

## Devoir Surveillé 2

Les calculatrices sont autorisées

Samedi 28 septembre 2019 : 8h30 - 12h30

### Danger lié à un pendule suspendu dans un véhicule

Certains conducteurs aiment suspendre des objets à proximité de leur rétroviseur intérieur comme des porte-bonheur ou des diffuseurs solides de parfum. On se propose de s'intéresser aux dangers associés à cette pratique. Pour simplifier l'étude, on considère que l'objet est une masse  $M$  suspendue à un fil inextensible, sans raideur, de masse négligeable devant  $M$  et de longueur  $l$  dont l'autre extrémité est attachée au rétroviseur. On suppose que la voiture roule en ligne droite à vitesse constante  $\vec{v}_0 = v_0 \vec{e}_x$  quand surgit un obstacle sur la route. Le conducteur freine brutalement avec une accélération constante  $\vec{a} = -a_0 \vec{e}_x$ . On négligera les frottements de l'air.

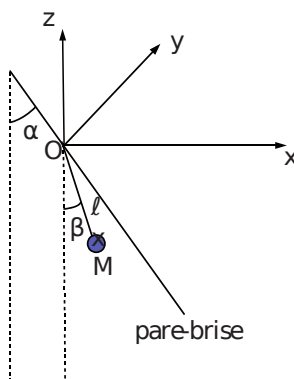


Figure : Pendule suspendu au pare-brise d'une voiture

Le point de suspension du fil est situé sur le pare-brise, ce dernier étant incliné d'un angle  $\alpha = 15^\circ$  par rapport à la verticale.

1. Pour déterminer si la masse  $M$  risque de heurter le conducteur ou le pare-brise, dans quel référentiel doit-on étudier le mouvement ? Justifier la réponse.
2. On considère que le référentiel terrestre est galiléen. Le référentiel lié à la voiture est-il galiléen ? La réponse diffère-t-elle en fonction de la phase du mouvement du véhicule (mouvement à vitesse constante ou phase de freinage) ?
3. Le point  $M$  étant initialement au repos, établir que son mouvement est plan à condition que la trajectoire de la voiture soit rigoureusement rectiligne.
4. Déterminer l'expression littérale de la position angulaire  $\beta_{\text{eq}}$  d'équilibre relatif lors de la phase de freinage.

- Déterminer l'équation différentielle à laquelle obéit la position angulaire  $\beta(t)$  de l'objet suspendu dans le référentiel lié à la voiture lors de la phase de freinage.

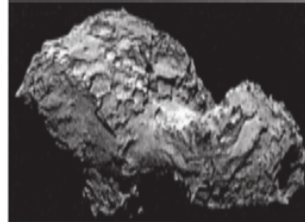
On se place dans l'approximation des petits angles jusqu'à la fin de cette partie.

- Établir l'expression de l'équation horaire de l'angle  $\beta$  en supposant qu'initialement le pendule est immobile et vertical.
- Déterminer la valeur  $a_1$  de l'accélération maximale du véhicule pour que la masse ne heurte pas le pare-brise. Commenter.

## Atterrissage du module Philae

Rosetta est une mission spatiale de l'Agence spatiale européenne dont l'objectif principal est de recueillir des données sur la composition du noyau de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko et sur son comportement à l'approche du Soleil.

La sonde spatiale s'est placée en orbite autour de la comète puis, après une période d'observation de plusieurs mois, a envoyé le 12 novembre 2014 Philae, un petit atterrisseur, se poser sur sa surface pour analyser la composition de son sol et sa structure.



Données :

- masse de la comète :  $m_{com} = 1,0 \cdot 10^{13}$  kg
- masse volumique de la comète :  $\mu_{com} = 400$  kg.m<sup>-3</sup>
- période de rotation propre de la comète :  $T_{com} = 12,4$  h
- constante gravitationnelle :  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>.s<sup>-2</sup>
- distance de largage par rapport au centre :  $r_{larg} = 22,5$  km
- masse de la sonde Rosetta :  $m_{ros} = 1500$  kg
- masse de l'atterrisseur Philae :  $m_{ph} = 98$  kg
- vitesse de la lumière dans le vide :  $c = 3,00 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup>

Dans cette partie, la comète est modélisée par une boule homogène de masse  $m_{com}$  et de masse volumique  $\mu_{com}$ .

La distance entre un point  $M$  et le centre  $O$  de la comète est notée  $r = OM$ .

## Champ gravitationnel de la comète

- Déterminer le rayon  $r_{com}$  de la boule équivalente à la comète.

On verra dans la suite de l'année que à l'aide du théorème de Gauss, le champ gravitationnel  $\vec{g}_{com}$  dû à la comète (analogue de celui de la terre  $\vec{g}$ ), s'écrit  $\vec{g}_{com} = -G \frac{m_{com}}{r^2} \vec{e}_r$  (pour  $r > r_{com}$ ).

- Vérifier par analyse dimensionnelle l'homogénéité de la relation obtenue.

## Philae à la surface de la comète

On s'intéresse à présent au module Philae, une fois celui-ci posé sur la surface de la comète.

10. Lors du largage de Philae, le 12 novembre 2014, plusieurs journalistes commentent l'évènement : "Philae pèse 1,7 g sur la comète". Qu'en pensez-vous ?

La comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko tourne sur elle-même avec une période  $T_{com}$  dans le référentiel "cométocentrique" galiléen  $R_0$  dont l'origine est le centre O de la comète et dont les axes pointent vers des directions fixes. Le référentiel  $R_{com}$  lié à la comète n'est pas galiléen.

11. Pour appliquer le principe fondamental de la dynamique à l'atterrisseur Philae dans le référentiel  $R_{com}$  lié à la comète, indiquer quelle force doit être ajoutée à la force gravitationnelle, ainsi que son nom usuel.
12. Représenter sur un schéma la comète, son axe de rotation, le module Philae posé à sa surface et les deux forces (en plus de la réaction du sol) auxquelles il est soumis. Comment est modifié qualitativement le poids réel de l'atterrisseur, par rapport à celui calculé à la question 10.
13. Exprimer littéralement, puis calculer numériquement la variation relative du poids due à la rotation propre de la comète (on suppose que Philae s'est posé dans le plan équatorial). Commenter.

## Objectif Lune

Le Soleil, la Terre et la Lune sont tous trois supposés à symétrie sphérique. On note T le centre de la Terre, S le centre du Soleil, L le centre de la Lune et O le centre de masse du système solaire. Le vecteur  $\vec{e}_z$  est le vecteur unitaire de l'axe Tz des pôles, autour duquel la terre tourne sur elle-même avec une vitesse angulaire égale à  $\Omega_T = 7,29.10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$ . La Lune tourne sur elle-même avec une vitesse angulaire de rotation propre  $\Omega_L = 2,66.10^{-6} \text{ rad.s}^{-1}$  autour de l'axe Lz.

Données :

- Constante de gravitation universelle :  $G = 6,67.10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$
  - Masse du Soleil :  $m_S = 1,99.10^{30} \text{ kg}$
  - Masse de la Terre :  $m_T = 5,98.10^{24} \text{ kg}$
  - Masse de la Lune :  $m_L = 7,34.10^{22} \text{ kg}$
  - Distance Terre-Soleil :  $D = 1,50.10^{11} \text{ m}$
  - Distance moyenne Terre-Lune :  $d = 3,84.10^8 \text{ m}$
  - Rayon de la Terre :  $R_T = 6,37.10^3 \text{ km}$
  - Rayon de la Lune :  $R_L = 1,75.10^3 \text{ km}$
14. Définir les référentiels : de Copernic  $R_o$ , géocentrique  $R_T$  et terrestre noté  $R_{T*}$ .

On suppose le référentiel de Copernic  $R_o$  galiléen. On lui associe le repère  $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ . De même, au référentiel géocentrique  $R_T$ , on associe  $(T, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$  et au référentiel terrestre  $R_{T*}$ , on associe  $(T, \vec{e}_X, \vec{e}_Y, \vec{e}_Z)$ . On définit un référentiel sélénocentrique  $R_L$  ou référentiel barycentrique de la Lune associé au repère  $(L, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ .

15. Justifier l'ordre de grandeur de la vitesse de rotation propre de la Terre.
16. A quelle condition peut-on considérer le référentiel géocentrique comme galiléen ?

17. A quelle condition peut-on considérer le référentiel terrestre comme galiléen ?
18. La Lune présente toujours la même face à la Terre. Qu'en déduisez-vous en supposant que le centre de la Lune L décrit une trajectoire circulaire à vitesse uniforme autour de T dans le référentiel géocentrique ? Evaluer en jours l'ordre de grandeur de la durée d'une révolution lunaire autour de la Terre.

Dans le référentiel géocentrique, on suppose qu'on peut écrire le principe fondamental pour un point matériel de masse  $\mu$ , placé en un point M sous la forme

$$\mu \left( \frac{d^2 \vec{TM}}{dt^2} \right)_{R_T} = \vec{R}_{ext} + \mu \vec{G}_{Terre}(M) + \mu \vec{G}_{Lune}(M) + \mu \vec{G}_{autres}(M) - \mu \left( \frac{d^2 \vec{OT}}{dt^2} \right)_{R_O},$$

en appelant  $\vec{G}_{Terre}(M)$ ,  $\vec{G}_{Lune}(M)$  et  $\vec{G}_{autres}(M)$  les champs gravitationnels créés respectivement par la Terre, la Lune et les autres astres.

19. Interpréter chaque terme de l'égalité ci-dessus en précisant quel théorème de la mécanique est utilisé. Le référentiel géocentrique est-il supposé galiléen ?
20. Écrire le théorème de la résultante cinétique (ou théorème de la quantité de mouvement) appliqué à la Terre dans le référentiel de Copernic.

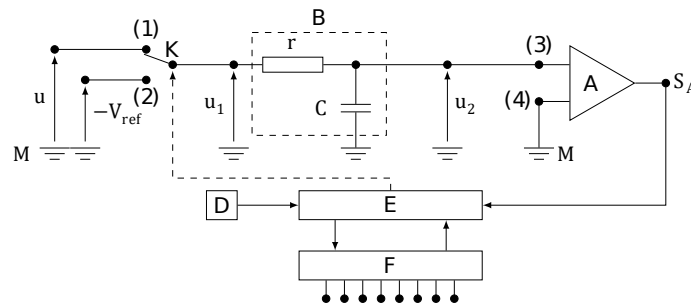
On néglige les effets du Soleil et des autres astres : on considère le système Terre-Lune isolé. On s'intéresse au mouvement du centre de la Lune autour de la Terre dans le référentiel géocentrique considéré galiléen dans la suite de la partie I-2. On assimilera la trajectoire de la Lune autour de la Terre à un cercle centré en T.

21. Dans cette hypothèse de trajectoire circulaire de rayon  $d$ , exprimer la vitesse  $V$  de L sur son orbite en fonction de  $d$ ,  $G$  et  $m_T$ . Est-ce compatible numériquement avec le résultat de la question 18. ?

## Numérisation avant stockage

Dans tout système de stockage numérique de données, la première étape est celle de la numérisation. Les signaux du monde réel sont analogiques, pour les transformer en signaux numériques on utilise un convertisseur analogique numérique, noté CAN par la suite.

Au cœur de tous les convertisseurs se trouve un compteur (noté F sur la figure ci-dessous), commandé par un signal d'horloge (noté D) qui incrémente le compteur à chaque bip d'horloge (le compteur est lui même commandé par une logique de commande notée E). La fréquence du signal d'horloge est de l'ordre de quelques GHz, on la suppose parfaitement stable. Le compteur compte à partir de zéro, dès que la commande de compter lui a été donnée, au rythme imposé par le signal d'horloge. Il fournit en sortie un nombre codé sur  $N$  bits.



22. Avec quelle précision maximale mesure-t-on une durée à l'aide d'un compteur dont le signal d'horloge a une fréquence  $f_{ck} = 1 \text{ GHz}$  ?

L'architecture des premiers CAN était de type « série », elle est modélisée par le dispositif schématisé sur la figure ci-dessus. La tension positive  $u$  dont la valeur est comprise entre 0 V et  $V_{\text{ref}}$  ( $V_{\text{ref}} = 2 \text{ V}$ ), supposée constante pendant la durée de la numérisation, est convertie en un nombre  $s_N$ . Le convertisseur est composé d'un circuit  $r, C$  formant le bloc B, d'un comparateur A, et d'éléments intégrés parmi lesquels le bloc logique de commande E, le générateur de signal d'horloge D et le compteur sur  $N$  bits F. Les résistances d'entrée des blocs A, E et F sont infinies. Le module A compare les potentiels des noeuds (3) et (4). Lorsque  $V_{(3)} > V_{(4)}$ , son potentiel de sortie  $V_{S_A}$  est au niveau haut, de sorte que  $v_{S_A} = V_{S_A} - V_M = 5 \text{ V}$ . Lorsque  $V_{(3)} < V_{(4)}$ , son potentiel de sortie est au niveau bas ( $v_{S_A} = 0 \text{ V}$ ). Il commande ainsi le bloc logique E. L'interrupteur K est commandé par le bloc logique E, ce qui est symbolisé par un trait pointillé.

23. Préciser ce qu'on appelle masse dans un montage électrique.
24. Représenter le graphe de la tension  $v_{S_A} = V_{S_A} - V_M$  en fonction de  $u_2$ .
25. Partant d'une situation où le condensateur est déchargé, E commande à l'instant  $t = 0$  la mise en position (1) de l'interrupteur K. L'interrupteur reste dans cette position pendant une durée  $t_1 = \frac{2^N - 1}{f_{ck}}$  qui correspond à un cycle complet de comptage du compteur sur  $N$  bits. Étudier  $u_2$  en fonction du temps entre  $t = 0$  et  $t_1$ . Faire apparaître une constante  $\tau$ , homogène à un temps, caractéristique du bloc B.

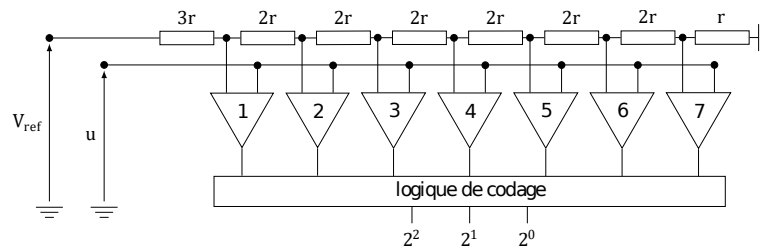
Pour toute la suite, on choisit les valeurs de  $r$  et  $C$  de sorte que  $t_1 \ll \tau$ .

26. Donner alors l'expression simplifiée de  $u_2$  en fonction du temps, ainsi que le lien simplifié entre  $u_1$  et  $\frac{du_2}{dt}$ .
27. Quelle est alors la fonction du bloc B ?
28. Que vaut  $v_{S_A}$  entre 0 et  $t_1$  ?

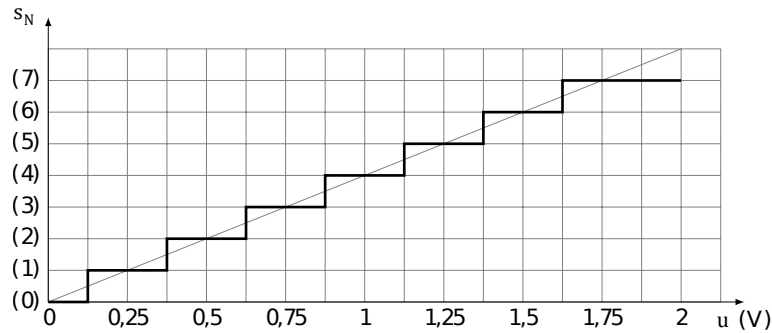
Le bloc de commande fait basculer l'interrupteur K en position (2) à l'instant  $t_1$  et déclenche le comptage. Celui-ci dure jusqu'à l'instant  $t_1 + t_2$  tel que le signal  $v_{S_A}$  soit modifié.

29. Exprimer  $t_2$  en fonction de  $u$ ,  $t_1$  et  $V_{\text{ref}}$ .
30. Représenter sur un même graphe  $u_2$  et  $u_1$  en fonction du temps, entre  $t = 0$  et  $t = t_1 + t_2$ .
31. Quel est le lien entre  $s_N$  ? et  $t_2$  ?
32. Quelle est la durée maximale de la conversion analogique numérique pour un convertisseur 8 bits commandé par un signal d'horloge de fréquence  $f_{ck} = 1 \text{ GHz}$  ? En déduire une condition sur la fréquence des signaux qu'on peut numériser avec un tel convertisseur. Commenter.

Les convertisseurs plus récents ont une architecture parallèle. La figure 3 représente un convertisseur 3 bits, qui convertit une tension  $u$  qui vérifie  $0 < u < V_{\text{ref}}$ . Il est composé de 7 comparateurs, d'une logique de commande et de résistances de valeur  $r, 2r$  et  $3r$ . Les comparateurs ont une impédance d'entrée infinie et délivrent un signal logique qui est au niveau haut lorsque la patte reliée à  $u$  a un potentiel supérieur à celui de la patte reliée à  $V_{\text{ref}}$  par l'intermédiaire des résistances.



33. Expliquer le fonctionnement de ce convertisseur. On note  $u_N$  ? la tension numérisée, reconstituée à partir de  $s_N$  ? . Comment passe-t-on de  $s_N$  à  $u_N$  ?
  34. Pour un convertisseur 8 bits, combien faut il de comparateurs ? Quels sont les avantages et inconvénients comparés des convertisseurs série et parallèle ?
- La figure 4 représente le signal numérisé  $s_N$  en fonction de la tension à numériser  $u$ .
35. Que vaut  $N$  dans l'exemple donné ?
  36. Donner les valeurs de  $s_N$  en base 2 et de  $u_N$  pour  $u = 1,28$  V.
  37. Quelle type d'erreur induit la numérisation ? Préciser l'écart maximal entre la valeur de la tension numérisée  $u_N$  et  $u$ .

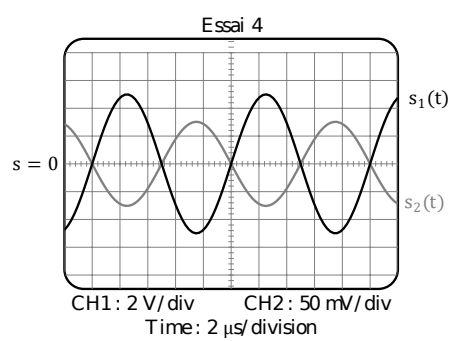
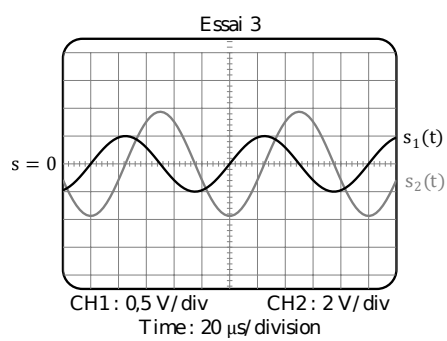
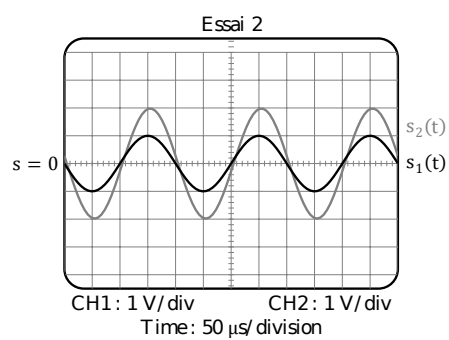
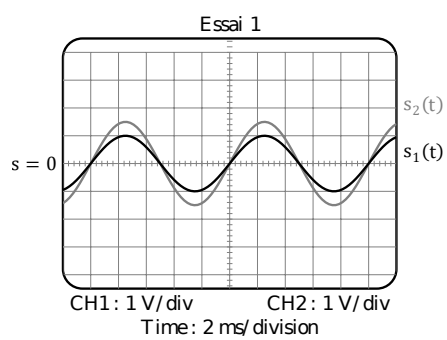


On souhaite enregistrer un signal musical avec une haute fidélité. Le signal à échantillonner possède des harmoniques très élevées, qui risquent de nuire à la qualité de l'enregistrement. Avant la numérisation, le signal doit être filtré. Un document en annexe fournit les spécifications du LMF100, qui est un composant intégré. Il réalise différents types de filtrages, selon les branchements qu'on lui applique. Dans ce document, la grandeur  $s$  est égale à  $j\omega$  où  $\omega$  est la pulsation des signaux sinusoïdaux et  $j^2 = -1$ .

38. Quel type de filtre doit-on utiliser et pourquoi ? Préciser la bande de fréquences qu'il doit sélectionner.
39. Proposer une valeur de la fréquence d'échantillonnage adaptée à la situation.

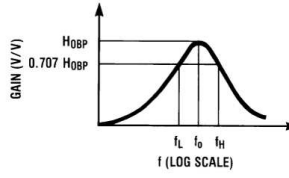
Quatre essais ont été réalisés en laboratoire, à quatre fréquences différentes, avec un filtre d'ordre 2 réalisé avec le LMF100. Sur les quatre oscillogrammes relevés figure ci-dessous,  $s_2(t)$  désigne la tension de sortie du filtre et  $s_1(t)$  la tension d'entrée.

40. Dédurre de ces quatre essais la nature du filtre testé, ainsi que ses caractéristiques : fréquence propre, fréquence de coupure, facteur de qualité. Expliciter clairement la démarche et commenter les résultats obtenus.

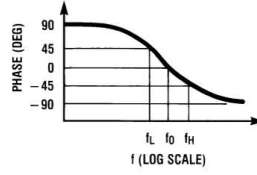


### Filtres réalisables avec le LMF100

$$H_{BP}(s) = \frac{H_{OBP} \frac{\omega_0}{Q} s}{s^2 + \frac{s\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$



(a)



(b)

FIGURE 1. 2nd-Order Bandpass Response

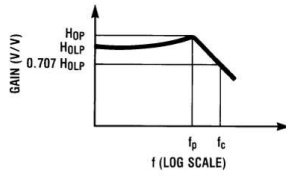
$$Q = \frac{f_0}{f_H - f_L}; f_0 = \sqrt{f_L f_H}$$

$$f_L = f_0 \left( \frac{-1}{2Q} + \sqrt{\left(\frac{1}{2Q}\right)^2 + 1} \right)$$

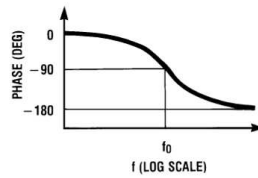
$$f_H = f_0 \left( \frac{1}{2Q} + \sqrt{\left(\frac{1}{2Q}\right)^2 + 1} \right)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0$$

$$H_{LP}(s) = \frac{H_{OLP} \omega_0^2}{s^2 + \frac{s\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$



(a)



(b)

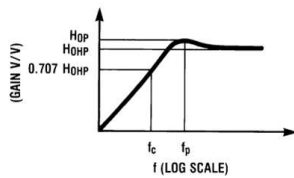
FIGURE 2. 2nd-Order Low-Pass Response

$$f_c = f_0 \times \sqrt{\left(1 - \frac{1}{2Q^2}\right) + \sqrt{\left(1 - \frac{1}{2Q^2}\right)^2 + 1}}$$

$$f_p = f_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$$

$$H_{OP} = H_{OLP} \times \frac{1}{Q \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}}$$

$$H_{HP}(s) = \frac{H_{OHP} s^2}{s^2 + \frac{s\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$



(b)

$$f_c = f_0 \times \left[ \sqrt{\left(1 - \frac{1}{2Q^2}\right) + \sqrt{\left(1 - \frac{1}{2Q^2}\right)^2 + 1}} \right]^{-1}$$

$$f_p = f_0 \times \left[ \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} \right]^{-1}$$

$$H_{OP} = H_{OHP} \times \frac{1}{Q \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}}$$

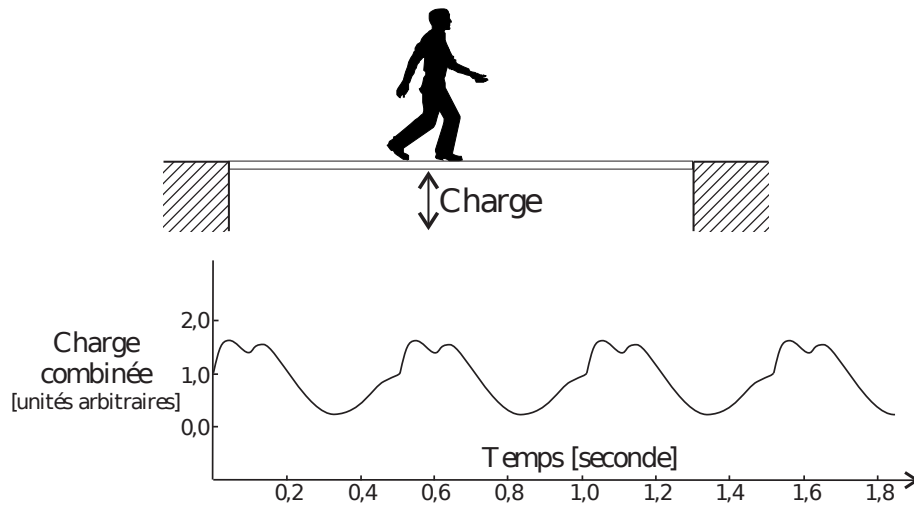
FIGURE 3. 2nd-Order High-Pass Response



**Spécification du microprocesseur i7-4500U**

Status	Launched
Launch Date	Q3'13
DMI2	5 GT/s
Processor Number	i7-4500U
# of Cores	2
# of Threads	4
Clock Speed	1.8 GHz
Max Turbo Frequency	3 GHz
Intel® Smart Cache	4 MB
Instruction Set	64-bit
Instruction Set Extensions	SSE 4.1/4.2, AVX 2.0
Lithography	22 nm
Max TDP	15 W
Recommended Customer Price	TRAY: \$393.00
Max Memory Size (dependent on memory type)	16 GB
Memory Types	DDR3L-1333/1600; LPDDR3-1333/1600
# of Memory Channels	2
Max Memory Bandwidth	25.6 GB/s
PCI Express Revision	2.0
PCI Express Configurations <sup>†</sup>	4x1, 2x4
Max # of PCI Express Lanes	12
Max CPU Configuration	1
T <sub>JUNCTION</sub>	100°C
Package Size	40mm x 24mm x 1.5mm
Sockets Supported	FCBGA1168
Low Halogen Options Available	See MDDS

## Numérisation d'un signal de marche



Afin d'étudier précisément les propriétés du forçage que constitue la marche d'un piéton, on réalise l'acquisition en laboratoire du signal correspondant à cette sollicitation.

41. Quel(s) type(s) de capteur(s) est-il envisageable d'utiliser pour obtenir un signal électrique issu de la marche d'un piéton ?

L'acquisition est effectuée sur des durées allant de quelques secondes à quelques minutes. Les signaux ainsi obtenus sont similaires mais pas parfaitement identiques. Chacun de ces signaux présente les caractéristiques essentielles du signal de la charge combinée représentée sur la figure ci-dessus. On calcule alors le spectre de ces signaux en les échantillonnant en  $N = 300$  points équidistants sur un intervalle  $[t_{\min}, t_{\max}]$ . Les différents spectres obtenus sont rassemblés sur la figure ci-dessous.

42. Analyser et interpréter aussi précisément que possible ces différents spectres. Sont-ils tous exploitables ? Lequel vous paraît le plus pertinent ? En déduire la (ou les) fréquence(s) caractéristique(s) de la marche étudiée. Était-ce qualitativement prévisible ?

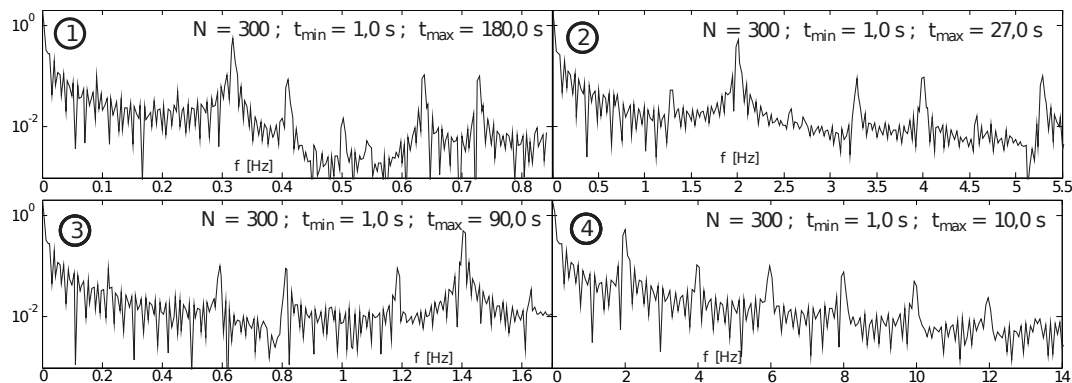


Figure – Spectres des signaux correspondants à la marche d'un piéton

## Extraction d'un signal faible du bruit par effet de moyenne

Un détecteur enregistre un spectre en le décomposant sur plusieurs canaux numérotés de 1 à  $N$ . Chacun de ces canaux représente une bande de fréquence très étroite. Lors d'une séquence d'acquisition, le détecteur enregistre une série de valeurs  $x_k = s_k + b_k$  pour  $k$  variant de 1 à  $N$ . L'éventuel signal  $s_k$  est celui dont la détection est souhaitée. Le signal  $b_k$  est un parasite appelé bruit ; différents phénomènes physiques sont à l'origine du bruit, à commencer par l'agitation thermique des porteurs de charges. Le bruit considéré,  $b_k$ , prend une valeur aléatoire de moyenne  $b$  indépendante de  $k$ . La dispersion autour cette moyenne est supposée gaussienne d'écart-type  $\sigma$  ; c'est-à-dire que pour un grand nombre  $n$  d'acquisitions indépendantes dont les résultats sont ajoutés canal par canal, la valeur moyenne du signal sommé sera  $nb$  et l'ordre de grandeur de la dispersion de chaque côté de cette valeur moyenne sera  $\sqrt{n}\sigma$ .

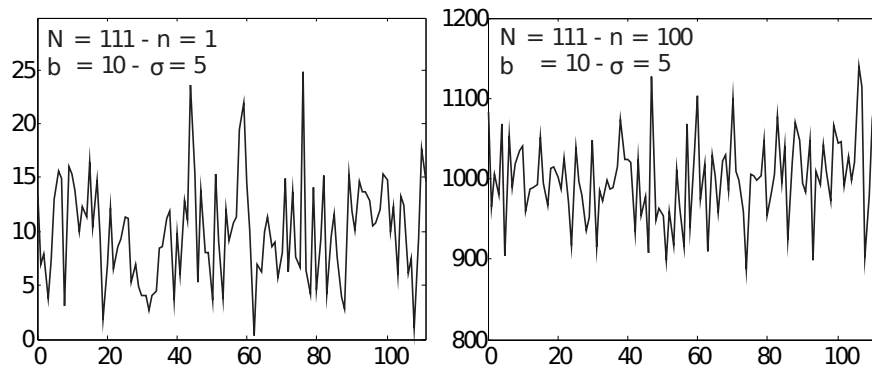


Figure e – Acquisition d'un bruit ( $s_k = 0$  pour tout  $k$ ) sur  $N = 111$  canaux avec  $b = 10$  et  $\sigma = 5$ . La figure de gauche représente 1 acquisition, celle de droite la somme canal par canal de 100 acquisitions indépendantes.

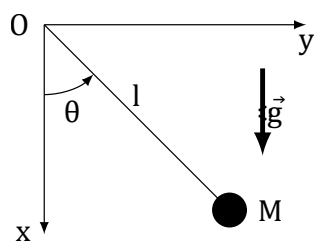
43. Représenter l'allure du graphe que l'on pourrait obtenir après 2500 acquisitions, l'axe des ordonnées étant clairement gradué dans sa partie utile.

On considère maintenant qu'en plus du bruit gaussien d'amplitude  $b = 10$  et d'écart-type  $\sigma = 5$  présent constamment sur chaque canal, un signal utile non nul, constant et d'amplitude 1 est présent uniquement sur les canaux 34 et 67 à chaque acquisition.

44. Le signal utile est-il détectable par une seule acquisition ? Représenter l'allure de la somme canal par canal de 2500 acquisitions. Le signal est-il devenu détectable ?
45. Dans le cadre d'un bruit de dispersion  $\sigma$  et d'amplitude  $b$ , estimer le nombre  $n$  d'acquisitions permettant de faire apparaître un signal constant d'amplitude  $s_p$  dans le canal  $p$ .

## Méthodes de mesure du champ de pesanteur à l'aide de pendules

Pour déterminer le champ de pesanteur localement, les géophysiciens disposent d'instruments appelés gravimètres. Le premier gravimètre utilisé historiquement a été un pendule.



**Figure pendule**

Les géophysiciens utilisent comme unité de mesure du champ de pesanteur le gal avec  $1 \text{ gal} = 1,00 \text{ cm.s}^{-2}$ .

46. Pourquoi l'utilisation d'un pendule simple (figure ci-dessus) permet-elle de remonter à la mesure de l'intensité du champ de pesanteur  $g$  ?
47. En 1672 l'astronome Richter part à Cayenne en Guyane avec une horloge à pendule réglée à Paris (pendule qui bat la seconde), il s'aperçoit qu'elle retarde de 2 min 28 s par jour. En déduire la valeur de  $g$  à Cayenne (à Paris  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ). Pour quelle(s) raison(s) les valeurs de  $g$  sont-elles différentes à Cayenne et à Paris ? L'altitude de Paris varie entre 28 et 131 m et l'altitude de Cayenne entre 0 et 105 m.
48. On admet que l'incertitude de mesure provient essentiellement de la mesure de la période  $T$ . Quelle devrait être l'incertitude sur la mesure de la période du pendule utilisé par Richter pour que l'incertitude sur la mesure de  $g$  soit égale à  $1 \text{ } \mu\text{gal}$  (ordre de grandeur de la précision des gravimètres actuels).