

**Consignes :**

- Laissez les grandeurs sous formes littérales le plus longtemps possible
- Encadrez les solutions littérales
- Soulignez les applications numériques
- Respectez le nombre de chiffres significatifs
- Prêtez attention au soin
- Le sujet est volontairement trop long. Evitez de rester bloqué trop longtemps sur une question. Traitez le maximum de questions.
- Vous n'êtes pas obligés de traiter le sujet dans l'ordre. Veillez seulement à bien indiquer les questions traitées sur votre copie.

*N.B. : Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre (extrait notice CCP).*

***L'utilisation de la calculatrice est interdite. Les documents sont interdits.***

Ce devoir s'intéresse à un certain nombre de propriétés physiques et chimiques concernant les téléphones portables.

Les parties sont indépendantes entre elles.

De nombreuses questions au sein des parties sont indépendantes.

La difficulté varie dans le sujet. Ne passez pas trop de temps sur les questions qui vous bloquent.

## 1. Détermination de l'orientation de l'écran : portrait ou paysage ?

### Document 1 : Accéléromètre dans les téléphones portables :

## Comment les téléphones portables et tablettes parviennent à comprendre dans quel sens on les tient ?

mardi, juillet 23, 2013

Karim MADJER

No comments

<http://sweetrandomscience.blogspot.fr/2013/07/comment-les-telephones-portables-et.html>

De nombreux appareils intègrent aujourd'hui des capteurs pour recueillir des informations sur leur orientation. Ces dispositifs facilitent grandement l'utilisation des téléphones, des tablettes et de certains appareils photos numériques en permettant par exemple le basculement de l'affichage. Ils sont également à la base de la technologie de détection des mouvements dans les *wii* et autres interfaces de jeu. Pour cela, les appareils embarquent des dispositifs ultra-miniaturisés et super précis : un accéléromètre, un gyroscope ou parfois même les deux ! Voyons comment tout cela fonctionne :

### L'accéléromètre

**Le principe de l'accéléromètre** n'est pas bien compliqué : imaginez un tube vertical dans lequel une petite masse est suspendue à un ressort. Ce ressort est tendu avec une certaine longueur à cause du poids de la masse. Si on prend trois tubes à ressort et qu'on les dispose selon trois axes perpendiculaires (appelés de façon très originale **X**, **Y** et **Z** dans la figure ci-dessous), on obtient un système comme celui-ci :

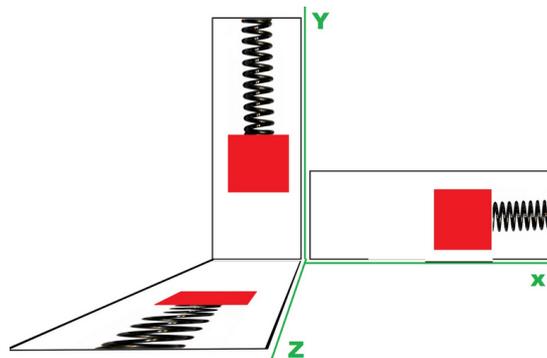
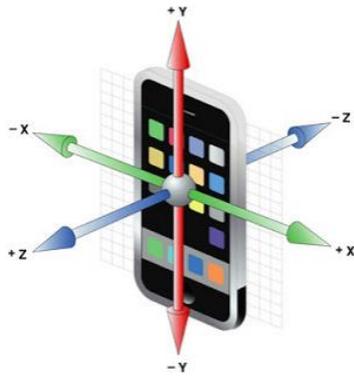
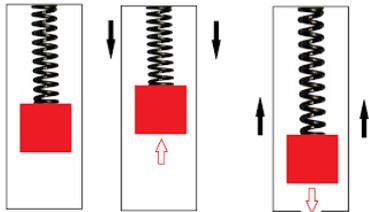


Schéma de l'accéléromètre à ressorts sur trois axes.

Ce système est rattaché à l'objet dont on veut mesurer l'inclinaison. Sur la figure, seul le ressort dans le tube vertical est tendu, les autres sont au repos. Si l'on tourne l'appareil sur le côté, de sorte que l'axe des **X** pointe vers le haut, c'est le ressort **X** qui sera tendu, et le ressort **Y** retrouvera sa position normale. Si on retourne complètement l'appareil, avec l'axe des **Y** pointant vers le sol, le ressort **Y** va se contracter, l'appareil "saura" qu'il est à l'envers. Pour une position quelconque, pour laquelle l'axe **Y** ne correspond pas à la verticale, les ressorts sont tous étirés ou contractés d'une certaine longueur, reliée aux angles d'inclinaison (et qui ne dépend que de paramètres constants : l'accélération de pesanteur et la constante de raideur du ressort). Ce simple dispositif permet donc déjà à un appareil de détecter son orientation : il lui suffit pour cela de regarder de combien les ressorts sont comprimés ou étirés dans les trois directions et de calculer l'orientation correspondante.



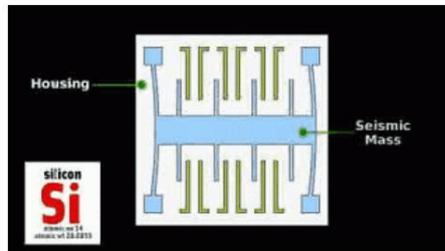
Axes d'un accéléromètre dans l'espace (<http://www.yetihq.com>)



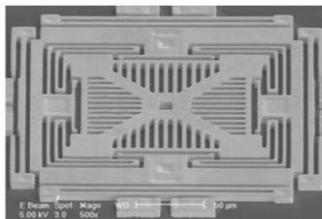
Le dispositif permet aussi de déterminer l'accélération linéaire de l'appareil : si l'on bouge le tube verticalement avec une vitesse qui varie, le ressort va se comprimer ou s'étirer. La valeur de cette élongation (ou contraction) est proportionnelle à l'accélération, ce qui signifie qu'il est très facile de calculer l'accélération.

Déformation du ressort pendant une accélération

Votre téléphone ne contient évidemment pas un dispositif aussi rudimentaire, mais le principe est le même. Une puce de quelques centaines de micromètres seulement est chargée de vérifier l'orientation de l'appareil plusieurs dizaines de fois par seconde. A l'intérieur, une structure mobile en silicium en forme de peigne remplace les ressorts. Cette structure se déforme quand on déplace l'appareil et l'importance de la déformation peut être mesurée. En effet, la variation de distance entre les électrodes mobiles et fixes introduit une variation de leur capacité.



L'appareil peut ensuite calculer assez facilement son orientation dans l'espace. Sur la photo ci-dessous, on peut voir la forme centrale et le cadre rigide, reliés par des parties intermédiaires flexibles qui se déforment selon les mouvements imprimés.



Composant MEMS accéléromètre, crédits



## Document 2 : Accéléromètres Capacitifs <http://dirac.epucfe.eu/projets/wakka.php?wiki=P09A04index>

L'accéléromètre Mems est composé de deux peignes complémentaires conducteurs électriques en Silicium. L'un (en rouge) est fixe. L'autre en bleu est mobile, suspendu à une lamelle flexible, et constitue une masse sensible à l'accélération. Le peigne mobile peut se déplacer d'une vingtaine de nanomètre par inertie lorsque le véhicule change de vitesse:

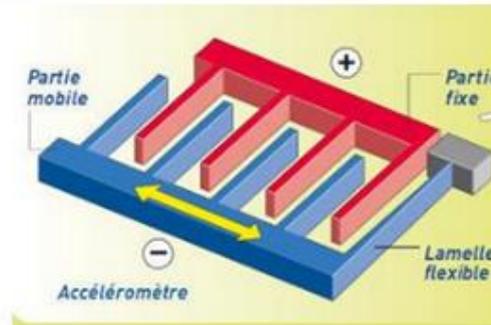


Figure7 : Accéléromètre MEMS à technologie Capacitive

Ces accéléromètres mesurent la variation d'une capacité. Lors d'une accélération, la distance entre les peignes varie. Comme la capacité d'un condensateur est inversement proportionnelle à la distance séparant ses deux armatures, on peut dire que la capacité est fonction de l'accélération.

## Document 3 : Modélisation simplifiée d'un accéléromètre

Ce document explicite la modélisation de l'accéléromètre d'un appareil photo. Le même genre d'accéléromètre se retrouve dans les téléphones portables.

Une poutre suspendue appelée « masse sismique » constitue l'une des armatures d'un condensateur plan. L'autre armature est solidaire de l'appareil photo dont on veut mesurer l'accélération (voir figure 4). Les variations de capacité liées au déplacement de la masse sismique permettent de suivre son mouvement.

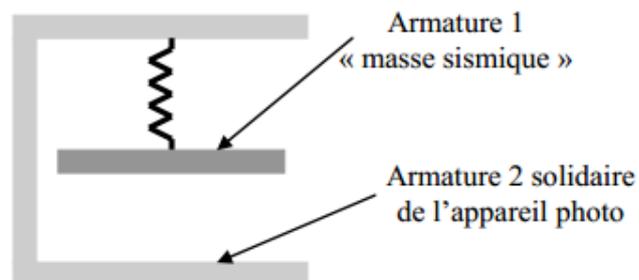
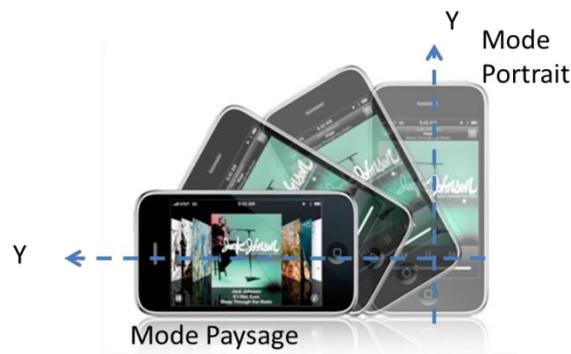


Figure 4

On modélise la structure mécanique étudiée par une masse ponctuelle l'extrémité d'un ressort de constante de raideur  $k$  et de longueur à vide  $\ell_0$ , dont l'autre extrémité est fixée en O au bâti solidaire de l'appareil photo

Dans la suite, on modélise l'accéléromètre du téléphone par le schéma du document 3, et qui correspond à l'accéléromètre de l'axe Y (document 1). L'accélération de la pesanteur est  $g$ .



1.1 – Que vaut la longueur du ressort si le téléphone est utilisé en mode paysage ? Justifier.

1.2 – Que vaut la longueur du ressort si le téléphone est utilisé en mode portrait, en fonction de  $l_0$ ,  $M$ ,  $g$  et  $k$  ? Commenter l'influence de  $M$  et  $k$  sur cette longueur.

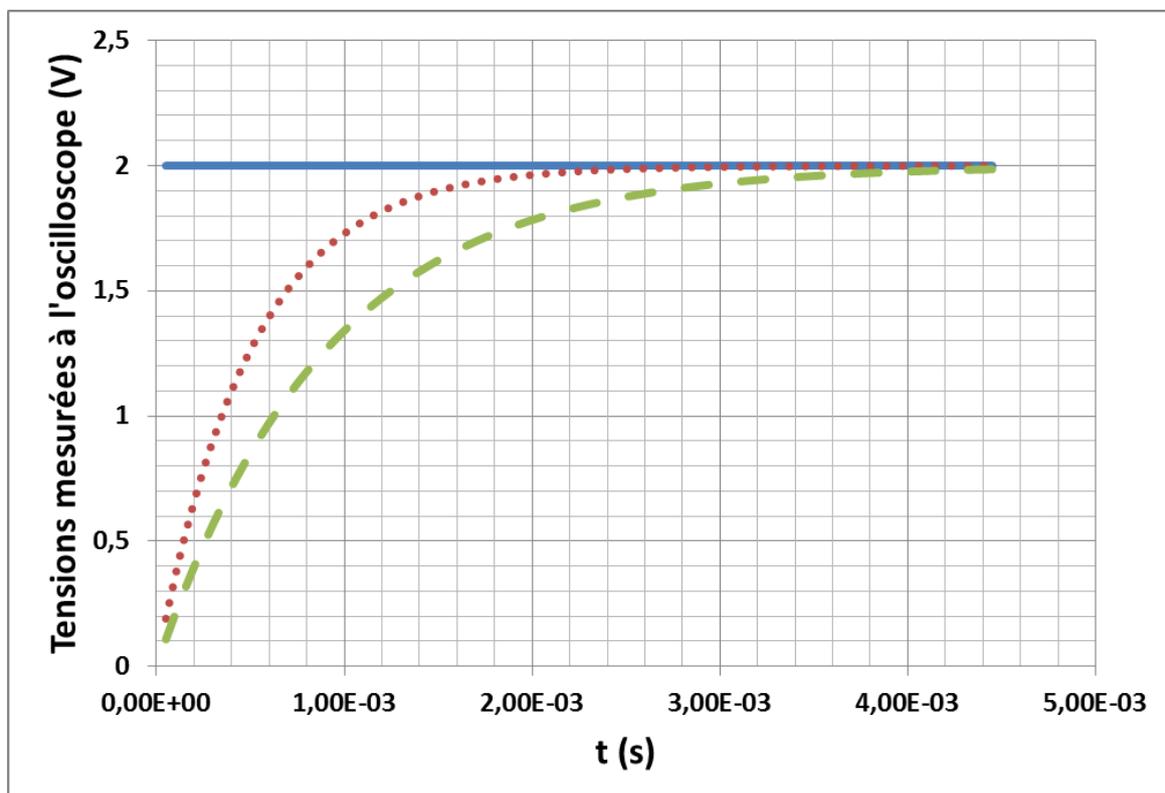
1.3 – Dans quel cas (portrait ou paysage) la capacité entre l'armature mobile et l'armature fixe est-elle maximale ? minimale ? Justifier.

Cette capacité est placée dans un circuit RC, alimenté par un GBF fournissant un échelon de tension. On ne soulève pas ici de difficulté sur comment se connecter directement aux armatures. On admet qu'elles sont facilement accessibles et que l'on peut les connecter aisément.

1.4 – Dessiner le circuit électrique correspondant. Indiquer le matériel utilisé et le câblage nécessaire pour observer :

- La tension échelon fournie par le GBF
- La tension aux bornes de la capacité

On relève alors les deux courbes suivantes, selon que le téléphone soit en mode paysage ou portrait.



**1.5 – Quelle est la valeur numérique de la constante de temps du régime transitoire :**

- Dans le cas de la courbe en traits pointillés ?
- Dans le cas de la courbe constituée de points ?

**Vous expliquerez rapidement la méthode utilisée.**

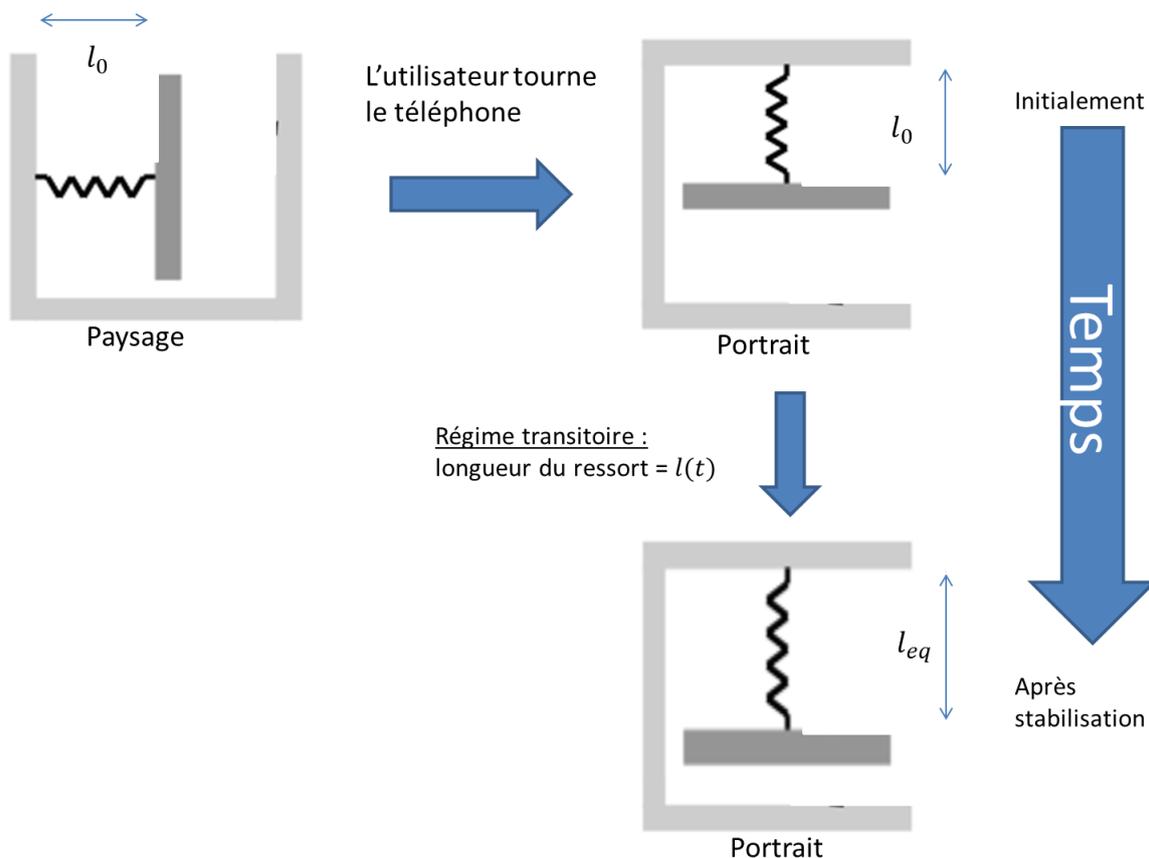
On rappelle que, dans le cas d'un circuit RC, la constante de temps est égale à  $\tau = RC$ .

**1.6 – Quelle courbe a été mesurée quand le téléphone est en mode portrait ? en mode paysage ? Justifier.**

Ainsi une rapide mesure électrique permet au téléphone de détecter si il est tenu en mode portrait ou en mode paysage. Dans la suite, nous nous intéressons au régime transitoire qui se produit lorsque l'utilisateur passe du mode paysage au mode portrait. On cherchera surtout à ce que ce régime transitoire s'effectue suffisamment rapidement, de façon à ce que l'utilisateur n'attende pas trop longtemps après la rotation de son écran.



Au niveau de l'accéléromètre (axe Y considéré), le passage du mode portrait au mode paysage est représenté ci-dessous :

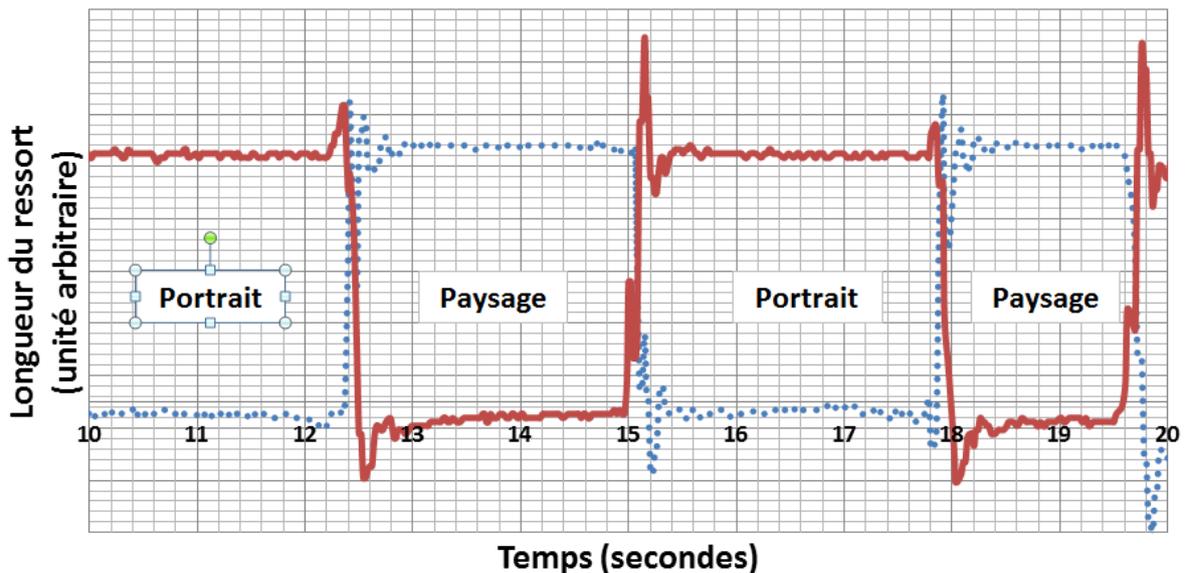


On considère le système {masse accrochée au ressort}, de masse  $M$ . La constante de raideur du ressort est  $k$  et la longueur à vide du ressort est  $l_0$ . On définit  $l(t)$  comme étant la longueur du ressort au cours du temps. On définit  $t = 0$  comme l'instant où l'utilisateur tourne le téléphone.

La masse subit des frottements, que l'on modélise par une force de frottements fluide  $\vec{f} = -h\vec{v}$ .

- 1.7 – Montrer que l'unité de  $h$  est de la forme  $\text{kg}^\alpha \cdot \text{s}^\beta$  où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des entiers relatifs à déterminer.
- 1.8 – Sur un schéma reproduit sur votre copie, au cours du régime transitoire, dessiner les forces s'appliquant sur la masse.
- 1.9 – En déduire l'équation différentielle régissant l'évolution de  $l(t)$ .
- 1.10 – Est-on en présence d'un oscillateur harmonique ou d'un oscillateur amorti ? Justifier.
- 1.11 – Quelle sont la pulsation propre et le facteur de qualité de cet oscillateur, en fonction des constantes de l'exercice ?
- 1.12 – Dans quel type de régime doit-on se situer pour que le régime transitoire soit le plus rapide ?
- 1.13 – Pour quelles valeurs de facteur de qualité se situe-t-on :
- En régime pseudo-périodique ?
  - En régime critique ?
  - En régime apériodique ?
- 1.14 – En déduire une relation entre  $m$ ,  $h$  et  $k$  pour que le régime transitoire soit le plus court possible.
- 1.15 – Quelle est alors, en fonction de  $k$  et  $m$  la durée du régime transitoire ?

On relève, grâce à l'application Accelerometer Monitor, les longueurs des ressorts de l'accéléromètre suivant deux axes (X et Y), selon que l'on soit en mode portrait ou paysage.



- 1.16 – Sur ce graphique, que vous rendrez avec votre copie, repérer quelques régimes transitoires et quelques régimes permanents. Indiquer où on lit  $l_0$  et  $l_{eq}$ .
- 1.17 – Quelle courbe correspond à la longueur du ressort de l'axe X ? de l'axe Y ? Justifier.
- 1.18 – Quel est le type de régime transitoire observé ? Estimer, en justifiant, l'ordre de grandeur du facteur de qualité de l'oscillateur.
- 1.19 – Tracer le portrait de phase  $(l, \frac{dl}{dt})$  associé à ce régime transitoire. On fera apparaître  $l_0$  et  $l_{eq}$  dans ce portrait de phase.

## 2. Podomètre : 10000 pas par jour ?

On considère ici une autre application de l'accéléromètre : son utilisation en tant que podomètre.

### Document 4 – Application Android / Podomètre

#### OBJECTIF 10 000 PAS PAR JOUR

POUR ENTREtenir SA FORME ET PRÉSERVER SA SANTÉ,  
L'ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ (OMS) RECOMMANDE  
DE FAIRE 10 000 PAS PAR JOUR.



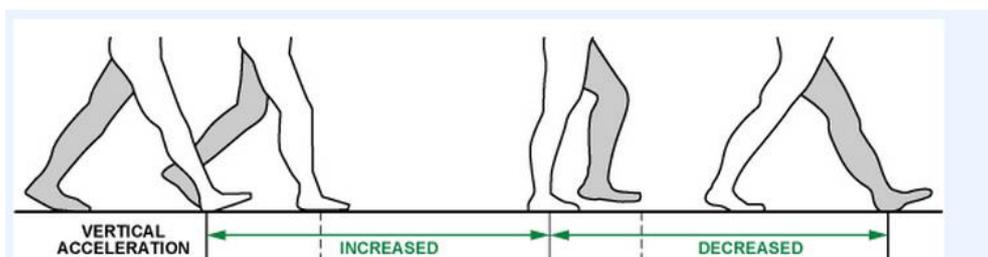
#### Description

Le Podomètre Runtastic (application Android) enregistre chacun de vos pas et vous permet de savoir si vous atteignez les 10 000 pas par jour recommandés.

- Enregistre automatiquement tous vos pas
- Marche partout : dans votre poche de pantalon ou de veste, dans votre main, sur votre bras, ou dans un sac
- Compteur de calories
- Calcul de la vitesse (pas moyen réglable)
- Distance effectuée
- Calcul de la fréquence des pas

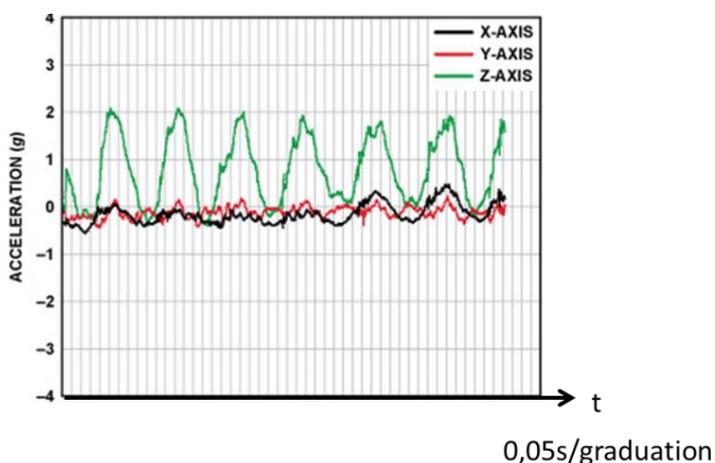
### Document 5 – Principe du Podomètre :

Pour mesurer nos pas, l'accéléromètre utilise le fait que lorsque nous marchons, notre accélération vertical augmente puis diminue cycliquement, comment montré ci-dessous :



<http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/44-06/pedometer.html>

Chaque fois qu'un pied (gauche ou droite, peu importe) touche par terre, on dit que l'on effectue un pas.



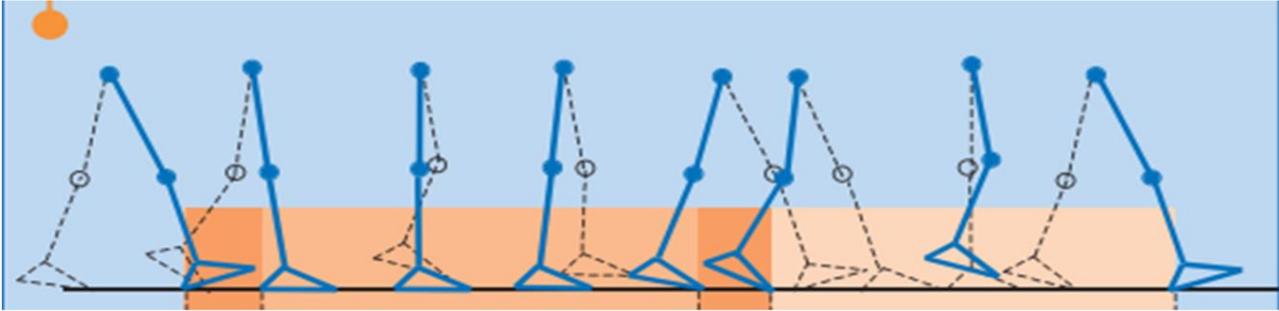
On suppose dans la suite que le pas moyen de cet individu est de 70cm.

### 2.1 – Quelle est la vitesse de l'individu correspondant au graphique mesuré dans le document 5 ?

On voit que le signal de l'accéléromètre dans le document 5 est une sinusoïde. Ainsi, afin d'étudier au mieux les propriétés de l'accéléromètre, on va l'étudier en régime complexe.

#### Document 6 – Accéléromètre placé dans une poche :

On s'intéresse ainsi à un accéléromètre, placé dans une poche, et soumis à un déplacement sinusoïdal vertical :  $X(t) = X\cos(\omega t)$  :



#### Déplacement de l'accéléromètre au cours de la marche

On voit que la masse oscille autour de sa position d'équilibre  $l_{eq}$  lorsque l'on déplace l'accéléromètre. On note  $x(t)$  le déplacement de la masse par rapport à sa position d'équilibre, de telle sorte que la longueur du ressort soit  $l(t) = l_{eq} + x(t)$

On admet que l'application du principe fondamental de la dynamique donne :

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + h \frac{dx}{dt} + kx = m \frac{d^2 X}{dt^2}$$

Le déplacement de la masse par rapport à sa position d'équilibre est une inconnue et on la note :

$$x(t) = x_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

**Attention :** On veillera à écrire clairement, de manière à ne pas confondre minuscules et majuscules.

2.2 – Donner les signaux complexes associés à  $x(t)$  et  $X(t)$ .

2.3 – Passer l'équation différentielle obtenue par le PFD dans le monde complexe.

2.4 – Montrer en explicitant  $\omega_1$  et  $\omega_0$ , que :

$$\underline{H} = \frac{\underline{x(t)}}{\underline{X(t)}} = \frac{(j\omega)^2}{(j\omega)^2 + \omega_1^2 (j\omega) + \omega_0^2}$$

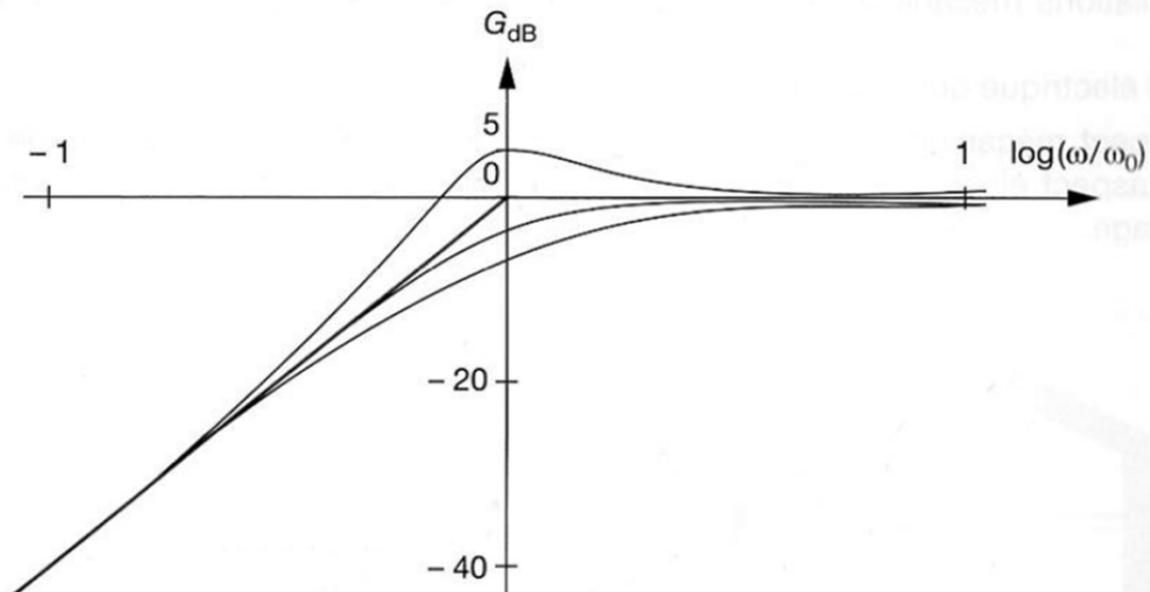
2.5 – En déduire l'expression du facteur de qualité et de la pulsation de coupure. Comparer aux expressions trouvées en régime transitoire : ces expressions dépendent-elles du régime de fonctionnement de l'accéléromètre ?

2.6 – En analysant le comportement basses fréquences et hautes fréquences de  $\underline{H}$ , déterminer le type de filtrage réalisé par l'accéléromètre.

2.7 – Si le déplacement de l'accéléromètre est constant  $X = 1m$ , quel est la valeur de l'élongation  $x(t)$  du ressort ?

2.8 – Expliquer (de manière détaillée, mais sans mener les calculs au bout) comment faire pour déterminer  $x(t)$  si  $X(t)$  était une sinusoïde d'amplitude 10cm et de fréquence 2Hz.

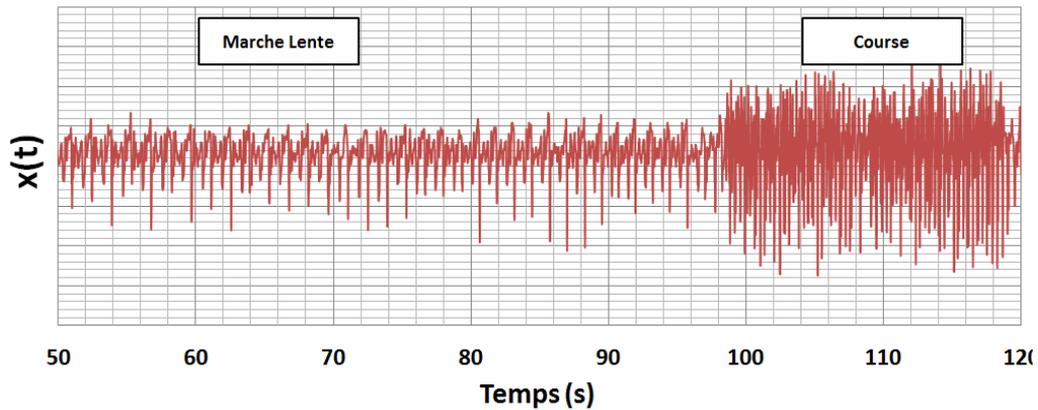
Le diagramme de Bode en gain de l'accéléromètre est donné ci-dessous, pour trois valeurs de Q :



2.9 – Sur le diagramme de Bode, que vous rendrez avec votre copie, déterminer la courbe pour laquelle Q est maximal, et celle pour laquelle Q est minimal.

2.10 – Mettre en évidence les asymptotes hautes et basses fréquences sur ce diagramme de Bode. Justifier leur allure (pente ou valeur).

On teste alors l'accéléromètre sous différentes conditions expérimentales, et on représente l'évolution de  $x(t)$  dans la courbe suivante :



2.11 – L'évolution du signal  $x(t)$  est-elle cohérente avec le diagramme de Bode ? Justifier.

### 3. [Prendre une photographie](#)

*Adapté de Petites Mines 2009*

On s'intéresse dans cette partie à la prise de photographies à l'aide de l'appareil photo du téléphone, ou à l'aide d'un appareil photo jetable.

Dans la suite, l'objet photographié est constitué par la tour Eiffel culminant à une hauteur  $h=324\text{m}$  du sol et située à une distance  $d=2,0\text{ km}$  du photographe.

3.1 – Quelle est, à l'œil nu, la hauteur apparente de la tour Eiffel dans ces conditions. La voit-on à l'œil nu ? Justifier en donnant la limite de résolution de l'œil.

On s'intéresse dans un premier temps à un objectif standard d'appareil photographique constitué d'une lentille convergente unique de centre O et de focale  $f' = 50\text{ mm}$ .

3.2 – Que vaut la vergence de cette lentille ?

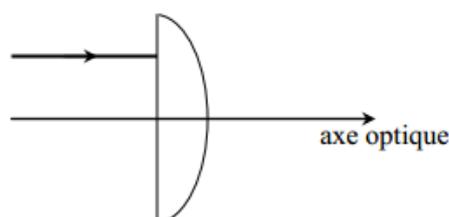
3.3 – Quelle doit être, en fonction de  $f'$  et  $d$ , la distance D entre la lentille et la pellicule pour que la photographie soit nette ? Justifier votre réponse et effectuer l'application numérique.

3.4 – Construire sur un schéma l'image de l'objet sur la pellicule (sans respecter l'échelle).

3.5 – On appelle  $h_1$  la hauteur de l'image de la tour Eiffel sur la pellicule. Déterminer son expression en fonction de  $f'$ ,  $d$  et  $h$  puis calculer sa valeur numérique.

On considère dans un premier temps une lentille de verre d'indice  $n$  placée dans l'air (figure 1). On se place dans l'approximation d'un indice  $n$  ne dépendant pas de la longueur d'onde.

3.6 – Comment appelle-t-on un milieu dans lequel  $n$  dépend de la longueur d'onde ? Citer un exemple de ce type de milieu.



L'indice de réfraction  $n$  du verre constituant la lentille dépend en réalité de la longueur d'onde  $\lambda$  de

la radiation lumineuse qui la traverse. Ils sont reliés par la loi de Cauchy :

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

où  $A$  et  $B$  sont des constantes positives qui ne dépendent que du milieu traversé.

**3.7 – Comparer  $r_R$  et  $r_B$ , angles réfractés en sortie de lentille pour une radiation rouge et pour une radiation bleue en considérant des rayons incidents parallèles à l'axe optique. Tracer alors les chemins suivis par ces deux radiations dans et après la lentille.**

**3.8 – Quel problème se pose-t-il alors pour l'appareil photo ?**

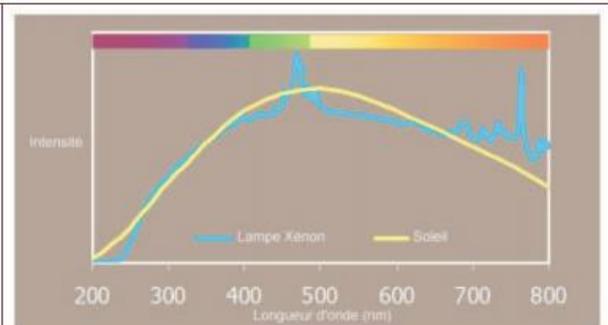
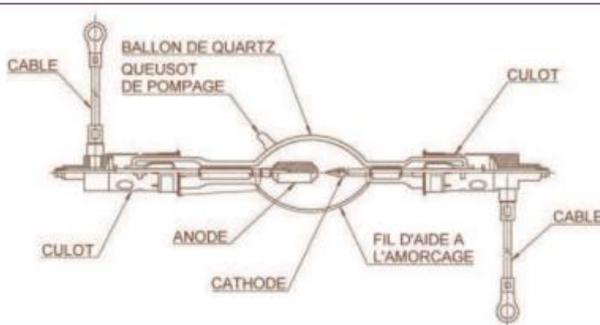
On peut s'affranchir de ce problème en réalisant un doublet, équivalent à une lentille convergente unique, constitué d'une lentille convergente accolée à une lentille divergente, les deux lentilles étant taillées dans des verres d'indices de réfraction différents. Le téléobjectif ainsi constitué présente toutefois l'inconvénient d'un encombrement important.

On s'intéresse désormais au Flash électronique d'un appareil photo (en général, pas le même que celui d'un téléphone portable).

### Document 7 : Fonctionnement d'un flash

Le fonctionnement d'un flash électronique repose sur la génération d'un éclair dans un tube à décharge. Il s'agit d'un tube de quartz dans lequel on a placé un gaz raréfié, le xénon, entre deux électrodes  $E1$  et  $E2$ . Ces deux électrodes sont reliées à un condensateur de capacité  $C$  chargé sous quelques centaines de volts. Autour du tube est enroulé un fil constituant une électrode  $E3$ . On peut appliquer entre  $E1$  et  $E3$  une impulsion de tension de plusieurs milliers de volts qui ionise le xénon. Il devient alors conducteur et le condensateur peut se décharger dans le gaz, créant ainsi un éclair lumineux très intense d'une durée très brève.

### Document 9 - Descriptif de la lampe au Xénon :



<http://www.projectionniste.net/docs/Specifications%20techniques%20et%20fonctionnement%20des%20lampes%20xenon%20UXL.pdf>

Le xénon est utilisé dans des dispositifs d'émission de lumière sous forme de flash lumineux, utilisés dans les [flash photographiques](#) ou les [stroboscopes](#)<sup>11</sup>. Il est également utilisé dans les lasers pour exciter le [milieu amplificateur](#) qui génère ensuite le faisceau cohérent<sup>76</sup>. Le premier laser solide fabriqué en 1960 était pompé par une lampe au xénon<sup>77</sup>, et les lasers utilisés pour la [fusion nucléaire](#) sont également pompés par des lampes au xénon<sup>78</sup>.

Les [lampes à décharge](#) au xénon ont une [température de couleur](#) proche de celle du soleil à midi et sont utilisées pour simuler le Soleil dans des [bancs solaires](#). Après leur introduction dans les années 1940, ces lampes ont commencé à remplacer, dans les projecteurs de cinéma, les lampes à arc au carbone dont la durée de vie était courte<sup>79</sup>. Elles sont employées de manière standard dans les systèmes de projection 35 mm ou IMAX, ainsi que pour d'autres applications spécialisées.

**3.18 – Comparer les spectres émis par le soleil et la lampe de Xénon. Justifier le type de courbe obtenue par les lampes à décharge en expliquant le phénomène d'émission.**

**3.19 – A partir des niveaux énergétiques de l'atome de Xénon, expliquer comment on calcule les longueurs d'ondes des photons qui peuvent être émis.**

**3.20 – Qu'est-ce que la température de couleur d'une lampe ? Qu'est-ce que l'IRC d'une lampe ? Citer des exemples de situations d'éclairage, et indiquer dans chaque cas le type de température de couleur et d'IRC que vous choisiriez pour les lampes.**

Le gaz du tube à décharge n'est a priori pas conducteur. Cependant, lorsqu'une très haute tension est appliquée entre deux de ses électrodes, l'ionisation des atomes de xénon qui en résulte abaisse la résistance du tube qui devient alors équivalent à un conducteur de résistance  $R_T$  dans lequel le condensateur  $C$  peut se décharger.

**3.21 - Expliquer pourquoi l'ionisation des atomes de xénon abaisse la résistance du tube à décharge.**

On utilise le circuit équivalent de la figure 3 pour expliquer la formation d'un éclair dans le tube.

On considère que la tension  $v_2$  est une tension continue de 0,30 kV.

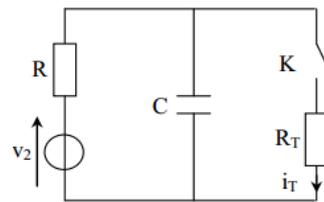


Figure 3

Le régime permanent étant atteint pour  $t < 0$ , on ferme l'interrupteur  $K$  à l'instant  $t = 0$ .

On appelle  $u$  la tension aux bornes du condensateur.

**3.22 – Déterminer  $u(0^-)$  et  $i_T(0^-)$ , juste avant la fermeture de l'interrupteur.**

**3.23 – Qui de  $u$  ou  $i_T$  est continue ? Justifier.**

**3.24 – Déterminer  $u(0^+)$  et  $i_T(0^+)$  juste après la fermeture de l'interrupteur.**

**3.25 – Déterminer  $u(\infty)$  et  $i_T(\infty)$  lorsque le régime permanent est atteint (après la fermeture de l'interrupteur).**

**3.26 – En déduire le tracé de  $i(t)$  pour  $t > 0$  et  $t < 0$ , en appelant  $\tau$  la constante de temps du régime transitoire. Expliquer la génération d'un éclair lors de la fermeture de l'interrupteur  $K$ .**

**3.27 – Déterminer l'équation différentielle vérifiée par  $i_T(t)$  pour  $t > 0$ . On pourra y faire apparaître la constante de temps**

$$\tau = \frac{RR_T C}{R + R_T}$$

**3.28 – En déduire l'expression complète de  $i_T(t)$  pour  $t > 0$  en fonction de  $v_2$ ,  $R$ ,  $R_T$ ,  $t$  et  $\tau$ .**

**3.29 - Donner l'expression de l'énergie accumulée par le condensateur avant la fermeture de l'interrupteur.**

On souhaite générer un flash d'une puissance égale à 4,0 W et d'une durée de 0,10 s.

**3.30 – Calculer l'énergie moyenne devant être stockée dans le condensateur.**

**3.31 – Déterminer un ordre de grandeur de la valeur de la capacité  $C$  nécessaire. Commenter ce résultat.**

## Partie 2 : Des moteurs plus économiques : les moteurs hybrides

### Document 1 : Les moteurs hybrides (d'après wikipédia)

Une **automobile hybride électrique** est une [automobile](#) faisant appel à deux stockages d'[énergie](#) embarqués distincts pour se mouvoir, dont l'un de nature [électrique](#)<sup>1</sup>.

Si un système type automobile a une source non-embarquée, donc raccordée électriquement à une source extérieure (comme un tramway, réseau électrique aérien ou enterré), on parle alors plutôt de véhicule à [traction-électrique](#) avec propulsion secondaire.

La contraction "voiture-hybride" désigne quasiment toujours l'association [moteur thermique](#) et [véhicule électrique](#). La nature réversible de la partie motrice électrique est maintenant quasi sous-entendue (récupération par recharge de [batterie d'accumulateurs](#) ou de [supercondensateurs](#)) c'est-à-dire la récupération de l'énergie cinétique par freinage électrique (système réversible pouvant être générateur).

Il faut distinguer quelques familles d'hybrides différentes que l'on peut classer suivant :

- La proportion d'énergie secondaire disponible.
- Le type de technologie secondaire.
- La durée de l'intervention du système secondaire (régime transitoire ou permanent).
- La cogénération-motrice simultanée ou séquentielle.

D'autres technologies d'hybridations apparaissent :

- avec [pile à combustible](#).
- avec énergie latente de compression-détente de gaz.
- avec [volant d'inertie](#).

### 1. [Les moteurs à combustion interne \(D'après sujet ATS 2008\)](#)

Les moteurs à combustion interne, qui comprennent essentiellement les moteurs à allumage commandé (cycle Beau de Rochas) et les moteurs Diesel, sont d'une très grande importance pratique. Ils constituent notamment la quasi-totalité des moteurs des automobiles. Ce problème étudie le fonctionnement théorique de ces moteurs.

Dans tout le problème, les gaz seront supposés parfaits.

## 1.1. Rendement théorique

### Document 2 : Principe du moteur

Pour récupérer, en partie, l'énergie chimique de la combustion, le principe est le suivant : on comprime un gaz (de l'air mélangé éventuellement à du carburant) dans un cylindre à l'aide d'un piston, lui-même actionné par un système bielle-vilebrequin (cf. figure 1). Le mélange a été préalablement admis dans le cylindre par une soupape d'admission (fermée ultérieurement). En fin de compression a lieu la réaction de combustion (s'il n'y était pas déjà, le combustible est donc injecté dans le cylindre, à ce stade). Une partie de l'énergie dégagée est récupérée sous forme de travail car les gaz résultants de cette réaction repoussent le piston. Les gaz subissent alors une détente (augmentation du volume tandis que le piston est repoussé vers le bas). La rotation de l'arbre conduit, par l'intermédiaire du système bielle-vilebrequin, à la remontée du piston. La soupape d'échappement s'ouvre, ce qui permet l'évacuation des gaz vers l'extérieur.

La rotation de l'arbre se poursuivant, le piston redescend. La soupape d'échappement se ferme et celle d'admission s'ouvre et on revient à la phase d'admission.

Pendant un cycle complet, le vilebrequin a donc accompli deux tours et le piston deux allers et retours : le piston descend pendant l'admission, remonte pendant la compression, redescend pendant la détente (après réaction) et remonte pendant l'échappement. Le moteur étudié est donc à quatre temps.

Le but du système bielle-vilebrequin est de transformer les mouvements de translation du piston en mouvement de rotation de l'arbre qui sera transmis aux roues.

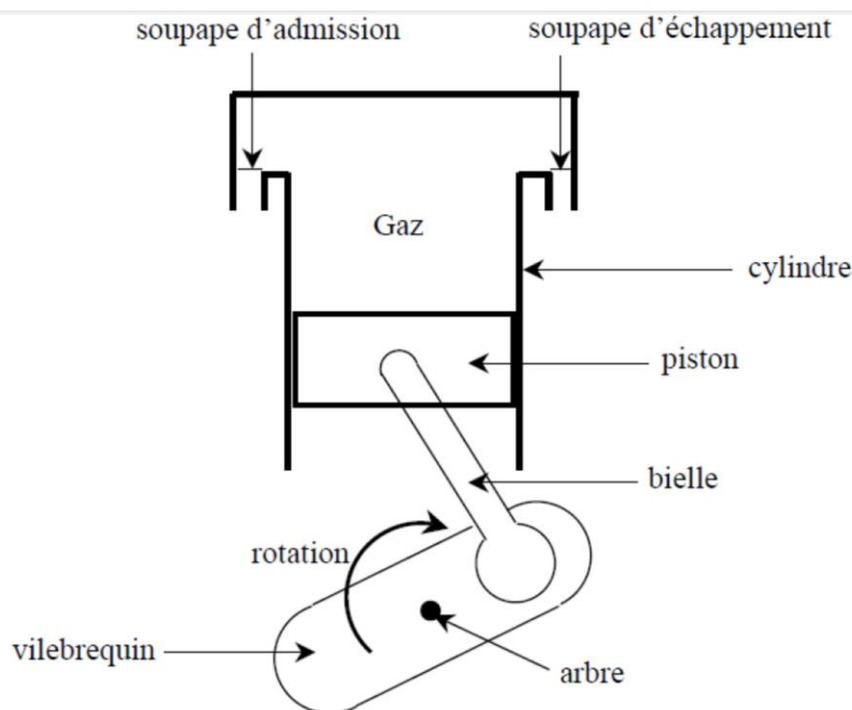


Figure 1

### Document 3 : Le cycle thermodynamique

On idéalise le fonctionnement du moteur en considérant que le système fermé constitué de  $n$  moles de gaz parfait parcourt le cycle réversible suivant (se reporter au diagramme de Watt donné à la figure 2) :

- Compression adiabatique de A à B ;
- La combustion démarre en B et il s'ensuit une première phase de B à C isochore ;
- La combustion se poursuit dans une phase isobare de C à D ;
- Détente adiabatique de D à E ;
- Phase isochore de E à A.

On adopte les notations suivantes :  $\alpha = \frac{V_A}{V_B}$  ;  $\lambda = \frac{P_C}{P_B}$  ;  $\varepsilon = \frac{V_D}{V_C}$ .

On notera  $C_{vm}$  la capacité thermique molaire à volume constant de l'air,  $C_{pm}$  la capacité thermique molaire à pression constante et  $\gamma = \frac{C_{pm}}{C_{vm}}$ . On prendra  $\gamma = 1,35$ .

Les différentes valeurs des pressions et des volumes sont indiquées sur le schéma. On notera de même  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$  et  $T_E$  les températures respectives des points A, B, C, D et E.

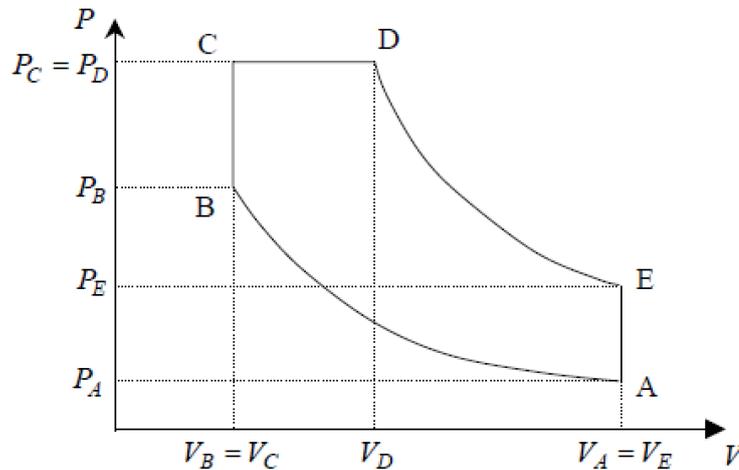


Figure 2

La combustion est prise en compte de façon abstraite : on ne se préoccupe pas des modifications dans la composition du système dues à la réaction chimique ; on considère que la combustion est équivalente à un apport de chaleur au gaz effectuant le cycle, durant les phases B→C et C→D

1.1 Ecrire la relation entre  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $V_A$ ,  $V_B$  et  $\gamma$ .

1.2 Exprimer la chaleur  $Q_{AB}$  et le travail  $W_{AB}$  reçus par le gaz pendant la transformation A → B. On exprimera le résultat en fonction de  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $V_A$ ,  $V_B$  et  $\gamma$ .

1.3 Exprimer la chaleur  $Q_{BC}$  et le travail  $W_{BC}$  reçus par le gaz pendant la transformation B → C ; On exprimera le résultat en fonction de  $C_{vm}$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ .

1.4 Exprimer la chaleur  $Q_{CD}$  et le travail  $W_{CD}$  reçus par le gaz pendant la transformation C → D ; On exprimera le résultat en fonction de  $C_{pm}$ ,  $T_C$ ,  $T_D$ .

1.5 Exprimer les chaleurs  $Q_{DE}$  et  $Q_{EA}$  reçues par le gaz pendant les transformations D → E et E → A. Exprimer le résultat en fonction des températures des points extrêmes (E et A) de la transformation étudiée, de  $n$  et des capacités thermiques molaires.

1.6 Que vaut la variation d'énergie interne  $\Delta U$  sur un cycle complet ? Justifier.

1.7 En déduire le travail total  $W$  reçu par le gaz au cours d'un cycle en fonction des chaleurs reçues définies dans les questions précédentes.

1.8 Définir le rendement  $\eta$  du cycle. L'exprimer ensuite uniquement en fonction des chaleurs reçues définies dans les questions précédentes.

1.9 Exprimer  $T_B$  en fonction de  $T_A, \gamma$  et  $\alpha$ .

1.10 Exprimer  $T_C$  en fonction de  $T_A, \gamma, \alpha$  et  $\lambda$ .

1.11 Exprimer  $T_D$  en fonction de  $T_A, \gamma, \alpha, \varepsilon$  et  $\lambda$ .

1.12 Exprimer  $T_E$  en fonction de  $T_A, \gamma, \varepsilon$  et  $\lambda$ .

1.13 Montrer que le rendement peut s'écrire :

$$\eta = 1 - \frac{\lambda \varepsilon^\gamma - 1}{\alpha^{\gamma-1} [\lambda - 1 + \gamma \lambda (\varepsilon - 1)]}$$

## 1.2. Moteur à allumage commandé

### Document 4 : Principe du moteur à essence

Les moteurs à essence suivent le cycle Beau de Rochas. Le gaz qui entre dans le cylindre durant la phase d'admission est un mélange essence-air. Le combustible est donc présent dans le système durant la phase de compression. La réaction de combustion est déclenchée en B par une étincelle d'allumage (arc électrique) générée par un dispositif appelé bougie. La combustion étant très rapide, on peut considérer qu'elle se fait à volume constant (phase isochore BC). Elle est suivie par la détente. Il n'y a donc pas de phase isobare (en d'autres termes, on pourra représenter le cycle à l'aide du diagramme de Watt de la figure 2 dans lequel les points D et C sont confondus).

1.14 Compte tenu de ce qui précède, simplifier l'expression du rendement donnée à la question 1.13.

1.15 Le coefficient  $\alpha$  est appelé rapport de compression volumétrique. Pour avoir le plus grand rendement possible, a-t-on a priori intérêt à le choisir grand ou petit ?

1.16 Si la température en fin de compression (en B) est trop élevée, la combustion peut démarrer spontanément (auto-allumage du mélange) ce qui provoque des vibrations et une détérioration des parois (cliquetis). En admettant que, pour le combustible utilisé, cette température maximale soit de  $380^\circ\text{C}$  (653 K), calculer numériquement la valeur maximale  $\alpha_{\max}$  du rapport de compression volumétrique. On prendra  $T_A = 300 \text{ K}$ .

1.17 Calculer le rendement théorique du moteur pour une valeur du rapport de compression volumétrique égale à la valeur calculée précédente  $\alpha_{\max}$ .

1.18 On peut améliorer le rapport de compression volumétrique maximal en choisissant soigneusement la composition de l'essence utilisée. Connaissez-vous un indice qui permet d'évaluer la tendance à l'auto-allumage d'un carburant ?

1.19 Une autre manière d'améliorer le rapport de compression volumétrique maximal est de rajouter à l'essence du plomb tétraméthyle ou du plomb tétraéthyle. Quel est l'inconvénient de procéder ainsi ?

### 1.3. Moteur Diesel

#### Document 5 : Principe du moteur Diesel

Dans un moteur Diesel, pour permettre un meilleur rapport de compression volumétrique tout en évitant l'auto-allumage prématuré, le carburant n'est pas mélangé à l'air dans la phase d'admission mais il est injecté après la compression, en B. C'est donc de l'air sans carburant qui subit la compression. La température devient alors très élevée et le combustible injecté s'enflamme spontanément. Il n'y a pas besoin d'étincelle d'allumage. L'injection est progressive et réglée de telle manière qu'on pourra considérer que la combustion est uniquement isobare. Ainsi, il n'y a pas d'étape isochore BC (en d'autres termes, on pourra représenter le cycle à l'aide du diagramme de Watt de la figure 2 dans lequel les points B et C sont confondus).

#### Document 6 : Définition du PCI (D'après Wikipédia)

Le **pouvoir calorifique** ou **chaleur de combustion** (noté  $\Delta_c H^0$ , en anglais Heating Value) d'un matériau combustible est l'enthalpie de réaction de combustion par unité de masse dans les conditions normales de température et de pression. C'est l'**énergie dégagée sous forme de chaleur par la réaction de combustion** par le dioxygène (autrement dit la quantité de chaleur). Le plus souvent, on considère un hydrocarbure réagissant avec le dioxygène de l'air pour donner du dioxyde de carbone, de l'eau et de la chaleur.

Elle est exprimée en général en kilojoule par kilogramme (noté kJ/kg ou  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), mais on rencontre également le pouvoir calorifique molaire (en kilojoule par mole, kJ/mol) ou le pouvoir calorifique volumique (en kilojoule par litre, kJ/L). Pour le gaz naturel, il est exprimé en kilowatt-heure par normo mètre cube (noté kWh/Nm<sup>3</sup>).

1.20 Compte tenu de ce qui précède, simplifier l'expression du rendement donnée à la question 1.13.

1.21 Le rapport de compression volumétrique étant supposé égal à 22, déterminer la température  $T_B$  en fin de compression si  $T_A = 300 \text{ K}$ .

1.22 Supposons qu'une automobile à moteur Diesel roule à la vitesse constante de  $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , avec une consommation constante de 6 litres de gazole par 100 km parcourus. Le moteur tourne à la vitesse angulaire, elle aussi constante, de 2000 tours par minute. Quelle est la masse de carburant injectée à chaque cycle dans le moteur (on n'oubliera pas qu'il y a deux tours de moteur lorsque le cycle est décrit une fois) ? On donne la masse volumique du gazole :  $\mu = 850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

1.23 La réaction de combustion étant totale, en déduire la chaleur fournie, durant la phase de combustion, au gaz parcourant le cycle. On prendra la valeur  $P_{CI} = 44,8 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  pour le pouvoir calorifique inférieur.

1.24 La masse d'air parcourant le cycle vaut 25 fois la masse de carburant injecté. Cette masse d'air reçoit la chaleur calculée à la question précédente (dans le cadre de la modélisation effectuée, on ne se préoccupe plus de la masse de carburant ni des produits de la réaction). Dans ces conditions, calculer la température  $T_D$  en fin de combustion (on rappelle que  $T_B = T_C$  pour le moteur Diesel). On donne :

Masse molaire de l'air :  $M = 29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

Capacité thermique molaire à pression constante :  $C_{pm} = 32 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

1.25 En déduire la valeur numérique du rendement théorique de ce moteur Diesel.