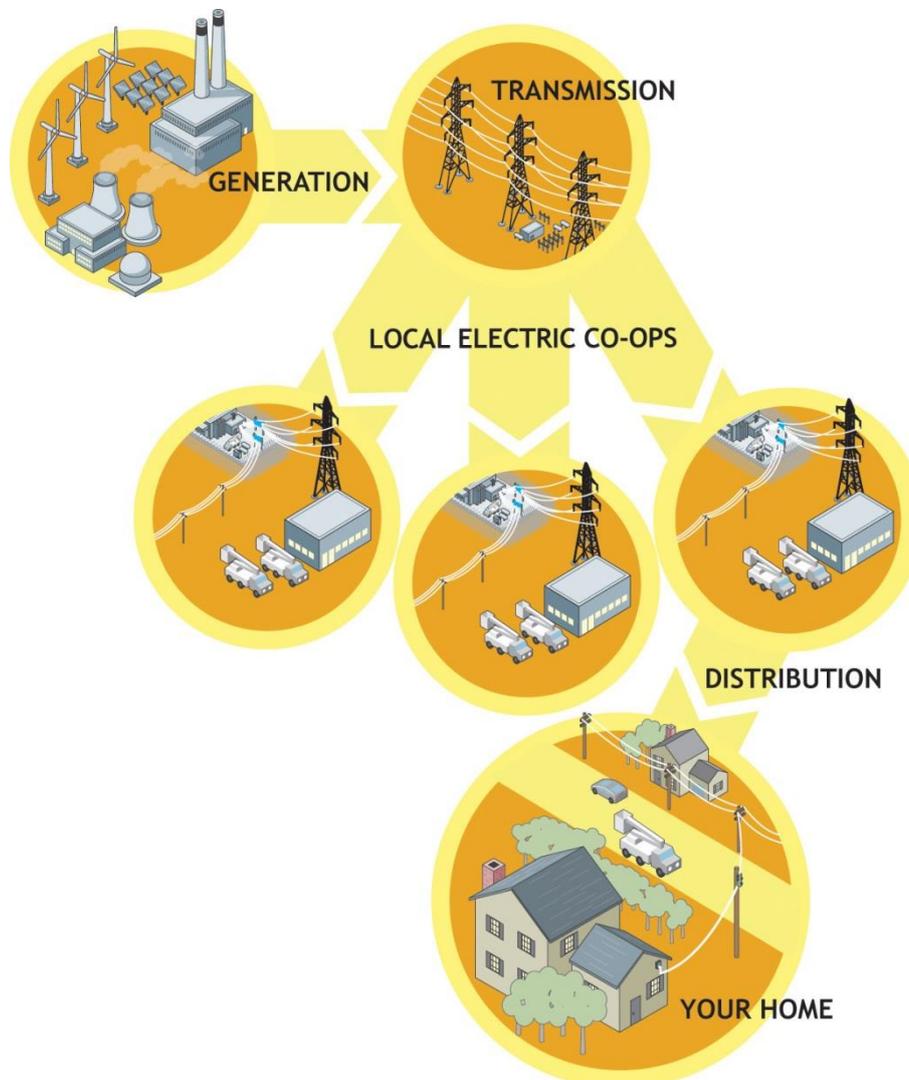


# L'énergie électrique

De sa production à sa mise en œuvre



Graphics by Funnel, Inc., and NRECA

## Table des matières

1.	PRÉAMBULE.....	4
1.1.	DÉFINITION.....	4
1.2.	LES FORMES D'ÉNERGIE.....	4
1.3.	UNITÉS D'ÉNERGIE.....	5
1.4.	TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE.....	5
1.5.	DE L'EXTRACTION À L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE.....	6
1.6.	RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE.....	8
1.7.	RELATION ÉNERGIE PUISSANCE.....	8
2.	L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.....	8
2.1.	PRÉSENTATION.....	8
2.2.	CHARGE ÉLECTRIQUE Q.....	8
2.3.	ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.....	8
2.4.	PUISSANCE ÉLECTRIQUE.....	9
2.4.1.	PUISSANCE ÉLECTRIQUE EN CONTINU.....	9
2.4.2.	PUISSANCE ÉLECTRIQUE EN ALTERNATIF MONOPHASÉ.....	9
2.5.	RENDEMENT.....	11
3.	LOIS ÉLÉMENTAIRES DES CIRCUITS ÉLECTRIQUES.....	11
3.1.	DÉFINITIONS DES GRANDEURS ÉLECTRIQUES.....	11
3.1.1.	COURANT ÉLECTRIQUE.....	11
3.1.2.	INTENSITÉ.....	11
3.1.3.	TENSION.....	12
3.1.4.	RÉSISTANCE.....	12
3.1.5.	CONVENTIONS GÉNÉRATEUR / RÉCEPTEUR.....	12
3.2.	LOI D'OHM.....	12
3.2.1.	ÉNONCÉ.....	12
3.3.	ASSOCIATION DE RÉSISTANCE.....	13
3.3.1.	EN SÉRIE.....	13
3.3.2.	EN PARALLÈLE.....	13
3.4.	LOI DES NŒUDS.....	13
3.5.	LOI DES MAILLES.....	13
3.6.	LOI DU DIVISEUR DE TENSION.....	14
3.7.	THÉORÈME DE SUPERPOSITION.....	14
4.	SCHÉMATISATION ÉLECTRIQUE.....	15
4.1.	CLASSIFICATION DES SCHÉMAS SELON LE MODE DE REPRÉSENTATION.....	15
4.1.1.	SELON LE NOMBRE DE NOMBRE DE CONDUCTEURS.....	15
4.2.	IDENTIFICATION DES ÉLÉMENTS.....	16
4.2.1.	PRINCIPE DE L'IDENTIFICATION.....	16



4.2.2.	IDENTIFICATION DU TYPE D'ÉLÉMENT .....	16
4.2.3.	IDENTIFICATION DE LA FONCTION DE L'ÉLÉMENT .....	17
4.2.4.	IDENTIFICATION DES BORNES D'APPAREILS .....	18
4.2.5.	REPÉRAGE DES CONDUCTEURS SUR LES SCHÉMAS .....	20
4.3.	SCHÉMATISATION.....	21
4.3.1.	C03-202 ÉLÉMENTS DE SYMBOLES, SYMBOLES DISTINCTIFS ET AUTRES SYMBOLES D'APPLICATION GÉNÉRALE	22
4.3.2.	C03-203 CONDUCTEURS ET DISPOSITIFS DE CONNEXION .....	22
4.3.3.	C03-204 COMPOSANTS PASSIFS .....	22
4.3.4.	C03-206 PRODUCTION, TRANSFORMATION ET CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE .....	22
4.3.5.	C03-207 APPAREILLAGE ET DISPOSITIFS DE COMMANDE ET DE PROTECTION .....	23
4.3.6.	C03-208 APPAREILS DE MESURE, LAMPES ET DISPOSITIFS DE SIGNALISATION.....	24
4.3.7.	DOCUMENT DE SYNTHÈSE ÉTABLI PAR PROMOTELEC.....	25
5.	LE MOTEUR À COURANT CONTINU .....	26
5.1.	IDENTIFICATION DE LA FONCTION TECHNIQUE RÉALISÉE.....	26
5.2.	FONCTIONNEMENT .....	26
5.2.1.	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	26
5.2.2.	CONSTITUTION D'UN MOTEUR À COURANT CONTINU .....	27
5.3.	DÉFINITIONS ET RELATIONS .....	28
5.3.1.	FRÉQUENCE DE ROTATION, VITESSE ANGULAIRE .....	28
5.3.2.	FORCE ÉLECTROMOTRICE (FEM) $E$ .....	28
5.3.3.	COUPLE ÉLECTROMAGNÉTIQUE $C_e$ .....	28
5.3.4.	SCHÉMA ÉQUIVALENT.....	28
5.4.	BILAN DES PUISSANCES/RENDEMENT.....	29
5.4.1.	PUISSANCE UTILE $P_U$ .....	29
5.4.2.	PUISSANCE ABSORBÉE PAR LE MOTEUR $P_A$ .....	29
5.4.3.	PERTES.....	29
5.4.4.	RENDEMENT.....	29
5.5.	COURBES CARACTÉRISTIQUES .....	29
5.6.	MODES DE FONCTIONNEMENT.....	30
5.7.	ASSOCIATION MOTEUR ET RÉDUCTEUR.....	30
5.7.1.	CHOIX D'UN MOTORÉDUCTEUR .....	30
5.8.	COMMANDE D'UN MOTEUR À COURANT CONTINU.....	30
5.8.1.	RAPPELS .....	31
5.8.2.	ALIMENTATION DES MOTEURS À COURANT CONTINU .....	31
6.	COURANT ALTERNATIF .....	34
6.1.	LE CHAMP TOURNANT .....	34
6.2.	GÉNÉRATION D'UNE SINUSOÏDE – REPRÉSENTATION DE FRESNEL .....	35
6.3.	INTENSITÉ ET DÉPHASAGE.....	35



6.4.	PUISSANCES.....	36
6.4.1.	PUISSANCE ACTIVE.....	36
6.4.2.	PUISSANCE RÉACTIVE.....	36
6.4.3.	PUISSANCE APPARENTE.....	36
6.4.4.	RELATION ENTRE LES PUISSANCES.....	37
6.4.5.	APPLICATION.....	37
6.4.6.	INCIDENCE DU FACTEUR DE PUISSANCE.....	37
6.4.7.	RELÈVEMENT DU FACTEUR DE PUISSANCE – COMPENSATION DE PUISSANCE RÉACTIVE.....	38
6.5.	CONVERSION DE COURANT.....	39
6.5.1.	CHANGEMENT DE TENSION ALTERNATIVE.....	39
6.5.2.	REDRESSEMENT DU COURANT ALTERNATIF.....	40
6.5.3.	ONDULATION DU COURANT CONTINU.....	40
6.6.	LES RÉSEAUX DE BASSE TENSION.....	41
6.6.1.	ARCHITECTURE DES RÉSEAUX.....	41
6.6.2.	COULEURS NORMALISÉES DES CONDUCTEURS.....	41
6.6.3.	LES TENSIONS.....	42
6.6.4.	INTENSITÉS ET PUISSANCES EN TRIPHASÉ ÉQUILIBRÉ.....	43
6.6.5.	INTENSITÉS ET PUISSANCES EN TRIPHASÉ DÉSÉQUILIBRÉ.....	44
6.6.6.	INTÉRÊT PRINCIPAL DU TRIPHASÉ.....	44
7.	LES MACHINES À COURANT ALTERNATIF.....	45
7.1.	LA MACHINE SYNCHRONE.....	45
7.1.1.	L'ALTERNATEUR TRIPHASÉ.....	45
7.1.2.	LE MOTEUR SYNCHRONE.....	49
7.2.	LE MOTEUR ASYNCHRONE.....	50
7.2.1.	VITESSE DE SYNCHRONISME ET MOTEUR ASYNCHRONE.....	50
7.2.2.	DEUX TYPES DE MOTEURS ASYNCHRONES.....	51
7.2.3.	LE MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASÉ.....	51
7.2.4.	LE MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ.....	52



## 1. PRÉAMBULE

### 1.1. DÉFINITION

L'énergie est, de manière générale, la capacité de faire un travail, c'est-à-dire d'agir. Ce terme recouvre plusieurs réalités qui se recoupent partiellement :

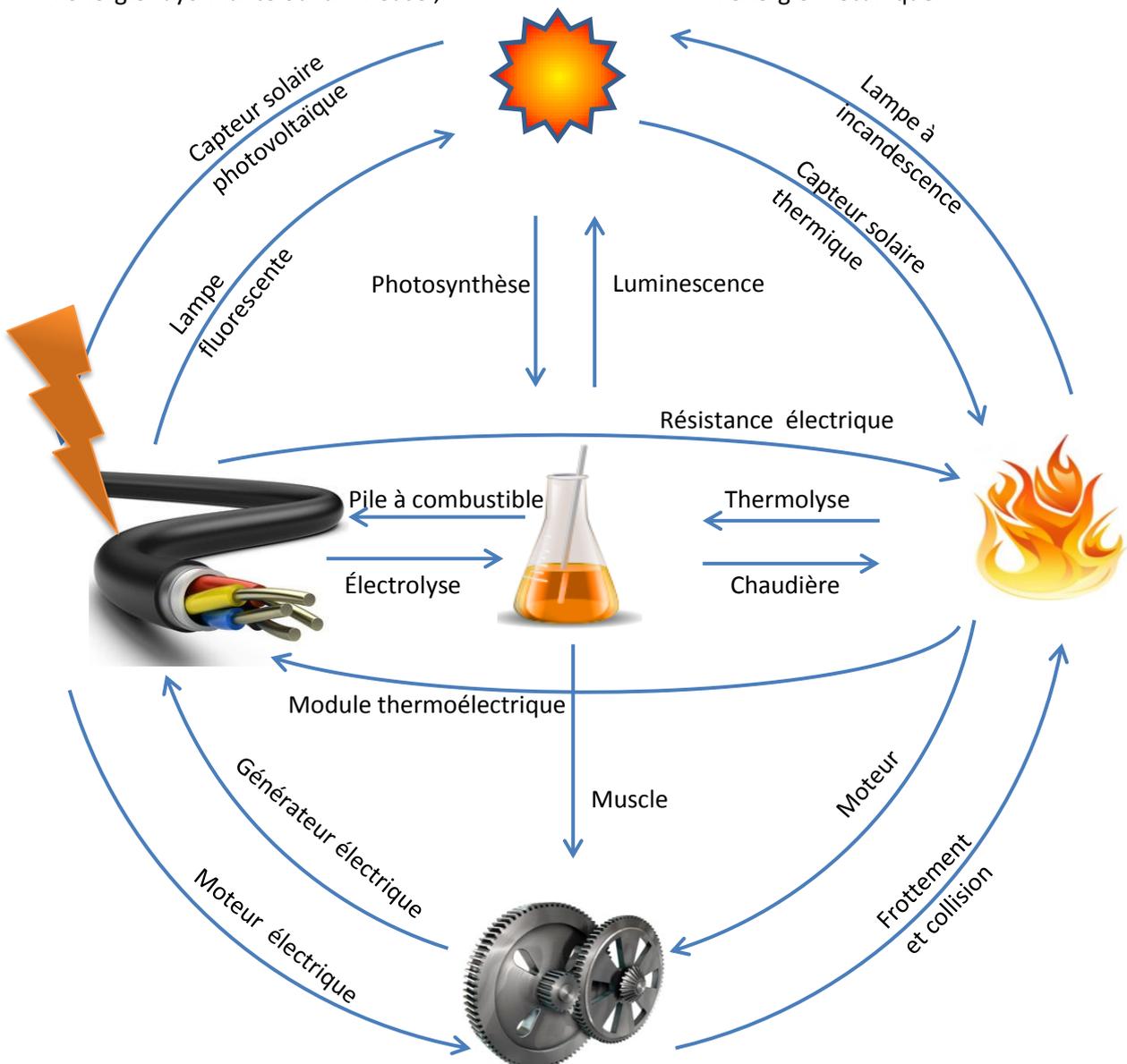
- l'énergie au sens de la science physique est une mesure de la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, un rayonnement électromagnétique ou de la chaleur ;
- au sens de l'écologie et de l'économie, on appelle énergie une ressource énergétique naturelle (énergie éolienne, énergie nucléaire, énergie solaire, gaz naturel, pétrole) ou son produit (électricité), lorsqu'ils sont consommés par les sociétés humaines pour divers usages industriels et domestiques (transport, chauffage...).

Le soleil, le bois, le charbon, le pétrole, le gaz, les matériaux nucléaires, les réserves d'eau, le vent ... sont des sources d'énergie primaires.

### 1.2. LES FORMES D'ÉNERGIE

L'énergie peut se présenter sous des formes très diverses :

- l'énergie thermique ou calorifique ;
- l'énergie chimique ;
- l'énergie rayonnante ou lumineuse ;
- l'énergie nucléaire ;
- l'énergie électrique ;
- l'énergie mécanique.



L'énergie mécanique se présente sous deux formes :

- cinétique, si les corps sont en mouvement (l'eau qui tombe d'un barrage) ;
- potentielle, si l'énergie est en réserve (l'eau stockée derrière un barrage).

### 1.3. UNITÉS D'ÉNERGIE

L'énergie se note W ou E. Elle s'exprime en joules (J). Dans certains cas, on utilise d'autres unités :

- l'électronvolt :  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- la calorie :  $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$
- la thermie :  $1 \text{ Th} = 1000000 \text{ cal}$
- la tonne équivalent pétrole :  $1 \text{ TEP} = 42 \text{ GJ}$
- le wattheure :  $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$

Quelques exemples :

$1,602 \times 10^7 \text{ J}$	Environ l'énergie cinétique d'un moustique volant [CERN LHC website].
1 J	Énergie requise pour soulever une petite pomme (102 g) d'un mètre, à la surface de la Terre. ( $1\text{J} = 1\text{N.m}$ )
90 J	Énergie cinétique d'une balle de tennis (masse 58 g) lors d'un service à 200 km/h.
1 000 J	Énergie nécessaire à un enfant (30 kg) pour monter un étage (un peu plus de trois mètres).
$4\,186 \text{ J} = 1 \text{ kcal}$	Énergie requise pour réchauffer un kilogramme d'eau d'un degré Celsius.
$8\,640 \text{ J} = 2,4 \text{ Wh}$	Énergie stockée dans une pile bâton LR06 AA rechargeable (1,2V 2000mAh).
600 000 J	Énergie d'une voiture de 1000 kg à la vitesse de 125 km/h.
$4,18 \times 10^7 \text{ J} = 11,6 \text{ kWh}$	Énergie pour réchauffer un cumulus de 200 litres (élever la température de 200 litres d'eau de 15 à 65 degrés Celsius).
$1,5 \times 10^9 \text{ J}$	Énergie moyenne d'un éclair.
$1,6 \times 10^9 \text{ J}$	Énergie d'un réservoir d'essence de 45 litres.
$1,8 \times 10^{10} \text{ J} = 5000 \text{ kWh}$	Objectif de consommation annuelle d'énergie pour un bâtiment de basse consommation, en France, de 100 m <sup>2</sup> (50 kWh/m <sup>2</sup> /an).
$4,26 \times 10^{20} \text{ J}$	Énergie consommée dans le monde en une année (2001).
$6,2 \times 10^{20} \text{ J}$	Énergie totale du Soleil qui atteint la Terre en une heure.

### 1.4. TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE

Dans toute transformation, l'énergie se conserve en quantité. L'énergie produite et l'énergie "disparue" sont égales.

Exemple : un moteur électrique absorbe de l'énergie électrique (Ee) et produit de l'énergie mécanique (Em) (rotation) et de l'énergie thermique (Eth) (frottements et échauffement des fils).



On peut écrire la relation :

$$Ee = Em + Eth$$

Dans cet exemple, seule l'énergie mécanique produite par le moteur est utile  $E_u$ . La chaleur qui apparaît est une perte  $E_p$ . L'énergie électrique consommée par le moteur est l'énergie absorbée  $E_a$ .

On peut écrire la relation de l'énergie utile  $E_u$  en fonction de  $E_a$  et  $E_p$  :

$$E_u = E_a - E_p$$

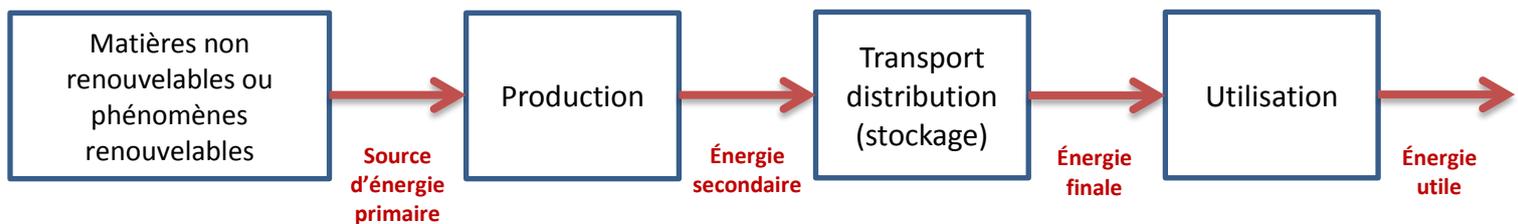
## 1.5. DE L'EXTRACTION À L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE

### 1.5.1. CHAÎNE D'UTILISATION DES ÉNERGIES

Une fois produite, l'énergie est acheminée par un vecteur énergétique jusqu'à son utilisation : électricité, fluide caloporteur (eau, air, vapeur).

L'énergie peut être transformée, stockée, transportée. L'agriculture, le résidentiel et le tertiaire, l'industrie sont de gros consommateurs d'énergie.

Toutes les productions d'énergie peuvent être représentées selon le modèle suivant :



### 1.5.2. DÉFINITIONS

L'énergie secondaire est l'énergie obtenue après transformation d'une source d'énergie primaire. L'électricité est une énergie secondaire. L'énergie finale est l'énergie livrée aux consommateurs après transport et distribution pour être convertie en énergie utile (carburants à la pompe, électricité...).

L'énergie utile est l'énergie dont dispose le consommateur après la conversion par ses équipements (lumière, chaleur, force motrice...).

Dans cette chaîne énergétique, les pertes sont présentes à tous niveaux. Un des enjeux essentiels est d'améliorer le rendement. Aussi, plusieurs actions sont possibles :

- améliorer le taux d'extraction des énergies primaires (aujourd'hui, les cadences de puisage imposées nécessitent une injection massive d'eau dans les gisements, le pétrole ainsi extrait est utilisable à 35% à cause du mélange avec l'eau) ;
- améliorer l'efficacité des procédés qui utilisent les énergies secondaires (un moteur électrique possède un rendement autour de 90% alors qu'un moteur thermique avoisine les 45%).

### 1.5.3. EXEMPLE DE CHAÎNE DE PRODUCTION, TRANSPORT ET DISTRIBUTION DU VECTEUR ÉNERGÉTIQUE ÉLECTRICITÉ

Plus du tiers de l'énergie primaire est convertie en énergie électrique. L'électricité est donc un vecteur énergétique essentiel qui facilite l'exploitation industrielle des sources d'énergie primaire. Elle permet le transport de grandes quantités d'énergie facilement utilisables pour des usages industriels ou domestiques : déplacer une charge, fournir de la lumière et de la chaleur, etc.



## L'énergie électrique : de sa production à sa mise en œuvre



### LA PRODUCTION

#### Activités en concurrence

La production d'électricité repose sur différentes sources d'énergie (nucléaire, thermique, énergies renouvelables telles l'hydraulique, l'éolien ou le solaire).

### LE TRANSPORT

#### RTE

Le transport de l'électricité à l'échelle nationale est principalement assuré en 400 000 volts. À l'échelle régionale, le transport est assuré en 225 000, 90 000 et 63 000 volts.

### LA DISTRIBUTION

#### ERDF

L'électricité est distribuée à tous les consommateurs via deux échelles de tension : la haute tension A<sup>(1)</sup> et la basse tension<sup>(2)</sup>. L'exploitation, le développement et l'entretien des réseaux électriques HTA et BT sont confiés à ERDF (95 % du territoire national) et à des Entreprises Locales de Distribution.

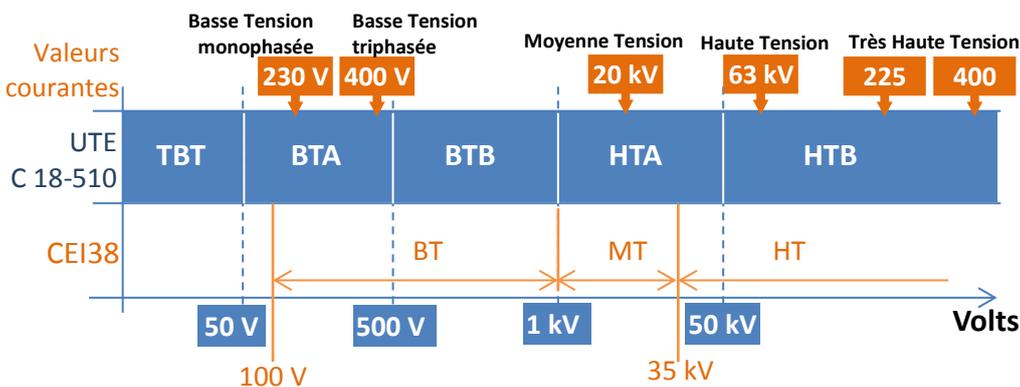
### LA FOURNITURE D'ÉLECTRICITÉ

#### Activités en concurrence

Ouverte totalement à la concurrence depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2007.

(1) HTA : haute tension A (20 000 V)  
(2) BT : basse tension (230 V/400 V)

### Classification des tensions :



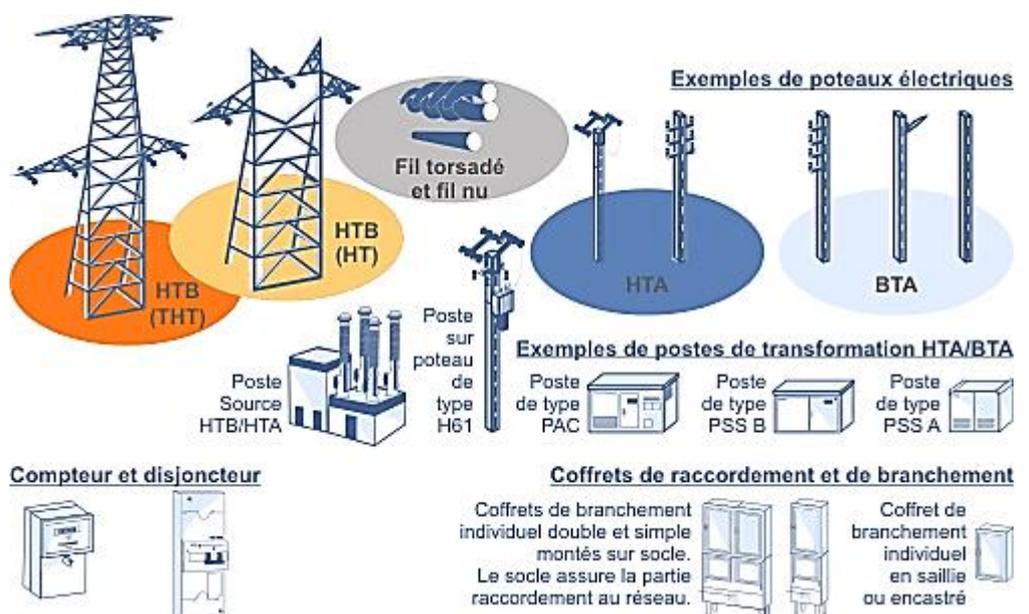
Internationale - 1983.

Les types de réseaux électriques selon les tensions usitées et les deux références suivantes :

- recueil de prescriptions UTE C 18-510 - Union Technique de l'Électricité - 1988,
- norme CEI 38 - Commission Électrotechnique

### Extrait du syndicat départemental d'énergies du TARN

[Si nous parlons de postes HTA/BTA, ou encore de réseau de répartition HTB en se référant au recueil UTE, nous entendons aussi parler de moyenne tension qui correspond en fait à la HTA. Cela provient de la norme CEI 38 comme le montre le schéma. Le terme Très Haute Tension est aussi utilisé pour désigner la HTB. Seules la basse tension (BT) et la très basse tension (TBT) sont épargnées par ces petites confusions. La BTB, quant à elle, concerne essentiellement l'éclairage des autoroutes. En haut du schéma, nous indiquons les valeurs les plus couramment rencontrées sur le réseau électrique. Nous avons distingué les Très Hautes Tensions de transport (225 et 400 kV) de la Haute Tension rencontrée principalement sur le réseau de répartition (63 kV).]



## 1.6. RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE

Le rendement  $\eta$  (êta) est le rapport entre l'énergie utile  $E_u$  et l'énergie absorbée  $E_a$  :

$$\eta = \frac{E_u}{E_a}$$

Le rendement est sans unité et toujours inférieur ou égal à 1.

## 1.7. RELATION ÉNERGIE PUISSANCE

La puissance se note  $P$  et s'exprime en watt (W). La puissance d'une machine est l'énergie qu'elle fournit en une seconde :

$$P = \frac{E}{t}$$

Avec :

$P$  : puissance électrique en W

$E$  : énergie électrique en J

$t$  : temps en s

On peut aussi exprimer l'énergie en fonction de la puissance et du temps :

$$E = P \cdot t$$

Si  $t$  est en heure,  $E$  s'exprime alors en wattheure (Wh).

## 2. L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE<sup>1</sup>

### 2.1. PRÉSENTATION

L'énergie électrique se manifeste lors du déplacement de charges électriques (électrons). Ce déplacement est appelé courant électrique. L'électricité est directement utilisable pour effectuer un travail : déplacer une charge électrique, fournir de la lumière, chauffer, etc...

### 2.2. CHARGE ÉLECTRIQUE Q

Un courant électrique d'un Ampère circulant pendant une seconde correspond au déplacement d'une charge électrique  $Q$  d'un Coulomb :

$$Q = I \cdot t$$

Avec :

- $Q$  : charge électrique (en C)
- $I$  : courant électrique (en A)
- $T$  : temps (en s)

On utilise plus souvent l'unité ampère-heure (Ah) pour mesurer la charge électrique des piles et des batteries : un ampèreheure vaut 3 600 coulombs.

### 2.3. ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Une charge électrique  $Q$  soumise à une différence de potentiel  $U$  dispose d'une énergie électrique telle que :

$$E = Q \cdot U$$

Avec :

- $E$  : énergie électrique (en J)
- $Q$  : charge électrique (en C)
- $U$  : différence de potentiel (en V)

<sup>1</sup> <http://mlkssi.free.fr/>



On utilise souvent l'unité wattheure (Wh) pour mesurer l'énergie électrique : un watt-heure vaut 3 600 joules.

## 2.4. PUISSANCE ÉLECTRIQUE

La puissance électrique que l'on note souvent  $P$  et qui a pour unité le watt (W) est le produit de la tension électrique aux bornes de laquelle est branchée l'appareil (en volts) et de l'intensité du courant électrique qui le traverse (en ampères).

La puissance électrique est fournie par le générateur et elle est consommée par le récepteur.

### 2.4.1. PUISSANCE ÉLECTRIQUE EN CONTINU

La puissance  $P$  est le produit de la tension  $U$  continue et du courant  $I$  continu :

$$P = U \cdot I$$

Avec :

- $P$  : puissance électrique (en W)
- $U$  : tension aux bornes du dipôle (en V)
- $I$  : intensité du courant traversant le dipôle (en A)

### 2.4.2. PUISSANCE ÉLECTRIQUE EN ALTERNATIF MONOPHASÉ

#### 2.4.2.1. RÉSEAU ÉLECTRIQUE DOMESTIQUE

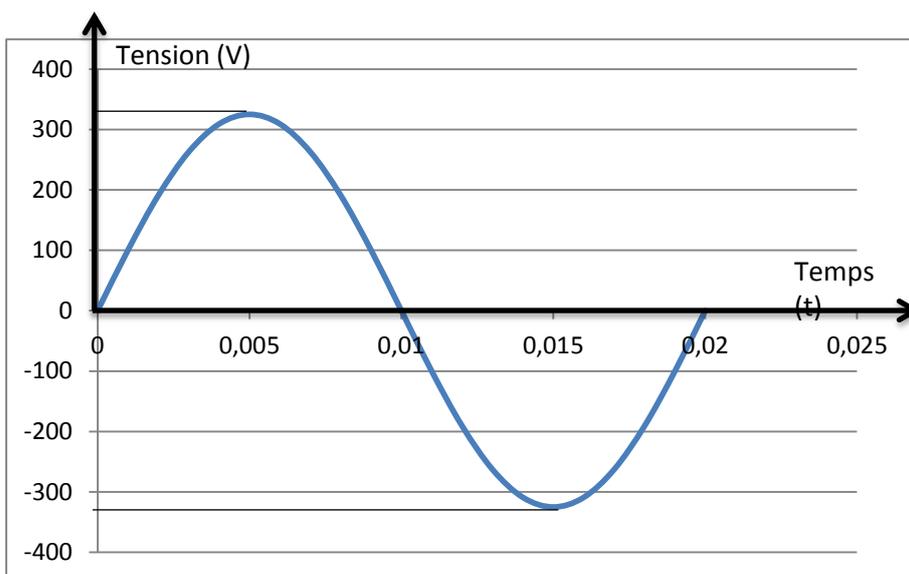
Le réseau domestique est relié au réseau électrique de la compagnie de distribution de l'électricité. L'alimentation électrique est réalisée en monophasé (entre phase et neutre). Généralement un troisième conducteur appelé terre est utilisé pour assurer la sécurité et évacuer un courant en cas de défaut électrique.



#### 2.4.2.2. CARACTÉRISTIQUES DE LA TENSION DU SECTEUR

La tension disponible aux bornes d'une prise de courant domestique (entre phase et neutre) se nomme la tension de secteur.  $U = 325 \sin(\omega \cdot t)$

La figure ci-dessous représente l'évolution dans le temps de cette tension :



Allure de la tension	Sinusoïdale
Période $T$	$T = 0,02 \text{ s}$
Valeur maximale $U_{\max}$	325 V
Valeur efficace $U_{\text{eff}}$	230 V
Fréquence $f$	50 Hz



La valeur efficace de la tension  $U_{eff}$  correspond à la valeur de la tension continue qui produirait un échauffement identique dans une résistance :

$$U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$$

Avec :

- $U_{eff}$  : tension efficace (en V)
- $U_{max}$  : tension maximale (en V)

La fréquence  $f$  représente le nombre de périodes par seconde :

$$f = \frac{1}{T}$$

Avec :

- $f$  : fréquence (en Hz)
- $T$  : période (en s)

#### 2.4.2.3. PUISSANCE APPARENTE $S$

Un dipôle alimenté sous une tension  $U_{eff}$  et traversé par un courant efficace  $I_{eff}$  absorbe une puissance apparente  $S$  exprimée en voltampère, telle que :

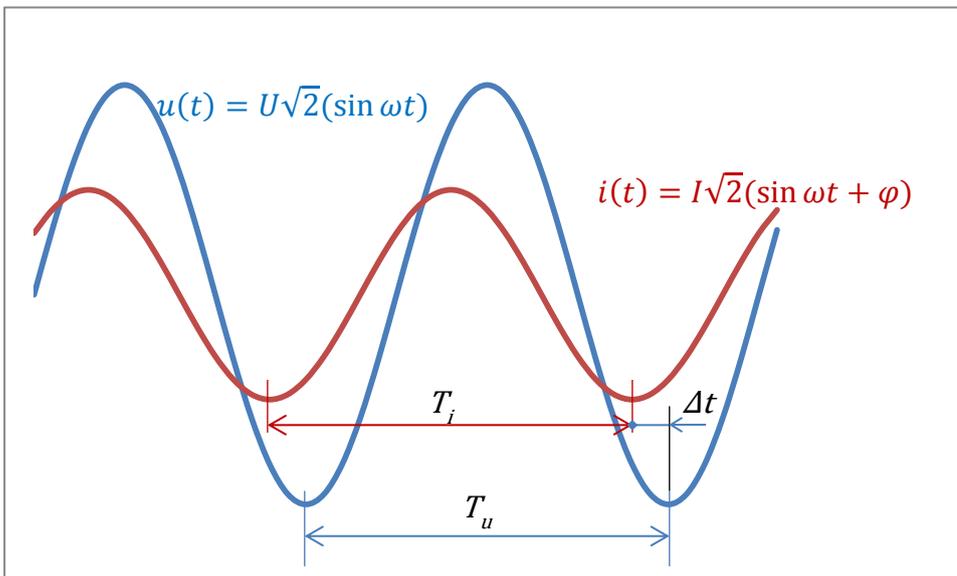
$$S = U_{eff} \cdot I_{eff}$$

Avec :

- $S$  : puissance apparente (en VA)
- $U_{eff}$  : tension efficace (en V)
- $I_{eff}$  : intensité efficace du courant (en A)

#### 2.4.2.4. DÉPHASAGE $\varphi$ ENTRE COURANT ET TENSION

Lorsque le dipôle alimenté est un moteur, il se crée un déphasage  $\varphi$  (phi) entre tension et courant :



Le déphasage  $\varphi$  entre tension et courant peut être exprimé comme un angle (en radian ou en degré) :

$$\varphi = 2\pi \cdot \frac{\Delta t}{T}$$

Avec :

- $\varphi$  : déphasage (en rad)
- $T$  : période (en s)
- $\Delta t$  : décalage temporel (en s)

#### 2.4.2.5. PUISSANCE ACTIVE $P$

C'est la puissance qui génère un effet utile dans le système électrique considéré :

$$P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi$$

Avec :

- $P$  : puissance active (en W)
- $U_{eff}$  : tension efficace (en V)
- $I_{eff}$  : intensité efficace du courant (en A)
- $\varphi$  : déphasage (en rad)



### 2.4.2.6. FACTEUR DE PUISSANCE $F_p$

C'est le rapport entre la puissance active consommée et la puissance apparente :

$$F_p = \frac{P}{S}$$

Avec :

- $F_p$  : facteur de puissance
- $P$  : puissance active (en W)
- $S$  : puissance apparente (en VA)

- Pour une résistance ou une lampe à incandescence  $F_p = 1$ .
- Pour un moteur électrique  $F_p = \cos \phi$

### 2.5. RENDEMENT

Le rendement  $\eta$  (êta) est le rapport entre l'énergie utile  $E_u$  et l'énergie absorbée  $E_a$ . Or :

- $E_u = P_u \times t$ , avec  $P_u$  = puissance utile ;
- $E_a = P_a \times t$ , avec  $P_a$  = puissance absorbée.

On peut donc exprimer  $\eta$  en fonction de  $P_u$  et de  $P_a$  :

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

## 3. LOIS ÉLÉMENTAIRES DES CIRCUITS ÉLECTRIQUES

### 3.1. DÉFINITIONS DES GRANDEURS ÉLECTRIQUES

#### 3.1.1. COURANT ÉLECTRIQUE

Un courant est un flux d'électrons. Pour que ces électrons puissent se déplacer, il faut que les électrons soient libres. On trouve des électrons libres dans les métaux : ce sont des conducteurs.

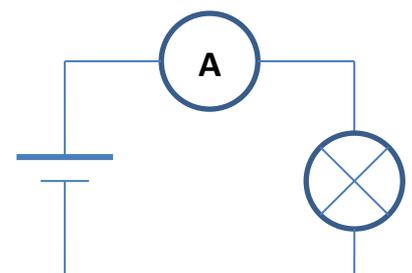
- Pour mettre en mouvement des électrons libres il faut :
- un circuit conducteur fermé;
- une pompe à électrons appelée générateur.

#### 3.1.2. INTENSITÉ

L'intensité du courant électrique est la quantité d'électricité traversant une section droite du conducteur en une seconde. L'intensité d'un courant s'exprime en ampères (symbole A).

Mesure de l'intensité :

Pour mesurer une intensité on utilise un ampèremètre. Ce dernier doit se placer en série sur le circuit :



### 3.1.3. TENSION

La tension ou différence de potentiel correspond à la mesure de la force qui permet aux électrons de se mouvoir dans un circuit. On l'appelle également force électromotrice, puisqu'elle permet un déplacement. La tension s'exprime en volts (symbole V).

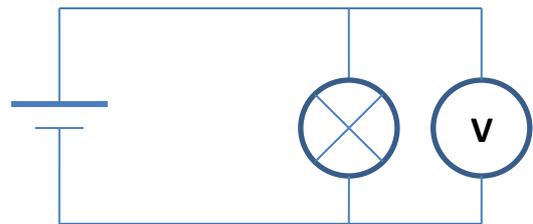
La différence de potentiel est représentée sur les schémas électriques par une flèche allant d'un point B vers un point A lorsqu'on veut représenter le potentiel du point A par rapport à celui du point B :

$$U_{(A,B)} = V_{(A)} - V_{(B)}$$

Le potentiel est mesuré par rapport à un potentiel de référence qui sert de zéro. Ce point est appelé masse du montage.

#### Mesure de la tension :

Pour mesurer une tension on utilise un voltmètre. Ce dernier doit se placer en parallèle sur le circuit :



### 3.1.4. RÉSISTANCE

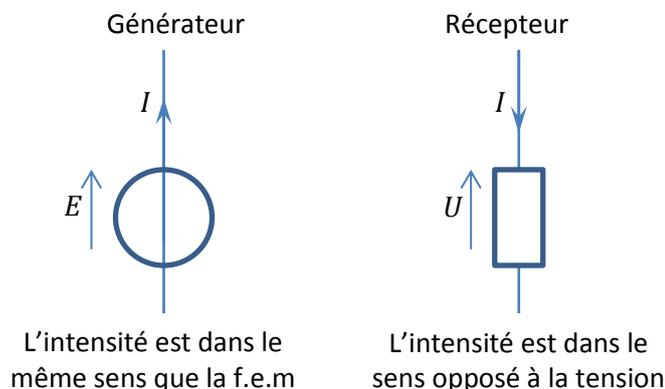
La résistance, (R) correspond, comme son nom l'indique, à l'opposition que rencontre le courant électrique lors de son déplacement dans un milieu conducteur. La résistance s'exprime en ohms (symbole  $\Omega$ ).

L'analogie avec un cours d'eau permet de comprendre plus facilement ces notions. Dans une rivière, le courant dépend de la différence d'altitude entre deux points du lit de la rivière.

On peut assimiler un circuit électrique à une rivière qui coule :

- Le courant électrique correspond au débit du cours d'eau ;
- La différence de potentiel correspond à la dénivellation.
- La résistance représente tout ce qui ralentit la progression de l'eau

### 3.1.5. CONVENTIONS GÉNÉRATEUR / RÉCEPTEUR



## 3.2. LOI D'OHM

### 3.2.1. ÉNONCÉ

La différence de potentiel ou tension U (en V) aux bornes d'une résistance R (en  $\Omega$ ) est proportionnelle à l'intensité du courant électrique I (en A) qui la traverse.



$$U = R \cdot I$$

### 3.3. ASSOCIATION DE RÉSISTANCE

#### 3.3.1. EN SÉRIE

La résistance équivalente ( $R_{eq}$ ) est égale à la somme des résistances.

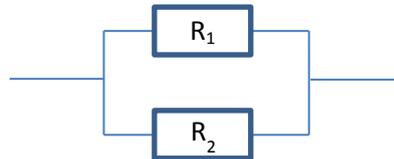
$$R_{eq} = R_1 + R_2$$



#### 3.3.2. EN PARALLÈLE

L'inverse de la résistance équivalente ( $R_{eq}$ ) est égale à la somme des inverses des résistances.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

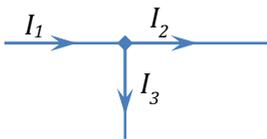


### 3.4. LOI DES NŒUDS

La somme des courants entrant dans un nœud est égale à la somme des courants qui en sortent :

$$I_1 = I_2 + I_3$$

Exemple d'utilisation :



Somme des courants entrants :  $I_1 - I_2 - I_3 = 0$

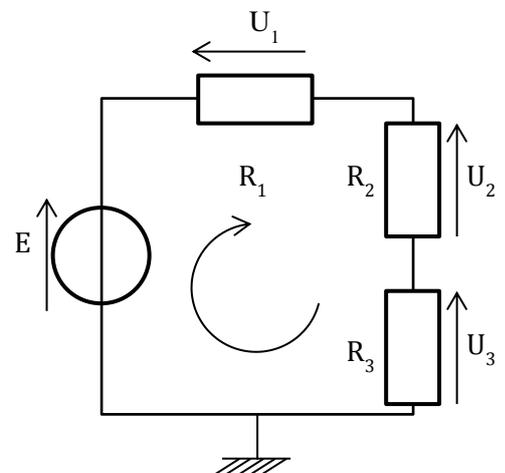
Somme des courants sortants :  $-I_1 + I_2 + I_3 = 0$

### 3.5. LOI DES MAILLES

La somme des tensions le long d'une maille est égale à zéro.

Exemple d'utilisation :

Une maille est une portion de circuit fermée. Un sens de parcours de la maille est choisi (arbitrairement). Les tensions fléchées dans le sens de parcours sont comptées positivement et celles en opposition sont comptées négativement.

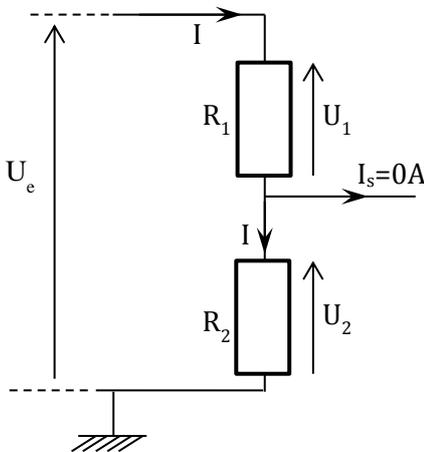


$$E = U_1 + U_2 + U_3$$



### 3.6. LOI DU DIVISEUR DE TENSION

Dans une maille comportant plusieurs résistances placées en série, le diviseur de tension permet de calculer directement la tension aux bornes d'une résistance.



Le diviseur de tension est obtenu en appliquant la loi d'ohm.

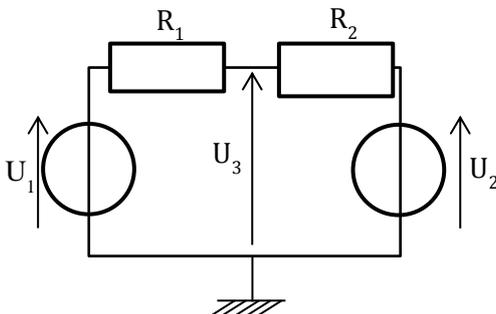
- Expression de  $U_2$  en fonction de  $I$  et de  $R_2$  :  $U_2 = R_2 \cdot I$
- Expression de  $I$  en fonction de  $U_e$ ,  $R_1$  et  $R_2$  :  $I = \frac{U_e}{R_1 + R_2}$

Il en résulte : 
$$U_2 = R_2 \cdot \frac{U_e}{R_1 + R_2}$$

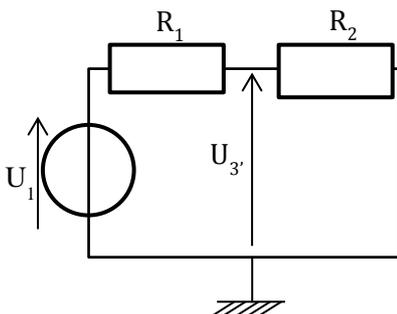
### 3.7. THÉORÈME DE SUPERPOSITION

Le théorème de superposition est utilisé pour déterminer une tension dans une maille comportant plusieurs générateurs de tension.

Exemple :

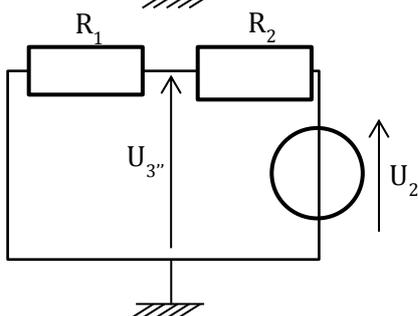


Les tensions issues des générateurs  $U_1$  et  $U_2$  et les résistances étant connues, on cherche à calculer la tension  $U_3$ . Cette tension peut être déterminée en deux étapes :



On éteint le générateur  $U_2$  et on exprime  $U_3$  en fonction de  $U_1$ ,  $R_1$  et  $R_2$  :

$$U_{3'} = R_2 \cdot \frac{U_1}{R_1 + R_2}$$



On éteint le générateur  $U_1$  et on exprime  $U_3$  en fonction de  $U_2$ ,  $R_1$  et  $R_2$  :

$$U_{3''} = R_1 \cdot \frac{U_2}{R_1 + R_2}$$

La tension  $U_3$  est égale à la somme des tensions partielles  $U_{3'}$  et  $U_{3''}$  :



$$U_3 = \frac{1}{R_1 + R_2} (R_1 \cdot U_2 + R_2 \cdot U_1)$$

## 4. SCHÉMATISATION ÉLECTRIQUE<sup>2</sup>

Un schéma électrique représente, à l'aide de symboles graphiques, les différentes parties d'un réseau, d'une installation, d'un équipement, qui sont reliées et connectées fonctionnellement.

Un schéma électrique a pour but :

- d'expliquer le fonctionnement de l'équipement (il peut être accompagné de tableaux et de diagramme) ;
- de fournir les bases d'établissement des schémas de réalisation ;
- de faciliter les essais et la maintenance.

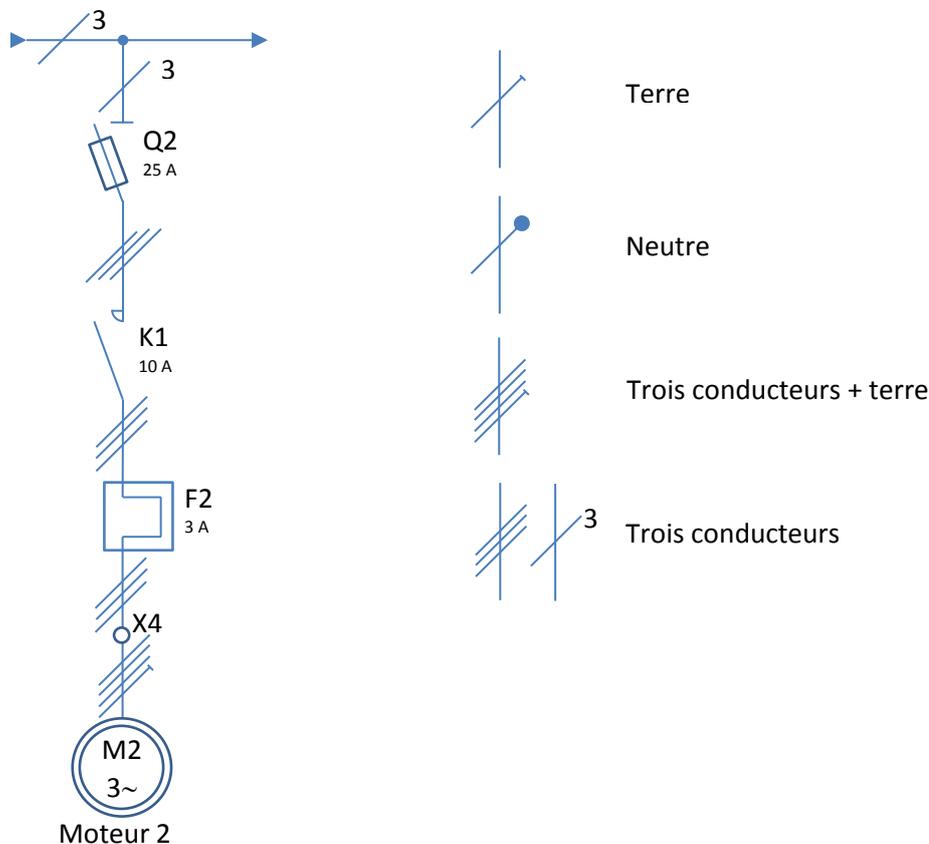
### 4.1. CLASSIFICATION DES SCHÉMAS SELON LE MODE DE REPRÉSENTATION

#### 4.1.1. SELON LE NOMBRE DE NOMBRE DE CONDUCTEURS

##### 4.1.1.1. REPRÉSENTATION UNIFILAIRE

Deux ou plus de deux conducteurs sont représentés par un trait unique. On indique sur ce trait le nombre de conducteurs en parallèle.

Cette représentation est surtout utilisée en triphasé.

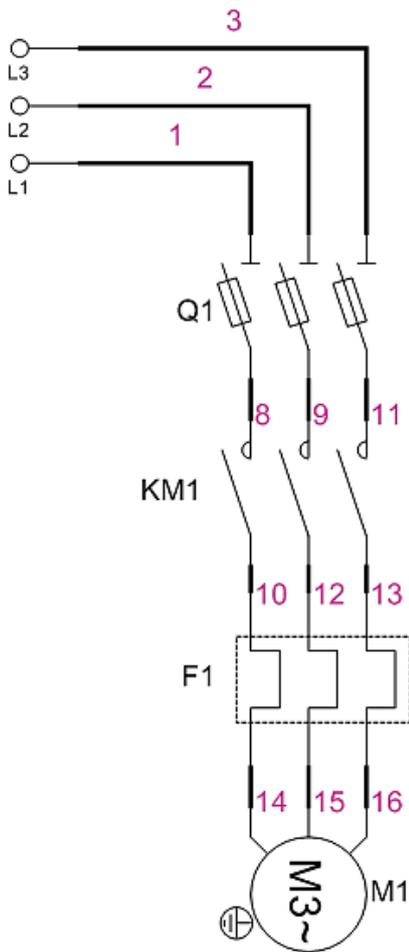


<sup>2</sup> <http://www.positron-libre.com/>



### 4.1.1.2. REPRÉSENTATION MULTIFILAIRE

Chaque conducteur est représenté par un trait.



Exemple d'un démarrage direct d'un moteur triphasé  
(point de vue puissance)

## 4.2. IDENTIFICATION DES ÉLÉMENTS

On désigne par élément un tout indissociable, par exemple un contacteur, un sectionneur ou un bouton-poussoir.

### 4.2.1. PRINCIPE DE L'IDENTIFICATION

A

B

C

--	--	--

Type de l'élément

Fonction

Numéro de l'él<sup>t</sup> concerné

### 4.2.2. IDENTIFICATION DU TYPE D'ÉLÉMENT

Les éléments sont identifiés à l'aide de lettre repère (sur la partie A).

**Exemple :**

- une bobine de contacteur **K**,
- un bouton poussoir **S**.



<i>Repère</i>	<i>Sorte d'élément</i>	<i>Exemple</i>
A	Ensemble ou sous-ensemble fonctionnel	Amplificateur
B	Transducteur d'une grandeur non Électrique en une grandeur électrique ou vice-versa	Couple thermo-électrique, cellule photo-électrique...
C	Condensateurs	
D	Opérateur binaire, dispositifs de temporisation ou de mise en mémoire	Opérateur combinatoire, ligne à retard, bascule bistable, monostable, mémoire magnétique...
E	Matériel divers	Éclairage, chauffage, éléments non spécifiés dans ce tableau
F	Dispositifs de protection	Coupe-circuit, limiteur de surtension, parafoudre...
G	Générateurs (dispositifs d'alimentation)	Génératrice, alternateur, batterie
H	Dispositifs de signalisation	Avertisseur lumineux ou sonores
K	Relais et contacteurs	
L	Inductances	Bobine d'induction, bobine de blocage
M	Moteurs	
P	Instrument de mesure, dispositifs d'essai	Appareil indicateur, appareil enregistreur
Q	Appareils mécaniques de connexion pour circuit de puissance	Disjoncteur, sectionneur
R	Résistances	Potentiomètre, rhéostat, shunt, persistance
S	Appareils mécaniques de connexion pour circuit de commande	Boutons poussoirs, interrupteur fin de course, sélecteur...
T	Transformateur	
U	Modulateur, convertisseur	Convertisseur de fréquence, convertisseur redresseur, onduleur autonome
X	Bornes, fiches, socles	
Y	Appareils mécaniques actionnés électriquement	Frein, embrayage, électrovalve pneumatique

#### 4.2.3. IDENTIFICATION DE LA FONCTION DE L'ÉLÉMENT

Le repère choisi doit commencer par une lettre (partie B) qui peut être suivie des lettres et/ou chiffres complémentaires nécessaires (partie C). Le code utilisé doit être explicite.

**Exemple :** la protection par relais thermique F1 pourra être identifiée fonctionnellement par Rth1. (KA1 pour un contacteur auxiliaire ; KM2...)



Repère fonctionnel	Légende	Repère fonctionnel	Légende
AL	Alarme	FE	Fermeture
Auto	Automatique (mode)	FR	Freinage
AR	Arrière	GA	Gauche
AT	Arrêt	GV	Grande vitesse
AV	Avant	HA	Haut
BA	Bas	HS	Hors service
CA	Courant alternatif	I	Courant
CC	Courant continu	L	Ligne d'alimentation
D	Triangle (couplage)	MA	Marche
Dcy	Départ cycle	Manu	Manuel (mode)
DE	Descente	MI	Minimum
DM	Démarrage	MO	Montée
DR	Droite	MX	Maximum
EA	Eau	NO	Normal
ES	En service	OU	Ouverture
EX	Excitation	P	Puissance
FC	Fin de course	PV	Petite vitesse
+	Augmentation	SY	Synchronisation
-	Diminution	U	Tension
INC	Incrémentation	Y	Etoile (couplage)
DEC	Décrémentation	W	Vitesse angulaire

#### 4.2.4. IDENTIFICATION DES BORNES D'APPAREILS

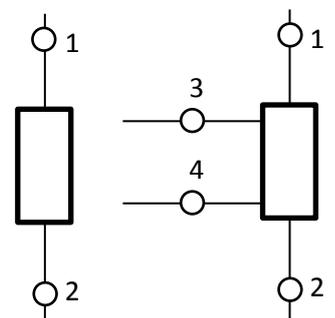
Il est fondé sur une notation alphanumérique employant des lettres majuscules et des chiffres arabes. Les lettres I et O ne doivent pas être utilisées.

##### 4.2.4.1. PRINCIPE DE MARQUAGE POUR LES BORNES

###### POUR UN ÉLÉMENT SIMPLE

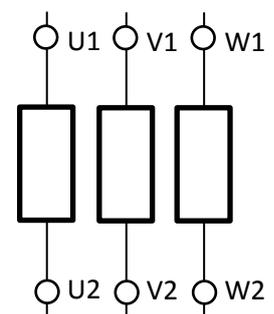
Les deux extrémités d'un élément simple sont distinguées par des nombres de référence successifs, par exemple 1 et 2.

S'il existe des points intermédiaires à cet élément, on les distingue par des nombres supérieurs en ordre normalement croissant à ceux des extrémités.



###### POUR UN GROUPE D'ÉLÉMENT

Pour un groupe d'éléments semblables, les extrémités des éléments seront désignés par des lettres de référence qui précéderont les nombres de référence indiqués au paragraphe précédent.



**Exemple :** U, V, W pour les phases d'un système alternatif triphasé.



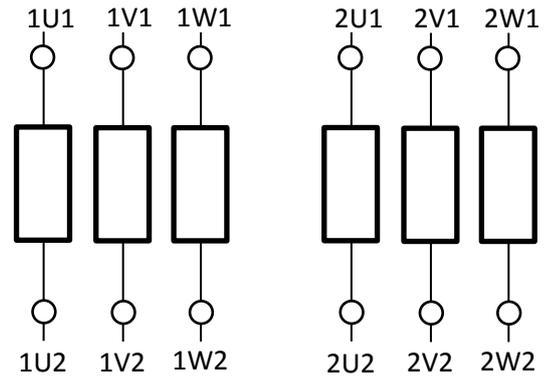
POUR PLUSIEURS GROUPES SEMBLABLES

Pour plusieurs groupes semblables d'éléments ayant les mêmes lettres de référence, on les distingue par un préfixe numérique devant les lettres de référence.

LETTRES DE RÉFÉRENCE

Les lettres de référence seront choisies :

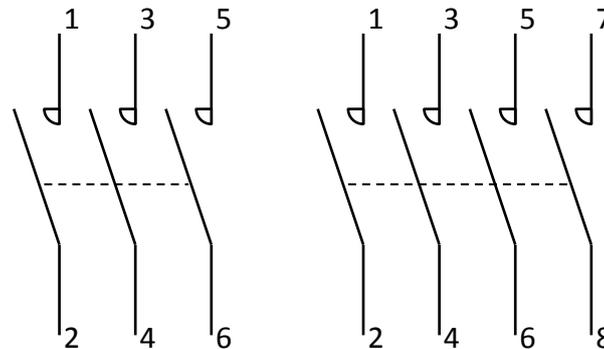
- En courant continu dans la première partie de l'alphabet,
- En courant alternatif dans la seconde partie de l'alphabet.



**4.2.4.2. PRINCIPE DE MARQUAGE DES CONTACTS**

CONTACTS PRINCIPAUX

Les bornes sont repérées par un seul chiffre de 1 à 6 (tripolaire), de 1 à 8 (tétrapolaire).

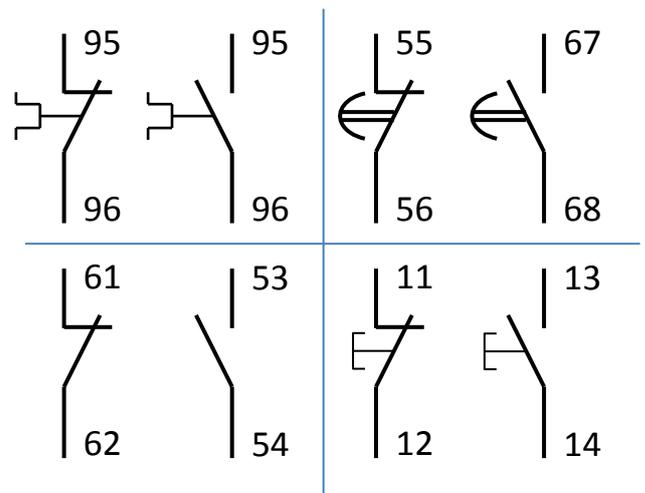


CONTACTS AUXILIAIRES

Ils sont repérés par un nombre de deux chiffres. Le chiffre des unités indique la fonction du contact :

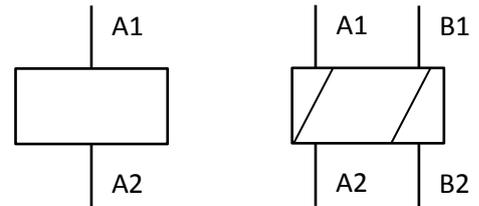
- 1-2 : contact à ouverture,
- 3-4 : contact à fermeture,
- 5-6 ; 7-8 : contact à fonctionnement spécial.

Le chiffre des dizaines indique le numéro d'ordre de chaque contact auxiliaire de l'appareil.



**ORGANE DE COMMANDE**

On utilise A1 et A2. Pour deux enroulements (ex: relais bistable) on utilisera A1-A2 et B1-B2.



**MARQUAGES PARTICULIERS**

Ils concernent les bornes raccordées à des conducteurs bien définis :

Bornes d'appareil pour	Marquage	
	Notation alphanumérique	Symbole graphique
Phase 1	U	
Phase 2	V	
Phase 3	W	
Neutre	N	
Système de protection	PE	
Terre	E	
Terre sans bruit	TE	
Masse (platine, châssis)	MM	

**4.2.5. REPÉRAGE DES CONDUCTEURS SUR LES SCHÉMAS**

Le repérage individuel des conducteurs est généralement nécessaire pour un schéma des connexions, pour un schéma explicatif détaillé et pour un schéma général des connexions.

Le repérage peut être fixé lors de l'étude du schéma ou dans les cas simples, choisi lors de la pose des conducteurs ; on doit alors reporter les repères sur le schéma ou sur un document annexe.

**REPÉRAGE DÉPENDANT**

Le repère du conducteur reproduit les marques des bornes ou des équipements auxquelles les deux extrémités de ce conducteur doivent être raccordées.

**REPÉRAGE INDÉPENDANT**

Il utilise le même repère généralement simple tout le long du conducteur. Généralement un schéma ou un tableau de connexions doit être employé.



REPÉRAGES PARTICULIERS

Désignation des conducteurs	Marquage		
	Notation alphanumérique	Symbole graphique	
Système d'alimentation alternatif	Phase 1	L1	
	Phase 2	L2	
	Phase 3	L3	
	Neutre	N	
Système continu	Positif	L+	+
	Négatif	L-	-
	Médian	M	
Conducteur de protection	PE		
Conducteur de protection non mis à la terre	PU		
Conducteur de protection et conducteur neutre confondus	PEN		
Terre	E		
Terre sans bruit	TE		

4.3. SCHÉMATISATION<sup>3</sup>

Issue de l'UTE (union technique de l'électricité) et de la norme NF C 03-201 à 03-211

- NF C 03-201 : Généralités, index général. Tables de correspondance
- NF C 03-202 : Éléments de symboles, symboles distinctifs et autres symboles d'application générale
- NF C 03-203 : Conducteurs et dispositifs de liaison
- NF C 03-204 : Composants passifs de base
- NF C 03-205 : Semi-conducteurs et tubes électroniques
- NF C 03-206 : Production, transformation et conversion de l'énergie électrique
- NF C 03-207 : Appareillage et dispositifs de commande et de protection
- NF C 03-208 : Appareils de mesure, lampes et dispositifs de signalisation
- NF C 03-209 : Télécommunications: Commutation, équipements périphériques
- NF C 03-210 : Télécommunications: Transmission
- NF C 03-211 : Schémas et plans d'installation, architecturaux et topographiques

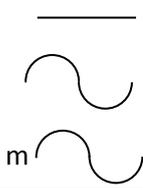
Dans la suite de ce cours seul les éléments principaux seront renseignés. Pour avoir la liste exhaustive, un document de référence sera fourni.

<sup>3</sup> <http://www.syscope.net/elec/elec.htm>

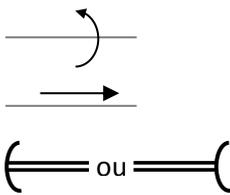
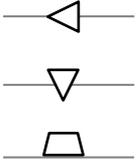


### 4.3.1. C03-202 ÉLÉMENTS DE SYMBOLES, SYMBOLES DISTINCTIFS ET AUTRES SYMBOLES D'APPLICATION GÉNÉRALE

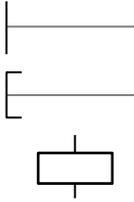
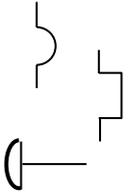
#### NATURE DU COURANT ET DE LA TENSION

Courant continu		Fréquence basse	
Courant alternatif monophasé		Fréquence moyenne	
Courant alternatif polyphasé (m phases)		Fréquence haute	

#### COMMANDES MÉCANIQUES

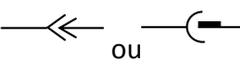
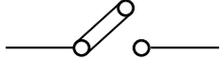
Indication du sens de rotation		Retour automatique (sens triangle=sens retour)	
Indication du sens de l'effort ou de translation		Verrouillage mécanique entre deux appareils	
Mouvement retardé		Frein	

#### DISPOSITIFS ET MÉTHODES DE COMMANDE

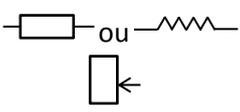
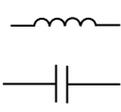
Commande mécanique manuelle, symbole général		Com <sup>de</sup> par protection électromagnétique de surintensité	
Commande par poussoir		Commande par élément thermosensible	
Commande électromagnétique		Bouton poussoir de sécurité (coup de poing)	

### 4.3.2. C03-203 CONDUCTEURS ET DISPOSITIFS DE CONNEXION

#### DISPOSITIFS DE CONNEXION

Fiche et prise branchées		Barrette de connexion ouverte	
--------------------------	---	-------------------------------	---

### 4.3.3. C03-204 COMPOSANTS PASSIFS

Résistance		Bobine	
Potentiomètre		Condensateur	

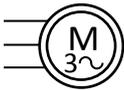
### 4.3.4. C03-206 PRODUCTION, TRANSFORMATION ET CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

#### MACHINES À COURANT CONTINU

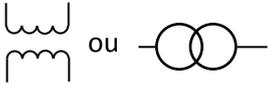
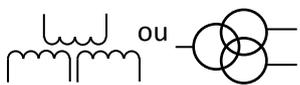
Génératrice à courant continu		Moteur à courant continu	
-------------------------------	---	--------------------------	---



MACHINES ASYNCHRONES À INDUCTION

Moteur triphasé, rotor en court-circuit (cage d'écureuil)		Moteur triphasé, rotor bobiné	
---	---	-------------------------------	---

TRANSFORMATEURS

Transformateur à deux enroulements		Transformateurs à trois enroulements	
------------------------------------	---	--------------------------------------	---

CONVERTISSEUR DE PUISSANCE

Convertisseur continu-continu		Onduleur	
Redresseur		Redresseur/onduleur	

PILES ET ACCUMULATEURS

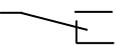
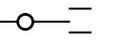
Pile ou accumulateur, F.E.M simple		Pile ou accumulateur, F.E.M double	
------------------------------------	--	------------------------------------	--

4.3.5. C03-207 APPAREILLAGE ET DISPOSITIFS DE COMMANDE ET DE PROTECTION

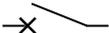
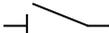
CONTACTS : SYMBOLES DISTINCTIFS

Fonction contacteur		Fonction sectionneur	
Fonction disjoncteur		Fonction interrupteur-sectionneur	

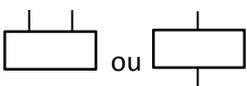
CONTACT À DEUX OU TROIS POSITIONS

Contact à fermeture (contact travail)		Contact à deux directions	
Contact à ouverture (contact de repos)		Contact à deux directions avec position médiane	

APPAREILS MÉCANIQUES DE CONNEXION

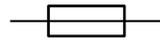
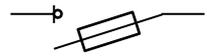
Disjoncteur		Sectionneur	
-------------	---	-------------	---

RELAIS : ORGANES DE COMMANDE

Symbole général		Relais thermique	
-----------------	---	------------------	---



FUSIBLES ET INTERRUPTEURS À FUSIBLES

Fusible, symbole général		Fusible sectionneur	
Fusible interrupteur		Fusible interrupteur-sectionneur	

**4.3.6. C03-208 APPAREILS DE MESURE, LAMPES ET DISPOSITIFS DE SIGNALISATION**

INDICATEURS, ENREGISTREURS ET COMPTEURS

Appareil indicateur		Appareil intégrateur (ex : compteur d'énergie électrique)	
Appareil enregistreur			

APPAREILS INDICATEURS ET ENREGISTREURS

Le symbole de l'appareil est complété en son centre par l'une des mentions suivantes :

Ampèremètre	A	Tachymètre	n
Fréquencemètre	f	Voltmètre	V
Ohmmètre	$\Omega$	wattmètre	W

Les différents types de branchements pour réaliser un démarrage moteur seront abordés en travaux pratiques.



4.3.7. DOCUMENT DE SYNTHÈSE ÉTABLI PAR PROMOTELEC

APPAREILS DE PRODUCTION ET TRANSFORMATION	APPAREILS DE MESURE	CANALISATIONS	APPAREILS D'UTILISATION
 Générateur  Batterie de piles ou accus  Transformateur  Transformateur triphasé triangle/étoile  Transformateur de courant  Transformateur tore  Autotransformateur	<p><b>Indicateurs</b></p>  Voltmètre  Ampèremètre  Wattmètre  Varmètre  Fréquencemètre	 Conducteur de phase  Neutre  De protection (terre)  5 conducteurs (3 P + N + T)  Connexion borne  Connexion barrette  Croisement de 2 conducteurs avec connexion  Sans connexion  Dérivation  Boîte de jonction non enterrée	 Lampe d'éclairage (symbole général)  Tube à fluorescence  Moteur  Sonnerie  Résistance  Condensateur  Impédance  Eclairage de sécurité sur circuit spécial  Bloc autonome d'éclairage de sécurité
	<p><b>Enregistreurs</b></p>  Compteur d'énergie active (wattheuremètre)  Compteur d'énergie active (varheuremètre)		

APPAREILLAGE D'INSTALLATION

Fonctions de l'appareillage	Appareillage à fonction simple	Appareillage à fonctions multiples	Appareillage de protection contre les surtensions
 Fonction disjoncteur  Fonction sectionneur  Fonction interrupteur-sectionneur  Fonction déclenchement automatique  Contact à fermeture (contact de travail)  Contact à ouverture (contact de repos)  Bobines de commande  Élément de protection thermique  Élément de protection magnétique	 Sectionneur  Interrupteur (commande)  Fusible (protection contre les surintensités)  Contacteur (commande)  Rupteur (commande)  Bouton-poussoir à fermeture et retour automatique  Tirette à ouverture et retour automatique	 Fusible interrupteur  Discontacteur  Fusible sectionneur  Interrupteur-sectionneur  Fusible interrupteur-sectionneur  Disjoncteur  Fusible à percuteur  Disjoncteur triphasé à relais magnétothermiques  Disjoncteur différentiel  Contacteur triphasé avec contact auxiliaire à deux directions	 Eclateur  Eclateur double intervalle  Limiteur de surtension  Parafoudre
			<p><b>Appareillage de connexion</b></p>  Fiche de prise de courant  Socle de prise de courant  Fiche et prise associées
			<p><b>Autres formes</b></p>  Fiche mâle  Prise femelle  Fiche et prise associées



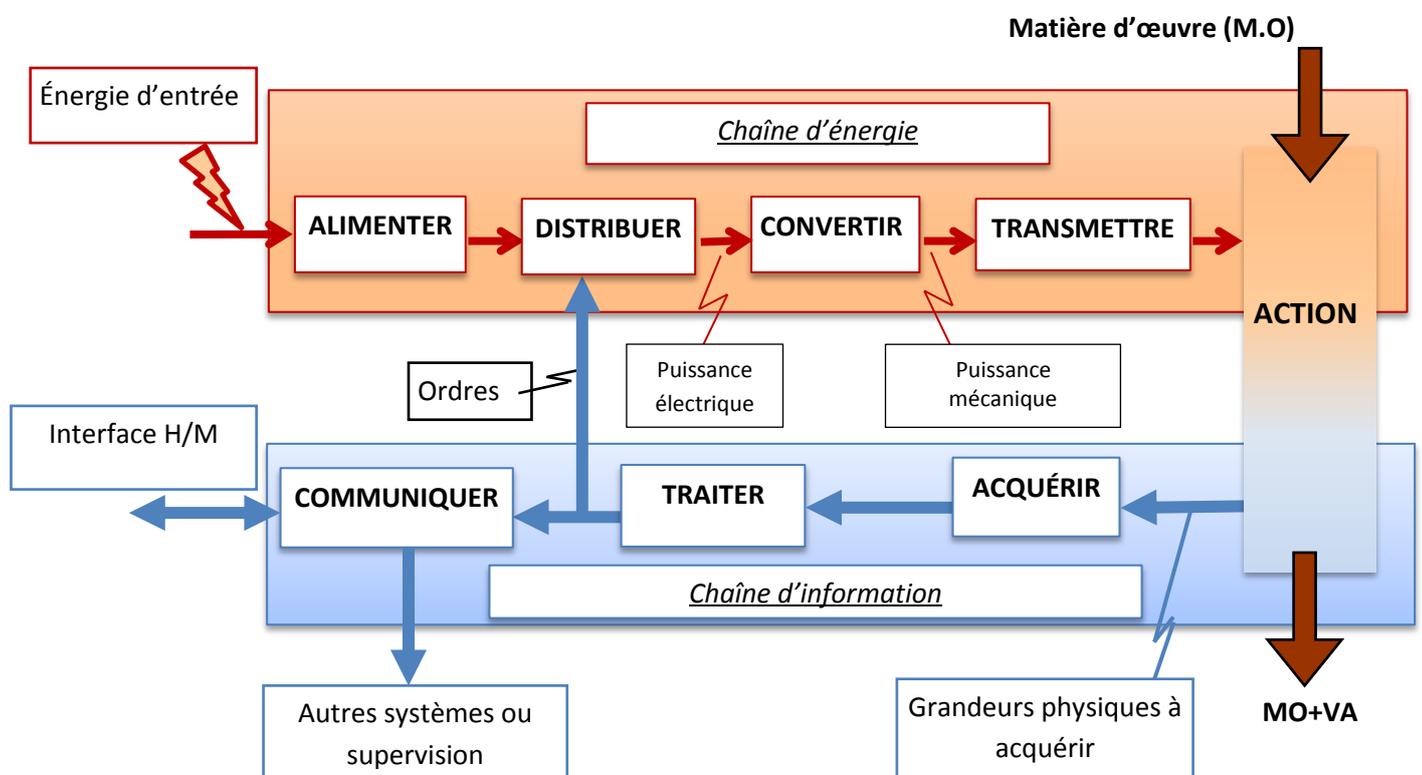
## 5. LE MOTEUR À COURANT CONTINU

Beaucoup d'applications nécessitent un couple de démarrage élevé. Le Moteur à Courant Continu (MCC) possède une caractéristique couple/vitesse de pente importante, ce qui permet de vaincre un couple résistant élevé et d'absorber les à-coups de charge : la vitesse du moteur s'adapte à sa charge. D'autre part, la miniaturisation recherchée par les concepteurs trouve dans le moteur à courant continu une solution idéale, car il présente un encombrement réduit grâce à un bon rendement.

Le moteur à courant continu est utilisé quand on dispose d'une source d'alimentation continue (batterie par ex). Il se caractérise par des lois de fonctionnement linéaires qui rendent l'exploitation de ses caractéristiques faciles d'emploi.

### 5.1. IDENTIFICATION DE LA FONCTION TECHNIQUE RÉALISÉE

Les moteurs à courant continu réalisent la fonction CONVERTIR de la chaîne d'énergie :



La puissance absorbée est de type électrique :  $P_{abs} = U \cdot I$  Avec la tension et le courant continu.

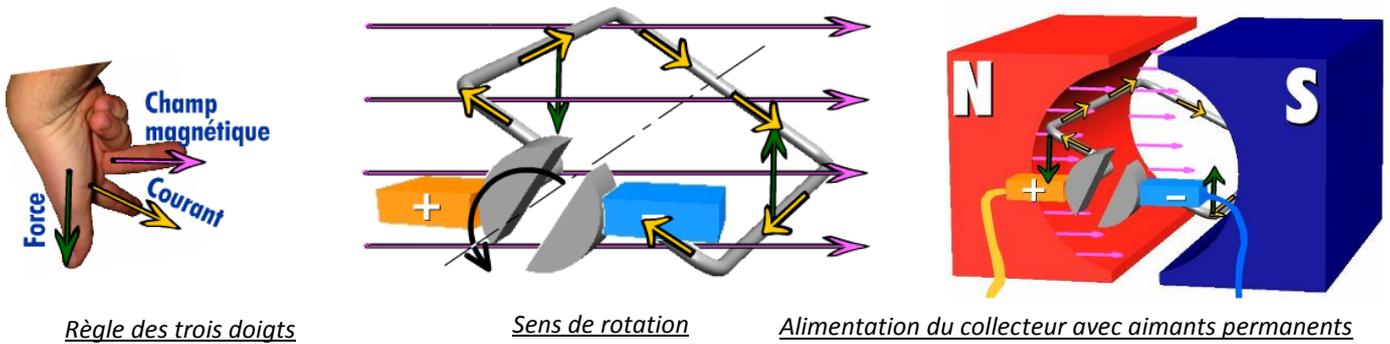
La puissance utilisable est de type mécanique  $P_u = C \cdot \omega$  caractérisée par le couple utile et la fréquence de rotation.

## 5.2. FONCTIONNEMENT

### 5.2.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le schéma de principe donné ci-après pour une spire permet de comprendre le fonctionnement d'un moteur à courant continu :



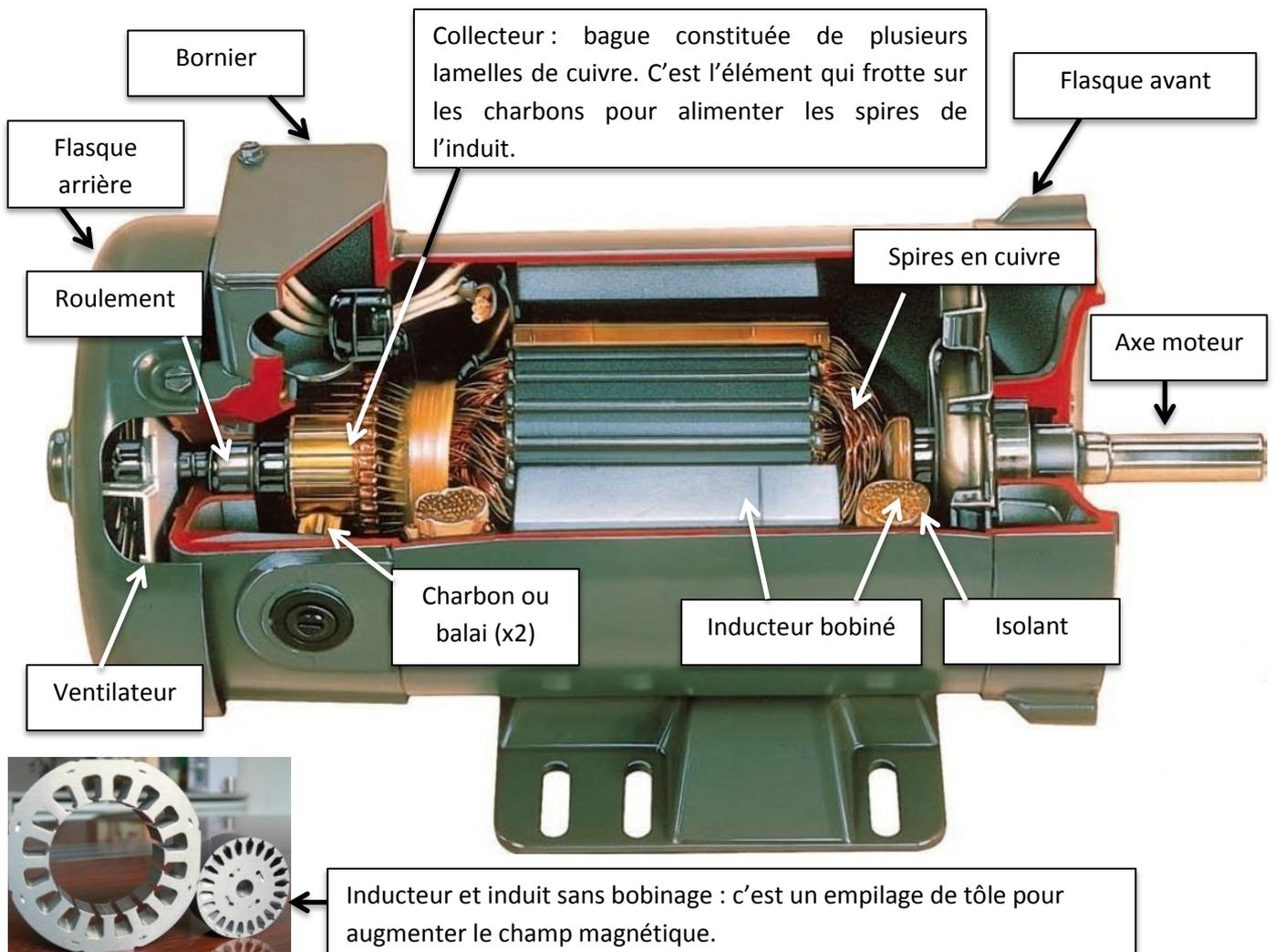


Les pôles Nord et Sud des aimants permanents créent un flux (champ magnétique) dans le moteur. La spire est alimentée et plongée dans ce flux. Elle est soumise à un couple de forces (force de Laplace). Le moteur se met en rotation. On dit qu'il y a création d'un couple moteur.

Les balais (solidaires de la carcasse) frottent sur le collecteur. Compte tenu de la disposition des balais et du collecteur, le sens du courant dans la spire change à chaque demi-tour, ce qui permet de conserver le même sens de rotation (sinon, la spire resterait en position d'équilibre).

En permutant les fils d'alimentation du moteur le courant dans la spire est inversé. Le couple qui s'applique est alors de sens contraire au précédent : le moteur change de sens de rotation. Par nature, le moteur à courant continu est un moteur à deux sens de rotation.

### 5.2.2. CONSTITUTION D'UN MOTEUR À COURANT CONTINU



### 5.3. DÉFINITIONS ET RELATIONS

#### 5.3.1. FRÉQUENCE DE ROTATION, VITESSE ANGULAIRE

La fréquence de rotation  $N$  de l'arbre moteur est liée à la vitesse angulaire  $\omega$  :

$$\omega = N \cdot \frac{2\pi}{60}$$

Avec :

- $N$  : fréquence de rotation en tr/min
- $\omega$  : vitesse angulaire en rad/s

#### 5.3.2. FORCE ÉLECTROMOTRICE (FEM) $E$

Dans chaque spire alimentée, il se crée une force électromotrice. On définit  $E$  la somme de toutes les forces électromotrices des spires. Cette f.e.m est proportionnelle à la vitesse de rotation :

$$E = k \cdot \omega$$

Avec :

- $E$  : force électromotrice en V
- $K$  : constante de couple en V/rad.s<sup>-1</sup>
- $\omega$  : vitesse angulaire en rad/s

Cas particulier au moment du démarrage : la vitesse est nulle, la F.E.M est nulle aussi.

$k$  est une constante qui dépend du nombre de spires et du nombre de pôles de l'inducteur. Elle peut être exprimée en N.m/A ou en V/rad.s<sup>-1</sup>

#### 5.3.3. COUPLE ÉLECTROMAGNÉTIQUE $C_e$

Le couple électromagnétique  $C_e$  est proportionnel au courant  $I_m$  dans le moteur :

$$C_e = k \cdot I_m$$

Avec :

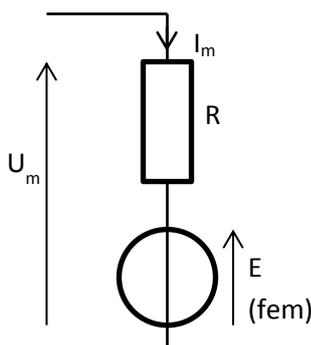
- $C_e$  : couple électromagnétique en N.m
- $K$  : constante de couple en N.m/A
- $I_m$  : courant dans l'induit du moteur en A

Attention : Le couple électromagnétique  $C_e$  n'est égal au couple utile disponible sur l'arbre moteur  $C_u$  que si les pertes constantes (pertes par frottement et pertes magnétiques) sont négligées.

#### 5.3.4. SCHÉMA ÉQUIVALENT

Le schéma électrique équivalent permet de modéliser l'induit du moteur :

À partir du schéma équivalent, on établit l'équation électrique :



$$U_m = E + R \cdot I_m$$

Avec :

- $U_m$  : tension aux bornes du moteur en V
- $E$  : Force électromotrice en V
- $R$  : Résistance d'induit en  $\Omega$
- $I_m$  : courant dans l'induit en A



## 5.4. BILAN DES PUISSANCES/RENDEMENT

### 5.4.1. PUISSANCE UTILE $P_u$

C'est la puissance mécanique produite par le moteur pour entraîner la charge :

$$P_u = C_u \cdot \omega$$

Avec :

- $P_u$  : puissance utile en W
- $C_u$  : couple utile en N.m
- $\omega$  : vitesse angulaire en rad/s

Cas particulier à vide : la puissance utile est nulle.

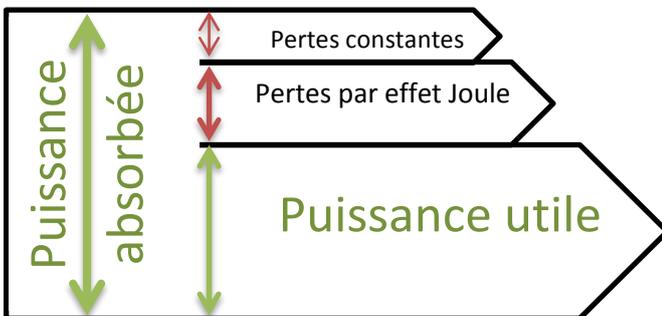
### 5.4.2. PUISSANCE ABSORBÉE PAR LE MOTEUR $P_a$

$$P_a = U_m \cdot I_m$$

Avec :

- $P_a$  : puissance absorbée en W
- $U_m$  : tension aux bornes de l'induit en V
- $I_m$  : courant dans l'induit en A

### 5.4.3. PERTES



Les pertes par effet Joule correspondent à la puissance absorbée par les bobinages et dissipée en chaleur

$$P_j = R \cdot I_m^2$$

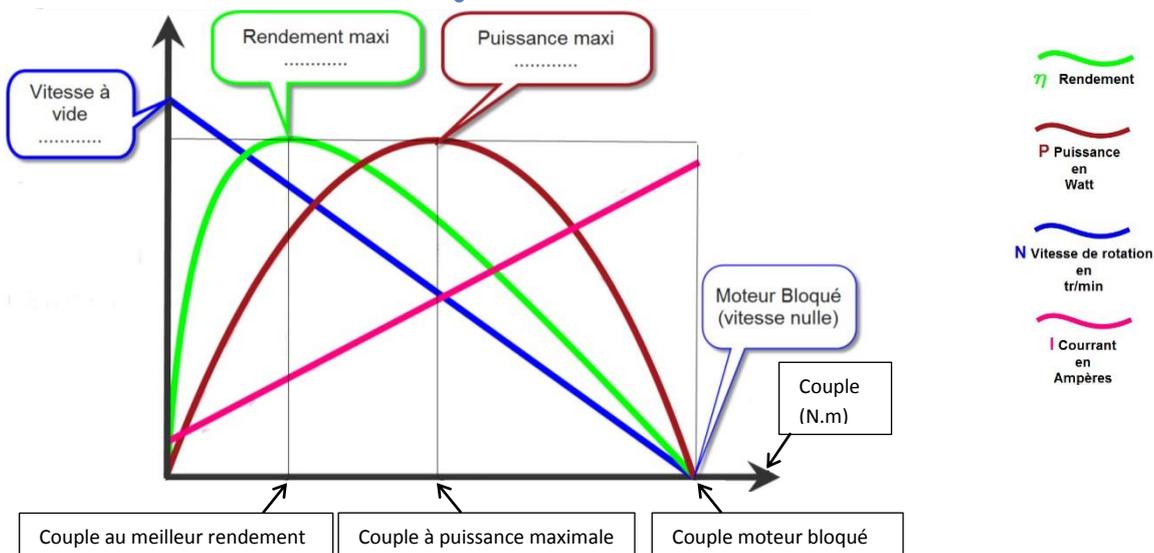
Les pertes constantes ( $P_c$ ) sont la somme des pertes mécaniques (puissance perdue par frottement) et magnétiques (saturation magnétique et courant de Foucault). Ces pertes peuvent se déterminer à vide.

### 5.4.4. RENDEMENT

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{C_u \cdot \omega}{U_m \cdot I_m}$$

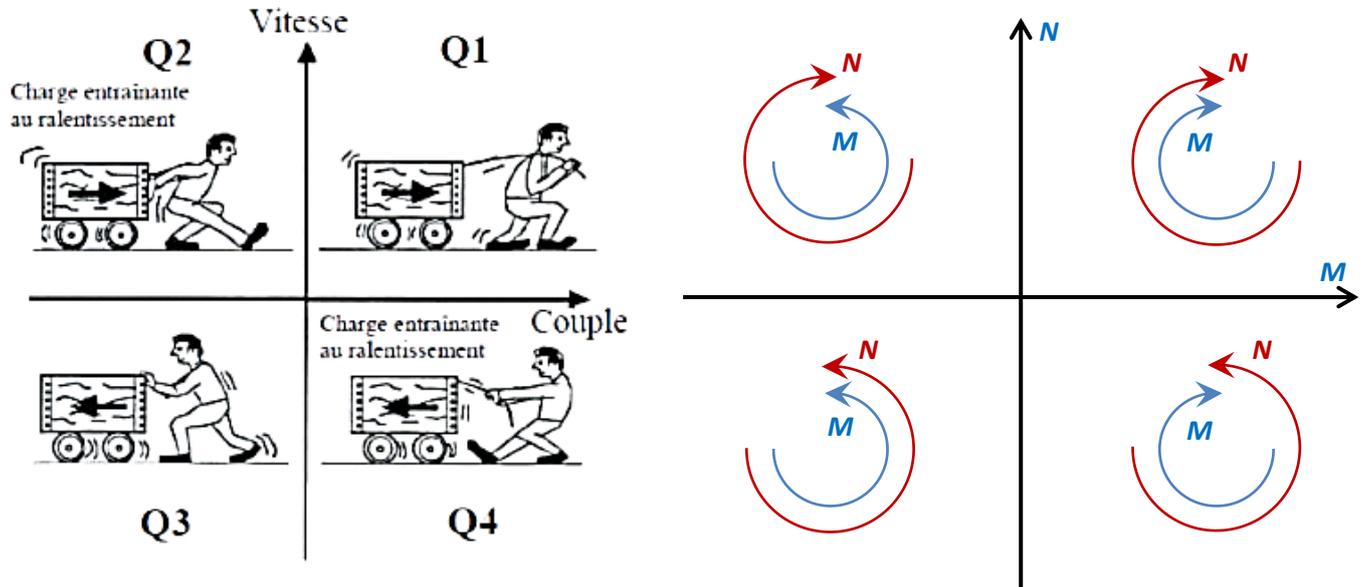
$$\text{Avec : } P_u = P_a - P_c - P_j$$

## 5.5. COURBES CARACTÉRISTIQUES



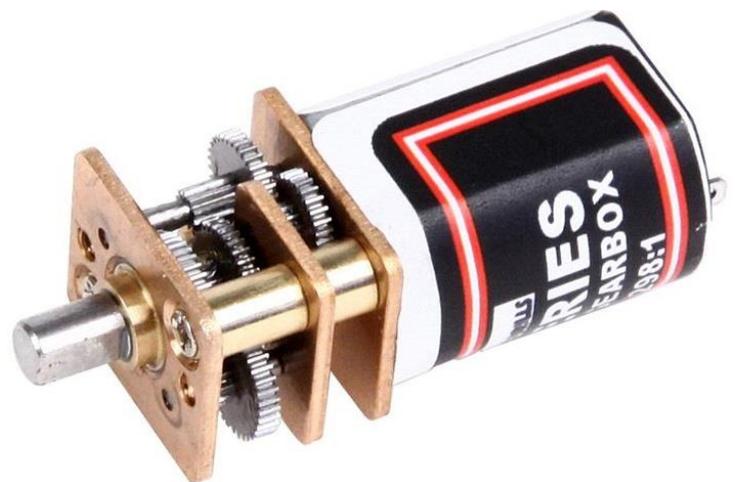
### 5.6. MODES DE FONCTIONNEMENT

Un moteur à courant continu est réversible : il peut fonctionner en génératrice. En faisant tourner le rotor du moteur sous l'action d'une force extérieure, on récupère une puissance électrique aux bornes des spires de l'induit du moteur (dynamo). Les dessins suivants illustrent les différents modes de fonctionnement du moteur (fonctionnement dans les quatre quadrants) :



### 5.7. ASSOCIATION MOTEUR ET RÉDUCTEUR

Les moteurs à courant continu sont construits pour fonctionner en permanence à une vitesse proche de leur vitesse à vide. Pour la plupart des applications, cette vitesse est trop élevée. Pour la réduire, un réducteur mécanique est associé au moteur et l'ensemble ainsi constitué est nommé motoréducteur. Les constructeurs proposent généralement une gamme de motoréducteurs dotés chacun d'une série de rapports, ce qui permet de couvrir une multitude d'applications.



#### 5.7.1. CHOIX D'UN MOTORÉDUCTEUR

En fonction de la fréquence de rotation recherchée, on opte pour un moteur direct ou un motoréducteur :

- fréquence de rotation de 1000 à 5000 tr/min : moteur direct ;
- fréquence de rotation inférieure à 1000 tr/min : motoréducteur.

### 5.8. COMMANDE D'UN MOTEUR À COURANT CONTINU

Nous allons nous intéresser aux techniques d'alimentation des moteurs à courant continu sans régulation de vitesse. La régulation permet de maintenir une vitesse constante sur le moteur, même si le couple résistant varie, en ajustant automatiquement la valeur de la tension d'alimentation.



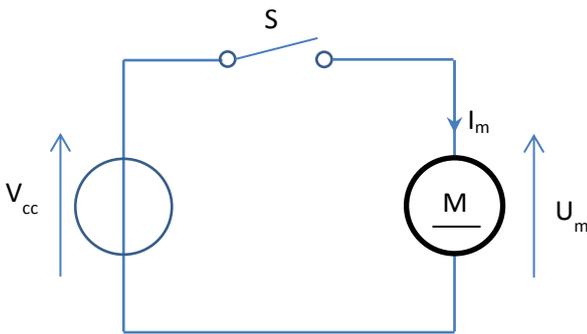
### 5.8.1. RAPPELS

- La vitesse de rotation d'un moteur à courant continu dépend de la valeur de la tension  $U_m$  appliquée à ses bornes et du couple résistant.
- Le sens de rotation dépend du signe de la tension  $U_m$ .

### 5.8.2. ALIMENTATION DES MOTEURS À COURANT CONTINU

#### 5.8.2.1. UN SENS DE ROTATION, VITESSE FIXE

Le schéma de principe donné ci-après permet une rotation du moteur dans un seul sens avec une vitesse unique. La mise en marche du moteur est obtenue par l'interrupteur S



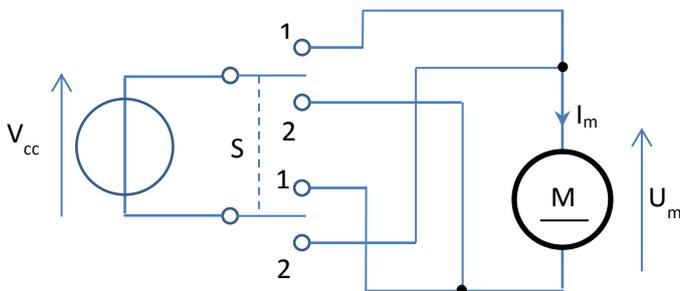
S ouvert :  $I_m = 0$ , donc  $U_m = 0$  : le moteur est à l'arrêt.

S fermé :  $U_m = V_{cc}$  : le moteur est en marche

Pour régler la vitesse du moteur, il faut agir sur la tension d'alimentation  $V_{cc}$

#### 5.8.2.2. DEUX SENS DE ROTATION, VITESSE FIXE

Le schéma de principe donné ci-après permet une rotation du moteur dans les deux sens avec une vitesse unique. L'inversion du sens de rotation peut être obtenue par un interrupteur bipolaire à trois positions.



Exemples :



- Lorsque S est en position repos (position représentée sur le schéma) :  $I_m = 0$ , donc  $U_m = 0$  : le moteur est à l'arrêt.
- Lorsque S est en position 1,  $U_m = V_{cc}$  : le moteur est en marche dans un sens.
- Lorsque S est en position 2,  $U_m = -V_{cc}$  : le moteur est en marche dans l'autre sens.

L'arrêt du moteur peut également être obtenu par des capteurs de position (détection de fin de course sur la partie opérative) :

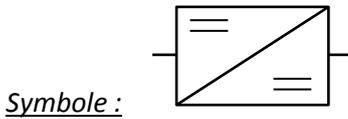


Symbole d'un capteur de position à contact 1 RT (Repos / Travail)

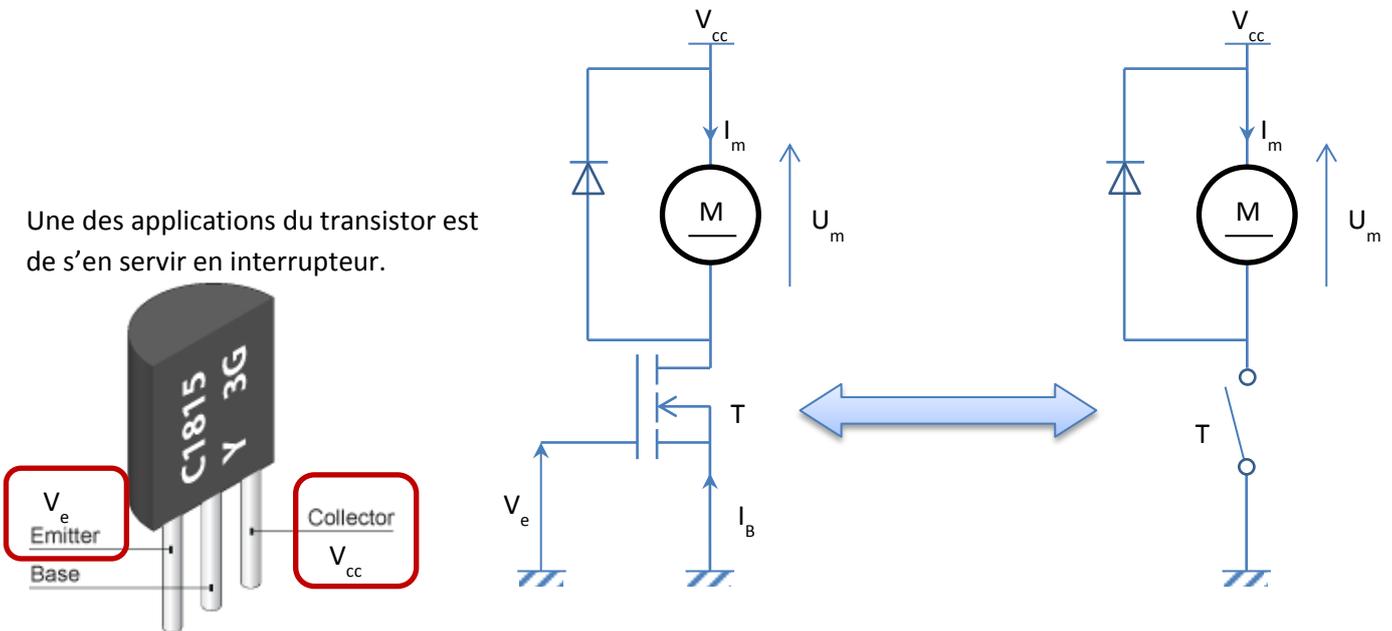


**5.8.2.3. UN SENS DE ROTATION AVEC VARIATION DE VITESSE (HACHEUR SÉRIE OU HACHEUR UN QUADRANT)**

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu. Ils permettent, à partir d'une tension continue fixe, d'obtenir une tension continue de valeur différente.



Utilisons un montage similaire au 5.8.2.1. L'interrupteur S est remplacé par un transistor T qui fonctionne en régime de commutation c'est-à-dire qu'il se comporte soit comme un interrupteur fermé, soit comme un interrupteur ouvert. On commande le transistor par son courant de base  $i_B$ :



**Analyse du fonctionnement :**

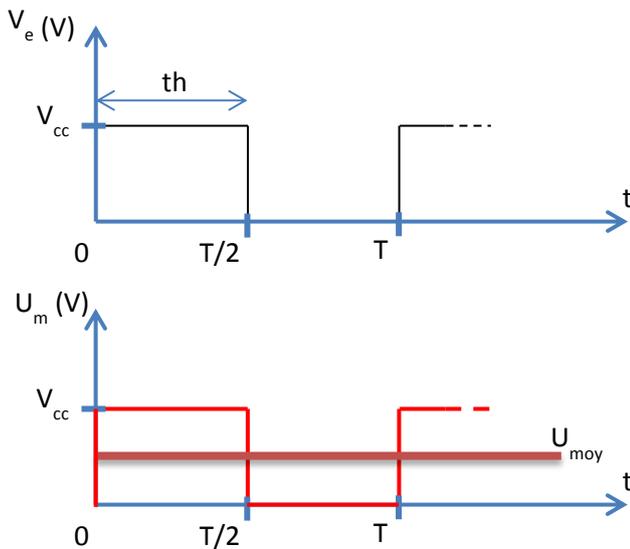
La tension d'entrée peut prendre deux valeurs (0V et  $V_{cc}$ ). Le transistor T fonctionne en régime de commutation (Bloqué / Saturé).

$V_e$ (V)	État de T (bloqué/saturé)	Valeur de $U_m$
0	Bloqué	0 V
$V_{cc}$	Saturé	$V_{cc}$

**Chronogrammes :**

La tension  $V_e$  est un signal carré. Quand le moteur est alimenté par  $V_{cc}$  le moteur tourne à une vitesse  $\Omega$ . Quand le moteur n'est plus alimenté (transistor bloqué), il continue à tourner à la même vitesse grâce à son inertie. La vitesse est constante (si la durée de l'état bloqué du transistor est suffisamment courte).





Rapport cyclique  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{th}{T}$$

Tension moyenne  $U_{moy}$  :

$$U_{moy} = \frac{\text{Aire}}{T}$$

Remarque : pour un signal carré positif, la valeur moyenne  $U_{moy}$  vaut :

$$U_{moy} = \alpha \cdot V_{cc}$$

### Vitesse de rotation du moteur :

La vitesse du moteur est liée à la valeur de la tension continue à ses bornes (valeur moyenne). Pour le chronogramme de la tension aux bornes du moteur  $U_m(t)$  ci-dessus :

$$U_{moy} = \frac{V_{cc}}{2} ; \alpha = \frac{1}{2} ; U_{moy} = \alpha \cdot V_{cc}$$

Pour obtenir une variation de la vitesse du moteur, on agit sur  $th$  et donc sur le rapport cyclique  $\alpha$  du signal de commande :

- si  $\alpha$  augmente :  $U_{moy}$  augmente donc la vitesse de rotation augmente,
- si  $\alpha$  diminue :  $U_{moy}$  diminue donc la vitesse de rotation diminue.

### Remarque :

- La fréquence du signal de commande  $f = 1/T$  doit être suffisamment élevée pour que le courant dans le moteur reste pratiquement constant.
- La diode placée en parallèle sur le moteur assure la continuité du courant dans le moteur lors de la phase de blocage du transistor. Elle est appelée diode de roue libre.

### Le fait de commander le moteur de cette manière s'appelle la Modulation à Largeur d'Impulsions (M.L.I) ou Pulse Wave Modulation (P.W.M)

#### 5.8.2.4. DEUX SENS DE ROTATION AVEC VARIATION DE VITESSE (HACHEUR QUATRE QUADRANTS)

Ce montage et son étude seront abordés en travaux pratiques.



## 6. COURANT ALTERNATIF

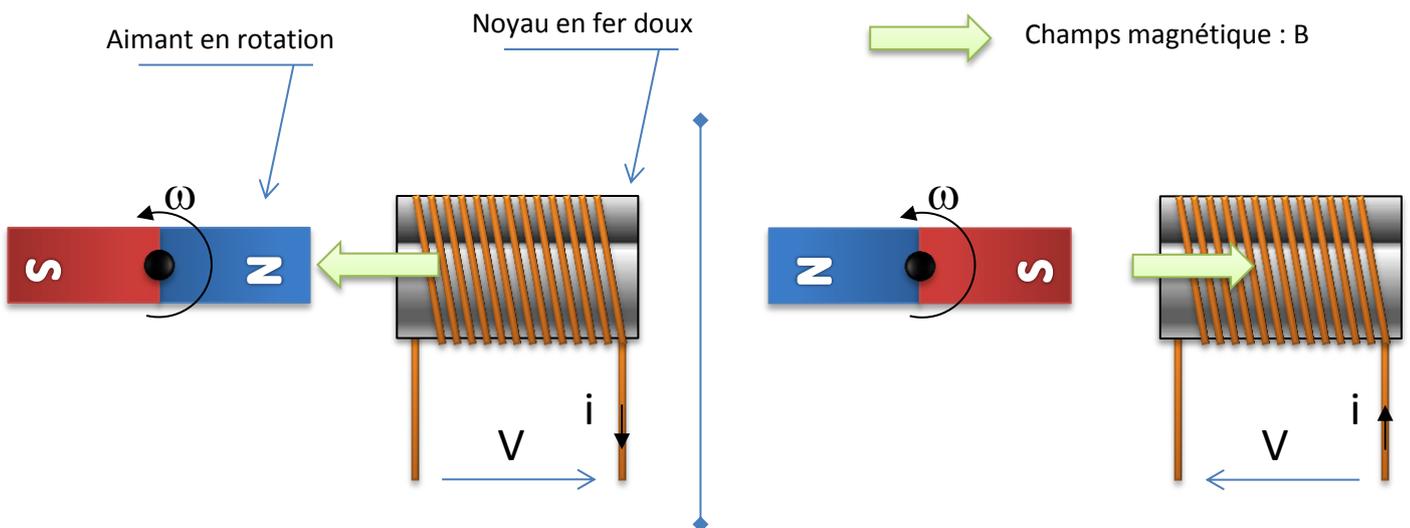
### 6.1. LE CHAMP TOURNANT

Les machines à courant alternatif (alternateurs, moteurs synchrones, moteurs asynchrones,...) reposent sur le principe des champs tournants. Cela vient de la génération de l'électricité par des turbo-alternateurs<sup>4</sup>.



1 : turbine  
2 : rotor  
3 : stator

L'alternateur est constitué d'un aimant placé dans un bobinage de cuivre. Lors de la rotation de l'aimant, ou rotor, il génère un courant induit dans le bobinage du stator. En effet l'aimant fournit la force nécessaire grâce au flux magnétique pour casser la liaison électronique de la dernière couche de l'atome et mettre en route le débit d'électron.



Le courant ainsi obtenu est périodique et sinusoïdal. Périodique : la tension change périodiquement de sens, le courant s'inverse constamment. Sinusoïdal : La tension varie en fonction du temps suivant une courbe appelée sinusoïde.

<sup>4</sup> Turbine associée à un alternateur.



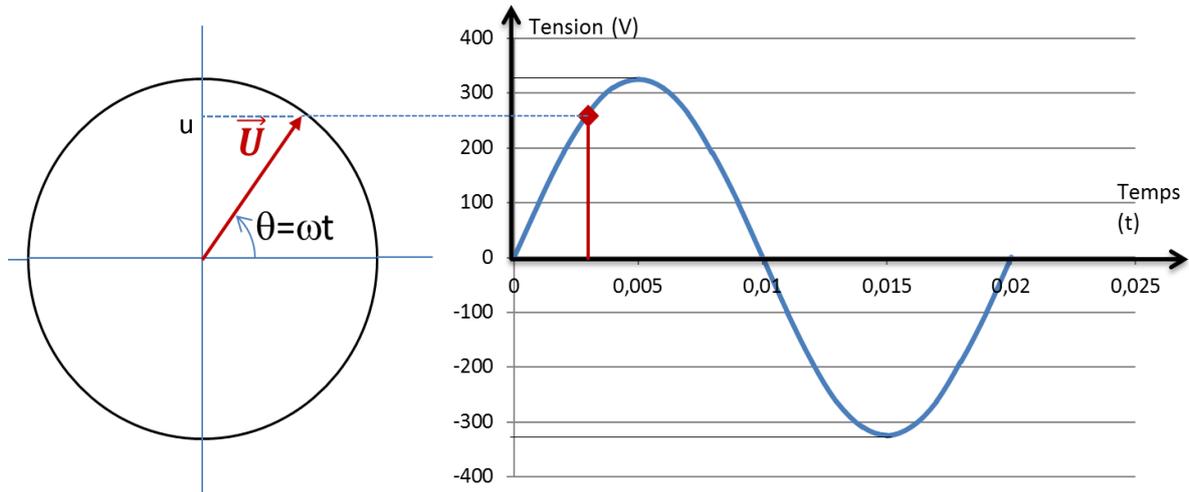
Durant un tour de l'alternateur celui-ci crée une alternance positive suivie d'une alternance négative.

Rappel :

La fréquence est l'inverse de la période :  $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$

## 6.2. GÉNÉRATION D'UNE SINUSOÏDE – REPRÉSENTATION DE FRESNEL

Dans un alternateur, le rotor crée un champ tournant que nous représentons par un vecteur. La rotation du rotor engendre des fluctuations du champ magnétique qui correspondent à la projection verticale du vecteur tournant.



Certaines formules font appel à la pulsation  $\omega$  (Oméga). Cette grandeur étroitement liée à la fréquence correspond à la vitesse angulaire du vecteur tournant qui nous a servi à tracer la sinusoïde. La pulsation s'exprime en radian par seconde.

Comme vu dans le paragraphe 2.4.2.4 :

- La tension s'exprime :  $u(t) = U\sqrt{2}(\sin \omega t)$ ,
- Le courant s'exprime :  $i(t) = I\sqrt{2}(\sin \omega t + \varphi)$

Pour connaître la valeur instantanée  $u$  à un instant  $t$ , on mesure la projection orthogonale du vecteur sur un axe de référence.

## 6.3. INTENSITÉ ET DÉPHASAGE<sup>5</sup>

Quand on soumet un dipôle RLC (résistance, self ou condensateur) à une tension alternative  $u$ , il est traversé par une intensité aussi alternative  $i$ . Elle est caractérisée par une intensité crête  $\hat{I}$ , une intensité efficace  $I$  et les mêmes : pulsation  $\omega$ , période  $T$ , fréquence  $f$  que la tension. On a la relation :

Avec :

$$U = Z \cdot I$$

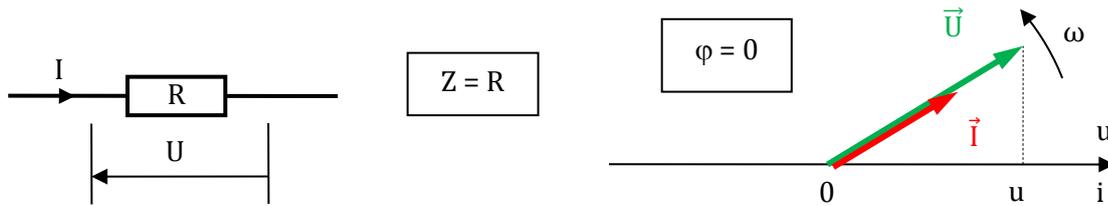
- $U$  : Tension [V]
- $Z$  : Impédance [ $\Omega$ ]
- $I$  : Intensité [A]

Selon la nature du dipôle l'intensité est en phase, en retard ou en avance par rapport à la tension. **Le déphasage  $\phi$  est l'angle compris entre le vecteur intensité et le vecteur tension**, dans le diagramme de Fresnel.

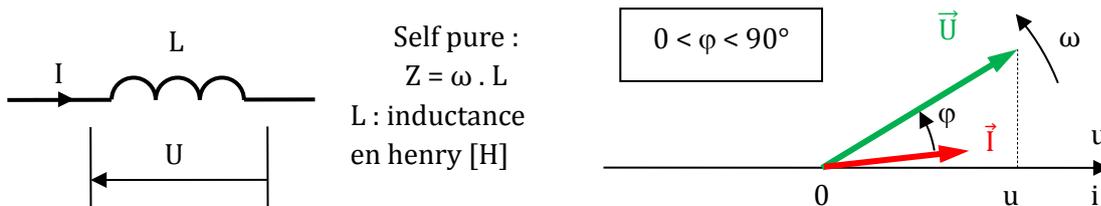
<sup>5</sup> Source : M. LE GUAY



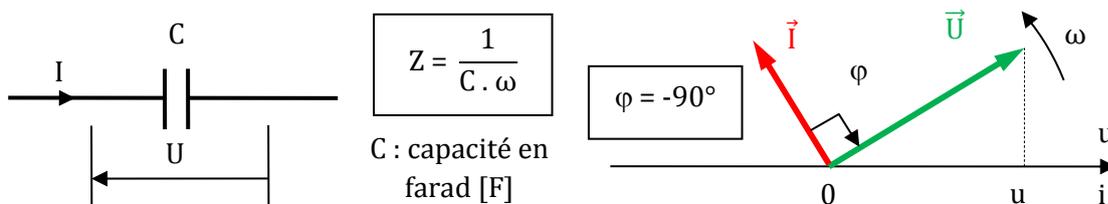
- **Résistance** : L'intensité est en phase avec la tension. Le déphasage est nul :  $\varphi = 0$



- **Bobine réelle (self pure + résistance)** : L'intensité est en retard sur la tension. Le déphasage est compris entre 0 et 90°.



- **Condensateur** : L'intensité est en avance sur la tension. Le déphasage vaut :  $\varphi = -90^\circ$



## 6.4. PUISSANCES

### 6.4.1. PUISSANCE ACTIVE

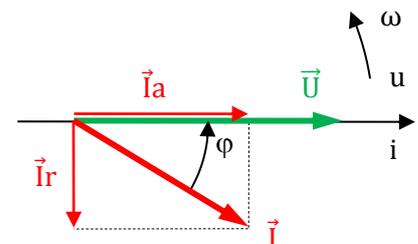
La puissance active est la puissance réellement consommée. Son unité est le watt [W].

Lorsque le vecteur  $U$  est horizontal, le vecteur  $I$  est en retard d'un angle égal au déphasage. À ce moment-là, l'intensité a pour valeur la projection orthogonale du vecteur  $I$ , sur le vecteur  $U$ . Cette intensité est appelée intensité active  $I_a = I \cdot \cos \varphi$

La puissance active se calcule donc par :

$$P = U \cdot I_a \quad \text{soit} \quad P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Pour cette raison,  $\cos \varphi$  est appelé le **facteur de puissance**.



### 6.4.2. PUISSANCE RÉACTIVE

La puissance réactive est une puissance virtuelle, utile aux calculs. Elle s'exprime en voltampère réactif, noté [var] et se calcule par :

$$Q = U \cdot I_r \quad \text{soit} \quad Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

### 6.4.3. PUISSANCE APPARENTE

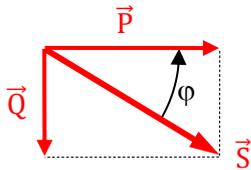
La puissance apparente est une puissance virtuelle, utile aux calculs. Elle s'exprime en voltampère, noté [VA] et se calcule par :



$$S = U.I$$

#### 6.4.4. RELATION ENTRE LES PUISSANCES

Les puissances P, Q et S, peuvent être représentées par trois vecteurs formant un triangle rectangle. On a donc :



$$\vec{S} = \vec{P} + \vec{Q} \quad \text{d'où}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

#### 6.4.5. APPLICATION

Deux récepteurs demandent respectivement les puissances  $P_1$  et  $P_2$  au réseau et créent des déphasages  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$ . On recherche l'intensité dans chaque récepteur et dans le réseau.

$$I_1 = \frac{P_1}{U \cdot \cos \varphi_1}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U \cdot \cos \varphi_2}$$

$$Q_1 = P_1 \cdot \tan \varphi_1$$

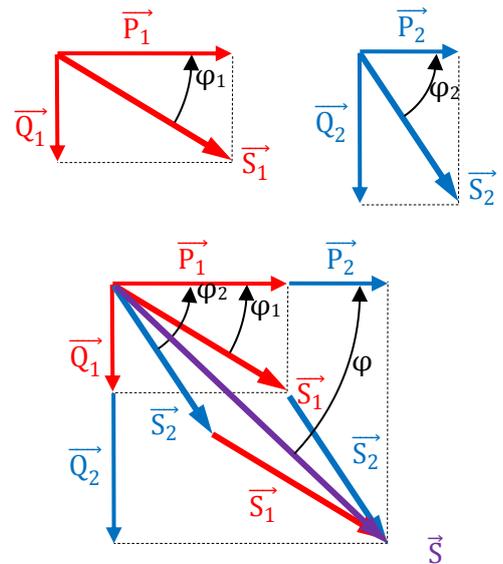
$$Q_2 = P_2 \cdot \tan \varphi_2$$

$$P = P_1 + P_2$$

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$I = \frac{S}{U}$$



On constate que l'intensité dans la ligne n'est pas égale à la somme des intensités dans les récepteurs :  $I \neq I_1 + I_2$ .

Les intensités ne peuvent être additionnées que le cas particulier où les déphasages sont identiques.

Le déphasage dans la ligne d'alimentation  $\varphi$ , est intermédiaire aux déphasages des récepteurs  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$ . Le facteur de puissance dans la ligne est égal à :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

On retiendra qu'il n'est possible d'additionner que les puissances actives entre elles et les puissances réactives entre elles.

#### 6.4.6. INCIDENCE DU FACTEUR DE PUISSANCE

Un récepteur avec un  $\cos \varphi$  faible demande une intensité plus importante dans la ligne d'alimentation. Ceci entraîne des **pertes supplémentaires** par échauffement :  $P = R.I^2$  et conduit à la **saturation du réseau**.

Le fournisseur d'électricité incite donc financièrement, les consommateurs à disposer d'un facteur de puissance élevé.

- **Tarif bleu (particuliers de 3 à 36 kVA) et jaune (PME de 36 à 250 kVA) :**

Seule l'énergie active est mesurée et facturée. Mais à cela s'ajoute le prix de l'abonnement qui dépend de la **puissance apparente** souscrite. L'intensité est limitée par le disjoncteur.

Un  $\cos \phi$  faible devrait conduire à souscrire un contrat plus cher.

- **Tarif vert (grandes entreprises) :**



L'installation comprend deux compteurs qui mesurent l'énergie active  $E_a$  et l'énergie réactive  $E_r$ . L'énergie active consommée et l'abonnement sont facturés.

Ensuite, chaque mois, on calcule à partir des index heures pleines des compteurs :

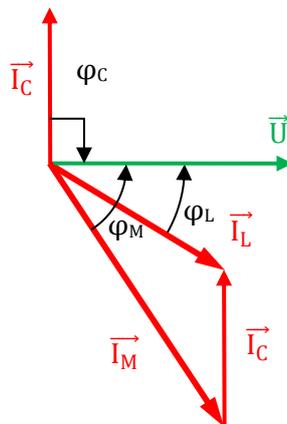
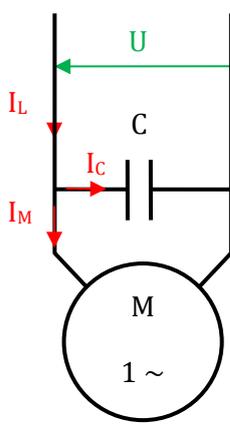
$$\tan \varphi = \frac{E_r}{E_a}$$

Si  $\tan \varphi > 0,4$ , ce qui correspond à  $\cos \phi < 0,928$ , l'énergie réactive supplémentaire à cette valeur est facturée.

Ceci constitue une taxe de pénalité sur le  $\cos \varphi$  faible.

#### 6.4.7. RELÈVEMENT DU FACTEUR DE PUISSANCE – COMPENSATION DE PUISSANCE RÉACTIVE

Il est possible d'augmenter le  $\cos \varphi$  d'un appareil ou de toute une installation, en plaçant en parallèle un condensateur ou une batterie de condensateurs.



$$\vec{I}_L = \vec{I}_M + \vec{I}_C$$

Par projection horizontale :

$$I_L \cos \varphi_L = I_M \cos \varphi_M + 0$$

$$I_L = I_M \cdot \frac{\cos \varphi_M}{\cos \varphi_L}$$

Par projection verticale :

$$I_L \sin \varphi_L = I_M \sin \varphi_M - I_C$$

$$I_C = I_M \cdot \sin \varphi_M - I_L \cdot \sin \varphi_L$$

En remplaçant  $I_L$  par sa valeur :

$$I_C = I_M \cdot \sin \varphi_M - I_M \cdot \cos \varphi_M \cdot \frac{\sin \varphi_L}{\cos \varphi_L} \text{ et } I_C = I_M \cdot (\sin \varphi_M - \cos \varphi_M \cdot \tan \varphi_L)$$

Finalement, la capacité du condensateur ou des condensateurs en parallèle, est égale à :

$$U = Z \cdot I_C \Leftrightarrow Z = \frac{U}{I_C}$$

$$Z = \frac{1}{C \cdot \omega} \Leftrightarrow C = \frac{1}{Z \cdot \omega} = \frac{I_C}{U \cdot \omega} ; C = \frac{I_M \cdot (\sin \varphi_M - \cos \varphi_M \cdot \tan \varphi_L)}{U \cdot \omega}$$

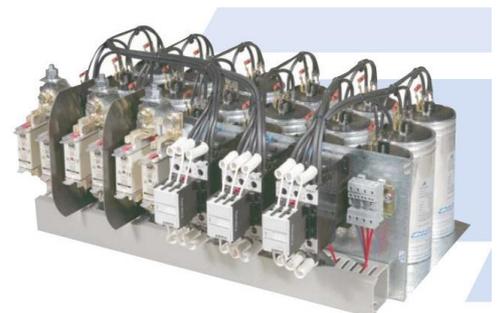
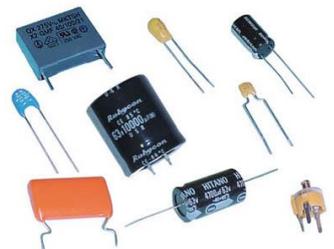
Il est aussi possible de traiter le problème par les puissances. On démontre que :

$$C = \frac{P_M \cdot (\tan \varphi_M - \tan \varphi_L)}{U^2 \cdot \omega}$$

où  $P_M$  est la puissance active du bobinage.

Le condensateur est placé dans chaque appareil qui dispose d'un  $\cos \varphi$  faible, comme par exemple dans les éclairages fluorescents.

Les condensateurs de grosse capacité étant relativement chers, ils peuvent être mutualisés pour l'ensemble de l'installation. Dans ce cas, un circuit électronique analyse le déphasage du réseau et met en service les condensateurs nécessaires, étage par étage.



## 6.5. CONVERSION DE COURANT

### 6.5.1. CHANGEMENT DE TENSION ALTERNATIVE

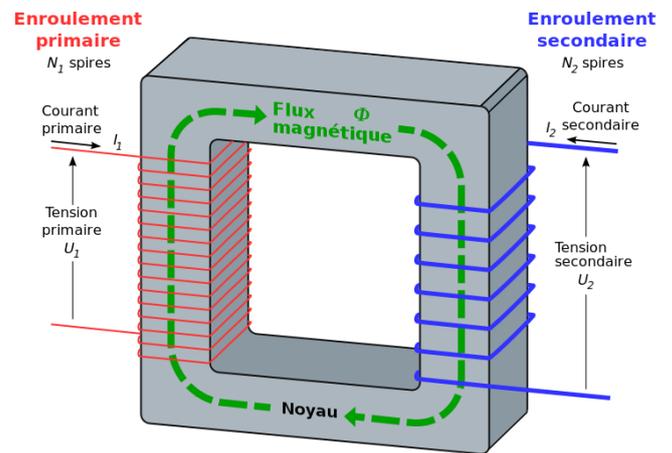
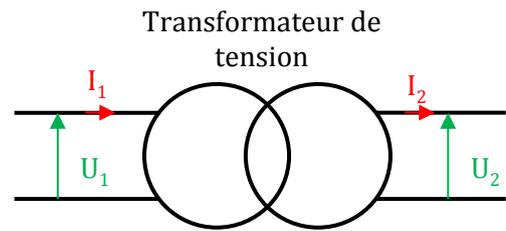
Un transformateur est employé pour abaisser ou augmenter une tension alternative.

La bobine primaire génère un champ magnétique variable dans le circuit magnétique, qui à son tour induit une tension alternative dans la bobine secondaire.

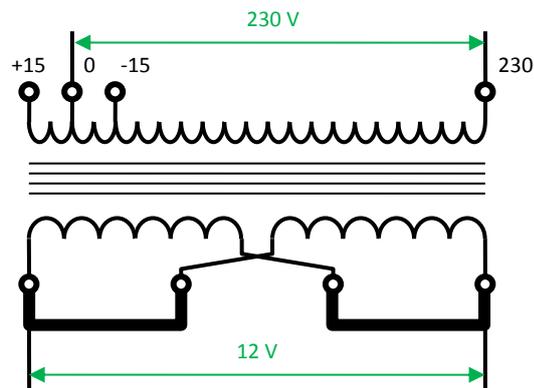
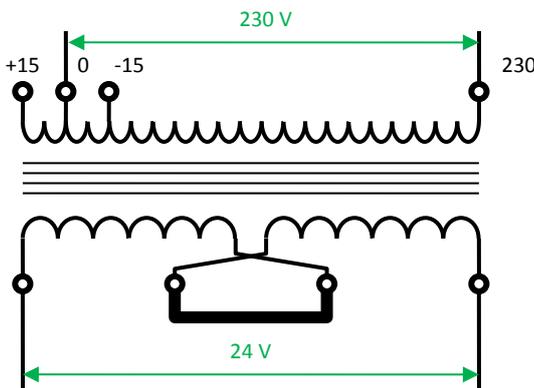
Le rapport des tensions efficaces primaire et secondaire est égal au rapport du nombre de spires des enroulements primaire et secondaire :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

En sortant des points intermédiaires des bobinages, le transformateur devient multi-tension.



Source : wikipedia



La fréquence du générateur de courant n'est pas modifiée par un transformateur.

$$f_2 = f_1$$

Le facteur de puissance du secondaire se transmet au primaire, avec une légère diminution :

$$\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2$$

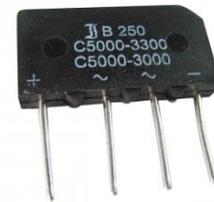
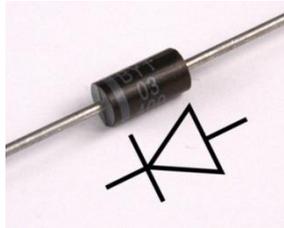
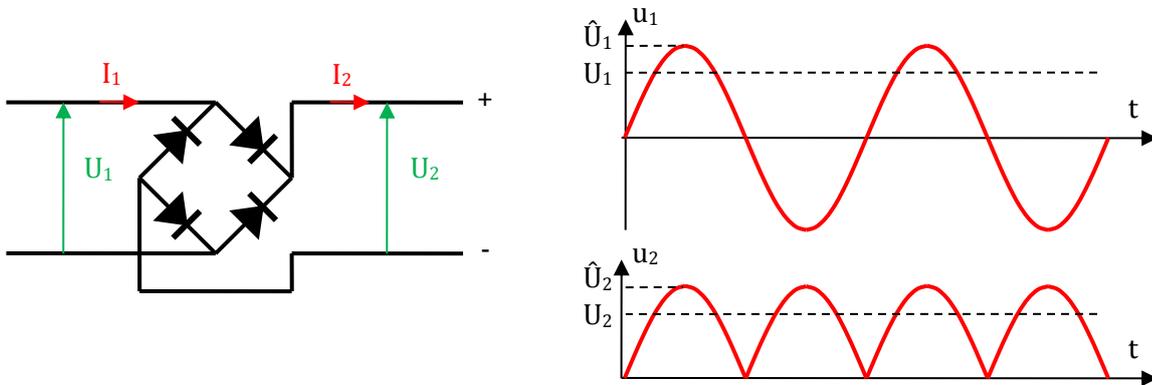
Les intensités dans les bobines primaires et secondaires sont limitées par la section des conducteurs. La caractéristique dimensionnelle d'un transformateur est donc **sa puissance apparente** en [VA].



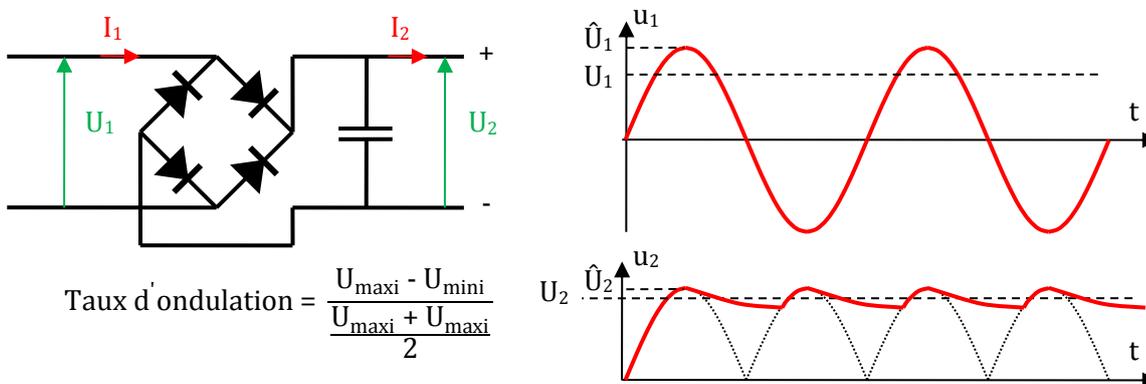
### 6.5.2. REDRESSEMENT DU COURANT ALTERNATIF

Il est facile de redresser les deux alternances d'un courant alternatif avec quatre diodes montées en pont de Graetz.

Les diodes peuvent être raccordées individuellement ou intégrées dans un boîtier.



Pour rendre le courant redressé plus proche du courant continu, on ajoute en sortie, un **condensateur de filtrage**.



Plus la capacité du condensateur est grande et plus le taux d'ondulation est faible.

### 6.5.3. ONDULATION DU COURANT CONTINU

Un onduleur est un dispositif électronique construit autour de transistors de puissance ou de thyristors. Il permet d'obtenir un courant alternatif avec la tension et la fréquence désirée, à partir d'un courant continu. Il a de multiples utilisations :

- Alimentations secours à partir d'une batterie d'accumulateurs,
- Raccordement de panneaux solaires photovoltaïques au réseau,
- Variateur de vitesse de rotation pour moteurs asynchrones...

Symbole :

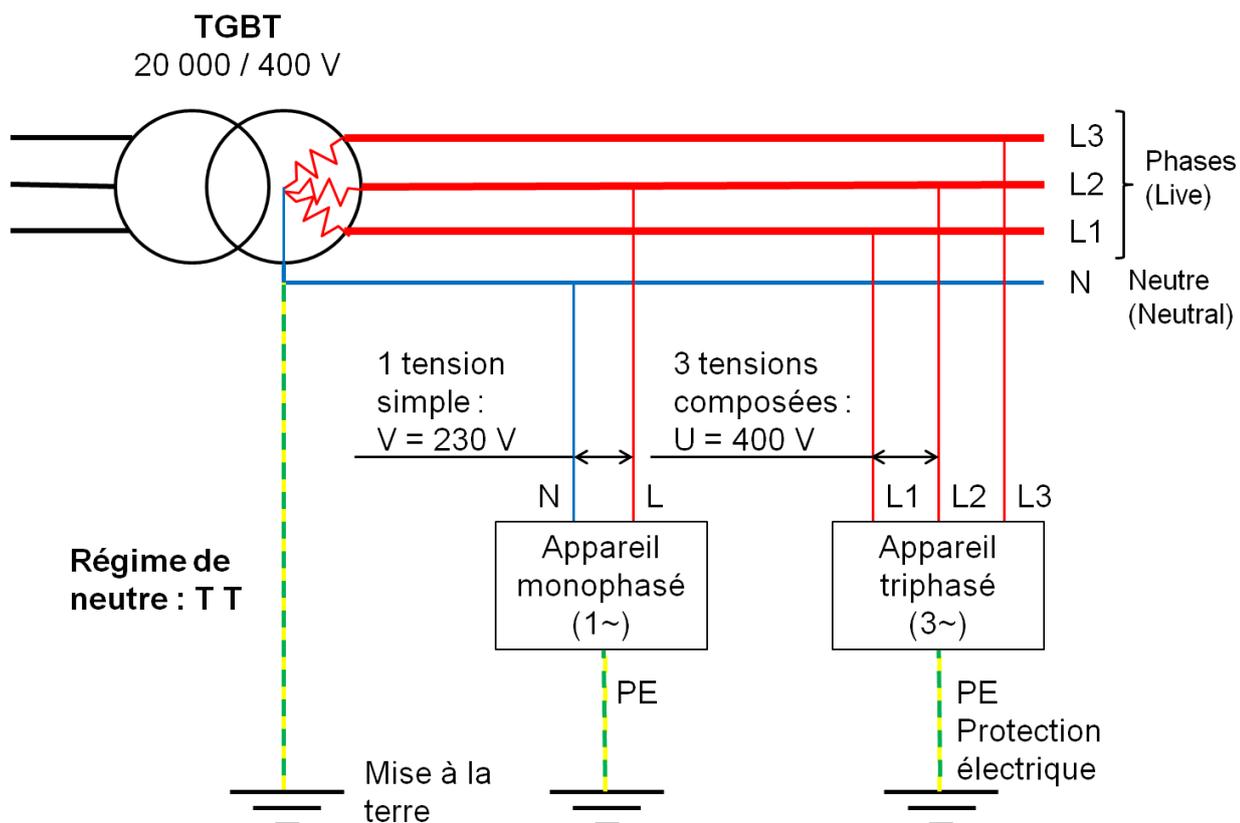


## 6.6. LES RÉSEAUX DE BASSE TENSION

### 6.6.1. ARCHITECTURE DES RÉSEAUX

Selon le nombre de conducteurs actifs, on distingue :

Nombre de fils	Type réseau	Composition	Tensions disponibles
2	Monophasé	Une phase + le neutre	$V = 230 \text{ [V]}$
3	Triphasé sans neutre	Trois phases	$U = 400 \text{ [V]}$
4	Triphasé avec neutre	Trois phases + le neutre	$V = 230 \text{ [V]}$ $U = 400 \text{ [V]}$



Le secondaire du TGBT est composé de trois bobinages connectés en étoile.

- Le point commun des trois bobinages est le neutre,
- Les trois extrémités libres sont les trois phases.

Sauf exceptions (quelques industries spécifiques), le régime de neutre est le TT :

- Neutre mis à la terre,
- Masse des appareils mis à la terre.

### 6.6.2. COULEURS NORMALISÉES DES CONDUCTEURS

La norme NF C 15-100 régit l'ensemble de la distribution basse tension :

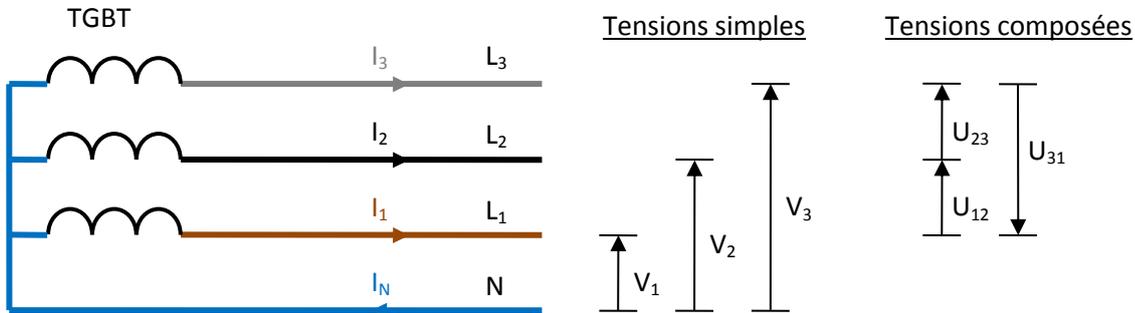
- Phases : L1 – Marron, L2 – Noir, L3 - Gris (Rouge en monophasé)
- Neutre : Bleu
- Protection électrique : Jaune + vert



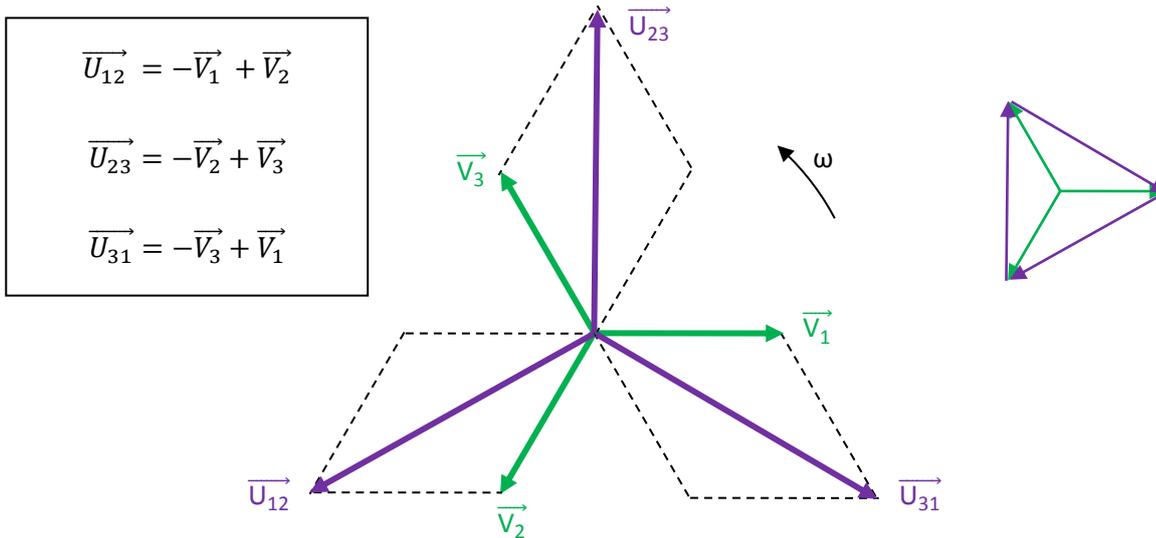
### 6.6.3. LES TENSIONS

Un réseau complet, triphasé avec neutre, délivre 6 tensions différentes :

- 3 tensions simples entre une phase et le neutre :  $V_1, V_2, V_3$  (230 V)
- 3 tensions composées entre deux phases :  $U_{12}, U_{23}, U_{31}$  (400 V)



Les 3 tensions simples sont déphasées entre elles de  $120^\circ$ . Les tensions composées sont obtenues par addition vectorielle :



Les tensions composées sont aussi déphasées entre elles de  $120^\circ$ . Elles sont déphasées de  $30^\circ$  en retard par rapport aux tensions simples.

Relation physique entre U et V :

$$U_{23} = 2 \cdot (V_3 \cdot \cos 30) = 2 \cdot V_3 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$U = \sqrt{3} \cdot V$$



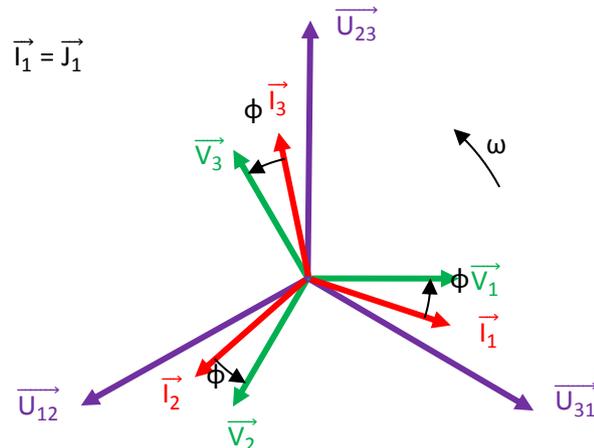
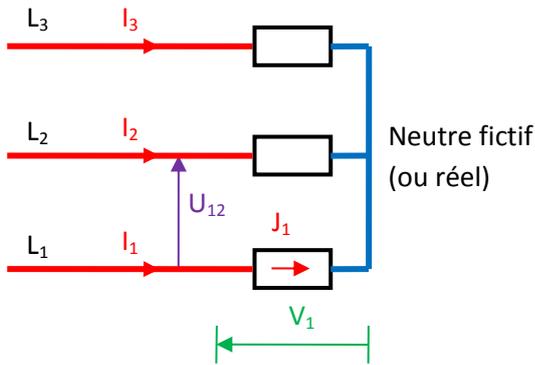
### 6.6.4. INTENSITÉS ET PUISSANCES EN TRIPHASÉ ÉQUILIBRÉ

Un appareil triphasé se compose de 3 dipôles identiques, connectés en étoile ou en triangle.

- Raccordement en étoile :

Le centre de l'étoile recrée un neutre fictif (ou réel).

L'intensité dans chaque ligne  $I_l$  est égale à l'intensité dans les dipôles  $J$ . Elle est déphasée par rapport la tension simple  $V$  d'un même angle  $\varphi$ .



$$P = 3 \cdot V \cdot J \cdot \cos \phi$$

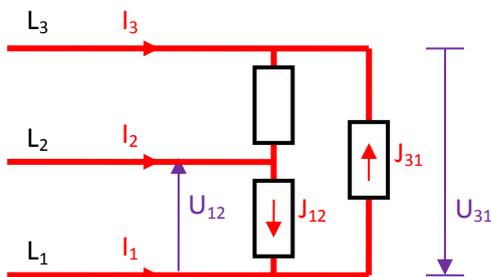
$$P = 3 \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot I \cdot \cos \phi$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi$$

- Raccordement en triangle :

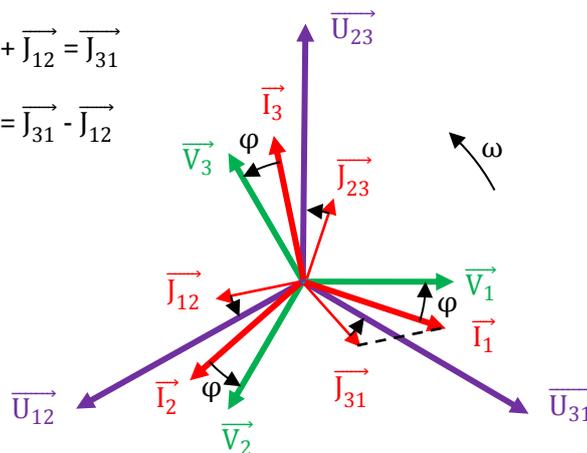
Chaque dipôle reçoit une tension composée  $U$ .

L'intensité dans chaque dipôles  $J$  est déphasée par rapport la tension composée  $U$  d'un même angle  $\varphi$ . L'intensité dans chaque ligne  $I$ , est égale à  $J/\sqrt{3}$  et est déphasée par rapport la tension simple  $V$  du même angle  $\varphi$ .



$$\vec{I}_1 + \vec{J}_{12} = \vec{J}_{31}$$

$$\vec{I}_1 = \vec{J}_{31} - \vec{J}_{12}$$



$$P = 3 \cdot U \cdot J \cdot \cos \phi$$

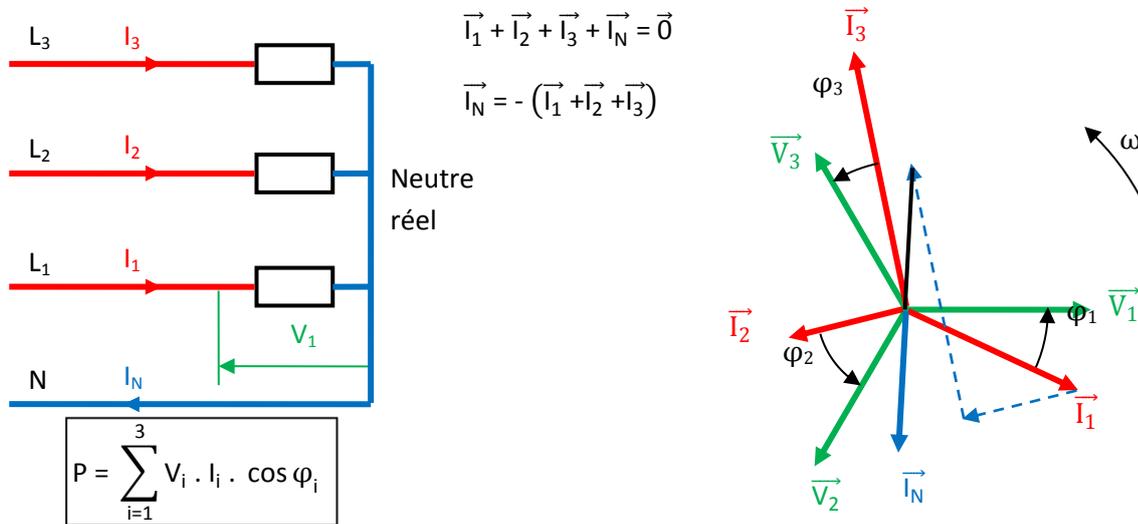
$$P = 3 \cdot U \cdot \frac{I}{\sqrt{3}} \cdot \cos \phi$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi$$



### 6.6.5. INTENSITÉS ET PUISSANCES EN TRIPHASÉ DÉSÉQUILIBRÉ

Le réseau triphasé avec neutre qui alimente des appareils monophasés différents sur chaque phase est déséquilibré. Les intensités dans les phases sont différentes ou les déphasages sont différents. Plus le déséquilibre entre est important et plus l'intensité dans le neutre est élevée.



La puissance du réseau est égale à la somme des puissances sur chaque phase.

Afin de transporter la puissance maximale avec l'intensité disponible et de réduire l'intensité dans le neutre, on veille toujours à répartir équitablement les récepteurs sur les trois phases.

### 6.6.6. INTÉRÊT PRINCIPAL DU TRIPHASÉ

Comparons les intensités et les sections de conducteur, dans un réseau monophasé et un réseau triphasé équilibré transportant la même puissance électrique.

- Réseau monophasé :

$$I_{\text{mono}} = \frac{P}{V \cdot \cos \varphi}$$

Deux conducteurs de section  $S_1$  sont nécessaires, d'où la section totale :  $S_{\text{mono}} = 2 \cdot S_1$

- Réseau triphasé équilibré :

$$I_{\text{tri}} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot (\sqrt{3} \cdot V) \cdot \cos \varphi} = \frac{P}{3 \cdot V \cdot \cos \varphi} = \frac{I_{\text{mono}}}{3}$$

La section des conducteurs étant proportionnelle à l'intensité, on a besoin de conducteurs de section :  $S_2 = S_1 / 3$

Trois conducteurs de section  $S_2$  sont nécessaires, d'où :

$$S_{\text{tri}} = 3 \cdot S_2 = 3 \cdot (S_1 / 3) = S_1$$

Pour transporter la même puissance, le réseau triphasé demande 2 fois moins de matière.



## 7. LES MACHINES À COURANT ALTERNATIF

### 7.1. LA MACHINE SYNCHRONE<sup>6</sup>

Une machine synchrone est une machine à courant alternatif pour laquelle la vitesse de rotation de l'arbre est égale à la vitesse de rotation du champ tournant.

Un champ magnétique invariable peut, en tournant, entraîner à la même vitesse que lui, une aiguille aimantée, un aimant ou un électroaimant (alimenté en continu) : c'est le principe du moteur synchrone. Une machine synchrone est composée de 2 éléments majeurs :

- Le stator, souvent le bâti de la machine, siège du courant induit. C'est aussi le siège de forces électromotrices.
- Le rotor, la partie mobile étant l'inducteur.

Dans les moteurs synchrones, le rotor est constitué soit d'un aimant permanent soit d'une bobine alimentée en courant continu via des balais. Le champ magnétique du rotor suit très précisément la rotation du champ magnétique tournant créé par les 3 bobines du stator, alimentées par du courant alternatif.

La vitesse de rotation  $n$  du rotor dépend directement de la fréquence  $f$  de la tension d'alimentation, on parle de vitesse de synchronisme.

$$f = p \cdot n$$

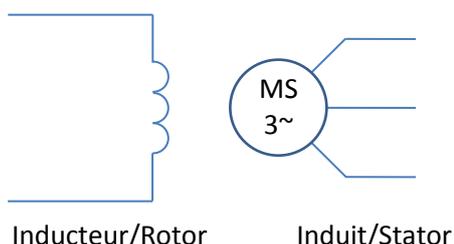
Avec :

- $f$  : fréquence en Hertz (rappel :  $f = \frac{\omega}{2\pi}$ )
- $p$  : nombre de paires de pôles
- $n$  : fréquence de rotation en tr/s

Si la fréquence  $f = 50$  Hz, les vitesses synchrones possibles sont :

$p$	$n$ [tr/s]	$N$ [tr/min]
1	50	3000
2	25	1500
3	16,67	1000
4	12,5	750

#### Schéma d'une machine synchrone triphasée



La machine synchrone peut-fonctionner aussi bien en moteur synchrone ou génératrice synchrone (alternateur).

#### 7.1.1. L'ALTERNATEUR TRIPHASÉ

Un alternateur triphasé permet de convertir une puissance mécanique en puissance électrique.

##### 7.1.1.1. L'INDUCTEUR

L'inducteur est la partie tournante de l'alternateur c'est-à-dire le rotor. Pour que l'alternateur puisse fonctionner, il faut que le rotor se comporte comme un aimant.

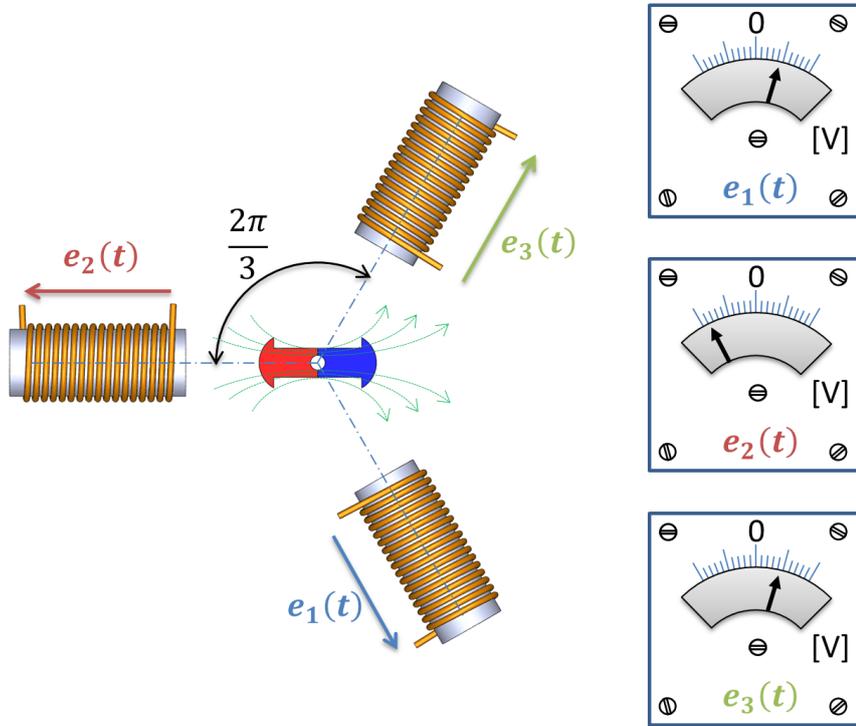
Ainsi, l'inducteur est :

<sup>6</sup> Fisik.free.fr



- Soit un aimant permanent,
- Soit on crée artificiellement un aimant en alimentant l'inducteur avec une alimentation continue.
- Si on ne dispose pas d'une alimentation continue externe pour alimenter l'inducteur, on crée l'alimentation directement avec la machine; on parle alors de machine auto-excitée.

### 7.1.1.2. L'INDUIT



L'induit est la partie fixe de l'alternateur c'est-à-dire le stator. L'induit est composé de 3 bobines (donc 3 paires de pôles) chacune décalées entre-elles de  $\frac{2\pi}{3}$

Le rotor (aimant naturel ou artificiel) crée le flux  $\phi$ . Lorsque le rotor tourne, chaque bobine est soumise à un flux magnétique variable et il se crée alors une tension alternative sinusoïdale  $e(t)$  aux bornes de chaque enroulement du stator. On montre que la tension  $e(t)$  a pour valeur efficace :

$$E = K \cdot N \cdot f \cdot \phi$$

Avec :

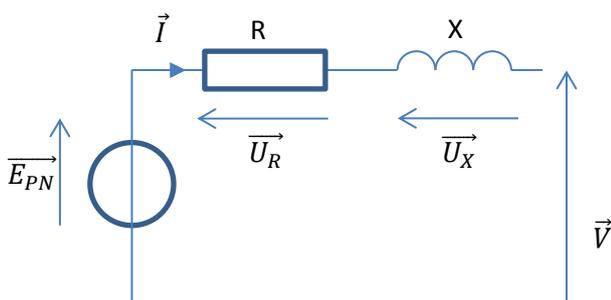
- E en [V]
- K : coefficient de Kapp
- N : nombre de conducteurs d'une phase
- f en [Hz]
- $\phi$  : flux maximal pour une spire en Weber [Wb]

Comme  $f = p \cdot n$  alors  $E = K \cdot N \cdot p \cdot n \cdot \phi$

Si on utilise une alimentation continue pour alimenter l'inducteur, on montre que la tension E est aussi proportionnelle au courant d'excitation  $i_E$ .

### 7.1.1.3. MODÈLE ÉQUIVALENT D'UNE PHASE DE L'ALTERNATEUR

Pour étudier l'alternateur triphasé, on modélise une phase de l'alternateur par une f.e.m  $E_{PN}$  en série avec une résistance R et une réactance synchrone  $X = L\omega$ .



Équation de fonctionnement pour une phase :

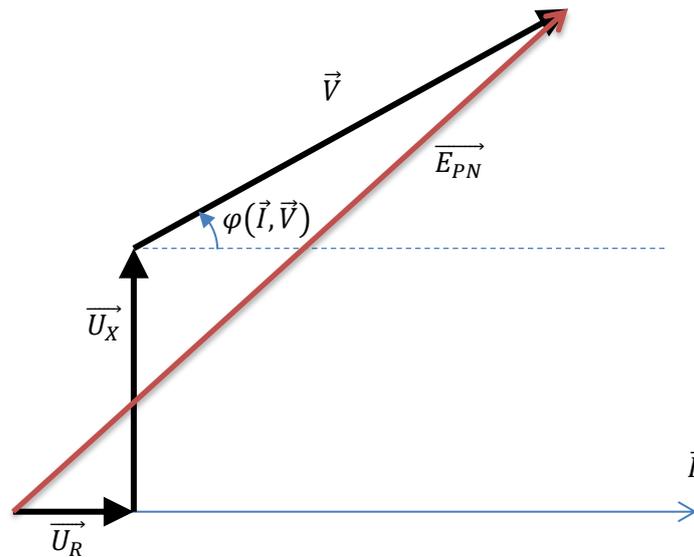
$$\vec{E}_{PN} = \vec{U}_R + \vec{U}_X + \vec{V}$$

Avec :

$$\vec{U}_R \left| \begin{array}{l} U_R = R \cdot I \\ \varphi(\vec{I}, \vec{U}_R) = 0^\circ \end{array} \right. ; \vec{U}_X \left| \begin{array}{l} U_X = X \cdot I = L \cdot \omega \cdot I \\ \varphi(\vec{I}, \vec{U}_X) = +90^\circ \end{array} \right.$$



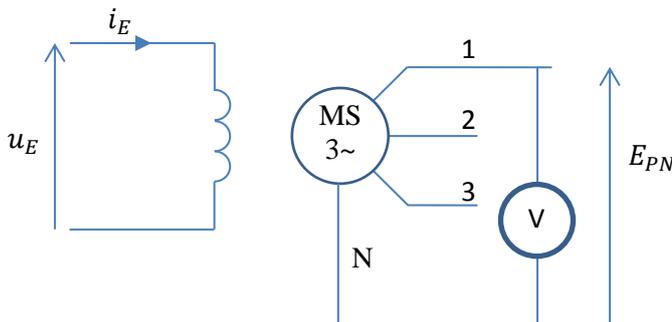
Diagramme synchrone d'une phase ( $I$  est pris comme référence)



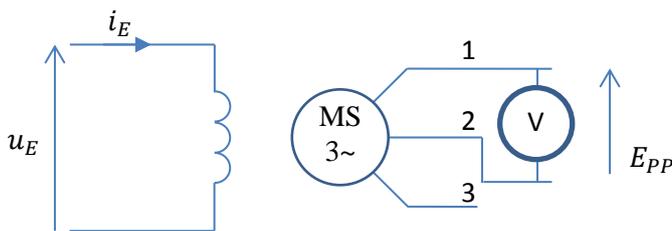
**7.1.1.4. DÉTERMINATION DES ÉLÉMENTS DU MODÈLE D'UNE PHASE**

**a) Détermination de la tension  $E_{PN}$  (réalisé par un essai à vide)**

Pour ce qui suit, les enroulements du stator sont couplés en étoile.



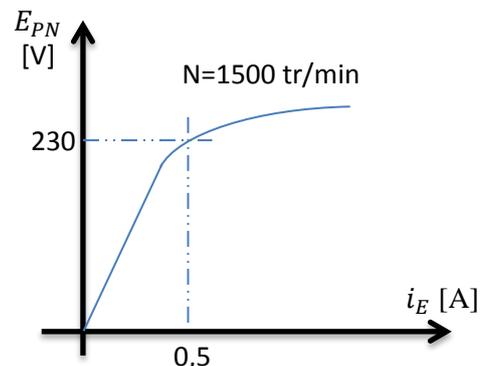
Si les enroulements du stator sont couplés en étoile et que le fil de neutre est sorti, on peut mesurer directement la tension  $E_{PN}$  pour une vitesse  $n$  donnée.



Si le fil de neutre n'est pas sorti, on mesure la tension entre phases  $E_{PP}$  :

Dans ce cas, la tension  $E_{PN}$  est :  $E_{PN} = \frac{E_{PP}}{\sqrt{3}}$

Pour une valeur fixe de la vitesse de rotation  $n$ , la caractéristique  $E_{PN}(i_E)$  est la suivante :

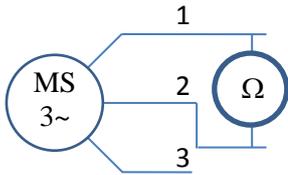


On admet que la tension  $E_{PN}$  ne dépend que de l'intensité du courant d'excitation  $i_E$ .



**b) Détermination de la résistance R**

On peut pour cela utiliser une méthode voltampèremétrique ou brancher un ohmmètre entre deux phases de l'alternateur (cet essai se fait hors-tension):



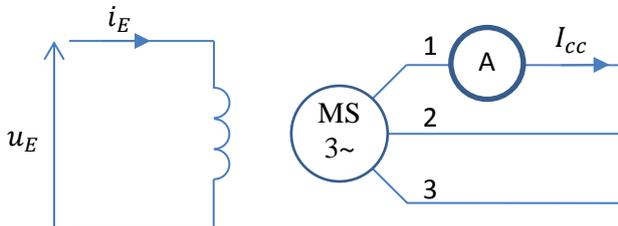
L'ohmmètre mesure la résistance  $r$  de deux enroulements. La résistance  $R$  d'un enroulement est  $R=r/2$

La résistance  $R$  est souvent négligeable devant la réactance synchrone  $X$ .

**c) Détermination de la réactance synchrone  $X = L\omega$  (réalisé par un essai en court-circuit)**

Pour cet essai, la vitesse de rotation du rotor est  $n$ . Pour cette vitesse de rotation  $n$  et pour  $i_E$  connu, on connaît la tension  $E_{PN}$  déterminée lors de l'essai à vide.

On court-circuite les 3 phases du stator et on mesure l'intensité de court-circuit  $I_{CC}$ .



On détermine alors la valeur de  $X$  par :

$$X = \sqrt{\left(\frac{E_{PN}}{I_{CC}}\right)^2 - R^2}$$

On montre aussi que  $I_{CC} = k \cdot i_E$ .

**7.1.1.5. BILAN ÉNERGÉTIQUE**

Si l'alternateur est auto-excité ou à aimant permanent, le terme  $(u_E \cdot i_E)$  est à enlever des relations suivantes.

**Puissance absorbée  $P_A$  :**

Pour entraîner l'alternateur, il faut lui fournir la puissance mécanique  $P_M = C_M \cdot \omega$

- $C_M$  est le moment du couple utile [N.m] et  $\omega$  la vitesse angulaire de l'arbre du moteur [rad.s<sup>-1</sup>]
- Si  $n$  est exprimé en [tr.s<sup>-1</sup>] alors  $\omega = 2\pi n$
- Si  $N$  est exprimé en [tr.min<sup>-1</sup>] alors  $\omega = \frac{2\pi}{60} \cdot N$

L'alimentation de l'excitation absorbe la puissance  $P_{ex} = u_E \cdot i_E$

Remarque : Si l'alternateur est auto-excité ou à aimant permanent,  $P_{ex} = 0$

La puissance absorbée est donc égale à  $P_A = P_M + P_{ex}$  soit  $P_A = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot C_M + u_E \cdot i_E$

**Puissance utile  $P_U$  :**

L'alternateur alimente une charge triphasée équilibrée qui a pour facteur de puissance  $\cos\varphi$ , qui absorbe une intensité  $I$  et qui est alimenté par une tension entre phases (ou tension composée)  $U$ .

La puissance utile est donc :  $P_u = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi$



**Les différentes pertes de l'alternateur :**

- Les pertes par effet Joule dans l'inducteur

$$P_{J_{ex}} = u_E \cdot i_E$$

- Les pertes par effet Joule dans l'induit :

Si R est la résistance d'une phase du stator et I l'intensité en ligne :  $P_{J_S} = 3R \cdot I^2$

Si r est la résistance mesurée entre deux bornes du stator  $P_{J_S} = \frac{3}{2} r \cdot i^2$

- Les pertes dites « constantes »  $P_C$

Ces pertes sont déterminées lors de l'essai à vide et représentent les pertes mécaniques et magnétiques de l'alternateur.

- Rendement de l'alternateur :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} ; \eta = \frac{U \cdot I \sqrt{3} \cdot \cos \varphi}{U \cdot I \sqrt{3} \cdot \cos \varphi + u_E \cdot i_E + \frac{3}{2} r \cdot i^2 + P_C}$$

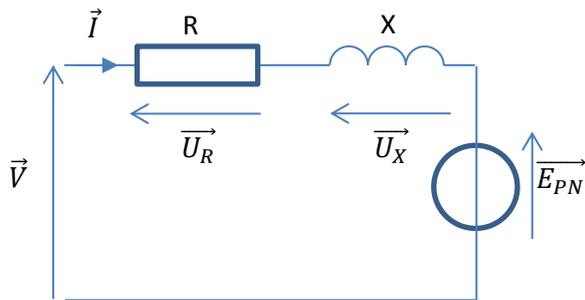
**7.1.2. LE MOTEUR SYNCHRONE**

Le moteur synchrone converti la puissance électrique en puissance mécanique. Pendant longtemps, ce moteur fût relativement peu utilisé en raison de sa difficulté à réguler sa vitesse. Ce problème est maintenant résolu grâce au progrès de l'électronique de puissance et des onduleurs qui lui sont associés.

Le stator de la machine est alimenté en triphasé ; il se crée alors un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation  $n = \frac{f}{p}$  ce qui fait que le rotor de la machine tourne lui-aussi à la fréquence de rotation n.

Comme pour l'alternateur, on modélise une phase du moteur par les éléments  $E_{PN}$ , R, X et V.

**7.1.2.1. MODÈLE D'UNE PHASE D'UN MOTEUR SYNCHRONE**



La relation entre les différentes tensions est :

$$\vec{V} = \vec{U}_R + \vec{U}_X + \vec{E}_{PN}$$

Avec :

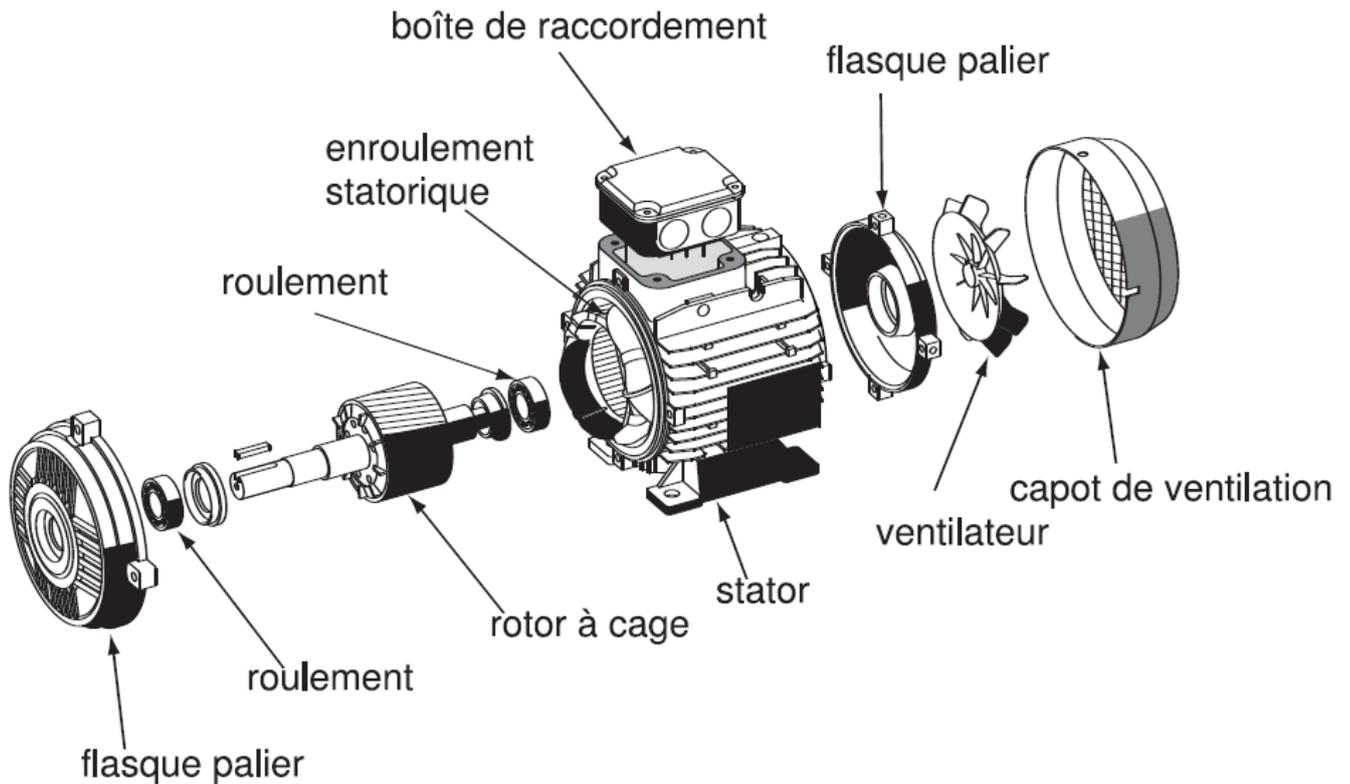
$$\vec{U}_R \left| \begin{matrix} U_R = R \cdot I \\ \varphi(\vec{I}, \vec{U}_R) = 0^\circ \end{matrix} \right. ; \vec{U}_X \left| \begin{matrix} U_X = X \cdot I = L \cdot \omega \cdot I \\ \varphi(\vec{I}, \vec{U}_X) = +90^\circ \end{matrix} \right.$$

**7.1.2.2. RENDEMENT D'UN MOTEUR SYNCHRONE :**

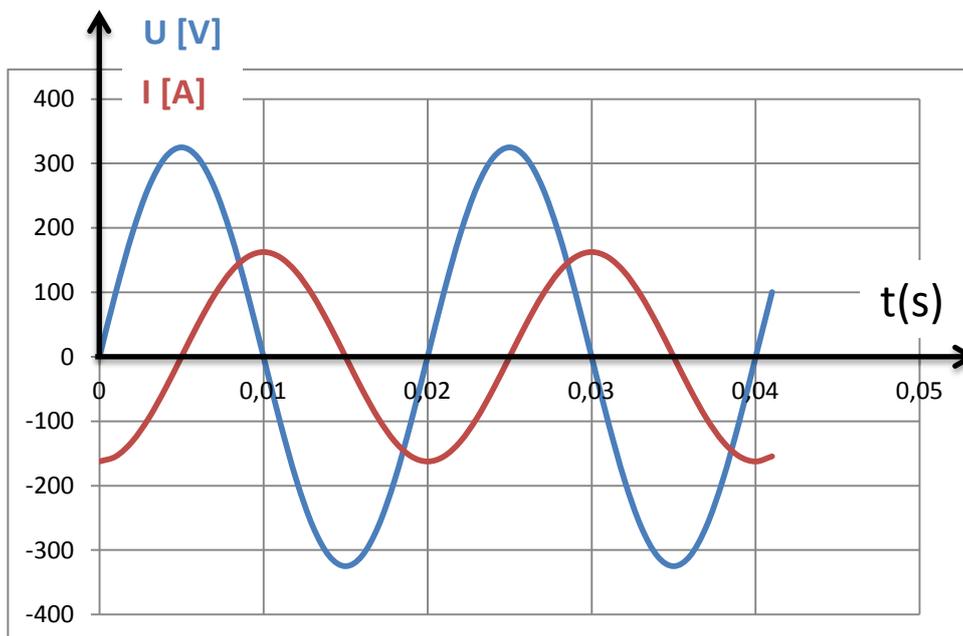
Le rendement d'un moteur synchrone est  $\eta = \frac{P_u}{P_a} ; \eta = \frac{C_u \cdot \omega}{U \cdot I \sqrt{3} \cdot \cos \varphi}$



## 7.2. LE MOTEUR ASYNCHRONE



Le moteur asynchrone est alimenté par une tension alternative monophasée ou triphasée. Que ce soit en monophasé ou triphasé le principe de fonctionnement du moteur reste le même.



Une bobine alimentée par une tension alternative crée un champ magnétique dont le sens et l'intensité dépendent du sens du courant et de son intensité. La présence de la bobine provoque un déphasage d' $1/4$  de période entre le courant et la tension (le courant est en retard par rapport à la tension) : le champ est maximal quand l'intensité du courant est maximale (ce qui correspond à une tension nulle).

### 7.2.1. VITESSE DE SYNCHRONISME ET MOTEUR ASYNCHRONE

Si on place plusieurs bobine autour d'un rotor métallique et que ces bobines créent un champ magnétique déphasé l'un par rapport à l'autre, le champ résultant est animé d'un mouvement de rotation.



La vitesse de rotation du champ magnétique est appelée vitesse de synchronisme. Le rotor cherche en permanence à s'aligner avec le champ magnétique mais est toujours légèrement en retard. Le rotor ne tourne pas exactement à la même vitesse de synchronisme : le moteur est asynchrone.

### 7.2.2. DEUX TYPES DE MOTEURS ASYNCHRONES

Selon le réseau de distribution électrique et l'usage que l'on souhaite en faire, on utilisera un moteur asynchrone monophasé ou triphasé.

### 7.2.3. LE MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASÉ

Les moteurs monophasés se rencontrent principalement dans des applications et installations domestiques et tertiaires qui ne disposent pas d'un réseau de distribution triphasé (appareils électroménagers, ventilateurs...).

En comparaison avec les moteurs triphasés, à puissance égale, les moteurs monophasés sont plus volumineux et plus onéreux. Ils développent une puissance plus faible (5 kW maximum) et un facteur de puissance plus défavorable.

#### 7.2.3.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Comme tout moteur le moteur monophasé est constitué d'un stator et d'un rotor animé en rotation par un champ magnétique tournant. Cependant la rotation du champ magnétique doit être ici provoquée par un dispositif annexe.



#### 7.2.3.2. CRÉER UN CHAMP MAGNÉTIQUE TOURNANT EN MONOPHASÉ

Le champ magnétique créé par l'alimentation monophasée dans un seul enroulement statorique a une amplitude qui varie mais il ne tourne pas et la rotation du rotor placé dedans ne pourra pas démarrer.

Deux méthodes principales sont utilisées :

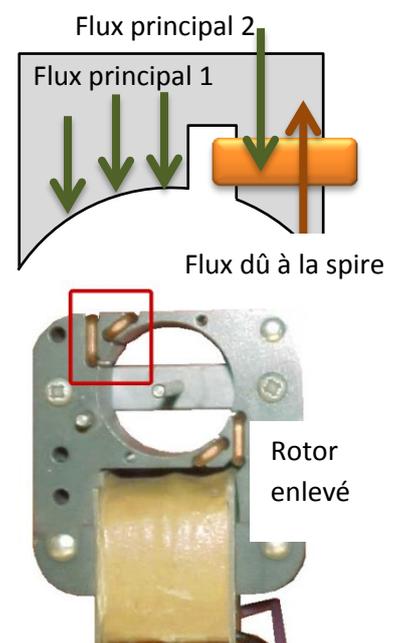
- La spire de FRAGER,
- Ajout d'une seconde bobine et d'un condensateur de déphasage.

#### 7.2.3.3. SPIRE DE FRAGER

Ce type de moteur est également appelé moteur à pôles fendus. Chaque pôle comporte une encoche qui délimite deux moitiés, l'une d'elles étant entourée d'une spire de cuivre fermée sur elle-même (spire de FRAGER).

Le courant induit dans cette spire ajoute son action magnétisante à celle du courant parcourant le circuit principal. Le déphasage qui en résulte suffit à privilégier un sens de rotation : le rotor passe devant le demi-pôle non pourvu de spire avant de passer devant l'autre.

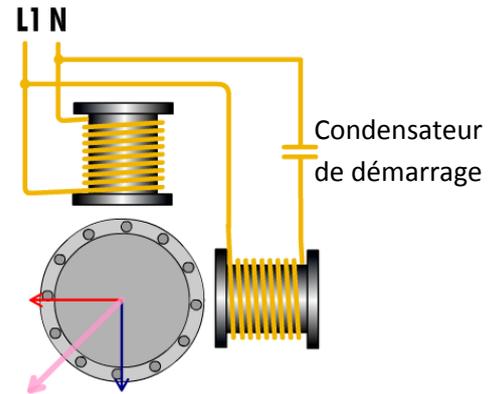
Cette technique est utilisée dans les moteurs de faible puissance (moins de 200 W).



### 7.2.3.4. ENROULEMENT ET CONDENSATEUR DE DÉMARRAGE

Dans les moteurs industriels on installe dans le stator un second enroulement perpendiculaire à l'enroulement principal alimenté en série avec un condensateur.

Pour augmenter le couple au démarrage il faut augmenter la capacité du condensateur ou en mettre un deuxième en parallèle du premier et le déconnecter une fois que le rotor tourne.

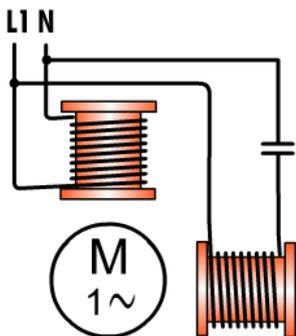


Champ résultant

### 7.2.3.5. TYPES DE MOTEURS À ENROULEMENT AUXILIAIRE

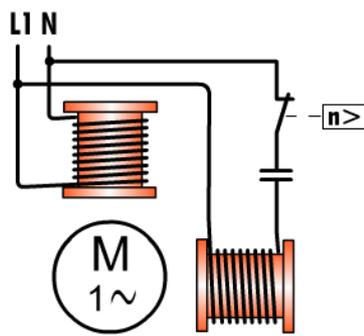
Selon l'usage prévu il existe trois types de moteurs monophasés à enroulement auxiliaire :

#### Condensateur permanent



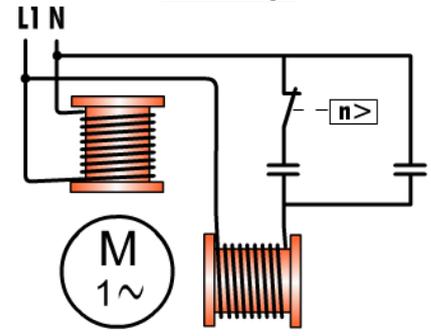
Le condensateur permanent assure le déphasage. La bobine auxiliaire participe en permanence à la rotation du champ magnétique. Le couple d'entraînement est régulier mais le couple de démarrage est plus faible.  
Usage : bétonneuse,...

#### Condensateur de démarrage



La bobine auxiliaire est sollicitée pendant la phase de démarrage puis est mise hors circuit par un relais électronique ou un capteur centrifuge avant que le moteur développe son couple maximal. Ensuite le rotor est entraîné par son inertie.  
Usage : machine à couple résistant élevé, compresseur,...

#### Condensateur permanent et de démarrage

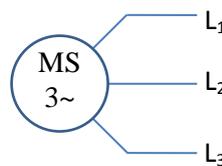


Un condensateur de démarrage est couplé au condensateur permanent pendant la phase de démarrage. Ce type de moteur présente un couple nominal et un couple de démarrage élevé.

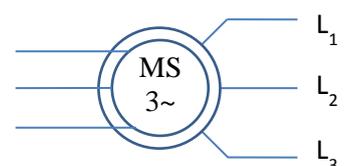
### 7.2.4. LE MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ

Le moteur asynchrone triphasé est l'actionneur électrique le plus fréquemment employé dans les applications industrielles.

Ce moteur est capable de développer de fortes puissances mécaniques (jusqu'à 5000 kW) et on le rencontre aussi bien dans l'industrie sidérurgique, que dans le traitement des eaux, les applications avec variations de vitesse...



Moteur à cage d'écureuil



Moteur à rotor bobiné



### 7.2.4.1. LE STATOR

Le stator est composé de 3 bobines (3 paires de pôles) alimentées par un système de tension triphasées de fréquence  $f$ .

Ces bobines créent un champ magnétique tournant à la pulsation de synchronisme  $\omega_s$  qui se répartit sinusoidalement dans l'entrefer (espace entre le rotor et le stator) de la machine.

$$\omega_s = \frac{\omega}{p}$$

Avec :

- $\omega = 2\pi \cdot f$
- $p$  : nombre de paires de pôles
- $\omega_s$  : vitesse angulaire en rad/s

La vitesse de rotation synchrone  $n_s$  du champ magnétique tournant est :

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

Avec :

- $f$  en Hertz
- $p$  : nombre de paires de pôles
- $n_s$  en tr/s

Si la fréquence  $f = 50$  Hz, les vitesses synchrones possibles sont :

$p$	$n$ [tr/s]	$N$ [tr/min]
1	50	3000
2	25	1500
3	16,67	1000
4	12,5	750

### 7.2.4.2. LE ROTOR

Le rotor du moteur asynchrone triphasé peut-être « à cage d'écureuil » ou bobiné. Le rotor ne possède aucune liaison électrique avec le stator. Le rotor constitue un circuit électrique fermé où se crée des courants induits qui entraînent la mise en rotation du rotor. Le rotor tourne à la vitesse de rotation  $n$  qui est inférieure à la vitesse synchrone.

On dit que le rotor glisse par rapport au champ magnétique tournant; on parle alors de glissement qui dépend de la charge.

On définit le glissement par  $g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$  (sans unité ou en %)

### 7.2.4.3. PLAQUE SIGNALÉTIQUE ET COUPLAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ

#### a) La plaque signalétique

4 pôles ; 4,4 kW  
230V / 400 V ; 16,3 A / 9,4 A  
50 Hz ; 1420 tr/min ;  $\cos \varphi = 0,85$

Ces indications correspondent aux grandeurs nominales du moteur.

- La puissance indiquée représente la puissance mécanique utile PU.
- La vitesse de rotation est  $N = 1420$  tr/min.
- La vitesse synchrone  $n_s$  est la vitesse immédiatement supérieure
- (voir tableau) soit  $n_s = 1500$  tr/min.

On retrouve  $p = 2$  soit 4 pôles magnétiques.



**b) Couplage du stator**

Sur la plaque signalétique, la tension la plus faible représente la tension nominale aux bornes d'un enroulement du stator. Le couplage du moteur dépend du réseau triphasé dont on dispose.

Sur le réseau triphasé V / U (V : tension simple ; U : tension composée), ce moteur sera couplé :

- en étoile (Y) si la tension aux bornes d'un enroulement correspond à la tension V.
- en triangle (D ou Δ) si la tension aux bornes d'un enroulement correspond à la tension U.

Pour notre exemple :

- sur le réseau 130 V / 230 V : le stator sera couplé en triangle.
- sur le réseau 230 V / 400 V : le stator sera couplé en étoile.

Les intensités 16,3 A / 9,4 A correspondent à l'intensité I en ligne suivant le couplage choisit.

Si le stator est couplé en triangle, chaque enroulement est traversé par l'intensité  $J = \frac{I}{\sqrt{3}} = \frac{16,3}{\sqrt{3}} = 9,4 \text{ A}$

Si le stator est couplé en étoile, chaque enroulement est traversé par l'intensité en ligne  $I=9,4 \text{ A}$

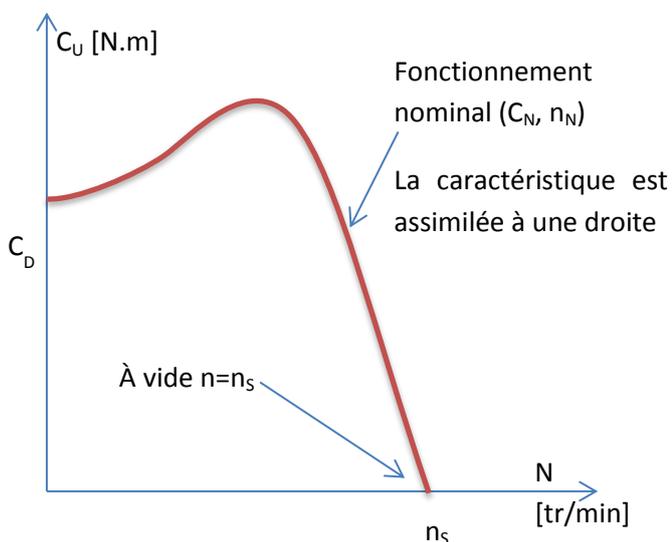
**7.2.4.4. FONCTIONNEMENT DU MOTEUR**

**a) Fonctionnement à vide :**

Lorsque le moteur fonctionne à vide (pas de charge couplée au moteur), sa vitesse de rotation  $n_0$  est proche de la vitesse de synchronisme  $n_s$ . On considère que  $g=0$  et  $n_0 = n_s$

Le facteur de puissance à vide ( $\cos\varphi_0 < 0,2$ ) est faible mais pas l'intensité à vide  $I_0$ . Ce courant sert à créer le champ magnétique tournant, on parle alors de courant magnétisant.

**b) Fonctionnement en charge**



Au voisinage du point de fonctionnement, on assimile la caractéristique  $C_U(n)$  à une droite telle que :  $C_U = a.n + b$

Les coefficients a et b se trouvent en utilisant deux points de la caractéristique.

Le premier est le fonctionnement à vide

$$\begin{cases} C_U = 0 \\ n = n_s \end{cases}$$

Le deuxième est le fonctionnement nominal

$$\begin{cases} C_U = C_N \\ n = n_N \end{cases}$$

On montre aussi que dans la partie linéaire, le moment du couple utile est proportionnel au glissement g.

$$C_U = k.g$$

Avec :

- $C_U$  : couple utile en [N.m]
- g : glissement
- k : coefficient de proportionnalité en [N.m]



#### 7.2.4.5. DÉMARRAGE MOTEUR

Lors du démarrage d'un moteur asynchrone triphasé, le courant de démarrage est très important (4 à 8 fois l'intensité nominale). Pour ne pas détériorer le moteur, on réduit le courant de démarrage en effectuant :

- une tension réduite puis sous tension nominale : démarrage étoile triangle.
- une tension réduite puis progressivement la tension nominale : utilisation d'un autotransformateur.

Pour les moteurs à rotor bobiné, on peut ajouter des résistances en série avec le rotor pour diminuer les intensités des courants rotoriques ou encore utiliser un onduleur.

#### 7.2.4.6. BILAN DES PUISSANCES

##### a) Puissance absorbée $P_a$

Le moteur reçoit la puissance électrique  $P_a = U \cdot I \sqrt{3} \cdot \cos \varphi$  quelque-soit le couplage. Cette puissance est transmise au stator de la machine qui est le siège de deux types de pertes.

##### b) Pertes par effet Joules au stator $P_{JS}$

Les deux types de pertes au stator sont :

Les pertes par effet Joule  $P_{JS}$  : Si on appelle  $r$  la résistance d'un enroulement et  $I$  l'intensité en ligne,

- si le moteur est couplé en étoile,  $P_{JS} = 3r \cdot I^2$
- si le moteur est couplé en triangle,  $P_{JS} = r \cdot I^2$

Si on appelle  $R$ , la résistance mesurée entre deux bornes du stator, quel que soit le couplage du stator, les pertes par effet Joules sont :  $P_{JS} = \frac{3}{2} R \cdot I^2$

##### c) Les pertes fer au stator $P_{FS}$

Ces pertes ne dépendent que de la tension  $U$  et de la fréquence  $f$ , elles sont considérées comme constantes si le moteur est branché sur le réseau triphasé.

##### d) Puissance transmise au rotor $P_{TR}$

La puissance transmise au rotor est :  $P_{TR} = P_a - P_{JS} - P_{FS}$

Cette puissance  $P_{TR}$  crée le couple électromagnétique

$$C_{EM} = \frac{P_{TR}}{\omega_S}$$

Avec :

- $P_{TR}$  en [W]
- $\omega_S$  en [rad/s]
- $C_{EM}$  en [N.m]

Cette puissance est transmise du stator au rotor. Le rotor est lui aussi soumis au couple  $C_{EM}$  mais tourne à la vitesse  $\omega$ .

##### e) Pertes par effet Joule $P_{JR}$ et pertes fer $P_{FR}$ au rotor

Les pertes fer au rotor sont souvent négligeables :  $P_{FR} \approx 0$

On montre alors que les pertes par effet Joule au rotor sont  $P_{JR} = g \cdot P_{TR}$

On ne peut que calculer ces pertes, elles ne sont pas mesurables car le rotor est court-circuité.



f) **Puissance disponible au rotor  $P_R$**

$$P_R = C_{EM} \cdot \omega \text{ et } C_{EM} = \frac{P_{TR}}{\omega_S} \text{ d'où } P_R = \frac{P_{TR} \cdot \omega}{\omega_S} \text{ soit } P_R = (1 - g) \cdot P_{TR}$$

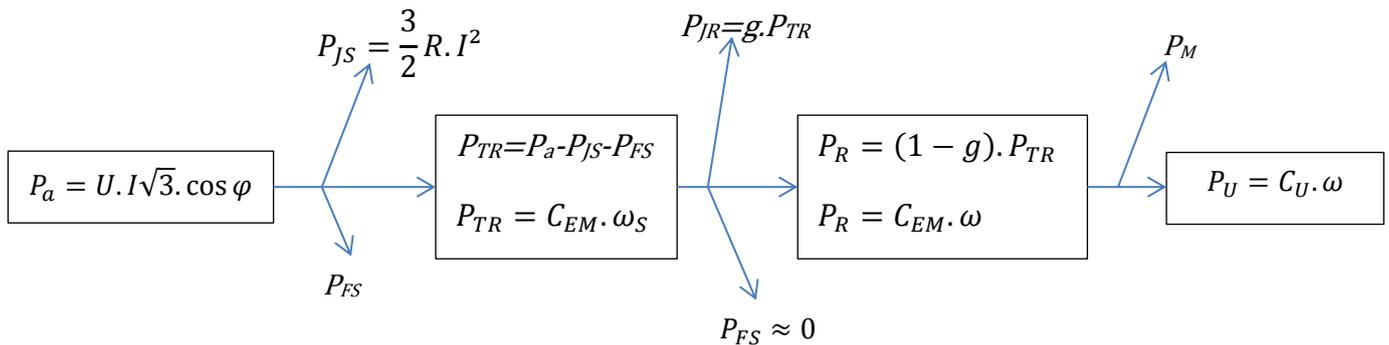
Le rotor étant constitué de conducteurs qui possèdent une résistance, ils sont le siège de pertes par effet Joule ainsi que de pertes magnétiques.

g) **Pertes mécanique  $P_M$  et puissance utile  $P_U$ .**

Le rotor est fixé à l'arbre du moteur par l'intermédiaire de roulements, il y a donc des pertes mécanique  $P_M$

$$P_U = P_R - P_M$$

7.2.4.7. **RENDEMENT  $\eta$  DU MOTEUR ASYNCHRONE**



Le rendement du moteur asynchrone est :  $\eta = \frac{P_U}{P_a}$

7.2.4.8. **Pertes collectives  $P_C$**

Lors d'un essai à vide, le moteur absorbe la puissance  $P_{a0} = U \cdot I_0 \sqrt{3} \cdot \cos \varphi_0 = P_{JS} + P_{FS} + P_{JR} + P_{FR} + P_M + P_U$

Or à vide  $g \approx 0 \rightarrow P_{JR} = 0 ; P_U = 0$  et  $P_{FR} \approx 0 ; P_{JR} = \frac{3}{2} R \cdot I_0^2$

Le bilan des puissances à vide s'écrit  $P_{a0} = \frac{3}{2} R \cdot I_0^2 + P_{FS} + P_M$

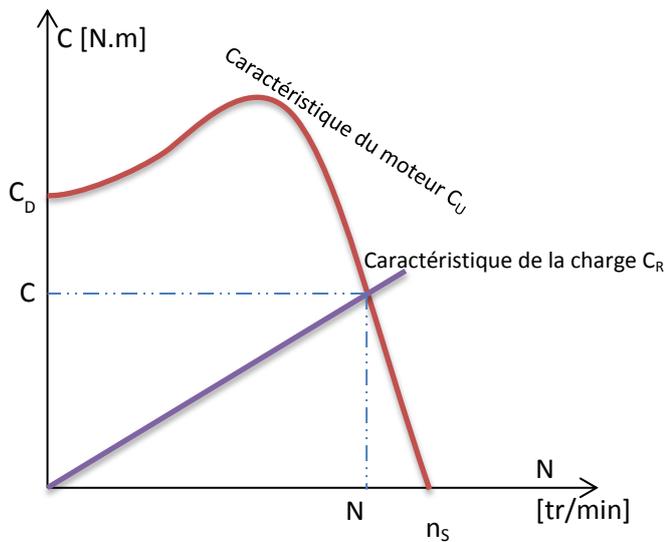
On appelle pertes collectives  $P_C = P_{FS} + P_M$  et on définit le couple de perte  $C_P = \frac{P_C}{\omega}$

Ce couple de perte est considéré comme constante quel que soit la vitesse et la charge du moteur.

Lors de l'essai à vide, les pertes par effet Joule au rotor  $P_{JR} = \frac{3}{2} R \cdot I_0^2$  sont négligeables.



7.2.4.9. POINT DE FONCTIONNEMENT



Les coordonnées du point de fonctionnement se déterminent soit par une méthode graphique ou par une méthode analytique.

Pour la méthode analytique :

- La charge à pour couple résistant  $C_R = k.n$
- Le moteur à pour couple utile  $C_U = a.n + b$

Les coordonnées du point de fonctionnement sont trouvées en résolvant  $C_U = C_R$

Les caractéristiques de quelques charges :

- Machine à puissance constante (compresseur, essoreuse) :  $C_R = \frac{k}{n}$
- Machine à couple constant (levage, pompe) :  $C_R = k$
- Machine à couple proportionnel à la vitesse (pompe) :  $C_R = k.n$
- Machine à couple proportionnel au carré de la vitesse (ventilateur) :  $C_R = k.n^2$

7.2.4.10. RÉGLAGE DE LA VITESSE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE

La vitesse de synchronisme  $n_s$  dépend que de la fréquence  $f$  des courants statoriques. Pour faire varier la vitesse du moteur, il faut faire varier la fréquence des courants statoriques.

On arrive à modifier la fréquence  $f$  des courants statoriques en utilisant un onduleur triphasé ou un gradateur triphasé.

Souvent, on fait varier la vitesse en maintenant le rapport  $\frac{V}{f}$  constant de manière à garder le moment du couple utile constant ( $V$  : tension aux bornes d'un enroulement du stator,  $f$  : fréquence de la tension d'alimentation).

