
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*

I) MOTEURS ELECTRIQUES

Une annexe à la fin de cette partie donne quelques détails théoriques sur les machines électriques.

Bibliographie :

L'introduction du Niard (pp. 5-8)¹ permet de se faire une idée globale sur les machines électriques.

		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.

1) Étude du moteur asynchrone triphasé

a) Principe

Le système dont nous disposons est constitué d'un **moteur asynchrone triphasé** couplé à **une dynamo-balance**, qui permet la mesure **mécanique** du **couple** exercé par le moteur. La puissance **mécanique** délivrée à la dynamo est convertie en puissance **électrique**, puis dissipée sous forme d'effet Joule dans **un rhéostat de charge**.

Le but des manipulations proposées ici est d'étudier quelques-unes des caractéristiques du moteur asynchrone. Pour cela on fera varier son point de fonctionnement en agissant sur la valeur du rhéostat de charge de la dynamo.

b) Dispositif expérimental

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.

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

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 1500 tours/min (25 Hz) (*cf.* Niard, pp. 145-149).

Le branchement utilisé est de type triangle (*cf.* figure), 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.

Rotor : Il s'agit de la partie tournante du moteur. Il est bobiné et prévu pour être court-circuité en fonctionnement normal. On peut remplacer le court-circuit par un ampèremètre analogique continu 5 A à zéro central.

Dynamo

C'est un moteur à courant continu qui fonctionne en génératrice et en auto-excitation, c'est-à-dire que l'inducteur et l'induit sont montés en parallèle. La **charge** est constituée par un ensemble de résistances commutables placées dans un grand boîtier. Placer un wattmètre entre la dynamo et la charge.

Pour expliquer la mesure du couple par la dynamo-balance, se reporter au paragraphe 1-c de l'Annexe.

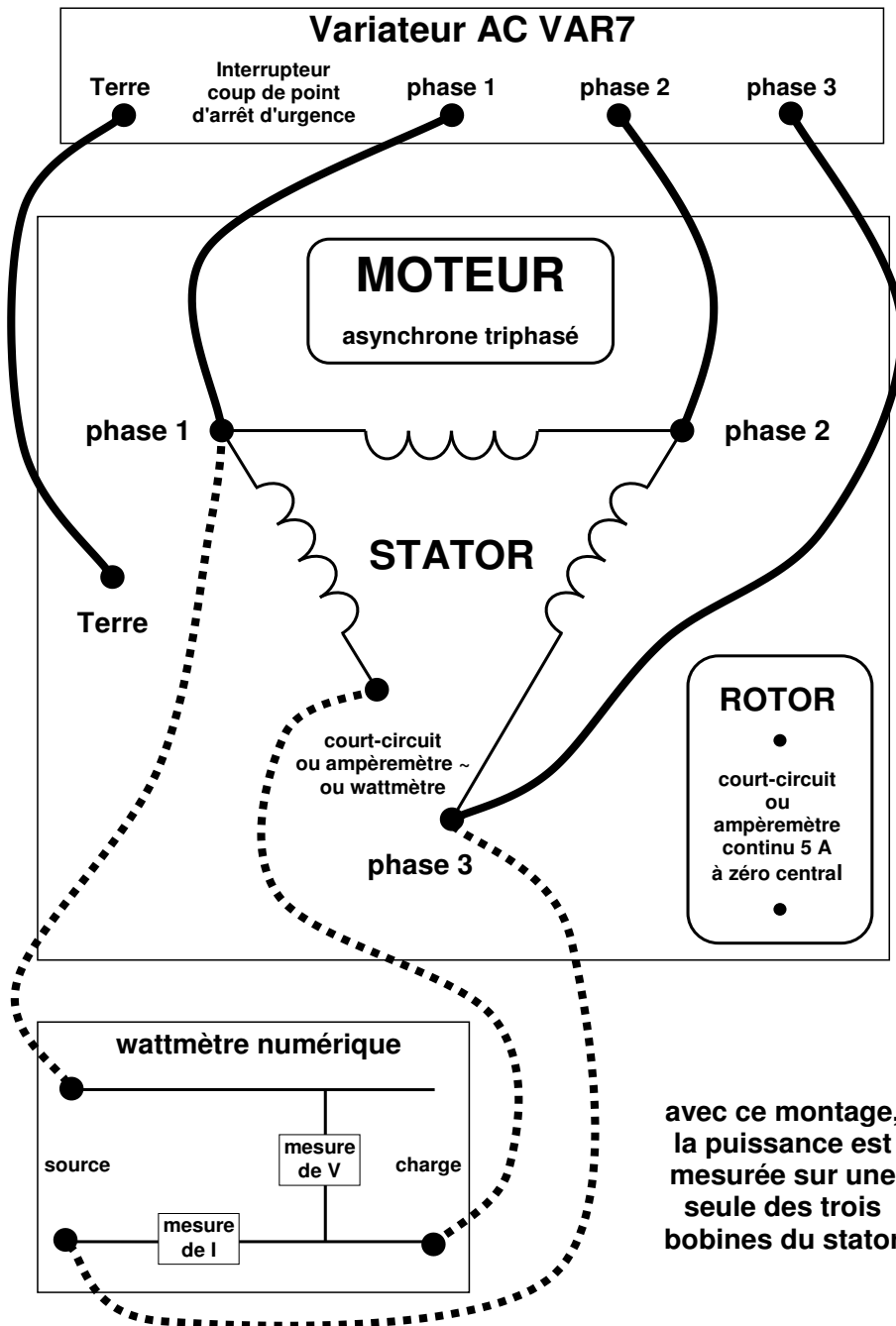
c) Grandeurs physiques à mesurer

- 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.
- La fréquence de rotation du moteur est mesurée à l'aide d'une petite dynamo tachymétrique montée sur l'axe du moteur et reliée à un voltmètre numérique directement gradué en tours par minute.
- Le couple moteur est mesuré en équilibrant la dynamo-balance avec la masselotte mobile de 1 kg. On accroît la puissance mécanique fournie par le moteur en diminuant la résistance de charge de la dynamo-balance (*cf.* Niard, pp. 38-39 et 71-72).

d) Mise en œuvre

- Réaliser l'équilibrage du bras de la dynamo-balance. Pour cela, placer la masselotte mobile sur la graduation 0 et agir sur le contrepoids situé sur le bras opposé.
- Ne pas brancher la charge de la dynamo.

**BRANCHEMENT du STATOR
avec le variateur AC VAR7
Montage triangle
avec 230 V (250 V maxi) entre phases**



- Alimenter le stator du moteur. Si le système disjoncte à l'enclenchement, vérifier que l'interrupteur coup-de-poing est bien tiré vers le haut.
- S'assurer que le moteur tourne dans le bon sens (flèche orange dessinée sur le moteur). Sinon arrêter le moteur (en coupant l'alimentation du stator) puis échanger deux phases du secteur (*cf.* Niard, p. 138).
- Brancher la charge de la dynamo.
- Noter dans un tableau les valeurs des grandeurs suivantes : résistance de charge, I_{stator} , V_{stator} , vitesse de rotation, couple (et facultativement tension et courant issus de la dynamo).

Glissement et couple (*cf.* Niard, pp. 168, 171, 186) Le glissement est l'écart relatif entre la vitesse de rotation du champ tournant (ici 25 Hz) et la vitesse de rotation du moteur. On observe directement l'effet du glissement sur l'ampèremètre analogique continu à zéro central branché sur le rotor (*cf.* paragraphe 1-b de l'Annexe).

Expliquer qualitativement pourquoi la vitesse diminue quand on diminue la résistance de charge de la dynamo (raisonner sur le transfert de puissance entre le moteur et la dynamo).

Tracer la caractéristique couple mécanique en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

Rendement du moteur (*cf.* Niard, p. 168) (**Important**) Tracer les courbes donnant le rendement (rapport de la puissance mécanique fournie à la puissance électrique reçue) et le $\cos \Phi$ du moteur en fonction de la puissance mécanique fournie (puissance utile).

Ces courbes sont-elles en accord avec les caractéristiques indiquées par le fabricant sur la plaque signalétique du moteur ?

e) Etude de la dynamo (facultatif)

On s'intéresse ici à la dynamo comme machine à courant continu fonctionnant en génératrice électrique.

Caractéristiques Tracer la caractéristique tension-vitesse de rotation pour la dynamo à vide. On fera varier la vitesse de rotation à l'aide de la machine asynchrone qui sera considérée ici comme un simple outil extérieur apportant une puissance mécanique. Pourquoi la relation obtenue est affine et non purement linéaire ? A quoi correspond l'ordonnée à l'origine ? (*cf.* Annexe 1-c à propos du fonctionnement de la dynamo). Déterminer la pente de la droite et calculer la constante de couplage électromécanique en $V/(\text{rad/s})$.

Tracer le couple mesuré en fonction du courant fourni par le dynamo pour différentes charges. Il est conseillé pour une telle courbe de se placer à vitesse de rotation constante ou de vérifier que la vitesse de rotation a peu varié avec les changements de charge. Remarquer que pour les courants les plus forts la relation n'est plus linéaire (ceci est dû à la réaction magnétique de l'induit sur l'inducteur). Sur la partie linéaire, comparer la pente de cette droite à la constante de couplage électromécanique. Pourquoi la pente est ici plus faible ?

Rendement Tracer la courbe donnant le rendement (rapport de la puissance électrique fournie à la puissance mécanique reçue) en fonction de la puissance électrique fournie. Il est ici aussi conseillé pour une telle courbe de se placer à vitesse de rotation constante ou de vérifier que la

vitesse de rotation a peu varié avec les changements de charge. Il peut être intéressant de tracer la courbe de rendement pour différentes vitesses de rotation (1000 tr/min par exemple ou au delà de 1450 tr/min) et vérifier que le fonctionnement nominal de la machine est bien obtenu à 1450 tr/min.

f) Étude du champ tournant (Facultatif)

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 étoile ou en triangle. On génère alors au centre un champ magnétique tournant à la fréquence du secteur³.

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.

Principe des machines à champ magnétique tournant Remplacer la bobine de mesure par une *cage d'écureuil* : la cage est mise en rotation. On réalise ainsi un moteur asynchrone de principe. 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.⁴ Montrer qu'on peut changer le sens de rotation du moteur en échangeant les branchements de deux des bobines.

Remplacer la cage d'écureuil par une aiguille de boussole. On réalise ainsi un moteur synchrone de principe. Monter la fréquence d'alimentation à 25 hertz 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).

2) Principe du moteur à courant continu

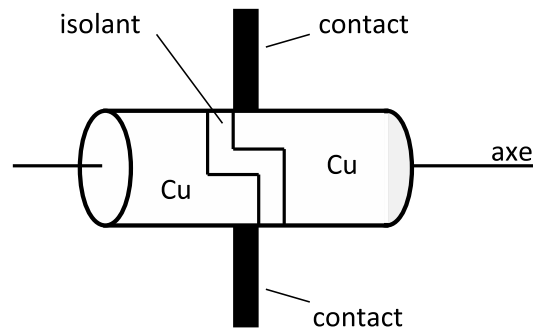
a) Expérience qualitative :

Nous proposons ici une expérience qualitative sur un moteur didactique. On utilise comme stator une **seule** bobine qui doit être horizontale. Le rotor est alimenté par l'intermédiaire du **collecteur**, qui est la pièce maîtresse du moteur à courant continu. La figure ci-dessous explique comment les contacts doivent être disposés sur le collecteur.

²1200 tours, résistance 10 Ω , pouvant supporter 1 A environ.

³Pour une raison encore inconnue, l'alimentation triphasée peut se bloquer pour des fréquences d'alimentation supérieures à une dizaine de hertz à moins que la machine asynchrone soit branchée en parallèle de ce montage. . .

⁴Voir aussi la notice N463 et le moteur asynchrone-synchrone Leybold monté.



Le stator et le rotor doivent être alimentés en série 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. 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. Comment pourrait-on inverser le sens de rotation ?

Peut-on utiliser ce moteur avec un générateur alternatif ?

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. Il est important d'être organisé et de savoir à l'avance ce que l'on va faire pour ne pas se perdre dans les limbes des valeurs numériques.

b) Relation entre la tension et la vitesse de rotation (important)

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 $U = e + RI$ (pourquoi ?), 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 utilise le moteur à courant continu à alimentation 12 V déconnectée, et on hisse sur une distance fixée différentes masses ($m = 200 \text{ g}, 1 \text{ kg}, 2 \text{ kg}, 3 \text{ kg}, \text{ etc.}$). 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.

On propose de vérifier dans un premier temps la 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 de remontée de la masse, il est possible d'avoir recours à une webcam et d'obtenir toutes les données via les logiciels Cinéris et Igor. Cependant, ce procédé s'avère très chronophage et donc le répéter un grand nombre de fois en préparation ou même juste une seule fois devant le jury peut être problématique le jour de l'oral. Il est donc conseillé de ne prendre qu'une seule courbe donnant la position d'une des masses 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 depuis une hauteur h_1 jusqu'à une hauteur h_2 avec h_1 et h_2 dans les limites du domaine établi précédemment.

Pour mesurer également la valeur de la tension et de l'intensité (qui servira plus tard) quand on est seul, on pourra répéter deux fois la même mesure à chaque fois : on mesure d'abord U et I puis le temps de remontée Δt entre h_1 et h_2 . Vérifier que I ne varie presque pas pour une masse donnée quand on fait varier U .

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 .

Tracer alors la courbe donnant $U(\Omega)$ pour une masse fixée et en déduire le coefficient K . On pourra par exemple faire une première mesure sans charge puis pour différentes masses et vérifier que K change peu.

L'ordonnée à l'origine permet de retrouver la valeur de R . Comparer à la valeur donnée dans la notice. À quoi cette ordonnée à l'origine correspond-elle physiquement ?

c) Évaluation des couples de frottement mécanique (facultatif)

Quel est le couple mécanique utile Γ_u exercé sur une masse m par le rotor ? 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 : $\Gamma_{em} = \Gamma_u + \Gamma_{\text{frott}}$ (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, on peut alors vérifier que l'on a toujours $\Gamma_u < \Gamma_{em}$ et représenter Γ_{frott} en fonction de la masse m de la charge. Comment varie-t-il avec la masse ? Pourquoi ?

d) Caractéristique et point de fonctionnement

Tracer les courbes $\Gamma_u(\Omega)$ à U fixé pour plusieurs valeurs de U . On doit obtenir un ensemble de droites parallèles. Ces courbes, les caractéristiques du moteur, sont également importantes pour sa caractérisation.

Où sont les points de la remontée à vide ? Que dire du couple au démarrage ?

Quel est le lien entre caractéristique et point de fonctionnement ?

e) Variation du rendement avec la charge

On peut enfin 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 ie 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. Mais qu'appelle-t-on point de fonctionnement nominal? (**Notion importante!**).

3) Moteur pas à pas (facultatif)

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

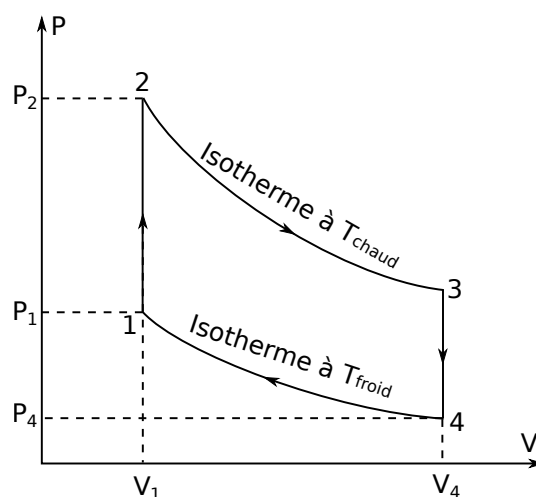
II) MOTEURS THERMIQUES – Étude d'un moteur de Stirling

1) 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 idéal est (cf Bazarov p331) :

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

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) Dispositif expérimental

Nous disposons d'un moteur à air chaud didactique.

- 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.

3) Manipulation

- Connecter l'embout du pressiomètre Jeulin au piston du moteur. La sortie analogique délivre une tension U_p allant de -2.5 V à $+2.5$ 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. L'alimenter avec une tension continue de 1 à 2 V (**!!! ne pas dépasser 2V!!!**).

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 $U_0 = 2.5$ V.

Pour la position du piston, effectuer une calibration préalable en le positionnant manuellement sur ses deux positions extrêmes, on notera U_{max} la tension mesurée correspondant au volume maximal et U_{min} la tension mesurée correspondant au volume minimal. La variation maximale de volume δV_{max} se déduit de l'excursion du piston $\Delta = 23$ mm (voir notice du moteur) et du diamètre du cylindre de travail $d = 25$ mm. En déduire la relation entre la tension mesurée U et le volume dans le piston :

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

où $\delta V = V - V_0$ est la variation de volume par rapport au volume minimal V_0 .

- 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.

- Replacer 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 la fonction Enregistreur du logiciel Igor ou Synchronie. Il est recommandé de moyenner sur plusieurs périodes.

Pour en déduire la puissance mécanique fournie, 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, une méthode sur Igor consiste à ne garder dans la table de données que les points correspondant à un cycle unique à quelques points près (pour cela, on aura ajusté le fenêtrage pour n’avoir enregistré qu’un cycle environ et on supprime les points en trop) et à utiliser dans la fenêtre de commande la fonction **PolygonArea** (cf manuel d’Igor pour les détails). Cette fonction prend en argument des "waves" et ne renvoie rien : il faudra ici lui fournir les noms des colonnes correspondant au volume et à la pression et obtenir la valeur numérique via une commande du type **Print PolygonArea (Volume, Pression)**. Le logiciel renverra toujours un nombre, même si on lui a laissé plus d’un cycle, il faut donc évidemment toujours vérifier la cohérence du résultat.

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 d’une machine de Stirling idéale.

Remarque importante : le rendement dépend de la différence de température entre le 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 juste après avoir démarré le moteur (attendre quand même qu’il ait bien démarré) pour avoir un rendement notable, et surtout ne pas attendre pour mesurer les températures des deux sources de chaleur.*

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) 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. L'efficacité d'une machine frigorifique est définie selon $\varepsilon = \frac{T_f}{T_c - T_f}$.

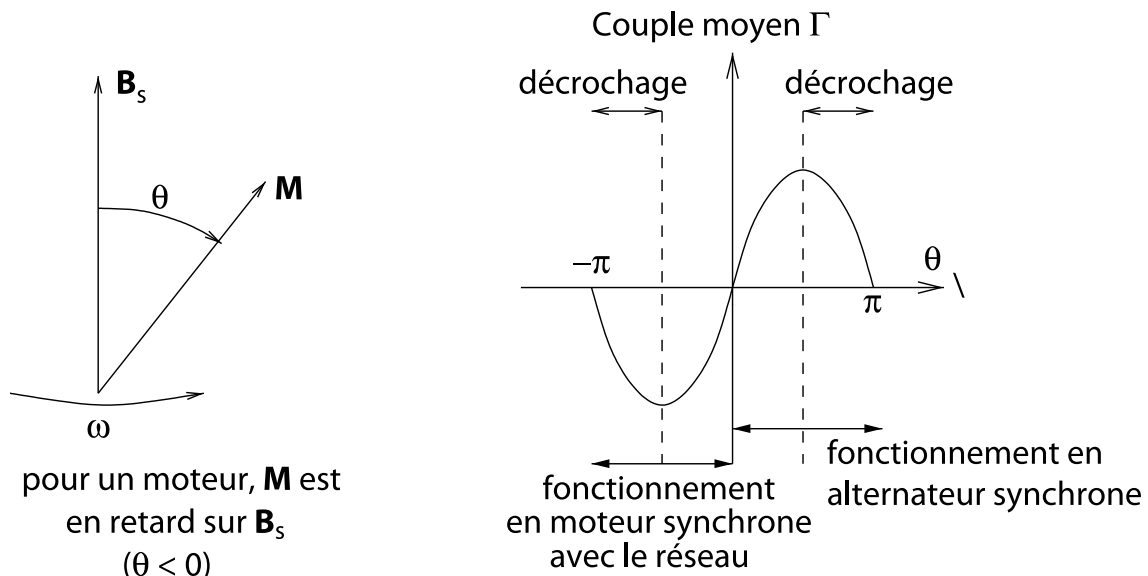
III) ANNEXES

1) Quelques informations supplémentaires sur le fonctionnement des machines électriques

a) Machine synchrone

Vous pouvez consulter Niard, pp. 218-219, et H-prépa, pp. 106-112.

- Le stator, alimenté en triphasé, fournit un champ magnétique B_s tournant à la pulsation ω_s .
- Le rotor, un aimant permanent ou un bobinage alimenté par un courant continu, est assimilable à un moment dipolaire \vec{M} et tourne à la vitesse ω_r .



Le couple moyen n'est non nul que si $\omega_r = \omega_s$, et il vaut alors $\Gamma = MB_s \sin \theta$. Pour le démarrage, voir Niard p. 219.

b) Moteur asynchrone

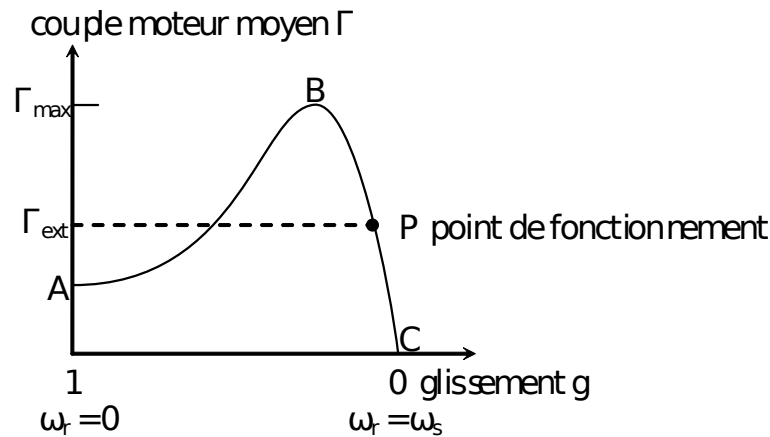
Vous pouvez consulter Niard, pp. 180-186, et H-prépa, pp. 114-121.

- Le stator est identique à celui des moteurs synchrones.
- Le rotor est constitué d'un bobinage, de surface totale S , fermé sur une résistance R'_r (résistance totale R_r , inductance totale L_r).

Pour $\omega_r \neq \omega_s$, il apparaît dans le rotor un courant induit i_r de pulsation $\omega = \omega_s - \omega_r$ (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) :

$$\Gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{R_r g \omega_s}{R_r^2 + L_r^2 g^2 \omega_s^2} \right) S^2 B_s^2$$

où $g = \omega/\omega_s = (\omega_s - \omega_r)/\omega_s$ 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.

Si l'on suppose que l'énergie électrique fournie au moteur est intégralement convertie en énergie mécanique et en effet Joule dans le rotor, le rendement r du moteur asynchrone est $r = 1 - g$, d'où l'intérêt d'un glissement faible en fonctionnement normal (cf. H-prépa, p. 118).

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

c) Dynamo

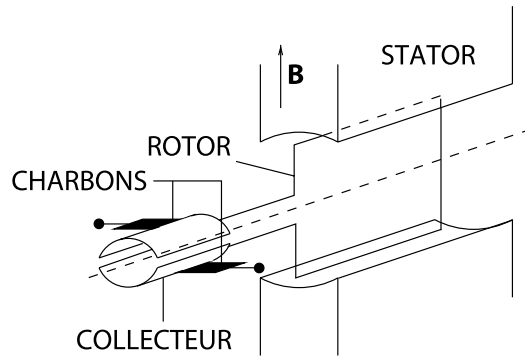
Il s'agit d'une machine électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique continue. Une machine électrique convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique sinusoïdale est un alternateur. La "dynamo" de vélo est un exemple d'alternateur.

Constitution de la dynamo

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

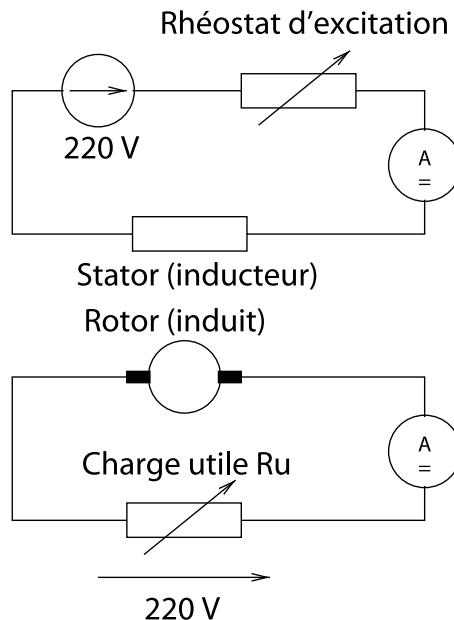
Le collecteur est une pièce tournante. Les charbons sont fixes. Le stator est en général constitué d'un bobinage placé autour de pièces polaires, alimenté par un courant continu.

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.)

Utilisation de la dynamo avec un générateur externe d'excitation :



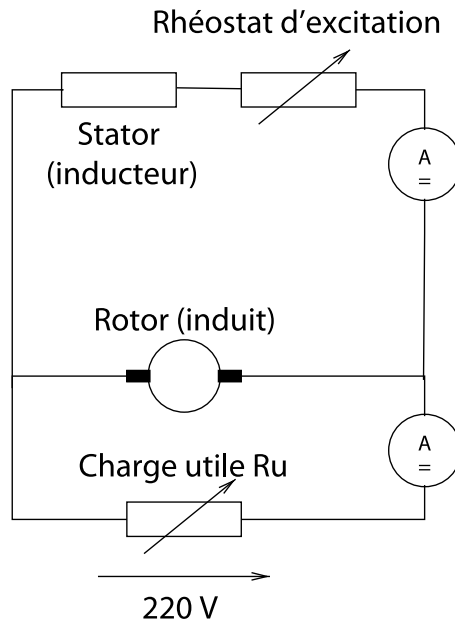
Utilisation de la dynamo en auto-excitation :

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 et on peut uniquement modifier la valeur du rhéostat de charge R_u .

Rôle de la dynamo dans le freinage du moteur asynchrone

Le moteur cède toute sa puissance à la dynamo. Celle-ci la dissipe en partie par frottement, par effet Joule dans ses bobinages, par hystérésis dans le fer, mais surtout par débit dans le rhéostat de charge. En considérant en première approximation qu'elle se comporte comme un générateur idéal de tension fixée, ce dernier terme est inversement proportionnel à la résistance du rhéostat R_u . Donc, dans certaines limites, plus R_u est faible, plus la dynamo freine le moteur.



Ceci dit, pour nous, la dynamo n'est qu'un instrument qui impose au moteur un point de fonctionnement ajustable et qui sert à mesurer le couple, peu importe la façon dont elle dissipe.

Rôle de la balance

Le moteur applique au rotor de la dynamo le couple Γ_u . En régime permanent, ce rotor est soumis à un couple résultant nul, il reçoit donc aussi de la part du stator de la dynamo un couple de forces de Laplace $-\Gamma_u$. Par action et réaction, ce stator subit le couple magnétique Γ_u . Enfin, ce stator peut, dans une certaine mesure, tourner autour de son axe. Il est maintenu en équilibre car un moment statique équilibre le couple de Laplace. La mesure de ce dernier est donc une mesure de Γ_u . La puissance mécanique fournie par le moteur est égale au produit de ce couple par la pulsation de rotation (*cf.* Niard, pp. 38-39 et 71-72).