Ce document a été mis en ligne par l'organisme FormaV©

Toute reproduction, représentation ou diffusion, même partielle, sans autorisation préalable, est strictement interdite.

Pour en savoir plus sur nos formations disponibles, veuillez visiter :
www.formav.co/explorer

BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR

TECHNIQUES PHYSIQUES POUR L'INDUSTRIE ET LE LABORATOIRE

U3 - ÉPREUVE DE SCIENCES PHYSIQUES

SESSION 2017

_____

Durée : 4 heures
Coefficient : 4

_____

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

Matériel autorisé :
Toutes les calculatrices de poche y compris les calculatrices programmables, alphanumériques ou à écran graphique à condition que leur fonctionnement soit autonome et qu'il ne soit pas fait usage d'imprimante (Circulaire n°99-186, 16/11/1999).

CE SUJET COMPORTE TROIS EXERCICES **INDÉPENDANTS** :

EXERCICE 1 : OPTIQUE ..... pages 3/23 à 8/23
EXERCICE 2 : MÉCANIQUE ..... pages 9/23 à 14/23
EXERCICE 3 : ÉLECTRICITÉ ..... pages 15/23 à 19/23

Documents à rendre et à agrafer avec la copie :

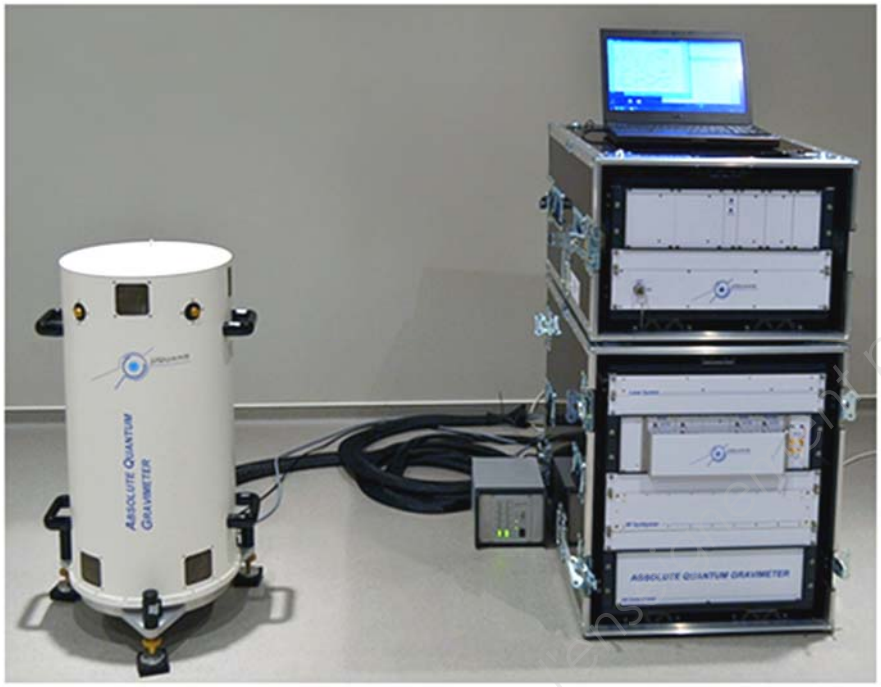
- Document réponse n° 1 (partie optique) ..... page 20/23
- Document réponse n° 2 (partie mécanique) ..... page 21/23
- Documents réponses n^{os} 3 et 4 (partie électricité) ..... page 22/23
- Document réponse n° 5 (partie électricité) ..... page 23/23

Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Le sujet se compose de 23 pages, numérotées de 1/23 à 23/23.

S'il apparaît au candidat qu'une donnée est manquante ou erronée, il pourra formuler toutes les hypothèses qu'il jugera nécessaires pour résoudre les questions posées. Il justifiera, alors, clairement et précisément ces hypothèses.

Introduction du sujet (commune aux 3 parties) :

Un gravimètre est un appareil de mesure qui permet de quantifier la valeur **g** du champ de pesanteur.



Extrait du site : http://www.muquans.com

Dans ce sujet, nous allons nous intéresser à deux types de gravimètres : interférométrique et à atomes froids.

L'étude portera sur quatre aspects : optique, thermodynamique, mécanique et électronique.

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

EXERCICE 1 : OPTIQUE (durée conseillée 1 h 10)

L'exercice comporte trois parties indépendantes.

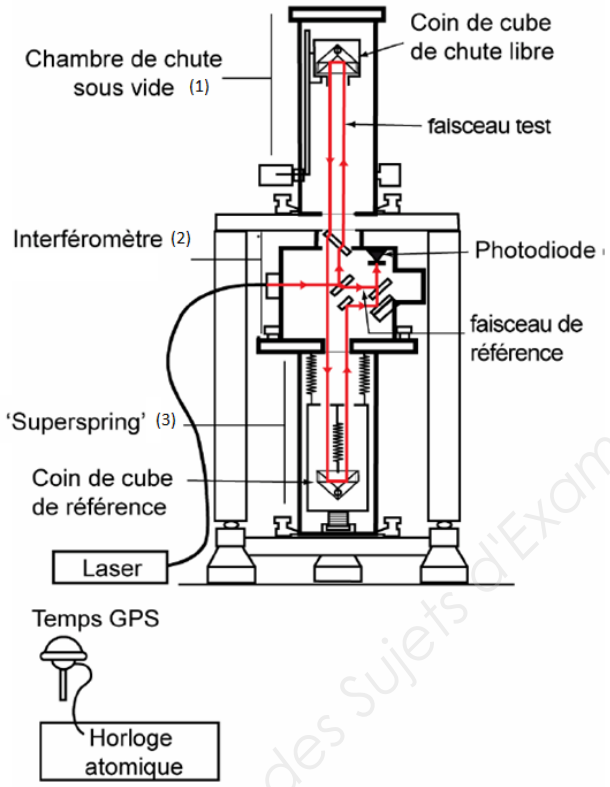
On étudie le principe d'un gravimètre interférentiel absolu encore appelé gravimètre absolu balistique.

Il est constitué de trois unités : une chambre de chute **(1)**, un interféromètre **(2)** et un système d'isolation sismique (« superspring ») **(3) (document 1 page 3/23).**

Un objet (coin de cube) est lâché en chute libre dans une chambre dans laquelle on fait le vide.

Les positions du coin de cube au cours de sa chute sont déterminées par interférométrie laser. Les temps associés à ces positions sont mesurés par une horloge atomique. L'ensemble de ces données permet de déterminer la valeur du champ de pesanteur **g** auquel est soumis l'objet en chute libre.

<u>Document 1</u> : schéma de principe d'un gravimètre absolu.



<u>Document 2</u> : extrait de la brochure commerciale d'un gravimètre absolu.

Petit et bon marché, ce gravimètre comporte un laser continu **He-Ne** produisant une lumière polarisée rectilignement, stabilisée en fréquence ou en intensité, cohérente, dans le domaine visible (rouge), et d'une puissance nominale **1 milliwatt**. Il est idéal pour les mesures de laboratoire, la spectroscopie et l'interférométrie.

Un objet réfléchissant tombe de **20 cm** dans une chambre à vide (**10^{-4} Pa**) pendant **200 ms**. Grâce à sa forme en coin de cube, *il réfléchit le faisceau laser dans la même direction que le faisceau incident même en cas de translation ou de rotation.*

Le mouvement de ce coin de cube par rapport à un miroir de référence est suivi par des mesures interférométriques : plus de 600 000 franges d'interférences sont générées pendant chaque chute. 700 franges, associées à une horloge atomique, sont analysées pour déterminer la valeur de **g**.

Le « superspring » est capable d'atténuer les vibrations micro-sismiques de la Terre pendant une longue période (environ **60 s**).

<u>L'exercice comporte trois parties</u> :

Dans la première partie, on étudie la source laser utilisée et la sécurité liée au laser.

Dans la deuxième partie, on s'intéresse au coin de cube en chute libre dans la chambre de chute.

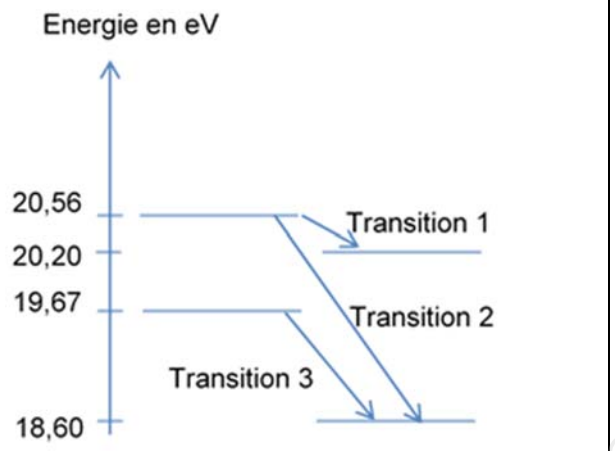
La troisième partie aborde le principe de l'interféromètre.

<u>Données</u> : Célérité de la lumière dans le vide : **$c = 3{,}00.10^{8}$ m.s^{-1}**.
Constante de Planck : **$h = 6{,}62.10^{-34}$ J.s**.
1 eV = $1{,}60.10^{-19}$ J.

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

PARTIE 1 : ÉTUDE DE LA SOURCE LASER.

Document 3 : diagramme de transitions d'énergie de l'atome de néon.



Q1 - Déterminer les longueurs d'onde dans le vide des trois radiations correspondant aux transitions représentées sur le **document 3 page 4/23.**

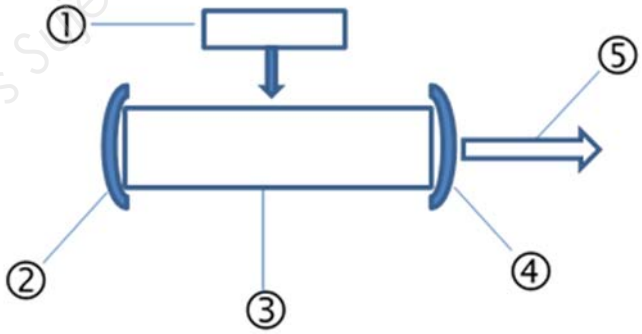
Q2 - Utiliser les indications de la brochure commerciale (**document 2 page 3/23**) pour déterminer, parmi les longueurs d'onde déterminées à la question **Q1,** celle du laser utilisé dans le gravimètre étudié.

Q3 - En utilisant le **document 2 page 3/23** et la relation de la puissance **P** donnée ci-dessous, déterminer le nombre de photons émis par le laser par seconde.

$$P = \frac{N \times E}{\Delta t}$$ avec **N** le nombre de photons émis pendant **Δt** et **E** l'énergie d'un photon.

Q4 - Indiquer sur votre copie les légendes des éléments numérotés de **1** à **5**, du **document 4 page 4/23**, représentant un schéma de principe d'un laser (plusieurs réponses sont acceptées).

Document 4 : schéma de principe d'un laser.



Q5 - Justifier le choix d'une source laser pour réaliser des interférences en vous appuyant sur les propriétés de cette source de lumière.

Q6 - À l'aide des **documents 2 page 3/23, 5 et 6 page 5/23,** montrer que la DNRO (Distance Nominale de Risque Oculaire) du laser vaut environ **5 m**. Justifier votre réponse.

Q7 - À l'aide des **documents 2 page 3/23, 6 et 7 page 5/23**, déterminer les lunettes de protection à porter parmi les exemples de lunettes cités dans le **document 7 page 5/23**.

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

Document 5 : EMP et DNRO.

En sécurité laser, l'EMP (Exposition Maximale Permise) représente le niveau maximal de rayonnement laser auquel des personnes peuvent être exposées sans subir de dommage immédiat ou à long terme. Elle est évaluée pour l'œil et pour la peau, en fonction de la longueur d'onde, de la durée d'exposition, du caractère continu ou impulsionnel du laser. Elle est exprimée en $\mathbf{W.m^{-2}}$ pour un laser continu et en $\mathbf{J.m^{-2}}$ pour un laser impulsionnel. Pour un laser continu, l'EMP pour l'œil est déterminée en prenant comme durée d'exposition de la cornée : **t = 0,25 s** (correspondant au réflexe palpébral de fermeture des paupières).

La DNRO (Distance Nominale de Risque Oculaire) est la distance pour laquelle l'éclairement énergétique tombe en dessous de la valeur de l'EMP.

Calcul de la DNRO dans le cas d'un faisceau direct :

$$\mathbf{DNRO} = \frac{1}{\phi}\sqrt{\frac{4P}{\pi.EMP} - a^2}\ , \text{ avec}$$

a : diamètre du faisceau à la sortie du laser (**m**) ;
ϕ : divergence du faisceau (**rad**) ;
P : puissance du laser (**W**) ;
EMP : exposition maximale permise ($\mathbf{W.m^{-2}}$).

Document 6 : quelques caractéristiques du laser.	
diamètre **a** du faisceau de sortie	0,63 mm
divergence ϕ du faisceau	1,3 mrad
EMP	25 $W.m^{-2}$

Document 7 : lunettes de protection.

Dans le cas où il n'est pas possible de respecter la DNRO (actes de maintenance ou de réglage), il est primordial de porter les protections individuelles (lunette, gants, blouse…).

Les lunettes doivent être adaptées à (aux) la longueur(s) d'onde du laser et de densité optique requise ($\mathbf{D_\lambda}$), calculée par :

$$\mathbf{D_\lambda = \log\frac{E_0}{EMP}}$$ (majorée à l'unité supérieure), avec

$\mathbf{E_0}$: puissance maximale par unité de surface en $\mathbf{W.m^{-2}}$ (calculée à la sortie du laser) ;
EMP : exposition maximale permise en $\mathbf{W.m^{-2}}$.

Les lunettes de protection doivent notamment comporter les indications suivantes :

Code **D** (laser continu), **I**, **R** ou **M** (laser impulsionnel) / Longueurs d'onde ou domaine spectral (en **nm**) / Numéro d'échelon (valeur de la densité optique).

Exemple d'indications sur les lunettes :

Lunettes 1 : **D / 980 - 1100 / 4**
Lunettes 2 : **M / 800 / 8**
Lunettes 3 : **D / 620 - 700 / 4**
Lunettes 4 : **D / 600 - 700 / 2**

Base Nationale des Sujets d'examens de l'enseignement professionnel

PARTIE 2 : ÉTUDE DU COIN DE CUBE.

L'objet soumis à des chutes libres dans la chambre de chute est un coin de cube, taillé dans un matériau transparent d'indice **n**. Les figures du **document 8 page 6/23 et du document réponse n° 1 page 20/23** représentent des triangles rectangles isocèles en **B : Â = Ĉ= 45°**.

On veut montrer, dans un cas simple, qu'un rayon ressort parallèlement au rayon incident et que ce phénomène ne dépend pas de la position du coin de cube lors de sa chute.

Q8 - Construire la marche du rayon incident qui se réfléchit successivement sur les faces **AB** puis **BC** dans le cas représenté **sur le document réponse n° 1 page 20/23 à rendre avec la copie.**

Q9 - On s'intéresse au cas représenté **document 8 page 6/23** où le rayon pénètre dans le coin de cube par la face **AC** avec un angle d'incidence **i** faible, se réfléchit en **J** sur la face **AB**, puis en **K** sur la face **BC** et émerge en **L** par la face **AC**. (Pour la clarté des schémas, les angles représentés ne sont pas petits).

Montrer que **r = r'**.

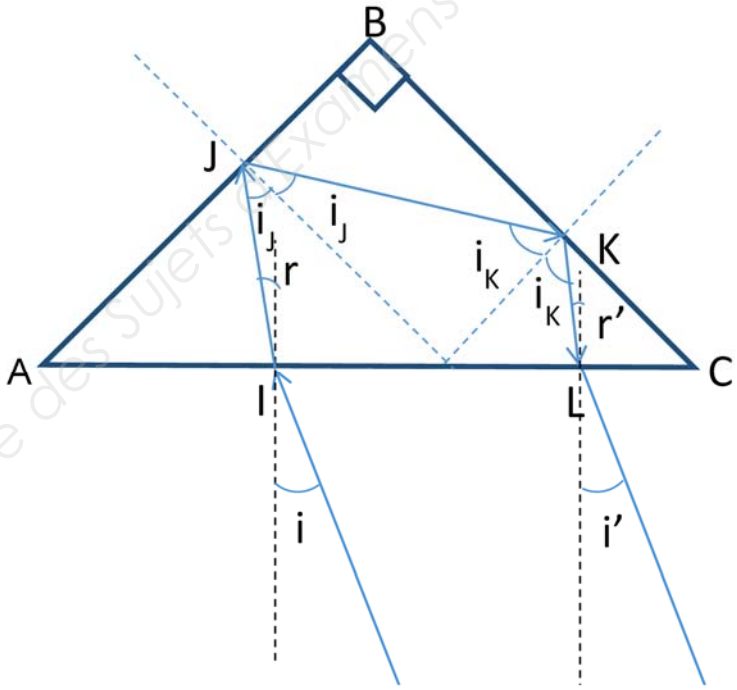
Vous pourrez suivre les étapes suivantes en exprimant :

- l'angle d'incidence i_J en **J** sur la face **AB** en fonction de **Â** et **r** ;
- l'angle d'incidence i_K en **K** sur la face **BC** en fonction de i_J ;
- l'angle d'incidence **r'** en **L** sur la face **AC** en fonction de i_K et **Â**.

En déduire que l'angle d'émergence **i'** en **L** du rayon réfléchi par le coin de cube est égal à l'angle d'incidence **i** en **I**.

Conclure sur la direction du rayon émergent par rapport à celle du rayon incident.

Document 8 : marche d'un rayon dans le coin de cube.



Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

Q10 - En utilisant les deux questions précédentes, justifier les propriétés du coin de cube indiquées en italique dans le **document 2 page 3/23** et le choix du constructeur d'utiliser un coin de cube plutôt qu'un miroir plan.

PARTIE 3 : ÉTUDE DE L'INTERFÉROMÈTRE.

L'interféromètre est équivalent à un interféromètre de Michelson schématisé sur le **document 9 page 7/23** : le faisceau laser est séparé en deux par une lame semi-réfléchissante. Une partie du faisceau se dirige vers un coin de cube fixe, l'autre vers le coin de cube en chute libre. Les coins de cube se comportent comme des miroirs. La photodiode reçoit les deux faisceaux, issus de la même source, qui peuvent interférer.

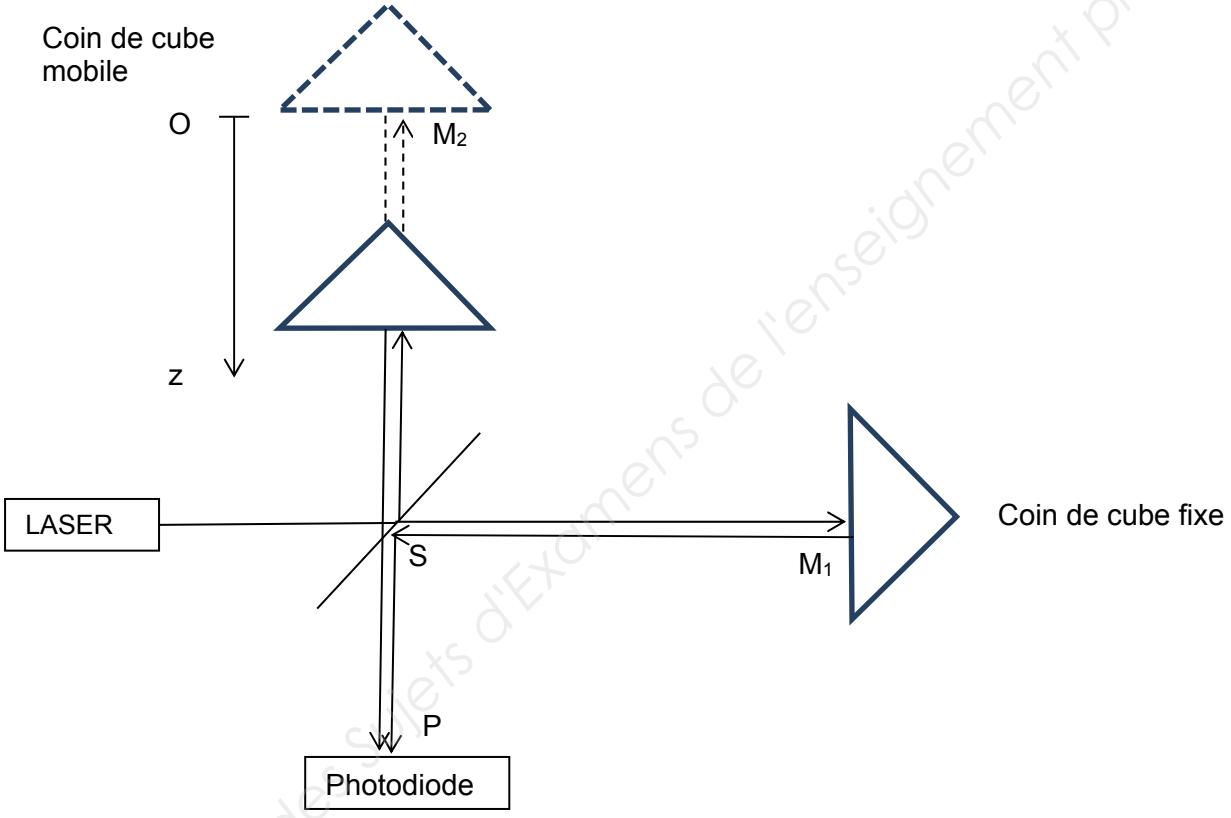
On suppose que, avant la chute du coin de cube mobile, l'interféromètre est réglé au contact optique c'est-à-dire que les faces réfléchissantes des coins de cube sont perpendiculaires entre elles et $\mathbf{SM_1 = SM_2}$.

La position du coin de cube $\mathbf{M_2}$ est repérée par l'équation : $z = \frac{1}{2} g t^2$ **(équation (1))**.

L'intensité lumineuse détectée par la photodiode varie selon l'expression suivante :

$I = 2\, I_0\, (1 + \cos \Phi)$ où Φ est le déphasage entre les deux ondes au point **P (équation (2)).**

Document 9 : schéma simplifié de l'interféromètre.



Q11 - Définir puis exprimer en fonction de z la différence de chemin optique (ou différence de marche) entre les deux ondes qui interfèrent en **P** en utilisant les notations du **document 9 page 7/23.** On suppose que l'indice de l'air raréfié est égal à 1.

Q12 - Rappeler les conditions d'interférences constructives entre deux ondes, en termes de différence de chemin optique ou de différence de phase.

Q13 - En déduire de quelle distance le coin de cube a chuté entre deux maxima consécutifs d'intensité lumineuse. Calculer cette distance pour une longueur d'onde de **633 nm**.

Q14 - Vérifier à l'aide de la question précédente l'indication donnée dans la brochure (**document 2 page 3/23**) concernant le nombre d'interférences constructives détectées pendant une chute.

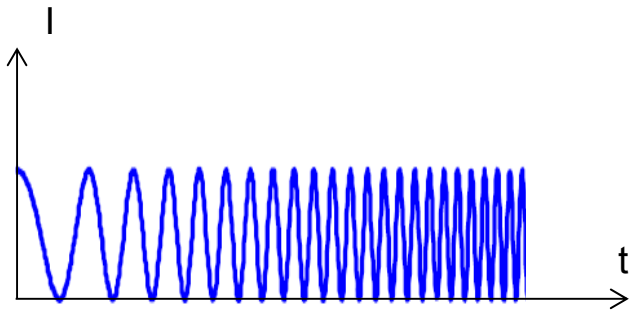
Q15 - Parmi les réponses **A**, **B** et **C** du **document 10 page 8/23,** choisir celle qui correspond à l'allure de l'évolution de l'intensité lumineuse reçue en **P** en fonction du temps au cours de la chute du coin de cube.

Justifier en utilisant **les équations (1) et (2) page 7/23.**

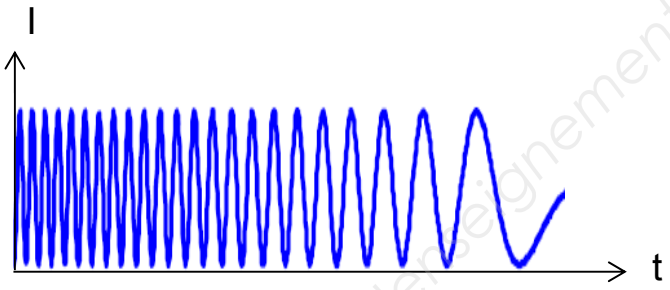
Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

<u>Document 10</u> : évolution de l'intensité lumineuse I en fonction du temps t.

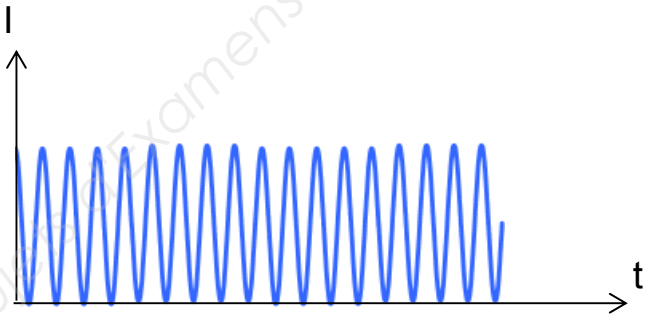
Réponse A :



Réponse B :



Réponse C :



Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

EXERCICE 2 : MÉCANIQUE (durée conseillée 1 h 20)

Les différentes parties ainsi que de nombreuses questions au sein de chaque partie sont indépendantes.

Cette partie présente de façon très simplifiée un type de gravimètre différent de celui étudié dans la partie optique : le gravimètre à atomes froids.

Ce type de gravimètre est utilisé, par exemple dans le Larzac, pour détecter la présence de « tunnels souterrains pouvant contenir de l'eau ». Ces tunnels peuvent communiquer entre eux et constituer une zone aquifère. Leur étude permet de comprendre et prévoir comment les nappes phréatiques se vident et se remplissent d'eau au cours des saisons et épisodes orageux.

- Dans une première partie, on validera la cohérence des données « constructeur » des **documents 11 page 9/23, 12 page 10/23 et des documents 13, 14 page 11/23.**
- Dans une seconde partie, on retrouvera la mesure de **g** donnée par le gravimètre à atomes froids.
- Dans une troisième partie, on utilisera la mesure de **g** pour la détection d'une cavité souterraine remplie d'eau.

<u>Document 11</u> : refroidissement des atomes de Rubidium 87 par laser.

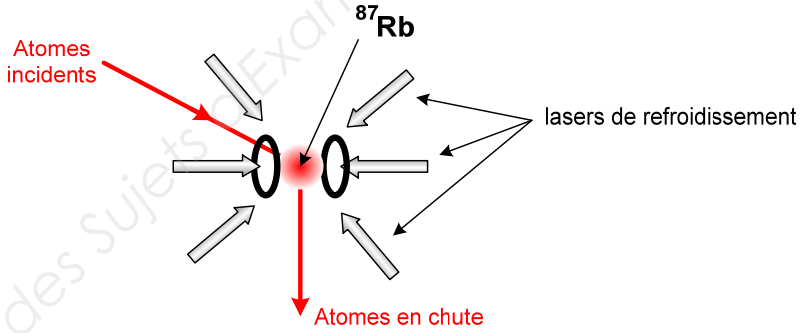
Une société a développé un gravimètre de mesures géophysiques (vulcanologie, sismologie, hydrologie ou encore exploration minière et pétrolière), léger (environ **50 kg**) et de haute précision, en refroidissant les atomes à l'aide d'un laser.

Un paquet de **N** atomes de Rubidium 87, à la température ambiante $\mathbf{T_0 = 20°C}$ est placé dans une enceinte de volume $\mathbf{V_0}$ **de 1 mm^3**, et à la pression $\mathbf{P_0 = 1.10^{-8}}$ **mbar**.

On estime l'ordre de grandeur de **N** entre 10^5 et 10^6 atomes.

À l'aide d'une pompe ionique, la pression dans l'enceinte est réduite à $\mathbf{P_1 = 1.10^{-10}}$ **mbar**. Le volume $\mathbf{V_0}$ est inchangé.

À l'aide de lasers, le paquet d'atomes de Rubidium 87 piégé est refroidi à une température de l'ordre du µK.



<u>Schéma de principe du piège opto-magnétique des atomes de Rubidium.</u>

Dans son procédé, l'équipe a simplifié l'appareil en réduisant le nombre de lasers de 10 à 1.

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

Document 12 : principe du gravimètre.

Le principe simplifié :

Pendant **340 ms**, le paquet d'atomes est évaporé et refroidi.

Après **340 ms**, le paquet d'atomes est alors en chute libre sans vitesse initiale et tombe sur une distance totale de **D = 15 cm** dans l'enceinte sous vide.

Enfin **10 µs** après, un laser de longueur d'onde **λ = 780 nm** est mis en fonctionnement.

Il fait fonction de «règle graduée optique», en délivrant une **première impulsion laser** d'une durée de **10 µs** qui interagit avec le paquet d'atomes et permet donc de repérer sa position.

La position du paquet d'atomes est repérée à Z_0 **= 0 m** à l'instant initial t_0 **= 0 s**.

Après Δt = 60 ms supplémentaires → seconde impulsion de durée **10 µs**
position du paquet repérée par Z_1.

Après Δt = 60 ms supplémentaires → troisième impulsion de durée **10 µs**
position du paquet repérée par Z_2.

L'accélération du paquet d'atome est déterminée à partir des trois positions Z_0, Z_1 et Z_2.

L'instrument affiche alors une valeur du champ de gravité g, avec une précision relative de 10^{-8}.

Le cycle de mesure total pour une chute dure Δt_{mesure} **= 5.10^2 ms**.

Le prix final de **500 k€** situe ce gravimètre parmi les appareils de mesure haut de gamme.

(D'après site publicitaire de la société)

***Règle* graduée optique**

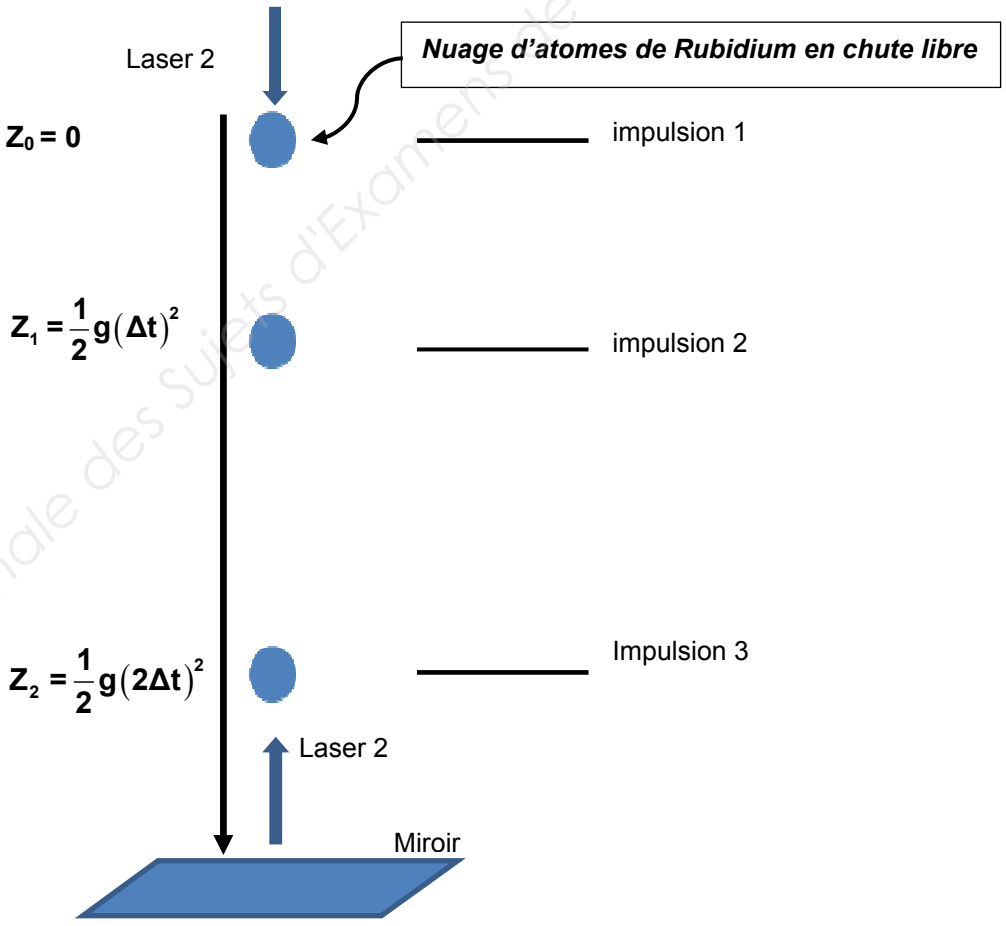


Schéma de principe du gravimètre atomique.

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

Document 13 : isotopes du rubidium.

Le rubidium (Rb, numéro atomique 37) possède 32 isotopes connus. Seuls deux de ces isotopes sont présents dans la nature : **^{85}Rb (72,2 %)**, seul isotope stable du rubidium et **^{87}Rb (27,8 %)** radioactif.
On attribue au rubidium une masse atomique standard de **85,4678 u**.

De tous les radio-isotopes du rubidium, **^{87}Rb** a la plus longue demi-vie (**$4{,}92.10^{10}$** années), suivi par **^{83}Rb** (86,2 jours), **^{84}Rb** (33,1 jours) et **^{86}Rb** (18,6 jours). Les isotopes plus légers que l'isotope stable se désintègrent principalement par émission de positron (**β^+**) en isotopes du krypton, les plus lourds par désintégration **β^-** en isotopes du strontium.

Données sur les isotopes du rubidium.

Symbole de l'isotope	Z	N	Masse isotopique (u)	Demi-vie	Mode(s) de désintégration	Isotope(s) fils
^{74}Rb	37	37	73,944265	64,76 ms	β^+	^{74}Kr
^{75}Rb	37	38	74,938570	19,0 s	β^+	^{75}Kr
^{85}Rb	37	48	84,911789738		Stable	
^{87}Rb	37	50	86,909180527	4,923 ×10^{10} a	β^-	^{87}Sr

u : unité de masse atomique : **$1\ u = 1{,}66054.10^{-27}$ kg**.

D'après Wikipédia

Document 14 : énergie cinétique.

L'énergie cinétique moyenne d'une particule d'un gaz parfait monoatomique à la température **T** est : $E_{C\,moyenne} = \frac{3}{2} k_B T$, où k_B est la constante de Boltzmann : $k_B = 1{,}38.10^{-23}$ J K^{-1}.

À température ambiante la vitesse moyenne des particules de gaz parfait est de l'ordre de **300 m.s^{-1}**.

Dans le cas des atomes refroidis par laser à une température T_1 d'environ **0,1 µK**, la vitesse moyenne est de l'ordre du **cm.s^{-1}**.

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

PARTIE 1 : ANALYSE ET VALIDATION DES DONNÉES À PARTIR DES DOCUMENTS 11 PAGE 9/23, 12 PAGE 10/23 ET 13, 14 PAGE 11/23.

Q16 - À l'aide des **documents 11 page 9/23**, **12 page 10/23** et **13 page 11/23** remplir le tableau du **document réponse n° 2 page 21/23** à rendre avec la copie.

Q17 - L'isotope naturel du Rubidium non radioactif n'est pas utilisé dans ce gravimètre à atomes froids car il est plus difficile à refroidir : il nécessiterait un laser de longueur d'onde **λ = 795 nm** plus compliqué à fabriquer.

Citer cet isotope naturel non radioactif.

Q18 - Le rubidium 87 est radioactif. Écrire son équation de désintégration.

Q19 - Au bout de combien de temps la moitié des atomes de rubidium 87 se sera-t-elle désintégrée ?

Q20 - Comparer le temps déterminé à la question **Q19** au temps d'un cycle de mesure et justifier l'utilisation possible de ces atomes dans le gravimètre.

Q21 - On considère que le gaz constitué d'atomes de rubidium 87 est modélisé par un gaz parfait à la température ambiante **T_0 = 20°C**, avant refroidissement.

Déterminer le nombre de moles (ou quantité de matière) **n** d'atomes piégés dans l'enceinte.

La constante des gaz parfaits est **R = 8,315 J.K^{-1}.mol^{-1}**.

Q22 - L'ordre de grandeur du nombre d'atomes piégés dans l'enceinte est-il en accord avec la donnée du **document 11 page 9/23** si le nombre de moles trouvé à la question **Q21** est **n = 4.10^{-19} mol** ?

La constante d'Avogadro est **N_A = 6,02.10^{23} mol^{-1}**.

Q23 - À l'appui d'un document que vous citerez, donner l'ordre de grandeur de la vitesse moyenne d'un atome de Rubidium après refroidissement.

Q24 - À partir de l'expression générale de l'énergie cinétique et de celle du **document 14 page 11/23**, retrouver l'ordre de grandeur de la température **T_1**.

Base Nationale des Sujets d'Examen de l'enseignement professionnel

PARTIE 2 : MESURE DE g DONNÉE PAR LE GRAVIMÈTRE À ATOMES FROIDS DANS LE LARZAC EN FRANCE.

On rappelle qu'à l'instant initial $t_0 = 0$ **s**, le nuage (paquet) d'atomes de Rubidium est situé en $Z_0 = 0$ **m** comme indiqué dans le **document 12 page 10/23**.

La vitesse initiale du paquet d'atomes est considérée comme nulle.

Le paquet d'atomes de Rubidium n'est soumis qu'à son poids.

Q25 - Écrire la deuxième loi de Newton (encore appelée relation fondamentale de la dynamique) appliquée au paquet d'atomes et en déduire l'expression du vecteur accélération $\vec{a}$ du paquet d'atomes.

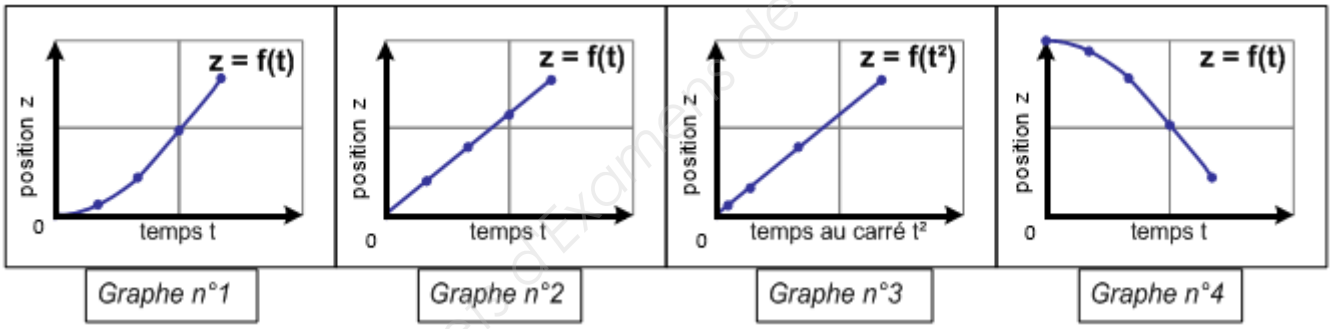
Q26 - En déduire le principe de la mesure de la valeur de **g** cité dans le **document 12 page 10/23**.

Q27 - En déduire, dans le repère proposé dans le **document 12 page 10/23**, l'expression de la vitesse du paquet d'atomes $V_Z(t)$ en fonction du temps.

Q28 - Retrouver l'expression de la position **Z(t)** du paquet d'atome à l'instant **t** : $Z(t) = \frac{1}{2} g t^2$.

Q29 - Indiquer sur votre copie, le ou les numéros du graphe du **document 15** ci-dessous qui sont cohérents avec l'évolution de la position **Z(t)** en fonction du temps **t** donnée à la question précédente.

Document 15 : évolution de Z en fonction de t.



Q30 - Les premières valeurs de positions relevées sont données ci-après :

t (µs)	Z (m)
0	$0{,}0000000.10^{-8}$
60,0000000	$1{,}76363810.10^{-8}$
120,000000	$7{,}05455250.10^{-8}$

Exprimer et calculer la valeur de **g** avec **9 chiffres significatifs**.

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

PARTIE 3 : UTILISATION DE LA MESURE DE g POUR LA DÉTECTION DE CAVITÉS SOUTERRAINES REMPLIES D'EAU.

Une zone aquifère (qui contient de l'eau) est modélisée par une cavité sphérique de rayon $\mathbf{R_1 = 50\ m}$. Le gravimètre est placé au point $\mathbf{M_1}$ pour détecter la cavité (voir **document 16 page 14/23**).

Le centre de cette cavité se situe à une profondeur **h** de plusieurs centaines de mètres sous terre à la verticale du point $\mathbf{M_1}$.

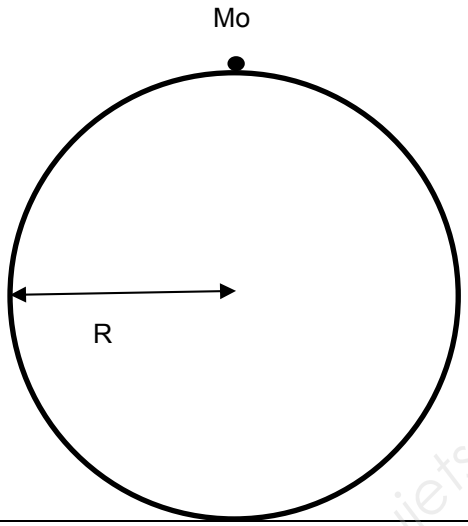
Dans cette partie, la valeur de **g** calculée précédemment, au niveau du sol (point de référence) $\mathbf{M_0}$, sera appelée $\mathbf{g_0}$ et la valeur retenue : $\mathbf{g_0 = 9{,}79788954\ m.s^{-2}}$.

Document 16 : schéma de la Terre (échelles non respectées).

Sans cavité souterraine :

M_o : point de mesure sans cavité

R : le rayon moyen de la Terre : 6378.10^3 m

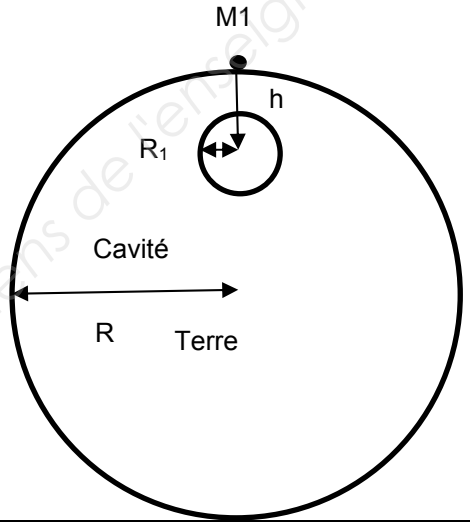


Avec cavité souterraine :

M_1 : point de mesure à la verticale de la cavité

R_1 : rayon de la cavité : 50 m

h : la profondeur du centre de la cavité par rapport au sol



Q31 - Ce gravimètre peut détecter une variation de **g** de $\Delta\mathbf{g = 10^{-8}\ g_0}$.

Donner l'ordre de grandeur de la résolution $\Delta\mathbf{g}$ du gravimètre.

Q32 - Lors de la détection de la cavité, on relève la valeur de **g** en différents points successifs à la surface du sol répartis de façon précise.

La valeur de **g** mesurée au point $\mathbf{M_0}$ loin de la cavité remplie d'eau est $\mathbf{g_0}$, et celle mesurée au point $\mathbf{M_1}$ à la verticale de la cavité est $\mathbf{g_1 = 9{,}79788935\ m.s^{-2}}$.

La variation $\mathbf{g_1 - g_0}$ peut-elle être détectée ?

Q33 - Moyennant des hypothèses simplificatrices, l'expression permettant de calculer la valeur de **h** dans une cavité est : $\mathbf{h} = \sqrt{\dfrac{R_1^3}{R.\left(1 - \dfrac{g_1}{g_0}\right)}}$.

Calculer la profondeur du centre de cette cavité : **h**.

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

EXERCICE 3 : ÉLECTRICITÉ (durée conseillée 1 h 30)

L'exercice comporte 4 parties : les différentes parties sont indépendantes.

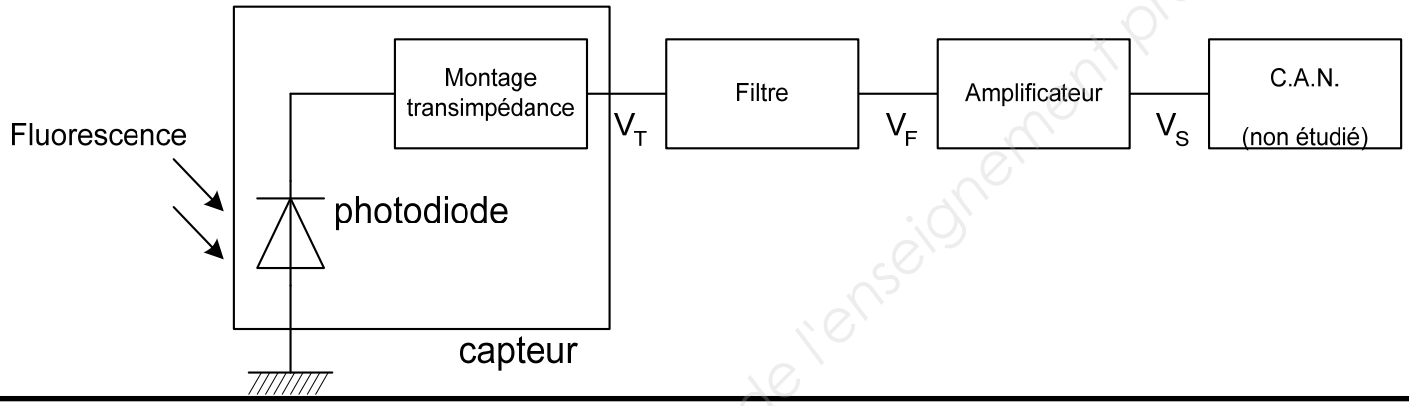
Le photodétecteur est un composant fondamental du système optoélectronique du gravimètre. Sa qualité doit être optimale pour assurer des bonnes performances au système.

Le photodétecteur est composé d'une photodiode polarisée en inverse et qui se modélise par un générateur de courant électrique dont l'intensité dépend du flux lumineux reçu.

La photodiode est utilisée comme capteur de flux lumineux : les atomes qui chutent dans le gravimètre émettent de la lumière (fluorescence). Les variations de flux lumineux sont liées à la valeur du champ de pesanteur **g** recherchée.

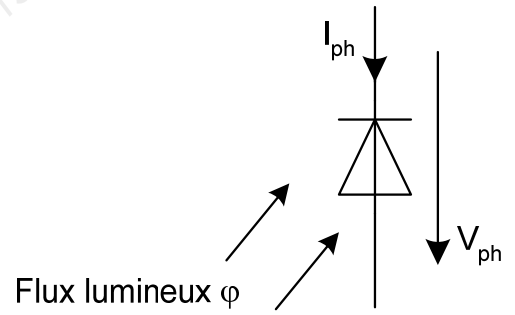
La photodiode est intégrée dans la chaine décrite dans le **document 17 page 15/23.**

Document 17 : principe de la chaîne de mesure.



La photodiode représentée **document 18 page 15/23** va capter les variations de fluorescence. Pour que la mesure soit précise il faut que la photodiode ait un temps de réponse adapté, il faut que tous les parasites soient filtrés et que le bruit électrique (petites fluctuations du signal) soit réduit pour que le résultat soit fiable.

Document 18 : symbole de la photodiode.



Dans la première partie, on étudie la sensibilité de la photodiode.

Dans la deuxième partie, on s'intéresse au montage transimpédance.

La troisième partie aborde le temps de réponse de la photodiode.

Dans la quatrième partie, on étudie le filtrage et l'amplification.

Base Nationale des sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

Données pour la partie 1 et la partie 2 :

Le courant qui traverse la photodiode est : $I_{ph} = I_o + I_\varphi$.

I_o est le courant d'obscurité : $I_o = I_s \cdot \left(1 - e^{A.V_{ph}}\right)$

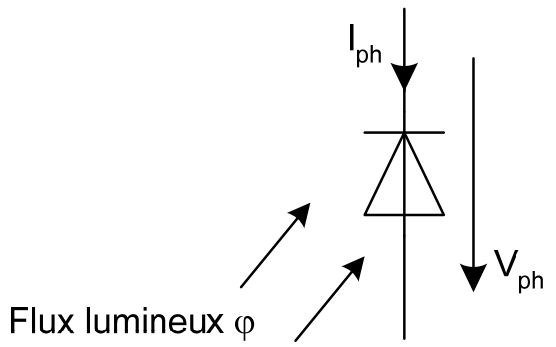
I_s et **A** sont des constantes ;

V_{ph} est la tension aux bornes de la diode ;

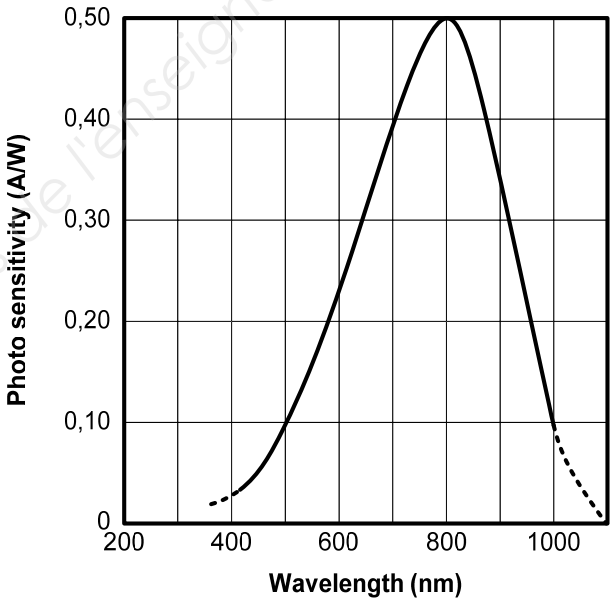
et I_φ est le courant photoélectrique (en ampère), il est **proportionnel** au flux lumineux **φ** reçu par la photodiode.

PARTIE 1 : ÉTUDE DE LA SENSIBILITÉ DE LA PHOTODIODE.

Document 19 : symbole de la photodiode.



Document 20 : réponse spectrale de la photodiode.



La photodiode doit capter une radiation de longueur d'onde **850 nm**.

On appellera s_{ph} la sensibilité de la photodiode avec $s_{ph} = \frac{I_\varphi}{\varphi}$.

Q34 - Donner la valeur de la sensibilité s_{ph} pour une radiation de **850 nm**.

Q35 - Donner l'unité du flux lumineux **φ**.

Q36 - Montrer que, dans l'obscurité (c'est-à-dire quand **φ = 0**), la photodiode est parcourue par un courant appelé courant d'obscurité.

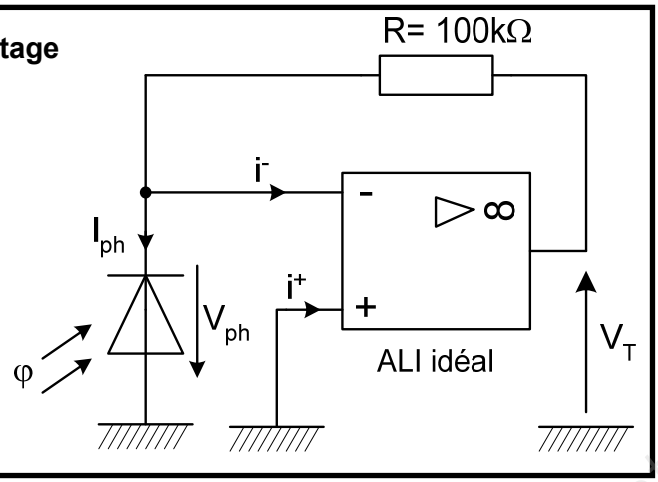
La présence de ce courant peut fausser les résultats de la mesure faite par le gravimètre.

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

PARTIE 2 : MONTAGE TRANSIMPÉDANCE.

La photodiode est branchée à l'entrée inverseuse du montage transimpédance **document 21 page 17/23** :

Document 21 : montage transimpédance.



L'amplificateur opérationnel (**ALI**) est idéal (**$i^+ = 0$** et **$i^- = 0$**). On notera **V^+** et **V^-** les potentiels respectifs des entrées non inverseuse et inverseuse du montage. Tous les potentiels sont référencés à la masse (**0V**). **R = 100 kΩ**.

Q37 - Donner, en justifiant, le régime de fonctionnement du montage à amplificateur opérationnel. Donner la valeur de **V^+**.

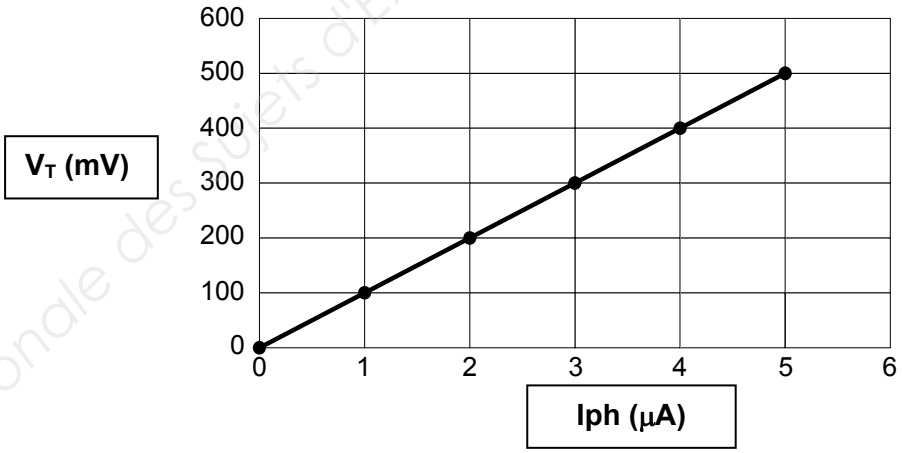
En déduire la valeur de **V^-** et de **V_{ph}**.

Q38 - En déduire alors que le courant d'obscurité **I_0** est nul.
Donner la valeur de **V_{T0}** dans l'obscurité.

Q39 - À l'aide de la courbe du **document 22 page 17/23**, exprimer **V_T** en fonction de **I_{ph}**.

En déduire la relation entre **V_T** et **I_φ**.

Document 22 : V_T en fonction de I_{ph}



Q40 - Montrer alors que **V_T** est proportionnel au flux lumineux **φ**.
On notera **s_c** la sensibilité du capteur, donner son expression en fonction de **V_T** et de φ, donner son unité.

Q41 - En observant le montage du **document 21 page 17/23**, donner le paramètre qui permet d'augmenter la sensibilité du capteur.

Q42 - Compléter le **document réponse n° 3 page 22/23 à rendre avec la copie**. En vous servant des résultats des questions précédentes, pour chacune des affirmations du tableau, cocher la case VRAI ou FAUX. Aucune justification n'est demandée.

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

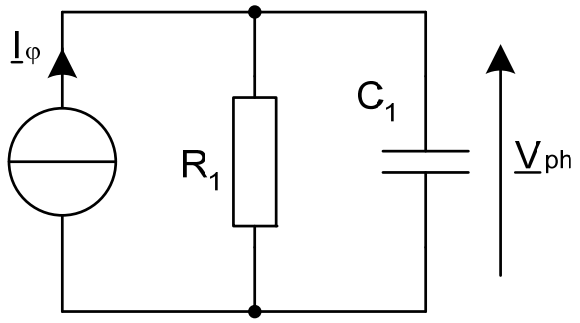
PARTIE 3 : TEMPS DE RÉPONSE DE LA PHOTODIODE.

La photodiode va capter un flux lumineux variable provenant de la fluorescence des atomes. Ces variations sont considérées comme sinusoïdales.

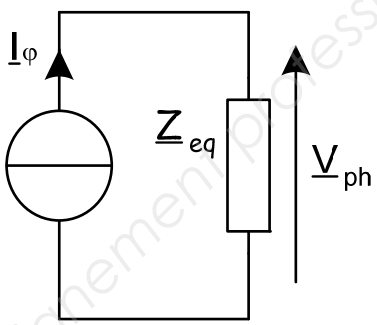
Pour étudier le temps de réponse de la photodiode, on la remplace par son schéma équivalent en régime variable : un générateur de courant $\underline{I}_\varphi$ en parallèle avec R_1 et C_1 : voir **documents 23 et 24 page 18/23**. On rappelle que $s_{ph} = \frac{I\varphi}{\varphi}$.

$\underline{Z}_{eq}$ est l'impédance complexe équivalente à R_1 en parallèle avec C_1.

Document 23 : schéma équivalent.



Document 24 : schéma équivalent.



Q43 - Donner l'expression liant $\underline{V}_{ph}$, $\underline{Z}_{eq}$ et $\underline{I}_\varphi$.

Q44 - Montrer que $\underline{Z}_{eq}$ peut se mettre sous la forme : $\underline{Z}_{eq} = \frac{R_1}{1 + jR_1 C_1 \omega}$.

Q45 - Déduire, des deux questions précédentes, l'expression de la fonction de transfert $\underline{S}(j\omega) = \frac{\underline{V}_{ph}}{\underline{\varphi}}$

montrer qu'elle peut se mettre sous la forme : $\underline{S}(j\omega) = \frac{\underline{V}_{ph}}{\underline{\varphi}} = \frac{S_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}}$.

ω_c est la pulsation de coupure, S_0 est l'amplification statique.

Exprimer S_0 et montrer que $\omega_c = \frac{1}{R_1 C_1}$.

Q46 - Donner l'expression de $\underline{S}(j\omega)$ pour les signaux continus.

Q47 - Déterminer l'expression de $\underline{S}(j\omega_c)$ et l'expression de son module $|\underline{S}(j\omega_c)|$ pour les signaux de fréquence f_c.
Comment doit être la fréquence de coupure f_c de la photodiode pour qu'elle soit capable de capter une large gamme de signaux ?

Q48 - La notice de la photodiode donne une fréquence de coupure de **1 GHz**. Calculer la constante de temps τ : $\tau = \frac{1}{\omega_c}$.

Q49 - La fluorescence des atomes est captée par la photodiode pendant **100 ms**. Pendant cet intervalle de temps elle doit capter 1000 variations de fluorescence.
On considère que le temps de réponse t_r de la photodiode est $t_r = 3.\tau$. Vérifier que le temps de réponse de la photodiode est bien adapté à la détection de chaque variation de fluorescence.

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

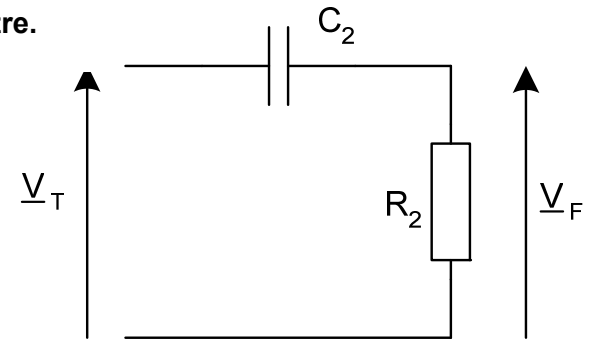
PARTIE 4 : FILTRAGE ET AMPLIFICATION.

Le signal V_T de sortie du montage transimpédance doit être filtré. En effet, le signal V_T contient une composante continue, une composante parasite à **50 Hz** et un signal utile de fréquence f_u >> 50 Hz.

Ensuite le signal doit être amplifié avant la conversion analogique numérique.

V_T est filtrée conformément au montage du **document 25 page 19/23** :

Document 25 : filtre.



Q50 - Déterminer qualitativement la nature (passe bas, passe haut, passe bande) du filtre dont la fonction de transfert est de la forme :

$$\underline{T}(j.\omega) = \frac{\underline{V}_F}{\underline{V}_T} = \frac{j\frac{\omega}{\omega_{C2}}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_{C2}}} \text{ avec } \omega_{C2} = \frac{1}{R_2 C_2}.$$

Q51 - Donner l'ordre du filtre.

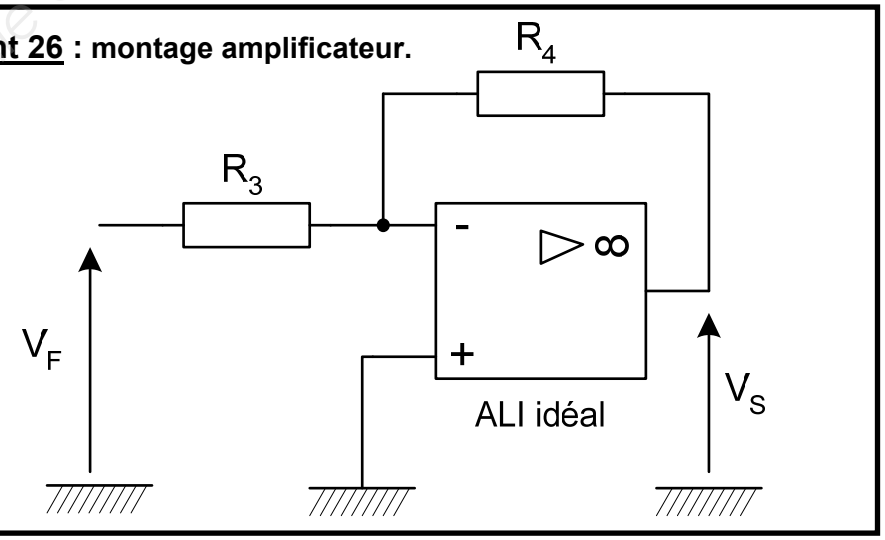
Q52 - À partir du **document réponse n° 4 page 22/23 à rendre avec la copie,** choisir le diagramme asymptotique du gain qui correspond à ce filtre : mettre une croix dans la case correspondante.

Q53 - Document réponse n° 5 page 23/23 à rendre avec la copie : à partir de la tension d'entrée V_T du filtre qui est donnée, tracer la forme de la sortie V_F du filtre pour les 3 cas proposés **document réponse n° 5 page 23/23.**

Q54 - Préciser l'action de ce filtre sur la tension V_T.
Positionner la fréquence f_u sur le diagramme retenu à la question **Q52** sur le **document réponse n° 4 page 22/23 à rendre avec la copie.**

Q55 - Cette tension V_F filtrée a une amplitude de **0,1 V**, elle doit être amplifiée d'un facteur 10 avant d'être numérisée. Le montage amplificateur est donné **document 26 page 19/23**.
Donner la relation entre V_S, V_F, R_3 et R_4, et en déduire la valeur du rapport entre R_3 et R_4.

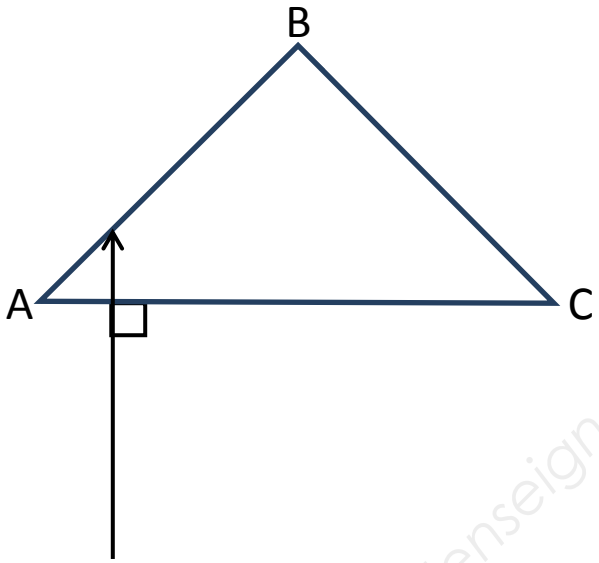
Document 26 : montage amplificateur.



Base Nationale des sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

DOCUMENT RÉPONSE N° 1 : PARTIE OPTIQUE
À RENDRE AVEC LA COPIE

Q8 -



Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

DOCUMENT RÉPONSE N° 2 : PARTIE MÉCANIQUE
À RENDRE AVEC LA COPIE

Q16 - Tableau à remplir :

Données sur le Gravimètre	Pression P dans l'enceinte avant refroidissement	Température T des atomes avant refroidissement	Température T des atomes après refroidissement	Masse d'un atome de rubidium 87	Volume du paquet d'atomes
Valeurs lues dans les documents.					
Valeurs converties en Unités de base du Système International.					

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

DOCUMENT RÉPONSE N° 3 : PARTIE ÉLECTRICITÉ
À RENDRE AVEC LA COPIE

Q42 - Pour chacune des affirmations du tableau ci-dessous, cocher la case VRAI ou FAUX.
Aucune justification n'est demandée.

Affirmations	***VRAI***	***FAUX***
Le montage transimpédance est un suiveur	☐	☐
Le montage transimpédance permet de faire une conversion courant-tension	☐	☐
Le montage transimpédance permet d'annuler le courant d'obscurité	☐	☐
Le montage transimpédance permet d'obtenir une tension V_T image du flux lumineux φ	☐	☐

DOCUMENT RÉPONSE N° 4 : PARTIE ÉLECTRICITÉ
À RENDRE AVEC LA COPIE

Q52 & Q54 - Diagramme asymptotique du filtre. **Q52 -** mettre une croix dans la case choisie.

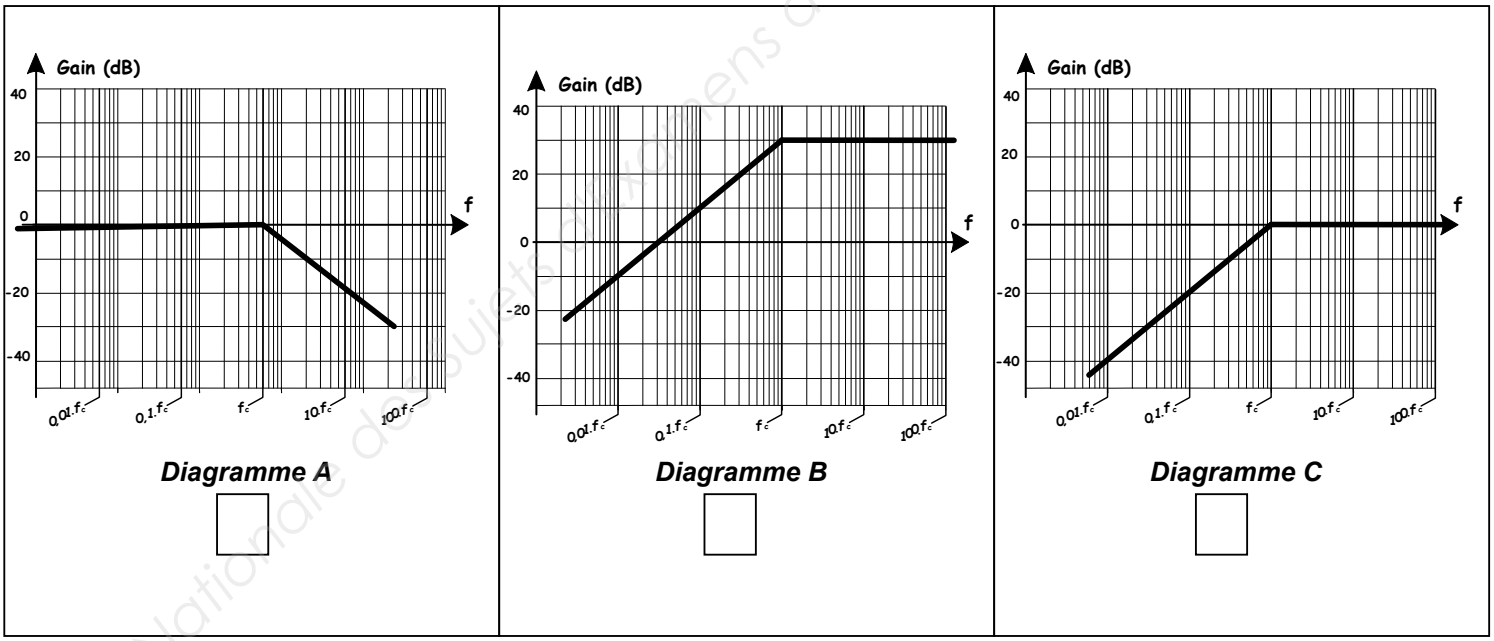
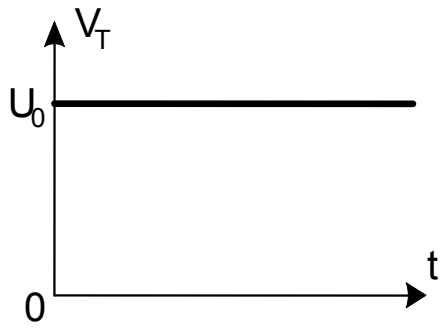
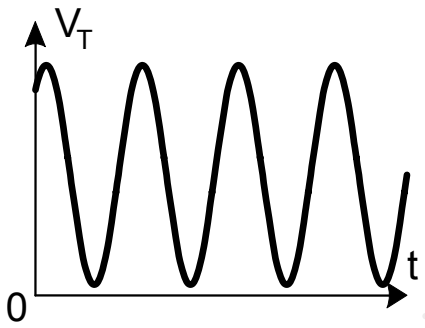
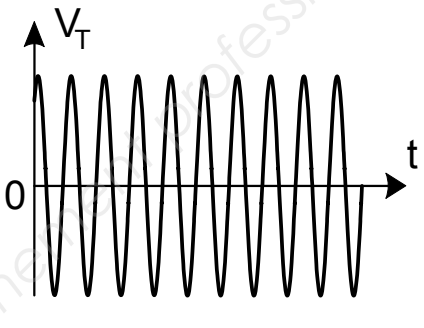
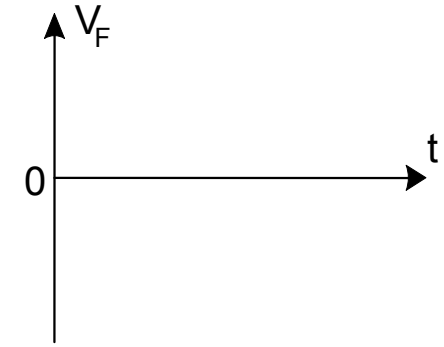
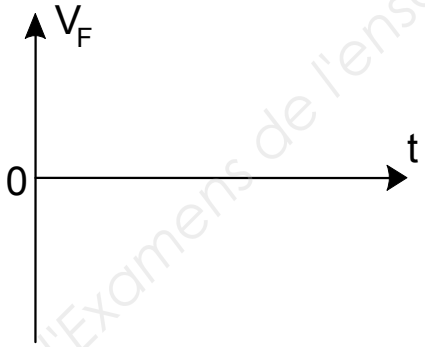
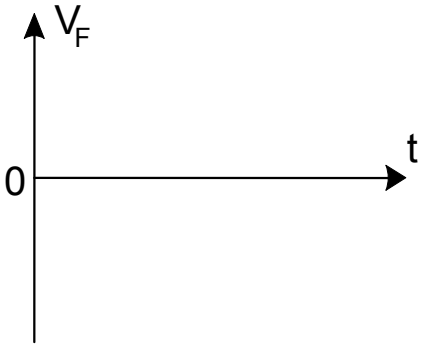


Diagramme A ☐ ***Diagramme B*** ☐ ***Diagramme C*** ☐

Base Nationale des sujets d'examens de l'enseignement professionnel

DOCUMENT RÉPONSE N° 5 : PARTIE ÉLECTRICITÉ
À RENDRE AVEC LA COPIE

Q53 -

Cas 1 : Composante continue U_0	Cas 2 : Composante continue et à 50 Hz < 0,01 f_C	Cas 3 : Composante à $f_u = 100\ f_C$
		
		

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel