

# Exercice bilan de physique (expiré de l'E3C 2020)

90 minutes

## Contexte

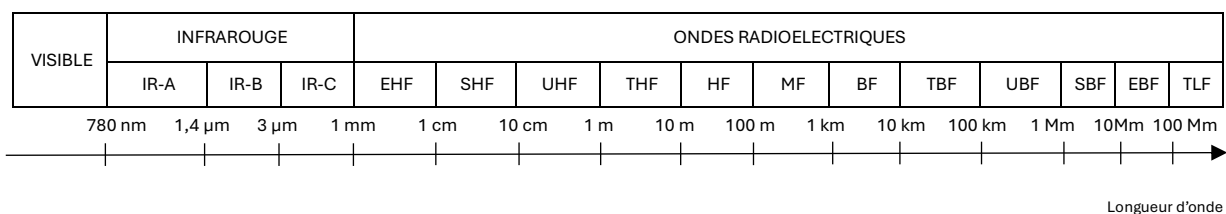
Le 17 mars 1898, le premier ballon-sonde météorologique français était lancé depuis l'observatoire de Trappes, en région parisienne. Il emportait, dans un panier d'osier, un « météorographe », destiné à enregistrer la pression et la température en altitude. En 2026, le projet BalMan (Ballon stratosphérique manœuvrant), développé par le CNES et Hemeria, modernise la technologie des ballons-sondes. En effet, contrairement aux ballons classiques, BalMan est capable de contrôler sa trajectoire et de rester stationnaire au-dessus d'une zone géographique précise.

Données :

- la valeur de la célérité  $c$  des ondes électromagnétiques dans le vide ou dans l'air est  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- masse (enveloppe) =  $80 \text{ kg}$  ;
- masse (nacelle) =  $150 \text{ kg}$  ;
- masse (hélium) =  $50 \text{ kg}$  ;
- intensité du champ de pesanteur :  $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$  ;
- pression atmosphérique au niveau du sol :  $P_0 = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$  ;
- volume initial du ballon :  $V_0 = 270 \text{ m}^3$  ;
- volume du ballon juste avant éclatement :  $V_{\max} = 3440 \text{ m}^3$ .

## 1. Choix technique pour la télécommunication

BalMan utilise des ondes électromagnétiques pour transmettre ses données vers des stations au sol. Il doit émettre dans le domaine UHF (Ultra Haute Fréquence) pour être conforme à la réglementation. La fréquence choisie est de  $f = 403,2 \text{ MHz}$ .



- 1.1. Citer un autre type d'ondes que les ondes électromagnétiques. En donner un exemple.
- 1.2. Exprimer la relation entre célérité  $c$ , longueur d'onde  $\lambda$  et fréquence  $f$
- 1.3. Déterminer la valeur de la longueur d'onde des ondes émises par BalMan. Commenter le choix effectué par rapport aux normes de télécommunication

## 2. Décollage

On considère le ballon juste après le décollage, étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen. On néglige les frottements exercés par l'air.

Le système {ballon + nacelle + hélium} est soumis à deux forces :

- son poids, noté  $\vec{P}$  ;
- la poussée d'Archimède, notée  $\vec{F}$ , verticale, dirigée vers le haut telle que sa norme  $F = 3000 \text{ N}$ .

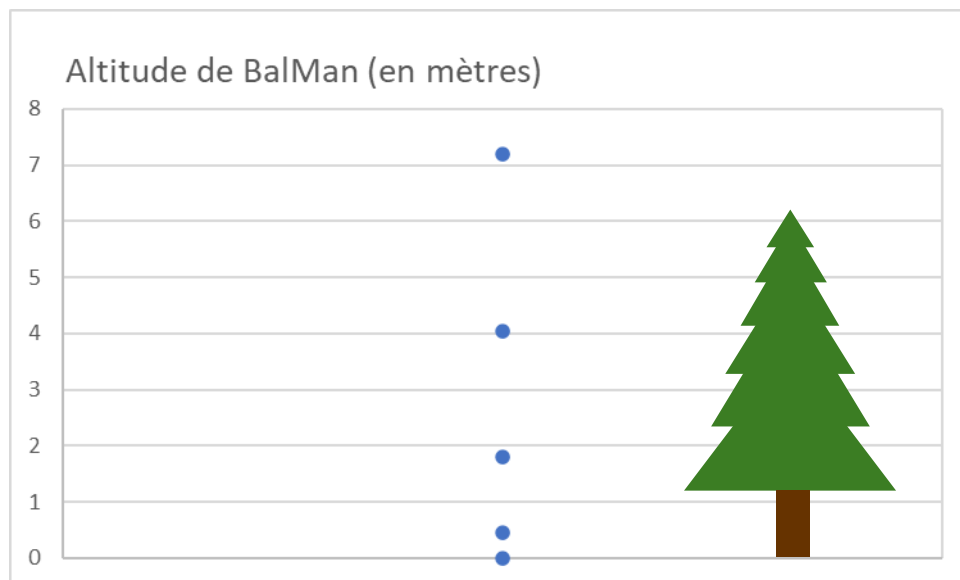
2.1 Calculer la valeur de la masse  $m$  totale du système étudié.

2.2 Calculer la valeur du poids du système {ballon + nacelle + hélium}.

2.3 Représenter les forces exercées sur le système {ballon + nacelle + hélium} modélisé par un point matériel noté **S** (échelle :  $1000 \text{ N} \leftrightarrow 1 \text{ cm}$ ).

2.4 En déduire le vecteur représentant la somme des forces appliquées sur le système et donner les caractéristiques de ce vecteur (direction, sens, norme).

Le ballon possède une trajectoire verticale ascendante, comme montré sur la chronophotographie ci-dessous :



A l'instant  $t_0$ , l'altitude est nulle,  $h_0 = 0 \text{ m}$ .

A l'aide de mesures graphiques, calculer la vitesse du ballon à  $t_1 = 1,0 \text{ s}$  et à  $t_3 = 3,0 \text{ s}$ .

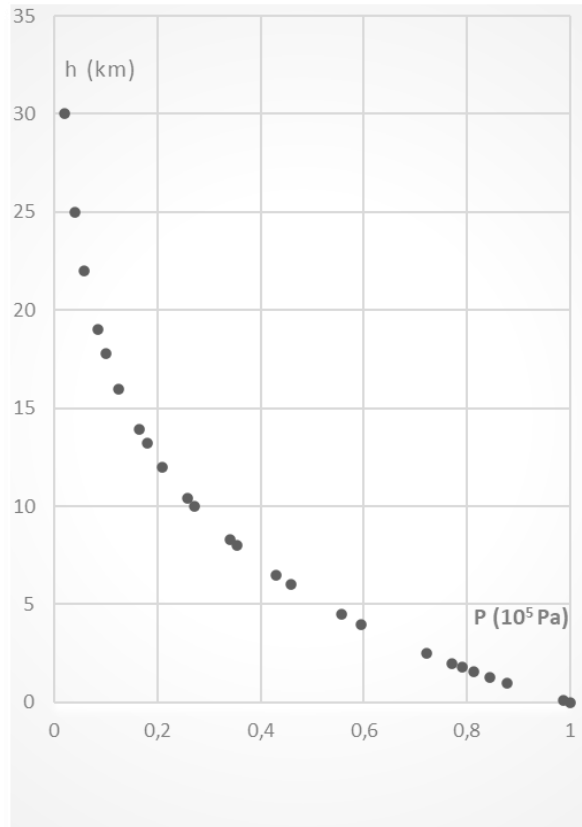
2.5 Calculer la variation de la valeur de la vitesse entre les instants  $t_1$  et  $t_3$ .

2.6 Montrer que cette variation est cohérente avec les caractéristiques de la somme des forces appliquées sur le système.

### 3. Altitude maximale

Dans cette partie, on considère que l'enveloppe du ballon-sonde est parfaitement souple et extensible de sorte que la pression de l'hélium à l'intérieur est constamment égale à la pression atmosphérique.

3.1 À l'aide du relevé de pression  $P$  dans l'atmosphère pour différentes altitudes  $h$ , expliquer comment varie la pression dans le ballon sonde lorsque l'altitude augmente.



3.2 Énoncer la loi de Mariotte relative au produit de la pression  $P$  par le volume  $V$  d'un gaz pour une quantité de matière donnée et une température constante.

3.3 À l'aide de la loi de Mariotte, indiquer comment varie qualitativement le volume du ballon au cours de son ascension. Déterminer ensuite l'altitude maximale atteinte par le ballon juste avant l'éclatement.

3.4 En réalité le ballon peut atteindre une altitude de 31 km sans éclater. Proposer une explication de cette différence.

### 4. Correction

#### 1.1

Un autre type d'ondes est les **ondes mécaniques**. Par exemple : les ondes sonores, qui nécessitent un milieu matériel pour se propager.

## 1.2

La relation entre la célérité  $c$ , la longueur d'onde  $\lambda$ , et la fréquence  $f$  est donnée par :

$$c = \lambda \times f$$

## 1.3

Avec  $f = 403,2 \text{ MHz} = 4,032 \times 10^8 \text{ Hz}$  et  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$  :

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \times 10^8}{4,032 \times 10^8} = 0,74 \text{ m}$$

La longueur d'onde est donc d'environ 74 cm, ce qui correspond au domaine UHF. Ce choix est cohérent car d'après le tableau les ondes UHF ont une longueur d'onde comprise entre 10 cm et 1 m.

## 2.1

La masse totale du système est :

$$m = m(\text{enveloppe}) + m(\text{nacelle}) + m(\text{hélium})$$

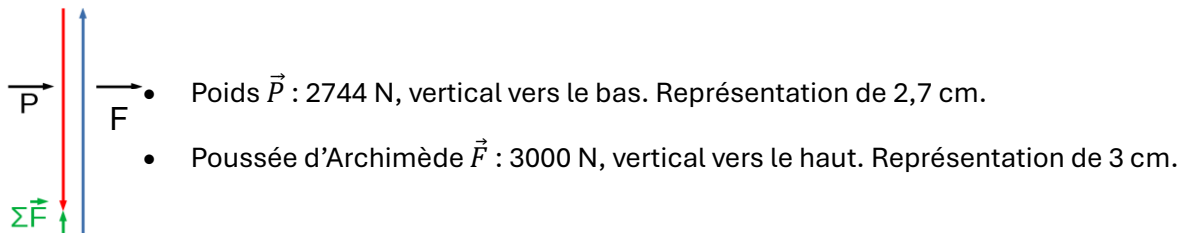
$$m = 80 \text{ kg} + 150 \text{ kg} + 50 \text{ kg} = 280 \text{ kg}.$$

## 2.2

La valeur du poids  $P$  est donné par :

$$P = m \times g = 280 \times 9,8 = 2744 \text{ N}$$

## 2.3



## 2.4

La somme des forces est :  $\vec{\Sigma F} = \vec{F} + \vec{P}$ . Ce vecteur est dirigé vers le haut, avec une norme de  $F - P = 3000 - 2744 = 256 \text{ N}$ .

## 2.5

Une évaluation de la vitesse à  $t = 1 \text{ s}$  est donnée par :

$$v_1 = \frac{(h_1 - h_0) + (h_2 - h_1)}{2 \cdot \Delta t} = \frac{h_2 - h_0}{2 \cdot \Delta t} = \frac{1,8}{2} = 0,9 \text{ m.s}^{-1}$$

De même, on peut estimer la vitesse à  $t = 3 \text{ s}$  par :

$$v_3 = \frac{(h_3 - h_2) + (h_4 - h_3)}{2 \cdot \Delta t} = \frac{h_4 - h_2}{2 \cdot \Delta t} = \frac{5,4}{2} = 2,7 \text{ m.s}^{-1}$$

La vitesse est  $v_1 = 0,9 \text{ m.s}^{-1}$  à  $t_1 = 1,0 \text{ s}$  et  $v_3 = 2,7 \text{ m.s}^{-1}$  à  $t_3 = 3,0 \text{ s}$

La variation de vitesse  $\Delta v$  est de :

$$\Delta v = v_3 - v_1 = 2,7 - 0,9 = 1,8 \text{ m.s}^{-1}$$

2.6

Le calcul de  $m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}$  devrait donner une estimation (en Newton) de la résultante  $R$  des forces s'exerçant sur le ballon :

$$R = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} = 280 \times \frac{1,8}{2} = 252 \text{ N}$$

Cette valeur est cohérente avec celle trouvée à la question 2.4

3.1

D'après le graphique, la pression atmosphérique diminue avec l'altitude. Donc, lorsque l'altitude augmente, la pression dans le ballon-sonde diminue (la pression interne du ballon reste égale à la pression externe, car l'enveloppe est souple).

3.2

La loi de Mariotte s'énonce ainsi :

$$P \times V = \text{constante}$$

3.3

Pendant l'ascension, la pression diminue. Selon la loi de Mariotte, si la pression  $P$  diminue, le volume  $V$  du ballon augmente pour maintenir  $P \times V$  constante.

Le ballon se dilate donc progressivement jusqu'à atteindre son volume maximal  $V_{\max} = 3440 \text{ m}^3$ .

En appliquant la loi de Mariotte, nous avons :

$$P = \frac{P_0 \times V_0}{V_{\max}} = \frac{1.10^5 \times 270}{3440} \approx 7,85.10^3 \text{ Pa} = 78,5 \text{ hPa}$$

Par lecture graphique, nous pouvons voir qu'une pression de 78,5 hPa correspond à une altitude d'environ 19,5 km. L'altitude maximale que peut atteindre le ballon sans éclater est donc de 19,5 km.

3.4

Plusieurs facteurs expliquent que le ballon ait atteint **31 km** en réalité, une altitude supérieure à la prédiction. La loi de Mariotte suppose une température reste constante, mais en réalité, la température diminue avec l'altitude. Le volume du ballon augmente bien avec l'altitude, mais moins rapidement. Par ailleurs, l'enveloppe du ballon est légèrement résistante, ce qui retarde encore un peu l'éclatement.