

SESSION 2021

**CAPES
CONCOURS EXTERNE
ET CAFEP**

SECTION : PHYSIQUE-CHIMIE

EXPLOITATION D'UN DOSSIER DOCUMENTAIRE

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.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours externe du CAPES de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E B E	1 5 0 0 F	1 0 2	7 4 2 1

► **Concours externe du CAFEP/CAPES de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E B F	1 5 0 0 F	1 0 2	7 4 2 1

ÉPREUVE D'EXPLOITATION D'UN DOSSIER DOCUMENTAIRE

Remarques générales

Les questions proposées sont de natures variées : restitution de connaissances, question ouverte, analyse de documents, résolution de problème, etc. Le barème tient compte de la durée nécessaire à la résolution des différentes questions.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.

Le sujet comporte quatre parties indépendantes. Les annexes sont regroupées en fin de sujet.

Le sujet traite des thèmes suivants :

- Partie 1 - L'alimentation électrique d'une maison
- Partie 2 - Vers une maison basse consommation
- Partie 3 - Communications par ondes électromagnétiques dans la maison
- Partie 4 - Caractéristiques du son émis par un piano

Données :

- constante de Planck : $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ m}^2.\text{kg}.\text{s}^{-1}$
- célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m}.\text{s}^{-1}$
- loi de Wien : $\lambda_m T = 2898 \text{ K}.\mu\text{m}$
- permittivité du vide : $\epsilon_0 = 8,9 \times 10^{-12} \text{ F}.\text{m}^{-1}$
- valeur du champ de pesanteur à la surface de la Terre : $g \sim 10 \text{ m}.\text{s}^{-2}$

Données relatives au Soleil :

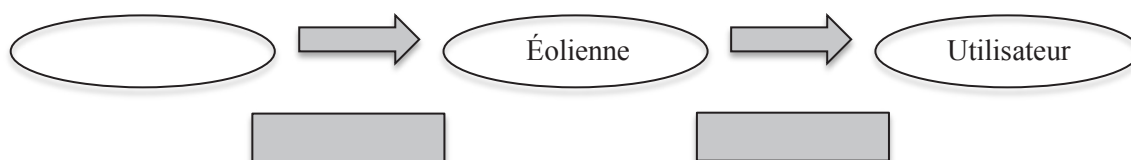
- rayon du Soleil : $R_S = 7,0 \times 10^5 \text{ km}$
- température moyenne de surface du Soleil : $T_S = 5500 \text{ }^\circ\text{C}$
- distance Soleil - Terre : $d_{ST} = 1,5 \times 10^8 \text{ km}$

Données relatives à la Terre et à son atmosphère :

- rayon de la Terre : $R_T = 6,4 \times 10^3 \text{ km}$
- épaisseur de l'atmosphère : $e = 30 \text{ km}$
- albédo : $A = 0,34$

Partie 1 – L'alimentation électrique d'une maison

1] Citer trois types de conversion sans combustion permettant d'obtenir de l'énergie électrique ? Donner un exemple pour chacun d'eux. Reproduire et compléter la chaîne énergétique suivante :



Le Soleil : une source d'énergie inépuisable

L'énergie solaire provient d'un ensemble de réactions nucléaires se produisant dans le Soleil. Un enseignant propose à une classe de seconde composée de 34 élèves, le questionnaire à choix multiple (QCM) reproduit en annexe 1, plusieurs réponses étant possibles.

2] Répondre à ce QCM.

3] L'enseignant regroupe les résultats de la classe dans le tableau ci-dessous (les nombres correspondent au nombre des réponses cochées) :

	A	B	C
Q1	20	0	14
Q2	34	0	0
Q3	0	34	17
Q4	0	25	9

Quelles confusions sont mises en évidence avec les questions Q1 et Q3 ? Interpréter les réponses de la question Q4 et proposer une remédiation.

4] Rayonnement solaire à la surface de la Terre

La loi de Stefan relie la puissance radiative surfacique φ émise par un corps noir à sa température T : $\varphi = \sigma \cdot T^4$, où σ est la constante de Stefan valant $5,7 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$.

Quelle est l'unité de φ ? Déterminer littéralement puis numériquement la puissance radiative totale émise par le Soleil, puis la puissance radiative surfacique reçue par la Terre de la part du Soleil en supposant que le Soleil se comporte comme un corps noir.

5] Effet de serre atmosphérique

Dans le cadre d'un modèle simple, l'atmosphère qui entoure la Terre peut être assimilée à une couche sphérique de même centre que celui de la Terre.

On formule les hypothèses simplificatrices suivantes :

- la surface de l'atmosphère est confondue avec celle de la Terre (1) ;
- la Terre se comporte comme un corps noir (2) ;
- l'atmosphère se comporte comme un corps noir pour le rayonnement terrestre (3) ;
- on définit l'albédo d'une surface comme le rapport de la puissance lumineuse réfléchie par cette surface à la puissance lumineuse incidente. L'albédo de la Terre entourée de l'atmosphère peut se décomposer en deux parties : l'albédo de l'atmosphère et l'albédo de la surface terrestre. On note A l'albédo de cet ensemble {atmosphère - Terre}. On suppose que la réflexion du rayonnement solaire se produit au niveau de l'interface espace/atmosphère (4) ;
- l'atmosphère transmet alors, sans aucune absorption, le rayonnement solaire qui n'a pas été réfléchi vers l'espace (5).

À partir d'un schéma mettant en évidence les différents échanges radiatifs mis en jeu, écrire les bilans radiatifs pour la Terre et pour l'atmosphère. En déduire la valeur de la température moyenne de la surface terrestre. En réalité, cette température est estimée à 15°C . Quelles peuvent être les causes de l'écart entre ces deux valeurs ?

La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque transforme l'énergie solaire en énergie électrique. Des cellules photovoltaïques identiques sont associées en série afin, par exemple, d'obtenir une tension de 12 V. On dispose alors d'un panneau photovoltaïque.

Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

6] On dispose du matériel suivant : une cellule photovoltaïque de surface 72 cm^2 , une lampe de bureau (46 W), deux multimètres, une boîte de résistances, des fils électriques, un luxmètre. Proposer le schéma d'un montage électrique permettant d'acquérir les grandeurs utiles pour tracer la caractéristique $I_c = f(U_c)$ de la cellule photovoltaïque pour un éclairement donné. Établir un protocole.

Dans l'annexe 2 figure la courbe $I_c = f(U_c)$ relative à la cellule photovoltaïque étudiée ; après conversion de l'éclairement lumineux mesuré par le luxmètre au niveau de la cellule, on obtient un éclairement énergétique $E = 700 \text{ W.m}^{-2}$.

7] Dans les conditions d'éclairement précédent, déterminer la valeur de la tension U_{CO} aux bornes de la cellule en circuit ouvert puis la valeur de l'intensité I_{CC} traversant la cellule court-circuitée. Expliquer alors qualitativement pourquoi la puissance délivrée par la cellule passe par un maximum.

8] Rendement d'une cellule photovoltaïque

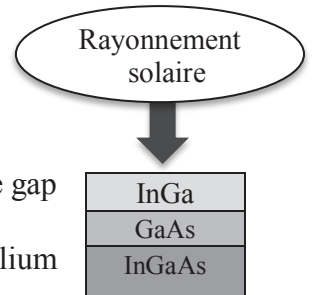
La courbe de la puissance disponible aux bornes de la cellule éclairée, $P = g(U_c)$, est donnée dans l'annexe 2. L'éclairement énergétique E est toujours égal à 700 W.m^{-2} .

Définir puis déterminer numériquement le rendement maximal de la cellule étudiée. Commenter.

9] Résolution de problème : choix d'une cellule photovoltaïque performante

Il existe entre autres deux types de cellule photovoltaïque :

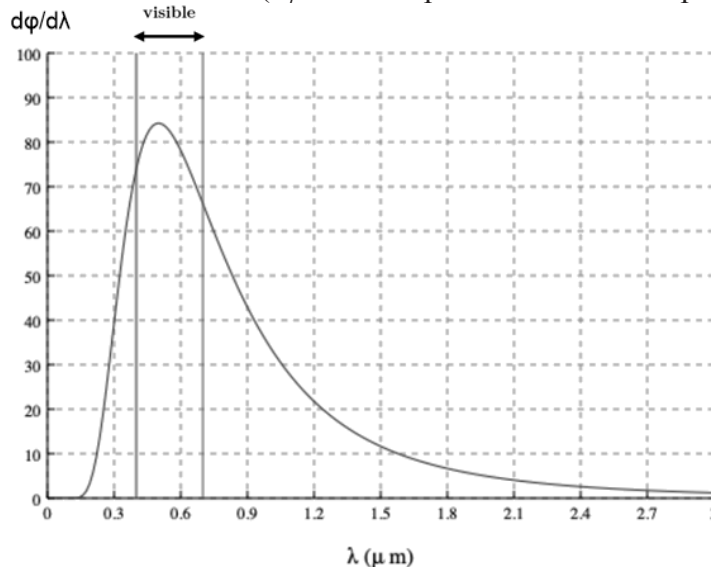
- la cellule « au silicium », fabriquée à partir d'une couche très mince de silicium (matériau semi-conducteur, de gap $E_g = 1,1 \text{ eV}$);
- la cellule « triple jonction », constituée de trois couches de semi-conducteurs de gaps différents :
 - la couche supérieure en phosphore d'indium-gallium InGa de gap $1,8 \text{ eV}$;
 - puis une couche intermédiaire en arséniure de gallium GaAs de gap $1,4 \text{ eV}$;
 - et enfin une couche inférieure en arséniure d'indium-gallium InGaAs de gap $1,0 \text{ eV}$.



Lorsqu'un photon de la lumière solaire arrive sur une couche, il est absorbé si son énergie est supérieure à celle du gap. Sinon, le photon traverse la couche. L'absorption du photon par une couche permet l'« arrachement » d'un électron. Les électrons « arrachés » peuvent alors se déplacer : c'est l'effet photoélectrique découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Ils sortent de la cellule pour aller dans un circuit extérieur : la cellule est équivalente à un générateur de courant.

On admet que l'énergie électrique maximale récupérable, pour un photon absorbé, est égale à la valeur du gap ; l'énergie en excès est dissipée sous forme d'énergie thermique.

La densité spectrale de flux surfacique $d\phi/d\lambda$ associée au rayonnement solaire au niveau de la surface de la Terre est donnée par la courbe ci-dessous ($d\phi/d\lambda$ est exprimée en MW.m^{-2} par μm).



Déterminer pour les deux types de cellules l'énergie maximale récupérable lorsque trois photons, de longueurs d'onde respectives $\lambda_1 = 1,0 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0,8 \mu\text{m}$ et $\lambda_3 = 0,4 \mu\text{m}$, arrivent en même temps sur chacune des cellules.

Les deux cellules sont maintenant éclairées par la lumière solaire. Identifier, en justifiant la réponse, celle qui est la plus performante.

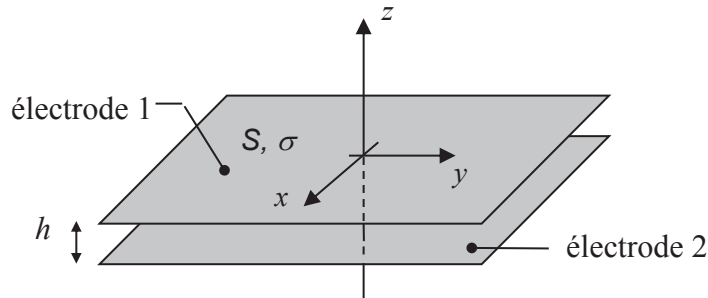
La réponse à cette question nécessite de l'initiative. Le candidat est invité à consigner ses pistes de recherche et à y consacrer un temps suffisant. La qualité de la démarche choisie et son explicitation seront évaluées tout autant que le résultat final.

Capteur de champ électrique

L'alimentation électrique d'une maison se fait également via le réseau par l'intermédiaire des lignes électriques. Ces dernières rayonnent un champ électromagnétique. Pour vérifier que le champ électrique rayonné n'est pas supérieur aux normes de sécurité (la norme française est $5 \times 10^3 \text{ V.m}^{-1}$), il faut disposer de capteurs de champ électrique. On se propose d'étudier un tel capteur, basé sur un effet capacitif et placé dans la maison.

Compte tenu de la valeur de la fréquence des champs électriques à mesurer ($f = 50 \text{ Hz}$), on suppose que l'étude peut être conduite dans le cadre de l'électrostatique.

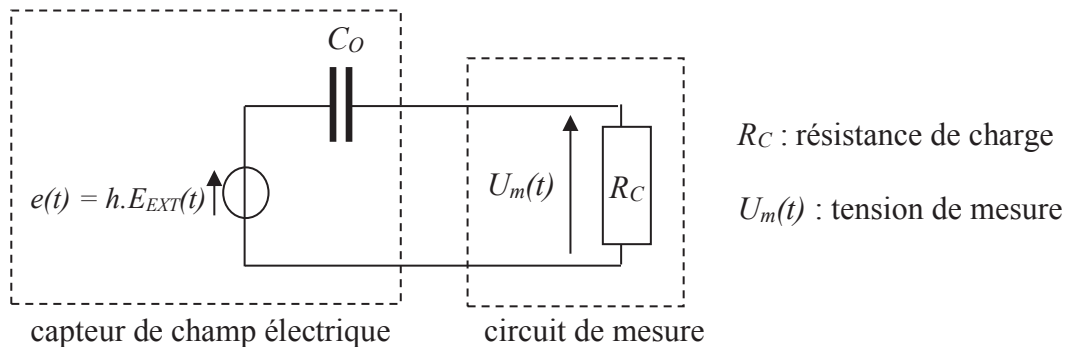
On considère un condensateur plan d'axe z . L'aire des électrodes est notée S . L'électrode 1 (potentiel V_1) porte une charge par unité de surface σ ($\sigma > 0$). L'électrode 2 (potentiel V_2) porte une charge par unité de surface $-\sigma$. Elles sont séparées par une distance h . Le condensateur peut être considéré comme infini dans les directions x et y , les effets de bord sont donc négligés.



10] Montrer que l'expression du champ électrique entre les armatures est $\vec{E}_{INT} = -\frac{\sigma}{\epsilon_0} \vec{e}_z$, où \vec{e}_z est un vecteur unitaire de l'axe des z . La différence de potentiel $U = V_1 - V_2$ aux bornes du condensateur s'écrit $U = Q/C_0$ où Q est la charge totale portée par l'électrode 1 et C_0 la capacité du condensateur. Déterminer l'expression de C_0 en fonction de S , h et ϵ_0 .

11] Ce dispositif est maintenant plongé dans un champ extérieur, variable dans le temps, $\vec{E}_{EXT}(t) = E_{EXT}(t) \vec{e}_z$ dont la mesure est envisagée. Montrer qu'alors $U = Q/C_0 - E_{EXT} \times h$.

12] Le dispositif peut alors être représenté par le schéma électrique suivant :



Déterminer l'équation différentielle vérifiée par $U_m(t)$.

13] Le champ électrique $E_{EXT}(t)$ varie sinusoïdalement à la pulsation $\omega = 2\pi f$. On se place en régime sinusoïdal forcé. Montrer que, si R_C est très supérieure à une valeur limite R_{LIM} , alors il est possible d'écrire : $U_m(t) = K \times E_{EXT}(t)$. Exprimer R_{LIM} en fonction de C_0 et ω , puis la constante K en fonction des données. Sachant que $h = 2 \text{ mm}$ et que l'amplitude de $U_m(t)$ mesurée est $0,8 \text{ V}$, les normes de sécurité sont-elles respectées pour l'habitation située en-dessous de la ligne électrique étudiée ?

Partie 2 – Vers une maison basse consommation

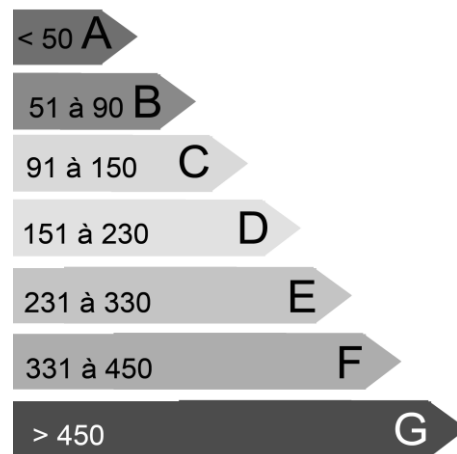
La maison étudiée est de forme carrée de plain-pied avec une surface au sol de 100 m^2 . Le toit de la maison est constitué de deux parties identiques, inclinées à 30° par rapport à horizontale, une face du côté nord, une autre du côté sud. La surface totale du toit est égale à 115 m^2 .

Diagnostic simplifié de performance énergétique

Au cours d'un diagnostic énergétique de la maison, il a été déterminé un flux thermique de 8 kW entre l'intérieur de la maison à 20°C et l'extérieur à 4°C .

Ces conditions climatiques représentent assez bien ce qu'il se passe en moyenne sur les 200 jours froids de l'année, les pertes des autres jours étant négligées.

14] Déterminer, en le justifiant, la catégorie de la maison en termes de performance énergétique.



Performance énergétique annuelle en kWh par m² de surface plancher

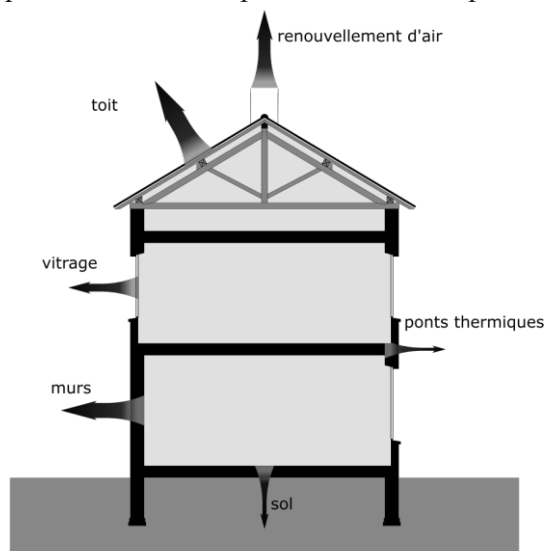
Baisser la température intérieure

Afin de diminuer sa facture énergétique, le propriétaire abaisse à 18°C la température intérieure de son domicile.

15] Calculer, en utilisant un modèle à expliciter, la valeur du nouveau flux thermique et en déduire, en pourcentage, la valeur de l'économie ainsi réalisée.

La suite de cette partie vise à étudier d'autres pistes pour limiter les déperditions thermiques de la maison.

Schématisations des déperditions thermiques d'une maison



Isoler le toit

L'objectif est de diviser par 20 le flux thermique associé aux déperditions par le toit en utilisant une couche de laine de verre fixée sur toute la surface du toit.

On rappelle que pour deux matériaux accolés, les résistances thermiques s'ajoutent et on suppose que, pour un écart de température de 14°C , le flux thermique transféré total est de 7 kW . Enfin, les déperditions par la toiture sont supposées correspondre à 30 % du flux thermique transféré total.

16] Recopier le tableau ci-contre sur la copie puis le compléter. Rappeler l'expression de la résistance thermique d'un matériau d'épaisseur e , de section S et de conductivité thermique λ . En déduire la valeur de l'épaisseur de laine de verre (de conductivité thermique $\lambda = 3,0 \times 10^{-2} \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$) à fixer sur la totalité de la surface du toit pour diviser par 20 les pertes thermiques.

	Flux thermique transféré par le toit	Résistance thermique du toit
non isolé		
isolé		

Opter pour du double vitrage

La rénovation des simples vitrages est également une option pour améliorer la performance énergétique d'une maison. En moyenne, 38 % des pertes totales s'effectuent par les façades, et les fenêtres contribuent en grande partie à ces pertes. Le propriétaire envisage de remplacer les 10 m^2 de simple vitrage de coefficient de transmission thermique $U_{\text{simple vitrage}} = 6,5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ par du double vitrage plus performant de coefficient de transmission thermique $U_{\text{double vitrage}} = 2,8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. L'écart de température est toujours de $14 \text{ }^\circ\text{C}$ et le flux thermique transféré total est de 7 kW .

17] Calculer la valeur du flux thermique transféré par les façades $\Phi_{\text{façades}}$, puis par le simple vitrage Φ_{vitrage} . Est-ce cohérent avec l'affirmation couramment entendue : « les fenêtres contribuent en grande partie aux pertes thermiques d'une habitation » ?
Quelle relation relie $\Phi_{\text{façades}}$, Φ_{murs} (flux thermique transféré par les murs) et Φ_{vitrage} ? En déduire Φ_{murs} .

Flux thermique d'un double vitrage

Les murs sont conservés en l'état.

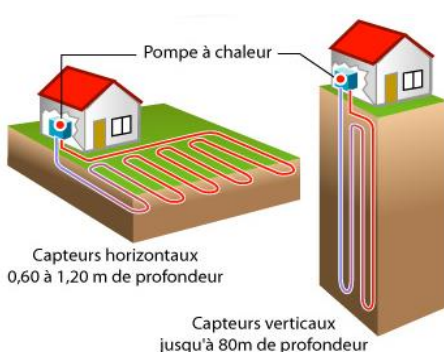
Le vitrage est remplacé par un double vitrage.

18] Calculer le flux thermique transféré à travers ce double vitrage Φ_{double} .
En déduire le flux thermique transféré par les nouvelles façades Φ_{nouveau} après mise en place du double vitrage.

19] Que vaut le flux thermique transféré total de la maison rénovée ? Quelle est la nouvelle catégorie de la maison en termes de performance énergétique ?

Se chauffer avec une pompe à chaleur

Le document ci-dessous permet d'envisager d'autres solutions énergétiques.



Pompe à chaleur sol : géothermie

① Une pompe à chaleur capte les calories présentes naturellement dans l'environnement et grâce à un compresseur, les porte à une température plus élevée qu'elle diffuse ensuite dans la maison. La pompe fonctionne à l'électricité, mais elle consomme peu : vous économisez jusqu'à 60 % sur votre facture de chauffage.

Une pompe à chaleur peut puiser son énergie dans l'eau, le sol ou l'air.

Une pompe à chaleur dite géothermique puise la chaleur contenue dans le sol.

Le coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur correspond au rapport de l'énergie thermique produite par l'énergie électrique consommée.

Extrait du site de L'ADEME : comprendre et choisir sa pompe à chaleur géothermie

Il est possible d'envisager l'installation d'une telle pompe à chaleur pour maintenir la température de la maison à $T_c = 18\text{ °C}$ alors que la température des capteurs verticaux en sous-sol est d'environ $T_f = 5\text{ °C}$. On a donc affaire à une machine ditherme. Le fluide utilisé est souvent le R-134a ($\text{CH}_2\text{F}-\text{CF}_3$).

20] Représenter la chaîne énergétique du système global {pompe à chaleur et sources thermiques} : les transferts seront notés W (travail électrique), Q_f (transfert thermique échangé avec la source froide), Q_c (transfert thermique échangé avec la maison). Préciser les signes des grandeurs W , Q_f et Q_c .
Montrer que le COP de la pompe à chaleur est inférieur ou égal à un COP maximal dont on donnera l'expression en fonction des températures à l'intérieur et à l'extérieur de la maison. Calculer numériquement ce COP maximal. Commenter le résultat.

Partie 3 – Communications par ondes électromagnétiques dans la maison

Dans cette partie, on se propose d'étudier les principales installations de communication utilisant la lumière dans une maison : la télévision et sa télécommande, la connexion à internet par la fibre optique.

Le téléviseur

Caractéristiques d'un écran numérique

Les deux principales caractéristiques d'une télévision sont la taille et la définition de son écran. La définition de l'écran, qui correspond au nombre total de pixels. Les couleurs sont codées en RVB.


21] Rappeler le principe du codage RVB. Donner les couleurs correspondant aux codages suivant en justifiant vos réponses : (255, 0, 0) ; (0, 0, 0) ; (255, 255, 0) ; (125, 125, 125). Calculer le nombre de couleurs différentes que peut générer un pixel de l'écran.

22] Une des conceptions initiales des élèves concernant la perception des couleurs est que la couleur d'un objet est une propriété de l'objet, elle ne dépend pas de la lumière qui éclaire l'objet. Proposer une activité à destination des élèves permettant de remettre en cause cette conception initiale. Les élèves disposent d'un écran numérique dont ils peuvent définir la couleur et d'objets de différentes couleurs.

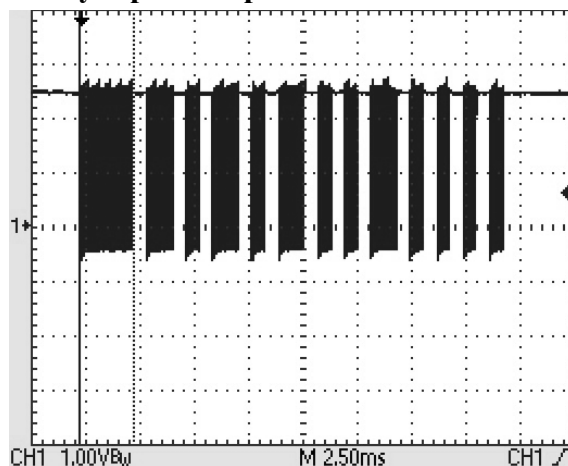
La télécommande du téléviseur

Pour piloter ce téléviseur, une télécommande équipée de diodes qui émettent des ondes électromagnétiques dans l'infrarouge, est utilisée.

Notice technique de la diode de la télécommande

Modèle LTE5228A		
	Angle d'ouverture	40°
	Tension	1,2 V
	Fréquence émise	$3,19 \times 10^{14}$ Hz
	Puissance	150 mW
	Dimension de l'optique	5 mm

Signal émis par la télécommande analysé par une photodiode



23] Définir la notion d'une onde progressive. Quelle est la principale différence entre une onde mécanique et une onde électromagnétique ? Justifier, à l'aide des documents fournis, que le rayonnement émis par la télécommande correspond bien à un rayonnement infrarouge.

24] Le signal émis par la télécommande est analysé par une photodiode reliée à un oscilloscope. Le signal ainsi obtenu peut-il être considéré comme numérique ? Justifier.

Transmission par fibre optique

Il est possible d'installer une fibre optique pour optimiser le débit associé aux communications par le réseau internet.

25] Rappeler une propriété d'un faisceau laser qui justifie l'usage de ce type de rayonnement électromagnétique pour la transmission d'information par fibre optique.

On considère que la fibre à saut d'indice utilisée est constituée d'un cœur cylindrique de rayon a , d'indice $n_1 = 1,510$ et d'une gaine de rayon extérieur b , d'indice $n_2 = 1,495$. Un schéma de cette fibre est donné en annexe 3.

Un rayon incident se propage dans l'air dans un plan axial de la fibre et arrive en I, à une distance $OI < a$ de l'axe, sur une extrémité de la fibre, sous un angle d'incidence i_0 . On note i_1 l'angle que fait le rayon avec la normale séparant la gaine du cœur.

26] Déterminer la condition sur i_1 pour qu'il y ait guidage dans la fibre. En déduire la condition sur i_0 , de la forme $i_0 < i_m$, permettant le confinement du rayon dans la fibre.

On appelle ouverture numérique $O.N.$ la quantité $\sin(i_m)$. Retrouver l'expression de $O.N.$ en fonction de n_1 et n_2 : $O.N. = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. Donner sa valeur numérique. Commenter.

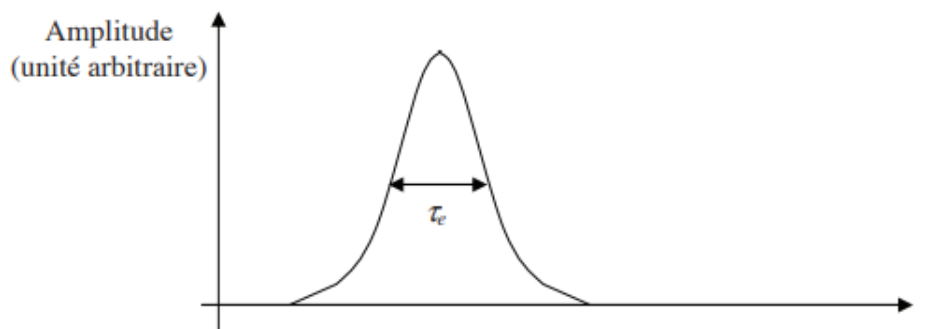
27] Un signal de sortie est exploitable tant que sa puissance P_{sortie} est supérieure à 1 % de la puissance $P_{entrée}$ du signal entrant.

Au bout de combien de kilomètres faudra-t-il prévoir une amplification optique intermédiaire pour garder des signaux satisfaisants en supposant que l'on se place à la longueur d'onde de 1550 nm. Commenter.

28] Résolution de problème : longueur maximale d'une fibre permettant de transmettre un signal sans recouvrement d'impulsions

Le codage binaire de l'information consiste à envoyer des impulsions lumineuses, appelées bits, périodiquement avec une fréquence f (exprimée en bits par seconde).

Ces impulsions lumineuses, de durée τ_e de l'ordre d'une centaine de femtosecondes (cf. graphe ci-dessous), sont formées chacune par un faisceau conique de rayons lumineux, de demi-angle au sommet i_m (on peut se référer à la question 26), entrant dans la fibre au point O. Les angles d'incidence étant différents, les durées associées pour parcourir la fibre sont différentes.



Impulsion lumineuse en entrée de fibre – $\tau_e \approx 100$ fs

En estimant la durée d'une impulsion en sortie de la fibre, évaluer la longueur maximale de fibre que l'on peut utiliser pour transmettre correctement un signal avec un débit de 100 Mbits.s^{-1} .

La réponse à cette question nécessite de l'initiative. Le candidat est invité à consigner ses pistes de recherche et à y consacrer un temps suffisant. La qualité de la démarche choisie et son explicitation seront évaluées tout autant que le résultat final.

Partie 4 - Caractéristiques du son émis par un piano

On se propose d'étudier le son émis par un piano ainsi que les cordes permettant cette émission.

Travaux pratiques

Un enseignant d'une classe de terminale Sciences et Technologies de Laboratoire (STL) propose à ses élèves l'énoncé de travaux pratiques présenté en annexe 4. Un compte rendu numérique de la part des élèves est attendu par l'enseignant ; un exemple est donné en annexe 6.

29] Répondre aux questions de l'énoncé de travaux pratiques de l'annexe 4 en utilisant les graphes expérimentaux obtenus en annexe 6.

30] Annoter le compte rendu fourni dans l'annexe 6, en relevant les éventuelles erreurs et en formulant des conseils utiles à l'élève pour progresser. Ce compte rendu annoté est à **rendre par le candidat avec sa copie**.

31] En annexe 5 figure le début d'un programme écrit en langage Python permettant d'obtenir le signal temporel d'un son ainsi que son spectre en fréquence.

Quelle modification à ce programme pourriez-vous demander aux élèves afin qu'ils s'approprient mieux le modèle de décomposition spectrale utilisé ici ?

Le piano à cordes

Lorsque l'instrumentiste frappe une touche du clavier d'un piano à cordes, celle-ci déclenche un mécanisme qui actionne à son tour un marteau qui vient frapper une corde fixée à ses deux extrémités. Celle-ci entre alors en vibration libre tant que la touche est enfoncée. On s'intéresse aux vibrations libres d'une corde du piano.

On suppose que la corde est sans raideur et inélastique et on néglige les effets de la pesanteur.

La corde, de masse linéique μ , est tendue avec la tension T_0 . Au repos, la corde est rectiligne et parallèle à un axe horizontal (Ox). On étudie les petits mouvements plans transversaux de la corde autour de sa position d'équilibre. On note $y(x, t)$ le déplacement transversal du point de la corde situé à l'abscisse x à l'instant t . L'axe (Oy) est l'axe vertical ascendant.

Mise en équation du mouvement d'une corde de piano dans le cadre du modèle décrit précédemment

32] Dans le cadre de l'approximation des petits mouvements et à partir de la deuxième loi de Newton appliquée à un petit élément de corde compris entre x et $x + dx$, montrer que la norme de la tension de la corde $T(x, t)$ en un point à l'abscisse x à l'instant t vaut T_0 .

Montrer alors que la fonction $y(x, t)$ vérifie l'équation aux dérivées partielles suivante :

$$\mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} ; \text{ on note } c_{\text{corde}} = \sqrt{\frac{T_0}{\mu}}.$$

Comment se nomme cette équation ? Ces ondes sont-elles transversales ou longitudinales ? Justifier.

33] On peut lire dans une documentation technique qu' « une corde de piano est tendue à 85 kg ». En déduire un ordre de grandeur de la valeur de la tension T_0 d'une corde. Pour une corde en acier donnant la note « La4 », le diamètre d de la corde est $d = 1,1 \text{ mm}$ et sa masse volumique ρ vaut $\rho = 7,8 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$. Calculer la valeur de la célérité c_{corde} des ondes sur la corde.

34] Résolution de problème : « Conception des cordes d'un piano »

Une corde est fixée à ses deux extrémités, $x = 0$ et $x = L$, ce qui impose les conditions aux limites : $y(0, t) = y(L, t) = 0$. La vibration d'une corde frappée peut être décrite à partir des modes d'ondes stationnaires.

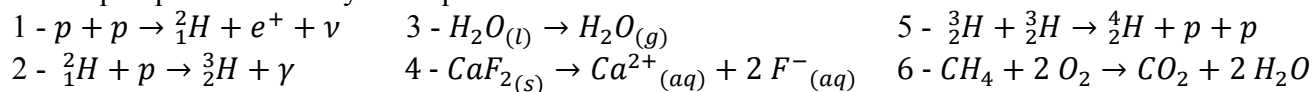
On s'intéresse à la hauteur du son produit. Les 88 notes d'un piano moderne s'échelonnent du « La 0 » (fréquence fondamentale $f = 28 \text{ Hz}$) au « Do 8 » (fréquence fondamentale $f = 4,2 \text{ kHz}$). Pour la note « Do 3 » la fréquence fondamentale vaut $f = 262 \text{ Hz}$, la valeur de la longueur de corde est $L = 65 \text{ cm}$.

Expliquer pourquoi les cordes correspondant aux notes les plus graves sont des cordes en acier autour desquelles on a enroulé un fil de cuivre.

La réponse à cette question nécessite de l'initiative. Des arguments quantitatifs sont attendus. Le candidat est invité à consigner ses pistes de recherche et à y consacrer un temps suffisant. La qualité de la démarche choisie et son explicitation seront évaluées tout autant que le résultat final.

Annexe 1**QCM**

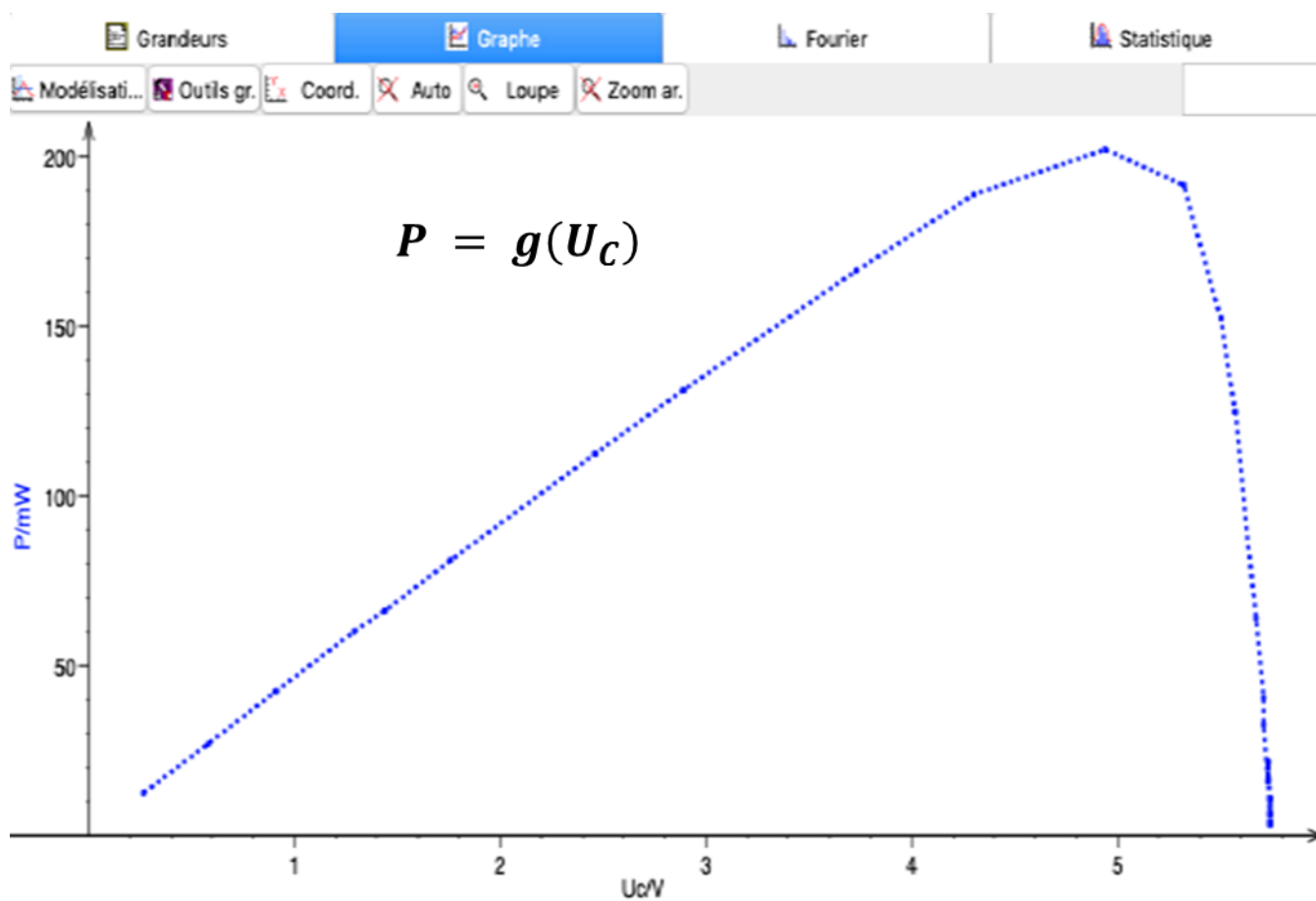
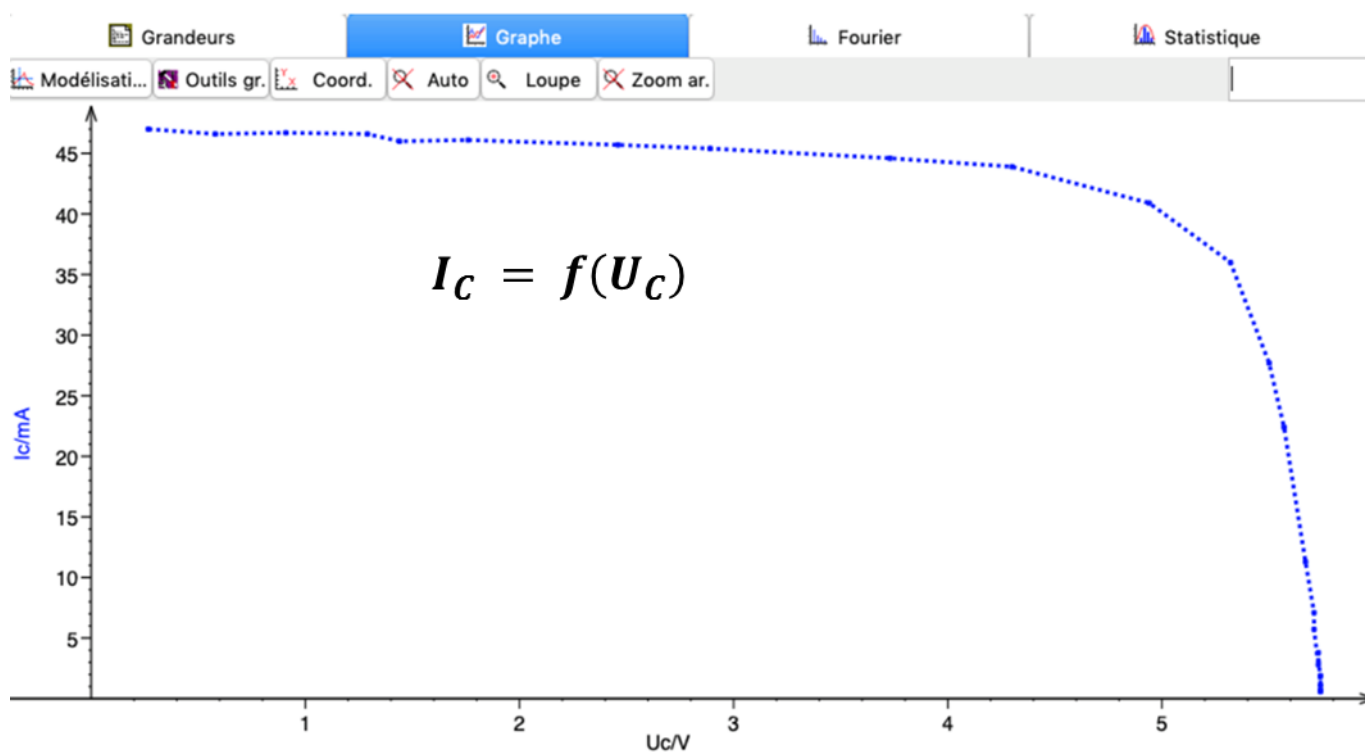
Voici quelques écritures symboliques modélisant certaines transformations :



- Q1.** L'équation 4 modélise une :
 A) fusion
 B) vaporisation
 C) dissolution
- Q2.** L'équation 3 modélise une transformation :
 A) physique
 B) chimique
 C) nucléaire
- Q3.** Deux nucléides isotopes ont même :
 A) nombre de neutrons
 B) nombre de protons
 C) nombre d'électrons
- Q4.** Le nucléide ${}^{238}_{92}\text{U}$ a pour isotope(s) :
 A) ${}^{239}_{94}\text{Pu}$
 B) ${}^{235}_{92}\text{U}$
 C) ${}^{238}_{94}\text{Pu}$

Annexe 2

La cellule photovoltaïque étudiée :



Annexe 3

Quelques données :

- l'atténuation en décibel d'un signal de puissance P à travers une chaîne de transmission est :

$$A_{dB} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{entrée}}{P_{sortie}} \right) ;$$

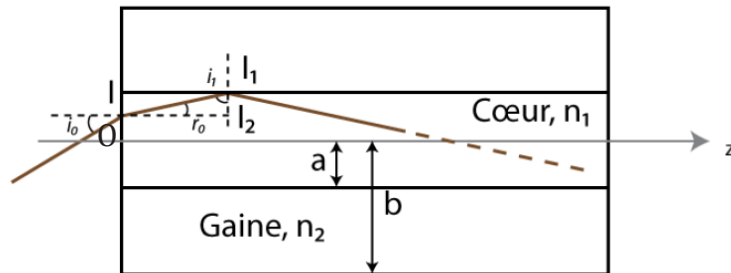
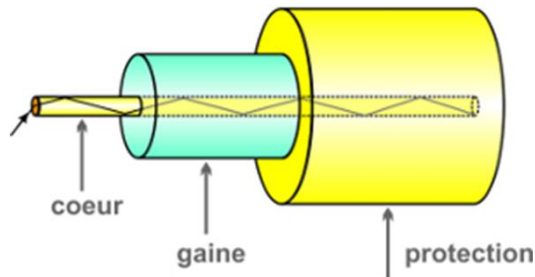
- pour une fibre optique de longueur L , on définit le coefficient d'atténuation en dB/km par :

$$A = A_{dB} / L ;$$

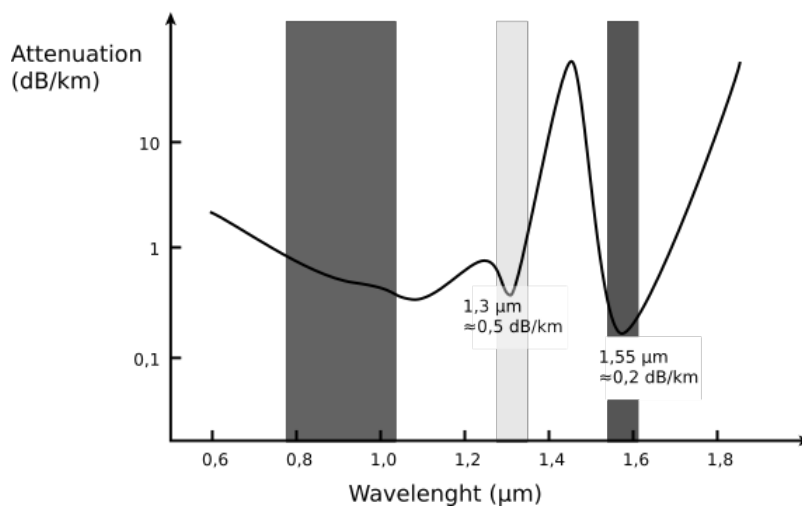
- 1 Tbit (téra-bit) = 10^{12} bits ;

- 1 octet = 8 bits ; 1 Mio = 2^{20} octets.

Transmission de la lumière dans une fibre à saut d'indice



Coefficient d'atténuation α (dB/km) des fibres en matériau de silice



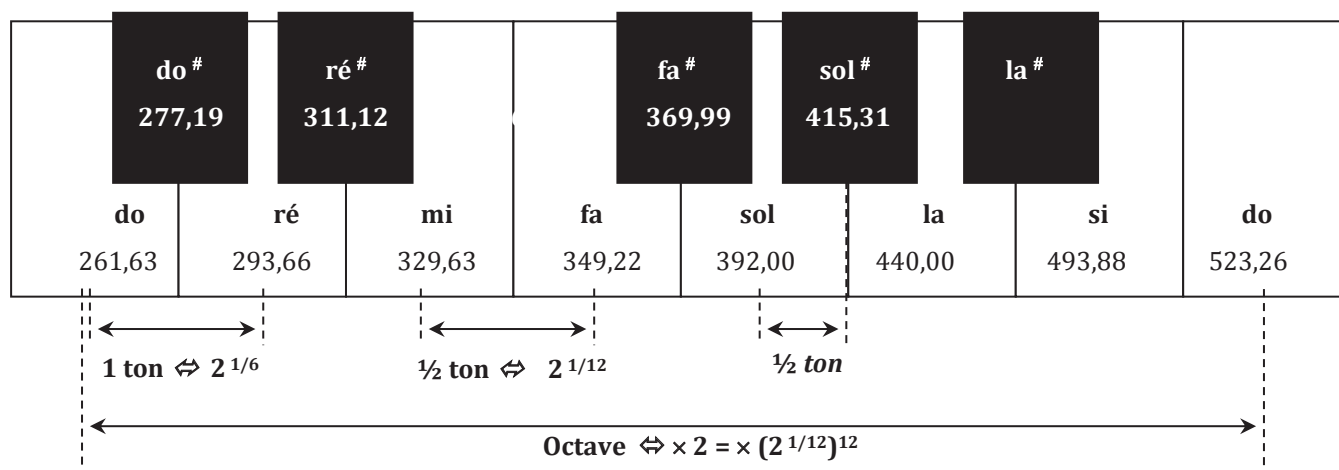
Annexe 4 : énoncé des travaux pratiques soumis aux élèves

TP - Synthétiser une note de piano

La gamme tempérée

Tout son musical (ou note) possède une fréquence fondamentale correspondant à sa hauteur. La gamme musicale est déterminée par les écarts de fréquences des notes de musique qui la constituent. Les combinaisons des notes doivent produire des effets sonores agréables. La gamme utilisée dans la musique occidentale classique et moderne a été élaborée par Jean-Sébastien Bach au XVII^{ème} siècle et est dite « tempérée ». Le schéma ci-dessous symbolise la troisième octave du clavier d'un piano.

↓ Fréquences en hertz des notes de la troisième octave



Deux notes dont le rapport de fréquences est 2 sont séparées par une octave. Une octave est divisée en douze intervalles de fréquence appelés demi-tons. Le rapport de fréquence de deux demi-tons consécutifs est égal à $2^{1/12}$.

1- Caractéristiques d'un son émis par un diapason

Ouvrir un logiciel d'acquisition. Produire un son à l'aide du diapason et l'enregistrer à l'aide d'un microphone.

1-a Mesurer la valeur de la période du signal temporel et en déduire celle de sa fréquence à l'aide des fonctionnalités du logiciel (zoom, réticule). Une copie de la courbe obtenue est attendue.

1-b Grâce au logiciel faire afficher le spectre en fréquence du signal précédent. Copier le graphe obtenu. Retrouver la valeur de la fréquence du son sur ce graphique.

1-c Le son obtenu est-il pur ou complexe ? Justifier votre réponse.

1-d Quelle est la hauteur du son produit par le diapason ? En déduire le nom de la note associée.

2- Analyse de la même note émise par un piano

Ouvrir le fichier son correspondant à la même note jouée par un piano. Analyser le signal temporel obtenu ainsi que le spectre en fréquence.

2-a Copier le graphe correspondant au spectre en fréquence.

2-b Le son obtenu est-il pur ou complexe ? Justifier votre réponse.

2-c La hauteur du son produit est-il bien le même que celui du diapason ? Justifier.

2-d Définir la notion d'harmonique et de timbre.

3- Synthétiser un son

Dans cette partie on se propose de modéliser par une fonction mathématique le signal temporel de la note émise par le piano à partir de son spectre en fréquence.

Une fonction sinusoïdale $u(t)$ dépendant du temps t peut s'exprimer sous la forme $u(t) = U_m \times \sin(2 \times \pi \times f \times t + \varphi)$, $u(t)$ est la tension, U_m l'amplitude, f la fréquence et φ sa phase à l'origine.

3-a Proposer une fonction mathématique permettant de modéliser le son du piano étudié à la question 2.

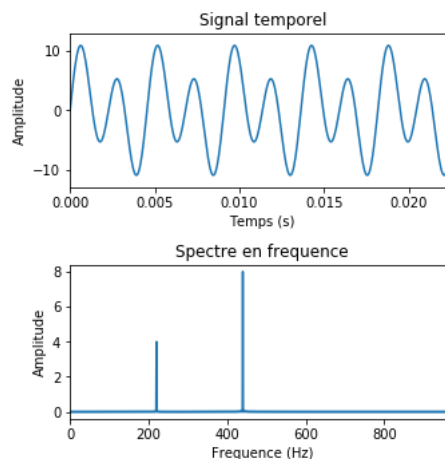
3-b Programmer cette fonction dans le logiciel d'acquisition. Visualiser son signal temporel et son spectre en fréquence puis écouter le son synthétisé. Obtenez-vous le même son que celui du piano ? Pourquoi ?

Annexe 5

Extrait d'un programme Python permettant de tracer le signal temporel d'un son et son spectre en fréquence.

```
1 # importation des Librairies
2 from numpy import pi, sin, linspace
3 from scipy.fftpack import fft, fftfreq
4 import matplotlib.pyplot as plt
5
6 # définition des constantes du signal
7 K = 2*pi      # facteur conversion période/fréquence
8 A0 = 4        # amplitude fréquence fondamentale
9 A1 = 8        # amplitude première harmonique
10 f0 = 220     # fréquence fondamentale (Hz)
11
12 # définition temporelle du signal
13 t0 = 0       # début de l'acquisition du signal
14 t1 = 1       # fin de l'acquisition (s)
15
16 # définition des paramètres d'échantillonnage
17 FreqEch = 20480 # fréquence d'échantillonnage
18 PerEch = 1/FreqEch # période d'échantillonnage
19 N = FreqEch*(t1 - t0) # nombre de points échantillonnés sur l'intervalle
20
21 # définition du signal temporel
22 t = linspace(t0, t1, N) # définition du temps
23 signal = A0*sin(f0*K*t) + A1*sin(2*f0*K*t)
24
25 # définition du spectre en fréquence
26 signal_FFT = fft(signal)/FenAcq # spectre en fréquence
27
28 #Tracé du graphique (non donné ici)
```

Copie de la fenêtre de la console lors de l'exécution du programme



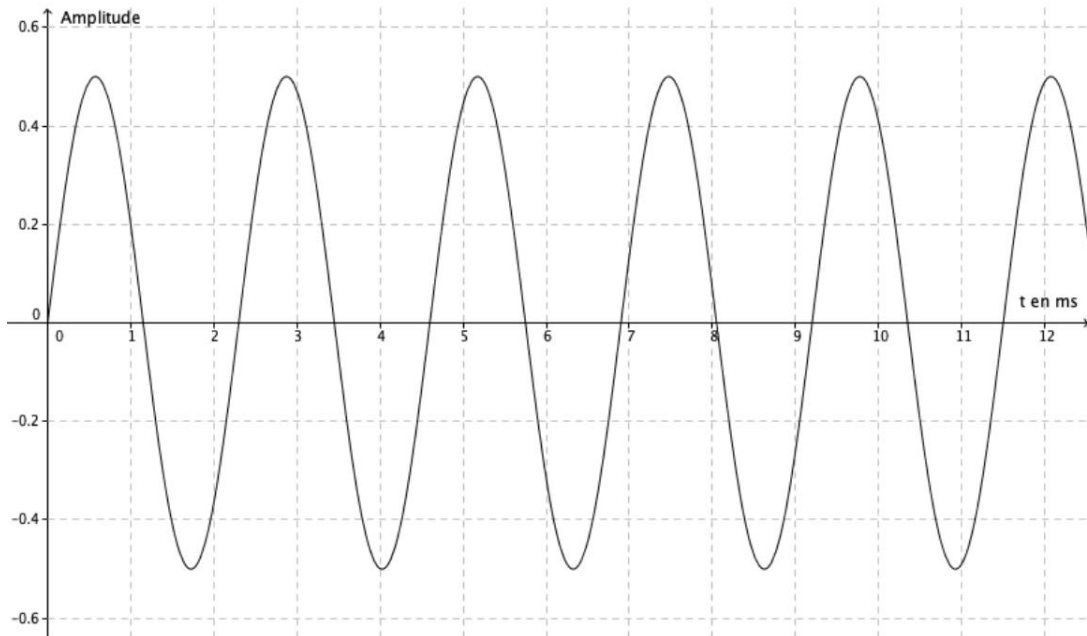
NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

À RENDRE PAR LE CANDIDAT AVEC SA COPIE

Annexe 6 : copie d'élève
TP

1) Caractéristiques d'un son émis par un diapason

1-a Voici la courbe que l'on obtient :

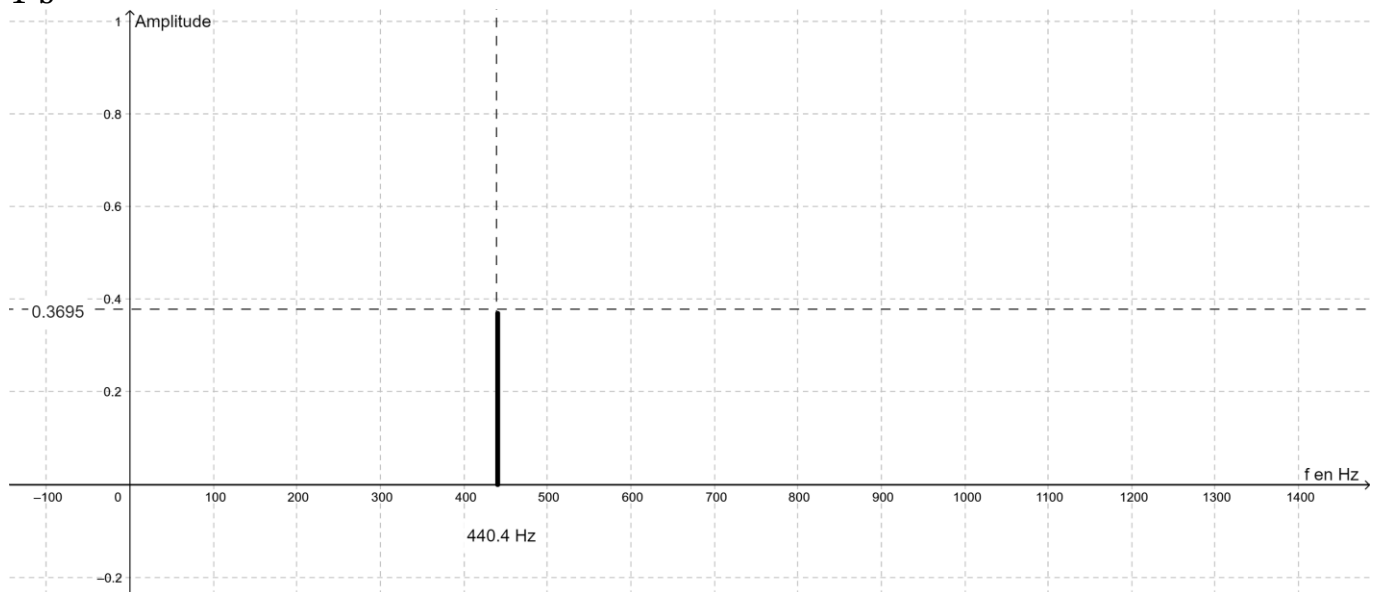


À l'aide du réticule on mesure 1 période : $T = 2,3$ ms.

On en déduit la fréquence.

$$f = 1/T = 1/2,3 = 0,435 \text{ Hz.}$$

1-b



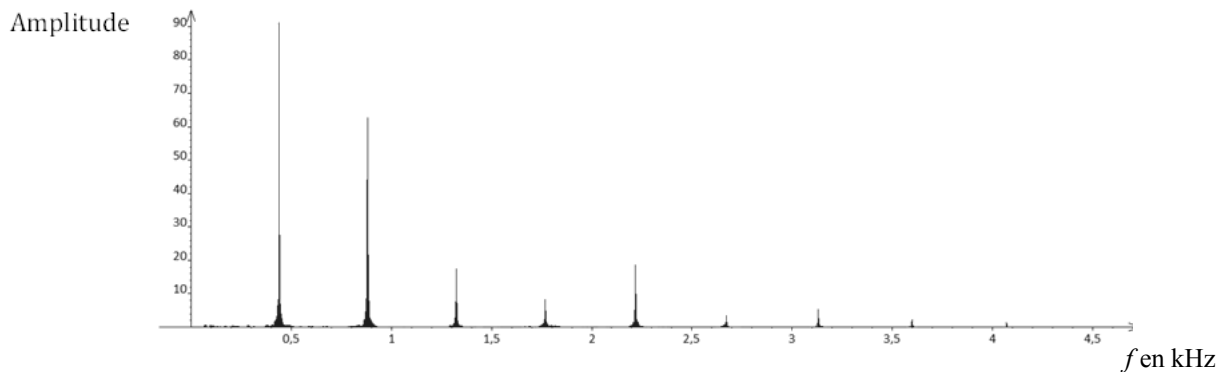
Le spectre en fréquence ne présente qu'un seul pic à 440,4 Hz.

Tournez la page S.V.P.

- 1-c Le son émis par le diapason est un son pur car le signal est périodique.
1-d La hauteur du son est 0,3695 et la note est proche du « la » (440 Hz).

2) Analyse de la même note émise par un piano

2-a



- 2-b Le son du piano est un son complexe car son signal temporel n'est pas périodique.
2-c Le son n'est pas de même hauteur que le diapason car la hauteur du premier pic est différente (0,3695 au lieu de 90).
2-d Un harmonique est un son de fréquence multiple. Le timbre est ...

3-a Voici une fonction mathématique permettant de modéliser ce son :

$$u(t) = U1 \times \sin(2 \times \pi \times 440 \times t) + U2 \times \sin(2 \times \pi \times 880 \times t).$$

3-b J'ai rentré cette fonction dans le logiciel mais je n'obtiens aucun son. Le logiciel m'indique que la formule est fausse. Je ne comprends pas pourquoi.