

**Le DS comporte 4 parties indépendantes.**

**Exercice 1 : Trompette**

Une trompette est un instrument à vent de la famille des cuivres. Le son  $y$  est produit par la vibration des lèvres du trompettiste au niveau de l'embouchure qui génère une onde acoustique au sein de l'instrument. La trompette peut être modélisée comme un tuyau sonore rectiligne de longueur totale  $L=1,40\text{m}$ , fermé au niveau de l'embouchure et ouvert au niveau du pavillon.

On introduit un axe  $x$  tel que l'embouchure se trouve en  $x=0$  et le pavillon en  $x=L$ .

1- On modélise l'onde de pression  $P_i(x=0, t)$  générée par le trompettiste par une onde progressive sinusoïdale d'amplitude  $P_0$ , de pulsation  $\omega$ , et de phase à l'origine  $\phi_i$ . Ecrire  $P_i(x=0, t)$ .

2- Etablir (en la justifiant), l'expression de l'onde incidente  $P_i(x, t)$  en un point M de la trompette, d'abscisse  $x$ .

3- Lorsqu'elle atteint le pavillon, cette onde se réfléchit en conservant la même amplitude, mais avec un déphasage  $\phi_r$ . Etablir l'expression de l'onde réfléchie au niveau de l'embouchure  $P_r(x=L, t)$ .

4- Etablir (en la justifiant), l'expression de l'onde réfléchie  $P_r(x, t)$  en un point M de la trompette d'abscisse  $x$ .

5- Etablir alors l'expression de l'onde totale  $P_{\text{tot}}(x, t)$  en un point M de la trompette. Comment s'appelle une telle onde. En quoi se distingue-t-elle d'une onde progressive?

6- Définir la notion de ventres et de nœuds de pression. Calculer la distance entre 2 nœuds et la distance entre 2 ventres.

7- Les notes jouables à la trompette correspondent aux modes propres du tuyau sonore. Les conditions aux limites (tuyau fermé-ouvert) imposent un ventre de pression au niveau de l'embouchure ( $x=0$ ) et un nœud au niveau du pavillon ( $x=L$ ).

a- Donner la valeur de  $\phi_r$ .

b- En s'appuyant sur une représentation graphique de l'onde, établir l'expression des longueurs d'onde  $\lambda_n$  des modes propres. En déduire la fréquence fondamentale de la trompette et faire l'application numérique. Etablir l'expression des fréquences harmoniques.

## Exercice 2: particule chargée dans un champ magnétique (Enac 2016)

Choisir la réponse exacte à chaque question en la justifiant soigneusement.

Un électron (masse  $m_e \approx 10^{-30}$  kg) pénètre, avec un vecteur vitesse  $\mathbf{v}_0$ , dans une région où règnent un champ électrostatique  $\mathbf{E}$  et un champ magnétostatique  $\mathbf{B}$  uniformes, orthogonaux entre eux et à  $\mathbf{v}_0$ . Précisément, dans la base directe  $\{e_x, e_y, e_z\}$  du repère cartésien  $Oxyz$  ( $x$ ,  $y$  et  $z$  sont les coordonnées cartésiennes de l'électron):  $\mathbf{E} = E e_x$ ,  $\mathbf{B} = B e_y$  et  $\mathbf{v}_0 = v_0 e_z$ ,  $E$ ,  $B$ , et  $v_0$  étant positifs.

L'origine  $O$  du repère cartésien est prise à l'endroit où l'électron pénètre dans la région des champs. La norme  $v_0$  de sa vitesse est de  $1\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Dans tout l'exercice,  $e \approx 2 \times 10^{-19} \text{ C}$  désigne la charge électrique élémentaire.

25. On considère dans un premier temps que  $B = 0$ , de sorte que l'électron n'est soumis qu'au champ électrique  $\mathbf{E}$ . Quelle est l'équation vectorielle du mouvement? Dans les propositions ci-dessous,  $\mathbf{a}$  est le vecteur accélération.

A)  $\mathbf{a} = \frac{e\mathbf{E}}{m_e}$       B)  $\mathbf{a} = \frac{\mathbf{E}}{em_e}$       C)  $\mathbf{a} = -em_e \mathbf{E}$       D)  $\mathbf{a} = -\frac{e\mathbf{E}}{m_e}$

26. Quelles sont la nature et l'équation de la trajectoire de l'électron?

A) La trajectoire est une portion de parabole d'équation  $\frac{eE}{m_e} \left(\frac{z}{v_0}\right)^2$   
 B) La trajectoire est une portion de droite d'équation  $\frac{eE}{m_e} \frac{z}{v_0}$   
 C) La trajectoire est une portion de parabole d'équation  $\frac{-eE}{2m_e} \left(\frac{z}{v_0}\right)^2$   
 D) La trajectoire est une portion de droite d'équation  $\frac{-eE}{2m_e} \frac{z}{v_0}$

27. On place un écran d'observation parallèlement au plan  $Oxy$  en  $z_0 = 0,2 \text{ m}$ . Sachant que  $E = 10 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ , calculer l'abscisse  $x_e$  de l'impact de l'électron sur l'écran?

A)  $x_e \approx 4 \text{ mm}$       B)  $x_e \approx -4 \text{ mm}$       C)  $x_e \approx 4 \text{ cm}$       D)  $x_e \approx -4 \text{ cm}$

28. On considère maintenant  $E = 0$  et  $B \neq 0$ ; l'électron pénètre donc dans une zone où règne un champ magnétostatique uniforme. Donner l'expression de la force de Lorentz  $\mathbf{F}_L$  qui s'exerce sur l'électron au moment où il pénètre dans la région du champ.

A)  $\mathbf{F}_L = v_0 \mathbf{B}$       B)  $\mathbf{F}_L = -ev_0 \times \mathbf{B}$       C)  $\mathbf{F}_L = ev_0 \times \mathbf{B}$       D)  $\mathbf{F}_L = ev_0 \mathbf{B}$

29. Parmi les affirmations proposées ci-dessous, quelles sont celles qui sont exactes?

A) La trajectoire de l'électron est rectiligne de vecteur vitesse constant.  
 B) La trajectoire de l'électron est parabolique  
 C) La trajectoire de l'électron est circulaire de rayon  $R_c = \frac{m_e v_0}{eB}$   
 D) La trajectoire de l'électron est circulaire de rayon  $R_c = \frac{ev_0}{m_e B}$

30. On a maintenant  $E \neq 0$  et  $B \neq 0$ . Pour quel rapport  $E/B$  le mouvement de l'électron est-il rectiligne et uniforme?

A)  $E/B = v_0$       C)  $B/E = v_0$   
 B)  $E = B$       D) On ne peut pas déterminer le rapport demandé.

## Problème1: Filtrage (banque PT 2018)

Le diagramme de Bode demandé doit être tracé sur la feuille de papier semi-logarithmique fournie



Figure 1 – un thérémine

### Document 1 : description de l'instrument

Le thérémine est un boîtier électronique avec deux antennes qui produit de la musique sans que l'instrumentiste ne touche l'instrument. Une antenne verticale est dite antenne de tonalité ou pitch car on commande la hauteur de la note en faisant varier la distance de la main droite à l'antenne verticale. L'antenne horizontale en forme de boucle est utilisée pour faire varier l'intensité du son selon la position de la main gauche (figure 1). La sortie du son, proche de celui d'une scie musicale, se fait par un haut-parleur. Cet instrument exige de l'instrumentiste une grande précision des mouvements de ses mains et une quasi-immobilité du reste du corps : la note juste est difficile à atteindre. Les morceaux joués sont lents.

### Document 2 : caractéristiques des sons, hauteur et intensité

La hauteur d'un son est la fréquence du fondamental. Les harmoniques décroissants avec le rang participent au son global. L'oreille perçoit la hauteur même si le fondamental est quasi-inexistant ! Mais il y a un lien avec la durée aussi car l'oreille possède une constante de temps mécanique et la durée limite en dessous de laquelle le son est perçu comme un bruit est 5 ms. Le « la3 » ou La du diapason est un son de fréquence 440 Hz. Une octave correspond à la multiplication par 2 de la fréquence.

Le timbre est lié à la composition spectrale (présence, durée et importance des harmoniques) et même l'oreille la moins exercée distingue facilement le timbre d'un instrument.

#### Intensité sonore

On obtient des effets musicaux en jouant certaines notes de manière plus intense que d'autres. Le son est généralement restitué par un haut-parleur qui transforme un signal électrique en son. L'intensité du son est une fonction croissante de l'amplitude du signal électrique. Le thérémine s'appuie sur l'effet hétérodyne pour engendrer la fréquence audible.

### Document 3 : audibilité

L'oreille humaine moyenne est sensible aux sons dont la fréquence est dans le domaine [20 Hz, 20 kHz]. Le domaine audible correspond à 10 octaves ( $10^3 \sim 2^{10}$ ). Un son grave est un son de basse fréquence, un son aigu de haute fréquence.

## II.1 Contrôle de la tonalité du son émis par le thérémine

On donne  $\sin(a)\sin(b) = \frac{1}{2}[\cos(a-b) - \cos(a+b)]$ .

L'effet hétérodyne est l'exploitation de deux signaux  $s_1$  et  $s_2$  de fréquences  $f_1$  et  $f_2$  très élevées inaudibles, du domaine des radiofréquences et dont la différence produit une vibration de fréquence audible.

L'oscillateur électrique local crée le signal électrique de fréquence  $f_2$  stable et l'instrumentaliste engendre le signal électrique de fréquence  $f_1$ . Un "mélangeur" ou multiplieur crée la multiplication des deux signaux  $s = k \times s_1 \times s_2$  avec un coefficient réel  $k$ .

On pourra prendre des signaux du type  $s_0 \sin(\omega_i t) = s_0 \sin(2\pi f_i t)$ .

1.
  - a. On dispose de deux signaux harmoniques :  $s_1$  de fréquence  $f_1 = 80.440$  kHz et  $s_2$  de fréquence  $f_2 = 80.000$  kHz. Ces fréquences font-elles partie du domaine audible ?
  - b. On envoie ces signaux à l'entrée du multiplieur. Préciser quel est le spectre en fréquence du signal de sortie du multiplieur. Ces fréquences font-elles partie du domaine audible ?
2. Pourquoi faut-il placer un filtre en sortie du multiplieur ? Quelle doit être la nature de celui-ci ?
3. On suppose que le circuit oscillant local est un circuit série contenant une bobine idéale d'inductance  $L_0$  et un condensateur de capacité  $C_0$ .

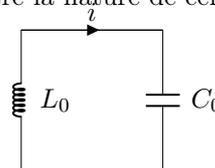


Figure 2 – circuit oscillant

- a. Établir l'équation différentielle à laquelle obéit la tension  $u_{C_0}(t)$  aux bornes du condensateur.
- b. Quelle est la forme mathématique générale de la solution  $u_{C_0}(t)$  ?
- c. En déduire la relation qui lie la fréquence propre du circuit, notée  $f_2$ , aux grandeurs  $L_0$  et  $C_0$ .
- d. Avant la mise en route de la machine, le circuit précédent est ouvert, le condensateur est chargée à la tension  $U_0$  et la bobine déchargée. Lors de la mise en route on ferme le circuit (à un instant  $t = 0$ ). Donner l'expression de  $u_{C_0}(t)$  qui correspond. On justifiera correctement les conditions initiales à  $t = 0^+$ .

4. Dans le schéma-bloc partiel d'un thérémine donné ci-dessous, retrouver les éléments qui correspondent à cet effet hétérodyne (situer le circuit oscillant de la figure 2, le multiplieur, le bloc qui fournit la fréquence  $f_1$ ) et indiquer où est le signal électrique qui comprend uniquement la fréquence "audible" désirée

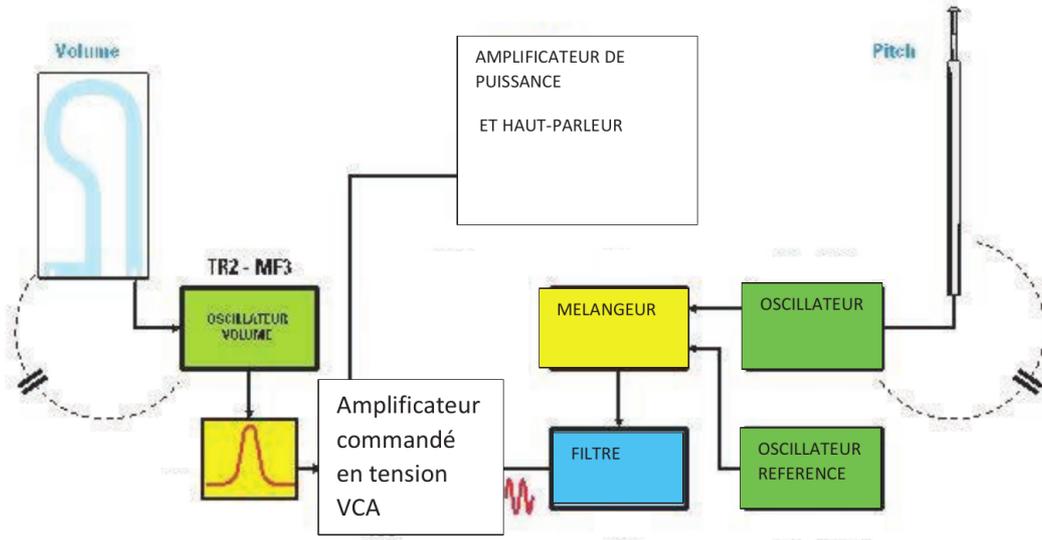


Figure 3 – schéma bloc d'un thérémine

5. L'antenne de tonalité (pitch) est reliée à un circuit oscillant ( $L_0, C_0$ ) identique à celui décrit figure 2. Le caractère conducteur du corps humain de l'instrumentiste fait que l'ensemble (antenne de tonalité (ou pitch) + main droite en face) revient à placer un condensateur de capacité  $C_{h1}$  (figures 3, 4 et 5) en parallèle sur le condensateur de capacité  $C_0$ . De même l'antenne de volume introduit une capacité en parallèle sur son circuit électrique  $C_{h2}$  (figures 3, 4 et 5).

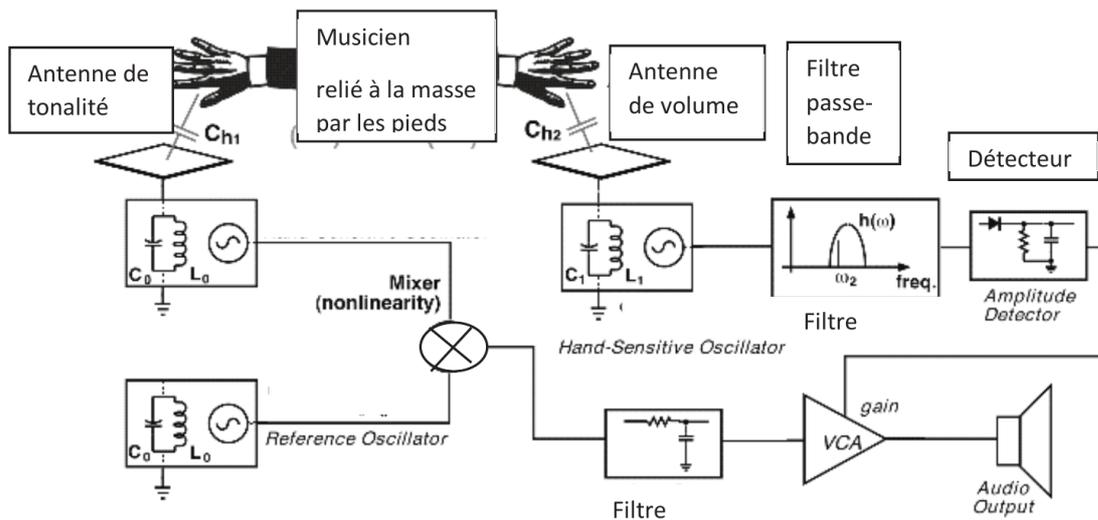


Figure 4 – schéma bloc d'un thérémine

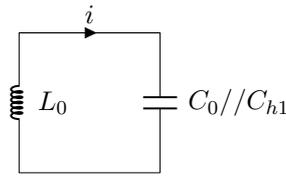


Figure 5 – circuit oscillant de l’antenne de tonalité.

- a. Déterminer la fréquence  $f_1$  du signal engendré en fonction de  $C_0$ ,  $L_0$  et  $C_{h1}$ .
  - b. Quel est le spectre de fréquence du signal  $u(t)$  qui sort du “multiplicateur” exprimé en fonction de  $L_0$ ,  $C_0$  et  $C_{h1}$ ? Comment choisir la fréquence de coupure du filtre qu’on applique à ce signal électrique  $u(t)$ ?
6. On s’intéresse au filtrage du signal  $u(t)$ . On dispose d’un conducteur ohmique de résistance  $R$  et d’un condensateur de capacité  $C$  dont le montage est celui du schéma de la figure 6.
- a. Établir la fonction de transfert  $T(jf)$ . Quelle est la nature du filtre?  
Rappeler la définition de la fréquence de coupure à -3 dB d’un tel filtre. Exprimer cette fréquence de coupure  $f_c$  en fonction de  $R$  et  $C$ .
  - b. On a une capacité  $C = 0.01 \mu\text{F}$ , quelle résistance proposez-vous de placer dans le circuit pour isoler la fréquence audible?
  - c. Donner l’expression du module et de l’argument de  $T(jf)$ .  
Tracer l’allure du diagramme de Bode en amplitude et en phase.

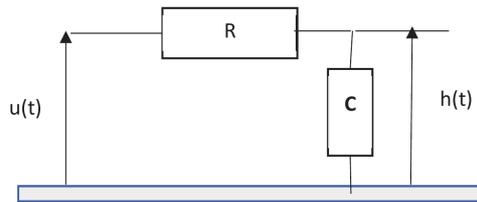


Figure 6 – montage  $R, C$

7. Pour déterminer le lien entre la capacité  $C_{h1}$  et la position de la main droite, on mesure sur un thérémine la fréquence  $f$  du signal  $h(t)$  de sortie du filtre en fonction de la distance  $x$  de la main droite à l’antenne en essayant de maintenir la même “forme” de la main. On obtient les valeurs du tableau 1 ci-contre :
- |           |    |    |     |     |     |     |      |
|-----------|----|----|-----|-----|-----|-----|------|
| $f$ en Hz | 40 | 55 | 110 | 220 | 440 | 880 | 1760 |
| $x$ en cm | 74 | 58 | 44  | 32  | 20  | 8   | 1    |

À quelle distance doit-on se placer pour obtenir un signal électrique  $h(t)$  de même fréquence que le “La3” ?

8. Le son qui sort du haut-parleur a la même fréquence que le signal  $h(t)$ . Rendra-t-on le son plus grave en rapprochant la main droite ou en l’éloignant de l’antenne? Combien d’octaves couvre ce thérémine? De combien doit-on avancer la main pour que la note se déplace d’une octave?

## II.2 Contrôle du volume ou intensité du son émis

L’antenne de volume est reliée à un circuit oscillant constitué d’un condensateur de capacité  $C_1$  et d’une bobine idéale d’inductance  $L_1$  (figures 3, 4). La main gauche de l’instrumentaliste, proche de l’antenne de volume, introduit un condensateur de capacité  $C_{h2}$  en parallèle sur  $C_1$  (figure 7). La valeur de la capacité  $C_{h2}$  dépend de la position de la main gauche.

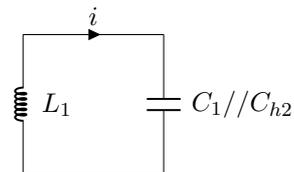
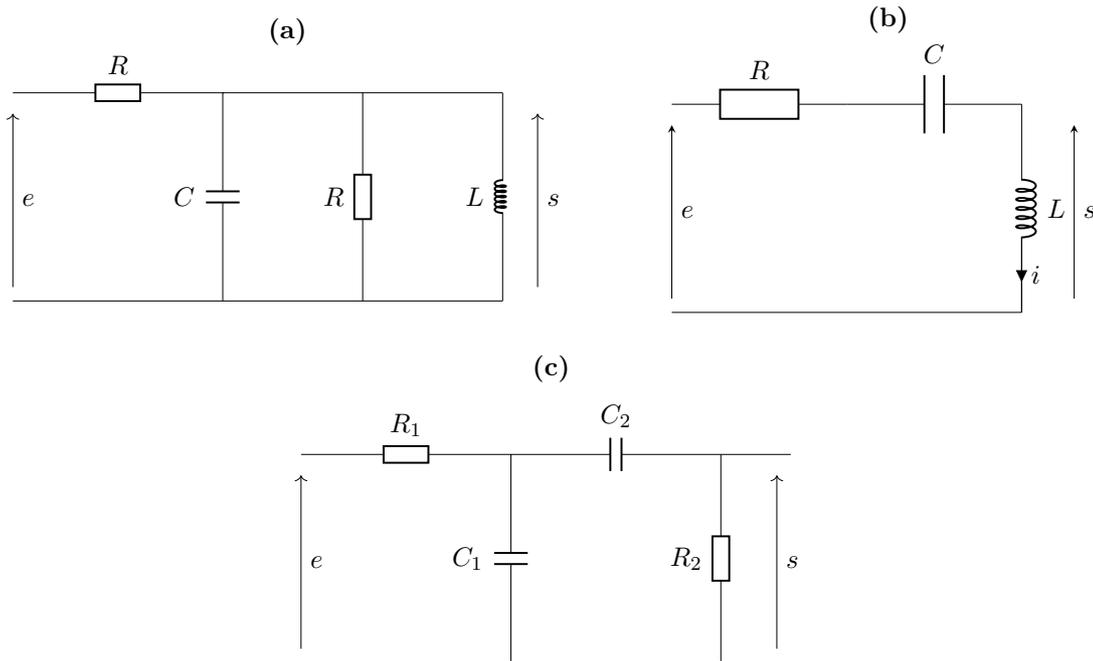


Figure 7 – circuit oscillant de l’antenne de volume.

Le signal provenant de l'antenne de volume  $v(t)$  doit subir un traitement pour pouvoir contrôler l'amplification du signal de tonalité  $h(t)$ . On convertit le signal  $v(t)$  en une tension continue  $S$  dont l'amplitude dépend de la fréquence  $f'$  de  $v(t)$ . On réalise ainsi un convertisseur fréquence→tension.

### II.2.1 Filtrage passe-bande

9. À partir du schéma bloc (figure 4), indiquer les étapes successives qui correspondent à la transformation décrite ci-dessus. Quelle est la fréquence  $f'$  du signal  $v(t)$  pour une position de la main gauche qui correspond à une capacité  $C_{h2}$  ?
10. On dispose des trois montages ci-dessous. Indiquer, en justifiant, le ou lesquelles réalisent un filtre passe-bande.



11. La fonction de transfert d'un filtre passe-bande du second ordre s'écrit sous la forme canonique suivante :

$$\underline{H}(jf) = \frac{H_0}{1 + jQ \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}. \quad (6)$$

Que représente  $H_0, Q$  et  $f_0$  ?

12. Dans le montage (a), on regroupe  $R, L$  et  $C$  en parallèle en une impédance équivalente  $\underline{Z}_{\text{eq}}$ . Donner l'expression de cette impédance.  
Montrer alors que la fonction de transfert du montage (a) est bien du type passe bande.  
Puis donner les valeurs des caractéristiques  $H_0, f_0$  et  $Q$  de ce montage en fonction de  $R, L$  et  $C$ .
13. On note  $v(t)$  le signal en entrée du filtre et  $u(t)$  celui en sortie. Ils sont sinusoïdaux de fréquence  $f'$ . On note  $v_m$  et  $u_m$  leurs amplitudes respectives. Quelle est la relation entre ces deux amplitudes en fonction de  $Q, H_0, f_0$  et  $f'$  ?

L'idée du fonctionnement est donc que si l'utilisateur bouge sa main, la capacité  $C_{h2}$  change, et donc également la fréquence du signal  $v(t)$  qui arrive à l'entrée du filtre passe-bande. L'amplitude du signal  $u(t)$  en sortie du filtre varie alors également (d'après la question 13).

## Problème 2: la mission spatiale Rosetta (Mines 2017)

Ce sujet propose de revenir sur l'exploit réalisé par l'Agence Spatiale Européenne lors de l'accomplissement de la mission Rosetta. Cette mission consistait à rejoindre la comète 67P Churyomov – Gerasimenko (rebaptisée Churry à cette occasion) sur son orbite à plusieurs centaines de millions de kilomètres de la Terre. Une fois sur place la sonde devait étudier l'environnement de Churry en se satellisant autour d'elle. Une fois ce premier exploit réalisé le 6 août 2014, la sonde Rosetta devait envoyer un robot, nommé Philæ, pour qu'il se pose sur la comète et réalise une étude in situ. Ce robot a réussi à se poser sur la comète le 12 novembre 2014, il a ensuite réalisé sa mission de façon quasi-nominale pendant 3 jours dans des conditions physiques extrêmes. Il a ensuite transmis les données recueillies vers Rosetta toujours en orbite autour de Churry. Rosetta les a ensuite envoyées vers la Terre où nous les avons reçues quelques dizaines de minutes plus tard.

La réalisation complète de cette mission aurait pu être présentée comme un exploit retentissant de la conquête spatiale, n'ayant rien à envier aux premiers pas de l'homme sur la Lune. Cependant, le fait que Philæ se soit posé de façon peu stable, le traitement médiatique de ce genre d'évènement, et bien d'autres facteurs plus complexes, n'ont pas permis de se rendre compte de l'incroyable performance scientifique réalisée à l'occasion de cette mission.

Ce sujet revient sur différents aspects de la problématique associée à cette mission. La première partie consiste en l'étude des propriétés orbitales de Churry, la seconde partie consiste en une étude de l'environnement des comètes du type de Churry et notamment de sa chevelure et de sa queue. La dernière partie est une étude technique de la motorisation de la foreuse de Philæ. Ces trois parties sont totalement indépendantes.

Les résultats numériques des calculs seront des ordres de grandeurs ne possédant au plus qu'un seul chiffre significatif. Les valeurs numériques utiles sont rassemblées en fin d'énoncé. Hormis le nombre  $j$  tel que  $j^2 = -1$ , les grandeurs complexes sont soulignées. Une quantité surmontée d'un point désigne la dérivée temporelle de cette quantité :  $\dot{r} = \frac{dr}{dt}$ .

### I. — Etude de la comète 67P Churyomov – Gerasimenko

La comète étudiée s'appelle Churyomov – Gerasimenko, du nom des scientifiques ukrainiens M. Churyumov, l'utilisateur du télescope, et Mme Gerasimenko, la comparatrice d'images, qui l'ont codécouverte en 1969. Cette comète mesure entre 3 et 5 km de diamètre et tourne sur elle-même en une douzaine d'heures. Voilà à peu près tout ce que l'on savait sur la comète objet de Rosetta et Philæ. Les estimations sur sa masse, varient, quant à elles, d'un facteur 10 et sa forme exacte restera un mystère jusqu'en juillet 2014 date de la première photo envoyée par Rosetta. Le noyau de la comète n'a pu être observé que depuis la Terre (le Very Large Telescope au Chili en lumière visible ou proche infrarouge) ou les satellites tournant autour de la Terre (Hubble en lumière visible, Spitzer en moyen infrarouge). De ces observations ont été tirées des courbes de lumière qui, elles-mêmes, ont permis de déterminer quelques unes de ses caractéristiques.

□ 1 — En appliquant le principe fondamental de la mécanique à une comète de masse  $m$  en orbite circulaire de rayon  $R$  autour du Soleil, retrouver la 3<sup>e</sup> loi de Kepler. Dans le cas d'une orbite elliptique, on peut démontrer que cette relation se généralise en remplaçant le rayon  $R$  par le demi grand axe  $a$  de l'ellipse (voir figure 1). En déduire la relation entre le demi-grand axe  $a$  de l'ellipse parcourue par la comète, la période  $T$  de la comète, la masse du Soleil  $M_\odot$  et la constante de gravitation  $G$ . Déterminer la valeur numérique de la période  $T_c$  de la comète Churry. On donne  $2\pi a_c = 33 \cdot 10^{11}$  SI et on prendra  $1 \text{ an} \simeq \frac{1}{3} \cdot 10^8$  secondes.

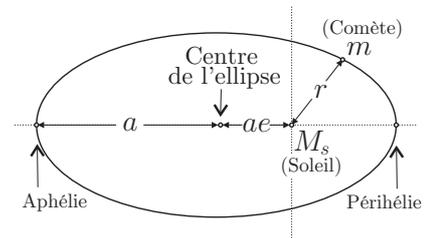


FIGURE 1 — Orbite elliptique d'excentricité  $e$  et de demi-grand axe  $a$ .

□ 2 — On ne suppose plus la trajectoire circulaire, et on note  $\vec{r}$  le vecteur position de la comète dans le référentiel héliocentrique et  $r = \|\vec{r}\|$ . Donner l'expression du moment cinétique  $\vec{\sigma}_s$  de la comète par rapport au Soleil. Montrer que la trajectoire de la comète est contenue dans un plan que l'on précisera. Déterminer l'expression de  $C = \frac{\|\vec{\sigma}_s\|}{m}$  en fonction des coordonnées polaires  $(r, \theta)$  de la comète dans ce plan.

□ **3** — Etablir la relation  $\frac{1}{2}m\dot{r}^2 = E_m - E_{\text{eff}}(r)$  où  $E_m$  est l'énergie mécanique supposée négative de la comète et  $E_{\text{eff}}(r)$  son énergie potentielle effective que l'on exprimera en fonction de  $C$ ,  $G$ ,  $m$ ,  $M_\odot$  et  $r$ . Tracer la représentation graphique de  $E_{\text{eff}}(r)$ , et positionner sur ce graphique  $E_m$ , l'aphélie  $r_{\text{max}}$  et le périhélie  $r_{\text{min}}$  (voir figure 1).

□ **4** — Montrer qu'il existe une trajectoire circulaire correspondant à  $r = r_{\text{min}} = r_{\text{max}} = r_0$  et  $E_m = E_0$ . Déterminer l'expression de  $r_0$  en fonction de  $C$ ,  $G$  et  $M_\odot$  puis en déduire celle de  $E_0$  en fonction de  $C$ ,  $G$ ,  $M_\odot$  et  $m$ . On note respectivement  $E_c(r)$  et  $E_p(r)$  les énergies cinétique et potentielle de la comète à la distance  $r$  du Soleil, déterminer la relation entre  $E_c(r_0)$  et  $E_p(r_0)$ .

□ **5** — Etablir l'équation du second degré en  $r$  dont  $r_{\text{min}}$  et  $r_{\text{max}}$  sont solutions, qui permet de déduire l'expression de  $E_m$  en fonction de  $G$ ,  $m$ ,  $M_\odot$  et  $a$ . On donnera cette expression. Après avoir montré que son discriminant est bien positif, résoudre l'équation et déterminer la relation liant  $e$  à  $E_m$ ,  $C$ ,  $a$  et  $m$ .

□ **6** — Quelle est la propriété de la vitesse aréolaire de la comète, rapport de la surface balayée par le rayon vecteur de la comète sur le temps mis par la parcourir ? Quel est l'astronome qui a identifié cette propriété qui porte son nom ? Sachant que l'aire d'une ellipse d'excentricité  $e$  et de demi-grand axe  $a$  est  $S = \pi a^2 \sqrt{1 - e^2}$ , déterminer la relation entre la période de la comète et le demi-grand axe de l'ellipse. Commenter le résultat obtenu.

#### Données numériques

- Constante de la gravitation :  $G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
- Vitesse de la lumière :  $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .
- Masse du Soleil :  $M_\odot = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ .
- Luminosité du Soleil :  $L_\odot = 4 \times 10^{26} \text{ W}$
- Unité astronomique :  $1 \text{ ua} = 1,5 \times 10^{11} \text{ m}$

#### Caractéristiques de la comète Churry

- $r_{\text{max}}$  : aphélie, distance au plus loin du Soleil : 5,70 ua
- $r_{\text{min}}$  : périhélie, distance au plus près du Soleil : 1,30 ua
- Taille caractéristique : 2000 m (albédo de 4%)
- Période de rotation autour de son axe principal : 12,6 h