

SESSION 2009

---

**CONCOURS INTERNE  
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS AGRÉGÉS  
ET CONCOURS D'ACCÈS A L'ÉCHELLE DE RÉMUNÉRATION**

**Section : SCIENCES PHYSIQUES  
Option : PHYSIQUE ET CHIMIE**

**COMPOSITION SUR LA PHYSIQUE  
ET LE TRAITEMENT AUTOMATISÉ DE L'INFORMATION**

Durée : 5 heures

---

*Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.*

*De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.**

**Tournez la page S.V.P.**

## Quelques applications potentielles des nanotubes de carbone

### Introduction

Découverts en 1991, les nanotubes de carbone sont des macromolécules aux propriétés électriques et mécaniques exceptionnelles : plus légers et plus rigides que l'acier, ils conduisent mieux le courant électrique que le cuivre et peuvent être métalliques ou semiconducteurs selon leur arrangement microscopique. Le diamètre de ces molécules cylindriques en forme de tube est de l'ordre du nanomètre tandis que leur longueur peut dépasser le millimètre.

Ce problème, centré sur plusieurs applications potentielles des nanotubes de carbone, est composé de 5 parties totalement indépendantes les unes des autres et qui peuvent être abordées dans n'importe quel ordre.

La partie A est une partie pédagogique qui traite de l'enseignement de l'astronomie au lycée.

La partie B, très largement futuriste, concerne la réalisation d'un ascenseur spatial qui relierait la Terre à un satellite géostationnaire.

La partie C, elle aussi pédagogique, est consacrée à l'étude des dipôles  $RC$ .

La partie D, inspirée d'expériences récentes, s'intéresse aux performances d'un transistor réalisé avec un nanotube de carbone unique.

La partie E, elle aussi basée sur des résultats expérimentaux récents, aborde le problème du transport de liquide dans le conduit formé par un nanotube de carbone.

On donne :

- la constante de gravitation  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
- l'unité astronomique :  $1 \text{ u.a.} = 1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}$
- le rayon de la Terre  $R_T = 6370 \text{ km}$
- la masse de la Terre  $M_T = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
- la valeur absolue de la charge de l'électron  $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- la permittivité diélectrique du vide  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
- la viscosité de l'eau  $\eta = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- le nombre d'Avogadro  $\mathfrak{N} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

L'usage de la calculatrice est autorisé.

## Partie A

### Astronomie au lycée

1. Copernic, Galilée, Képler, Newton, Ptolémée et Tycho Brahé ont chacun contribué à l'évolution de l'astronomie.
  - (a) Ordonner chronologiquement ces astronomes.
  - (b) Indiquer le siècle des travaux de chacun d'entre eux.
  - (c) Quels sont les apports de Copernic, Galilée et Newton ?
  - (d) L'Union Astronomique Internationale (U.A.I) a tenu sa 26<sup>ème</sup> assemblée générale à Prague en août 2006. Lors de cette réunion, une décision importante a été prise. Quelle est cette décision ? Quelles conséquences a cette décision sur la représentation du système solaire ?
2. Le 8 juin 2004, il était possible d'assister au *transit de Vénus*. Qu'appelle-t-on le transit de Vénus et quelle grandeur a-t-il été possible de calculer à partir des observations faites ce jour-là ?
3. La Lune : satellite de la Terre.
  - (a) Les premières estimations de la distance Terre-Lune ont été obtenues à partir de mesures faites lors d'éclipses de Lune. Nous disposons actuellement d'une méthode beaucoup plus précise.
    - Connaissez-vous cette méthode ?
    - Cette technique peut-elle servir de support d'enseignement en classe de seconde ? Si oui, en rapport avec quelle partie du programme ? (Des extraits des programmes officiels de la classe de seconde sont disponibles en annexe A)
    - Comment sensibiliser les élèves à l'importance de la précision de la mesure à partir d'une telle expérience ?
  - (b) Les programmes officiels de la classe de seconde demandent d'interpréter le mouvement de la Lune par extrapolation du mouvement d'un projectile (voir les extraits du programme donnés dans l'annexe A).
    - Quel type d'activité proposeriez-vous aux élèves pour atteindre cet objectif ? (on ne demande pas une description détaillée de l'activité)
    - Quel bilan attendez-vous de la part de l'élève à la suite de cette activité ? (4 à 5 lignes maximum)

#### 4. Astronomie en terminale S.

Le tableau ci-dessous présente quelques données concernant le système solaire :

Astre	Masse relative à celle de la Terre	Rayon de l'astre (en km)	Rayon moyen de l'orbite (en u.a.)	Période de rotation propre (en jour)	Période de révolution (en jour)
Mercure	0,0553	2439	0,387	58,6	87,96
Vénus	0,815	6051	0,723	243	224,7
Terre	1,00	6378	1,00	0,997	365,25
Mars	0,107	3402	1,52	1,03	686,9
Jupiter	318	71492	5,20	0,413	4335
Saturne	95,1	60268	9,54	0,444	10757
Uranus	14,5	25656	19,2	0,718	30708
Neptune	17,1	24961	30,1	0,671	60224
Lune	0,0123	1737	$2,56 \cdot 10^{-3}$	27,3	27,3

Proposer l'organisation d'une séquence de cours qui s'appuie sur ce tableau de valeurs (des extraits du programme officiel de la classe de terminale S sont disponibles en annexe B).

Vous prendrez soin de :

**Tournez la page S.V.P.**

- préciser les éléments supposés acquis par les élèves avant le début de cette séquence
- préciser les contenus, connaissances et savoir-faire exigibles développés
- préciser le plan de la séquence et le travail demandé aux élèves
- faire explicitement les calculs de la masse du Soleil et de la masse de la Terre.

---

## Partie B

### Réalisation d'un ascenseur spatial

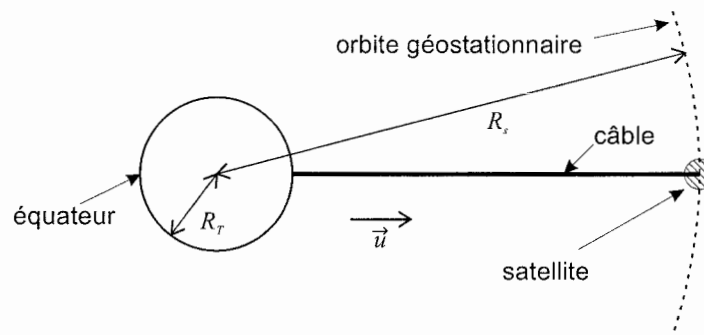
On étudie ici la possibilité de construire un câble rigide pour relier la Terre à un satellite géostationnaire. On s'intéresse essentiellement à la tension d'un tel câble et aux matériaux susceptibles de la supporter.

#### 1 Satellite géostationnaire

1. Rappeler ce qu'est un satellite géostationnaire. Quelle est son orbite? Quel type de satellite trouve-t-on sur cette orbite?
2. Appliquer le principe fondamental de la dynamique au satellite en précisant le référentiel d'étude. En déduire le rayon  $R_s$  de l'orbite géostationnaire en fonction de la constante de gravitation  $G$ , de la masse de la Terre  $M_T$  et de la pulsation  $\omega_T$  du mouvement de rotation propre de la Terre.
3. Le tableau de la question A.4 donne la période de rotation propre de la Terre  $T_T$ . Expliquer pourquoi  $T_T$  n'est pas strictement égale à 1 jour. Exprimer  $T_T$  en fonction de la durée du jour  $T_J$  et de la période de révolution de la Terre  $T_A$ .
4. *Application numérique* : Evaluer  $R_s$ .
5. Comment aurait-on pu retrouver simplement la valeur numérique de  $R_s$  à partir des données du tableau de la question A.4?

#### 2 Câble de section constante

On imagine qu'un câble de section constante  $S$ , réalisé dans un matériau de masse volumique  $\rho$ , relie la Terre à un satellite géostationnaire. Le câble est ancré à la Terre en un point de l'équateur situé à la verticale du satellite.



- Figure 1 -

Un point du câble est repéré par sa distance  $r$  au centre de la Terre. La tension du câble en  $r$ , notée  $\vec{T}(r)$ , est la force qu'exerce en  $r$  la partie supérieure du câble ( $r' > r$ ) sur la partie inférieure ( $r' \leq r$ ).

On pose ici  $\vec{T}(r) = T(r)\vec{u}$ , où  $\vec{u}$  est le vecteur unitaire pointant de la Terre vers le satellite dans la direction du câble (voir figure 1). On note  $g_0 = GM_T/R_T^2$  la valeur du champ de gravitation à la surface de la Terre.

On se place dans le référentiel terrestre.

1. Donner l'expression de la force d'inertie d'entraînement qui s'exerce sur un élément du câble, de masse  $dm$  et compris entre  $r$  et  $r + dr$ .
2. Ecrire la condition d'équilibre de cet élément. Montrer qu'elle peut s'écrire :

$$T(r + dr) - T(r) - dP(r) = 0$$

où

$$dP(r) = \rho S g_0 R_T^2 \left( \frac{1}{r^2} - \frac{r}{R_s^3} \right) dr$$

Quelle est la signification physique de  $dP(r)$  ? Que vaut  $dP(r)$  pour  $r = R_s$  ? Commenter.

3. Au niveau du satellite, l'extrémité du câble est supposée libre. En déduire  $T(R_s)$ . En utilisant cette condition aux limites, donner l'expression de  $T(r)$ .
4. Montrer que  $T(r = R_T)$  est le poids apparent du câble dans le référentiel terrestre. On note  $P_0$  le poids qu'aurait le câble s'il se trouvait entièrement dans le champ de pesanteur  $g_0$ . Montrer que :

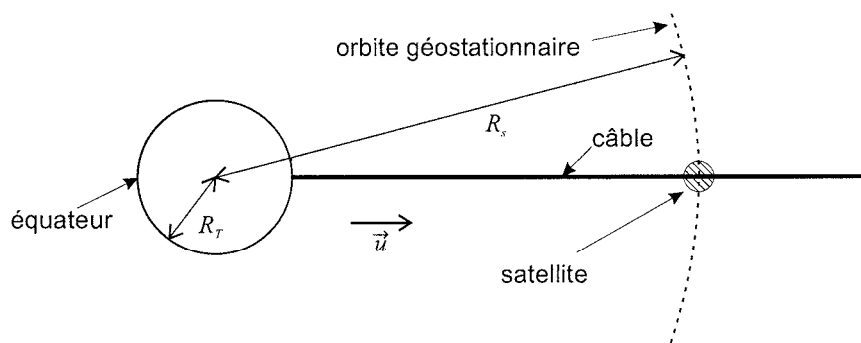
$$|T(r = R_T)| = P_0 \times \frac{x}{1-x} \left( 1 + \frac{x^3}{2} - \frac{3x}{2} \right)$$

où

$$x = \frac{R_T}{R_s}$$

*Application numérique* : Evaluer le rapport  $|T(r = R_T)| / P_0$ . Commenter.

5. Représenter graphiquement  $T(r)$  en fonction de  $r$ . Le câble est-il en tension ou en compression ? Quel est le risque lié à une telle situation ?
6. Pour remédier au problème soulevé à la question précédente, on envisage un câble qui dépasse l'orbite géostationnaire (i.e. dont la longueur est supérieure à  $R_s - R_T$ , voir figure 2). Comment est dirigé le poids apparent d'un élément de longueur du câble situé à  $r > R_s$  ?



- Figure 2 -

7. En reprenant la question 2.3 et le début de la question 2.4, montrer que si le câble dépasse une certaine distance  $R_0$ , il est en tension pour toute distance  $r$ . Quel est alors le poids apparent total du câble ?

Montrer que  $R_0$  est solution de l'équation :

$$1 + \frac{R_0^3}{2R_s^3} - \frac{R_0}{R_T} - \frac{R_0 R_T^2}{2R_s^3} = 0$$

Montrer que :

$$R_0 \simeq \sqrt{\frac{2R_s^3}{R_T}}$$

*Application numérique* : Evaluer  $R_0$ .

8. Représenter graphiquement  $T(r)$  en fonction de  $r$  pour un câble de longueur  $R_0 - R_T$ . A quelle distance, le maximum  $T_{max}$  de  $T(r)$  est-il atteint ? Donner l'expression de  $T_{max}$ .

### 3 Câble de section variable

On envisage ici un câble de section variable  $S(r)$  de longueur supérieure à  $R_0 - R_T$  (i.e.  $T(r) > 0$  pour tout  $r$ ). On définit la contrainte  $\sigma(r)$  du câble au point  $r$  par :

$$\sigma(r) = \frac{T(r)}{S(r)}$$

Pour un matériau donné, la contrainte ne doit pas excéder une valeur critique  $\sigma_c$  sous peine d'entraîner des déformations irréversibles conduisant éventuellement à sa rupture.

1. Montrer que pour optimiser la masse du câble, on doit faire varier sa section de façon à avoir, pour tout  $r$ ,  $\sigma(r) = \sigma_c$ . Dans toute la suite, on suppose cette condition réalisée.
2. En utilisant le résultat de la question 2.2, montrer que  $S(r)$  satisfait l'équation différentielle :

$$\frac{dS}{S(r)} = \frac{R_T^2}{h} \left[ \frac{1}{r^2} - \frac{r}{R_s^3} \right] dr$$

où

$$h = \frac{\sigma_c}{\rho g_0}$$

Quelle est la dimension de  $h$  ?

3. En intégrant l'équation ci-dessus, montrer que :

$$S(r) = S_s e^{\frac{3R_T^2}{2hR_s}} e^{(-\frac{R_T}{h})(\frac{R_T}{r} + \frac{R_T r^2}{2R_s^3})}$$

où  $S_s$  est la section du câble sur l'orbite géostationnaire.

Représenter schématiquement la dépendance de  $S(r)$  avec  $r$ .

4. En déduire le rapport d'aspect du câble :

$$\frac{S_s}{S_T} = e^{0,775 \frac{R_T}{h}}$$

où  $S_T$  est la section du câble à la surface de la Terre.

Représenter  $S_s/S_T$  en fonction de  $h$  pour  $h$  compris entre 50 km et 10000 km.

Comment varie la tension  $T(r)$  ?

### 4 Choix du matériau

Le tableau suivant donne  $\rho$  et  $\sigma_c$  pour quelques matériaux dont les nanotubes de carbone. Il donne également le module d'Young  $E$  de ces matériaux défini par :

$$\sigma = E \frac{\delta l}{l}$$

où  $\delta l/l$  est l'allongement relatif du matériau sous la contrainte  $\sigma$ .

Matériau	Acier	Kevlar	Nanotubes
$\rho(\text{kg.m}^{-3})$	7800	1450	1300
$\sigma_c(\times 10^9 \text{ N.m}^{-2})$	1	3,5	100
$\mathbf{E}(\times 10^9 \text{ N.m}^{-2})$	200	30	1000

1. Calculer  $h$  pour chacun des matériaux mentionnés.
2. Discuter les valeurs obtenues en utilisant les résultats de la question 3.4.
3. Quel est l'allongement relatif du câble sous contrainte critique  $\sigma_c$  pour les différents matériaux ? Commenter.
4. On cherche à lever le long du câble une masse de 10 tonnes. On se donne comme critère de fonctionnement de l'ascenseur que le poids de cette masse au niveau de la Terre ne doit pas excéder  $T(R_T)/10$ . Evaluer  $S(R_T)$  et  $S(R_s)$  pour les différents matériaux du tableau. Commenter.

---

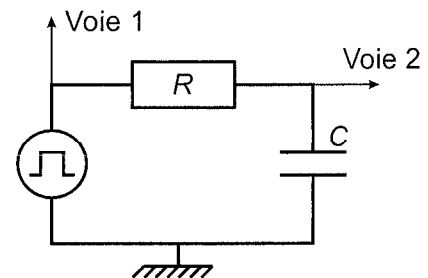
## Partie C

### Electricité : le dipôle $RC$

Le programme de la classe de terminale S aborde l'étude des dipôles  $RC$ . Les extraits du programme qui correspondent à cette étude sont donnés dans l'annexe B.

1. Proposer une séance de travaux pratiques **introductive** aux dipôles  $RC$ . On supposera que la partie 1.1 intitulée *Le condensateur* a déjà été traitée. Vous prendrez soin de préciser :
  - les objectifs en termes de savoir acquis
  - les compétences travaillées au cours de cette séance
  - l'organisation de la séance de travaux pratiques et le travail demandé aux élèves.

2. Lors de l'étude à l'oscilloscope de la réponse à un échelon de tension (voir figure 3), il faut veiller au choix de la valeur des composants pour obtenir expérimentalement une visualisation pertinente de la tension crête et de la réponse aux bornes de  $C$ .



- Figure 3 -

- (a) Comment choisir la fréquence du générateur basse fréquence ?
- (b) Quel est le schéma équivalent de l'entrée d'un oscilloscope à cette fréquence ?
- (c) Que se passe-t-il si la valeur de la résistance du circuit est très élevée ?
- (d) Donner l'ordre de grandeur de la valeur limite  $R_{max}$  de cette résistance ?
- (e) Quel est le schéma équivalent d'un générateur basse fréquence ?
- (f) Que se passe-t-il si la valeur de la résistance du circuit est très faible ? Donner l'ordre de grandeur de la valeur limite  $R_{min}$  ?
- (g) L'étude expérimentale peut aussi se faire à l'aide d'un système informatique d'acquisition de données. Quels sont les réglages à effectuer pour avoir une acquisition convenable de la tension aux bornes du condensateur en réponse à un échelon de tension d'amplitude  $E$ . Préciser les valeurs numériques pour  $E = 6 \text{ V}$ ,  $R = 10 \text{ k}\Omega$  et  $C = 10 \text{ nF}$ .

3. Au cours de la deuxième période de la classe de PCSI, on étudie le régime sinusoïdal forcé des circuits  $RC$ .
- (a) Quelle méthode donner aux élèves pour qu'ils puissent déterminer qualitativement la nature du filtre avant de commencer le calcul de la fonction de transfert ?
  - (b) Déterminer l'expression de la fonction de transfert du circuit série  $RC$ , la tension de sortie étant prise aux bornes de  $C$ .
  - (c) Tracer le diagramme de Bode du circuit précédent. On se limitera au tracé du gain. Quelle est la nature de ce filtre ? Donner ses caractéristiques.
  - (d) Tracer pour ce même circuit, la tension aux bornes de  $C$  en réponse à un échelon de tension. Comment montrer aux élèves que cette réponse permet de retrouver la nature du filtre ?

---

## Partie D

### Transistor à effet de champ à nanotube de carbone unique

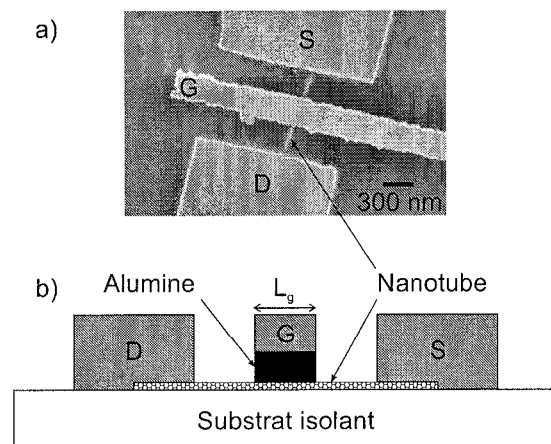
Grâce aux progrès récents des nano-technologies, on sait réaliser depuis quelques années des transistors fonctionnant avec un nanotube de carbone unique. Un tel composant est constitué d'un nanotube de carbone déposé sur une surface isolante et en contact à ses deux extrémités avec deux électrodes métalliques (appelées *drain* et *source* et notées respectivement D et S). Le potentiel appliqué sur une troisième électrode, appelée *grille* et notée G, permet, grâce à un effet de champ non décrit ici, de contrôler le courant électrique circulant dans le nanotube (entre le drain et la source). Dans la configuration étudiée ici, la grille est posée au-dessus du nanotube, séparée de celui-ci par une fine couche isolante d'alumine (voir figure 4.b).

L'objet de cette partie est l'étude électronique d'un tel transistor et de ses applications à la détection de charge ultra-rapide.

#### Transistor à nanotube unique (NTFET)

a) Image obtenue par microscopie électronique. L'échelle est indiquée sur la figure.

b) Schéma d'une vue en coupe. Le dessin n'est pas à l'échelle. Les électrodes sont reliées aux instruments de mesure par un dispositif non représenté.



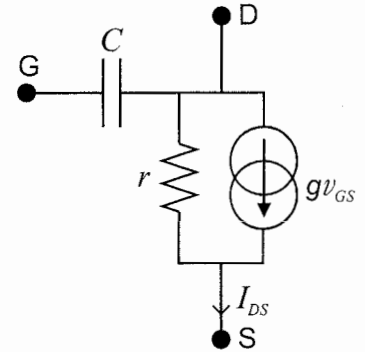
- Figure 4 -



Lors de son utilisation, le transistor est polarisé par des tensions continues de sorte que son schéma équivalent pour les petits signaux alternatifs est celui représenté sur la figure 5. Le générateur de courant est commandé par la tension entre grille et source.  $C$  est la capacité du condensateur formé par la grille, le nanotube et la couche d'alumine.  $r$  et  $g$  sont respectivement la résistance différentielle du nanotube (entre le drain et la source) et la transconductance du transistor définies par :

$$r = \left( \frac{dV_{DS}}{dI_{DS}} \right)_{V_{GS}} \quad \text{et} \quad g = \left( \frac{dI_{DS}}{dV_{GS}} \right)_{V_{DS}}$$

où  $V_{GS} = V_G - V_S$  et  $V_{DS} = V_D - V_S$ ,  $V_G$ ,  $V_D$ ,  $V_S$  étant respectivement les potentiels continus de la grille, du drain et de la source.  $I_{DS}$  est le courant continu circulant dans le nanotube.  $v_{GS}$  est la différence de potentiel alternative appliquée entre drain et source.  $g$ , exprimée en siemens ( $1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1}$ ), est le paramètre essentiel du transistor. C'est lui qui caractérise la variation du courant dans le nanotube lorsqu'on change la tension grille, à tension drain-source constante.



- Figure 5 -

## 1 Ordres de grandeur

### 1.1 Estimation de la capacité $C$

Pour évaluer simplement un ordre de grandeur de la capacité  $C$  formée par la grille, le nanotube et la couche d'alumine, on modélise l'ensemble par un condensateur cylindrique constitué de deux armatures coaxiales conductrices séparées par un diélectrique de permittivité relative  $\epsilon_r$ . Dans ce modèle, l'armature interne de rayon  $R_{NT}$  est le nanotube. Elle est séparée de l'armature externe (la grille) par une couche d'alumine d'épaisseur  $e$ . On suppose le condensateur infiniment long.

On applique une différence de potentiel  $V$  entre les deux armatures.

1. Quelle est la géométrie du champ électrique à l'intérieur du condensateur ? Représenter graphiquement les lignes de champ électrique.
2. En utilisant le théorème de Gauss, donner l'expression du champ électrique à une distance  $r$  de l'axe du condensateur en fonction de la charge par unité de longueur de l'armature interne, notée  $q_l$ .
3. Relier la tension  $V$  aux bornes du condensateur à la charge linéique  $q_l$ .
4. En déduire que la capacité par unité de longueur de l'ensemble nanotube-alumine-grille est :

$$C_l = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{R_{NT}+e}{R_{NT}}\right)}$$

5. *Application numérique* : En prenant  $\epsilon_r = 9,8$ ,  $R_{NT} = 0,5 \text{ nm}$  et  $e = 10 \text{ nm}$ , donner la valeur de  $C_l$  en attoFarad ( $10^{-18} \text{ F}$ ) par micromètre. En déduire un ordre de grandeur de  $C$  pour une longueur de grille  $L_G = 100 \text{ nm}$  (voir figure 4).

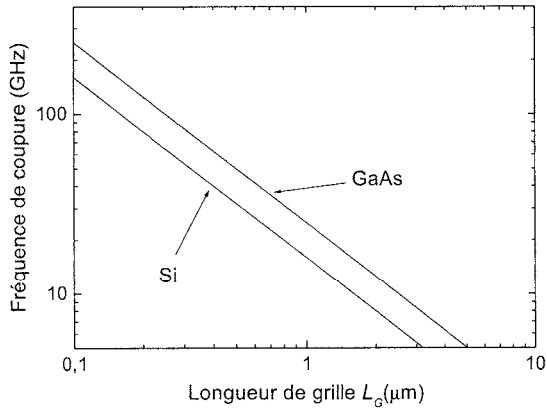
Dans la suite, on utilisera la valeur plus réaliste  $C_l = 50 \text{ aF} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ .

### 1.2 Fréquences caractéristiques

1. En utilisant le schéma équivalent au transistor présenté figure 5, montrer par analyse dimensionnelle que le NTFET possède deux fréquences caractéristiques :

$$\nu_1 = \frac{1}{2\pi r C} \quad \text{et} \quad \nu_2 = \frac{g}{2\pi C}$$

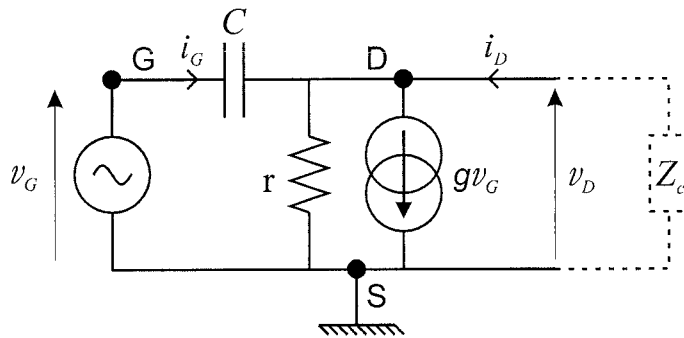
2. Evaluer  $\nu_1$  et  $\nu_2$  pour un transistor dont la longueur de grille est  $L_G = 100$  nm pour les valeurs typiques  $r = 100$  k $\Omega$ ,  $g = 20$   $\mu$ S,  $C_l = 50$  aF. $\mu$ m $^{-1}$ . Comment les fréquences  $\nu_1$  et  $\nu_2$  dépendent-elles de la longueur de grille  $L_G$  ?
3. On admet pour l'instant que la fréquence  $\nu_2$  définit la fréquence maximale de fonctionnement du transistor. En utilisant la figure 6, comparer la fréquence maximale de fonctionnement d'un NTFET à celle des transistors à effet de champ usuels à base de Silicium (ceux de vos ordinateurs) ou d'Arsénure de Gallium (ceux de vos téléphones portables).



- Figure 6 - Fréquence maximale d'utilisation des transistors à effet de champ usuels

## 2 Amplificateur à nanotube unique

Pour étudier un amplificateur à nanotube unique, on applique en plus des tensions de polarisation une tension alternative  $v_G$  de pulsation  $\omega$  (on notera  $\nu$  la fréquence correspondante) sur la grille du transistor. On mesure la tension alternative  $v_D$  entre drain et source et le courant  $i_D$  qui circule dans une charge d'impédance  $Z_c$  branchée entre drain et source. Le schéma équivalent de ce montage pour les petits signaux alternatifs est présenté figure 7.



- Figure 7 -

**Notations :** On note  $\tilde{a}$  l'amplitude complexe d'une grandeur alternative  $a$  de pulsation  $\omega$ , de sorte que la représentation complexe de  $a$  est  $\tilde{a} e^{j\omega t}$  où  $j$  désigne le nombre complexe de partie imaginaire positive tel que  $j^2 = -1$ .

## 2.1 Gain en tension

On s'intéresse d'abord au gain en tension  $G_V$  de l'amplificateur en l'absence de charge  $Z_c$  ( $Z_c = \infty$ ) :

$$G_V = \left( \frac{\tilde{v}_D}{\tilde{v}_G} \right)_{\tilde{i}_D=0}$$

1. Exprimer  $G_V$  en fonction de  $r$ ,  $C$ ,  $g$  et  $\omega$ .
2. En utilisant les valeurs numériques fournies à la question 1.2.2, représenter  $|G_V|$  en fonction de  $\nu$  pour un transistor avec une longueur de grille  $L_G = 100$  nm. Préciser le rôle des fréquences caractéristiques  $\nu_1$  et  $\nu_2$  définies au 1.2.
3. Commenter les résultats obtenus.
4. Montrer que le gain en tension de l'amplificateur s'effondre si on branche une faible impédance  $Z_c$  entre drain et source. On discutera en particulier le cas où  $Z_c = 50 \Omega$  est l'impédance caractéristique des lignes qui relient un composant à un autre dans les circuits hyperfréquences.
5. Montrer qu'on peut résoudre le problème soulevé à la question précédente en connectant entre drain et source un grand nombre de tubes en parallèle.

## 2.2 Gain en courant

On définit le gain en courant  $G_I$  par le rapport des courants  $i_D$  et  $i_G$  lorsqu'on court-circuite drain et source ( $Z_c = 0$ ) :

$$G_I = \left( \frac{\tilde{i}_D}{\tilde{i}_G} \right)_{\tilde{v}_D=0}$$

1. Exprimer  $G_I$  en fonction de  $C$ ,  $g$  et  $\omega$ .
2. En utilisant les valeurs numériques fournies à la question 1.2.2, représenter  $|G_I|$  en fonction de  $\nu$  pour un transistor avec une longueur de grille  $L_G = 100$  nm.
3. Commenter les résultats obtenus. Quelle est la fréquence maximale de fonctionnement de l'amplificateur ? Quelles sont ses applications possibles ?

## 3 Application à la détection de charge

Dans cette partie, on cherche à utiliser le NTFET comme électromètre rapide et sensible. Le transistor est polarisé en continu et on s'intéresse à la détection d'une petite variation de la charge électrique de la grille par la mesure de la variation correspondante du courant dans le nanotube.

1. On note  $N_\tau$  le nombre d'électrons qui traversent le nanotube (entre drain et source) pendant le temps  $\tau$ .  
Exprimer  $N_\tau$  en fonction de  $I_{DS}$ ,  $\tau$  et  $e$  en l'absence de perturbation sur la grille.
2. On impose une petite variation  $\delta q$  de la charge électrique de la grille. A l'aide du schéma de la figure 5, montrer que  $N_\tau$  varie de :

$$\delta N_\tau = \frac{g}{eC} \delta q \tau$$

En déduire que :

$$\frac{\delta N_\tau e}{\delta q} = 2\pi\nu_2\tau = \omega_2\tau$$

où  $\omega_2$  est la pulsation correspondant à la fréquence  $\nu_2$  introduite au 1.2.

*Application numérique :* On considère un NTFET pour lequel  $\nu_2 = 100$  GHz. Calculer  $\delta N_\tau$  pour une variation de la charge de la grille  $\delta q$  égale à la charge élémentaire  $e$  et un temps  $\tau = 1$  ns =  $10^{-9}$  s.

3. On cherche maintenant à comparer  $\delta N_\tau$  aux fluctuations de  $N_\tau$  associées au bruit du courant  $I_{DS}$ . On admet qu'à basse température, celui-ci est dominé par le bruit de grenaille dû au caractère corpusculaire des électrons. Dans ces conditions, les fluctuations de  $N_\tau$  sont égales à  $\Delta N_\tau = \sqrt{N_\tau}$ .

Exprimer le rapport  $\delta N_\tau / \Delta N_\tau$  en fonction de  $\omega_2$ ,  $\tau$ ,  $I_{DS}$ ,  $e$  et  $\delta q$ .

Montrer que si l'on se fixe un rapport signal sur bruit minimum de 1, la plus petite charge  $\delta q$  que l'on peut détecter en un temps  $\tau$  est :

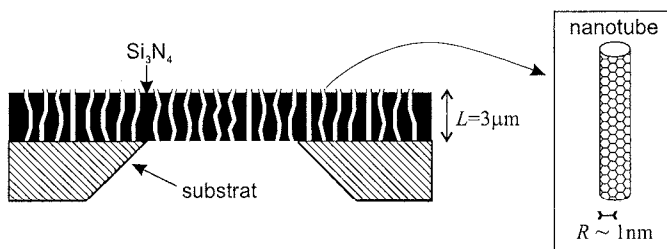
$$\delta q_{min} = e \frac{C}{g} \sqrt{\frac{I_{DS}}{e\tau}}$$

*Application numérique :* Evaluer  $\delta q_{min}/e$  pour  $\nu_2 = 100$  GHz,  $I_{DS} = 10 \mu\text{A}$  et  $\tau = 1$  ns. Commenter le résultat obtenu.

## Partie E

### Écoulement d'eau à travers un nanotube de carbone

Des expériences publiées récemment<sup>1</sup> ont permis la mesure de l'écoulement d'eau à travers une membrane poreuse de nitrure de silicium dont les pores sont des nanotubes de carbone alignés les uns avec les autres (voir figure 8). Le diamètre des nanotubes est compris entre 1,3 et 2 nm tandis que l'épaisseur de la membrane est  $3 \mu\text{m}$ . La densité surfacique de nanotubes est  $0,25 \text{ cm}^{-2}$ .



- Figure 8 -

On cherche ici à comparer les résultats de ces mesures à un modèle hydrodynamique simple.

## 1 Écoulement de Poiseuille

Pour modéliser le transfert de liquide à travers un nanotube de carbone, on considère l'écoulement, dit de Poiseuille, d'un fluide de masse volumique  $\rho$  et de viscosité  $\eta$  à travers un cylindre de rayon  $R$ . On s'intéresse à l'écoulement stationnaire induit par une différence de pression  $\Delta P$  sur une longueur  $L$  du tube. On utilise les coordonnées cylindriques  $r$ ,  $\theta$ ,  $z$  définies par la figure 9. L'origine ( $z = 0$ ) de l'axe des  $z$  est notée O. On note  $P(M)$  la pression au point  $M$  et on pose  $P(z = 0) - P(z = L) = \Delta P$ . On cherche le champ des vitesses du fluide sous la forme  $\vec{v}(M) = v(r)\vec{u}_z$ . On néglige les effets de la pesanteur.

<sup>1</sup>J.K. Holt et al., *Fast mass transport through Sub-2-Nanometer carbon nanotubes*, Science, **312**, 1034 (2006).

On rappelle l'expression de la divergence en coordonnées cylindriques :

$$\text{si } \vec{A} = A_r \vec{u}_r + A_\theta \vec{u}_\theta + A_z \vec{u}_z$$

$$\text{alors } \operatorname{div}(\vec{A}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

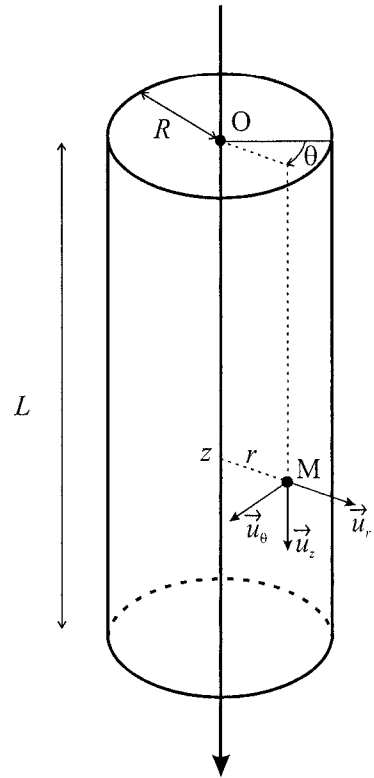
1. Ecrire l'équation locale traduisant la conservation de la masse.

Montrer que dans le cas où le fluide peut être considéré comme incompressible, elle se ramène à :

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0$$

Un champ de vitesse de la forme  $v(r) \vec{u}_z$  vérifie-t-il cette équation ?

A quelle condition peut-on considérer le fluide comme incompressible? Dans la suite, on supposera cette condition réalisée.

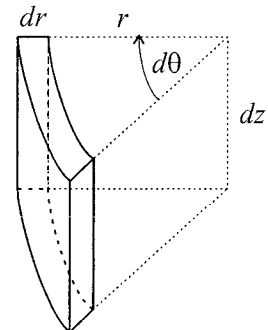


- Figure 9 -

On considère l'élément de fluide représenté figure 10. On rappelle que la force de viscosité exercée sur cet élément par le fluide situé entre 0 et  $r$  s'écrit :

$$d^2 \vec{F} = -\eta \frac{dv}{dr} r d\theta dz \vec{u}_z$$

2. Quelle est l'origine microscopique de la force de viscosité ?



- Figure 10 -

3. Calculer la résultante des forces de viscosité qui s'exercent sur l'élément de fluide de la figure 10 et montrer que la densité volumique de force de viscosité s'écrit :

$$\frac{\eta}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) \vec{u}_z$$

L'équation, dite de Navier-Stokes, qui régit le champ des vitesses du fluide en régime stationnaire et en géométrie cylindrique s'écrit :

$$\rho (\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}) \vec{v} = -\overrightarrow{\text{grad}} P + \frac{\eta}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) \vec{u}_z$$

4. Interpréter chacun des termes de cette équation.

5. Montrer que le terme  $\rho (\vec{v} \cdot \overrightarrow{grad}) \vec{v}$  est nul dans la géométrie considérée.  
 Déduire de l'équation de Navier-Stokes que  $P$  ne dépend que de  $z$  et montrer que le gradient de pression est indépendant de  $z$ . En déduire :

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\Delta P}{L}$$

Comment varie la pression dans le tube ?

6. En utilisant les conditions aux limites au centre et sur le bord du tube, montrer que :

$$v(r) = -\frac{\Delta P}{4\eta L}(r^2 - R^2)$$

Représenter schématiquement le profil de vitesse dans le tube.

Montrer que le débit volumique de l'écoulement est donné par :

$$D = \frac{\Delta P}{8\eta L}\pi R^4$$

Quelle est la vitesse moyenne  $\bar{v}$  d'une particule de fluide ?

7. En comparant les débits induits par un même gradient de pression dans un tube de rayon  $R$  et dans 100 tubes de rayon  $R/10$ , commenter la dépendance en  $R$  de  $D$ . Quelle est l'origine physique de ce comportement très différent de celui observé dans le transport du courant électrique par exemple ?
8. On se propose de retrouver rapidement les résultats précédents en faisant le bilan des forces qui s'exercent sur le système fermé constitué du fluide à l'intérieur d'un cylindre de rayon  $r < R$  à l'instant  $t$  et de la masse  $dm$  de fluide qui y pénètre entre  $t$  et  $t + dt$  (la figure 11 représente ce système à l'instant  $t$ ).

Représenter le système fermé considéré à l'instant  $t + dt$ .

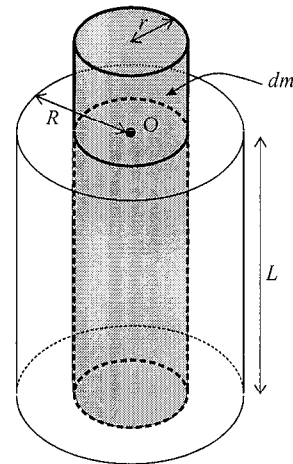
On note  $\vec{p}(t)$  la quantité de mouvement du système fermé à l'instant  $t$  et on suppose que la pression est uniforme sur une section droite du cylindre.

Montrer que  $\vec{p}(t) = \vec{p}(t + dt)$ .

Quelles sont les forces qui s'exercent sur le système fermé considéré entre  $t$  et  $t + dt$  ?

Montrer que l'application du théorème de la résultante cinétique permet de retrouver directement :

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{\Delta P}{2\eta L}r$$



- Figure 11 -

9. On définit le nombre de Reynolds de l'écoulement par :

$$\Re = \frac{2\rho\bar{v}R}{\eta}$$

Quelle est la signification physique de  $\Re$  ?

Dans quelle limite les calculs faits ci-dessus sont-ils pertinents ?

## 2 Analyse des résultats expérimentaux

1. En supposant un écoulement de type Poiseuille, évaluer numériquement le débit volumique d'eau  $D$  à travers un nanotube de carbone de rayon  $R = 1 \text{ nm}$ , de longueur  $L = 3 \mu\text{m}$  pour une différence de pression  $\Delta P = 1 \text{ bar}$ .
2. Évaluer la distance moyenne entre molécules d'eau dans l'eau liquide.
3. En déduire le nombre de molécules d'eau qui traverse un nanotube de carbone par nanoseconde. Dans leurs expériences, Holt et al. observent un flux de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-1}$  molécules par nanotube et par nanoseconde. Comparer ce résultat à celui prédit par le modèle de Poiseuille. Commenter en précisant quelles peuvent être les origines physiques du désaccord observé.

## Annexe A : Extraits du programme de la classe de seconde

### 1. Exploration de l'espace

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p>Comment déterminer l'ordre de grandeur de la taille d'une molécule ? <i>Expérience de Franklin</i></p> <p>Comment déterminer l'ordre de grandeur de l'épaisseur d'un cheveu ? <i>Utilisation de la diffraction pour construire une courbe d'étalonnage et utilisation de cette courbe</i> <i>Utilisation d'un microscope ou d'une loupe</i></p> <p>Comment évaluer la distance et les dimensions d'un immeuble ? <i>Méthode de la parallaxe</i> <i>Technique de la visée</i> <i>Utilisation du diamètre apparent</i></p> <p>Comment déterminer la profondeur d'un fond marin ? <i>Technique du sonar</i></p> <p>Comment mesurer le rayon de la Terre ? <i>Méthode d'Eratosthène*</i>.</p> <p>Comment mesurer la distance de la Terre à la Lune ?</p> <p><i>Technique de l'écho laser</i> Étude de documents textuels ou multimédias* donnant des informations sur les représentations du système solaire et sur les échelles de distances.</p>	<p>1.1. Présentation de l'Univers L'atome, la Terre, le système solaire, la Galaxie, les autres galaxies .</p> <p>1.2. Echelle des longueurs Echelle des distances dans l'univers de l'atome aux galaxies. Unités de longueur. Taille comparée des différents systèmes.</p> <p>1.3. L'année de lumière. Propagation rectiligne de la lumière. Vitesse de la lumière dans le vide et dans l'air. Définition et intérêt de l'année de lumière.</p>	<p>Utiliser à bon escient les noms des objets remplissant l'espace aussi bien au niveau microscopique (noyau, atome, molécule, cellule etc...) qu'au niveau cosmique (Terre, Lune, planète, étoile, galaxie). Savoir classer ces objets en fonction de leur taille. Savoir positionner ces objets les uns par rapport aux autres sur une échelle de distances. Savoir que le remplissage de l'espace par la matière est essentiellement lacunaire, aussi bien au niveau de l'atome qu'à l'échelle cosmique.</p> <p>Connaître la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide (ou dans l'air) et savoir qu'il s'agit d'une vitesse limite. Convertir en année de lumière une distance exprimée en mètres et réciproquement. Expliquer que "voir loin, c'est voir dans le passé".</p> <p>Utiliser les puissances de 10 dans l'évaluation des ordres de grandeur, dans les calculs, et dans l'expression des données et des résultats. Repérer un angle.</p> <p><i>Mesurer une petite et une grande distance :</i> <i>- mettre en œuvre une technique de mesure utilisée en TP</i> <i>- garder un nombre de chiffres significatifs en adéquation avec la précision de la mesure</i> <i>- exprimer le résultat avec une unité adaptée</i></p> <p>Compétence en cours d'acquisition : être capable d'effectuer une recherche documentaire et critique sur un cédérom ou sur Internet.</p>



## 2. L'Univers en mouvements et le temps

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p>La trajectoire d'un corps qui tombe est-elle la même pour tous les observateurs ? <i>Analyse d'un mouvement par rapport à différents corps de référence*</i> (étude à partir d'images vidéo, chronophotographie)</p> <p><i>Expériences montrant l'influence d'une force sur le mouvement d'un corps (action d'un aimant sur une bille qui roule, modification de la trajectoire d'une balle lorsqu'on la touche, forces entre corps électrisés...)</i></p> <p>Peut-il y avoir mouvement sans force dans un référentiel terrestre ? Etude d'exemples de la vie courante provenant de films ou de bandes dessinées illustrant le principe d'inertie</p> <p>Pourquoi la Lune "ne tombe-t-elle pas" sur la Terre ? <i>Influence de la vitesse initiale sur la chute d'un corps* (simulation, étude à partir d'images vidéo...)</i> <i>Observation du mouvement circulaire uniforme d'un corps soumis à une force centrale</i></p>	<p>1.1. Relativité du mouvement</p> <p>1.2. Principe d'inertie 1.2.a. Effets d'une force sur le mouvement d'un corps. Rôle de la masse du corps</p> <p>1.2.b. Énoncé du principe d'inertie pour un observateur terrestre : "tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme si les forces qui s'exercent sur lui se compensent"</p> <p>1.3. La gravitation universelle 1.3.a. L'interaction gravitationnelle entre deux corps. 1.3.b. La pesanteur résulte de l'attraction terrestre. Comparaison du poids d'un même corps sur la Terre et sur la Lune.</p> <p>1.3.c. Trajectoire d'un projectile. Interprétation du mouvement de la Lune (ou d'un satellite) par extrapolation du mouvement d'un projectile.</p>	<p>Décrire le mouvement d'un point dans deux référentiels différents.</p> <p>Savoir qu'une force s'exerçant sur un corps modifie la valeur de sa vitesse et/ou la direction de son mouvement et que cette modification dépend de la masse du corps.</p> <p>Énoncer le principe d'inertie Savoir qu'il est équivalent de dire : "un corps est soumis à des forces qui se compensent" et "un corps n'est soumis à aucune force".</p> <p>Utiliser le principe d'inertie pour interpréter en termes de force la chute des corps sur Terre Calculer la force d'attraction gravitationnelle qui s'exerce entre deux corps à répartition sphérique de masse, et représenter cette force. Cas du poids en différents points de la surface de la Terre Prévoir qualitativement comment est modifié le mouvement d'un projectile lorsqu'on modifie la direction du lancement ou la valeur de la vitesse initiale.</p>

## Annexe B : Extraits du programme de la classe terminale de la série scientifique

### Évolution des systèmes électriques (3TP - 10HCE)

#### Objectifs

Les élèves ont abordé dans le cours de physique de la classe de première quelques propriétés de circuits électriques en courant continu. Dans cette partie, on s'intéresse à des phénomènes associés à des courants variables, et plus spécifiquement aux éléments qui permettent de contrôler l'évolution temporelle d'un courant électrique : condensateurs et bobines. Les lois fondamentales utilisées en courant continu (loi des tensions, loi des intensités) seront dans les applications toujours valables pour les valeurs instantanées des tensions et des intensités variables. Condensateurs et bobines sont caractérisés empiriquement par l'expression de la tension que l'on mesure à leurs bornes. Dans cette logique, il n'est pas nécessaire d'introduire la notion d'auto-induction, puisque le phénomène d'induction n'est pas au programme. On indique que la possibilité de produire des signaux électriques modulables dans le temps est à l'origine de nombreuses applications. Dans chaque cas considéré (circuit RC, RL et LC), ce qui est appelé "résolution analytique" dans la colonne des compétences exigibles comprend : l'établissement de l'équation différentielle, la vérification qu'une solution analytique proposée la satisfait, et la détermination des constantes à partir des paramètres du circuit et des conditions initiales. On rappelle que ces compétences sont des compétences scientifiques transversales. Les savoir-faire expérimentaux concernant l'oscilloscope ne sont exigibles qu'à la fin de l'étude de l'évolution des systèmes électriques, c'est pourquoi ils figurent à la fin de cette partie. Tous les autres réglages, tels

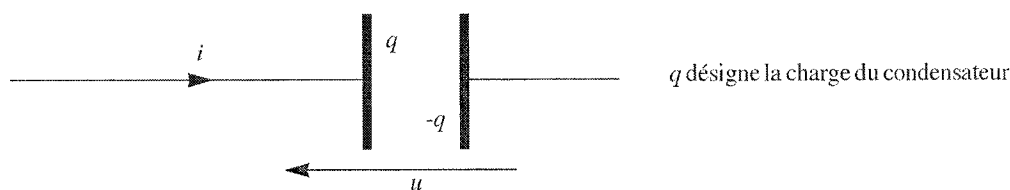
la synchronisation ou le décalibrage, ne sont pas exigibles.

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p><i>Illustrations expérimentales par quelques montages simples : oscillateurs de relaxation, temporisation, etc.</i></p> <p><i>Illustration de l'utilisation des condensateurs (alimentation continue, condensateur de découplage, stimulateur cardiaque, etc.)*</i></p> <p><i>Charge d'un condensateur à courant constant.</i></p> <p><i>Mise en évidence de l'énergie emmagasinée.</i></p> <p>Exemples d'application du stockage de l'énergie par des condensateurs (principe du flash).</p> <p><i>Charge et décharge d'un condensateur à travers une résistance :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- utilisation d'un oscilloscope et/ou d'un système d'acquisition informatisé avec traitement de l'information,</li> <li>- visualisation des tensions aux bornes du générateur, du condensateur et du conducteur ohmique,</li> <li>- influence des paramètres R et C,</li> <li>- mesure de la constante de temps,</li> <li>- influence de la tension du générateur.</li> </ul>	<p><b>1 - Cas d'un dipôle RC</b></p> <p>1.1 Le condensateur Description sommaire, symbole. Charges des armatures. Intensité : débit de charges</p> <p>Algébrisation en convention récepteur <math>i, u, q</math>. Relation charge-intensité pour un condensateur <math>i = dq/dt</math>, <math>q</math> charge du condensateur en convention récepteur. Relation charge-tension <math>q = Cu</math> ; capacité, son unité le farad (F).</p> <p>1.2 - Dipôle RC Réponse d'un dipôle RC à un échelon de tension : tension aux bornes du condensateur, intensité du courant ; étude expérimentale et étude théorique (résolution analytique). Énergie emmagasinée dans un condensateur. Continuité de la tension aux bornes du condensateur. Connaître la représentation symbolique d'un condensateur.</p>	<p>Connaître la représentation symbolique d'un condensateur. En utilisant la convention récepteur, savoir orienter un circuit sur un schéma, représenter les différentes flèches-tension, noter les charges des armatures du condensateur. Connaître les relations charge-intensité et charge-tension pour un condensateur en convention récepteur ; connaître la signification de chacun des termes et leur unité. Savoir exploiter la relation <math>q = Cu</math>.</p> <p>Effectuer la résolution analytique pour la tension aux bornes du condensateur ou la charge de celui-ci lorsque le dipôle RC est soumis à un échelon de tension. En déduire l'expression de l'intensité dans le circuit. Connaître l'expression de la constante de temps et savoir vérifier son unité par analyse dimensionnelle. Connaître l'expression de l'énergie emmagasinée dans un condensateur. Savoir que la tension aux bornes d'un condensateur n'est jamais discontinue. Savoir exploiter un document expérimental pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- identifier les tensions observées,</li> <li>- montrer l'influence de R et de C sur la charge ou la décharge,</li> <li>- déterminer une constante de temps lors de la charge et de la décharge.</li> </ul> <p>Savoir-faire expérimentaux <i>Réaliser un montage électrique à partir d'un schéma.</i> <i>Réaliser les branchements pour visualiser les tensions aux bornes du générateur, du condensateur et du conducteur ohmique.</i> <i>Montrer l'influence de l'amplitude de l'échelon de tension, de la résistance et de la capacité sur le phénomène observé lors de la charge et de la décharge du condensateur.</i></p>

### Commentaires

L'objectif de la manipulation introductive est de montrer, d'un point de vue qualitatif, l'influence d'un conducteur ohmique, d'un condensateur et d'une bobine sur l'établissement du courant dans un circuit. Les trois dipôles pourront être montés en dérivation.

1. Aucun développement sur la technologie des condensateurs n'est demandé. Le symbole du condensateur électrochimique est hors programme. L'orientation d'un circuit sera indiquée par une flèche sur un fil de jonction, surmontée de  $i$ . On insistera auprès des élèves sur le fait que si le courant passe dans le sens de la flèche, alors  $i$  est positif et que si le courant passe en sens opposé, alors  $i$  est négatif. Les conventions choisies seront celles du schéma ci-dessous :



Après avoir rappelé que l'intensité est un débit de charges électriques, on introduira  $i = dq/dt$  uniquement pour le condensateur,  $q$  étant la charge du condensateur à l'instant  $t$ . L'expression  $q = Cu$  pourra être introduite à partir de l'expérience de la charge d'un condensateur à courant constant. L'expression de la capacité d'un condensateur plan est hors programme. Les associations de condensateurs sont hors programme. On étudiera aussi bien la charge que la décharge d'un condensateur en utilisant un oscilloscope à mémoire ou un système d'acquisition de données. Dans cette partie on évitera d'utiliser des tensions crêteaux pour ne pas se heurter aux difficultés liées à l'utilisation du matériel (offset) ou conceptuelles ( $-E, +E$ ). La constante de temps sera déterminée par une méthode au choix de l'enseignant. L'expression de l'énergie pourra être établie mais sa démonstration n'est pas exigible. On indiquera que le stockage et le déstockage de l'énergie ne peuvent jamais s'effectuer instantanément. Par conséquent, la tension aux bornes d'un condensateur ne subit pas de discontinuité.

2. ...

---

## Évolution temporelle des systèmes mécaniques (5 TP - 22 HCE)

### Objectifs

Cette partie constitue l'aboutissement de l'enseignement de mécanique commencé en classe de seconde. L'appropriation des lois de Newton, à travers les différents exemples de mouvements étudiés, permet aux élèves de pratiquer les différents aspects de la démarche scientifique :

- modéliser un système et utiliser les lois de la dynamique pour prévoir son comportement, en utilisant une résolution analytique et/ou une méthode numérique itérative ;
- réaliser des mesures quantitatives et les confronter aux prédictions d'une théorie, dans le but éventuel d'améliorer la modélisation. La variété des systèmes étudiés doit illustrer la généralité de la théorie.

Dans chaque cas considéré, ce qui est appelé "résolution analytique" dans la colonne des compétences exigibles comprend : l'établissement de l'équation différentielle, la vérification qu'une solution analytique proposée la satisfait, et la détermination des constantes à partir des paramètres du circuit et des conditions initiales.

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p>Textes (Galilée, Newton, Einstein, Feynman, etc.)<sup>*</sup></p> <p>Applications de la vie courante mettant en jeu la première et la troisième loi de Newton.</p> <p><i>Tracé des vecteurs vitesse et accélération sur des enregistrements de mouvements divers de solides (la résultante des forces appliquées au solide est donnée).</i></p> <p><i>Vérification de la pertinence des grandeurs <math>m</math>, <math>\Delta v_c / \Delta t</math> et <math>\Sigma F_{ext}</math> intervenant dans la deuxième loi de Newton (une des grandeurs étant fixée, l'étude porte sur les variations relatives des deux autres).</i></p> <p><i>Étude de la chute verticale de solides de même forme et de masses différentes, dans l'air et dans l'huile.</i></p> <p><i>Détermination des vitesses limites.</i></p>	<p><b>1. La mécanique de Newton</b></p> <p>Lien qualitatif entre <math>\Sigma F_{ext}</math> et <math>\Delta v_c</math> (rappels)</p> <p>Comparaison de <math>\Delta v_c</math> correspondant à des intervalles de temps égaux pour des forces de valeurs différentes (résultat de l'activité)</p> <p>Introduction de <math>\Delta v_c / \Delta t</math></p> <p>Accélération : <math>a_c = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta v_c / \Delta t) = dv_c / dt</math> ; vecteur accélération (direction, sens, valeur).</p> <p>Rôle de la masse.</p> <p>Deuxième loi de Newton appliquée au centre d'inertie.</p> <p>Importance du choix du référentiel dans l'étude du mouvement du centre d'inertie d'un solide : référentiels galiléens.</p> <p>Troisième loi de Newton : loi des actions réciproques (rappel).</p>	<p>Choisir un système. Choisir les repères d'espace et de temps.</p> <p>Faire l'inventaire des forces extérieures appliquées à ce système.</p> <p>Définir le vecteur accélération et exploiter cette définition, connaître son unité.</p> <p>Énoncer les trois lois de Newton.</p> <p>Savoir exploiter un document expérimental (série de photos, film, acquisition de données avec un ordinateur...): reconnaître si le mouvement du centre d'inertie est rectiligne uniforme ou non, déterminer des vecteurs vitesse et accélération, mettre en relation accélération et somme des forces, tracer et exploiter des courbes <math>v_c = f(t)</math>.</p> <p>Savoir-faire expérimentaux</p> <p><i>Savoir enregistrer expérimentalement le mouvement de chute d'un solide dans l'air et/ou dans un autre fluide en vue de l'exploitation du document obtenu.</i></p>
<p><i>Exploitation des résultats obtenus au TP précédent : vitesse limite, régime initial et permanent, influence de la masse sur la vitesse limite, modélisation de la force de frottement.</i></p> <p>Exemples de chutes verticales dans la vie courante.</p> <p><i>Une méthode numérique itérative pour résoudre l'équation différentielle caractéristique de l'évolution d'un système à l'aide d'un tableur ou d'une calculatrice graphique : la méthode d'Euler. Confrontation des résultats théoriques et expérimentaux, importance du choix du pas de discrétisation temporelle, du modèle théorique choisi pour la force de frottement.</i></p> <p>Exemples de mouvements de projectiles dans la vie courante.</p> <p><i>Étude expérimentale de mouvements de projectiles de masses différentes dans un champ de pesanteur ; importance des conditions initiales.</i></p> <p><i>ou webcam :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- tracé de vecteurs accélération,</li> <li>- vérification que dans tous les cas <math>a_c = g</math> quelle que soit la masse.</li> <li>- importance des conditions initiales sur la nature de la trajectoire.</li> </ul>	<p><b>2. Étude de cas</b></p> <p><b>2.1 Chute verticale d'un solide</b></p> <p>Force de pesanteur, notion de champ de pesanteur uniforme.</p> <p><b>- Chute verticale avec frottement</b></p> <p>Application de la deuxième loi de Newton à un mouvement de chute verticale : forces appliquées au solide (poids, poussée d'Archimède, force de frottement fluide) ; équation différentielle du mouvement ; résolution par une méthode numérique itérative, régime initial et régime asymptotique (dit "permanent"), vitesse limite ; notion de temps caractéristique.</p> <p><b>- Chute verticale libre</b></p> <p>Mouvement rectiligne uniformément accéléré ; accélération indépendante de la masse de l'objet. Résolution analytique de l'équation différentielle du mouvement ; importance des conditions initiales.</p> <p><b>2.2 Mouvements plans</b></p> <p><b>- Mouvement de projectiles dans un champ de pesanteur uniforme</b></p> <p>Application de la deuxième loi de Newton au mouvement du centre d'inertie d'un projectile dans un champ de pesanteur uniforme dans le cas où les frottements peuvent être négligés.</p> <p>Équations horaires paramétriques.</p> <p>Équation de la trajectoire.</p> <p>Importance des conditions initiales.</p>	<p>Définir un champ de pesanteur uniforme.</p> <p>Connaître les caractéristiques de la poussée d'Archimède</p> <p>Appliquer la deuxième loi de Newton à un corps en chute verticale dans un fluide et établir l'équation différentielle du mouvement, la force de frottement étant donnée.</p> <p>Connaître le principe de la méthode d'Euler pour la résolution approchée d'une équation différentielle.</p> <p>Définir une chute libre, établir son équation différentielle et la résoudre</p> <p>Définir un mouvement rectiligne uniformément accéléré.</p> <p>Savoir exploiter des reproductions d'écrans d'ordinateur (lors de l'utilisation d'un tableur grapheur) correspondant à des enregistrements expérimentaux</p> <p>Savoir exploiter des courbes <math>v_c = f(t)</math> pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- reconnaître le régime initial et/ou le régime asymptotique.</li> <li>- évaluer le temps caractéristique correspondant au passage d'un régime à l'autre.</li> <li>- déterminer la vitesse limite.</li> </ul> <p>Dans le cas de la résolution par méthode itérative de l'équation différentielle, discuter la pertinence des courbes obtenues par rapport aux résultats expérimentaux (choix du pas de résolution, modèle proposé pour la force de frottement).</p> <p>Savoir-faire expérimentaux</p> <p><i>Utiliser un tableur ou une calculatrice pour résoudre une équation différentielle par la méthode d'Euler.</i></p> <p>Appliquer la deuxième loi de Newton à un projectile dans un champ de pesanteur uniforme. Montrer que le mouvement est plan.</p> <p>Établir l'équation de la trajectoire à partir des équations horaires paramétriques.</p> <p>Savoir exploiter un document expérimental reproduisant la trajectoire d'un projectile : tracer des vecteurs vitesse et accélération, déterminer les caractéristiques du vecteur accélération, trouver les conditions initiales.</p>

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p>Lois de Kepler : approche historique*.</p> <p><i>Tracés de vecteurs accélération dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme.</i></p> <p>Utilisation d'un logiciel de simulation pour la satellisation et les lois de Kepler*.</p>	<p><b>- Satellites et planètes</b></p> <p>Lois de Kepler (trajectoire circulaire ou elliptique). Référentiels héliocentrique et géocentrique. Étude d'un mouvement circulaire uniforme ; vitesse, vecteur accélération ; accélération normale. Énoncé de la loi de gravitation universelle pour des corps dont la répartition des masses est à symétrie sphérique et la distance grande devant leur taille (rappel). Application de la deuxième loi de Newton au centre d'inertie d'un satellite ou d'une planète : force centripète, accélération radiale, modélisation du mouvement des centres d'inertie des satellites et des planètes par un mouvement circulaire et uniforme, applications (période de révolution, vitesse, altitude, satellite géostationnaire). Interprétation qualitative de l'impesanteur dans le cas d'un satellite en mouvement circulaire uniforme.</p>	<p>Savoir-faire expérimentaux <i>Savoir enregistrer expérimentalement la trajectoire d'un projectile et exploiter le document obtenu.</i></p> <p>Énoncer les lois de Kepler et les appliquer à une trajectoire circulaire ou elliptique. Définir un mouvement circulaire uniforme et donner les caractéristiques de son vecteur accélération. Connaître les conditions nécessaires pour observer un mouvement circulaire uniforme : vitesse initiale non nulle et force radiale. Énoncer la loi de gravitation universelle sous sa forme vectorielle pour des corps dont la répartition des masses est à symétrie sphérique et la distance grande devant leur taille. Appliquer la deuxième loi de Newton à un satellite ou à une planète. Démontrer que le mouvement circulaire et uniforme est une solution des équations obtenues en appliquant la deuxième loi de Newton aux satellites ou aux planètes. Définir la période de révolution et la distinguer de la période de rotation propre. Exploiter les relations liant la vitesse, la période de révolution et le rayon de la trajectoire. Connaître et justifier les caractéristiques imposées au mouvement d'un satellite pour qu'il soit géostationnaire. Retrouver la troisième loi de Kepler pour un satellite ou une planète en mouvement circulaire uniforme. Exploiter des informations concernant le mouvement de satellites ou de planètes.</p>

### Compétences scientifiques générales exigibles en fin de classe terminale S

- **Compétences expérimentales**
  - Formuler une hypothèse sur un événement susceptible de se produire ou sur un paramètre pouvant influencer un phénomène
  - Proposer une expérience susceptible de valider ou d'invalider une hypothèse ou répondant à un objectif précis
  - Choisir et justifier l'utilisation du matériel de laboratoire
  - Décrire une expérience, un phénomène
  - Analyser les résultats expérimentaux et les confronter aux prévisions d'un modèle
  
- **Compétences manipulatoires**
  - Reconnaître et nommer le matériel de laboratoire
  - Suivre un protocole et utiliser le matériel prescrit
  - Respecter les règles de sécurité élémentaires pour l'utilisation du matériel et des produits
  - Faire le schéma d'un montage expérimental

- Réaliser un montage à partir d'un schéma ou d'un protocole
- **Compétences scientifiques**
  - Identifier les paramètres jouant un rôle dans un phénomène physique ou chimique
  - Associer un modèle à un phénomène
  - Elaborer une argumentation, une démarche scientifique
  - Discuter la pertinence, la cohérence et la logique d'une argumentation scientifique
  - Utiliser des unités adaptées
  - Utiliser l'analyse dimensionnelle
  - Evaluer l'ordre de grandeur d'un résultat
  - S'interroger sur la vraisemblance d'un résultat
  - Utiliser un vocabulaire scientifique adapté
  - Analyser, en termes scientifiques, une situation, une expérience, un document
  - Construire une courbe à partir d'un ensemble de mesures et l'exploiter
  - Savoir exploiter une courbe
- **Compétences transversales**
  - Utiliser un axe orienté et des mesures algébriques
  - Utiliser les vecteurs et les opérations correspondantes (coordonnées, addition, produit scalaire)
  - Utiliser les fonctions du programme de mathématiques
  - Conduire un calcul de dérivée, de primitive et d'intégrale
  - Utiliser la notion d'équation différentielle
  - Utiliser les notions de statistique et de probabilité du programme de mathématiques
  - Exploiter un tableau de valeurs
  - Utiliser l'ordinateur pour acquérir et/ou traiter des données expérimentales
  - Effectuer une recherche documentaire et savoir trier les informations selon des critères pertinents
  - S'interroger sur la crédibilité d'une information
  - Produire un document en utilisant les technologies de l'information et de la communication