



**PHYSICS.  
OLYMPIAD.CH**

PHYSIK-OLYMPIADE  
OLYMPIADES DE PHYSIQUE  
OLIMPIADI DELLA FISICA

# Olympiades de Physique

## Deuxième tour

15 janvier 2025

**Partie 1 : 21 questions à choix multiple**

Durée : 60 minutes

Total : 21 points ( $21 \times 1$ )

---

Moyens autorisés : Calculatrice simple

Matériel pour écrire et dessiner

## Bonne chance !

Supported by :



## Constantes fondamentales

Fréquence hyperfine du césium	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9.192 631 770	$\times 10^9$	$\text{s}^{-1}$
Vitesse de la lumière dans le vide	$c$	2.997 924 58	$\times 10^8$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Constante de Planck	$h$	6.626 070 15	$\times 10^{-34}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Charge élémentaire	$e$	1.602 176 634	$\times 10^{-19}$	$\text{A} \cdot \text{s}$
Constante de Boltzmann	$k_{\text{B}}$	1.380 649	$\times 10^{-23}$	$\text{K}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
Constante d'Avogadro	$N_{\text{A}}$	6.022 140 76	$\times 10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$
Efficacité lumineuse d'un rayonnement	$K_{\text{cd}}$	6.83	$\times 10^2$	$\text{cd} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{sr}$
Constante magnétique	$\mu_0$	1.256 637 062 12(19)	$\times 10^{-6}$	$\text{A}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
Constante électrique	$\varepsilon_0$	8.854 187 812 8(13)	$\times 10^{-12}$	$\text{A}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^4$
Constante des gaz	$R$	8.314 462 618...		$\text{K}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma$	5.670 374 419...	$\times 10^{-8}$	$\text{K}^{-4} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
Constante gravitationnelle	$G$	6.674 30(15)	$\times 10^{-11}$	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$
Masse de l'électron	$m_{\text{e}}$	9.109 383 701 5(28)	$\times 10^{-31}$	$\text{kg}$
Masse du proton	$m_{\text{n}}$	1.674 927 498 04(95)	$\times 10^{-27}$	$\text{kg}$
Masse du neutron	$m_{\text{p}}$	1.672 621 923 69(51)	$\times 10^{-27}$	$\text{kg}$
Accélération normale de la pesanteur	$g_{\text{n}}$	9.806 65		$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

## Multiple Choice

Durée : 60 minutes

Cotation : 21 points (1 point par réponse correcte)

- Les questions à choix multiple (MC) comportent plusieurs réponses, dont **une seule** est correcte. Si vous sélectionnez la bonne réponse (et seulement celle-là) sur la feuille-réponse, vous obtenez un point, sinon zéro.

### Question 1.1 (MC)

Il est bien connu que les Olympiades de physique remboursent les frais de billets de train aux participants. Vous cherchez un partenaire de soutien qui prendrait en charge ces frais pour le deuxième tour. Quel est le montant le plus probable que votre partenaire devra payer ?

- A) CHF 9.-      B) CHF 30.-      C) CHF 900.-  
 D) CHF 3000.-      E) CHF 9000.-      F) CHF 30000.-

### Question 1.2 (MC)

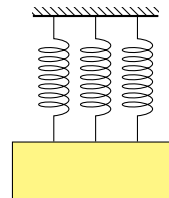
M. Fogg et Passepartout relèvent le défi de faire le tour du monde. Ils choisissent de tracer leur chemin le long de l'équateur. M. Fix qui les poursuit se trouve toujours au point sur Terre diamétralement opposé aux deux compagnons. Combien de fois Fix et Fogg seront-ils simultanément à la même altitude ?

- A) Jamais.  
 B) Possiblement seulement une fois.  
 C) Au moins deux fois.  
 D) Ça dépend de la position de la Terre par rapport au Soleil.

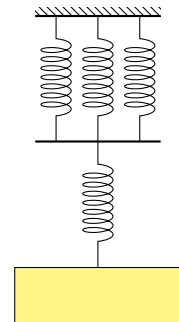
### Question 1.3 (MC)

Parmi les configurations suivantes, laquelle a la raideur équivalente  $k_{eq}$  la plus faible ? Tous les ressorts individuels ont la même raideur  $k$  et la même longueur.

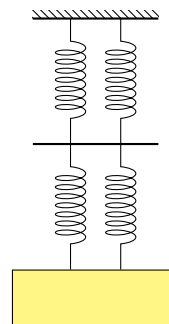
A)



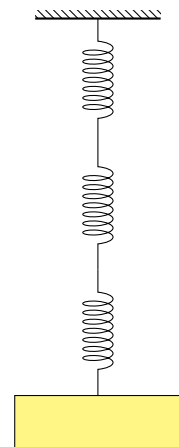
B)



C)



D)



**Question 1.4 (MC)**

Globi a décidé de partir sur la lune. Il aimerait rendre visite aux extraterrestres qui sont censés y vivre. Comme il ne veut pas arriver sans rien, il a décidé d'emporter une meule de fromage suisse. Comme il veut la partager équitablement, il emporte également une balance à ressort. La balance est étalonnée sur Terre et la constante gravitationnelle sur la Lune est environ six fois plus petite que sur Terre. Que découvre-t-il lorsqu'il pèse la meule de fromage sur la lune ?

- A) Rien. La balance affiche le même poids que sur terre.
- B) La balance indique environ six fois le poids mesuré sur terre.
- C) La balance indique environ un sixième du poids mesuré sur terre.
- D) Impossible à prévoir.

**Question 1.5 (MC)**

Vous êtes en expédition dans un sous-marin sur Titan, la lune de Saturne, qui contient des lacs d'éthane et de méthane liquides. Ils ont une densité d'environ  $500 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  et Titan a une accélération gravitationnelle de  $1.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Vous savez que Titan a une pression de surface de 1.5 bar ( $1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ ). Le baromètre de votre sous-marin indique une pression de 3 bar. À quelle profondeur êtes-vous dans le lac ?

- A) 0.22 m
- B) 0.66 m
- C) 220 m
- D) 660 m
- E) 22 000 m
- F) 66 000 m

**Question 1.6 (MC)**

Une noix de coco se déplaçant à vitesse constante explose et se divise en trois morceaux qui s'envolent dans des directions différentes. Laquelle des propositions suivantes est correcte pour leurs vecteurs de quantité de mouvement respectifs dans le référentiel de la noix de coco ?

- A) Ils sont perpendiculaires les uns avec les autres.
- B) La somme de leurs longueurs est égale à la quantité de mouvement initial de la noix de coco.
- C) Les vecteurs ont la même longueur.
- D) Les vecteurs sont tous situés dans un plan.

**Question 1.7 (MC)**

Une moto effectue un saut en l'air et sa roue avant tourne dans le sens des aiguilles d'une montre pour Alice qui l'observe de côté. Au départ, la moto ne tourne pas et l'axe de la roue avant est aligné avec celui de la roue arrière. Lequel des énoncés suivants décrit correctement ce qui se passe et pourquoi cela se passe lorsque le conducteur appuie sur le frein de la roue avant (et que la roue cesse complètement de tourner par rapport à la moto) ?

- A) La vitesse angulaire de la moto reste égale à 0 car aucun couple externe n'est appliqué.
- B) La moto commence à tourner dans le sens des aiguilles d'une montre en raison de la conservation du moment angulaire.
- C) La moto commence à tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre en raison de la conservation du moment angulaire.
- D) La moto commence à tourner dans le sens des aiguilles d'une montre en raison de la conservation de l'énergie.
- E) La moto commence à tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre en raison de la conservation de l'énergie.
- F) La moto change de vitesse de translation horizontale en raison de la conservation de l'énergie.

**Question 1.8 (MC)**

Comme nous l'avons appris au premier tour, une personne de taille  $h$  n'a besoin que d'un miroir de taille  $h/2$  pour se voir entièrement. Comment le miroir doit-il être accroché pour qu'elle puisse réellement se voir ?

- A) De sorte que le bord supérieur du miroir se trouve exactement à la hauteur de la pointe de la tête.
- B) De sorte que le bord supérieur du miroir se trouve approximativement à la hauteur du front de la personne.
- C) De telle sorte que le milieu du miroir se trouve exactement à la hauteur  $h/2$ .
- D) Cela dépend de la distance entre la personne et le miroir.

**Question 1.9 (MC)**

Dans la figure 1, une fine lentille convexe est représentée. La distance de l'objet à la lentille et de son image à la lentille est désignée respectivement par  $g$  et  $b$ . La distance focale est désignée par  $f$ . À quelle distance de la lentille un objet doit-il être placé pour que son image ait exactement la même taille de l'autre côté de la lentille ?

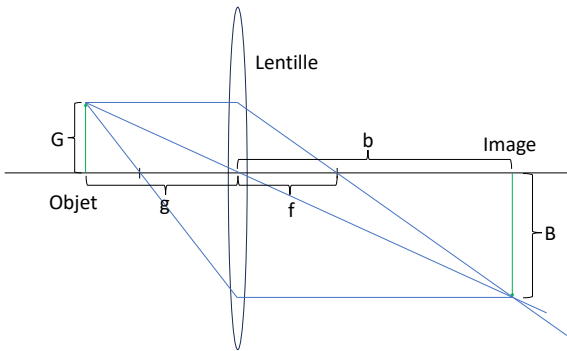


Figure 1 : Disposition de la lentille et de l'objet à une distance  $g$ , de sorte que l'image soit visible du côté opposé à une distance  $b$ .

- A)  $2f$                                       B)  $f$   
 C) Ce n'est pas possible.              D)  $\frac{f}{2}$

**Question 1.10 (MC)**

Étant donné une fente unidimensionnelle de largeur  $l = 3\text{ mm}$ , quelle est la séparation angulaire minimale en secondes d'arc entre deux lumières de longueur d'onde  $\lambda = 500\text{ nm}$ , de sorte qu'elles puissent être résolues à travers la fente ?

- A)  $35''$                                       B)  $40''$   
 C)  $45''$                                       D)  $50''$

**Question 1.11 (MC)**

Un moteur thermique fonctionnant entre deux réservoirs thermiques aux températures  $T_1 = 0^\circ\text{C}$  et  $T_2 = 100^\circ\text{C}$  avec un rendement 30% est-il physiquement possible ?

- A) Oui, indépendamment du processus.  
 B) Oui, si le processus du moteur est réversible.  
 C) Oui, en fonction du processus exact du moteur.  
 D) Non.

**Question 1.12 (MC)**

Alice utilise un glaçon pour refroidir son verre d'eau. Juste après avoir ajouté le glaçon, la hauteur de l'eau dans le verre est  $h_1$ . Au bout d'un moment, le glaçon a complètement fondu. Que peut-on dire de la hauteur d'eau  $h_2$  à ce moment-là ?

- A)  $h_1 > h_2$   
 B)  $h_1 = h_2$   
 C)  $h_1 < h_2$   
 D) Les informations fournies sont insuffisantes.

**Question 1.13 (MC)**

En Formule 1, les pneus jouent un rôle essentiel. La pression des pneus doit donc être optimale. Nous voulons gonfler un pneu de telle sorte que nous puissions rouler avec une pression de 21 psi, 1 psi correspondant environ à 0.07 bar. En roulant, on atteint une température de pneu de  $90^\circ\text{C}$  et pour cette température, on s'attend à ce que la pression du pneu soit de 21 psi. À quelle pression devons-nous gonfler le pneu dans la voie des stands à une température de  $35^\circ\text{C}$  ? Supposez que le volume est constant.

- A) 8.2 psi                                      B) 7.0 psi  
 C) 4.4 bar                                      D) 1.2 bar  
 E) 25 psi                                      F) 18 bar

**Question 1.14 (MC)**

Une bougie allumée est placée dans un bassin rempli d'eau jusqu'à mi-hauteur de la bougie. Albertina renverse un verre sur la bougie, de sorte que le verre soit immergé dans l'eau. La bougie s'éteint. Que se passe-t-il avec le niveau d'eau à l'intérieur du verre ?

- A) Le niveau de l'eau baisse.  
 B) Le niveau de l'eau ne change pas.  
 C) Selon l'altitude au-dessus du niveau de la mer, le niveau de l'eau monte ou descend.  
 D) Le niveau de l'eau monte.

**Question 1.15 (MC)**

Considère le circuit électrique de la figure 1. Quelles résistances sont traversées par le courant le plus faible (valeur en ampères la plus basse) si elles ont toutes la même résistance  $R$ ?

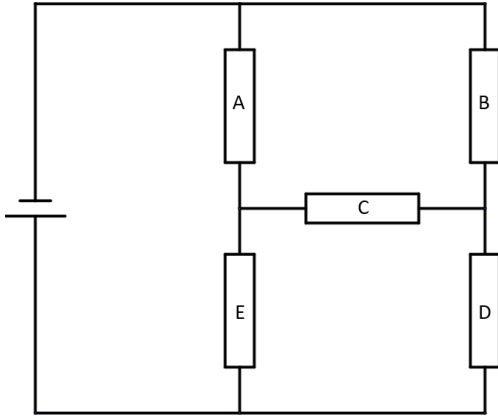


Figure 1: Circuit électrique avec 5 résistances A,B,C,D et E, toutes ayant la même valeur  $R$ .

- A) A et E.
- B) B et D.
- C) Seulement C.
- D) Toutes sont traversées par le même courant.

**Question 1.16 (MC)**

Dans quelle situation le risque d'être frappé et blessé par la foudre est-il le plus élevé?

- A) En montant les escaliers de la tour Eiffel.
- B) En se cachant dans les bois.
- C) En conduisant une voiture.
- D) Voler sous les nuages avec un avion.

**Question 1.17 (MC)**

La vitesse de fuite de la Terre pour une particule de masse  $m = 1 \text{ kg}$  et de charge  $q = 1 \text{ C}$  est approximativement  $11.18 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Quelle serait-elle si la Terre avait une charge totale de  $Q = -44.3 \text{ kC}$ ? La masse de la Terre est  $M = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$ , son rayon est  $R = 6371 \text{ km}$ , la constante de Coulomb est  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.99 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{C}^{-2}$  et la constante gravitationnelle est  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ .

- A)  $15.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
- B)  $25.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
- C)  $38.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
- D)  $55.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

**Question 1.18 (MC)**

Considérons deux sphères, chacune portant la même charge totale  $q$ . L'une des sphères est uniformément chargée dans tout son volume, tandis que l'autre est une sphère conductrice dont la charge n'est répartie que sur sa surface. Les sphères peuvent avoir des rayons différents. Déterminez quelle sphère produit un champ électrique plus intense à une distance  $d$  du centre de la sphère, où  $d > R$  (le rayon de la sphère).

- A) La sphère conductrice produit un champ électrique plus intense.
- B) La sphère uniformément chargée produira un champ électrique plus intense.
- C) La sphère de plus grand rayon produira un champ électrique plus intense.
- D) La sphère de plus petit rayon produira un champ électrique plus intense.
- E) Le champ électrique sera le même pour les deux sphères.

**Question 1.19 (MC)**

La chef Clara veut faire chauffer ses aliments le plus rapidement possible. Elle décide d'utiliser sa table de cuisson à induction, qui génère un champ magnétique changeant pour induire des courants dans les casseroles en métal. Que lui suggèreriez-vous ?

- A) Placer la casserole légèrement décentrée sur la table de cuisson à induction.
- B) L'utilisation d'une casserole faite d'un matériau non conducteur comme le verre.
- C) L'utilisation d'une casserole fabriquée dans un matériau hautement conducteur, comme le cuivre.
- D) L'utilisation d'une casserole avec un fond plus petit, qui couvre moins le champ magnétique de la table de cuisson.

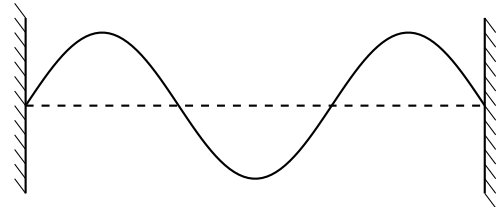
**Question 1.20 (MC)**

On sait qu'il est possible de briser un verre à vin en émettant le bon son. Qu'advient-il du son nécessaire pour briser le verre si on le remplit partiellement d'eau ?

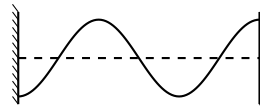
- A) La fréquence augmente.
- B) La fréquence diminue.
- C) Seule l'intensité nécessaire change.
- D) Rien ne change.

**Question 1.21 (MC)**

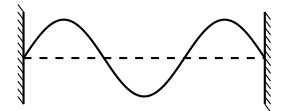
L'image montre une onde stationnaire sur une corde entre deux murs au temps  $t = 0$  s. La corde vibre à une fréquence de 100 Hz. Laquelle des images suivantes montre l'état de la corde à  $t = 10$  ms ?



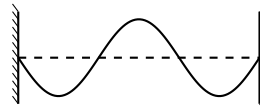
A)



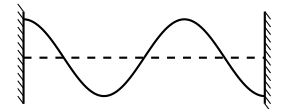
B)



C)



D)



**Multiple Choice : feuille-réponse**

Donnez vos réponses dans les cases prévues à cet effet sur cette page.

<b>Nom :</b>	<b>Prénom :</b>	<b>Total :</b>
--------------	-----------------	----------------

	A	B	C	D	E	F
Question 1.1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Question 1.2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Question 1.6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Question 1.8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.11	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.12	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Question 1.14	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.16	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.17	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.18	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Question 1.19	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.21	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		



**Multiple Choice : solutions**

	A	B	C	D	E	F
Question 1.1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Question 1.2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Question 1.4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Question 1.6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Question 1.7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Question 1.8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.11	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Question 1.12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Question 1.14	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Question 1.15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.16	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.17	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.18	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Question 1.19	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.20	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Question 1.21	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		



**PHYSICS.  
OLYMPIAD.CH**

PHYSIK-OLYMPIADE  
OLYMPIADES DE PHYSIQUE  
OLIMPIADI DELLA FISICA

# Olympiades de Physique

## Deuxième tour

15 janvier 2025

**Partie 2 : 3 problèmes longs**

Durée : 120 minutes

Total : 48 points (3 × 16)

---

Moyens autorisés : Calculatrice simple

Matériel pour écrire et dessiner

## Bonne chance !

Supported by :



## Constantes fondamentales

Fréquence hyperfine du césium	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9.192 631 770	$\times 10^9$	$\text{s}^{-1}$
Vitesse de la lumière dans le vide	$c$	2.997 924 58	$\times 10^8$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Constante de Planck	$h$	6.626 070 15	$\times 10^{-34}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Charge élémentaire	$e$	1.602 176 634	$\times 10^{-19}$	$\text{A} \cdot \text{s}$
Constante de Boltzmann	$k_{\text{B}}$	1.380 649	$\times 10^{-23}$	$\text{K}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
Constante d'Avogadro	$N_{\text{A}}$	6.022 140 76	$\times 10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$
Efficacité lumineuse d'un rayonnement	$K_{\text{cd}}$	6.83	$\times 10^2$	$\text{cd} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{sr}$
Constante magnétique	$\mu_0$	1.256 637 062 12(19)	$\times 10^{-6}$	$\text{A}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
Constante électrique	$\varepsilon_0$	8.854 187 812 8(13)	$\times 10^{-12}$	$\text{A}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^4$
Constante des gaz	$R$	8.314 462 618...		$\text{K}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma$	5.670 374 419...	$\times 10^{-8}$	$\text{K}^{-4} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
Constante gravitationnelle	$G$	6.674 30(15)	$\times 10^{-11}$	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$
Masse de l'électron	$m_{\text{e}}$	9.109 383 701 5(28)	$\times 10^{-31}$	$\text{kg}$
Masse du proton	$m_{\text{n}}$	1.674 927 498 04(95)	$\times 10^{-27}$	$\text{kg}$
Masse du neutron	$m_{\text{p}}$	1.672 621 923 69(51)	$\times 10^{-27}$	$\text{kg}$
Accélération normale de la pesanteur	$g_{\text{n}}$	9.806 65		$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

## Problèmes longs

Durée : 120 minutes

Cotation : 48 points ( $3 \times 16$ )

Commencez chaque problème sur une nouvelle feuille afin de faciliter la correction.

*Remarque générale : les problèmes sont composés de parties partiellement indépendantes. En cas de blocage, il est conseillé de continuer à lire et de faire les parties plus faciles.*

### Problème long 2.1 : Strépy-Thieu Boat Lift (16 points)

L'ascenseur à bateaux de Strépy-Thieu est une infrastructure navale destinée à relier deux canaux en Belgique. Il se compose de deux caissons indépendants à contrepoids, qui peuvent chacun accueillir une grande barge de 1350 tonnes. L'image ci-dessous montre la structure de base d'un de ces caissons. *Note : Les valeurs numériques de ce problème ont été adaptées et ne reflètent pas entièrement la réalité. Si vous utilisez un résultat déjà obtenu, continuez toujours à calculer avec le nombre exact.*

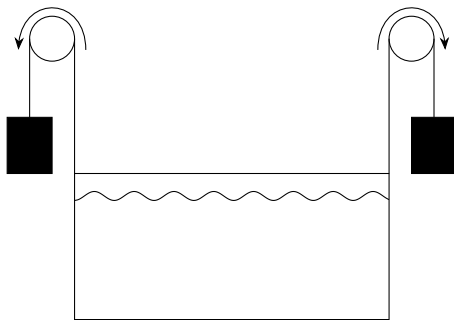


Figure 1 : Vue schématique d'un caisson. Vous pouvez voir les contrepoids en noir et le caisson, où vient le bateau, au milieu. Entre les deux, il y a les câbles qui s'enroulent autour des cylindres.

#### Partie A. Statique (5.5 points)

Nous voulons d'abord déduire quelques propriétés du système au repos. Un caisson a des dimensions intérieures de  $112\text{ m} \times 12\text{ m}$  et une profondeur d'eau de  $4\text{ m}$ . Il est suspendu par 112 câbles de suspension et 32 câbles de commande, ces derniers étant également utilisés pour le déplacer.

**i. (1 pt)** Quel est la masse total de l'eau à l'intérieur du caisson en l'absence de bateau ?

**ii. (1 pt)** Sachant qu'un caisson vide pèse  $3000\text{ t}$  et que les contrepoids correspondent exactement à la masse totale du caisson plein, calculez la tension  $T$  dans chacun des câbles (= force supportée par chacun des câbles). Vous pouvez supposer que tous les câbles ont la même tension.

**iii. (1.5 pt)** L'ascenseur est conçu pour transporter des bateaux jusqu'à  $1350\text{ t}$ . Calculez le volume d'eau qui quitte le caisson lorsqu'un tel bateau y entre. Expliquez votre résultat. Supposez que le niveau de l'eau reste constant.

**iv. (2 pt)** Le caisson a une porte à chaque extrémité (étroite), qui s'étend sur toute la section transversale de l'eau. Calculez la force avec laquelle l'eau pousse sur chaque porte.

#### Partie B. Dynamique (7 points)

Nous voulons maintenant que le caisson se déplace, afin de transporter les bateaux.

**i. (1 pt)** Les câbles de commande peuvent supporter une tension maximale de  $600\text{ kN}$ . Calculez l'accélération maximale possible avant que les câbles ne se rompent.

Nous considérons maintenant un câble s'enroulant autour d'un cylindre et nous voulons calculer la force supplémentaire créée par le frottement. En d'autres termes, nous voulons trouver la relation entre la tension  $T_{\text{Charge}}$  d'un côté du câble, la tension  $T_{\text{Maintien}}$  de l'autre côté, le coefficient de frottement  $\mu$  et l'angle total  $\varphi$  (donné en radians) balayé par le câble autour du cylindre.

**ii. (1 pt)** Décrivez le changement  $\delta F_N$  de la force normale (du câble sur le cylindre) causé par un petit changement  $\delta\varphi$  de l'angle balayé par le câble. Supposez qu'il y a une tension  $T_{\text{Charge}}$  sur le câble et utilisez les simplifications appropriées.

**iii. (3 pt)** En utilisant le résultat précédent, comment la variation de la tension par petit angle

$\frac{dT_{\text{Charge}}(\varphi)}{d\varphi}$  dépend-elle de la tension et du frottement ? Indiquez ce que  $T_{\text{Charge}}(\varphi)$  doit être lorsque  $\varphi = 0$ . Il s'agit maintenant d'une équation différentielle. Vous n'avez pas besoin de la résoudre.

Chaque câble de commande s'enroule autour d'une roue motorisée qui actionne l'ascenseur. L'effet du frottement sur un câble enroulé autour d'un cylindre peut être calculé à l'aide de l'équation suivante, qui est la solution de l'équation différentielle que vous avez dérivée ci-dessus :

$$T_{\text{Charge}} = T_{\text{Maintien}} \cdot e^{\mu\varphi}. \quad (\text{B.1})$$

**iv. (2 pt)** Calculez le nombre minimal de tours nécessaires pour chaque câble de commande afin de pouvoir atteindre l'accélération maximale sans que le câble ne glisse. Le coefficient de frottement acier sur acier est de 0.78. *Indice : pensez à la configuration du système*

### Partie C. Énergétique (3.5 points)

Enfin, nous voulons faire quelques considérations sur l'énergie utilisée.

L'ascenseur a une vitesse maximale de  $0.2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  et une hauteur de 73.15m. Il est propulsé par des

moteurs électriques, qui peuvent également être utilisés comme générateurs pour le ralentir. L'efficacité de ces moteurs est moindre lorsqu'ils sont utilisés comme générateurs :

$$\eta_{\text{générateur}} = 0.7\eta_{\text{moteur}}. \quad (\text{C.1})$$

Vous pouvez négliger la dissipation d'énergie due au frottement pour cette partie.

**i. (1 pt)** Calculez l'énergie totale qui est effectivement nécessaire pour une ascension du caisson.

**ii. (1 pt)** Quelle masse d'eau pourrions-nous porter à ébullition avec cette énergie ? L'eau commence à  $18^\circ\text{C}$  et a une capacité thermique spécifique de  $c = 4.18\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ . *Indice : Si vous n'avez pas trouvé la réponse à la question précédente, utilisez 100kJ à la place.*

**iii. (1.5 pt)** Calculez la puissance moyenne nécessaire pendant la phase d'accélération. Vous pouvez supposer que le changement d'accélération est instantané et que nous n'utilisons que la moitié de l'accélération maximale pour garder une marge de sécurité.

### Problème long 2.2 : Cristaux liquides (16 points)

Certains hublots d'avion peuvent ajuster leur transparence grâce à la technologie des cristaux liquides, qui contrôle la quantité de lumière qui passe à travers. Ce réglage s'effectue en ajustant la polarisation de la lumière qui passe. La polarisation désigne la direction d'oscillation du champ électrique de la lumière (qui est une onde électromagnétique). La polarisation est toujours perpendiculaire à la direction de propagation et peut donc être représentée par un vecteur dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. Si de la lumière d'intensité  $I$  traverse un polariseur linéaire, l'intensité de la lumière transmise  $I_t$  est généralement donnée par la formule suivante

$$I_t = I \cos^2(\alpha), \quad (1)$$

où  $\alpha$  est l'angle entre la direction de polarisation de la lumière entrante et l'axe de transmission du second polariseur.

#### Partie A. Schéma du système (4 points)

Tout d'abord, la lumière passe à travers un polariseur linéaire statique, qui fixe la direction de polarisation de la lumière. Ensuite, la lumière traverse une couche de cristaux liquides qui modifie la polarisation de la lumière d'un angle,  $\Delta\phi$ , en fonction du champ électrique appliqué. À l'état fondamental (sans champ), le cristal liquide fait tourner la polarisation d'un angle  $\Delta\phi_0$ . Lorsqu'un champ électrique est appliqué, l'angle de rotation diminue. Enfin, la lumière traverse un second polariseur linéaire placé à une distance  $d$  et aligné à un angle  $\theta = 90^\circ$  par rapport au premier, ce qui détermine l'intensité finale de la lumière transmise.

**i. (2 pt)** Esquissez le système, indiquez la distance entre les filtres et insérez une étiquette pour l'intensité à chaque étape (il n'est pas nécessaire de calculer les intensités introduites pour l'instant, voir les tâches suivantes).

**ii. (1 pt)** Décrivez avec vos propres mots l'état de polarisation de la lumière entrante.

**iii. (1 pt)** Décrivez avec vos propres mots l'état de polarisation de la lumière sortante.

#### Partie B. Comportement du condensateur (3 points)

La couche de cristaux liquides a une épaisseur de  $d = 5 \mu\text{m}$  et une tension maximale appliquée de  $V_{\text{max}} = 12 \text{ V}$ . La permittivité relative des cristaux liquides est  $\epsilon_r = 10$ . *Note : nous négligeons les effets de bord dans ce qui suit.*

**i. (2 pt)** Calculez l'intensité du champ électrique  $E_{\text{max}}$  appliqué entre les deux polariseurs à travers la couche de cristaux liquides lorsque la tension maximale est appliquée.

**ii. (1 pt)** Déterminez la capacité  $C$  d'une zone de  $0.125 \text{ m}^2$  de la couche de cristaux liquides.

#### Partie C. Réglage de l'intensité (6 points)

Dans ce système, l'angle  $\alpha$  est déterminé par le changement de polarisation dû au cristal liquide ( $\Delta\phi$ ) et l'orientation du second polariseur. Nous avons

$$\alpha = \theta - \Delta\phi, \quad (\text{C.1})$$

où le changement de polarisation  $\Delta\phi$  causé par le cristal liquide dépend de la tension appliquée et est approximé par

$$\Delta\phi = \Delta\phi_0 \left(1 - \frac{V}{V_{\text{max}}}\right), \quad (\text{C.2})$$

où  $V_{\text{max}} = 12 \text{ V}$  élimine complètement la rotation de la polarisation. *Note : nous négligeons les réflexions (qui seraient présentes en raison de l'importance de  $\epsilon_r$ ).*

**i. (2 pt)** Quelle est l'intensité lumineuse  $I_{LC}$  après le premier polariseur linéaire par rapport à l'intensité de la lumière entrante  $I_0$  ?

**ii. (1 pt)** Vous souhaitez avoir une fenêtre avec une transparence maximale. Si vous êtes libre de choisir la valeur de  $\Delta\phi_0 \in (0, 2\pi)$ , quelle valeur lui donneriez-vous ? Utilisez cette valeur pour toutes les sous-tâches suivantes. Si vous ne trouvez pas la valeur optimale, indiquez dans les sous-tâches suivantes la valeur numérique supposée que vous utilisez pour les calculs ultérieurs.

**iii. (3 pt)** Calculer la tension  $V_1$  qui doit être appliquée pour réduire l'intensité de la lumière transmise de 70% par rapport à la lumière entrante.

#### Partie D. Écrans de la calculatrice (3 points)

La même technologie est utilisée dans les écrans de nombreuses calculatrices. La seule différence conceptuelle est qu'un miroir est placé d'un côté de l'installation. La lumière traverse donc le système deux fois.

**i. (2 pt)** Dans ce cas, quelle tension  $V_2$  doit être appliquée pour réduire l'intensité de 70% par rapport à la lumière entrante ?

**ii. (1 pt)** Quelle est la valeur de la fraction  $\frac{V_1}{V_2}$  ?

**Problème long 2.3 : Voltmètre (16 points)**

Un voltmètre est un appareil utilisé pour mesurer les tensions dans un circuit électrique. L'utilisation du voltmètre dans la pratique repose sur quelques bases théoriques. Dans cet exercice, tu découvriras comment un voltmètre peut fonctionner et ce à quoi il faut faire attention dans la pratique lorsqu'on utilise un voltmètre.

**Partie A. Calculer les tensions (4.5 points)**

Considérez le circuit électrique de la figure A.1. Dans un premier temps, nous voulons calculer la tension aux bornes des différentes résistances. Nous appliquons une tension  $V_0 = 10\text{ V}$  et connaissons les valeurs des résistances ( $R_1 = 10\text{ M}\Omega$ ,  $R_2 = 500\text{ k}\Omega$  et  $R_3 = 750\text{ k}\Omega$ ).

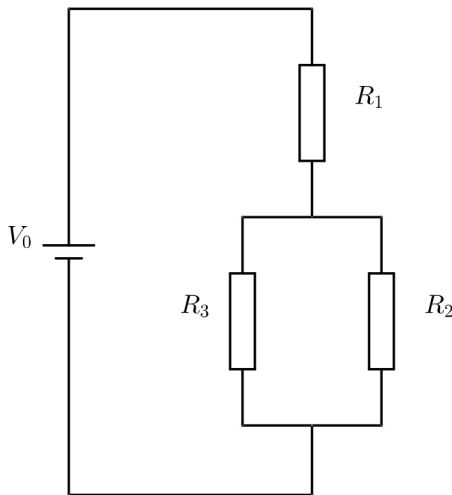


Figure A.1: Circuit électrique avec tension appliquée  $V_0$  et résistances  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$ .

**i. (2 pt)** Calculez les tensions  $U_1$ ,  $U_2$  et  $U_3$  aux bornes des résistances respectives  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$ .

**ii. (1 pt)** Considérons maintenant le circuit électrique de la Fig. A.2. Nous considérons ce circuit pour deux configurations expérimentales différentes  $A$  et  $B$ . Les deux configurations expérimentales ne diffèrent que par les valeurs des résistances  $R_1$  et  $R_2$ . Calculez la tension  $U_2$  aux bornes de la résistance  $R_2$  pour les deux dispositifs expérimentaux différents  $A$  et  $B$ :

- $R_1^{(A)} = 10\text{ k}\Omega$  et  $R_2^{(A)} = 50\text{ k}\Omega$ ,

- $R_1^{(B)} = 10\text{ M}\Omega$  et  $R_2^{(B)} = 50\text{ M}\Omega$ .

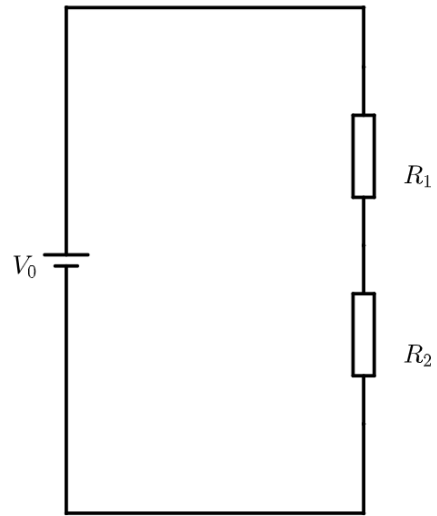


Figure A.2: Circuit électrique avec tension appliquée  $V_0$  et résistances  $R_1$  et  $R_2$ .

**iii. (1.5 pt)** Qu'est-ce qui frappe dans la tension calculée  $U_2$  dans les deux dispositifs expérimentaux  $A$  et  $B$ ? Justifiez mathématiquement pourquoi il en est ainsi.

**Partie B. Résistance interne d'un voltmètre (6 points)**

Un voltmètre est un instrument de mesure permettant de mesurer des tensions. Idéalement, la mesure n'entraîne pas de courant dans le voltmètre. Dans les instruments réels, l'isolation et la mesure ne sont toutefois pas parfaites, de sorte qu'un courant circule tout de même. Ce courant est décrit par une résistance dans le voltmètre, la résistance interne. Dans cette sous-question, nous considérons le circuit électrique dans la Fig. A.2 et calculons ainsi la résistance interne du voltmètre.

**i. (2 pt)** Dessinez un schéma montrant comment connecter un voltmètre au circuit électrique de la Fig. A.2 pour mesurer la tension aux bornes de  $R_2$ . Justifiez votre choix.

**ii. (3 pt)** Lors d'une expérience, nous avons reproduit les deux dispositifs expérimentaux et mesuré à chaque fois la tension aux bornes de  $R_2$  avec le même voltmètre. Nous avons obtenu les valeurs suivantes

- A)  $\tilde{U}_2^A = 8.33 \text{ V}$ ,
- B)  $\tilde{U}_2^B = 7.14 \text{ V}$ .

Calculez la résistance interne  $R_i$  du voltmètre.

**iii. (1 pt)** Qu'est-ce qui doit être valable pour la résistance interne  $R_i$  par rapport à celle que l'on veut mesurer pour des mesures précises ?

**Partie C. Électroscope (5.5 points)**

Un voltmètre analogique peut être représenté au moyen d'un électroscope. Dans les prochaines sous-questions, nous considérons donc un électroscope tel qu'il est représenté dans la Fig. C.1. L'électroscope se compose de deux plaques à travers lesquelles un champ est créé lorsqu'une tension est appliquée. Sur l'une des plaques est fixée une aiguille conductrice qui peut tourner librement. Pour les tâches suivantes, nous supposons que le champ  $E$  entre les deux plaques est homogène. Les plaques ont une surface  $A$  et ont respectivement une charge positive  $Q$  et une charge négative  $-Q$ . Le pointeur a une petite charge positive  $q$ . Nous supposons en outre que toute la charge  $q$  et toute la masse  $m$  du pointeur se trouvent dans sa pointe.

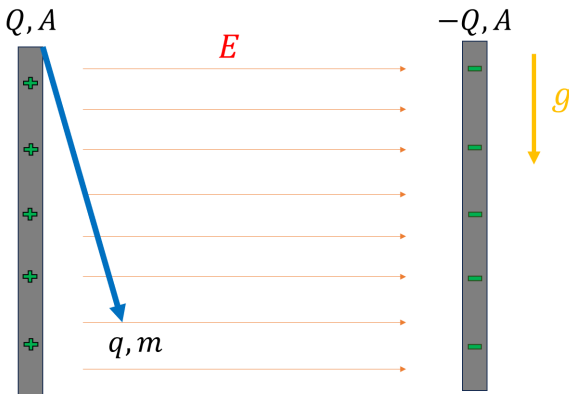


Figure C.1 : Schéma de l'électroscope. À gauche et à droite se trouvent les plaques avec des charges  $Q$  et  $-Q$ . Les deux plaques ont une surface  $A$ . Le pointeur bleu a une charge  $q$  et une masse  $m$ , que nous supposons être respectivement une masse ponctuelle et une charge ponctuelle dans la pointe de la flèche. Le champ électrique  $E$ , représenté en rouge sur le schéma, entre les deux plaques, est homogène.

- i. (0.5 pt)** Expliquez pourquoi l'aiguille se déplace.
- ii. (1 pt)** Quelle condition doit être remplie lorsque le pointeur ne se déplace plus dans la direction tangentielle ? Décrivez à l'aide d'un croquis.
- iii. (2 pt)** À partir de la condition d'équilibre pour la direction tangentielle, calculez l'angle de déviation  $\alpha$  en fonction des forces présentes.
- iv. (1.5 pt)** Calculez la force électrique exercée sur la pointe en fonction des charges  $Q$  sur la plaque, de la charge  $q$  sur la pointe et de la surface  $A$  de la plaque.
- v. (0.5 pt)** Calculez maintenant l'angle de déviation pour les valeurs suivantes :

- $m = 200 \text{ g}$ ,
- $q = 0.001 \mu\text{C}$ ,
- $Q = 30 \mu\text{C}$ ,
- $A = 1.5 \text{ dm}^2$ ,
- $\epsilon = \epsilon_0$ .



## Problèmes longs : solutions

### Problème long 2.1 : Strépy-Thieu Boat Lift

16

L'ascenseur à bateaux de Strépy-Thieu est une infrastructure navale destinée à relier deux canaux en Belgique. Il se compose de deux caissons indépendants à contrepoids, qui peuvent chacun accueillir une grande barge de 1350 tonnes. L'image ci-dessous montre la structure de base d'un de ces caissons. *Note : Les valeurs numériques de ce problème ont été adaptées et ne reflètent pas entièrement la réalité. Si vous utilisez un résultat déjà obtenu, continuez toujours à calculer avec le nombre exact.*

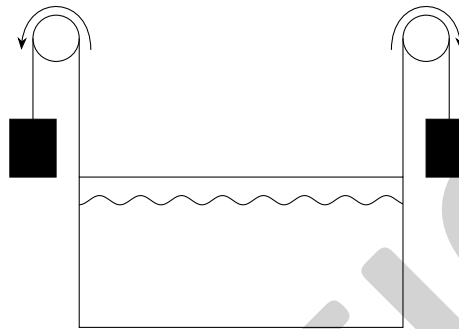


Figure 1 : Vue schématique d'un caisson. Vous pouvez voir les contrepoids en noir et le caisson, où vient le bateau, au milieu. Entre les deux, il y a les câbles qui s'enroulent autour des cylindres.

#### Partie A. Statique

5.5

Nous voulons d'abord déduire quelques propriétés du système au repos. Un caisson a des dimensions intérieures de 112 m × 12 m et une profondeur d'eau de 4 m. Il est suspendu par 112 câbles de suspension et 32 câbles de commande, ces derniers étant également utilisés pour le déplacer.

i. Quel est la masse total de l'eau à l'intérieur du caisson en l'absence de bateau ?

1

$$m = \rho V = \rho \cdot \text{Length} \cdot \text{Width} \cdot \text{Height} \tag{A.1}$$

For water,  $\rho = 1000 \text{ kilogram/m}^3$ . The total water mass is then 5 376 000 kg. Also accepted are solutions of the form  $5.4 \cdot 10^6 \text{ kg}$ . However, we require to continue working with the exact result.

1

ii. Sachant qu'un caisson vide pèse 3000 t et que les contrepoids correspondent exactement à la masse totale du caisson plein, calculez la tension  $T$  dans chacun des câbles (= force supportée par chacun des câbles). Vous pouvez supposer que tous les câbles ont la même tension.

1

The tension in one cable is equal to the gravitational pull of the caisson divided by the number of cables.

$$T = m_{\text{caisson+water}}g/(112 + 32) = 570420\text{N} = 570\text{kN} \tag{A.2}$$

We do not accept  $6 \cdot 10^5 \text{ N}$ . Doubling the value because the caisson and the counterweight pull down is wrong. 0.5 points for that.

1

**iii. L'ascenseur est conçu pour transporter des bateaux jusqu'à 1350t. Calculez le volume d'eau qui quitte le caisson lorsqu'un tel bateau y entre. Expliquez votre résultat. Supposez que le niveau de l'eau reste constant.**

1.5

According to Archimede's Principle, the volume of liquid displaced is so that it's mass is equal to the mass of the floating object. Since water has a density of  $1000\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , the displaced volume is exactly  $1350\text{m}^3$ . We give 1 point for the numerical result, 0.5 points for the explanation (either just the name Archimede's Principle or a description of it).

1.5

**iv. Le caisson a une porte à chaque extrémité (étroite), qui s'étend sur toute la section transversale de l'eau. Calculez la force avec laquelle l'eau pousse sur chaque porte.**

2

*The force exerted on the door is given by the pressure of the water multiplied with the area of the door. The difficulty here is that the pressure is not constant over the whole door.*

The pressure at a given depth is given by:

$$p = \rho gh \tag{A.3}$$

with  $h$  being the depth.

0.5

Therefore, the total force on the door is:

$$F_{\text{Door}} = \int_0^4 p \cdot 12dh = \int_0^4 12\rho gh dh \tag{A.4}$$

1

For water, we can again use  $\rho = 1000\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . This results in a total force of  $F_{\text{Door}} = 941438.1\text{N} \approx 940\text{kN}$ . We accept also different roundings, as long as it makes sense (e.g.  $9 \cdot 10^5$  does NOT make sense).

0.5

**Partie B. Dynamique**

7

**Nous voulons maintenant que le caisson se déplace, afin de transporter les bateaux.**

**i. Les câbles de commande peuvent supporter une tension maximale de 600 kN. Calculez l'accélération maximale possible avant que les câbles ne se rompent.**

1

The cables have a tension of  $570.420\text{kN}$  while at rest (see previous question). We therefore have  $(600 - 570.420)\text{kN} = 29.580\text{kN}$  of force available for the acceleration.

0.5

The acceleration can then be calculated using Newton's second law:  $F = ma$ . We have 32 control cables, Therefore, we get:

$$a_{\text{max}} = \frac{F}{m_{\text{caisson}} + m_{\text{water}}} = \frac{32 \cdot 29580\text{N}}{8376000\text{kg}} = 0.113\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \tag{B.1}$$

The students also get this 0.5 points if they are missing the  $570.420\text{kN}$  from the previous question but still set up the correct equation.

0.5

**Nous considérons maintenant un câble s'enroulant autour d'un cylindre et nous voulons calculer la force supplémentaire créée par le frottement. En d'autres termes, nous voulons trouver la relation entre la tension  $T_{\text{Charge}}$  d'un côté du câble, la tension  $T_{\text{Maintien}}$  de l'autre côté, le coefficient de frottement  $\mu$  et l'angle total  $\varphi$  (donné en radians) balayé par le câble autour du cylindre.**

**ii. Décrivez le changement  $\delta F_N$  de la force normale (du câble sur le cylindre) causé par un petit changement  $\delta\varphi$  de l'angle balayé par le câble. Supposez qu'il y a une tension  $T_{\text{Charge}}$  sur le câble et utilisez les simplifications appropriées.**

1

Depending on the geometrical derivation, one might get these two possible approximations. We accept both:

$$\delta F_N \approx T_{\text{Load}} \sin(\delta\varphi) \approx T_{\text{Load}}\delta\varphi. \tag{B.2}$$

Or

$$\delta F_N \approx 2T_{\text{Load}} \sin\left(\frac{\delta\varphi}{2}\right) \approx T_{\text{Load}}\delta\varphi. \tag{B.3}$$

Only 0.5 points if the small-angle approximation is missing or only the answer without intermediate step is given. 1

**iii. En utilisant le résultat précédent, comment la variation de la tension par petit angle  $\frac{dT_{\text{Charge}}(\varphi)}{d\varphi}$  dépend-elle de la tension et du frottement ? Indiquez ce que  $T_{\text{Charge}}(\varphi)$  doit être lorsque  $\varphi = 0$ . Il s'agit maintenant d'une équation différentielle. Vous n'avez pas besoin de la résoudre.** 3

Going to infinitesimal elements, the result from above is:

$$dF_N = T_{\text{Load}}(\varphi)d\varphi. \tag{B.4}$$

This leads to the following differential equation:

$$\frac{dF_N}{d\varphi} = T_{\text{Load}}(\varphi). \tag{B.5}$$

1

On the verge of slipping, the (additional) tension which can be applied to one side of the cable is given by the friction force. This is in turn given by  $\mu F_N$ . 0.5

Combining these results, we can get the following result by multiplying both side of the differential equation with  $\mu$  and substituting  $T_{\text{Load}}$ :

$$\frac{dT_{\text{Load}}(\varphi)}{d\varphi} = \mu T_{\text{Load}}(\varphi). \tag{B.6}$$

0.5

The initial condition can be easily deduced by considering the case of  $\varphi = 0$ , corresponding to not wrapping the cable around the cylinder at all. Then, the tension on one side of the cable must trivially be the same as the other side:  $T_{\text{Load}}(0) = T_{\text{Hold}}$ . 1

**Chaque câble de commande s'enroule autour d'une roue motorisée qui actionne l'ascenseur. L'effet du frottement sur un câble enroulé autour d'un cylindre peut être calculé à l'aide de l'équation suivante, qui est la solution de l'équation différentielle que vous avez dérivée ci-dessus :**

$$T_{\text{Charge}} = T_{\text{Maintien}} \cdot e^{\mu\varphi}. \tag{B.7}$$

**iv. Calculez le nombre minimal de tours nécessaires pour chaque câble de commande afin de pouvoir atteindre l'accélération maximale sans que le câble ne glisse. Le coefficient de frottement acier sur acier est de 0.78. Indice : pensez à la configuration du système** 2

In our case,  $T_{\text{Load}}$  will be the 600kN while  $T_{\text{Hold}}$  is given by the tension needed to "slow down" the counterweights in their fall:  $T_{\text{Hold}} = (570.420 - 29.580) \text{ kN} = 540.840\text{kN}$ . 0.5

The equation solved for  $\varphi$  is:

$$\varphi = \frac{\log\left(\frac{T_{Hold}}{T_{Load}}\right)}{\mu}. \quad (\text{B.8})$$

Here, log is the natural log.

0.5

We obtain the numerical result

$$\varphi = \frac{\log\left(\frac{600000\text{N}}{540840\text{N}}\right)}{0.15} = 0.692 \quad (\text{B.9})$$

0.5

The numerical value is between  $\pi/5$  and  $\pi/4$ , which would correspond to 1/9 of a turn. However, due to the fact that both end of the cables have to go downwards to the caisson or counterweight, we need at least half a turn. The reasoning to obtain the answer needs to be there and correct. (Taking 0.692, rounding it to 0.5 and interpreting it as the number of turn is wrong.)

0.5

### Partie C. Énergétique

3.5

**Enfin, nous voulons faire quelques considérations sur l'énergie utilisée.**

**L'ascenseur a une vitesse maximale de  $0.2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  et une hauteur de 73.15m. Il est propulsé par des moteurs électriques, qui peuvent également être utilisés comme générateurs pour le ralentir. L'efficacité de ces moteurs est moindre lorsqu'ils sont utilisés comme générateurs:**

$$\eta_{\text{générateur}} = 0.7\eta_{\text{moteur}}. \quad (\text{C.1})$$

**Vous pouvez négliger la dissipation d'énergie due au frottement pour cette partie.**

**i. Calculez l'énergie totale qui est effectivement nécessaire pour une ascension du caisson.**

1

The potential energy does not play a role in this, since we have a counterweight. The kinetic energy (independent whether there is a boat or not) is therefore the only one that plays a role, and we get 0.7 of it back while decelerating. The needed energy is therefore:

$$E_{\text{needed}} = 0.3 \cdot \frac{1}{2} m_{\text{caisson} + \text{water}} v_{\text{max}}^2. \quad (\text{C.2})$$

0.5

The numerical result is then:

$$E_{\text{needed}} = 0.3 \cdot \frac{1}{2} 8376000\text{kg} \cdot (0.2\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2 = 50256\text{J} \approx 50\text{kJ}. \quad (\text{C.3})$$

0.5

**ii. Quelle masse d'eau pourrions-nous porter à ébullition avec cette énergie? L'eau commence à  $18^\circ\text{C}$  et a une capacité thermique spécifique de  $c = 4.18\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Indice: Si vous n'avez pas trouvé la réponse à la question précédente, utilisez 100kJ à la place.**

1

The energy needed to raise the temperature of a certain mass  $m$  of water by  $\Delta T$  is

$$E = mc\Delta T. \quad (\text{C.4})$$

Therefore, we will use the following equation:

$$m = \frac{E}{c\Delta T}. \quad (\text{C.5})$$

0.5

In our case,  $\Delta T = (100 - 18) \text{ K} = 82 \text{ K}$ . This gives:

$$m = \frac{50256 \text{ J}}{4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K} \cdot 82 \text{ K}} = 0.147 \text{ kg}. \quad (\text{C.6})$$

If the 100kJ were used, the result would be 0.292kg. At least two significant digits are needed, but not overly many.

0.5

**iii. Calculez la puissance moyenne nécessaire pendant la phase d'accélération. Vous pouvez supposer que le changement d'accélération est instantané et que nous n'utilisons que la moitié de l'accélération maximale pour garder une marge de sécurité.**

1.5

The power needed is given by the work exerted divided by the time. The total work is equal to the final kinetic energy, since we start with no energy. Again, potential energy does not play a role. The time needed can be easily calculated from the maximal speed and the acceleration used:  $t = v / (0.5a_{\text{max}})$ . Bringing all of this together, we get:

$$P = \frac{m_{\text{caisson}} + m_{\text{water}} v a_{\text{max}}}{4}. \quad (\text{C.7})$$

1

We obtain the numerical result:

$$P = \frac{8376000 \text{ kg} \cdot 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0.113 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{4} = 47328 \text{ W}. \quad (\text{C.8})$$

It is reasonable to round this to two decimal digits so  $P = 47 \text{ kW}$ . More are also correct.

0.5

**Problème long 2.2 : Cristaux liquides**

16

Certains hublots d’avion peuvent ajuster leur transparence grâce à la technologie des cristaux liquides, qui contrôle la quantité de lumière qui passe à travers. Ce réglage s’effectue en ajustant la polarisation de la lumière qui passe. La polarisation désigne la direction d’oscillation du champ électrique de la lumière (qui est une onde électromagnétique). La polarisation est toujours perpendiculaire à la direction de propagation et peut donc être représentée par un vecteur dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. Si de la lumière d’intensité  $I$  traverse un polariseur linéaire, l’intensité de la lumière transmise  $I_t$  est généralement donnée par la formule suivante

$$I_t = I \cos^2(\alpha), \tag{1}$$

où  $\alpha$  est l’angle entre la direction de polarisation de la lumière entrante et l’axe de transmission du second polariseur.

**Partie A. Schéma du système**

4

Tout d’abord, la lumière passe à travers un polariseur linéaire statique, qui fixe la direction de polarisation de la lumière. Ensuite, la lumière traverse une couche de cristaux liquides qui modifie la polarisation de la lumière d’un angle,  $\Delta\phi$ , en fonction du champ électrique appliqué. À l’état fondamental (sans champ), le cristal liquide fait tourner la polarisation d’un angle  $\Delta\phi_0$ . Lorsqu’un champ électrique est appliqué, l’angle de rotation diminue. Enfin, la lumière traverse un second polariseur linéaire placé à une distance  $d$  et aligné à un angle  $\theta = 90^\circ$  par rapport au premier, ce qui détermine l’intensité finale de la lumière transmise.

**i. Esquissez le système, indiquez la distance entre les filtres et insérez une étiquette pour l’intensité à chaque étape (il n’est pas nécessaire de calculer les intensités introduites pour l’instant, voir les tâches suivantes).**

2

Sketch of: First polarizing filter.

0.25

Label the distance between the linear polarizers.

0.25

Sketch of: Liquid cristal, marked that it rotates the polarization axis.

0.25

Sketch of: Second polarizing filter, turned  $90^\circ$  with respect to the first.

0.25

Sketch of: Outcoming light.

0.25

Incoming light intensity  $I_0$ .

0.25

Light intensity in the liquid cristal  $I_{LC}$  (assumed constant).

0.25

Outcoming light intensity  $I_1$ .

0.25

**ii. Décrivez avec vos propres mots l’état de polarisation de la lumière entrante.**

1

The incoming light is not polarized (sunlight). (To be precise: also sunlight is polarized (i.e. every EM wave is polarized) but it has an arbitrary direction and varying in time.)

1

**iii. Décrivez avec vos propres mots l’état de polarisation de la lumière sortante.**

1

The outcoming light is linearly polarized.

0.5

The polarization axis is the same as the polarization axis of the second filter. 0.5

**Partie B. Comportement du condensateur** 3

La couche de cristaux liquides a une épaisseur de  $d = 5 \mu\text{m}$  et une tension maximale appliquée de  $V_{\text{max}} = 12 \text{ V}$ . La permittivité relative des cristaux liquides est  $\epsilon_r = 10$ . *Note : nous négligeons les effets de bord dans ce qui suit.*

i. Calculez l'intensité du champ électrique  $E_{\text{max}}$  appliqué entre les deux polariseurs à travers la couche de cristaux liquides lorsque la tension maximale est appliquée. 2

The maximum field strength is given by

$$E_{\text{max}} = \frac{V_{\text{max}}}{d} = \frac{12 \text{ V}}{5 \mu\text{m}} = 2.4 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}. \quad (\text{B.1})$$

2

ii. Déterminez la capacité  $C$  d'une zone de  $0.125 \text{ m}^2$  de la couche de cristaux liquides. 1

The capacity in such a situation is given by

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}. \quad (\text{B.2})$$

Substituting with the given numerical values yields

$$C = (8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}) \cdot 10 \cdot \frac{0.125 \text{ m}^2}{5 \times 10^{-6} \text{ m}} = 2.2 \mu\text{F}. \quad (\text{B.3})$$

1

**Partie C. Réglage de l'intensité** 6

Dans ce système, l'angle  $\alpha$  est déterminé par le changement de polarisation dû au cristal liquide ( $\Delta\phi$ ) et l'orientation du second polariseur. Nous avons

$$\alpha = \theta - \Delta\phi, \quad (\text{C.1})$$

où le changement de polarisation  $\Delta\phi$  causé par le cristal liquide dépend de la tension appliquée et est approximé par

$$\Delta\phi = \Delta\phi_0 \left(1 - \frac{V}{V_{\text{max}}}\right), \quad (\text{C.2})$$

où  $V_{\text{max}} = 12 \text{ V}$  élimine complètement la rotation de la polarisation. *Note : nous négligeons les réflexions (qui seraient présentes en raison de l'importance de  $\epsilon_r$ ).*

i. Quelle est l'intensité lumineuse  $I_{LC}$  après le premier polariseur linéaire par rapport à l'intensité de la lumière entrante  $I_0$ ? 2

Assume uniform polarization angle probability distribution for the incoming light. 0.5

So,

$$I_t = \sum_{\alpha} p(\alpha \in [\alpha, \alpha + \epsilon]) I \cos^2(\alpha) \quad (\text{C.3})$$

or

$$I_t = \int_0^{2\pi} p(\alpha) I \cos^2(\alpha) d\alpha \tag{C.4}$$

One obtains  $I_{LC} = \frac{I_0}{2}$ . Give all points for the derivation, if this formula is correct. 0.5

The student clearly states that  $I_{LC} < I_0$ . Alternatively full points are given, if the numerical solution fullfills the above statement (no points are attributed for follow up errors).e 0.25

The student clearly states that  $I_{LC} > 0$ . Alternatively full points are given, if the numerical solution fullfills the above statement (no points are attributed for follow up errors). 0.25

**ii. Vous souhaitez avoir une fenêtre avec une transparence maximale. Si vous êtes libre de choisir la valeur de  $\Delta\phi_0 \in (0, 2\pi)$ , quelle valeur lui donnerez-vous ? Utilisez cette valeur pour toutes les sous-tâches suivantes. Si vous ne trouvez pas la valeur optimale, indiquez dans les sous-tâches suivantes la valeur numérique supposée que vous utilisez pour les calculs ultérieurs.** **1**

It is has to be equal the angle difference of the two linear polarizers. Thus we have  $\Delta\phi_0 = \theta = 90^\circ$ . 1

**iii. Calculer la tension  $V_1$  qui doit être appliquée pour réduire l'intensité de la lumière transmise de 70% par rapport à la lumière entrante.** **3**

Realize it is a combination of the 'unpolarized' to 'linearly polarized' and the misalignment of the linear polarized light with the second filter. 0.5

Provide the statement  $I_L C = \frac{I_0}{2} \cos^2 \alpha$ . 0.25

State that  $0.3 = \frac{I_1}{I_0} = \frac{1}{2} \cos^2 \alpha_1$ . 0.25

Solve for  $\alpha_1 = \arccos(\sqrt{0.3 \cdot 2})$ . 0.25

State that  $\alpha_1 = \theta - \Delta\phi_0 \left(1 - \frac{V}{V_{\max}}\right)$ .  
Optionally: provide a numerical answer  $\alpha_1 = 39^\circ$ . 0.25

Solve for  $V = V_{\max} \left(1 - \frac{\theta - \alpha_1}{\Delta\phi_0}\right)$ . If the final formula is correct, give full points to all above derivation subtasks. 0.5

Provide the numerical answer  $V_1 = 5.2 \text{ V}$ . 0.5

The student clearly states that  $V_1 > 0 \text{ V}$   
Alternatively full points are given, if the numerical solution fullfills the above statement (no points are attributed for follow up errors). 0.25

The student clearly states that  $V_1 < V_{\max}$   
Alternatively full points are given, if the numerical solution fullfills the above statement (no points are attributed for follow up errors). 0.25

**Partie D. Écrans de la calculatrice** **3**

**La même technologie est utilisée dans les écrans de nombreuses calculatrices. La seule différence conceptuelle est qu'un miroir est placé d'un côté de l'installation. La lumière traverse donc le système deux fois.**



**i. Dans ce cas, quelle tension  $V_2$  doit être appliquée pour réduire l'intensité de 70% par rapport à la lumière entrante ?** **2**

Realize its a combination of the ‘unpolarized’ to ‘linearly polarized’ and the misalignment of the linearly polarized light with the second filter and on the way back the misalignment of the linearly polarized light with the first filter.

Provide the statement  $I_2 = \frac{I_0}{2} \cos^2(\alpha_2) \cos^2(\alpha_2)$ . 0.25

State that  $0.3 = \frac{I_2}{I_0} = \frac{1}{2} \cos^2(\alpha_2) \cos^2(\alpha_2)$ .

Solve for  $\alpha_2 = \arccos(\sqrt[4]{0.3 \cdot 2})$ .

Optionally: provide a numerical answer  $\alpha_2 = 28^\circ$ . 0.25

Repeat the same steps as in the previous subtask, resulting in  $V_2 = \frac{V}{d} = \frac{V_{\max} \left(1 - \frac{\theta - \alpha_2}{\Delta\phi_0}\right)}{d}$ .  
Give full points to all derivation subtasks, if the final formula is correct. 0.5

Provide the numerical answer  $V_2 = 3.8 \text{ V}$ . 0.5

The student clearly states that  $V_2 > 0 \text{ V}$ .  
Alternatively full points are given, if the numerical solution fullfills the above statement (no points are attributed for follow up errors). 0.25

The student clearly states that  $V_2 < V_{\max}$ .  
Alternatively full points are given, if the numerical solution fullfills the above statement (no points are attributed for follow up errors). 0.25

**ii. Quelle est la valeur de la fraction  $\frac{V_1}{V_2}$  ?** **1**

State that

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_{\max} \left(1 - \frac{\theta - \alpha_1}{\Delta\phi_0}\right)}{V_{\max} \left(1 - \frac{\theta - \alpha_2}{\Delta\phi_0}\right)} \tag{D.1}$$

This simplifies to  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{\left(1 - \frac{\theta - \alpha_1}{\Delta\phi_0}\right)}{\left(1 - \frac{\theta - \alpha_2}{\Delta\phi_0}\right)}$ . 0.5

Provide the numerical answer  $\frac{V_1}{V_2} = 1.38$ . 0.25

The student clearly states that  $V_2 < V_1$  and thus  $\frac{V_1}{V_2} > 1$ .  
Alternatively full points are given, if the numerical solution fullfills the above statement (no points are attributed for follow up errors). 0.25

**Problème long 2.3 : Voltmètre****16**

Un voltmètre est un appareil utilisé pour mesurer les tensions dans un circuit électrique. L'utilisation du voltmètre dans la pratique repose sur quelques bases théoriques. Dans cet exercice, tu découvriras comment un voltmètre peut fonctionner et ce à quoi il faut faire attention dans la pratique lorsqu'on utilise un voltmètre.

**Partie A. Calculer les tensions****4.5**

Considérez le circuit électrique de la figure A.1. Dans un premier temps, nous voulons calculer la tension aux bornes des différentes résistances. Nous appliquons une tension  $V_0 = 10\text{ V}$  et connaissons les valeurs des résistances ( $R_1 = 10\text{ M}\Omega$ ,  $R_2 = 500\text{ k}\Omega$  et  $R_3 = 750\text{ k}\Omega$ ).

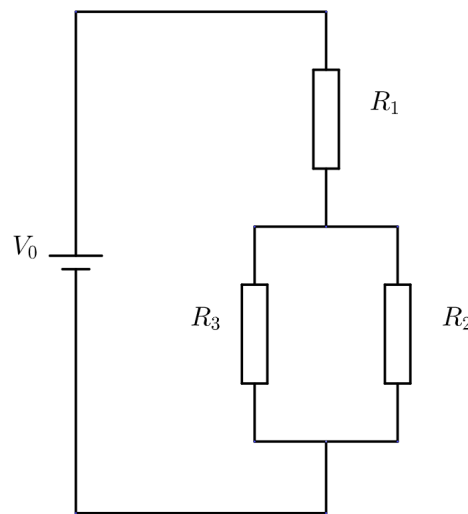


Figure A.1 : Circuit électrique avec tension appliquée  $V_0$  et résistances  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$ .

**i. Calculez les tensions  $U_1$ ,  $U_2$  et  $U_3$  aux bornes des résistances respectives  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$ .**

**2**

We compute  $R_{\text{tot}}$  by first computing  $R_{2,3}$ , the equivalent resistance of the parallel resistors  $R_2$  and  $R_3$

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{2,3}} &= \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \\ \Rightarrow R_{2,3} &= \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)^{-1} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}. \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

0.5

Then  $R_{\text{tot}}$  can be computed as the combination of  $R_1$  and  $R_{2,3}$  in series

$$\begin{aligned} R_{\text{tot}} &= R_1 + R_{2,3} \\ R_{\text{tot}} &= R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}. \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

0.5

From this equation we can compute the current

$$\begin{aligned} U_0 &= R_{\text{tot}} \cdot I_0 \\ I_0 &= \frac{U_0}{R_{\text{tot}}} . \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

For the first resistor, the entire current flows through it and therefore  $U_1$  can be calculated

$$U_1 = R_1 \cdot I_0 = R_1 \cdot \frac{U_0}{R_{\text{tot}}} = 9.7 \text{ V} . \quad (\text{A.5})$$

0.5

As  $R_2$  and  $R_3$  are in parallel, the same voltage is applied across both resistors. Together with  $U_1$ , this must result in the input voltage  $U_0$ .

$$\begin{aligned} U_0 &= U_1 + U_2 = U_1 + U_3 \\ U_2 &= U_3 = U_0 - U_1 = 0.29 \text{ V} . \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

0.5

ii. Considérons maintenant le circuit électrique de la Fig. A.7. Nous considérons ce circuit pour deux configurations expérimentales différentes  $A$  et  $B$ . Les deux configurations expérimentales ne diffèrent que par les valeurs des résistances  $R_1$  et  $R_2$ . Calculez la tension  $U_2$  aux bornes de la résistance  $R_2$  pour les deux dispositifs expérimentaux différents  $A$  et  $B$ :

- $R_1^{(A)} = 10 \text{ k}\Omega$  et  $R_2^{(A)} = 50 \text{ k}\Omega$ ,
- $R_1^{(B)} = 10 \text{ M}\Omega$  et  $R_2^{(B)} = 50 \text{ M}\Omega$ .

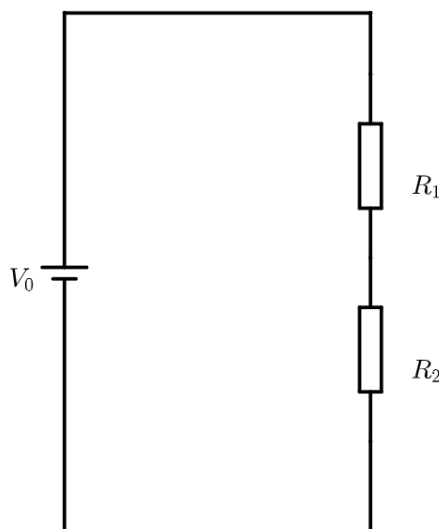


Figure A.7: Circuit électrique avec tension appliquée  $V_0$  et résistances  $R_1$  et  $R_2$ .

1

This is a series circuit, so the total resistance is the addition of the individual resistances

$$R_{\text{tot}} = R_1 + R_2 . \quad (\text{A.8})$$

This allows the total current to be calculated

$$\begin{aligned} U_0 &= R_{\text{tot}} \cdot I_0 \\ \Rightarrow I_0 &= \frac{U_0}{R_{\text{tot}}} . \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

The voltages can now be calculated

$$U_2 = R_2 \cdot I_0 = R_2 \cdot \frac{U_0}{R_{\text{tot}}} . \quad (\text{A.10})$$

0.5

The answers for the two different test arrangements are thus

$$\begin{aligned} U_2^{(A)} &= 8.3 \text{ V} , \\ U_2^{(B)} &= 8.3 \text{ V} . \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

0.5

**iii. Qu'est-ce qui frappe dans la tension calculée  $U_2$  dans les deux dispositifs expérimentaux A et B ? Justifiez mathématiquement pourquoi il en est ainsi.**

**1.5**

The voltage  $U_2$  is identical in both experimental setups.

0.5

Reason: we can represent the voltages across a resistor as follows

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 \cdot I_0 , \\ U_2 &= R_2 \cdot I_0 . \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

We can transform this to

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{U_1}{R_1} , \\ I_0 &= \frac{U_2}{R_2} . \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

0.25

Now we can equate and analyze both equations

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{R_1} &= \frac{U_2}{R_2} , \\ \frac{U_1}{U_2} &= \frac{R_1}{R_2} . \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

0.25

From this equation it can be seen that the ratio of  $U_1$  and  $U_2$  is identical to that of  $R_1$  and  $R_2$ . Since the same ratio of resistances is present in both test arrangements, the ratio of voltages is also identical and therefore the voltage  $U_2$  is the same in both arrangements.

0.5

***Solution alternative :***

**(1.5)**

*Alternative solution.*

The voltage  $U_2$  is identical in both experimental setups. (0.5)

This can be seen by noting that in the previous task,  $U_2$  reduces to

$$U_2 = \frac{U_0}{1 + R_1/R_2}, \tag{A.15}$$

such that  $U_2$  only depends on the ratio between  $R_1$  and  $R_2$ . (0.5)

Since the same ratio of resistances is present in both test arrangements, the ratio of voltages is also identical and therefore the voltage  $U_2$  is the same in both arrangements. (0.5)

**Partie B. Résistance interne d'un voltmètre** 6

Un voltmètre est un instrument de mesure permettant de mesurer des tensions. Idéalement, la mesure n'entraîne pas de courant dans le voltmètre. Dans les instruments réels, l'isolation et la mesure ne sont toutefois pas parfaites, de sorte qu'un courant circule tout de même. Ce courant est décrit par une résistance dans le voltmètre, la résistance interne. Dans cette sous-question, nous considérons le circuit électrique dans la Fig. A.7 et calculons ainsi la résistance interne du voltmètre.

**i. Dessinez un schéma montrant comment connecter un voltmètre au circuit électrique de la Fig. A.7 pour mesurer la tension aux bornes de  $R_2$ . Justifiez votre choix.** 2

The voltmeter is connected in parallel to  $R_2$  in the sketch. 0.5

All circuit elements are properly labeled, including the voltmeter. 0.5

Explanation: for a parallel circuit, the same voltage is applied on both elements, such that the voltmeter should be connected in parallel. 1

**Solution alternative :** (2)

The voltmeter is connected in parallel to  $R_2$  in the sketch. (0.5)

All circuit elements are properly labeled, including the voltmeter. (0.5)

Explanation: the voltmeter has to be connected in parallel because it has to measure the voltage difference across the resistor and there is no way it can do it if it is in series. (1)

**ii. Lors d'une expérience, nous avons reproduit les deux dispositifs expérimentaux et mesuré à chaque fois la tension aux bornes de  $R_2$  avec le même voltmètre. Nous avons obtenu les valeurs suivantes**

- A)  $\tilde{U}_2^A = 8.33 \text{ V}$ ,
- B)  $\tilde{U}_2^B = 7.14 \text{ V}$ .

**Calculez la résistance interne  $R_i$  du voltmètre.** 3

The value  $\tilde{U}_2^A = 8.33 \text{ V}$  from the first test arrangement does not help us to calculate the internal resistance  $R_i$ , as the value corresponds to the calculated value without taking the internal resistance into account. 0.5

We know from the previous subtask that the ratio of resistances and voltages is related as follows if we consider a series circuit

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}, \tag{B.1}$$

where  $U_1$  is indirectly given by

$$U_1 = U_0 - U_2. \tag{B.2}$$

Since we connect the voltmeter in parallel as discussed in the previous task, we know that the voltage across the resistor  $R_2$  is the same as that across  $R_i$  and that this corresponds to the voltage across the equivalent resistor  $R_E$

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} &= \frac{R_1}{R_E} \\ \Rightarrow R_E &= \frac{U_2}{U_1} \cdot R_1 = \frac{U_2}{U_0 - U_2} \cdot R_1. \end{aligned} \tag{B.3}$$

We can calculate the equivalent resistance as a parallel circuit

$$R_E = \frac{R_2 \cdot R_i}{R_2 + R_i}. \tag{B.4}$$

If we now set both equations equal, we can solve for  $R_i$  and calculate

$$\begin{aligned} \frac{U_2}{U_0 - U_2} \cdot R_1 &= \frac{R_2 \cdot R_i}{R_2 + R_i} \\ \Rightarrow R_i &= \frac{U_2 \cdot R_1 \cdot R_2}{(U_0 - U_2) \cdot R_2 - U_2 \cdot R_1} = 50 \text{ M}\Omega. \end{aligned} \tag{B.5}$$

**Solution alternative :**

*This alternative solution does not require knowledge of  $U_0$  and but requires the use of the information from both measurements.*

We can express  $U_2$  as (the participant could deduce this e.g. from task A.i)

$$U_2 = \frac{V_0}{1 + \frac{R_1 R_2 + R_1 R_i}{R_2 R_i}}. \tag{B.6}$$

One then obtains

$$\frac{\tilde{U}_2^A}{\tilde{U}_2^B} = \frac{1 + \frac{R_1^B R_2^B + R_1^B R_i}{R_2^B R_i}}{1 + \frac{R_1^A R_2^A + R_1^A R_i}{R_2^A R_i}} = \frac{R_i + R_1^B + \frac{R_1^B R_i}{R_2^B}}{R_i + R_1^A + \frac{R_1^A R_i}{R_2^A}}. \tag{B.7}$$

For clarity, let us call  $\alpha = \frac{\tilde{U}_2^A}{\tilde{U}_2^B}$ . One then obtains

$$\alpha R_i \left( 1 + \frac{R_1^A}{R_2^A} \right) + \alpha R_1^A = R_i \left( 1 + \frac{R_1^B}{R_2^B} \right) + R_1^B. \tag{B.8}$$

Using that  $\frac{R_1^A}{R_2^A} = \frac{R_1^B}{R_2^B}$  gives

$$R_i \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) (\alpha - 1) = R_1^B - \alpha R_1^A. \tag{B.9}$$

(0.5)

We can finally solve for  $R_i$  and compute

$$R_i = \frac{R_1^B - \alpha R_1^A}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)(\alpha - 1)} = 50 \text{ M}\Omega. \tag{B.10}$$

(1)

iii. Qu'est-ce qui doit être valable pour la résistance interne  $R_i$  par rapport à celle que l'on veut mesurer pour des mesures précises ?

1

Because the voltage is measured in parallel, the internal resistance  $R_i$  must be as large as possible compared to the resistance to be measured.

0.5

If the internal resistance is of the same order of magnitude or even lower, the voltage to be measured will deviate from the expected value.

0.5

Partie C. Électroscope

5.5

Un voltmètre analogique peut être représenté au moyen d'un électroscope. Dans les prochaines sous-questions, nous considérons donc un électroscope tel qu'il est représenté dans la Fig. C.1. L'électroscope se compose de deux plaques à travers lesquelles un champ est créé lorsqu'une tension est appliquée. Sur l'une des plaques est fixée une aiguille conductrice qui peut tourner librement. Pour les tâches suivantes, nous supposons que le champ  $E$  entre les deux plaques est homogène. Les plaques ont une surface  $A$  et ont respectivement une charge positive  $Q$  et une charge négative  $-Q$ . Le pointeur a une petite charge positive  $q$ . Nous supposons en outre que toute la charge  $q$  et toute la masse  $m$  du pointeur se trouvent dans sa pointe.

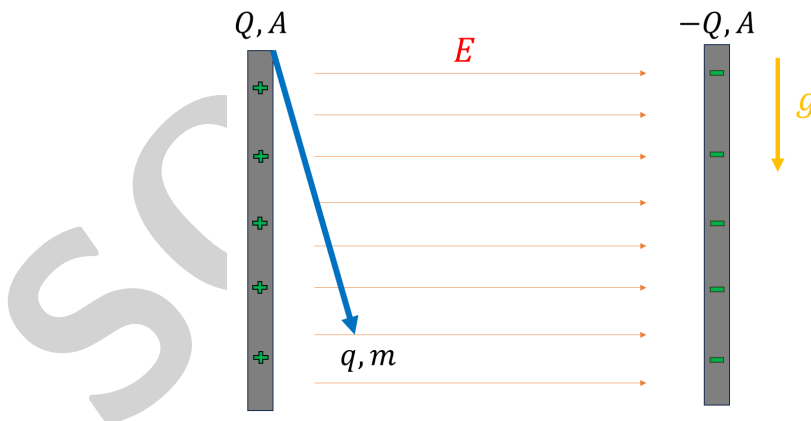


Figure C.1 : Schéma de l'électroscope. À gauche et à droite se trouvent les plaques avec des charges  $Q$  et  $-Q$ . Les deux plaques ont une surface  $A$ . Le pointeur bleu a une charge  $q$  et une masse  $m$ , que nous supposons être respectivement une masse ponctuelle et une charge ponctuelle dans la pointe de la flèche. Le champ électrique  $E$ , représenté en rouge sur le schéma, entre les deux plaques, est homogène.

i. Expliquez pourquoi l'aiguille se déplace.

0.5

The pointer moves because it is charged at the tip and therefore moves along the electric field. As the plate is charged with the same charge, it repels itself. 0.5

**ii. Quelle condition doit être remplie lorsque le pointeur ne se déplace plus dans la direction tangentielle ? Décrivez à l'aide d'un croquis.** 1

The normal component of the gravitational force and the normal component of the Coulomb force from the electric field on the pointer must have the same amount, as they act in opposite directions. 0.5

Clean and correct drawing. 0.5

**iii. À partir de la condition d'équilibre pour la direction tangentielle, calculez l'angle de déviation  $\alpha$  en fonction des forces présentes.** 2

We know from the previous subtask that the normal components of gravity and the force of the field must be equal. The normal forces are calculated as follows.

$$\begin{aligned} F_{G,N} &= \sin(\alpha) \cdot F_G \\ F_{E,N} &= \cos(\alpha) \cdot F_E. \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

This follows from geometric illustrations in the sketch. 1

Since these two forces should be equal, we set them equal and write expressions in terms of  $\alpha$ .

$$\begin{aligned} F_{G,N} &= F_{E,N} \\ \Rightarrow F_G \cdot \sin(\alpha) &= F_E \cdot \cos(\alpha) \\ \Rightarrow \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} &= \tan(\alpha) = \frac{F_E}{F_G} \\ \Rightarrow \alpha &= \tan^{-1}\left(\frac{F_E}{F_G}\right) \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

**iv. Calculez la force électrique exercée sur la pointe en fonction des charges  $Q$  sur la plaque, de la charge  $q$  sur la pointe et de la surface  $A$  de la plaque.** 1.5

The electrical force can be calculated from the electric field as

$$F_E = q \cdot E \quad (\text{C.4})$$

The electric field is given by 0.5

$$E = \frac{Q}{\epsilon \cdot A} \quad (\text{C.5})$$

Assemble both equations leads to the result 0.5

$$F_E = \frac{q \cdot Q}{\epsilon \cdot A} \quad (\text{C.6})$$

**v. Calculez maintenant l'angle de déviation pour les valeurs suivantes :** 0.5

- $m = 200 \text{ g}$ ,
- $q = 0.001 \text{ }\mu\text{C}$ ,
- $Q = 30 \text{ }\mu\text{C}$ ,
- $A = 1.5 \text{ dm}^2$ ,
- $\epsilon = \epsilon_0$ .

Plugging in the numbers leads to the following result 0.5

$$\alpha = \tan^{-1}(0.115\dots) = 6.6^\circ. \quad (\text{C.7})$$

0.5