

## *G4. Moteurs électriques à courant continu*

### **BUT**

Le but de cette manipulation est de mieux comprendre le fonctionnement de génératrices et de moteurs électriques à l'aide des modèles "simples" mais proches des machines réelles. Nous proposons aux étudiants d'axer d'abord leurs efforts sur l'aspect pratique (montages divers, mesures de certaines caractéristiques) et, le cas échéant, d'approfondir tel ou tel aspect théorique.

### **I. INTRODUCTION.**

Les moteurs à courant continu sont déterminés par une grande variété de caractéristiques de fonctionnement qui les rend pratiquement aptes à tous les emplois. Ils sont utilisés en priorité lorsque l'énergie provient de piles ou d'accumulateurs (automobiles, jouets, baladeurs,...). Il existe principalement deux types de machines: les moteurs synchrones (alternateurs) et les asynchrones (d'induction). Les premiers sont utilisés dans des systèmes à vitesse constante et faible couple de démarrage, tandis que les derniers sont employés dans la gamme de hautes puissances ( $10^{-1} - 10^{-3}$  kW).

Tout système de transport qui fait appel à une technologie de sustentation ayant comme principe l'élimination des contacts matériels nécessite l'emploi de propulseurs spéciaux: des moteurs fonctionnant aussi bien en traction qu'en freinage sans faire appel aux forces de frottement. Pour des raisons de sécurité, dans le cas de la propulsion des véhicules à grande vitesse, ces moteurs doivent avoir des performances supérieures en freinage qu'en traction. Il existe deux familles de propulseurs qui respectent ce cahier de charges: les réacteurs utilisés en aéronautique et les moteurs électriques linéaires.

### **II. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT**

#### **La loi d'Ampère et force de Lorentz**

Considérons un conducteur quelconque parcouru par un courant  $I$  et situé dans un champ magnétique  $\vec{B}$ . Chaque élément de longueur  $d\vec{l}$  du fil est le siège d'un élément de force (Fig.1a):

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B} \quad (1)$$

En particulier, si le fil est rectiligne et le champ est uniforme ( $\vec{B} = cst$ ) la résultante des forces agissant sur une longueur  $L$  du fil vaut:

$$\vec{F}_L = \int_L I d\vec{l} \times \vec{B} = I \vec{L} \times \vec{B} \quad (2)$$

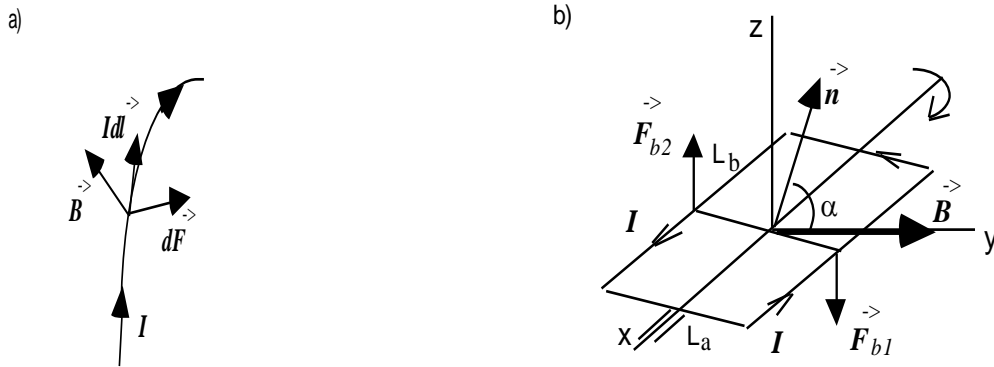


Fig.1: a) Conducteur électrique dans un champ magnétique.  
b) Moment de force agissant sur une boucle de courant de forme rectangulaire

Considérons maintenant un cadre rectangulaire (de largeur  $L_a$  et longueur  $L_b$ ) parcouru par un courant  $I$  et pouvant tourner autour d'un axe passant par le milieu de deux côtés opposés (Fig. 1b). Ce cadre est plongé dans un champ  $\vec{B}$  uniforme perpendiculaire à l'axe de rotation. Supposons que la normal du plan du cadre fasse un certain angle  $\alpha$  avec le champ  $\vec{B}$ . Le lecteur vérifiera facilement que les forces s'exerçant sur les côtés de longueur  $L_a$  s'annulent car elles sont de même intensité mais de sens opposés. Par contre, les forces  $\vec{F}_{b1}$  et  $\vec{F}_{b2}$  forment un couple.

$$|\vec{F}_{b1}| = |\vec{F}_{b2}| = IL_b B \sin \alpha \quad (3)$$

$$\text{Couple} = C = IBL_a L_b \sin \alpha \quad (4)$$

Vectoriellement on peut écrire:

$$\vec{C} = I \cdot S \cdot \vec{n} \times \vec{B} \quad (5)$$

Avec  $S = L_a L_b$  surface du cadre et  $\vec{n}$  le vecteur unité normal au plan du cadre (sens conventionnel du tire-bouchon par rapport au sens du courant).

On constate que si:

- $\alpha = 0$  le couple est nul
- $\alpha = \frac{\pi}{2}$  le couple est maximum dans le sens indiqué par la figure
- $\alpha = \pi$  le couple est nul
- $\alpha = \pi + \Delta\alpha$  le couple s'inverse par rapport à celui indiqué sur la figure

Pour maintenir le couple dirigé toujours dans une même direction, il sera donc nécessaire d'inverser le sens du courant chaque fois que  $\alpha$  vaudra  $0, \pi, 2\pi, 3\pi$ , etc.

## Moteurs

Dans le cas des moteurs à courant continu, on parvient facilement à produire une alternance de courant en utilisant des commutateurs et des balais (Fig. 2). A chaque demi-tour du cadre tournant, le courant circulant dans celui-ci est bien inversé. Le champ magnétique est assuré par un aimant permanent, ou par des bobines inductrices connectées directement à la source de courant continu.

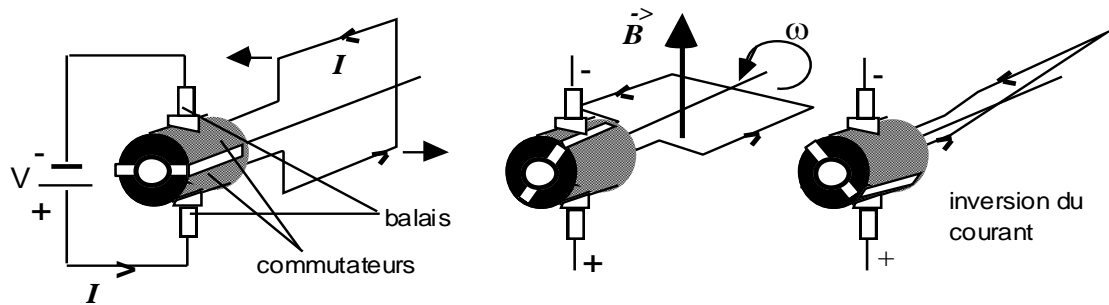


Fig. 2: Moteur à courant continu. Les commutateurs sont fixés à l'arbre du moteur et tournent avec lui. Le contact électrique est assuré par les balais fixes qui frottent contre les commutateurs.

### La loi d'induction de Faraday

Dans la Fig. 2 et en absence d'une source de tension, si une force mécanique fait pivoter le cadre à une vitesse angulaire  $\omega$  constante, il apparaît une force électromotrice induite

$$E_i = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = \frac{d}{dt} (BS \cos \alpha) \quad (6)$$

où  $\alpha$  est l'angle entre  $\vec{B}$  et le vecteur normal  $\vec{n}$ . D'autre part  $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$ , donc on en déduit que

$$E_i = BA\omega \sin \omega t \quad (7)$$

Ainsi, une telle bobine pivotant à l'intérieur d'un champ  $\vec{B}$  constant produit un courant alternatif. Elle constitue l'élément de base du fonctionnement d'un générateur électrique.

### III. ROTOR ET STATOR

En pratique, le cadre mobile est constitué par un bobinage plus complexe autour d'une armature métallique (noyau cylindrique en Fe pour augmenter le couple mécanique) appelé **rotor** ou armature d'induit (Fig. 3).

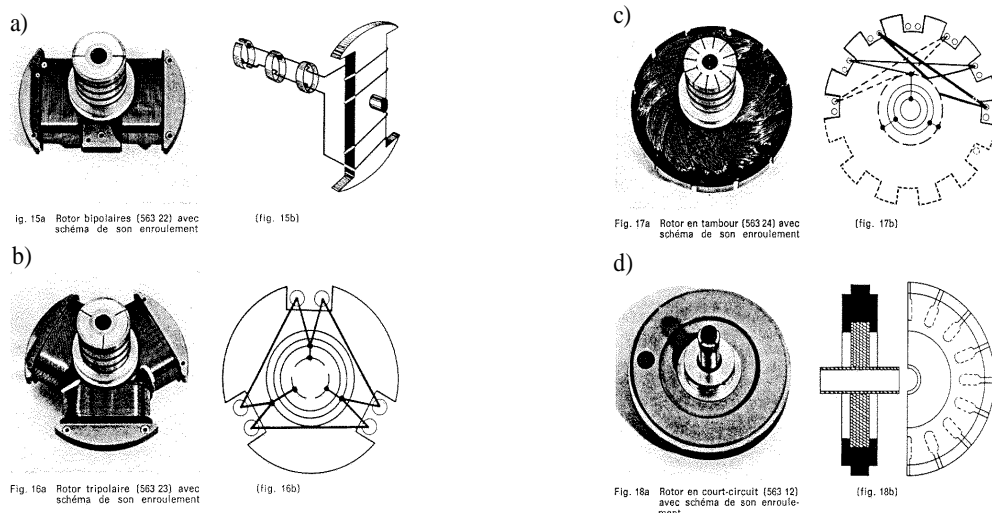


Fig. 3: Différents rotors. Pour éviter les courants de Foucault, les rotors ont des noyaux de bobine en tôles de Fer doux pressées et assemblées par des rivets.

Le rotor est relié à un arbre et tourne entre les pièces polaires d'un inducteur à aimant permanent appelé **stator**. Il est possible de créer le champ  $\vec{B}$  du stator à l'aide d'un électroaimant alimenté par du courant continu (excitation) provenant de la même source que celle alimentant le rotor ou d'une autre source.

Le **rotor bipolaire** (Fig. 3 a) se présente sous forme d'un double T muni d'un enroulement continu dont les extrémités sont connectées aux bagues collectrices et aux deux ponts de collecteur. Il porte 2x380 spires. Dans le cas du **rotor tripolaire** (Fig. 3 b), les extrémités de deux bobines voisines sont reliées en commun à une bague collectrice et à un pont collecteur (dans le cas présent, 340 spires par bobine). Le **rotor en tambour** de la Fig. 3 c est composé 12 enroulements de 80 spires raccordées en série. Les connexions aux ponts de collecteur et aux bagues collectrices sont indiquées sur le schéma. Le **rotor en court-circuit** (Fig. 3 d) est constitué par des tôles en fer dans lesquelles on a coulé du métal léger.

#### IV. TYPES DE MOTEURS À COURANT CONTINU

Le moteur à courant continu excité par des aimants permanents n'est pas le seul type possible. Souvent on remplace les aimants par des électroaimants fixes (bobines convenablement alimentées en courant continu). Les bobines sont appelées "bobines d'excitation" ou "bobines inductrices". On distingue généralement quatre types de moteurs selon le branchement envisagé:

**Moteur à excitation indépendante:** l'inducteur peut être, soit un aimant permanent, soit un électroaimant fixe (Fig. 4).

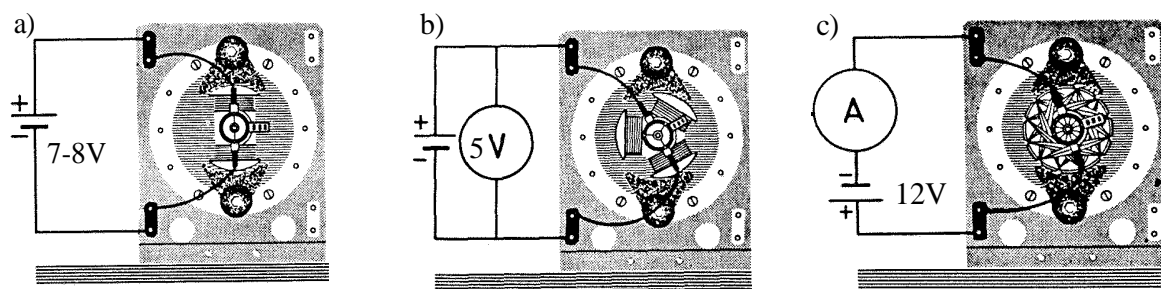


Fig. 4: Moteurs excités par des aimants permanents: a) rotor bipolaire, b) rotor tripolaire, c) rotor en tambour

**Moteur-série** (Fig. 5a): rotor et bobines inductrices (250 spires) sont raccordées en série. La tension aux bornes ne doit pas dépasser 15 V.

**Moteur-shunt** (Fig. 5b): rotor et bobines inductrices (250 spires) sont raccordées en parallèle. La tension aux bornes ne doit pas dépasser 10 V.

**Moteur-compound** (Fig. 5c): une bobine inductrice est raccordée directement à la source de courant, tandis que la seconde bobine inductrice est raccordée en série au rotor. La tension aux bornes ne doit pas dépasser 10 V.

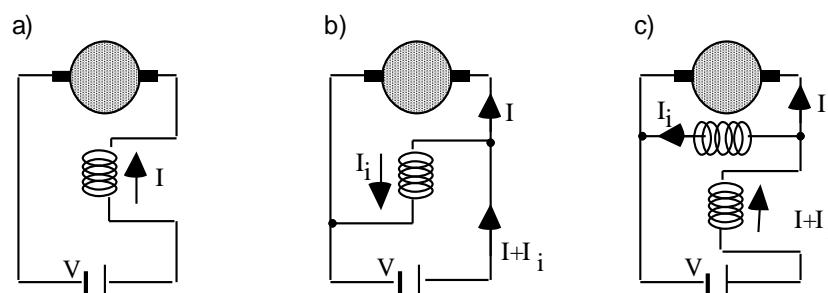


Fig. 5: Moteurs excités par des bobines inductrices. Branchement: a) en série, b) en dérivation ou shunt, et c) en compound

## V. QUELQUES CARACTÉRISTIQUES DES MOTEURS

### a) Le couple du moteur (voir aussi page 36, notice Leybold)

La force exercée par le champ inducteur sur l'enroulement de l'induit traversé par le courant dépend de l'intensité de ce champ et de l'intensité de ce courant. Sur chaque élément de longueur  $dl$  de la circonférence (arbre du moteur) agit une force  $d\vec{F}$  tangentielle. Le couple du moteur sera donné par:

$$\vec{M} = \oint_{\text{poulie}} \vec{r} \times d\vec{F} = \vec{k} \oint r dF \quad (8)$$

$r$  est le rayon de l'arbre et  $\vec{k}$  un vecteur unité dont la direction est donnée par l'axe.

Le couple du moteur peut être mesuré en utilisant une configuration avec deux dynamomètres et un fil. On passe autour de la poulie un fil dont les deux bouts sont fixés chacun à un dynamomètre (Fig. 6). Les dynamomètres sont fixés à du matériel-support. À l'aide de ce dernier on applique au moteur des forces différentes de freinage. La force tangentielle est la différence  $F_2 - F_1$ , d'où on peut déterminer les couples pour des charges différentes. En variant la force de traction  $F_2$ , on modifie par paliers la force de freinage agissant sur le rotor.

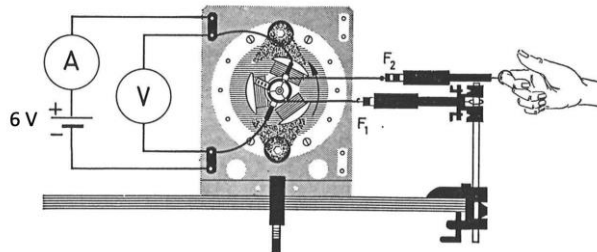


Fig. 6 : Principe de mesure de la force tangentielle

### b) Le rendement des moteurs

Les moteurs électriques absorbent de l'énergie électrique et fournissent de l'énergie mécanique. Ce sont en ce sens des transformateurs d'énergie. On entend par rendement  $\eta$  du moteur considéré le rapport:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} \quad (10)$$

$P_m$  est la puissance mécanique développée et  $P_e$  la puissance électrique absorbée. La puissance  $P_e$  est celle fournie par le générateur (puissance totale). On la déduit à partir des mesures de tensions et de courants. La puissance mécanique développée peut être obtenue à partir du montage avec deux dynamomètres et un fil à ligne. Elle s'exprime comme

$$P_m = F \cdot 2r\pi \cdot f_r \quad (11)$$

où  $r = 12$  mm est le rayon de la poulie et  $f_r$  le nombre de tours par seconde.

### c) Mesure de la contre-tension induite dans le rotor (page 33, notice Leybold)

La tension efficace  $U_R$  aux extrémités du rotor résulte de la tension  $U_G$  appliquée aux bornes diminuée par la tension induite  $U_M$ .

$$U_R = U_G - U_M = RI_R \quad (12)$$

En réalisant le montage indiqué à la Fig. 7, on peut mesurer la tension  $U_G$  et le courant induit  $I_R$  lorsque le moteur a atteint sa vitesse de rotation stationnaire. Connaissant la résistance du rotor on peut déduire  $U_M$ . On peut calculer avec la loi d'Ohm la valeur de la résistance du rotor quand celui ne tourne pas et  $U_M = 0$  V.

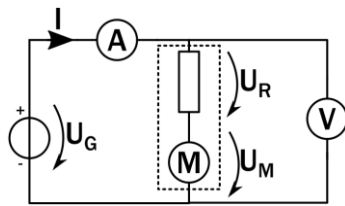


Fig. 7 : Mesure de la contre-tension

#### d) Le courant de démarrage (page 33, notice Leybold)

La tension induite apparaissant dans un moteur dépend, en présence d'un champ inducteur constant, de la vitesse de rotation de l'induit. Au moment de l'enclenchement, la vitesse de rotation est nulle pour atteindre après le démarrage, suivant la tension appliquée aux bornes, jusqu'à 5000 tours/minute.

Par conséquent, le courant fourni par la génératrice s'élève rapidement pendant le temps de démarrage du rotor de zéro à une valeur maximum constante. Comme le courant de démarrage est environ 4 à 5 fois plus fort que celui de marche à vide, le risque de surcharger dangereusement le moteur existe donc lors de l'enclenchement.

#### e) La vitesse de rotation du moteur dépend de l'intensité du courant d'induction et du champ inducteur (page 36 notice Leybold)

La force avec laquelle un conducteur parcouru par un courant est déplacé dans un champ magnétique, dépend de la longueur de ce conducteur, de l'intensité du courant passant dans ce conducteur et de celle du champ magnétique. Le régime du moteur est par conséquent déterminé par le nombre de spires de l'enroulement du rotor et par l'intensité du courant traversant le rotor et les bobines du stator.

#### f) Freinage électrique (pages 44 et 45, notice Leybold)

Si l'on inverse sur un moteur le sens du courant du rotor sans inverser en même temps la polarité du champ inducteur, l'induit change de sens de rotation. Si l'on coupe le courant d'induction au moment de l'inversion du sens de rotation, le rotor s'arrête. L'*inversion du courant* est par conséquent un moyen simple et efficace de freinage électrique.

Freinage électrique *par résistance*. Pendant son fonctionnement, tout moteur se comporte en même temps comme une génératrice. Il produit dans son rotor une tension de sens contraire à celle qui l'alimente. Lorsque le rotor continue à tourner après la coupure du courant moteur, il ne passe dans le rotor qu'un courant induit dont le sens tend à empêcher la rotation de l'induit.

## VI. TRAVAUX PROPOSES

### VI.1. Modèles simples bipolaires et multipolaires à aimants permanents

Réaliser le montage de la figure 8.

Commencer par monter le stator. Il est composé d'aimants permanents, et de noyaux de fer. Attention au sens des aimants ! Les noyaux de fer doivent s'attirer.

Huiler l'axe de rotation, puis mettre le rotor. L'huile permet de fortement diminuer les frottements, et d'augmenter l'efficacité du moteur. Une fine pellicule suffit.

Fixer les brosses sur le commutateur. L'orientation de celles-ci est très importante. Dans le cas des rotors à disposition, le moteur est le plus efficace lorsque les brosses font un faible angle avec le champ magnétique.

Brancher le rotor à la source de tension. Mesurer le courant et la tension du rotor avec les multimètres en mode DC.

Pour démarrer le moteur, appliquez une tension graduellement. Le rotor bipolaire doit être démarré à la main. Les rotors tripolaire et en tambour démarrent tout seul.

Des étincelles peuvent être nettement observées à chaque transition de commutateur. L'amplitude des étincelles change en fonction de l'orientation des balais. Le moteur est le plus efficace lorsque les étincelles sont minimales et quand sa vitesse de rotation est maximale. Trouvez cette position pour chaque rotor.

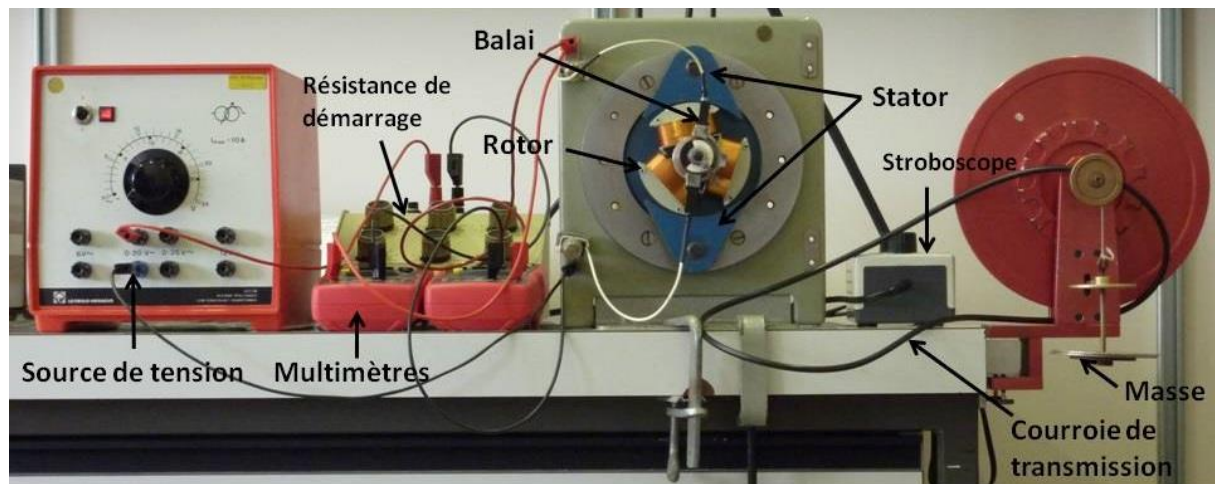


Fig. 8 : Image du montage à aimants permanents

### Mesures à effectuer

Contre-tension induite : Faire varier la tension appliquée au système, et mesurer la vitesse de rotation du moteur, ainsi que le courant et la tension du rotor. La vitesse de rotation est mesurée à l'aide d'un compteur de tours. Pour connaître la résistance du rotor, il faut mesurer la tension et le courant aussi quand le moteur ne tourne pas.

Établir des mesures pour les rotors bipolaire et tripolaire. Discuter de l'évolution de la contre-tension induite en fonction de la vitesse de rotation et nombre de spires.

Rendement et couple : Réaliser le montage de la Fig. 9.

Déterminer la puissance mécanique fournie par le moteur, et la diviser par la puissance électrique fournie au moteur pour obtenir le rendement. Déterminer également le couple fourni par le moteur.

Établir des mesures pour les rotors bipolaire, tripolaire et en tambour. Discuter de l'évolution du rendement et du couple en fonction de la vitesse de rotation.

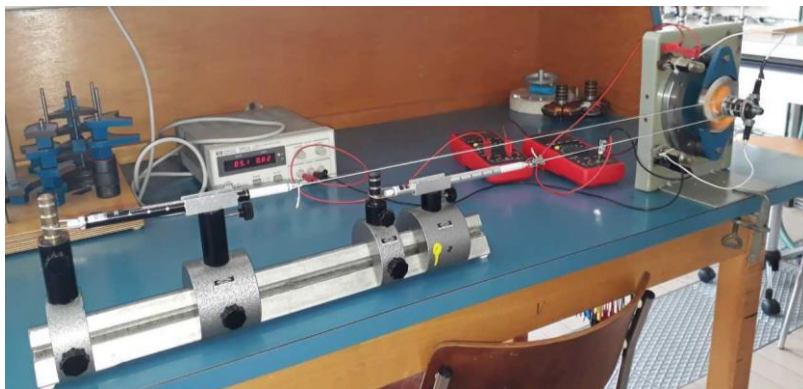


Fig. 9 : Image du montage avec deux dynamomètres et un fil pour la mesure de la force tangentielle

**VI.2. Pour un bonus**

Si les mesures décrites précédemment sont de bonne qualité, vous pouvez discuter avec votre assistant pour prendre une mesure supplémentaire. Par exemple :

- Générateur : Utilisez la manivelle pour imposer une vitesse de rotation au moteur. Etudier la tension et la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation. Pour une fréquence de rotation précise, vous pouvez utiliser « pause(0.5) ; beep » sur matlab ou une application (« Natural Metronome » sur Android).
- Montage avec bobines pour induire le champ magnétique et mesures liées à ce montage
- Etude de la tension aux bornes du moteur grâce à l'oscilloscope.