

# MP37 : Conversion électromécanique

Alexandre Koessler

## Expériences

- ☞ machine à courant continu
- ☞ haut-parleur

## Références

[1] Jolidon. *Physique expérimentale : optique, magnétisme, électrotechnique, mécanique, thermodynamique et physique non linéaire*. Enseignement sup physique. EDP sciences, Les Ulis, 2020.

## Plan

<b>1</b>	<b>Machine à courant continu</b>	<b>2</b>
1.1	Étude à vide . . . . .	4
1.2	Étude en charge à fréquence fixée . . . . .	4
1.3	Rendement à fréquence fixée . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Haut-parleur</b>	<b>6</b>
2.1	Caractérisation et fonction de transfert . . . . .	6
2.2	Rendement . . . . .	7

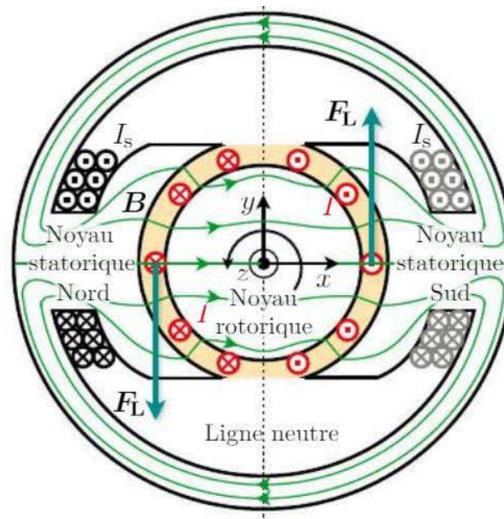
## Introduction

Il est intéressant de convertir une énergie en une autre, ici on s'intéresse à des conversion électromécaniques. Comment on fait ça et est-ce que c'est efficace ?

### 1 Machine à courant continu

La machine à courant continu est composée de deux parties :

- **l'inducteur** : c'est la source de champ magnétique. Il peut être réalisé soit à partir d'aimants permanents (cas des machines de faible puissance, quelques W), soit à l'aide d'un second bobinage. L'inducteur est souvent fixe et est appelé stator.
- **l'induit** : c'est le circuit électrique soumis au champ magnétique et qui est mobile (rotor). Dans le cas du fonctionnement de la machine en moteur, l'induit produit un mouvement de rotation. Dans le cas du fonctionnement en génératrice, l'induit produit un courant électrique.



La machine à courant continu est réversible et peut être utilisée soit en moteur (alimentation électrique de l'induit et de l'inducteur pour récupérer une énergie mécanique), soit en génératrice/dynamo (alimentation électrique de l'inducteur et mécanique de l'axe du rotor de l'induit pour récupérer une énergie électrique). On utilise ici un ensemble de deux génératrices, l'une d'elles est utilisée en moteur (MCC) pour entraîner le rotor de l'autre utilisée en dynamo (GCC).

#### Remarque

Pour toutes les mesures, il faut utiliser des voltmètres, la précision est meilleure pour le tachymètre et le capteur de couple.

#### ⚠ Attention

Pour le démarrage de la MCC : Rhéostat de  $10 \Omega$  en série avec l'induit. En effet, au départ la vitesse de rotation est nulle et l'induit se comporte comme une résistance de très faible valeur (on la déterminera), il existe un risque aigu de surintensité.

#### ⚠ Attention

Pour arrêter la MCC : il faut toujours couper l'induit en premier et ensuite l'inducteur, sinon risque d'emballement. Si on coupe l'inducteur avant on  $\phi_0 \approx 0$  alors que  $U - RI$  est fixé, on donc  $\omega \rightarrow \infty$ .

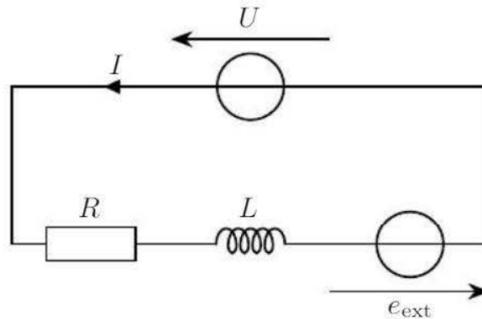
**⚠ Attention**

C'est valable à chaque que l'on manipule de grosses inductances : il ne faut pas débrancher d'un coup les inductances au risque de provoquer une surtension. On a  $U = L \frac{dI}{dt}$  à la borne d'une bobine de  $L$  grand si on ouvre le circuit rapidement on a  $\frac{dI}{dt}$  grand donc  $U$  grand.

**⚠ Attention**

Bien brancher toutes les terres.

L'induit peut être modélisé par le circuit suivant :



On en déduit alors une équation électrique par la loi des mailles en régime permanent  $e_{ext} = U - RI$  avec  $e_{ext} = \phi_0 \omega$  le force électromotrice créée par la rotation du rotor (spires de courant) dans le champ magnétique de flux  $\phi_0$  :

$$\phi_0 \omega = U - RI \tag{1}$$

On a aussi une équation mécanique qui vient du théorème du moment cinétique appliqué à une spire de courant en régime permanent en notant  $\Gamma$  le couple total et  $\Gamma_r$  le couple resistif dû aux frottements solides :

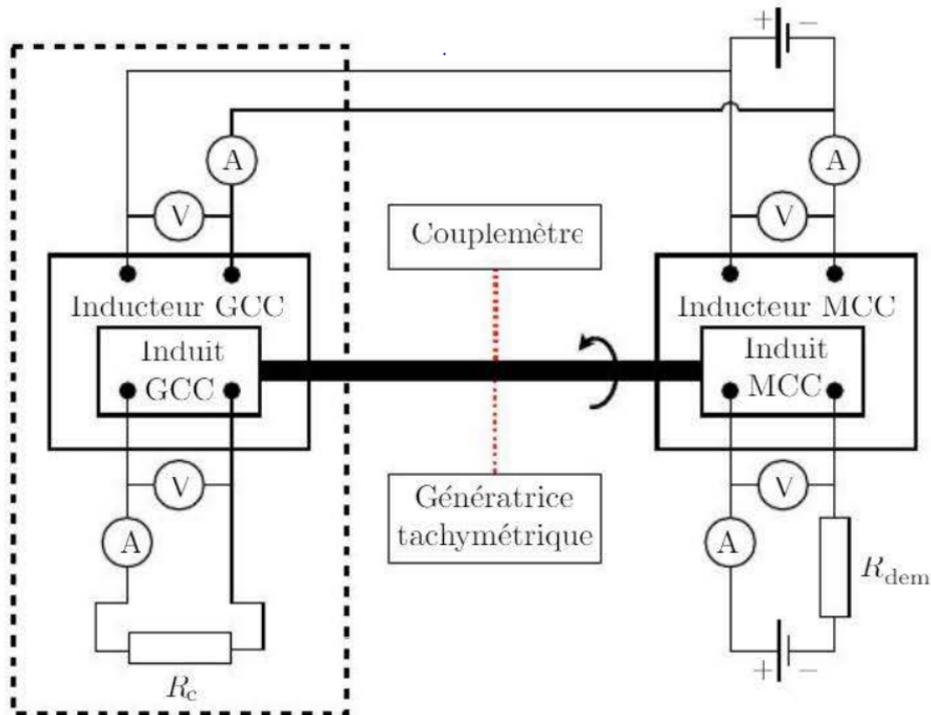
$$\Gamma = \phi_0 I - \Gamma_r \tag{2}$$

On en déduit les couples d'équations de fonctionnement pour la MCC (convention moteur) et la GCC (convention générateur) :

$$\left. \begin{array}{l} \text{MCC} \\ \phi_0 \omega = U - RI \\ \Gamma = \phi_0 I - \Gamma_r \end{array} \right| \left. \begin{array}{l} \text{GCC} \\ \phi'_0 \omega = U' + R' I' \\ \Gamma = \phi'_0 I' + \Gamma'_r \end{array} \right.$$

Dans la suite la MCC et la GCC sont reliées par le même axe on confond donc pour les deux, les mêmes  $\Gamma$  et  $\omega$ .

On se basera sur le schéma électrique suivant pour les branchements et les mesures des différents grandeurs électriques :



## 1.1 Étude à vide

On s'intéresse ici seulement à la MCC.

### Expérience

#### Étude à vide - [1]

Alimenter l'inducteur du moteur avec  $U_s = 110\text{ V}$  (tension nominale). On n'y touchera plus. On utilisera des multimètres (ou un wattmètre) pour y mesurer  $U_s$  et  $I_s$ . Brancher l'induit du moteur. On utilisera des multimètres (ou un wattmètre) pour y mesurer  $U$  et  $I$ . Brancher un rhéostat de démarrage de  $10\ \Omega$  en série avec l'induit (normalement pas besoin grâce aux pertes Joule mais question de sécurité devant le jury). Pour démarrer le moteur, augmenter progressivement  $U$ . Une fois que le moteur tourne, court-circuiter le rhéostat.

Faire varier  $U$  jusqu'à  $110\text{ V}$  et mesurer  $I$  ainsi que la fréquence de rotation  $f = \omega/2\pi$  grâce à la génératrice tachymétrique (c'est une GCC qui mesure la fréquence de sa tension de sortie). Vérifier la relation  $\phi_0 \omega = U - RI$  en traçant  $\omega/I$  en fonction de  $U/I$  le coefficient directeur est  $1/\phi_0$  et l'ordonnée à l'origine est  $-R/\phi_0$ .

On peut le faire pour différentes valeurs de  $U_s$  pour avoir la courbe d'aimantation  $\phi_0 = f(U_s)$ , mais attention de parcourir  $U$  toujours dans le même sens (hystérésis).

On peut noter que  $\phi_0$  dépend aussi de l'induit par la réaction magnétique de l'induit, mais c'est au moins d'ordre 1.

## 1.2 Étude en charge à fréquence fixée

On va maintenant appliquer un couple au moteur via la génératrice, sans s'intéresser à sa capacité à générer du courant.

## Expérience

### Étude en charge - [1]

Alimenter l'inducteur de la génératrice en parallèle de celui du moteur (avec voltmètre et ampèremètre), toujours avec  $U_s \equiv U'_s = 110\text{ V}$ . Alimenter l'induit du moteur avec une tension constante, toujours en faisant attention d'utiliser un rhéostat au démarrage qui sera ensuite court-circuité. Se placer à une fréquence de rotation de 10 Hz par exemple.

Brancher un rhéostat de  $100\ \Omega$  en série avec un ampèremètre sur l'induit de la génératrice. La MCC ralentit. Réduire la résistance  $R_c$  du rhéostat. On voit qu'il faut fournir plus de puissance à l'alimentation du moteur en faisant varier  $U$  pour retrouver  $f = 10\text{ Hz}$ .

Pour différentes valeurs de  $R_c$ , ajuster la puissance fournie par l'alimentation du moteur pour retrouver  $f = 10\text{ Hz}$  puis mesurer  $\Gamma$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $U'$  et  $I'$ . Tracer  $\omega/I$  en fonction de  $U/I$  et  $\Gamma$  en fonction de  $I$  pour remonter aux caractéristiques de la MCC en charge, *i.e.* deux valeurs pour  $\phi_0$  que l'on peut comparer (elles sont souvent bien en accord), une nouvelle valeur de  $R$  (souvent bien plus petite que celle obtenu à vide, pas trop d'explications *c.f.* [1]) et une valeur de  $\Gamma_r$  (OdG cohérent *c.f.* [1]  $\approx 10^{-2}\text{ N m}$ ).

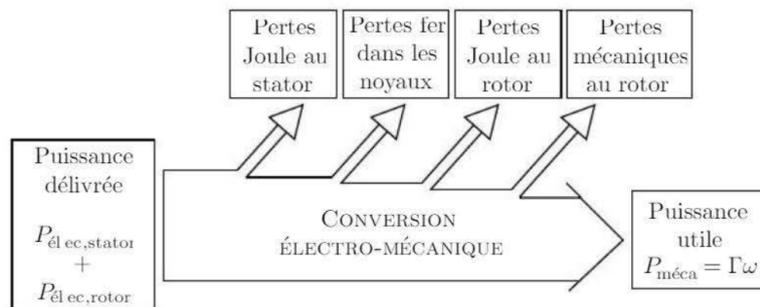
Faire de même pour la GCC.

La résistance  $R_c$  du rhéostat permet à un courant de circuler dans l'induit de la génératrice et donc de fournir un couple s'opposant à la rotation engendrée par le moteur.

On a réalisé une étude à  $f$  constant, mais on peut aussi le faire en maintenant  $U$  ou  $\Gamma$  constant.

### 1.3 Rendement à fréquence fixée

La conversion électromécanique d'un tel moteur n'est pas parfaite et peut être résumer dans le schéma suivant :



Les pertes sont les suivantes :

- pertes cuivre (effet Joule) dans l'induit :  $RI^2$
- pertes cuivre (effet Joule) dans l'inducteur :  $R_s I_s^2$
- frottements mécaniques :  $\Gamma_r \omega$
- pertes magnétique (hystérésis magnétique, courants de Foucault, perte de flux)

On peut remonter aussi facilement au rendement du moteur :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{méca}}}{\mathcal{P}_{\text{élec, stator}} + \mathcal{P}_{\text{élec, rotor}}} = \frac{\Gamma\omega}{UI + U_s I_s} \quad (3)$$

ainsi qu'au rendement de la génératrice :

$$\eta' = \frac{-\mathcal{P}'_{\text{élec,rotor}}}{-\mathcal{P}'_{\text{méca}} + \mathcal{P}'_{\text{élec,stator}}} = \frac{-U' I'}{-\Gamma\omega + U'_s I'_s} \tag{4}$$

**👤 Expérience**

**Rendement - [1]**

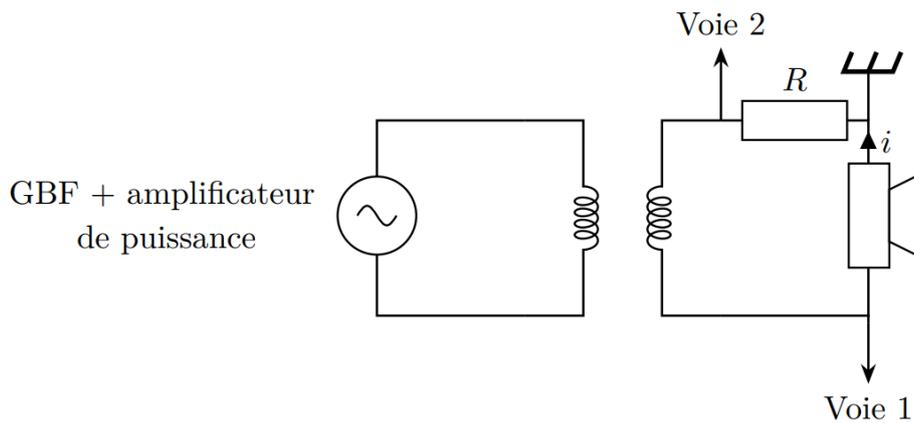
Pendant l'expérience précédente, en profiter pour relever aussi  $U_s$ ,  $I_s$ ,  $U'_s$  et  $I'_s$ .

Tracer alors  $\eta$  en fonction de  $\Gamma$ , on s'attend à la présence d'un plateau et un rendement maximal du moteur  $\eta \approx 0.54$  pour  $f = 10$  Hz.

Tracer aussi  $\eta'$  en fonction de  $-I'$  puis en fonction de  $U'$ , on s'attend à des courbes en cloche avec un rendement maximal de la génératrice dans les deux cas de  $\eta' \approx 0.26$  et des valeurs d'intensité en de tension nominales  $I'_{\text{nom}} \approx 1$  A et  $U'_{\text{nom}} \approx 20$  V.

## 2 Haut-parleur

On va étudier un haut-parleur dans le circuit suivant :



On utilise un ampli de puissance pour augmenter la puissance délivrée par le GBF. On utilise aussi un transformateur d'isolement pour s'affranchir des problèmes de masse si l'ampli de puissance n'est pas à masse flottante.

### 2.1 Caractérisation et fonction de transfert

Grâce à la voie 1 de l'oscilloscope, on visualise la tension aux bornes du haut-parleur, tandis que la voie 2 donne une image du courant traversant le haut-parleur. En mesurant les amplitudes  $U_{HP}$  et  $U_R$  des tensions aux deux voies de l'oscilloscope et leur déphasage  $\varphi$ , on peut remonter à l'impédance électrique du haut-parleur :

$$\underline{Z}(j\omega) = -R \frac{U_{HP}}{U_R} \cos(\varphi) \tag{5}$$

Pour avoir une bonne résolution à la fois sur le courant et la tension, on prendra la résistance  $R$  de l'ordre de l'impédance d'entrée du haut-parleur (de quelques ohms). Il faudra prendre garde à ne pas dépasser le courant admissible par la résistance et la puissance nominale du haut-parleur. In l faut aussi faire attention à ne dépasser l'intensité maximale d'entrée du transformateur d'isolement.

En faisant varier la fréquence, on peut tracer l'impédance électrique en fonction de la pulsation  $\omega$ , dont le comportement à basses fréquences est bien modélisé par la relation

$$\underline{Z}(j\omega) = r + \frac{\frac{(Bl)^2}{\eta}}{1 + j\frac{\sqrt{km}}{\eta}\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} \quad (6)$$

en négligeant les effets inductifs dans le bobinage du haut-parleur. Dans cette expression,  $r$  désigne la résistance des bobinages dans le haut-parleur,  $B$  le champ magnétique créé par l'aimant,  $l$  la longueur du bobinage,  $\eta$  un coefficient de frottement permettant de tenir compte des pertes d'énergie de la membrane en mouvement du fait des frottements et du rayonnement acoustique, et  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  une pulsation de résonance, avec  $m$  la masse de l'équipage mobile et  $k$  la constante de raideur associée à la force élastique exercée par le châssis et le spider sur la membrane mobile.

### ☕ Expérience

#### Fonction de transfert - Poly de B.Guiselin

On relève  $U_{HP}$ ,  $U_R$  et  $\varphi$  pour différentes fréquences. On trace alors  $\text{Re}(\underline{Z})$  et  $\text{Im}(\underline{Z})$  en fonction de  $\omega$  donnés par les relations :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Re}(\underline{Z})(\omega) = r + \frac{\frac{(Bl)^2}{\eta}}{1 + \frac{km}{\eta^2}\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} \\ \text{Im}(\underline{Z})(\omega) = \frac{\frac{(Bl)^2}{\eta}}{1 + \frac{km}{\eta^2}\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} \frac{\sqrt{km}}{\eta} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) \end{array} \right. \quad (7)$$

On peut alors grâce à un ajustement non linéaire des données de remonter à des valeurs pour  $r$ ,  $\frac{(Bl)^2}{\eta}$ ,  $\frac{km}{\eta^2}$  et  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ .

On peut vérifier rapidement la cohérence de la valeur de  $r$  en mesurant directement la résistance du haut-parleur à l'ohmmètre.

On peut continuer à caractériser ces constantes avec d'autres expériences (*c.f.* le Poly de B.G.).

### Remarque

La fonction de transfert dévie de la formule donnée à hautes fréquences à cause des effets inductifs (auto-induction et effet de peau).

## 2.2 Rendement

On peut également mesurer le rendement du haut-parleur en tant que transducteur électromécanique. Pour cela, on place en aval du haut-parleur à une distance  $d$  un sonomètre qui mesure le logarithme de l'intensité acoustique en dBs.

Pour mesurer la puissance fournie on mesure les amplitudes  $U_R$  et  $U_{HP}$  des tensions aux bornes de la résistance et du haut-parleur, ainsi que leur déphasage  $\varphi$ , et on en déduit la puissance électrique fournie par la relation

$$\mathcal{P}_{\text{élec}} = -\frac{U_{HP} U_R}{R} \cos(\varphi) \quad (8)$$

Il est à priori possible de faire la mesure du rendement pour différentes fréquences, mais cela donne des mesures bruitées. Par ailleurs, cela pose également le problème de la dépendance spatiale de la puissance surfacique. Il est alors plus commode de faire la mesure à une seule fréquence  $f$ . Il faut alors choisir celle-ci telle que la distance  $d$  de l'ordre du m entre le haut-parleur et le sonomètre vérifie  $d \gg \lambda = c/f$  afin de se trouver dans la zone de rayonnement où la puissance surfacique rayonnée varie simplement comme  $1/d^2$ . De plus, il faut choisir  $f$  de telle sorte que  $\lambda = c/f \gg a$ , afin de pouvoir assimiler le haut-parleur à une source ponctuelle émettant un rayonnement isotrope. Dans ce cas, la puissance acoustique s'écrit

$$\mathcal{P}_{\text{acous}} = 4\pi d^2 I_{\text{réf}} 10^{L/10} \quad (9)$$

où  $L$  désigne la valeur lue sur le sonomètre en décibels, et  $I_{\text{réf}} = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}$ . Cela permet finalement de définir le rendement par la relation

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{acous}}}{\mathcal{P}_{\text{élec}}} \quad (10)$$

Si la puissance nominale du haut-parleur est indiquée dans la notice, on essaiera de s'y placer en limitant l'inconfort auditif.

### Expérience

#### Rendement du haut-parleur - Poly de B.G.

On se place à la fréquence de résonance pour maximiser la puissance acoustique émise. On fixe  $d$  et on fait varier la puissance électrique envoyée dans le haut-parleur.

On fait alors la régression affine  $\mathcal{P}_{\text{acous}}$  en fonction de  $\mathcal{P}_{\text{élec}}$ . Le coefficient directeur donne directement le rendement de valeur très faible (j'ai eu  $\approx 10^{-7}$ ). L'ordonnée à l'origine correspond à la puissance acoustique des bruits ambiants et on peut vérifier sa cohérence en comparant sa valeur en dB à celle lue au sonomètre avec le haut-parleur éteint.

## Conclusion

On avait vu deux systèmes plus ou moins efficaces pour faire des conversions entre puissance électrique et puissance mécanique. Il en existent plein d'autres : machine asynchrone, microphone ...

## Compléments

### Questions

- **Dans la MCC tu nous exposes les pertes. Est ce que tu sais ce que sont les pertes fer et les pertes cuivre ?** Pertes cuivre : effet joule. Pertes fer : hystérésis dans la ferrite.
- **Une idée pour diminuer les pertes** Utilisation de matériaux feuilletés.
- **Idée d'une manip qualitative pour illustrer une conversion de puissance électromécanique** Rails de Laplace **Un petit schéma pour expliquer ?**
- **Un analogue des rails de Laplace dans ce que tu as fait ?** Proche du haut parleur, mais pas tout à fait pareil.
- **Je voudrais revenir sur les pertes fer et les pertes cuivre, comment elles évoluent en fonction de la fréquence ?** Comme on a des bobines, les pertes cuivres vont être très importantes à haute fréquence. On sera plus dans l'ARQS magnétique à haute fréquence. Dans ton ferro, comme le champ change de sens à chaque cycle, tu parcours un cycle d'hystérésis par tour donc pertes en  $\omega$ . Les pertes par courant de Foucault elles sont en  $\omega^2$ . **Et pour les pertes cuivre, elle se comportent comment en fonction de  $\omega$  (puissance?)** On sait pas. **Pour les pertes Joule, comment ça**

**fonctionne ?** Modèle de Drüde? Phénomène dissipatif? Les pertes Joule elles sont constantes en fonction de  $\omega$

- **Quand tu as dit on prend l'incertitude constructeur. Comment tu as pris cette incertitude ? Comment elle est donnée cette incertitude constructeur ? Elle est de quel type l'incertitude constructeur ? Dernier digit ?** C'est souvent un pourcentage de la valeur affichée ET un nombre de digit sur le dernier digit.
- **Tu as dit qu'il fallait commencer par allumer le stator . Pourquoi ?** Risque d'emballage pareil pour l'extinction, commencer par éteindre l'induit.
- **Pourquoi il y a pas de terre sur l'autre générateur ?** A priori il y a une terre sur les générateurs, mais avec la prise sur 1 des 2, on peut relier la MCC à la terre.
- **Comment marche le couplemètre ?** Ça marche avec des piézoélectrique. Décalage créé une DDP qu'on peut mesurer.
- **Comment fonctionne un piézoélectrique ?** Cristal (par exemple quartz) qui lorsque soumis à une contrainte provoque un décalage entre les anions et les cations et se traduit par une DDP macro. **Anions ? Cations ? C'est quoi avec le  $\text{SiO}_2$  ? Ça marche dans les 2 sens un piézoélectrique ?** Oui
- **Avec quel appareil tu mesures la fréquence de rotation ? Comment ça marche ?** Un petit circuit qui est fermé à chaque instant précis et qui est relié à un compteur ? Un truc optique ?
- **Que se passe-t-il si je force le moteur à tourner** Il y a un courant alternatif qui est produit et on peut en déduire une fréquence. **Comment marche le tachymètre du coup ?** A priori ça fonctionne avec une génératrice. Ça s'appelle une génératrice tachymétrique.
- **Est ce que tu peux rajouter sur tes graphiques les paramètres  $R$  et  $\phi_0$  ? Comment ils sont reliés aux coefficients de ta droite ?**
- **Est ce que tu as été surpris de trouver le même flux pour les 2 moteurs ?** Non c'est la même tension dans les deux inducteurs donc on s'attend un flux similaire.
- **Au niveau de la sécurité les fils jaunes et verts il servent à quoi ?** Ça relie les carrosseries métalliques à la terre évite les danger en cas de court circuit.
- **C'est quoi les courants en jeu ?** De l'ordre de 1 A.
- **Quels dangers avec des bobines ?** Loi de Lenz, il faut faire attention à ne pas débrancher un circuit avec une bobine dedans.
- **T'en penses quoi de ce rendement, c'est ok pour une MCC ? A quoi tu pourrais le comparer ?** On peut le comparer avec un moteur thermique  $\eta \approx 0.3$ . Mais on peut avoir de très bon rendements avec des machine électriques.
- **Le haut parleur c'est réversible ?** Oui. En faisant bouger la membrane, on voit un signal.
- **Est ce que ton haut parleur ferait un bon micro ?** Non l'inertie de la membrane est ici trop grande.
- **Est ce que les rails de Laplace c'est réversible aussi ?** Oui. **C'est quoi comme principe physique ?** L'induction. **Y a quoi comme type d'inductions ?** Lorentz et Neumann.
- **Tu as dit que l'onde était sphérique, mais si on se met derrière le haut-parleur y a moins de son** Oui c'est une hypothèse forte, on suppose une onde sphérique dans le demi espace devant le haut-parleur.

- **Manip surprise : Mesure de  $g$  avec des masses et un dynamomètre** Le dynamomètre donne le poids de la masse. Avec plusieurs masses on obtient une droite et on fait une régression linéaire qui donnera  $g$ .
- **C'est quoi comme type d'incertitude la régression linéaire** C'est du type A.

## Commentaires

- Il n'y a pas assez de mesures. Tu nous expliques comment marchent les appareils mais tu les utilises pas.
- Il y a un problème de sécurité dans ce que t'as fait. Le jury a eu peur. Quand il y a des bobines et des forts courant, ne pas débrancher.
- Manque de schéma au tableau. Le schéma de la MCC en coupe c'est ok, mais le plus important était le schéma électrique des branchements avec les wattmètres.
- Le pendule était sans doute plus judicieux que le dynamomètre pour la mesure de  $g$ .
- Être plus précis sur les hypothèses du PFD.
- Ça pourrait être pas mal de faire des conversions méca  $\rightarrow$  élec : ça a été fait avec la génératrice. On peut faire le micro aussi.
- **Insister sur la sécurité si on tombe sur la MCC.**