
Moteurs

Première Partie – MOTEURS ÉLECTRIQUES

- Niard, *Machines électriques* (Terminale F3) ;
- Chatelain, *Machines électriques* ;
- Brébec *et al.*, *Électronique II*, PSI-PSI*, H-Prépa, Hachette (édition de 1997) ;
- Mérat *et al.*, *Génie électrotechnique*, Collection étapes Références, Nathan ;
- Wildi, *Électrotechnique*, De Boeck.

Seconde Partie – MOTEURS THERMIQUES

- Pérez, *Thermodynamique*
- Livres de prépa 1ère année MPSI/PCSI
- Bazarov, *Thermodynamique*

Deux types de moteurs seront proposés dans ce TP. D'une part, les moteurs électriques : l'introduction du Niard (pp. 5-8)¹ permet de se faire une idée globale sur les différents dispositifs.

		J. NIARD Machines électriques	J. CHATELAIN Machines électriques
Machines synchrones		p. 188 à 222	p. 327 à 335, 420 à 422
Machines asynchrones		p. 154 à 186	p. 225, 247 à 251, 259 à 260
Machines à courant continu	-génératrice	p. 21 à 24	p. 514 à 518
	-moteurs	p. 24 à 27	p. 519 à 525, p. 529
Moteur pas à pas		p. 240	
		Lecture facile, développe surtout les aspects techniques.	Etude théorique des machines électriques. Assez ardu.

Vous pouvez aussi consulter :

- J.-M. Brébec *et al.*, *Électronique II*, PSI-PSI*, H-Prépa, Hachette (édition de 1997) ;
- R. Mérat *et al.*, *Génie électrotechnique*, Collection étapes Références, Nathan.

Les plus curieux trouveront des informations complémentaires (aspects techniques notamment) dans T. Wildi, *Électrotechnique*, De Boeck.

D'autre part, les machines thermiques : on dispose dans la collection d'un moteur de Stirling.

I) [1P] Moteur asynchrone

1) Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

Vous pouvez consulter Niard, pp. 180-186, et H-prépa, pp. 114-121.

- Le stator, alimenté en triphasé, fournit un champ magnétique B_s tournant à la pulsation ω_s .
- Le rotor comporte un bobinage, de surface totale S . La résistance totale du rotor est R_r et son inductance totale est L_r .

Pour $\omega_r \neq \omega_s$, il apparaît dans le rotor un courant induit i_r de pulsation $\omega_g = \omega_s - \omega_r$ (pulsation de glissement). Le moment magnétique du rotor $\vec{M} = i_r S \vec{n}(t)$ [vecteur unitaire $\vec{n}(t)$ selon son axe, tournant à ω_r] subit le couple $\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}_s$. En moyenne sur le temps, ce couple est trouvé égal à (cf. H-prépa, p. 115) :

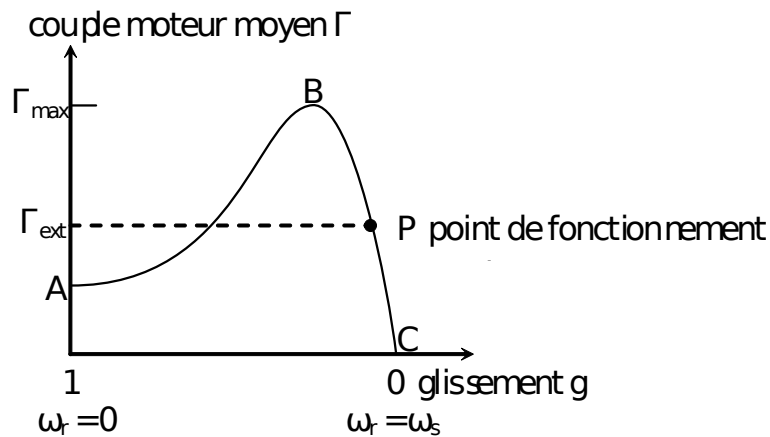
$$\Gamma = \frac{S^2 B_s^2}{2} \times \frac{R_r g \omega_s}{R_r^2 + L_r^2 g^2 \omega_s^2}$$

où $g = \omega_g / \omega_s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$ est le glissement du moteur (cf. Niard, p. 156).

En fonctionnement normal, le glissement est très faible (inférieur à 10%). La partie AB de la courbe correspond à un fonctionnement instable du moteur (un accroissement de la vitesse provoque un accroissement du couple moteur Γ qui accroît la vitesse...). La partie BC, correspondant à un fonctionnement stable, est la seule accessible dans le cadre du TP.

Pour des exemples numériques, voir Niard, pp. 184-186 (le moteur y est sensiblement plus puissant que le nôtre).

¹Les pages indiquées correspondent à l'édition de 1985.



2) Étude du moteur asynchrone triphasé : dispositif expérimental

N'oubliez pas de consulter la notice du banc moteur [N 488].

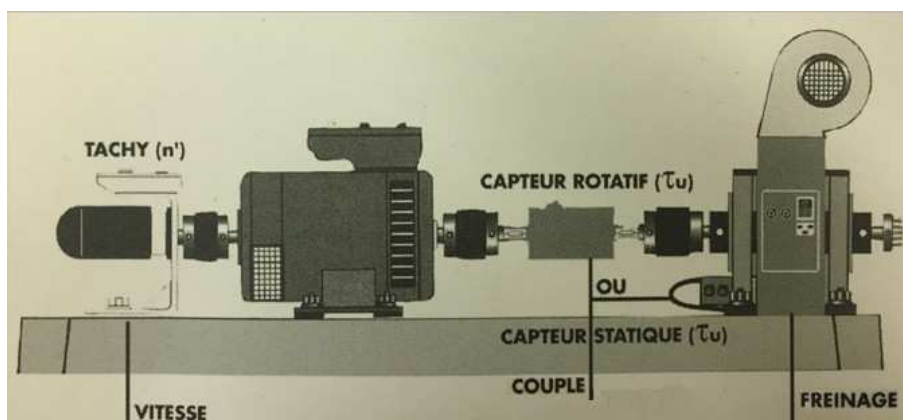
Le système dont nous disposons est constitué d'un **moteur asynchrone triphasé** couplé à un capteur de couple, un frein à poudre, et une dynamo tachymétrique.

Le but des manipulations proposées ici est d'étudier quelques-unes des caractéristiques du moteur asynchrone. Pour prendre différents points de mesure, on changera la tension d'alimentation du boîtier de freinage (**sans jamais dépasser 4V**). Faire varier le couple résistif permet d'explorer divers points de fonctionnement du moteur. L'allure typique de la caractéristique couple-vitesse de rotation est rappelée au paragraphe précédent (seule la partie stable de cette courbe pourra être explorée). On pourra grâce aux appareils de mesure en déduire couple, vitesse de rotation, et puissance électrique absorbée par le stator.

ATTENTION : les tensions manipulées sont de l'ordre de 220 V.

Ne toucher aux branchements qu'une fois le moteur arrêté.

En cas de problème, couper l'alimentation au moyen de l'interrupteur coup-de-poing d'arrêt d'urgence.

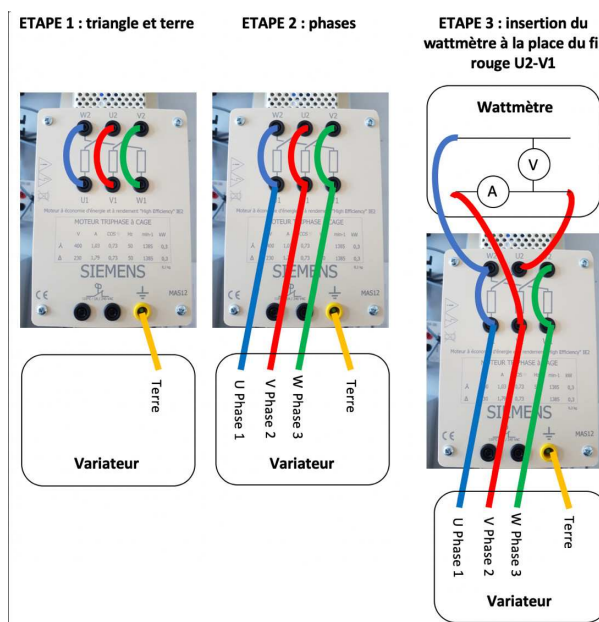


a) Moteur

Stator Il s'agit de la partie fixe du moteur. Il est constitué de bobinages entourant des pièces polaires en matériau ferromagnétique. Ils doivent être alimentés en triphasé et la tension aux bornes de chaque bobinage doit être égale à 220 V. Sa structure (disposition des bobinages et des pièces polaires) est telle que tout se passe comme si le stator créait un champ magnétique tournant à la fréquence $f_s = f/2$ où f est la fréquence d'alimentation (cf. Niard, pp. 145-149). Par exemple, en utilisant la fréquence du secteur (50 Hz), cela correspond à un champ tournant de fréquence 1500 tours/min (25 Hz).

Le branchement utilisé est de type triangle, sans neutre. Pour mesurer la puissance électrique fournie sur l'une des phases, on utilisera de préférence un wattmètre numérique donnant aussi accès à la tension et à l'intensité. À défaut, en plus du wattmètre, on ajoutera un ampèremètre alternatif et un voltmètre alternatif. Noter qu'avec le système d'alimentation utilisé ici, qui synthétise le triphasé à partir du monophasé, la valeur du $\cos \Phi$ indiquée par le wattmètre est très instable, inexploitable.

On veillera à ne jamais dépasser le courant maximum de 5,6 A.



Pour réaliser les branchements adéquats, on se réfère à la figure précédente (voir aussi la figure de la notice, très complémentaire, qui fait apparaître explicitement le montage en triangle, ce qui rend notamment plus transparent le branchement du wattmètre).

1. On connecte toutes les prises de terre avec les fils verts/jaunes adéquats.
2. On connecte les bornes du stator en triangle : U1 à W2, V1 à U2 et W1 à V2.
3. On relie la borne U du variateur à U1, V du variateur à V1 et W du variateur à W1.
4. Enfin, pour les branchements du wattmètre, on se reporte au schéma (on supprime le lien U2-V1 et on referme le triangle via le wattmètre). C'est normal si on laisse une des quatre bornes de ce wattmètre sans connexion (celle en haut à droite).

Le montage du wattmètre monophasé proposé permet de mesurer la puissance P_1 qui entre dans une seule bobine du stator. Le réseau étant équilibré, la puissance consommée par le moteur vaut $P_0 = 3P_1 = 3UI \cos \Phi$, où U est la tension aux bornes d'une bobine et I l'intensité du courant qui la traverse.

Rotor Il s'agit de la partie tournante du moteur. Il est bobiné et prévu pour être court-circuité en fonctionnement normal.

b) Système de freinage à poudre magnétique

(Détails et schémas dans la notice)

Un frein à poudre est constitué d'un volant d'inertie soumis aux frottements d'une poudre métallique fluide dont la viscosité dépend du champ magnétique appliqué. En imposant un courant d'excitation à cette poudre, on peut imposer un couple de freinage proportionnel au courant injecté, et indépendant de la vitesse de rotation. Ici, on fera attention à ne **jamais dépasser 4V** pour la tension d'alimentation du module de freinage, et à ne pas rester trop longtemps à des tensions au-delà de 3V. Pour des trop grands freinages, le moteur peut finir par lâcher et se détériorer irréversiblement.

c) Capteur de couple

L'alimentation du capteur et le module de mesure du couple sont réunis dans un même boîtier. Il suffit de brancher le câble du capteur à la prise associée sur le banc moteur. On connecte alors la sortie du boîtier à un multimètre pour obtenir une tension qui nous permettra d'en déduire le couple du moteur.

Une tension de 5V correspond à un couple de 20 N.m. Ici on devrait atteindre des couples maximaux de l'ordre de 3 N.m si on n'a pas dépassé la valeur maximale de 4V pour la tension de freinage magnétique (comme spécifié au paragraphe précédent). Consulter la notice du capteur de couple pour évaluer les incertitudes.

d) Dynamo tachymétrique

C'est un moteur à courant continu qui fonctionne en génératrice et en auto-excitation, ici elle sert à retrouver la valeur de la vitesse de rotation. La valeur de la tension que l'on peut lire en se connectant sur les bornes de la dynamo est proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur avec la relation $10V = 1000$ tours/min. Pour expliquer le principe général d'une dynamo, se reporter à l'Annexe.

3) Étapes de mise en place et expérience

- Connecter le frein à une alimentation qui peut monter jusqu'à 4V et commencer avec une tension d'alimentation nulle. *Ne pas oublier d'appuyer sur Output sur l'alimentation fournie avec le banc moteur !*
- Connecter le stator du moteur au variateur et au wattmètre en respectant soigneusement les branchements décrits précédemment.
- Connecter la sortie de la dynamo tachymétrique sur un multimètre pour mesurer une tension continue.
- Connecter le capteur de couple au boîtier adéquat. Connecter sa sortie sur un multimètre pour mesurer une tension continue.

Demander à Eric de confirmer les branchements avant d'enclencher le moteur.

- Lancer le moteur (on allume le variateur et on monte sa fréquence jusqu'à 50 Hz). Si le système disjoncte à l'enclenchement, vérifier que l'interrupteur coup-de-poing est bien tiré vers le haut.
- Pour faire varier le point de fonctionnement, on augmente progressivement la tension d'alimentation du frein à poudre sans jamais dépasser la valeur maximale de 4V.
- Noter les valeurs des grandeurs suivantes pour différents points de fonctionnement : Puissance indiquée par le wattmètre (attention au facteur 3 pour retrouver la puissance absorbée, cf. paragraphe précédent), Tension du capteur de couple, Tension de la dynamo tachymétrique.

a) [1P] Glissement et couple (cf. Niard, pp. 168, 171, 186)

Le glissement est l'écart relatif entre la vitesse de rotation du champ tournant (ici $f_s = 25$ Hz pour une alimentation de 50 Hz) et la vitesse de rotation du moteur (obtenue via la tension de sortie du tachymètre). Le courant dans le rotor oscille exactement à cette vitesse de glissement.

En traçant le couple du moteur (obtenue via la tension du capteur de couple) en fonction du glissement, on obtient la caractéristique du moteur $\Gamma(g)$. On peut réaliser un ajustement avec la formule rappelée plus haut :

- il faut donner des valeurs de départ assez proches de la réalité pour que l'ajustement se fasse. L'outil *Aperçu* de QtiPlot est particulièrement pratique.
- on peut vérifier la valeur de la pulsation du champ tournant ω_s , les autres paramètres sont plus compliqués à comparer à une valeur constructeur.

b) [1P] Rendement du moteur (cf. Niard, p. 168)

Tracer la courbe donnant le rendement η (rapport de la puissance mécanique fournie (utile) à la puissance électrique reçue) en fonction de la puissance mécanique fournie (puissance utile) :

- attention, la puissance fournie est bien le triple de la puissance lue sur le wattmètre ;
- la puissance utile s'exprime en fonction du couple et de la vitesse angulaire du rotor $\Gamma\omega_r$.

Le point de fonctionnement nominal, point de fonctionnement "normal" prévu par le constructeur (dont les valeurs typiques des différents paramètres est indiqué dans la notice et directement sur l'appareil), correspond généralement au point de fonctionnement de rendement maximal. Vérifier si c'est le cas ici. On fera attention à la valeur de la puissance nominale que l'on peut retrouver sur l'appareil : elle correspond soit à la puissance mécanique utile nominale, soit à la puissance électrique absorbée nominale (le lien entre les deux étant le rendement nominal $\eta = 72,7\%$ indiqué sur une étiquette collée sur le côté du moteur). En pratique, on trouve une valeur comprise entre 300 W et 400 W.

On peut tracer les courbes de rendement pour différentes fréquences d'alimentation (par exemple, 20 Hz et 40 Hz), et vérifier que le rendement maximal est atteint pour 50 Hz.

II) [AP] Champ magnétique tournant

1) Mise en place du champ tournant

On dispose dans la collection d'un jeu de trois bobines Leybold² (notice N8), munies de leur noyau en fer, placées à 120° les unes des autres et que l'on alimente grâce à une alimentation triphasée (26 V entre phases et neutre, 45 V entre phases) par un montage en triangle (voir notice). On génère alors au centre un champ magnétique tournant à la fréquence du secteur. L'alimentation triphasée doit être elle-même branchée sur la prise triphasée alimentée par le variateur du moteur asynchrone. On fera attention à l'ordre des couleurs qui demande de ne pas torsader les différents fils : noir, marron, gris, puis la masse (verte et jaune).

On utilise une bobine supplémentaire que l'on place au centre du dispositif et dont on mesure à l'oscilloscope la f.e.m. induite par le champ tournant. Quelle composante du champ observe-t-on ainsi ?

Mettre en évidence la phase relative des trois champs produits par les trois bobines en alimentant successivement une seule des trois bobines. Comment faut-il synchroniser l'oscilloscope ?

Ajuster alors la position des noyaux en fer de sorte que ces trois champs aient même amplitude au centre. Alimenter à nouveau les trois bobines. Vérifier alors que le champ magnétique total est bien un champ tournant : l'amplitude du signal est indépendante de la direction d'observation θ et la phase dépend linéairement de θ .

Mesurer le rapport des amplitudes du champ créé par une seule bobine et du champ tournant. Faire un bilan de puissance.

2) Réalisation de moteurs de principe

Remplacer la bobine de mesure par une aiguille de boussole. On réalise ainsi un **moteur synchrone** de principe. Monter la fréquence d'alimentation à 25 Hz puis stopper à la main l'aiguille. Vérifier alors que le moteur synchrone ne démarre pas sans y être aidé (ou sans augmenter lentement la fréquence d'alimentation de l'inducteur).

Remplacer l'aiguille par une *cage d'écureuil* : la cage est mise en rotation. On réalise ainsi un **moteur asynchrone** de principe. Pour vaincre les frottements de ce dispositif, il faut monter très progressivement la fréquence du variateur jusqu'à sa fréquence maximale (doucement sinon les fusibles du transformateur grillent). On pourra également rapprocher le plus possible les ferromagnétiques de la cage. La mesure de la vitesse de rotation de la cage *via* une fourche optique est possible quoique délicate. Le "vrai" moteur asynchrone est plus adapté à cette mesure. Montrer qu'on peut changer le sens de rotation du moteur en échangeant les branchements de deux des bobines.

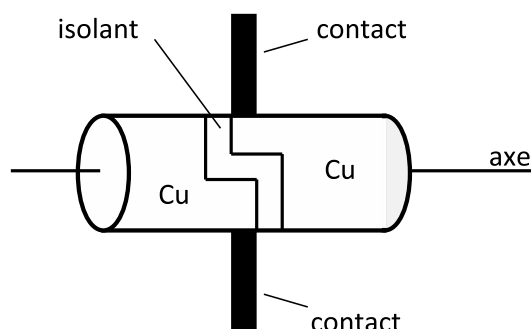
III) Moteur à courant continu

1) [1P] Expérience qualitative

Nous proposons ici une expérience qualitative sur un moteur didactique. On utilise comme stator un ensemble de deux bobines horizontales, alimentées de manière symétrique pour former un champ important. Le rotor est alimenté par l'intermédiaire du **collecteur**, qui est la pièce maîtresse du moteur

² 1200 tours, résistance 10 Ω , pouvant supporter 1 A environ.

à courant continu. La figure ci-dessous explique comment les contacts doivent être disposés sur le collecteur.



Alimenter en série le stator et le rotor par un générateur continu d'environ 10 V pouvant débiter 1 A. Pour le démarrage, placer le rotor perpendiculairement au stator de façon à avoir un couple important (on pourra éventuellement l'aider à se lancer en cas de frottements initiaux trop importants). Faire fonctionner le système le moins longtemps possible, car les étincelles qui se produisent lors de la commutation abîment rapidement le collecteur.

Interpréter le rôle du collecteur. Vérifier que l'inversion de la polarité du générateur ne change pas le sens de rotation du moteur (car rotor et stator sont alimentés en série !).

Remarques :

- on peut inverser les bornes d'alimentation du *rotor* : le sens de rotation est alors inversé ;
- si les deux bobines du stator ne sont pas branchées symétriquement, le champ total devrait être a priori nul. Des défauts de symétrie du dispositif conduisent néanmoins à un champ non nul, mais la vitesse de rotation du moteur est alors bien plus faible.

2) [1P] Mise en place du moteur

On utilise le moteur à courant continu à alimentation 12 V découplée [N 02], et on hisse sur une distance fixée différentes masses ($m = 200$ g, 1 kg, 2 kg, 3 kg, etc.). Il est bien entendu possible d'effectuer une étude plus longue en utilisant un plus grand nombre de masses. Si l'on souhaite faire un point "à vide" il faudra tout de même mettre une petite masse de sorte que le fil reste bien tendu et s'enroule correctement. On alimente le moteur avec une alimentation réglable pouvant fournir 12 V et on le branche en série avec un ampèremètre **et un interrupteur**. On place un voltmètre à ses bornes. L'interrupteur servira à déclencher ou stopper la remontée rapidement.

Pour fixer le moteur sur la table, on pourra utiliser deux serre-joints. Penser à placer une mousse au sol pour ne pas abîmer les masses, plutôt de couleur claire (pour faciliter le travail du logiciel Cinéris si utilisé), et penser aussi à accompagner la masse lors de sa retombée quand l'interrupteur est en position ouverte.

De nombreuses mesures différentes peuvent être effectuées sur le moteur à courant continu. En montage, vous serez amené à faire des choix sur les quantités mesurées et les principes que vous souhaitez illustrer. Pour ce moteur, on peut faire varier essentiellement deux paramètres extérieurs : la tension imposée et la masse à remonter. Le fait d'avoir deux paramètres à faire varier augmente grandement le jeu de données mesurables et on peut facilement s'y perdre. Il est donc particulièrement important d'être organisé et de savoir à l'avance ce que l'on va faire avant de se lancer dans les mesures.

3) [1P] Relation entre la tension et la vitesse de rotation

Un grand intérêt du moteur à courant continu est de pouvoir commander la vitesse de rotation via la tension à ses bornes U car la dépendance entre les deux est affine. En effet, on peut écrire $U = e + RI$ (cf Électronique II PSI, H Prépa), avec e la fém qui vérifie $e = K\Omega$ (K constante de couplage électromécanique), R la résistance du rotor donnée dans la notice et I l'intensité du courant dans le rotor, normalement indépendante de la tension à charge fixée. On peut donc réécrire $U = K\Omega + \text{cste}$.

On propose de vérifier dans un premier temps cette relation tension-vitesse en faisant varier la tension d'alimentation dans un domaine raisonnable : **on ne dépassera jamais 12 V**, et on n'imposera pas non plus des tensions trop faibles (à juger selon la charge imposée, ne pas aller en dessous de 8 V pour les grandes charges). Vérifier également que le courant ne prend pas des valeurs trop importantes.

Pour obtenir la vitesse v de remontée de la masse, on peut utiliser une webcam et le logiciel Cinéris, on extraie la vitesse en régime stationnaire avec la pente de la courbe donnant la hauteur de la masse en fonction du temps. Relier la vitesse angulaire de rotation du moteur Ω à la vitesse de remontée de la masse v et au rayon de la bobine d'enroulement du fil r .

Expérience à réaliser : à masse fixée, mesurer la vitesse de remontée de la masse en régime stationnaire pour différentes tensions d'alimentation du moteur. On relèvera aussi au passage les valeurs de l'intensité fournie au moteur, qui serviront pour les sections suivantes.

Tracer alors la courbe donnant $U(\Omega)$ (ou $\Omega(U)$) pour une masse fixée³ et en déduire le coefficient K . On pourra ensuite faire des mesures pour différentes masses et vérifier que K varie peu. L'ordonnée à l'origine permet de retrouver la valeur de R (si on a bien noté la valeur de I). Comparer à la valeur donnée dans la notice.

Attention, le recours à Cinéris peut s'avérer très chronophage quand on commence à faire beaucoup de points et donc le répéter un grand nombre de fois peut être problématique le jour de l'oral. Une possibilité est de ne prendre qu'une seule courbe donnant la position d'une masse moyenne en fonction du temps et d'évaluer le domaine des hauteurs sur lequel le moteur fonctionne effectivement à vitesse constante. Dès lors le reste des mesures peut être effectué plus rapidement au chronomètre : on mesure le temps mis par une masse pour être remontée entre deux niveaux situés dans le domaine où la vitesse est stationnaire.

Un conseil : pour mesurer en même temps le temps de remontée au chrono, la valeur de la tension et celle de l'intensité quand on est seul, on peut répéter plusieurs fois la même mesure à chaque fois.

4) [1P] Caractéristique et point de fonctionnement

Expérience à réaliser : à tension fixée, mesurer la vitesse de remontée de la masse en régime stationnaire pour différentes masses, ainsi que les intensités fournies par le moteur.

On obtient ainsi les courbes d'intensité en fonction de la vitesse de rotation à U fixé. En utilisant le paramètre K déterminé précédemment, on peut alors obtenir les courbes de couple électro-mécanique $\Gamma_{em} = KI$ en fonction de Ω à U fixé pour plusieurs valeurs de U . On doit obtenir un faisceau de droites parallèles. Ces courbes, les caractéristiques du moteur, sont également importantes pour sa caractérisation.

³En évaluant les incertitudes sur U et Ω , on s'arrangera pour tracer en ordonnée la grandeur ayant la plus grande incertitude.

Le point de fonctionnement est fixé en régime établi par l'égalité de ce couple avec le couple utile imposé par la charge (si on néglige les couples de frottement, cf. plus bas). Ici, il s'exprime $\Gamma_u = mgr$ où m est la masse remontée et r est le rayon de la bobine d'enroulement.

La pente élevée et négative des caractéristiques montre que la vitesse de rotation Ω est principalement imposée par la tension d'alimentation U , et que les points de fonctionnement sont stables (si Ω augmente, le couple utile aussi donc le nouveau point de fonctionnement tend à diminuer Ω).

Sur ces caractéristiques, où sont les points de la remontée à vide ? Les points correspondant au couple au démarrage ?

5) [2P] Variation du rendement avec la charge

Cette mesure étant le résultat principal de la manip sur le moteur asynchrone, il faut privilégier fortement les expériences proposées dans les deux paragraphes précédents en cas de présentation des deux dispositifs pour le montage Moteurs, sinon la redondance entre ces deux types de mesures risque d'ennuyer fortement le jury.

On peut remonter à la variation du rendement de la conversion électrique-mécanique avec la charge, dans le cas d'un moteur à courant continu.

La puissance électrique fournie au système est donnée par $P_e = UI$ et la puissance utile est donnée par $P_u = \Gamma_u \Omega = mgv$. En déduire le rendement.

Tracer le rendement en fonction de la puissance utile à U fixé (de préférence à la tension nominale de 12 V). On peut aussi montrer que les rendements atteints quand le moteur fonctionne à sa tension nominale sont supérieurs à ceux atteints pour des tensions inférieures. Le point de fonctionnement nominal, point de fonctionnement recommandé par le constructeur, correspond généralement au point de fonctionnement maximisant le rendement (ce que l'on supposera ici). Donner les valeurs des divers paramètres du moteur correspondant à son point de fonctionnement nominal à l'aide de la courbe obtenue.

6) [AP] Évaluation des couples de frottement mécanique

C'est cette fois l'intensité que l'on va pouvoir relier aux différents couples.

En effet, on a $\Gamma_{em} = KI$ avec Γ_{em} le couple électromagnétique (ou couple de Laplace), qui est égal à la somme du couple utile et du couple de frottement : $\Gamma_{em} = \Gamma_u + \Gamma_{frott}$ (cf *Électronique II*, PSI-PSI*, H-Prépa). Il faut prendre dans ce cas en toute rigueur la valeur de K obtenue dans le cas de la remontée "à vide".

À l'aide des mesures précédentes, vérifier que l'on a toujours $\Gamma_u < \Gamma_{em}$ et représenter Γ_{frott} en fonction de la masse m de la charge à tension fixée, puis en fonction de la tension à masse fixée. Interpréter les courbes obtenues.

IV) [AP] Moteur pas à pas

On dispose également dans la collection d'un moteur pas à pas (voir notice N592).

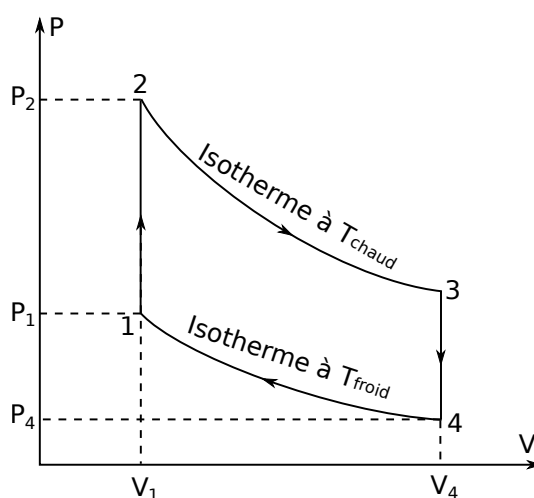
V) Moteurs thermiques – Étude d'un moteur de Stirling

1) [1P] Principe de fonctionnement

Le moteur de Stirling permet la transformation d'énergie thermique en énergie mécanique. Le principe consiste à chauffer un fluide pour qu'il se détende et entraîne un piston pour ensuite le refroidir et revenir aux conditions initiales. Le cycle thermodynamique est le suivant :

- échauffement isochore (à V_1) $1 \rightarrow 2$;
- détente isotherme (à T_c) $2 \rightarrow 3$;
- refroidissement isochore (à V_4) $3 \rightarrow 4$;
- compression isotherme (à T_f) $4 \rightarrow 1$.

Le cycle de Stirling idéal est représenté ci-après.



Le rendement η du cycle de Stirling est (cf. par exemple Bazarov p 331) :⁴

$$\eta = \frac{T_c - T_f}{T_c + (T_c - T_f) \cdot \frac{C_{V,m}}{R \ln(V_4/V_1)}}$$

Ce rendement idéal est inférieur au rendement du cycle de Carnot fonctionnant entre les mêmes isothermes $\eta_C = (T_c - T_f)/T_c$. De plus, il dépend de la nature du fluide porteur. En réalité, le cycle n'est pas réversible et donc le rendement est loin d'être maximal. Le travail fourni par le système pendant un cycle correspond à l'aire délimitée par la courbe dans le diagramme PV . Dans ce TP, on se propose d'évaluer le rendement d'un moteur de Stirling didactique, en traçant un diagramme PV expérimental.

2) [1P] Dispositif expérimental

Nous disposons d'un moteur à air chaud didactique [N 12].

⁴Il est conseillé de reprendre les hypothèses de ce calcul. En l'occurrence, il suppose que le fluide caloporteur est un gaz parfait et que les transformations sont mécaniquement réversibles (ce qui permet de calculer le travail sur un isotherme à T , $W = -\int P dV = -nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$). L'énergie consommée est celle prise à la source chaude $Q_{12} + Q_{23}$.

Si on rajoute un *régénérateur idéal* dans le moteur de Stirling, les transferts thermiques Q_{12} et Q_{34} (qui se compensent) deviennent internes ; l'énergie consommée est alors uniquement Q_{23} . Dans ce cas, le rendement devient égal à celui de Carnot η_C .

- La mesure de pression est réalisée à l'aide d'un pressiomètre Jeulin, que l'on connectera à la sortie du piston du moteur. Le pressiomètre est pourvu d'une sortie analogique que l'on connectera à un oscilloscope (ou une carte d'acquisition) ;
- La mesure de volume est réalisée à l'aide d'un potentiomètre linéaire repérant la position relative du piston. Un montage type pont diviseur de tension permet alors convertir la position en tension. Connaissant le diamètre du cylindre, il est possible de remonter au volume d'air dans le piston.
- Le chauffage du piston est réalisé à l'aide d'une lampe à alcool.

Important – En vue de la présentation de cette expérience lors d'un montage, il est important de réfléchir aux questions suivantes : quel est le système qui suit le cycle de Stirling ? À quelle situation réelle correspond chaque étape du cycle ? Où est la source chaude / la source froide ? Quelles sont les limites du cycle réel par rapport au cycle de Stirling idéal ?

Les différentes étapes du cycle sur le moteur expérimental sont notamment explicitées dans la notice.

3) [1P] Manipulation

a) Observation du cycle

- Connecter l'embout du pressiomètre Jeulin au piston du moteur. La sortie analogique délivre une tension U_P allant de -2.5 V à $+2.5\text{ V}$ pour la gamme de pression correspondante de 0 à 2000 hPa (voir la notice).
- Utiliser le potentiomètre linéaire en pont diviseur de tension pour mesurer la position du piston : on l'alimente sur ses bornes extrêmes (rouge et bleue) avec une tension continue de 1 à 2 V (**!!! ne pas dépasser 2V !!!**), et on mesure la tension U_V entre la borne rouge et la borne jaune.

Pour rendre l'expérience quantitative, il faut calibrer les tensions mesurées. Pour la pression, il suffit d'appliquer le facteur de conversion donné par la notice constructeur (vérifier rapidement une valeur pour éviter les erreurs). La pression P en Pa est donc donnée par la relation suivante :

$$P = \alpha \times (U_P + U_0),$$

avec $\alpha = 4 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{V}^{-1}$, et $U_0 = 2.5\text{ V}$.

Pour la position du piston, effectuer une calibration préalable en le positionnant manuellement sur ses deux positions extrêmes, on notera $U_{V,max}$ la tension mesurée correspondant au volume maximal et $U_{V,min}$ la tension mesurée correspondant au volume minimal. La variation maximale de volume δV_{max} se déduit de l'excursion du piston $\Delta = 24\text{ mm}$ (voir notice du moteur) et du diamètre du cylindre de travail $d = 25\text{ mm}$. La notice donne aussi directement V_{max} et V_{min} . En déduire la relation entre la tension mesurée U_V et le volume dans le piston :

$$\delta V = \frac{U_V - U_{V,min}}{U_{V,max} - U_{V,min}} \delta V_{max},$$

où $\delta V = V - V_{min}$ est la variation de volume par rapport au volume minimal V_{min} .

- Peser la lampe à alcool à l'aide d'une balance de précision. Pour évaluer le rendement, on pèsera le réchaud d'alcool avant et après l'expérience, en prenant garde de noter la durée totale de combustion.
- Remplacer la lampe dans son support et allumez la pour chauffer le piston. **Déclencher un chronomètre à l'instant où la lampe est allumée** afin de déterminer le taux massique de combustion d'alcool dans les conditions de l'expérience.

- Après quelques instants, le volume d'air est suffisamment chaud : lancer le moteur à la main pour initier la rotation.
- Dans un premier temps, on déconnectera la dynamo de charge et le moteur tournera à vide.

Une fois le moteur lancé et stabilisé, connecter la tension du potentiomètre sur la voie X d'un oscilloscope et le pressiomètre sur la voie Y. Observer le cycle à l'oscilloscope. Acquérir les données sur l'ordinateur via le logiciel d'acquisition. Il est recommandé de moyenner sur plusieurs périodes.

b) Calcul du rendement

Pour mesurer la **puissance mécanique utile**, il va falloir calculer l'aire d'un cycle et la diviser par le temps de parcours d'un cycle, correspondant tout simplement à la période du signal directement observé sur l'oscilloscope. Pour obtenir l'aire du cycle :

- la méthode "à l'ancienne" consiste à tracer le cycle sur une feuille, qu'ensuite on découpe et pèse, ce qui permet de retrouver l'aire si l'on connaît le poids d'une même feuille de surface connue.
- sur QtiPlot, une méthode pas très optimale consiste à récupérer les signaux temporels (pas en XY) $U_P(t)$, $U_V(t)$ correspondant au pressiomètre et au potentiomètre sur l'oscilloscope, par exemple avec un Single. On utilise ensuite le logiciel d'interface pour sauvegarder ces courbes et les importer sur QtiPlot. Après conversion $U_P \rightarrow P$ et $U_V \rightarrow V$, on met la colonne Volume en [X] et Pression en [Y]. Dans le menu Analyse > Intégrer, on peut obtenir l'intégrale de PdV . Le graphique obtenu correspond en abscisse au volume, et en ordonnée à l'opposé du travail $-W$ accumulé sur chaque cycle. On peut alors mesurer le travail fourni sur plusieurs périodes, et connaissant la durée d'un cycle (mesurée simplement sur l'oscilloscope), on en déduit la puissance utile $P_u = -W/T$. Pour cela, on peut utiliser l'outil "Curseur sur courbe" et lire les coordonnées du point atteint après N cycles, ou bien lire la valeur sur le tableau associé (qui est au départ caché sur QtiPlot, mais accessible via l'onglet Fenêtre ou en double-cliquant sur le graphe puis sur Table).

À l'aide de deux thermocouples, mesurer les températures froides et chaudes du moteur. En déduire le rendement théorique du moteur de Stirling.⁵

Une fois la lampe à alcool éteinte, arrêter le chronomètre et en déduire le taux de combustion (massique) de l'alcool. Sachant que le pouvoir calorifique de l'alcool est de 25 kJ.g^{-1} (valeur donnée dans la notice), en déduire la **puissance thermique fournie** au système dans les conditions de l'expérience.

Connaissant la puissance mécanique et la puissance thermique, en déduire le rendement expérimental et le comparer au rendement théorique précédemment calculé.

Remarque importante : le rendement dépend de la différence de température entre la source froide et la source chaude. Plus cette différence de température est grande, plus le rendement est élevé. En pratique, le moteur tourne à couple résistif donnée, donc il tournera d'autant plus vite que la différence de température est grande. Une fois le chauffage allumé, la chaleur va diffuser lentement dans le dispositif à travers les pièces de verres et de métal. Ainsi, aux temps longs, la différence de température va chuter, le moteur ralentir et le rendement fortement diminuer. *Il convient donc de faire les mesures peu après avoir démarré le moteur (de l'ordre de quelques minutes) pour avoir un rendement notable, notamment celles des températures des sources chaudes et froides.*

Avant de refaire les mesures, laisser le moteur refroidir !

⁵Savoir estimer le rapport C_V/R avant de vérifier sa valeur dans le Handbook.

4) [AP] Expériences complémentaires

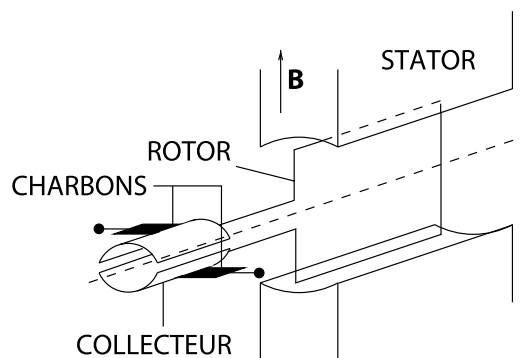
- Il est possible de changer la puissance de charge en connectant la dynamo au moteur, et en branchant une charge électrique. En faisant varier cette charge, observer la modification du cycle, ainsi que le changement de vitesse de rotation.
- Le cycle est inversible et peut fonctionner en pompe à chaleur. Pour cela, il faut apporter un travail mécanique pour induire un refroidissement de la source froide.

VI) Annexe – détails sur la dynamo

Il s'agit d'une machine électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique continue. Une machine électrique convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique sinusoïdale est un alternateur. La "dynamo" de vélo est un exemple d'alternateur.

Constitution typique d'une dynamo

Vous pouvez consulter Niard, pp. 17-24, et H-prépa, pp. 74-94.



Le collecteur est une pièce tournante. Les charbons sont fixes. Le stator est en général constitué d'un bobinage placé autour de pièces polaires, alimenté par un courant continu.

Lorsque le rotor effectue un quart de tour à partir de la position du schéma, le flux de \vec{B} passe de 0 à sa valeur maximale Φ_m (supposée positive). On a donc $d\Phi/dt > 0$ et la tension utile a un signe constant. Lorsque le rotor débute le demi-tour suivant, le flux se met à décroître, mais on inverse le signe de la tension utile grâce au collecteur. Ainsi, grâce à son collecteur, la dynamo est un générateur de tension continue. (Le schéma n'en donne qu'une idée partielle. En fait, le rotor comporte plusieurs bobines décalées et le collecteur a de nombreuses lames de contact, cf. Niard, p. 76, ou H-prépa, p. 83.)

En mode d'auto-excitation, il se pose le problème de l'amorçage : il se réalise grâce au faible champ rémanent du fer du stator. Ce champ induit dans le rotor une petite tension qui, si le branchement est dans le bon sens, accroît le champ du stator.

Dans le TP, la dynamo fonctionne en auto-excitation.

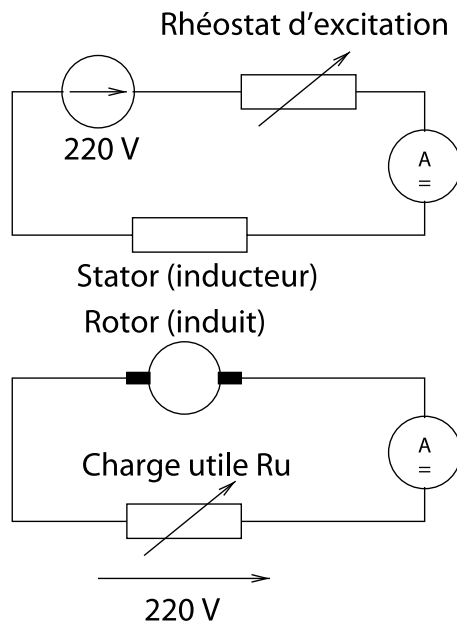


FIG. 1 – Utilisation de la dynamo avec un générateur externe d'excitation

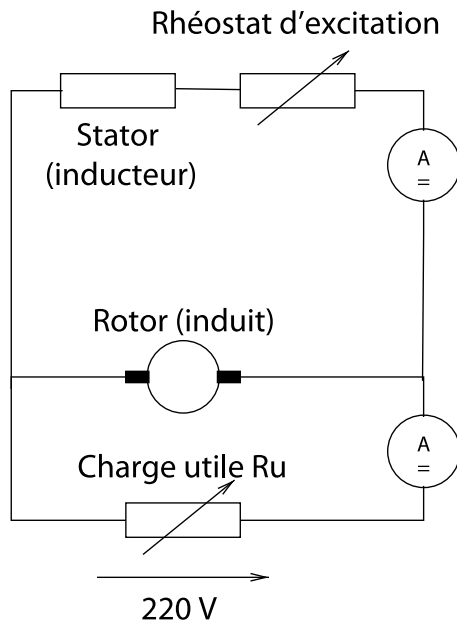


FIG. 2 – Utilisation de la dynamo en auto-excitation