



PSL 



SORBONNE  
UNIVERSITÉ

université  
PARIS-SACLAY

*Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge*

---

# PHYSIQUE POUR LES CHIMISTES - PUISSANCE ET RÉGULATION

---

*2022-2023*

**Bibliographie :**

# Table des matières

<b>1 Moteur de Stirling</b>	<b>3</b>
1.1 Principe . . . . .	3
1.2 Dispositif . . . . .	3
1.3 Expériences . . . . .	3
<b>2 Moteur à courant continu</b>	<b>5</b>
2.1 Principe . . . . .	5
2.2 Dispositif et expérience . . . . .	5
<b>3 Cellules photovoltaïques</b>	<b>7</b>
3.1 Principe . . . . .	7
3.2 Mesure des caractéristiques . . . . .	7
3.3 Rendement des différents types de cellules (facultatif) . . . . .	8
<b>4 Régulation d'éclairage</b>	<b>9</b>
4.1 Principe . . . . .	9
4.2 Mise en œuvre . . . . .	9
<b>5 Régulation de vitesse d'un moteur</b>	<b>11</b>
5.1 Principe . . . . .	11
5.2 Mise en œuvre . . . . .	12

Les expériences proposées dans ce poly de TP peuvent illustrer les leçons "Thermodynamique : premier et second principes", "Transferts thermiques", "Conservation de l'énergie", "Régulation", ou encore "Machines thermiques".

## 1 Moteur de Stirling

### 1.1 Principe

Le moteur de Stirling est un moteur thermique exploitant une différence de température entre une source chaude et une source froide<sup>1</sup>, dans lequel une masse de gaz subit des transformations cycliques sous l'effet notamment d'un chauffage externe<sup>2</sup>.

Le cycle de Stirling est composé de quatre transformations :

- un chauffage isochore (à volume constant)
- une détente isotherme (à température constante)
- un refroidissement isochore
- une compression isotherme

Bien que le cycle de Stirling soit parcouru de manière irréversible, son rendement est relativement proche de celui de Carnot.

$$\eta_{\text{Stirling}} = 1 - \frac{(\gamma - 1)T_f \ln a + T_c - T_f}{(\gamma - 1)T_c \ln a + T_c - T_f} \quad (1)$$

où  $\gamma$  est l'exposant adiabatique du gaz (quelle valeur prendre ?) et  $a = V_2/V_1 > 1$  est le rapport de compression. On rappelle que le rendement de Carnot réversible est

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (2)$$

Pour plus d'informations sur le cycle de Stirling (calcul du rendement, etc.), on pourra se référer à *Michel, Raoux, Tondelier & Van Brackel, Physique PCSI*.

### 1.2 Dispositif

Le moteur mis à votre disposition (ENSP 4334, Notice 12 : 1) ne reproduit cependant pas fidèlement ce cycle à cause des contraintes liées au mouvement de la bielle, et parce que la diffusion thermique opère rapidement au sein du verre. En effet, après une dizaine de minutes, la source froide ne l'est plus, les deux sources ont des températures proches et le rendement s'effondre. Le moteur possède un ensemble de capteurs utiles pour caractériser son fonctionnement :

- un potentiomètre variable solidaire du piston et caractérisant son déplacement. On peut donc avoir accès, par ce biais, au volume  $V$  ;
- un embout permettant la connexion d'un manomètre pour connaître la pression  $P$  de l'air dans le moteur au cours du cycle ;
- un mécanisme d'entraînement d'un moteur électrique ;
- deux embouts thermiques métalliques pour mesurer les températures des sources chaude ( $T_c$ ) et froide ( $T_f$ ).

### 1.3 Expériences

**Expérience :** On va commencer par repérer les quatre étapes du cycle lors de la rotation du moteur, en travaillant "à la main", sans chauffer. Tout d'abord, alimenter le potentiomètre (bornes rouge et bleue - attention, pas celles

1. Les moteurs Stirling dits "de type gamma" peuvent ainsi fonctionner sur la différence de température entre l'air ambiant et la paume de la main !

2. Robert Stirling a mis au point son système pour répondre au problème récurrent de l'explosion des chaudières à vapeur.



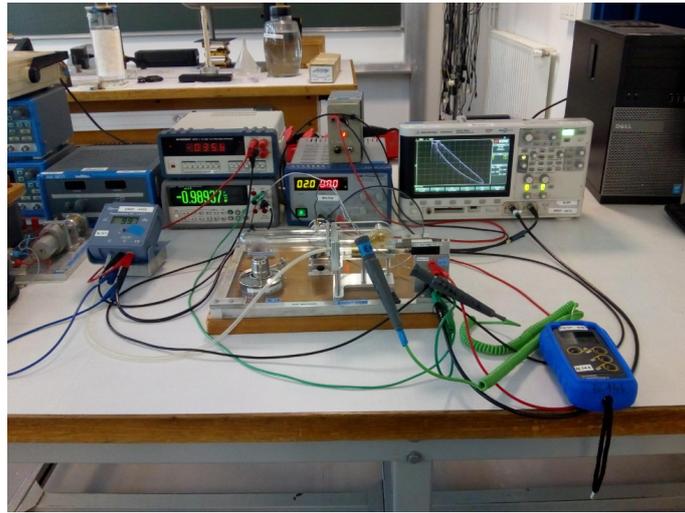


FIGURE 1 – Fonctionnement en machine frigorifique

de l'unité moteur-générateur) avec une alimentation continue de tension adéquate (maximum 2V). La mesure du volume se fait par le biais du potentiomètre, entre la borne jaune et la bleue<sup>3</sup>. On est en présence d'un diviseur de tension qui permet de suivre la variation du volume. Déterminer ainsi, en utilisant les données du constructeur, la relation entre tension mesurée et volume. Ensuite, relier le manomètre à l'embout prévu à cet effet sur le moteur de Stirling, et la sortie du manomètre sur l'oscilloscope, pour visualiser le signal proportionnel à la pression, et trouver de même le facteur de conversion entre tension et pression. On peut dès maintenant suivre l'état du gaz dans le diagramme de Clapeyron (pression en fonction du volume) en utilisant le mode X-Y de l'oscilloscope<sup>4</sup>. Insérer des thermocouples dans les deux embouts métalliques, de manière à pouvoir à tout instant mesurer les températures des sources chaude et froide. Faites tourner rapidement le moteur à l'aide d'un moteur électrique couplé au Stirling par le mécanisme d'entraînement<sup>5</sup> et attendre quelques minutes. Toucher les deux embouts métalliques, que constatez-vous ? Quel type de machine thermique a-t-on construit ici ? Retirer le moteur électrique pour la suite de l'étude, c'est-à-dire retirer l'élastique d'entraînement.

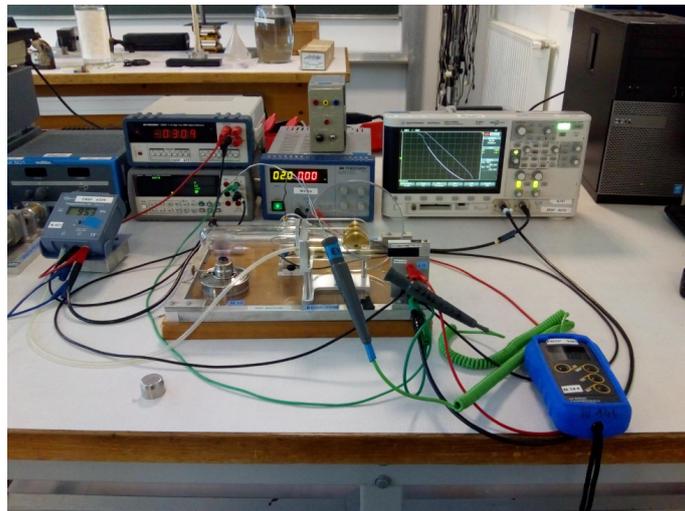


FIGURE 2 – Fonctionnement en moteur

**Expérience :** On va maintenant étudier le fonctionnement moteur du dispositif. Vérifier la présence d'éthanol dans

3. Si on veut que le cycle ait l'orientation voulue sur l'oscilloscope, on pourra brancher la voie 1 à l'envers par rapport au schéma habituel du diviseur de tension.

4. On pourra utiliser le mode "haute résolution" dans le menu "Acquire" pour s'affranchir un peu du bruit.

5. On alimentera le moteur électrique avec une alimentation 0/12V d'amplificateur opérationnel, qui peut délivrer suffisamment de puissance pour que le freinage associé au mécanisme d'entraînement ne soit pas un problème.



le brûleur, puis peser ce dernier, le disposer sous le cylindre, allumer la mèche et démarrer un chronomètre. À partir de là, il faut procéder rapidement : après quelques minutes, le moteur de Stirling sera en état de fonctionnement, mais après quelques dizaines de minutes, tout le verre sera chaud et il ne débitera plus une puissance suffisante pour entretenir son mouvement. Lorsque le moteur de Stirling est prêt, le faire démarrer à la main en initiant une rotation dans le bon sens<sup>6</sup>. Ensuite, mesurer la fréquence des signaux à l'oscilloscope et observer le cycle dans le diagramme de Clapeyron en mode X-Y (ajouter si nécessaire une persistance, menu "Display"). Enfin, éteindre la flamme, arrêter le chronomètre puis peser de nouveau le brûleur (attention c'est chaud !). On peut alors faire les mesures suivantes :

- Déterminer grossièrement l'aire dans ce diagramme  $P - V$ , et en déduire le travail fourni sur un cycle par le moteur. À partir de la mesure de la fréquence et des indications du chronomètre, déterminer le nombre de cycles effectués pendant l'expérience, et donc le travail total fourni par le moteur.
- À partir de la perte de masse en éthanol, et en sachant que la combustion de l'éthanol génère environ 30 kJ/g, estimer le transfert thermique fourni au moteur par la source chaude sur un cycle et sur l'ensemble de l'expérience.
- Obtenir alors l'ordre de grandeur du rendement de ce moteur, et le comparer à la valeur attendue d'après la formule donnée plus haut.

## 2 Moteur à courant continu

### 2.1 Principe

Un moteur à courant continu est une machine permettant de convertir de l'énergie électrique fournie sous la forme d'un courant continu en énergie mécanique. Il est constitué d'un "stator" créant un champ magnétique permanent, et d'un rotor fait de bobinages parcourus par le courant. Le moment magnétique de ces spires de courant cherchant à s'aligner sur le champ magnétique du stator, on s'arrange pour que le sens du courant s'inverse régulièrement afin d'entraîner le rotor. 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. On peut écrire  $U = K\Omega + C$ , où  $\Omega$  est la vitesse angulaire de rotation du moteur et  $C$  est une constante.

### 2.2 Dispositif et expérience

On va illustrer la conversion de puissance électromécanique avec un moteur à courant continu à alimentation 12 V, en l'utilisant pour hisser sur une distance fixée différentes masses ( $m = 200$  g, 1 kg, 2 kg, 3 kg, etc.) accrochées au bout d'un fil qui s'enroule autour du moyeu du moteur. Si l'on souhaite faire un point "à vide" ( $m = 0$ ) 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 qui peut être réglable, mais on utilisera le moteur à sa tension nominale de 12 V. Brancher le moteur en série avec un ampèremètre (on utilisera la borne "10A" en continu) et un interrupteur qui permettra de déclencher ou stopper la remontée rapidement, et en parallèle avec un voltmètre, également en continu. Pour fixer le moteur sur la table, on pourra utiliser deux serre-joints, ou à défaut placer une grande masse (5 kg) comme contrepoids. Penser à placer une mousse au sol pour ne pas abîmer les masses si elles tombent au sol, et accompagner la masse lors de sa retombée quand l'interrupteur est en position ouverte.

**Expérience :** Avec un chronomètre, mesurer le temps  $\Delta t$  mis par une masse pour remonter depuis une hauteur  $h_1$  jusqu'à une hauteur  $h_2$  et en déduire la puissance utile<sup>7</sup>  $P_u = \Gamma_u \Omega = mgv$ . Pour obtenir la puissance électrique fournie au système,  $P_e = UI$ , mesurer également la valeur de la tension et de l'intensité<sup>8</sup>. En déduire le rendement

6. Sens inverse des aiguilles d'une montre lorsque le brûleur est à gauche.

7. La vitesse angulaire de rotation du moteur  $\Omega$  est reliée à la vitesse de remontée de la masse  $v$  et au rayon de la bobine d'enroulement du fil  $r$  par  $v = r\Omega$ .

8. 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  $\Delta t$ .



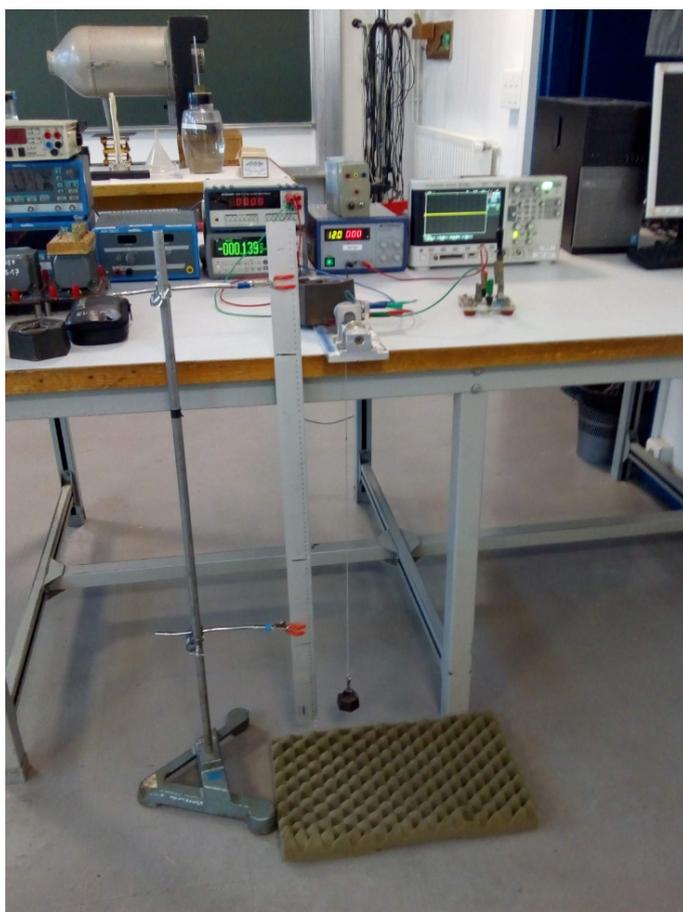


FIGURE 3 – Mesure du rendement du moteur à courant continu



$\eta = P_u/P_e$ . Reprendre ces mesures pour différentes charges (c'est-à-dire différentes masses) et tracer le rendement en fonction de la puissance utile à  $U$  fixée (ici à la tension nominale de 12 V).

### 3 Cellules photovoltaïques

#### 3.1 Principe

Les cellules photovoltaïques permettent de convertir l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. Elles se présentent sous la forme de plaques sombres, équipées de bornes pour brancher des charges (accumulateur ou charge utile en utilisation directe). Il existe différentes technologies de cellules photovoltaïques. Nous allons uniquement nous intéresser aux technologies silicium, qui constituent la grande majorité des cellules commerciales. Les cellules photovoltaïques sont optimisées pour fournir leur puissance maximale pour un éclairage dont la distribution spectrale est celle du rayonnement solaire.

Sous un éclairage donné, les caractéristiques importantes d'une cellule photovoltaïque sont :

- Une courbe Courant-Tension  $U - I$
- Une courbe Puissance-Tension  $U - P$ .

Quatre grandeurs physiques importantes caractérisent une cellule photovoltaïque :

- La tension à vide :  $V_{co}$ . Il s'agit de la tension aux bornes d'une cellule éclairée, mais non raccordée, donc qui ne débite pas de courant.
- Le courant de court-circuit :  $I_{cc}$ . Il s'agit du courant débité par une cellule éclairée et raccordée à elle-même par un simple fil, de résistance négligeable.
- Le point de puissance maximale : MPP (en anglais : Maximum Power Point) est le point de fonctionnement  $(U, I)$  de la cellule pour lequel la puissance électrique produite  $P = UI$  est maximale. Les courant et tension correspondants sont dits optimaux.
- Le rendement  $\eta$ . Il s'agit de la puissance maximale produite divisée par la puissance lumineuse reçue.

Par la suite, nous nous proposons de tracer les caractéristiques  $U - I$  et  $U - P$  d'une cellule photovoltaïque en silicium polycristallin (matériau de la majorité des panneaux solaires commerciaux) pour une situation d'éclairage donnée. Nous déterminerons aussi les quatre grandeurs physiques mentionnées ci-dessous. Au cours du TP, pensez à tenir compte des incertitudes lors de vos mesures, en particulier lors de la détermination du rendement  $\eta$ .

#### 3.2 Mesure des caractéristiques

Pour mesurer les caractéristiques de la cellule photovoltaïque en silicium polycristallin, réaliser le montage de la figure ci-dessous. Afin d'avoir un éclairage le plus homogène possible, placer la cellule à étudier à une trentaine de centimètres d'une lampe quartz-iodé sans condenseur. Placer également à côté (à la même distance du filament) un luxmètre permettant de mesurer le flux surfacique d'énergie lumineuse incidente<sup>9</sup>. Brancher électriquement la cellule comme indiqué sur la figure, en plaçant un ampèremètre, un voltmètre, et une résistance de charge variable (on prendra une boîte à décades permettant d'aller de  $1\ \Omega$  à  $1\ \text{k}\Omega$ ).

#### Expérience

- Déterminer rapidement  $V_{co}$  et  $I_{cc}$ . Pour cela, il faudra adapter le montage électrique proposé.
- Mesurer la tension et le courant délivré pour plusieurs valeurs de la résistance de charge, et reconstruire les caractéristiques  $U - I$  et  $U - P$ . Identifier  $V_{co}$  et  $I_{cc}$  sur ces caractéristiques.

9. Attention à la lecture du luxmètre, il change de calibre automatiquement, et il faut bien tenir compte des "0" qui apparaissent à droite. On prendra garde de remettre le cache en place après utilisation.





FIGURE 4 – Éclairage de la cellule photovoltaïque

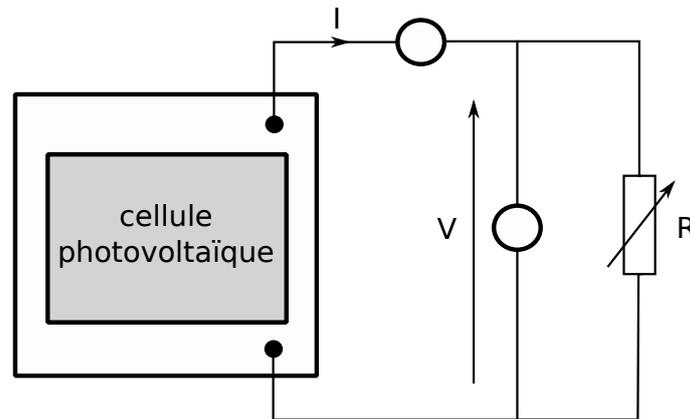


FIGURE 5 – Montage électrique de la cellule photovoltaïque

- Trouver la valeur de la puissance maximale délivrée par la cellule  $P_m$ , ainsi que les coordonnées du point de puissance maximale ( $I_m, U_m$ ).
- À l'aide du luxmètre, mesurer le flux d'énergie lumineuse surfacique incident  $F$ . La valeur affichée par l'appareil est en "lux". On admettra qu'un éclairage de 100 lux correspond à  $1 \text{ W m}^{-2}$ . En mesurant précautionneusement la surface de la cellule photovoltaïque  $S$ , calculer la puissance lumineuse reçue puis le rendement  $\eta = P_m / (FS)$ .
- Evaluer les incertitudes sur  $P_m$ ,  $F$  et  $S$ , et en déduire celle sur le rendement.

### 3.3 Rendement des différents types de cellules (facultatif)

Nous avons étudié précédemment le rendement d'une cellule photovoltaïque en silicium polycristallin, qui correspond à un bon compromis coût/rendement pour les panneaux solaires commerciaux, mais nous disposons dans la collection de trois types de cellules photovoltaïques :

- cellules en silicium amorphe,
- cellules en silicium polycristallin,
- cellules en silicium monocristallin.

**Expérience :** Reprendre l'étude précédente et déterminer le rendement pour les différents types de cellules. Quelle hiérarchie de rendement suivant le type de cellule observe-t-on ? Proposer une explication.

## 4 Régulation d'éclairage

### 4.1 Principe

Un système bouclé peut être stable ou instable. Lorsqu'il est instable, il peut se mettre à osciller et cette oscillation peut être exploitée pour la réalisation d'oscillateurs (oscillateurs à quartz, par exemple). Si le système bouclé est stable, il permet au contraire de réaliser une régulation, aussi appelée asservissement<sup>10</sup>, qui correspond au fait qu'un système suit une consigne, malgré les perturbations extérieures possibles. On va illustrer ce principe au travers d'une régulation d'éclairage, dont le but est de maintenir constant l'éclairage d'une surface, la valeur de cet éclairage étant imposée par une tension de commande  $U_{com}$ . Pour tester l'efficacité de la régulation on modifiera la distance lampe-surface éclairée. Le schéma ci-dessous représente les fonctions qui interviennent :

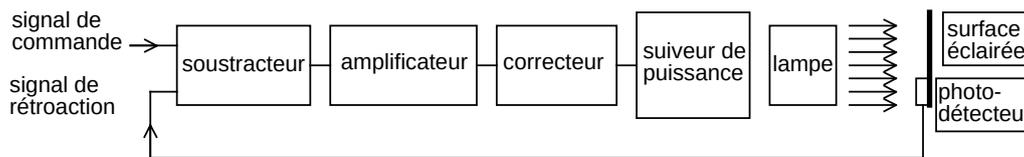


FIGURE 6 –

Le schéma suivant en représente le circuit électrique réalisé sur une plaquette qui contient tous les composants :

- L'amplificateur opérationnel AO<sub>1</sub> fonctionne en suiveur (adaptateur d'impédances), il permet d'avoir une tension de commande (réglée par le potentiomètre) qui ne soit pas influencée par la résistance d'entrée du soustracteur qui est placé à sa suite.
- L'amplificateur opérationnel AO<sub>4</sub> joue un rôle équivalent pour le signal d'éclairage.
- Avec l'amplificateur opérationnel AO<sub>2</sub>, on réalise un *soustracteur* :  $v_S = v_+ - v_-$ . En ce point, on a donc une tension qui reflète l'écart entre la consigne et l'éclairage.
- Avec l'amplificateur opérationnel AO<sub>3</sub> on réalise un amplificateur non inverseur dont le gain<sup>11</sup> est croissant de C<sub>1</sub>--D à C<sub>3</sub>--D, la connexion C<sub>4</sub>--D procurant une *correction intégrale*<sup>12</sup>. Cet amplificateur commande un *suiveur de puissance* fondé sur un transistor.

### 4.2 Mise en œuvre

On opère dans une relative obscurité. Afin d'être sûr que le régime de fonctionnement reste linéaire, il vaut mieux commencer les diverses expériences avec la distance maximum entre la lampe et la photodiode : on ajuste à chaque fois la tension de commande  $U_{com}$  de façon à ce que la tension  $U_{lampe}$  soit environ 10 V<sup>13</sup>. Puis, sans changer  $U_{com}$ , on rapproche la photodiode jusqu'à la butée et on étudie l'évolution de  $U_{ecl}$  et  $U_{lampe}$ , qu'on mesure avec des voltmètres continus et qu'on visualise avec un oscilloscope.

**Expérience (étude en boucle ouverte) :** Relier A à B<sub>1</sub> (la tension de consigne  $U_{com}$  sur l'entrée + du soustracteur) et relier C<sub>1</sub> à D (gain le plus faible de l'amplificateur). Observer  $U_{ecl}$  et  $U_{lampe}$ . Régler la consigne  $U_{com}$  pour avoir  $U_{lampe} \simeq 10$  V. Rapprocher la photodiode et vérifier que son éclairage n'est pas régulé.

**Expérience (étude en boucle fermée) :** Relier E à B<sub>2</sub> (c'est-à-dire la tension d'éclairage  $U_{ecl}$  sur l'entrée – du soustracteur). Relier C<sub>1</sub> à D pour utiliser un faible gain de l'amplificateur. Régler à nouveau la consigne  $U_{com}$ . Rapprocher la photodiode et remarquer que l'éclairage varie légèrement, l'interpréter en remarquant que  $U_{lampe}$  diminue un peu sous l'effet de la rétroaction. Pour améliorer la régulation il faut augmenter le gain de boucle : relier

10. Dans ce cas là, il convient d'éviter les oscillations du système.

11. On pourra utilement revoir le calcul des fonctions de transfert de ces montages à AO.

12. La connexion (C) est normalement inutilisée, elle peut servir à des expériences complémentaires.

13. Un peu inférieure à la tension d'alimentation de 12V afin de tenir compte de la saturation des AO et de la tension de décalage  $V_{BE}$  du transistor.



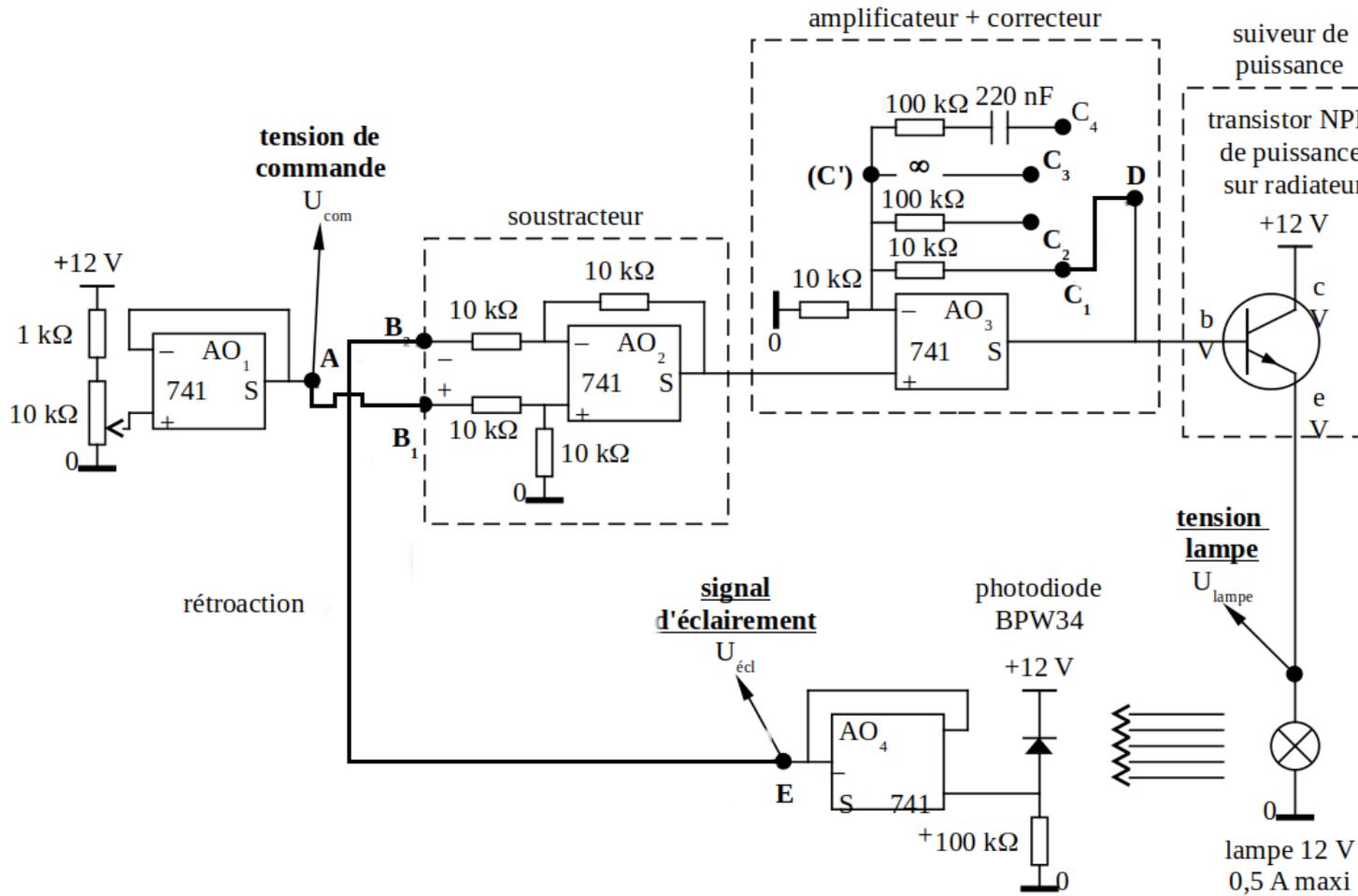


FIGURE 7 –

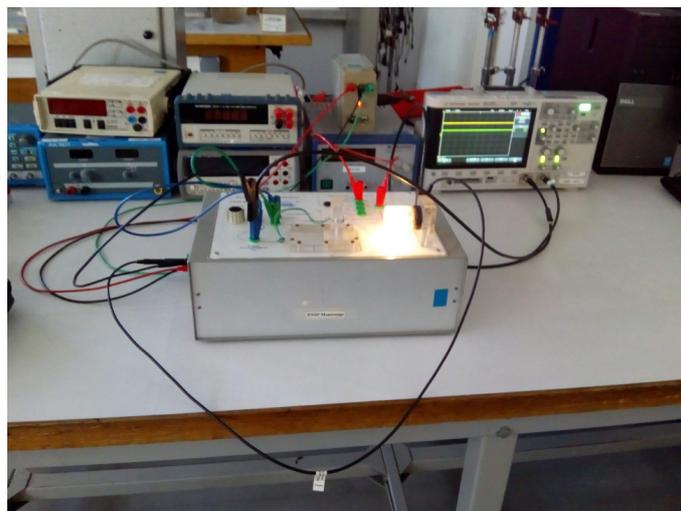


FIGURE 8 – Montage de régulation d'éclairage



$C_2$  à D et procéder de même que précédemment. Relier ensuite  $C_3$  à D pour pouvoir utiliser l'énorme gain de l'AO en boucle ouverte, et remarquer que la régulation de  $U_{lampe}$  est parfaite. On peut voir apparaître des oscillations de la tension  $U_{lampe}$  : l'accroissement du gain de boucle provoque une réduction de la stabilité du système<sup>14</sup>. On peut remarquer que l'amplificateur opérationnel AO<sub>3</sub> fonctionne en comparateur, et ce mode de fonctionnement, très utilisé, est appelé «régulation en tout-ou-rien». Si on le souhaite, on peut continuer en reliant  $C_4$  à D, ce qui introduit une *correction intégrale* : le gain en continu est énorme à cause du condensateur (régulation statique parfaite), et le gain à la fréquence critique, qui correspond à un déphasage de  $-180^\circ$ , est le même qu'en  $C_2$ --D (stabilité). La valeur choisie pour le condensateur correspond approximativement au régime transitoire qui minimise le temps de réponse.

## 5 Régulation de vitesse d'un moteur

### 5.1 Principe

Le but de cet asservissement est de maintenir constante la vitesse d'un moteur, la valeur de cette vitesse étant imposée par une tension de commande  $U_{com}$ . Pour tester l'efficacité de la régulation, on freinera le moteur par courants de Foucault. Elle ressemble totalement à l'expérience de régulation d'éclairage, le même protocole étant suivi. Cette régulation est toutefois plus visuelle car on perçoit plus nettement (à l'œil et au bruit) les variations de vitesse du moteur que d'intensité lumineuse de la lampe. Pour que l'asservissement fonctionne bien, il ne faut pas mettre des tensions de commande trop élevées à cause de la limitation de l'amplification de puissance. Le schéma suivant représente le circuit électrique réalisé sur une plaquette qui contient tous les composants :

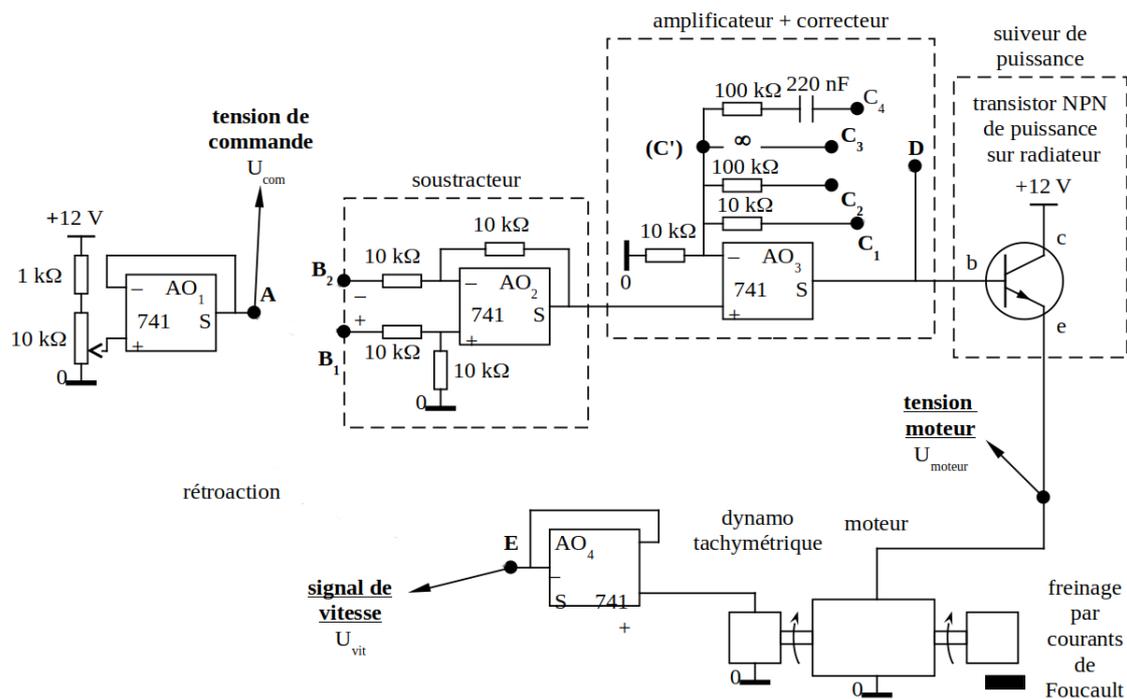


FIGURE 9 –

- L'amplificateur opérationnel AO<sub>1</sub> fonctionne en suiveur (adaptateur d'impédances), il permet d'avoir une tension de commande (réglée par le potentiomètre) qui ne soit pas influencée par la résistance d'entrée du soustracteur qui est placé à sa suite.

14. Dans le cas du système présent, cette instabilité est peu gênante car la lampe a un temps de réponse tel que les oscillations n'apparaissent pratiquement pas dans le flux lumineux. La lampe a d'ailleurs un comportement hautement non linéaire, à deux titres : relation tension-flux lumineux et variation de la résistance du filament avec sa température. Ceci rend délicates certaines études quantitatives, en particulier au niveau du temps de réponse.

- L'amplificateur opérationnel AO<sub>4</sub> joue un rôle équivalent pour le signal de vitesse.
- Avec l'amplificateur opérationnel AO<sub>2</sub>, on réalise un *soustracteur* :  $v_S = v_+ - v_-$ . En ce point, on a donc une tension qui reflète l'écart entre la consigne et le signal de vitesse.
- Avec l'amplificateur opérationnel AO<sub>3</sub> on réalise un amplificateur non inverseur dont le gain est croissant de C<sub>1</sub>--D à C<sub>3</sub>--D, la connexion C<sub>4</sub>--D procurant une *correction intégrale*. Cet amplificateur commande un *suiveur de puissance* fondé sur un transistor.

L'axe du moteur entraîne d'un côté la dynamo tachymétrique qui donne une tension  $U_{vit}$  proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation, et de l'autre côté un cylindre en cuivre soumis à l'action d'un aimant dont la distance est réglable<sup>15</sup>.

## 5.2 Mise en oeuvre

Afin d'être sûr que le régime de fonctionnement reste linéaire, il vaut mieux commencer les diverses expériences avec la distance minimum entre l'aimant et le cylindre : on ajuste à chaque fois la tension de commande  $U_{com}$  de façon que la tension  $U_{moteur}$  soit environ 5 V<sup>16</sup>. Puis, sans changer  $U_{com}$  on éloigne l'aimant jusqu'à la butée et on étudie l'évolution de  $U_{vit}$ .

**Expérience (étude en boucle ouverte) :** Relier A à B<sub>1</sub> (la tension de consigne  $U_{com}$  sur l'entrée + du soustracteur) et relier C<sub>1</sub> à D (gain le plus faible de l'amplificateur). Observer  $U_{vit}$  et  $U_{moteur}$ . Régler la consigne  $U_{com}$  pour avoir  $U_{moteur} = 5$  V. Eloigner l'aimant et interpréter le fait que la vitesse n'est pas régulée.

**Expérience (étude en boucle fermée) :** Relier E à B<sub>2</sub> et C<sub>1</sub> à D pour utiliser un faible gain de l'amplificateur. Régler à nouveau la consigne  $U_{com}$ . Eloigner l'aimant et remarquer que la vitesse varie légèrement, l'interpréter en remarquant que  $U_{moteur}$  diminue un peu sous l'effet de la rétroaction. Voir ce qui se passe quand on permute les connexions B<sub>1</sub> et B<sub>2</sub>. Pour améliorer la régulation il faut augmenter le gain de boucle : relier C<sub>2</sub> à D et procéder de même que précédemment. Relier ensuite C<sub>3</sub> à D pour pouvoir utiliser l'énorme gain de l'AO en boucle ouverte, et remarquer que la régulation est parfaite... mais que la tension  $U_{moteur}$  est très oscillante : l'accroissement du gain de boucle a provoqué une réduction de la stabilité du système<sup>17</sup>. On peut remarquer que l'amplificateur opérationnel AO<sub>3</sub> fonctionne en comparateur, et ce mode de fonctionnement, très utilisé, est appelé «régulation en tout-ou-rien». Si on le souhaite, on peut continuer en reliant C<sub>4</sub> à D, ce qui introduit une *correction intégrale* : le gain en continu est énorme à cause du condensateur (régulation statique parfaite), et le gain à la fréquence critique, qui correspond à un déphasage de  $-180^\circ$ , est le même qu'en C<sub>2</sub>--D (ce qui améliore la stabilité, les oscillations disparaissent). La valeur choisie pour le condensateur correspond approximativement au régime transitoire qui minimise le temps de réponse. On peut également relier un GBF délivrant une tension crête à une fréquence  $\approx 0.5$  Hz à l'entrée B<sub>2</sub> et observer comment le moteur parvient à suivre plus ou moins la tension de commande en fonction de l'amplificateur choisi. Cela permettra également d'évaluer l'effet du correcteur sur le temps de réponse à la consigne. On ne modifiera alors pas la position de l'aimant.

**Note :** L'asservissement de vitesse et l'asservissement d'éclairement vu précédemment sont des systèmes de classe 0 (le gain de boucle est fini quand la fréquence tend vers 0). Il existe des maquettes montrant également des asservissements en position d'un moteur, qui sont des systèmes de classe 1 (le gain de boucle a une pente de  $-20$  dB/déc quand la fréquence tend vers 0), ce qui leur confère des propriétés différentes<sup>18</sup>.

15. Le moteur est à courant continu et aimant permanent. La dynamo tachymétrique donne une tension continue de 1 V pour 1000 tr/min. Le freinage par courants de Foucault est proportionnel à la vitesse. On le rencontre sous une forme un peu différente dans les ralentisseurs de poids lourds.

16. Il vaut mieux faire tourner le moteur assez lentement. En tout cas il faut que cette tension soit inférieure à 9 V afin de tenir compte de la saturation des AO et de la tension de décalage  $V_{BE}$  du transistor.

17. Dans le cas du système présent, cette instabilité est peu gênante car le moteur a une inertie telle que les oscillations apparaissent peu dans sa vitesse. Cependant on note un fonctionnement plus bruyant, il y a donc un risque d'usure prématurée.

18. Cf. MANNEVILLE et ESQUIEU : *Systèmes bouclés linéaires de communication et de filtrage*, p. 57.

