



Cours

CHAPITRE 14

Génie Electrique



CHAPITRE 14

Génie Electrique



Grandeurs électriques de base : intensité	1
Grandeurs électriques de base : tension	2
Principales lois de l'électrocinétique	3
Résistor	4
Condensateur	5
Self inductance	6
Moteur à courant continu	7
Moteur asynchrone	8
Moteur pas à pas	9
Servomoteur	10
Vérin	11
Pont en H	12
Hacheur série	13



GENIE ELECTRIQUE

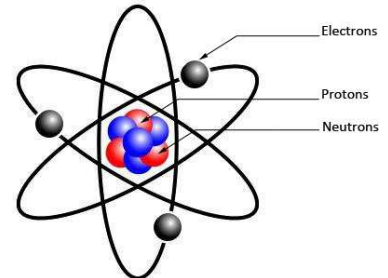
Grandeurs électriques de base - Intensité

1

1 – QU'EST-CE QUE L'ELECTRICITE ?

La matière est constituée d'atomes. Chaque atome est composé :

- d'un noyau central qui est un assemblage de protons et de neutrons. Les protons portent des charges positives et les neutrons ne portent pas de charges et sont donc neutres (d'où leur nom) ;
- d'un ensemble d'électrons qui tournent très vite autour de ce noyau. Les électrons portent des charges négatives.



En temps normal, un atome comprend autant d'électrons que de protons, donc autant de charges positives que de charges négatives. Ces charges s'équilibrent, ce qui rend l'atome électriquement neutre. Mais il suffit qu'un électron s'ajoute à ceux de cet atome (par frottement avec un autre atome par exemple) pour que l'équilibre soit rompu et que l'atome devienne négatif. De la même manière, il suffit qu'un électron soit enlevé à cet atome pour que l'atome devienne positif. L'électricité résulte du déplacement de ces électrons.

L'électricité est une forme d'énergie. C'est un phénomène énergétique associé à la mobilité ou au repos de particules chargées positivement ou négativement.

2 –CHARGE ELECTRIQUE

Qu'est-ce qu'une charge électrique ?

La charge électrique est une caractéristique possédée par certaines particules entre lesquelles s'exerce une interaction électrique.

Certaines particules ont une charge et sont dites « chargées » tandis que d'autres n'en n'ont pas et sont dites neutres.

Lorsque des particules sont chargées les forces électriques peuvent être soit attractives soit répulsives ce qui amène à distinguer deux catégories de charges: les charges de type positif et celles de type négatif.

Par ailleurs l'intensité des forces électriques varie suivant les charges en présence ce qui a conduit à associer à chaque charge une valeur.

Unités et notations

Une charge électrique se note : q ou Q (selon qu'on parle de valeur instantanée ou constante)

L'unité de charge électrique est le Coulomb (en hommage au physicien français Charles Coulomb) : C

La charge électrique élémentaire

La charge électrique élémentaire est notée « e » et a pour valeur approchée $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$.

Elle correspond par exemple à la charge d'un proton ou (en valeur absolue) à celle d'un électron (qui est négative).

Qu'est-ce que l'intensité électrique ?

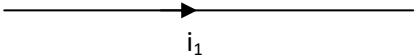
Le courant électrique (autrement appelé intensité) traduit du transfert d'énergie par le biais des charges électrique. Il résulte donc d'un déplacement de charges électriques (la plupart du temps d'électrons).

C'est donc un **flux (ou débit) de charges** traversant un composant électrique (par exemple : d'électrons dans un câble).

Unités et notations

Une intensité se note : **i ou I** (selon qu'on parle de valeur instantanée ou continue).

L'unité de l'intensité est l'Ampère (en hommage au mathématicien et physicien français André-Marie Ampère) : **A**.

On la représente dans un circuit électrique par **une flèche sur le fil électrique** : 

Formule de l'intensité

L'intensité est équivalente au débit de charge électrique à travers une surface donnée au cours du temps.

Elle est donc donnée par :



$$i = \frac{dq}{dt}$$



avec : i : intensité du courant traversant le composant (A) ;
 dq : charge électrique traversant la section S (C) pendant la durée dt ;
 dt : durée d'écoulement des charges (s).

L'intensité est une grandeur algébrique (positive si les charges positives se déplacent dans le sens de la flèche).

1 ampère correspond à un débit de charge d'1 coulomb pendant 1 seconde (1A = 1C / 1s).
 Exemple : Un moteur est traversé par un courant de $i = 5 A$ \Leftrightarrow toutes les secondes, le moteur est traversé par une quantité d'électricité $q = i \times t = 5^{(A)} \times 1^{(s)} = 5 C$.

Ordres de grandeur

Valeur	Consommation ou sensation
<1mA	Seuil de perception du courant
10 mA	LED classique
75 mA	Fibrillation ventriculaire
1 A	Ampoule incandescence 200W
10 A	Radiateur 2kW
100	Démarrateur automobile
1000	Moteur de locomotive
>10kA	Eclair

Moyens de mesure

L'intensité se mesure à l'aide :

- d'un ampèremètre ou d'un multimètre sur le calibre "A", qui doit être branché en série dans le circuit puisqu'il mesure les charges qui le traversent ;



Symbole de l'ampèremètre

ou

- d'une pince ampèremétrique, qui ne nécessite pas d'ouvrir le circuit.



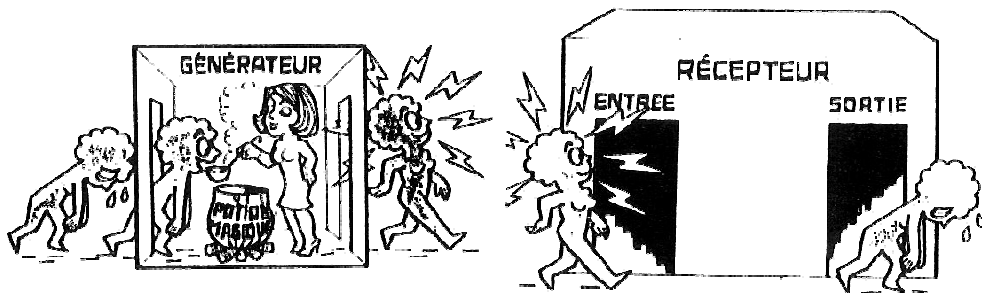


1 – POTENTIEL ELECTRIQUE

Le potentiel électrique, exprimé en volts (symbole : V), est l'une des grandeurs définissant l'état électrique d'un point de l'espace.

Il correspond à l'énergie potentielle électrostatique que posséderait une charge électrique unitaire située en ce point, c'est-à-dire à l'énergie potentielle (mesurée en joules) d'une particule chargée en ce point divisée par la charge (mesurée en coulombs) de la particule.

 Dans un générateur, les charges électriques se chargent en énergie, alors que dans un récepteur, elles restituent cette énergie



Exemples : Une lampe alimentée sous 230V \Leftrightarrow Chaque Coulomb qui la traverse dépense une énergie de 230 Joules.
Une pile de 4,5V \Leftrightarrow Chaque Coulomb qui la traverse « accumule » une énergie de 4,5 Joules.

2 – TENSION ELECTRIQUE / DIFFERENCES DE POTENTIEL

Qu'est-ce qu'une tension électrique ?

Nous avons vu dans la fiche sur le courant que ce dernier était l'image du déplacement des charges électriques dans le circuit.

Pour produire ce déplacement, il faut créer un effort pour pousser les charges. Cet effort correspond à la tension.

Avec cette définition, on voit bien que plus la tension est importante, plus le courant le sera et inversement.

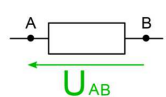
Sous certaines conditions, on peut assimiler la tension à la différence de potentiel.

Unités et notations

v ou V

Une tension électrique se note : u ou U (selon qu'on parle de valeur instantanée ou constante)

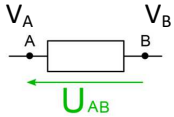
L'unité de la tension électrique est le Volt (en hommage à Alexandro Volta inventeur de la pile) : V



Dans un circuit, on représente la tension par une flèche entre 2 points du circuit puisqu'on mesure la différence entre le potentiel d'un point et le potentiel d'un autre point.

U_{AB} : tension électrique entre les point A et B .

Formule de la tension



V_A : Potentiel électrique du point A

V_B : Potentiel électrique du point B

U_{AB} : tension électrique entre les point A et B



La tension équivaut à la différence de potentiel entre le point A et le point B :

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

C'est une grandeur algébrique. Elle est positive si le potentiel du point A est supérieur au potentiel du point B et inversement.

Ordres de grandeur

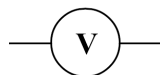
Valeur	Consommation ou sensation
1,5 V	Piles alcalines (continu)
12 V	Batterie démarreur automobile (continu)
230 V	Tension alternative entre phase et neutre d'une prise réseau EDF monophasé
400 V	Tension entre 2 phases d'une prise réseau EDF triphasé
1 500 V	Tension continue du train PLM
25 000 V	Tension alternative du TGV PSE
400 000 V	Tension entre phases des lignes haute tension du réseau RTE
>100 000 000 V	Eclair

Moyens de mesure

La tension se mesure à l'aide d'un voltmètre ou d'un multimètre sur le calibre branché en dérivation dans le circuit puisqu'il mesure la différence des points de mesure ;

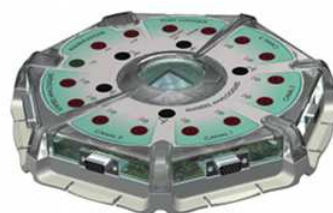


V, qui doit être branché en dérivation dans le circuit puisqu'il mesure la différence des points de mesure ;



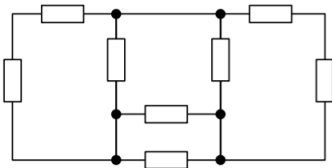
Symbole du voltmètre

Un oscilloscope ou une centrale d'acquisition permet de visualiser l'allure de la tension.

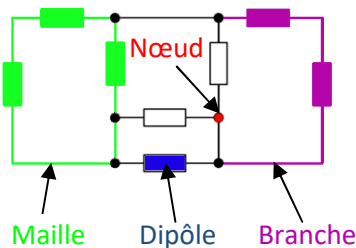


**1 – REGIME PERMANENT OU QUASI PERMANENT**

Dans ce qui suit, nous considérerons que la longueur des circuits électriques est faible devant la longueur d'onde du signal électrique. Cela signifie que l'on néglige les phénomènes de propagation dans le circuit et que par conséquent aucune accumulation de charges électrique n'a lieu dans les conducteurs électriques.

2 – DEFINITIONS

Réseau électrique : Ensemble des éléments électriques reliés entre eux et susceptibles d'être parcourus par des courants électriques.



Dipôle : Tout ensemble d'élément électrique situé entre deux nœuds.

Branche : Ensemble de dipôles placés entre deux nœuds.

Maille : Ensemble des branches formant une boucle fermée.

Nœud : Connexion électrique entre plusieurs dipôles.

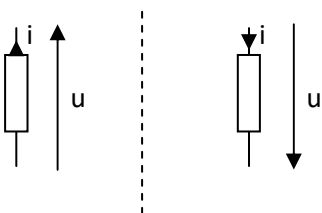
3 – SIGNES ET CONVENTION**Grandeurs algébriques / signes**

Les tensions et courants sont des grandeurs algébriques. Elles peuvent être positives ou négatives selon le sens des flèches fixées arbitrairement au départ. Si lors d'un calcul une valeur négative apparaît, cela signifie que la flèche fixée arbitrairement au départ n'est pas dans le « bon » sens.

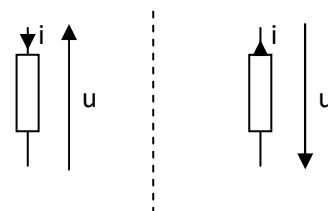
Pour faciliter les calculs (obtenir des valeurs positives), on utilise les conventions de fléchage suivantes :

Convention générateur

En convention générateur, la flèche courant est dans le même sens que la flèche tension. Si les grandeurs u et i sont de même signe, alors c'est que le dipôle ainsi fléché se comporte comme un générateur (délivre de l'énergie électrique).

**Convention récepteur**

En convention récepteur, la flèche courant est dans le sens opposé à la flèche tension. Si les grandeurs u et i sont de même signe, alors c'est que le dipôle se comporte comme un récepteur (consomme de l'énergie électrique).



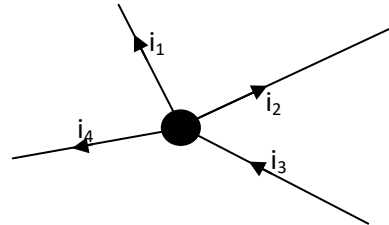
Loi des nœuds

Dans un nœud électrique, il n'y a aucune accumulation de charges. Par conséquent la somme **algébrique** des courants est nulle.

$$\sum_{\text{algébrique}} \text{courants} = 0$$

On peut l'écrire autrement :

$$\sum i_{\text{entrants}} = \sum i_{\text{sortants}}$$



$$i_1 + i_2 - i_3 + i_4 = 0$$

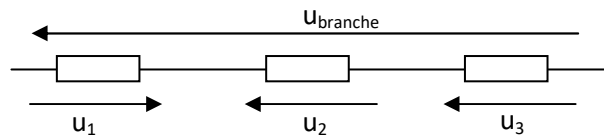
ou

$$i_3 = i_1 + i_2 + i_4$$

Loi des branches

La tension aux bornes d'une branche est égale à la somme **algébrique** des tensions aux bornes de chacun des dipôles formant la branche.

$$u_{\text{branche}} = \sum_{\text{algébrique}} \text{tensions}$$

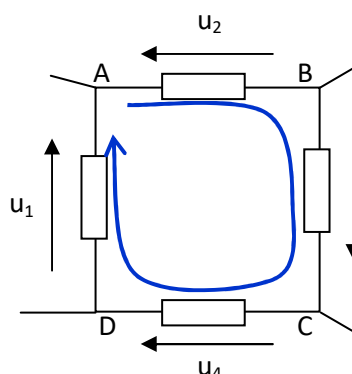


$$u_{\text{branche}} = -u_1 + u_2 + u_3$$

Loi des mailles

La somme algébrique des tensions d'une maille est nulle.

$$\sum_{\text{algébrique}} \text{tensions} = 0$$



Dans la maille A, B, C, D, A

$$-u_2 + u_3 + u_4 - u_1 = 0$$



1- NOTION DE RESISTANCE ELECTRIQUE

Qu'est-ce que la résistance électrique ?

La résistance électrique traduit la propriété d'un composant à s'opposer au passage d'un courant électrique. Elle est donc principalement liée au matériau du composant.

2- COMPOSANT RESISTOR

Symbole

Un résistor est un composant électronique ou électrique dont la principale caractéristique est d'opposer une plus ou moins grande résistance à la circulation du courant électrique.

C'est par métonymie que le mot « résistance », qui désigne avant tout une propriété physique, en est venu à désigner aussi un type de composant que certains préfèrent appeler un « dipôle résistant ». On utilise également l'expression « conducteur ohmique », de façon à éviter d'utiliser le même terme pour l'objet et sa caractéristique.

Utilisation



Les résistances de puissance : le but est de produire de la chaleur, exemple : chauffage électrique. Généralement une plaque indique la tension nominale d'utilisation et la valeur de la puissance produite.

Les résistances fixes : le but est d'obtenir, dans un montage électronique, des potentiels ou des courants parfaitement déterminés en certains endroits du circuit. On indique alors par un code de couleur sa valeur de résistance et la précision de cette valeur. La puissance maximale qu'elle peut dissiper se devine (parfois) par sa taille.



Les résistances variables : qui permettent à un utilisateur d'ajuster un courant : rhéostat, potentiomètre (ou transistor CMOS).

Les dipôles dont la résistance varie avec une grandeur physique :

- La température : CTN (résistance à coefficient de température négatif) et CTP (à coefficient de température positif)
- L'éclairement : photorésistance (LDR)
- Les forces appliquées : jauge de contrainte...

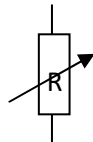


Symbole

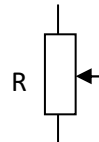
Résistance fixe



Résistance variable



Potentiomètre ou Rhéostat

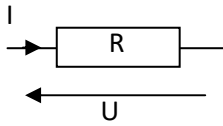


Unité

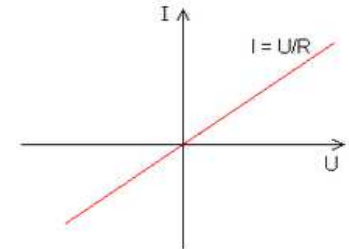
L'unité de la résistance est l'Ohm (en hommage au physicien allemand Georg Simon Ohm) : Ω

Loi d'ohm en courant continu

La différence de potentiel (tension) U aux bornes d'un résistor de résistance R est proportionnelle à l'intensité du courant électrique I qui traverse ledit résistor :



$$U = R \cdot I$$

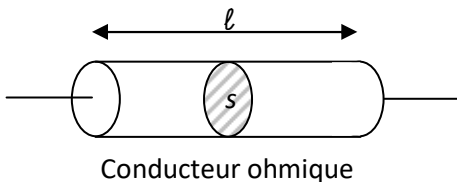


Caractéristique du résistor idéal (linéaire)

avec : U : tension aux bornes du résistor (V) ;
 R : résistance du résistor (Ω) ;
 I : Intensité traversant le résistor (A).

Résistance d'un conducteur

La résistance d'un conducteur ohmique dépend des dimensions du conducteur et du matériau :

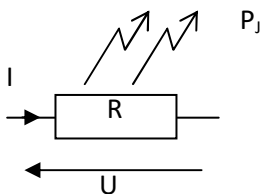


$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{s}$$

avec : R : résistance du résistor (Ω) ;
 ρ : résistivité du matériau ($\Omega \cdot m$) (dépend de la température du matériau) ;
 ℓ : longueur du fil (m) ;
 s : section du fil (m^2).

Effet Joule

L'effet Joule est la manifestation thermique de la résistance électrique qui se produit lors du passage d'un courant électrique dans tout matériau conducteur. L'effet porte le nom du physicien anglais James Prescott Joule qui l'a découvert en 1840.



$$P_j = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$$



avec : P_j : puissance thermique dissipée par le résistor par effet Joule (J) ;
 R : résistance du résistor (Ω) ;
 I : intensité traversant le résistor (A) ;
 U : tension aux bornes du résistor (V).



1- NOTION DE CAPACITE ELECTRIQUE

Qu'est-ce que la capacité électrique ?

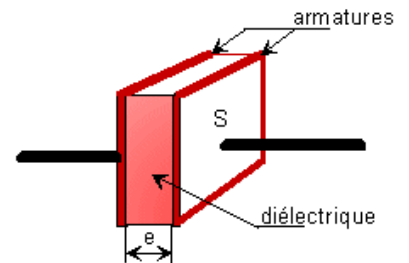
On confond souvent le terme de condensateur et celui de capacité, mais en fait, la capacité est la caractéristique d'un condensateur, au même titre que la résistance est la caractéristique d'un résistor.

La **capacité** représente la **quantité de charges électriques** stockée par un condensateur pour une tension donnée.

2- COMPOSANT CONDENSATEUR

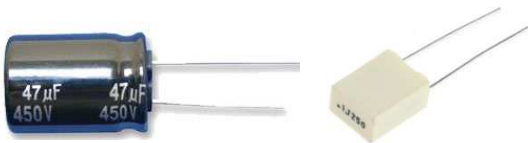
Constitution

Un condensateur est un composant électronique élémentaire, constitué de deux armatures conductrices (appelées « électrodes ») en influence totale et séparées par un isolant appelé « diélectrique ».



La fonction d'un condensateur est celle d'un réservoir qui accumule de l'énergie puis la restitue.

Utilisation



Les condensateurs de filtrage (découplage) : le but est de lisser la tension en absorbant les variations de celle-ci.

La batterie de condensateurs de compensation d'énergie : le but est de compenser les effets d'inductance dans les circuits alimentés en alternatif.

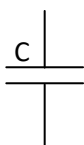


Les condensateurs de démarrage moteur : le but, déphaser une partie du courant alimentant les phases d'un moteur alternatif.

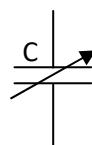
Il existe bien d'autres utilisations et d'autres formes de condensateurs.

Symbole

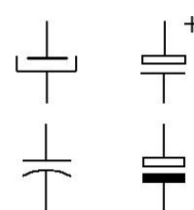
Condensateur fixe



Condensateur ajustable



Condensateur polarisé

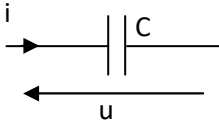


Unité

L'unité de la capacité est le Farad (tiré du nom du physicien Michael Faraday) : **F**.

Loi de comportement

L'intensité $i(t)$ traversant un condensateur de capacité C est égale à la dérivée de la tension $u(t)$ aux bornes de cette capacité :



$$i = C \cdot \frac{du_c}{dt}$$

avec : $\frac{du_c}{dt}$: dérivée par rapport au temps de la tension aux bornes du condensateur ($V \cdot s^{-1}$) ;

C : capacité du condensateur (F) ;

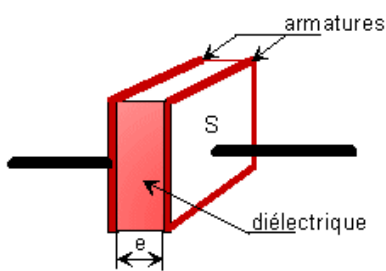
i : intensité traversant le condensateur (A).

Avec des courants alternatifs sinusoïdaux, cette loi se transforme en la loi suivante :

$$\underline{U} = \frac{1}{j \cdot C \cdot \omega} \cdot \underline{I} \quad \text{avec } j^2 = -1$$

Capacité d'un condensateur

La capacité d'un condensateur dépend des dimensions des armatures, de l'écartement de celles-ci et du matériau :



$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{e}$$

avec : C : capacité du condensateur (F) ;

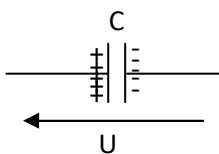
ϵ : permittivité du matériau diélectrique ($kg \cdot m \cdot A^{-2} \cdot s^{-2} \Leftrightarrow F \cdot m^{-1}$) ;

e : espacement entre les armatures (m) ;

s : section d'une armature (m^2).

Loi de charge

La charge électrique emmagasinée par un condensateur est proportionnelle à la tension appliquée entre ses deux armatures :



$$Q = C \cdot U$$

avec : Q : Quantité de charges stockées dans le condensateur (C) ;

C : capacité du condensateur (F) ;

U : tension aux bornes de condensateur (V).

Energie stockée

En stockant des charges, le condensateur stocke de l'énergie qu'il peut restituer ultérieurement (il se décharge). L'énergie stockée suit la loi suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

avec : E_c : Energie électrique stockée dans le condensateur (J) ;

C : capacité du condensateur (F) ;

U : tension aux bornes de condensateur (V).



1 – CONSTITUTION ET PRINCIPE

(voir figure 1)

CONSTITUTION

Une machine électrique à courant continu est constituée d'un :

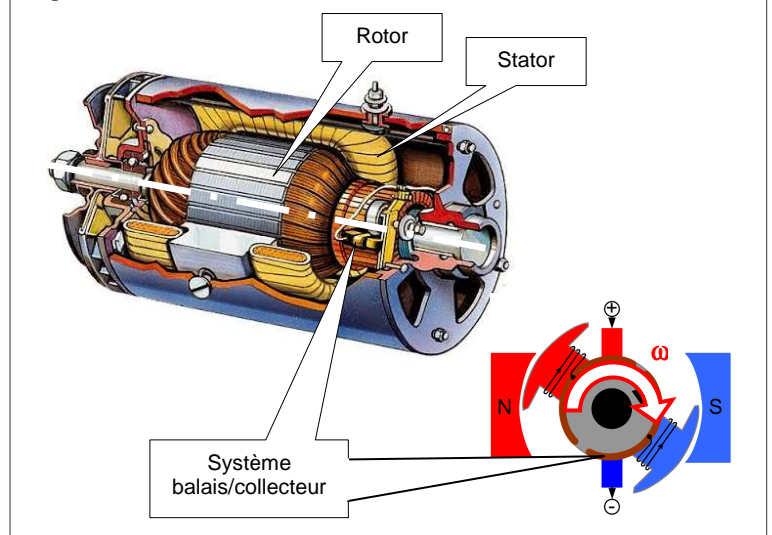
- **Stator** ou **inducteur** (quand c'est une génératrice) construit avec soit des bobinages soit des aimants permanents.
- **Rotor** ou **induit** (quand c'est une génératrice) construit avec des bobinages et alimenté par un collecteur à balais.
- **Carcasse** qui supporte les points de fixations avant ou arrière la plupart du temps.

PRINCIPE

W électrique continue < **CONVERSION** > W mécanique rotation

Le stator crée un flux magnétique longitudinal fixe. Chaque bobinage du rotor (alimenté par un système balais collecteur - inverse la polarité au moins une fois par tour) crée un champ magnétique transversal. Ainsi un flux magnétique transversal circule en quadrature avec le flux statorique. Les aimants fictifs ainsi créés s'attirent en créant un couple au rotor. Le rotor va donc tourner à une fréquence ω .

Figure 1 : Architecture d'un moteur à courant continu



2 – CRITERES TECHNIQUES

Réversibilité	Oui, peut aussi fonctionner en génératrice
Rendement optimal	45 à 95% selon taille et technologie
Vitesse nominale	qq1000tr/min à qq100 tr/min selon la taille
Puissance nominale :	Quelques mW à 10 MW / applications
Tension d'alimentation :	Quelques V à quelques kV
Avantages	Utilisable dans un système asservi grâce à un codeur Fort couple de démarrage Rapport courant / couple affine Vitesse quasi-proportionnelle à la tension appliquée
Inconvénients	Puissance massique faible (besoin du système balais collecteurs qui ne participa pas à la conversion d'énergie) Bruit dû au changement de lames de collecteur Maintenance obligatoire car pièces en frottements (balais / collecteur)
Applications	Historiquement -> Entraînements des machines et dans les applications à vitesse variable (traction de locomotives, propulsion de navires, servomécanismes de grandes performances de machines-outils, robots) Récemment -> A cause des coûts de fabrication et d'entretien élevés (avec collecteur et balais) et l'apparition des groupes moto variateurs alternatifs performants : applications industrielles ou le positionnement et la précision sont importants et les jeux d'enfants.



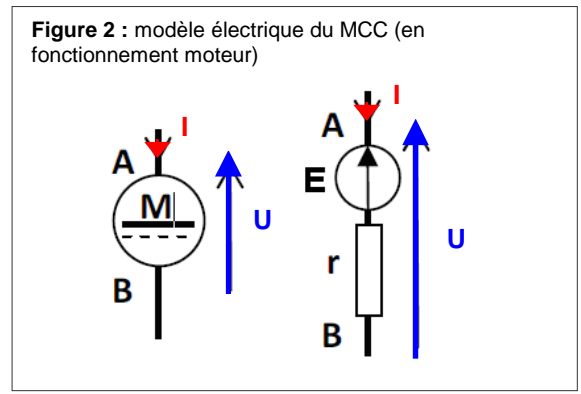
3 – MODELE DE COMPORTEMENT

LOI ÉLECTRIQUE SIMPLIFIÉE

(voir figure 2)

$$U = E + r \cdot I$$

- U : Tension d'alimentation de l'induit (V)
- r : résistance interne de l'induit (Ω)
- I : Courant absorbé par le moteur (A)
- E : FCEM du moteur (V)



LOIS ÉLECTROMÉCANIQUES

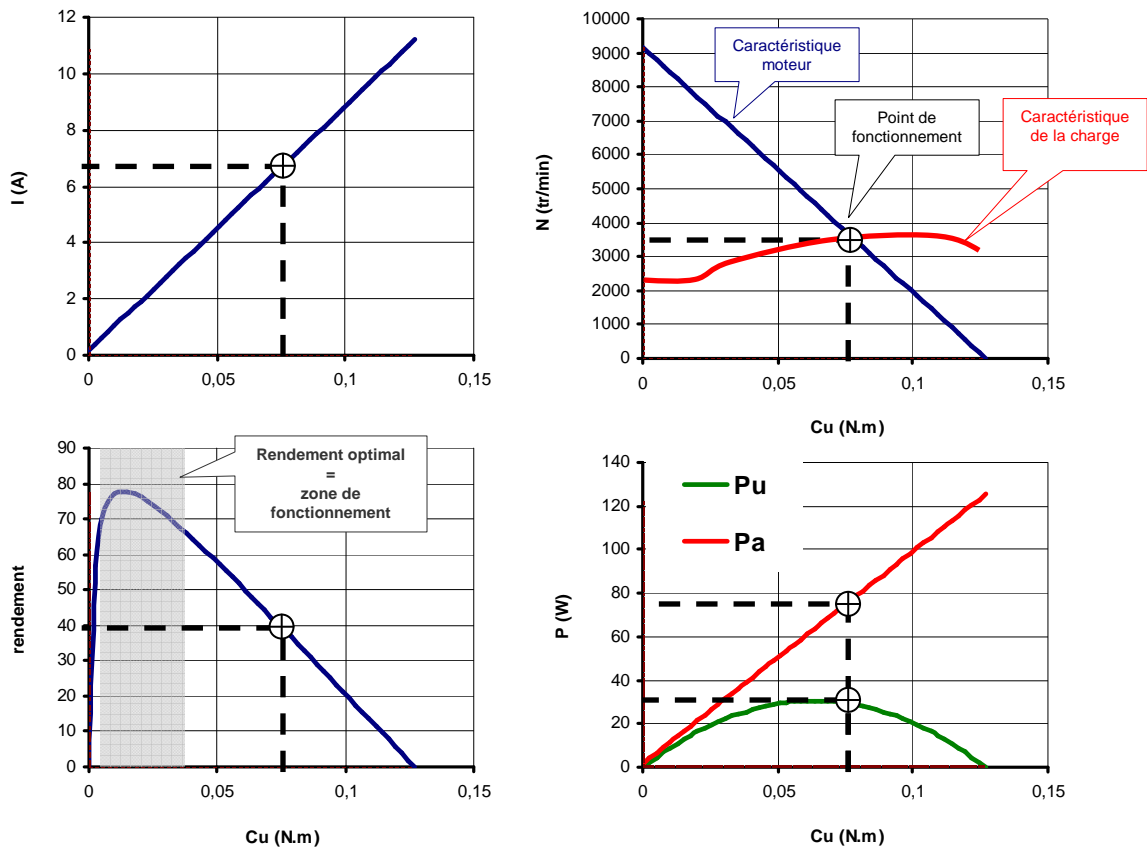
(voir figure 3)

$$C = k \cdot I - C_f$$

$$E = k \cdot \omega$$

- C : Couple fourni par le moteur sur l'arbre (N.m)
- C_f : Couple de frottement sec (N.m)
- k : Constante de couple ($N.m.A^{-1}$)
- E : FCEM du moteur (V)
- k : Constante de vitesse ou de FEM ($V.rad^{-1}.s$)
- ω : vitesse de rotation de l'arbre ($rad.s^{-1}$)
- I : Courant absorbé par le moteur (A)

Figure 3 : MCC - Courbes caractéristiques





GÉNIE ÉLECTRIQUE

Moteur asynchrone

2

1 – CONSTITUTION ET PRINCIPE

CONSTITUTION

(voir figure 1)

Une machine électrique asynchrone est constituée d'un :

- **Stator** construit en matériau ferromagnétique, servant de support mécanique et magnétique. Il inclue un bobinage (polyphasé) relié au réseau ou à un variateur de vitesse.
- **Rotor** en matériau ferromagnétique relié au stator par des paliers. Il peut comporter un enroulement ou être constitué d'une cage d'écuereuil (conducteurs en court-circuit).
- **Carcasse** qui supporte les points de fixations disposés différemment selon les constructions.

PRINCIPE

(voir figure 2)

W électrique alternative < **CONVERSION** > W mécanique rotation

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à une fréquence proportionnelle à celle de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée *vitesse de synchronisme*.

L'enroulement au rotor est soumis à des variations de flux du champ magnétique. Une force électromotrice induite apparaît et crée des courants rotoriques responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en rotation pour tenter de suivre le champ statorique.

La machine est dite asynchrone car elle ne peut, sans présence d'un entraînement extérieur, atteindre la même vitesse que le champ statorique. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée *vitesse de glissement*. Lorsqu'elle est entraînée au-delà de la vitesse de synchronisme - fonctionnement hypersynchrone - la machine fonctionne en générateur alternatif.

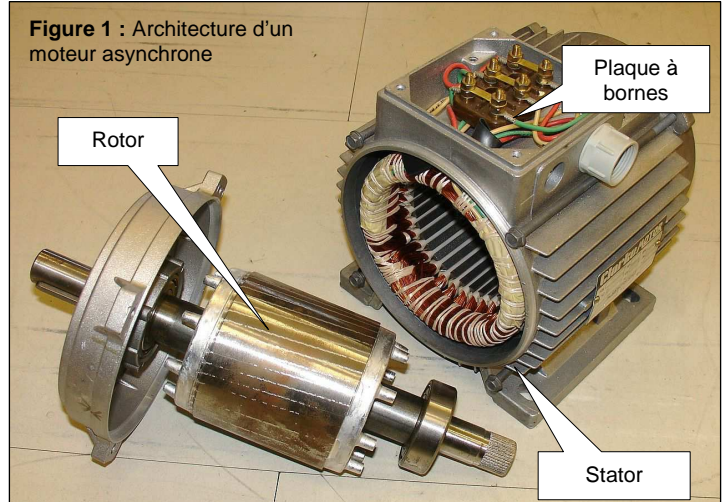
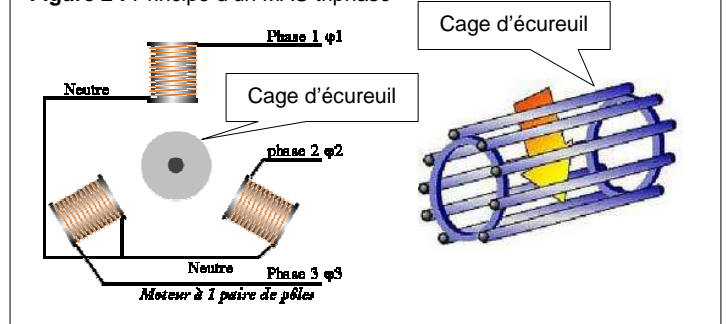


Figure 2 : Principe d'un MAS triphasé



2 – CRITERES TECHNIQUES

Réversibilité	Oui, sous certaines conditions (voir modèle de comportement)
Rendement optimum	60% (les + petits) à 98% (les + gros)
Vitesse nominale	proche d'un divisible de 3000 tr.min ⁻¹ si alimenté sur réseau 50 Hz (voir modèle de comportement).
Puissance nominale :	de 90 W à 15 MW selon les applications
Tension d'alimentation :	Quelques centaines de V
Avantages	Prix faible car facile à produire Puissance massive élevée
Inconvénients	besoin d'une électronique de puissance sophistiquée
Applications	Traction (Eurostar, ...) ; propulsion des navires ; propulsion électrique automobile (Tesla Roadster...) ; ventilation ; pompes ; ascenseurs ; chariots élévateurs ; treuils ; électroménager.



3 – MODELE DE COMPORTEMENT

LOI ÉLECTRIQUE

$$n_s = f / p$$

n_s : vitesse de synchronisme (champ tournant) (tr.s⁻¹)
 f : fréquence des courants alimentant le moteur (Hz)
 p : nombre de paires de poles du moteur
 (fabrication des enroulements du moteur)

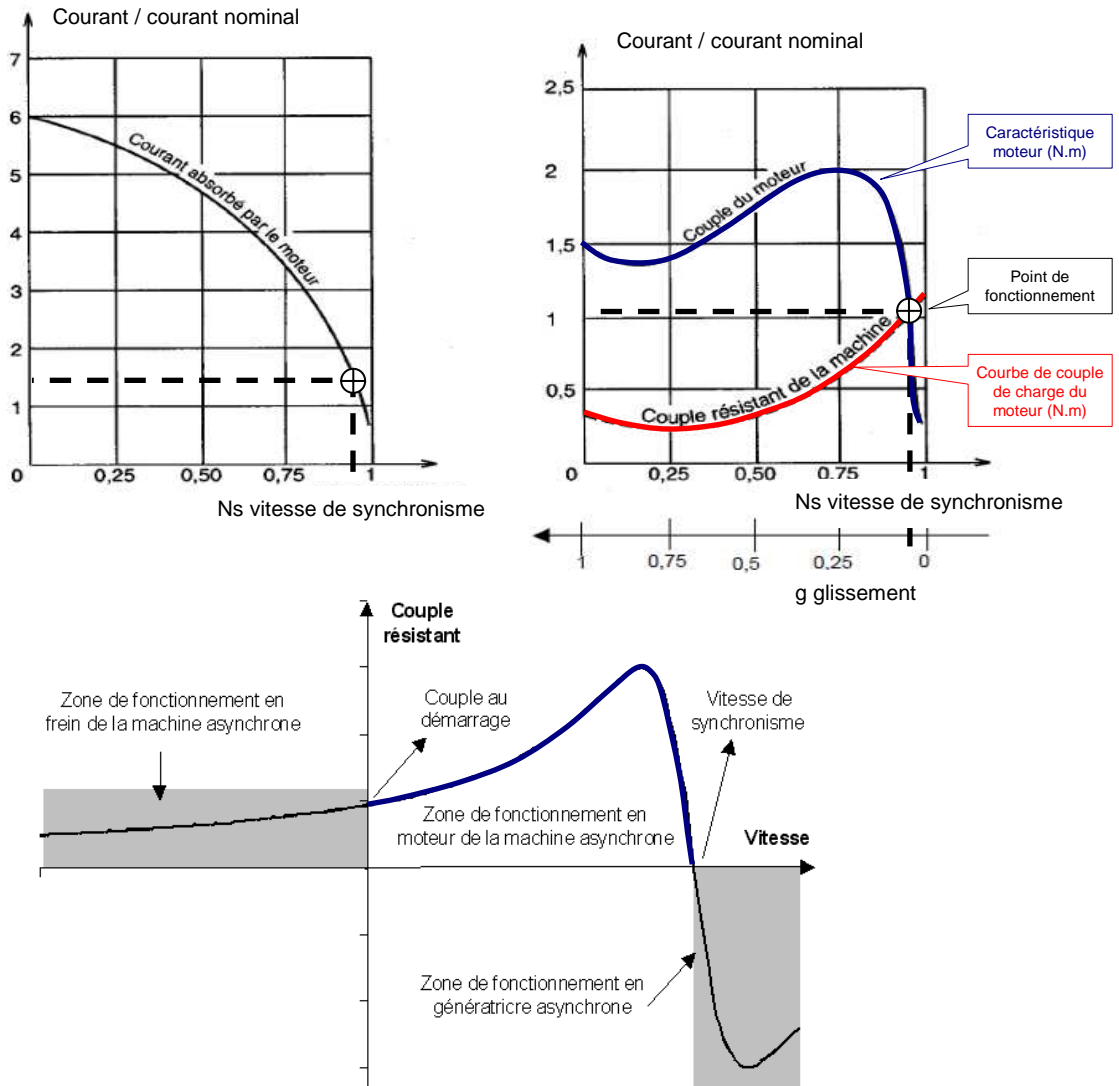
LOIS ÉLECTROMÉCANIQUES

(voir figure 3)

$$g = (n_s - n) / n_s$$

g : glissement du rotor par rapport au champ tournant
 n : vitesse du rotor (tr.s⁻¹)

Figure 3 :
 MAS –
 Courbes
 caractéristiques





1 – CONSTITUTION ET PRINCIPE

CONSTITUTION (voir figure 1)

Une machine électrique pas à pas, qu'elle soit à aimant permanent (MAP), à réluctance variable (MRV) ou hybride est constituée d'un :

- **Stator** construit avec des enroulements ou bobinages dont le nombre est variable et est appelés pôles ou phases.
- **Rotor** en ferrite ou fer doux pour les MRV et constitué à partir d'un aimant permanent pour les MAP. Il possède des créneaux à sa périphérie afin de rendre variable la distance le séparant des bobinages du stator.
- **Carcasse** qui supporte les bobinages du stator et les points de fixations disposés différemment selon les constructions.

PRINCIPE (voir figures 2 & 3)

W électrique continue < **CONVERSION** > W mécanique rotation

On alimente successivement les phases du moteur à une fréquence d'impulsion qui conditionnera la vitesse de rotation du moteur.

Il existe 3 types de moteurs pas à pas. Les moteurs à reluctance variable, les moteurs à aimants permanents et les hybrides.

Les moteurs à reluctance variable (MRV) possèdent un rotor en fer doux avec des pôles saillants (cf. fig. 2). L'alimentation d'une phase du stator entraîne la rotation du rotor de façon à ce que l'un des pôles les plus proches de ladite phase se place en conjonction avec celle-ci. Pour continuer à faire tourner le rotor, il faut ensuite alimenter la phase suivante. Le rotor tourne d'un pas. Le sens du courant dans les phases n'a pas d'incidence sur le fonctionnement de ce moteur. Les phases nécessitent une alimentation non réversible en courant. Ce sont des moteurs dits unipolaires.

Les moteurs à aimants permanents (MAP) possèdent des aimants dans le rotor (pôle nord/pôle sud). L'alimentation d'une phase du stator crée un aimant fictif (pôle nord/pôle sud) attaché au stator. L'aimant du rotor va donc être attiré par l'aimant fictif du stator de façon à faire tourner le rotor et le placer en conjonction avec la phase du stator alimentée. La rotation vers le pas suivant s'effectue en alimentant la phase suivante du stator. Dans ce moteur, le sens du courant dans la phase a une incidence sur le sens des pôles magnétiques du stator. Cela joue sur le sens de rotation du moteur. Ce sont des moteurs dits bipolaires. Leur alimentation nécessite une alimentation réversible en courant. Ces moteurs possèdent un couple de détente (couple sans alimentation).

Les moteurs hybrides combinent le principe de fonctionnement de chacun des 2 moteurs cités précédemment.

Pour augmenter la résolution (diminuer le pas angulaire), le stator et le rotor possèdent des encoches plutôt que des poles saillants (cf. fig. 3). On peut ainsi obtenir des moteurs ayant un pas angulaire de $0,9^\circ$ /impulsion.

Pour le moteur représenté figure 2 :

- la séquence d'alimentation en pas entiers est la suivante : **phase 1** => **phase 2** => **phase 3** => **phase 4** => **phase 1** ...
- la précision de position peut être doublée, en réalisant une séquence d'alimentation en $\frac{1}{2}$ pas : **phase 1** => **phase 1 & phase 2** => **phase 2** => **phase 2 & phase 3** => **phase 3** => **phase 3 & phase 4** => **phase 4** => **phase 4 & phase 1**...
- le sens de rotation peut être inversé en inversant la rotation des phases.

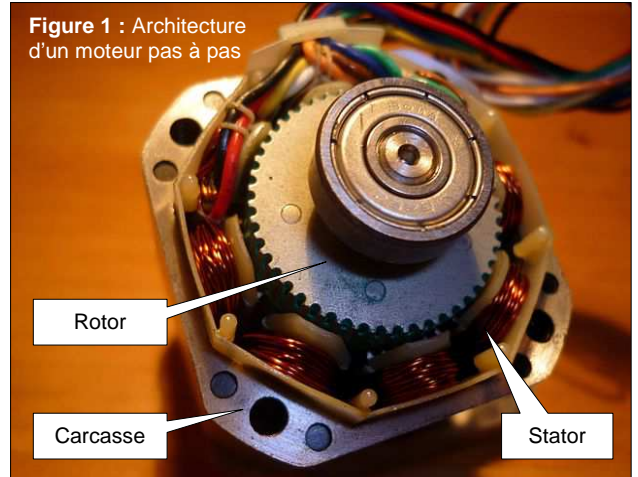


Figure 1 : Architecture d'un moteur pas à pas

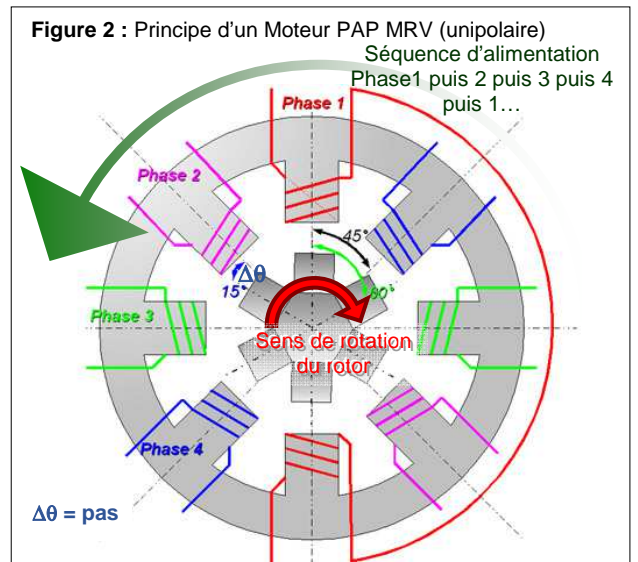


Figure 2 : Principe d'un Moteur PAP MRV (unipolaire)
Séquence d'alimentation
Phase1 puis 2 puis 3 puis 4
puis 1...

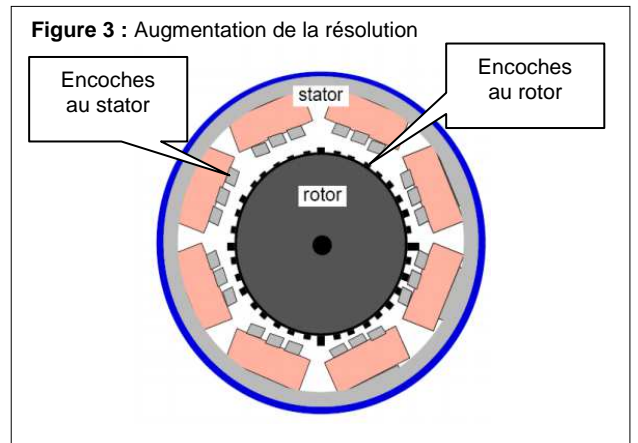
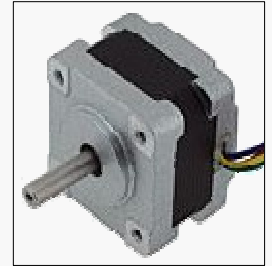


Figure 3 : Augmentation de la résolution

2 – CRITERES TECHNIQUES

Réversibilité	Non
Pas angulaire - Résolution	de 7,2° à 0,9° - de 50 à 400 pas / tour
Vitesse de décrochage	quelques milliers de tours par minutes (fonction du couple à entrainer et de la fréquence de pilotage des pas)
Couple :	Quelques N.m
Nombre de phases	2, 3, 4
Types d'alimentation	Unipolaire / bipolaire
Avantages	Possibilité d'atteindre des positions précises grâce aux pas sans capteurs MAP : produit un couple même sans alimentation Pas de balais pour le rotor => durée de vie très longue
Inconvénients	Vitesse de rotation peu élevée MRV : ne produit pas de couple résiduel (sans alimentation) Besoin d'une alimentation séquencée pas toujours aisée à réaliser
Applications	Pilotage systèmes de précision (imprimantes, tours à commande numérique...)



3 – MODELE DE COMPORTEMENT

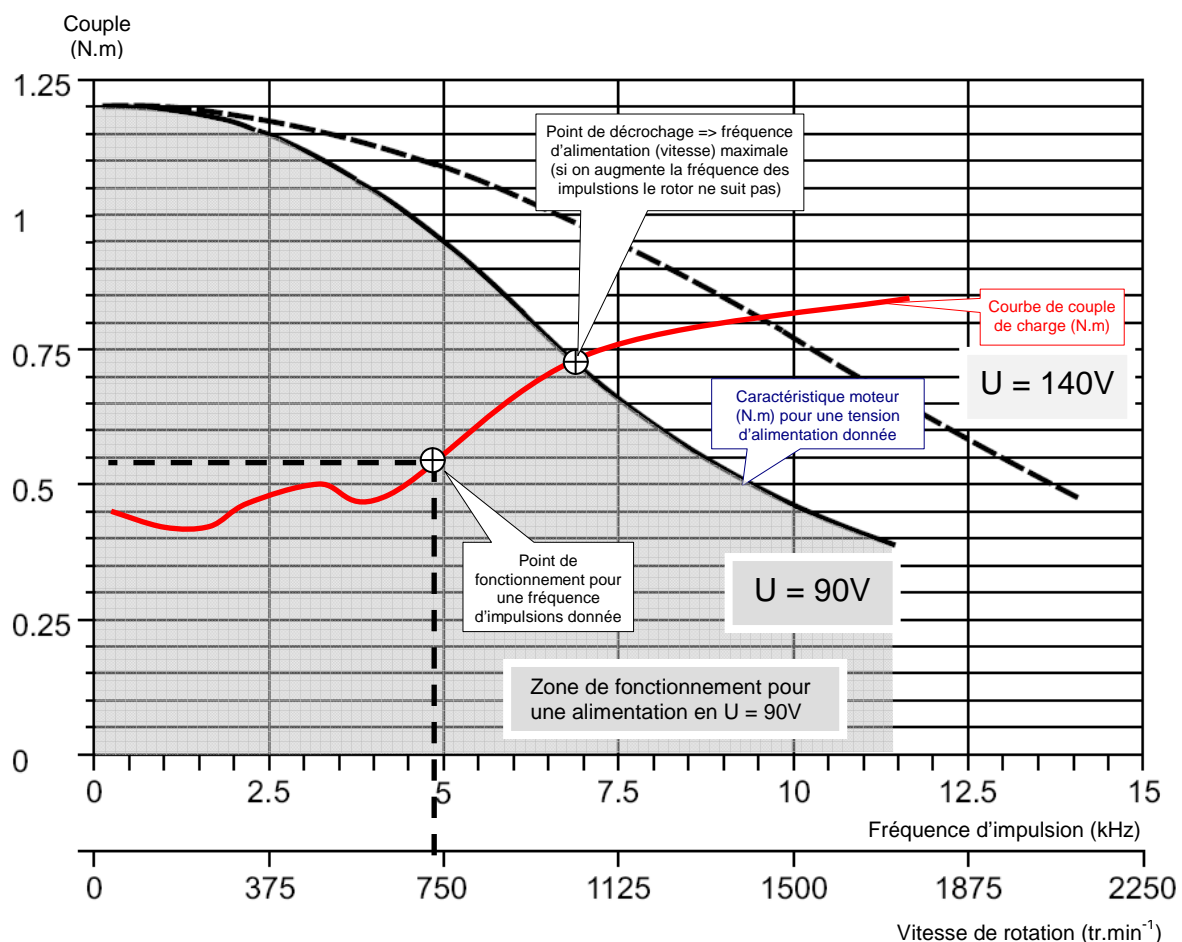
(voir figure 4)

L'influence de la charge est directement liée au calcul du couple moteur via les paramètres du calcul inertiel (en kg.m^2) et de l'accélération (en m.s^{-2}). Pour des paramètres d'accélération et de chaîne cinématique identiques, un moteur pas à pas n'aura pas besoin du même couple selon la charge mise en jeu.

Pour l'étude du comportement, le dimensionnement d'un moteur pas à pas doit être vu de façon rigoureuse ou être surdimensionné afin d'éviter tout problème de glissement par « perte de pas ». Le moteur pas à pas fonctionnant en boucle ouverte (sans asservissement), il ne récupère pas sa position de consigne en cas de glissement.

Il convient donc de faire le lien entre couple utile (donc dépendant de la charge) et vitesse d'impulsion pour son pilotage.

Figure 3 : Moteur PAP – Courbes caractéristiques pour un moteur particulier (400 pas / tr – alimenté en pas entier)





1 – CONSTITUTION ET PRINCIPE

CONSTITUTION

(voir figure 1)

Un servo moteur est constituée d'un :

- **Moteur à courant continu** qui permet la rotation angulaire de l'axe de sortie du servo en fonction du pilotage issu de la carte électronique d'asservissement.
- **Réducteur** qui augmente le couple de sortie.
- **Carte électronique d'asservissement** qui pilote la mise en énergie du moteur en fonction de la consigne de position souhaitée et de la position réelle du servo.
- **Potentiomètre de recopie** qui acquière la position réelle du servo et la transmet à la carte électronique d'asservissement.

PRINCIPE DE COMMANDE

(voir figure 2)

W électrique continue < **CONVERSION** > W mécanique rotation

L'électronique reçoit la consigne de position sous forme PPM (Pulse Position Modulation).

Le signal de commande aura donc l'allure de créneaux.

La fréquence du signal de commande devra être de 50Hz.

La position prise par l'axe du servo dépendra de la largeur de l'impulsion envoyée sur le fil de commande.

La figure 2 montre la relation entre la position de l'axe de sortie du servo et la largeur d'impulsion de la commande.

Le servomoteur a besoin de trois fils de connexion pour fonctionner.

Deux fils servent à son alimentation, le dernier étant celui qui reçoit le signal de commande :

- **rouge** : pour l'alimentation positive (4.5V à 6V en général)
- **noir** ou **marron** : pour la masse (0V) (commun à l'alimentation en énergie et à la commande)
- **orange, jaune, blanc, ...** : entrée du signal de commande

Figure 1 : Architecture d'un servomoteur de modélisme

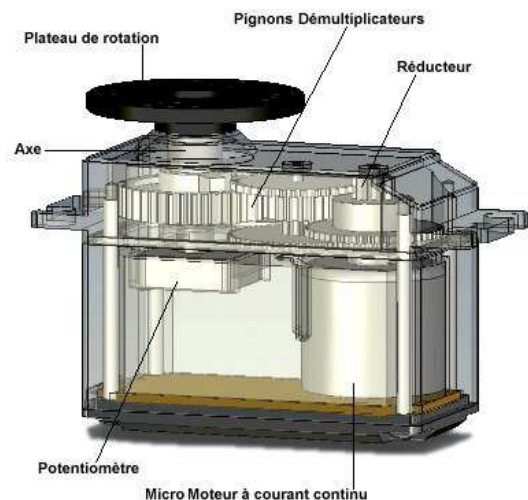
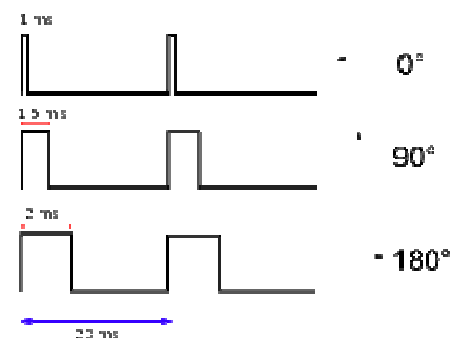


Figure 2 : Principe de pilotage d'un servomoteur



2 – CRITERES TECHNIQUES

Réversibilité	Non
Rendement	Sans objet
Tension d'alimentation	4,8 ou 6V

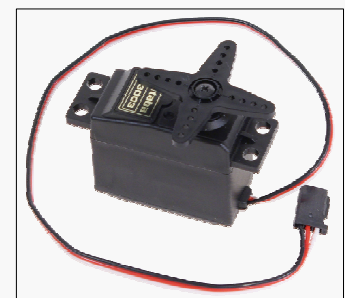
Taille	Masses (g)	Couple de blocage (kg.cm)
sub-micro	4	0,7
micro	10	1,5
mini	25	3
standard	50	6
grand	100	10 à 20

Amplitude angulaire	De 45° à 360°
« Vitesse » angulaire	de 0,1s à 0,4s pour 60°

Avantages Intégration du moteur, du pont en H, de l'électronique de commande et du capteur de position
Blocage sans alimentation

Inconvénients Pilotage nécessitant une commande élaborée (PPM)

Applications Asservissement en position des systèmes (modélisme)



3 – MODELE DE COMPORTEMENT

LOI ÉLECTRIQUE

Voir le moteur à courant conti

LOIS ÉLECTROMÉCANIQUES

Voir le moteur à courant continu



1 – CONSTITUTION ET PRINCIPE

CONSTITUTION (voir figure 1 et 2)

Un vérin à fluide classique est constituée d'un :

- **Corps** souvent construit à partir de pièces en alliage d'aluminium qui fait office d'encaint fermé pour les deux chambres sous pression de fluide. C'est lui qui supporte les points de fixation soit directement prévus lui sur lui, soit permettant l'accueil de chappe de fixation.
- **Piston** qui sépare les deux chambres du corps.
- **Tige** encastré au piston (anti rotation ou non) auquel on relie mécaniquement les éléments de transmission ou d'action.

Un vérin rotatif est constituée des mêmes éléments que le modèle classique mais est pourvu en plus d'un :

- **Système pignon - crémaillère** simple ou double pour assurer la transformation de mouvement.

L'étanchéité nécessaire est assurée par des joint de différentes technologies (toriques, à lobe, lèvres...).

Le guidage des éléments en translation ou rotation est assurée par des roulements ou des palliers lisses.

Certains modèles « simple effet » sont pourvu de ressort de rappel pour l'un des mouvements (sortie ou rentrée)

PRINCIPE (voir figure 3)

$W_{\text{pneumatique}}$ > **CONVERSION** > $W_{\text{mécanique translation}}$
 $W_{\text{hydraulique}}$

$W_{\text{pneumatique}}$ > **CONVERSION** > $W_{\text{mécanique rotation}}$
 $W_{\text{hydraulique}}$

Un fluide sous pression et à un certain débit est « envoyé » dans l'une des chambres alors que l'autre est placée à l'échappement (libre ou contrôlé).

L'appui du fluide contre la surface utile de la paroi du piston provoque le déplacement de la tige.

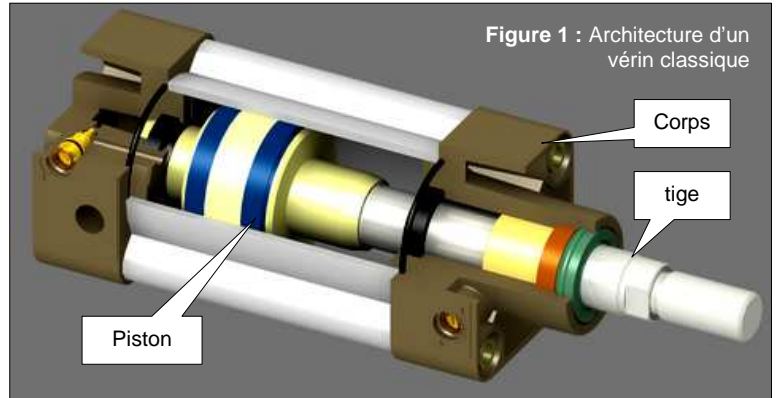


Figure 1 : Architecture d'un vérin classique

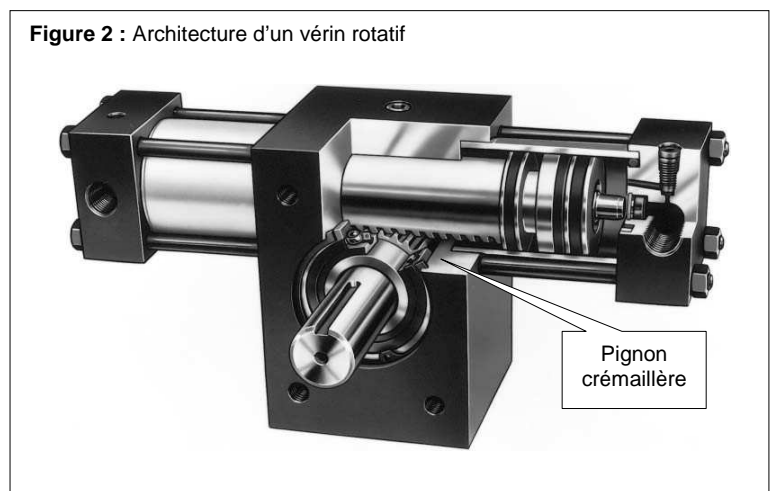


Figure 2 : Architecture d'un vérin rotatif

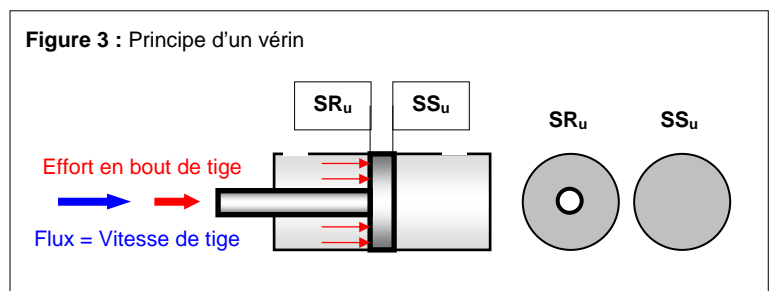
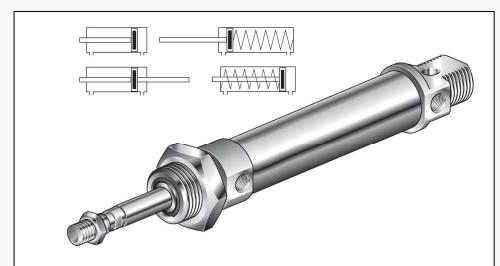


Figure 3 : Principe d'un vérin

2 – CRITERES TECHNIQUES

Réversibilité	Non
Rendement	60 à 80 % mais on parler plutôt de taux de charge
Pression	2 à 10 bar (pneumatique) 10 à plusieurs centaines de bar (hydraulique).
Avantages	Grande variété de technologie (taille, effort développé...) Puissance massique élevée
Inconvénients	Energie source contraignante
Applications	Divers systèmes industriels (véhicule de chantier, système automatisés, amortisseur...)



3 – MODELE DE COMPORTEMENT

EFFORT EN BOUT DE TIGE

(Voir figure 3)

$$F_{\text{pratique}} = \tau \cdot P \cdot S_u$$

- F pratique : effort disponible en bout de tige (N ou daN en automatisme)
 τ : taux de charge
P : pression relative (Pa ou Bar en automatisme)
 S_u : section utile du piston (m^2 ou cm^2 en automatisme)
(attention tenir compte de la tige du vérin en rentrée de tige)

VITESSE DE DÉPLACEMENT DE TIGE

(voir figure 3)

$$v = q / S_u$$

- v : vitesse de la tige ($m \cdot s^{-1}$)
q : débit de fluide ($m^3 \cdot s^{-1}$)
 S_u : section utile du piston (m^2 ou cm^2 en automatisme)
(attention tenir compte de la tige du vérin en rentrée de tige)



1 – ROLE

Le pont en H permet de changer le signe de la tension d'alimentation. S'il est réversible en courant, le courant dans le récepteur pourra s'inverser également.

Utilités :

- faire tourner un moteur DC dans les 2 sens et de le freiner : contrôleur de moteur ;
- créer une tension alternative : onduleur ;
- créer une tension continue réglable : hacheur

2 – SCHEMA DE PRINCIPE

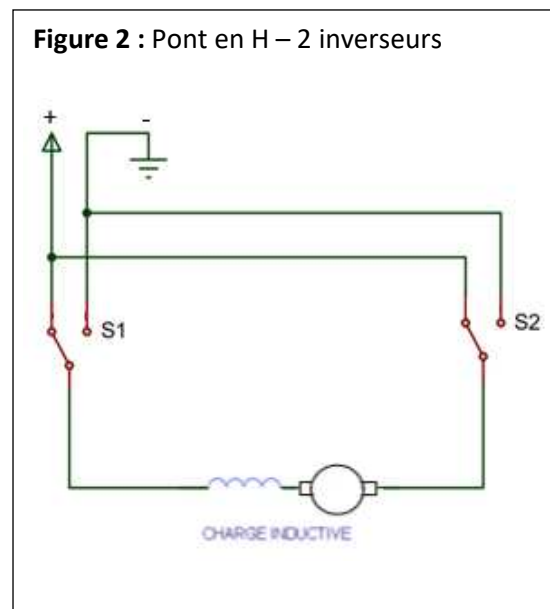
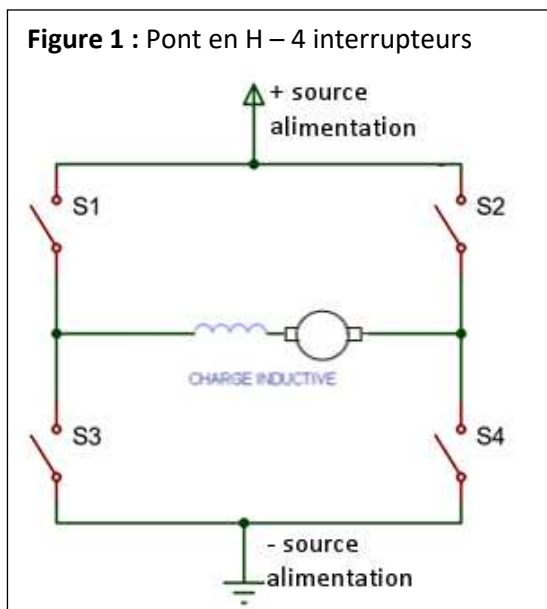
Un pont en H est composé de 2 parties :

- une partie puissance composée de 4 « interrupteurs » commandés (S1...S4) (relais, transistor bipolaire ou MOS, thyristor...) (figure 1). Un montage simplifié permet de créer des ponts en H avec seulement 2 contacts inverseurs (figure 2) ;
- une partie commande qui permet de contrôler l'ouverture (O) ou la fermeture (F) les « interrupteurs ».

Cette commande se fait le plus souvent par l'intermédiaire d'un microcontrôleur afin de contrôler le pont en :

- TOR (tout ou rien : tension dans la charge maximale ou nulle ou négative) ;
- PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation en Largeur d'Impulsion) => tension moyenne dans la charge réglable.

Schéma de principe de la partie puissance :

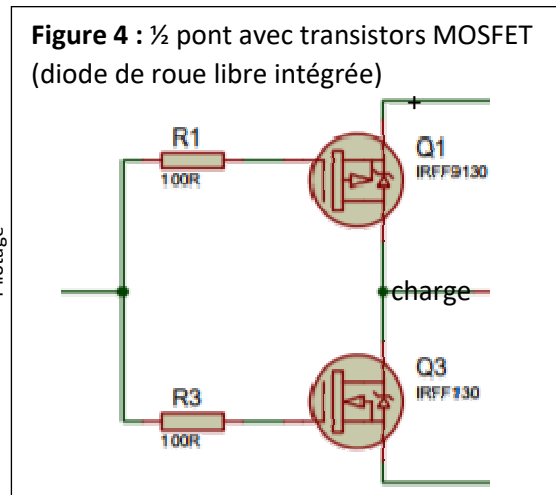
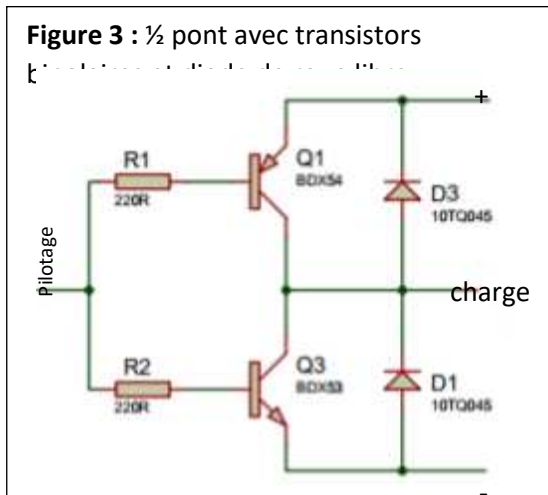


Les composants de commande des interrupteurs (S1...S4) ne sont pas représentés sur le schéma.

Remarques :

- les branches S1 et S3 forment un demi pont en H ;
- les branches S2 et S4 forment un demi pont en H ;
- les 2 branches S1, S3 et S2, S4 réunies forment un **pont en H** complet.

Exemple de composants pour le demi pont S1/S3 : Transistor associé à une diode de roue libre – Pilotage commun des transistors

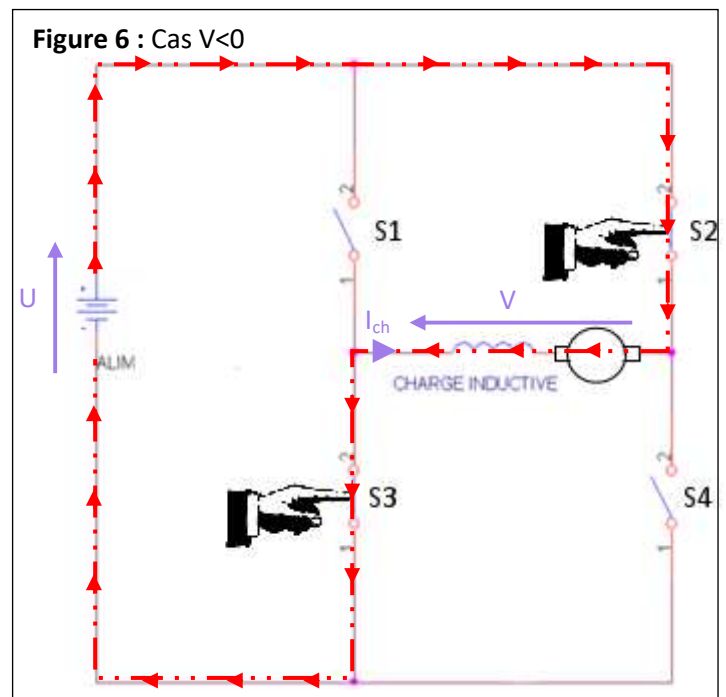
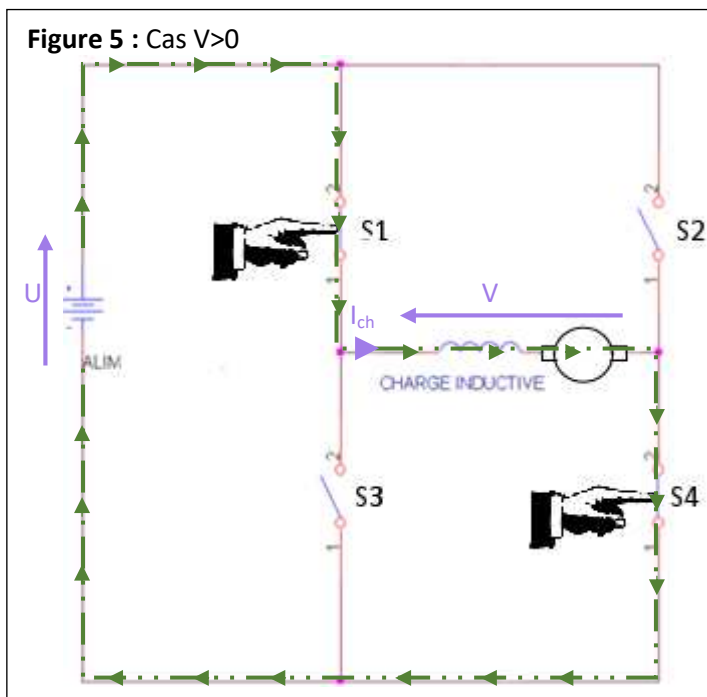


3 – FONCTIONNEMENT

Ce montage permet de faire passer du courant dans les 2 sens dans la charge :

Cas 1 : S1 et S4 commandés seuls

Cas 2 : SW2 et SW4 commandés seuls



ETAT DE S1	ETAT DE S4	ETAT DE S2	ETAT DE S3	MODE DE FONCTIONNEMENT	TENSION DE LA CHARGE	SENS DU COURANT DANS LA CHARGE
O	O	O	O	Circuit ouvert	$V = 0$	0
F	O	F	O	Roue libre	$V = 0$	$I_{ch} > 0$ ou < 0 ou $= 0$
O	F	O	F	Roue libre	$V = 0$	$I_{ch} > 0$ ou < 0 ou $= 0$
F	F	O	O	Alim. positive (cas 1)	$V = -U$	$I_{ch} > 0$ ou < 0 ou $= 0$
O	O	F	F	Alim. Négative (cas 2)	$V = +U$	$I_{ch} > 0$ ou < 0 ou $= 0$
F	X	X	F		!!! DANGER !!!	Court-circuit
X	F	F	X		!!! DANGER !!!	Court-circuit

O : Ouvert – F : Fermé

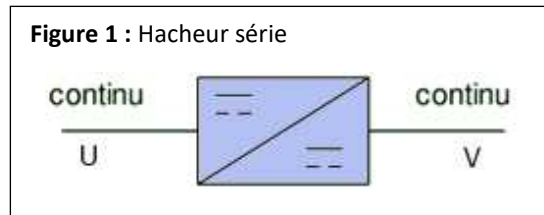
Nota : Si la charge est un moteur DC, ce montage permet d'inverser le sens de rotation du moteur ou de le freiner.



1 - ROLE

Le hacheur série permet de contrôler la valeur moyenne de la tension d'alimentation d'un appareil.

Il fait partie des convertisseurs continu / continu (qui modifie une tension continue en une tension continue de valeur plus faible) dont le symbole est donné figure 1.



Utilités :

- faire varier la vitesse un moteur DC dans un sens de marche : contrôleur de moteur ;
- faire varier la tension d'un appareil nécessitant une tension continue variable.

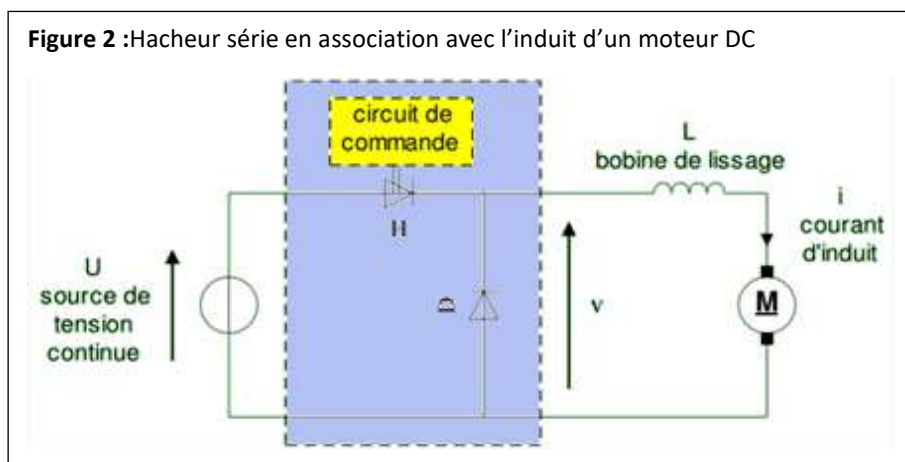
Il présente l'avantage de réduire une tension continue avec un excellent rendement contrairement aux circuits de régulation de tension linéaires.

2 - SCHEMA DE PRINCIPE (figure 2)

Un hacheur série est composé de 2 parties :

- une partie puissance composée de 1 « interrupteur » commandé (H) (transistor bipolaire ou MOS, thyristor...) (figure 1 et d'un « interrupteur non commandé (diode)
- une partie commande qui permet de contrôler l'ouverture (O) ou la fermeture (F) de l'« interrupteurs commandé ».

Cette commande se fait le plus souvent par l'intermédiaire d'un microcontrôleur afin de contrôler la tension moyenne de sortie v en PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation en Largeur d'Impulsion) => tension moyenne dans la charge réglable.



Les composants de commande de l'interrupteur (H) ne sont pas représentés sur ce schéma.

L'interrupteur H est un interrupteur unidirectionnel (réalisé par des transistors).

3 - FONCTIONNEMENT (figures 3 et 4)

Le circuit de commande règle :

- le rapport cyclique $\alpha = \frac{T_{on}}{T} = \frac{\text{durée fermeture de H}}{\text{période de hachage}}$ (sans unité) - ($0 \leq \alpha \leq 1$;
- et $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\text{période de hachage}}$ (en Hz).

L'interrupteur H est commandé périodiquement (sur la période T) :

- de $0 \leq t \leq \alpha.T$, le circuit de commande provoque la fermeture de l'interrupteur H et par conséquent le blocage de la diode D (figure 3) – dans ce cas $v = U$, $i_H = i$, $i_D = 0$;
- de $\alpha.T \leq t \leq T$, l'ouverture de H provoque le passage du courant dans la diode D (tant que la bobine de lissage de la charge impose la présence d'un courant) (figure 4) – dans ce cas $v = 0$, $i_H = 0$, $i_D = i$.

Figure 3 : de $0 \leq t \leq \alpha.T$

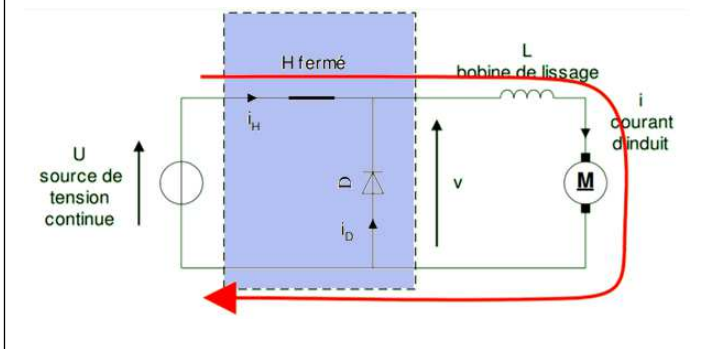
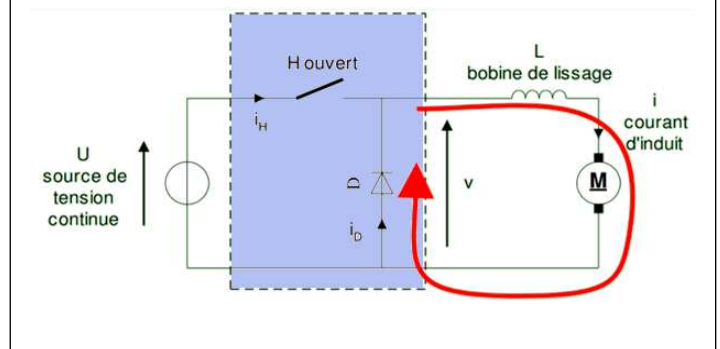


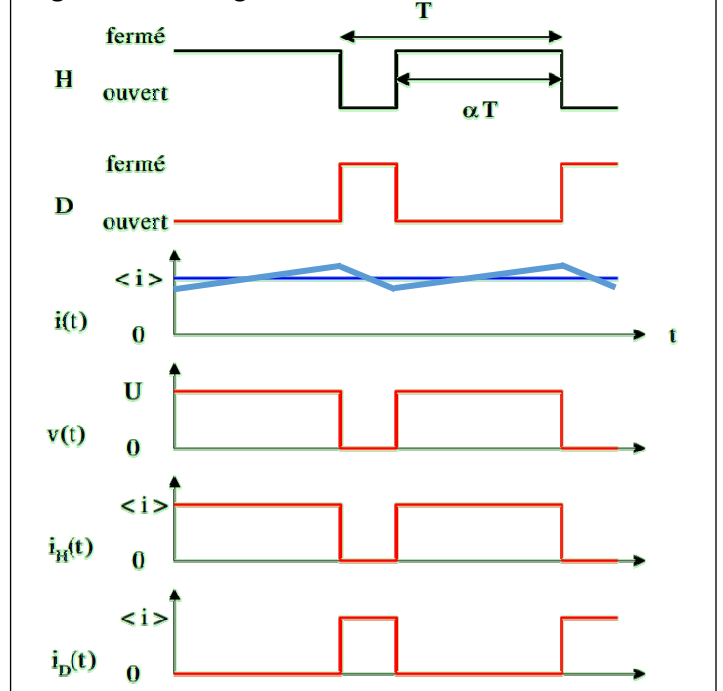
Figure 4 : de $\alpha.T \leq t \leq T$



D est une diode de « roue libre ». Elle est nécessaire quand la charge est inductive, pour éviter l'interruption du courant i quand H s'ouvre.

Chronogrammes (figure 5) :

Figure 5 : chronogrammes



4 - Principale valeur caractéristique

Tension moyenne aux bornes de la charge (en V) : $\langle v \rangle = \alpha \cdot U$