

Le vol des « plus légers que l'air »

L'homme volant
Société, Culture et Techniques
Lycée Roosevelt de Reims



Le rêve d'Icare



Dédale et son fils Icare, retenus prisonniers dans le labyrinthe du roi Minos en Crète, tentèrent de s'échapper en confectionnant des ailes à l'aide de cire et de plumes.

*Pourquoi Icare est-il tombé ?
Pourquoi sommes-nous « cloués au sol » ?*

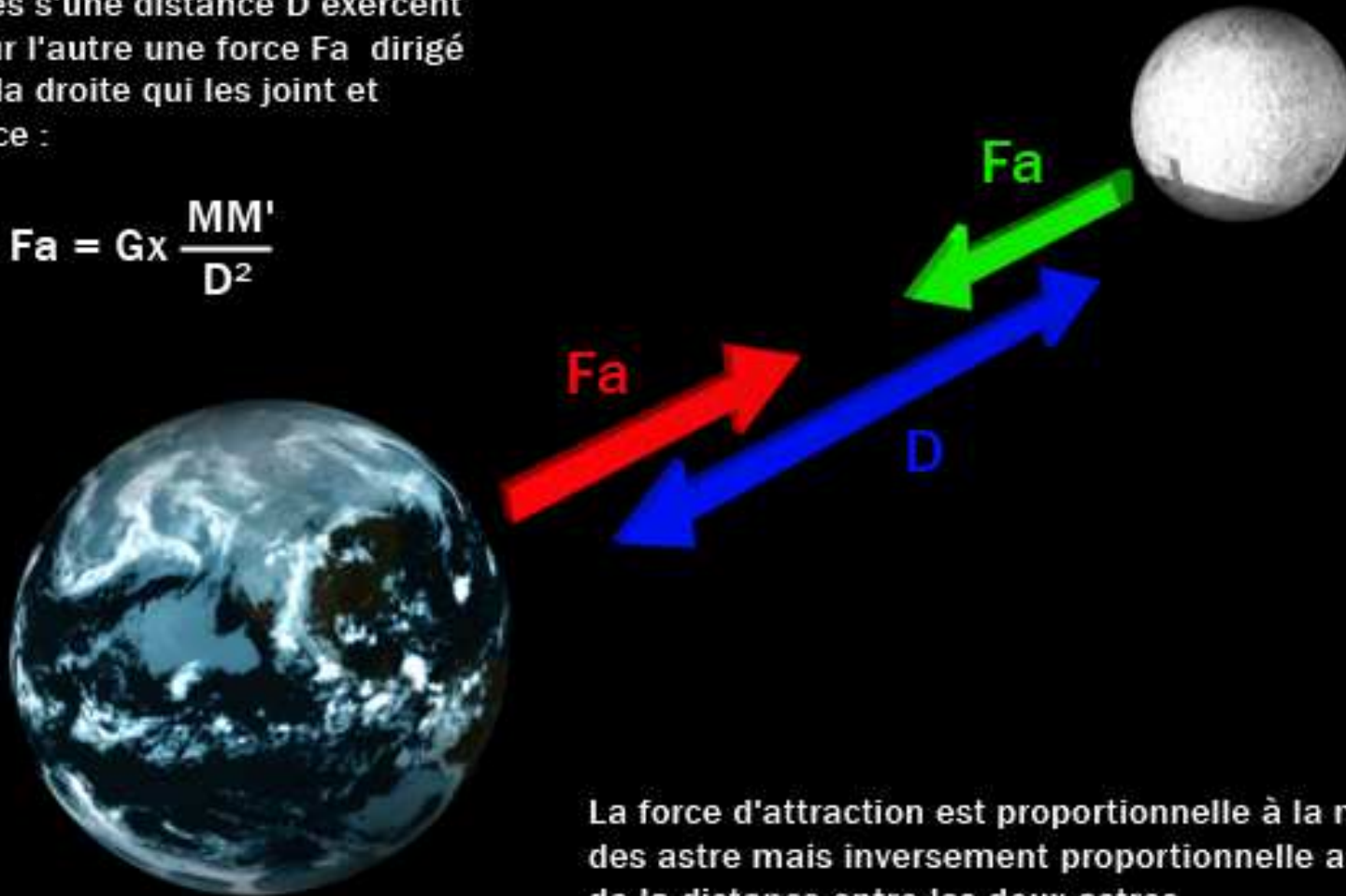


la loi de gravitation universelle. (Isaac Newton en 1684)

La force d'attraction

Deux astres de masses M et M' , séparés d'une distance D exercent l'un sur l'autre une force F_a dirigée selon la droite qui les joint et de force :

$$F_a = G \times \frac{MM'}{D^2}$$



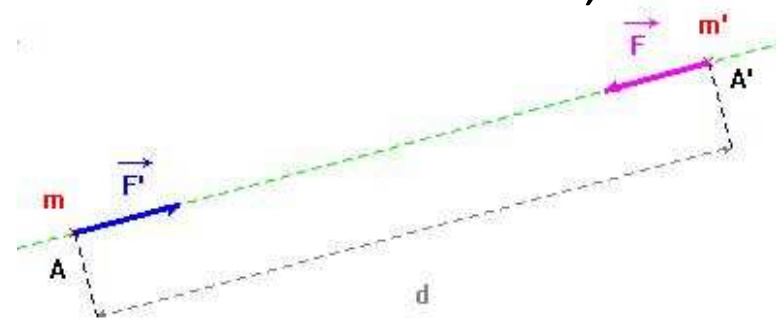
La force d'attraction est proportionnelle à la masse des astres mais inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux astres.
 G est la constante d'attraction gravitationnelle.

La Loi de Gravitation universelle

Énoncé :

Deux corps ponctuels, de masses **m** et **m'**, séparés par une distance **d**, exercent l'un sur l'autre des forces attractives, de même valeur :

$$\mathbf{F} = \mathbf{G} * \frac{\mathbf{m} * \mathbf{m}'}{\mathbf{d}^2}$$



G est appelée la constante d'attraction universelle :

$$\mathbf{G} = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \times \text{m}^2 \times \text{kg}^{-2}$$

Valeur de la force **F** en Newton N

Valeur des masses **m** et **m'** en kg

Distance séparant les deux masses ponctuelles : **d** en m

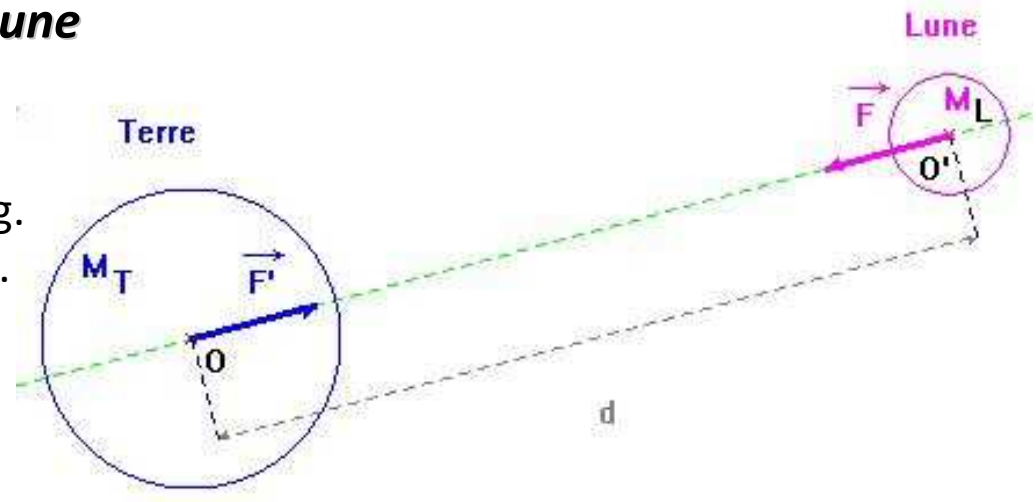
La Loi de Gravitation universelle (suite)

Calculer la valeur de F qui retient la Lune sur son orbite autour de la Terre?

M_T : masse de la Terre : $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$.

M_L : masse de la Lune : $M_L = 7,34 \times 10^{22} \text{ kg}$.

d : distance entre le centre de la Terre et le centre de la Lune : $d = 384\,000 \text{ km}$.

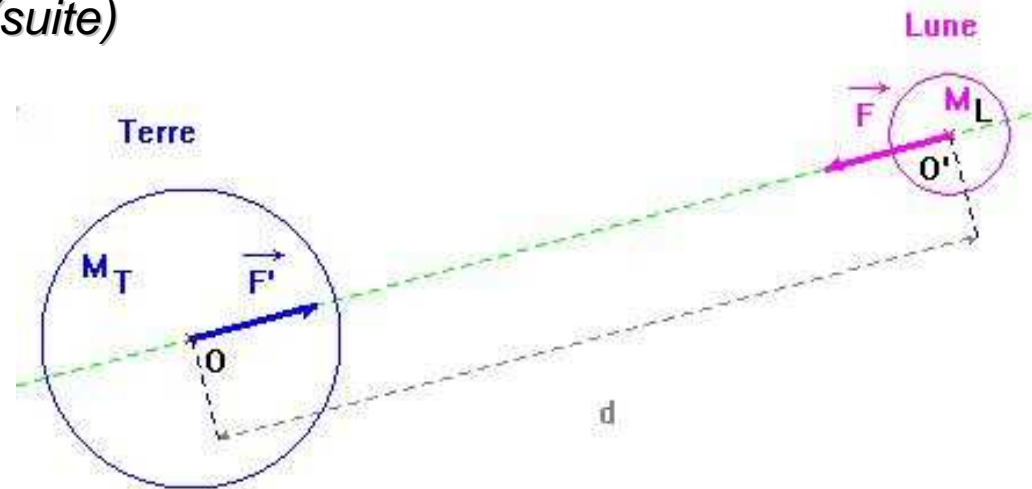


Rappel: $F = G \times (M_T \times M_L) / d^2$

Avec $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \times \text{m}^2 \times \text{kg}^{-2}$

Cette force due à l'interaction gravitationnelle, est une force attractive représentée par le vecteur \vec{F} appliqué au centre de la lune et dirigé vers le centre de la terre

La Loi de Gravitation universelle (suite)



Valeur de F qui « retient » la lune sur son orbite autour de la Terre:

$$F = G \times (M_T \times M_L) / d^2$$

$$F = 6,67 \times 10^{-11} \times (5,98 \times 10^{24} \times 7,34 \times 10^{22}) / (384\,000\,000)^2$$

$$F = 2 \times 10^{20} \text{ N} !!!$$

Force gravitationnelle et poids

Si l'objet est situé à la surface de la Terre, un corps de masse **m** est soumis à une force d'interaction gravitationnelle avec la Terre.

On peut considérer que dans ce cas, la distance correspond au rayon de la terre.

Ainsi

$$F = G \cdot \frac{M_T \cdot m}{d^2}$$

avec

$$d = R_T = 6\,380 \text{ km},$$

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \times \text{m}^2 \times \text{kg}^{-2}$$

$$M_T : \text{masse de la Terre} : M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$m : \text{masse du corps à la surface de la terre}$$

Calculer la valeur $g = G \times M_T / d^2$

Poids et force gravitationnelle (suite).

$$g = G \times (M_T \times M_L) / d^2$$

$$g = 6,67 \times 10^{-11} \times 5,98 \times 10^{24} / (6\,380\,000)^2$$

$$g = 9,8 \text{ N.Kg}^{-1} \text{ pour l'intensité de la pesanteur}$$

(Lorsque l'on parle d'accélération de la pesanteur, on utilise une autre unité en correspondance: m.s^{-2})

La terre exerce une force d'attraction sur la pomme et simultanément, la pomme exerce sur la terre une force d'attraction de même valeur.

Pourquoi est-ce la terre qui attire la pomme, et non le contraire ?

La terre ayant une masse sans commune mesure avec celle de la pomme, la force exercée sur la terre ne l'entraîne presque pas, alors que la force exercée sur la pomme par la terre provoque une chute rapide...

Poids et force gravitationnelle (fin).

Ainsi, on peut définir l'action de la pesanteur terrestre qui permet de calculer la force appelée **poids d'un corps**.

Sur la terre, tout corps de masse **m** est soumis à une force appelée poids du corps :

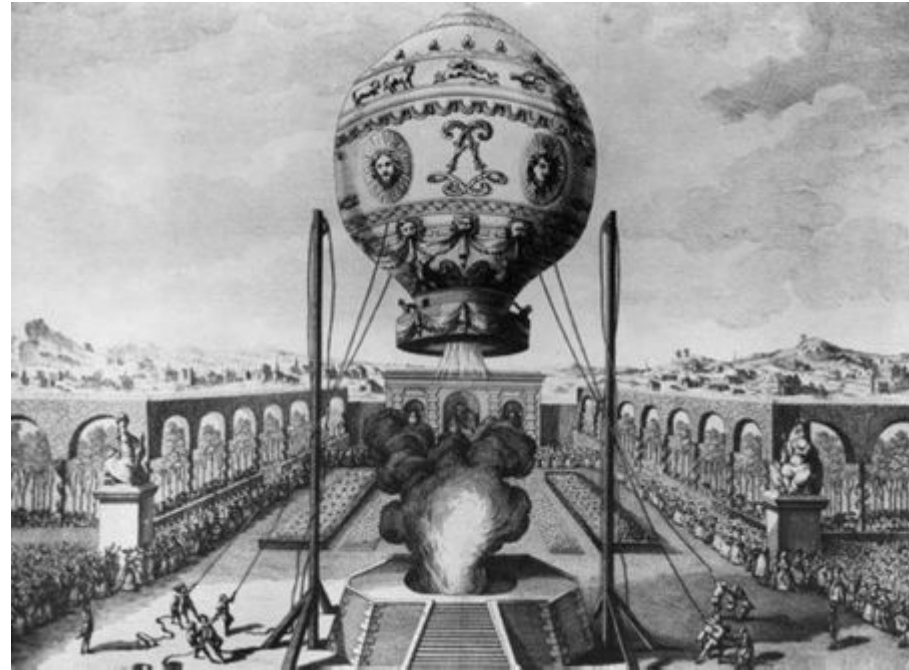
Expression du poids : **$P = m \cdot g$** .

P poids en Newton N,

m la masse en kg

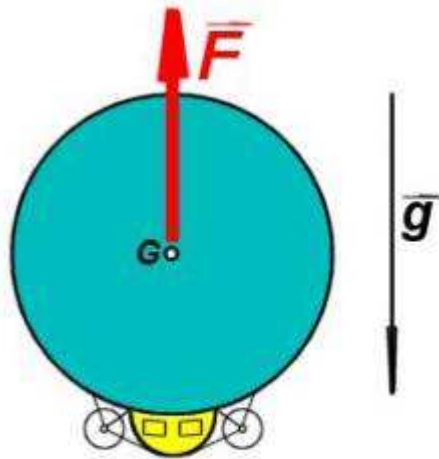
g le facteur d'attraction terrestre : **$g = 9,8 \text{ N / kg}$**

Pourquoi les ballons volent-ils ?



La montgolfière est un aéronef plus léger que l'air aussi appelé **aérostat**, qui a été inventée par les frères Montgolfier, Joseph-Michel et Jacques-Étienne, en 1782.

Vous connaissez la poussée d'Archimède



$$\bar{F} = -\rho \cdot \bar{g} \cdot V$$

C'est elle qui fait qu'un objet coule ou flotte, dans l'eau.

Eh bien elle existe aussi dans l'air !

Ainsi, pour que les ballons et dirigeables volent, il faudra qu'ils soient « plus légers que l'air ».

Tous les aérostats s'envolent sous la poussée d'Archimède.

Qu'est ce que la poussée d'Archimède ?



Enoncé de la poussée d'Archimède :

« Tout corps plongé dans « un fluide, un liquide ou un gaz » subit une poussée verticale, dirigée du bas vers le haut, égale au poids du fluide déplacé. »

Bien souvent, la poussée d'Archimède est négligée dans les calculs des forces car elle est minime face aux autres forces. Cependant, dans le cas des montgolfières, c'est une force élémentaire qui s'oppose au poids et permet le vol des montgolfières.



Le principe d'Archimède appliqué au ballon... **(La pression atmosphérique diminuant avec l'altitude...)**

C'est pour cela qu'il est utilisé, dans le ballon dirigeable, un gaz plus léger que l'air :

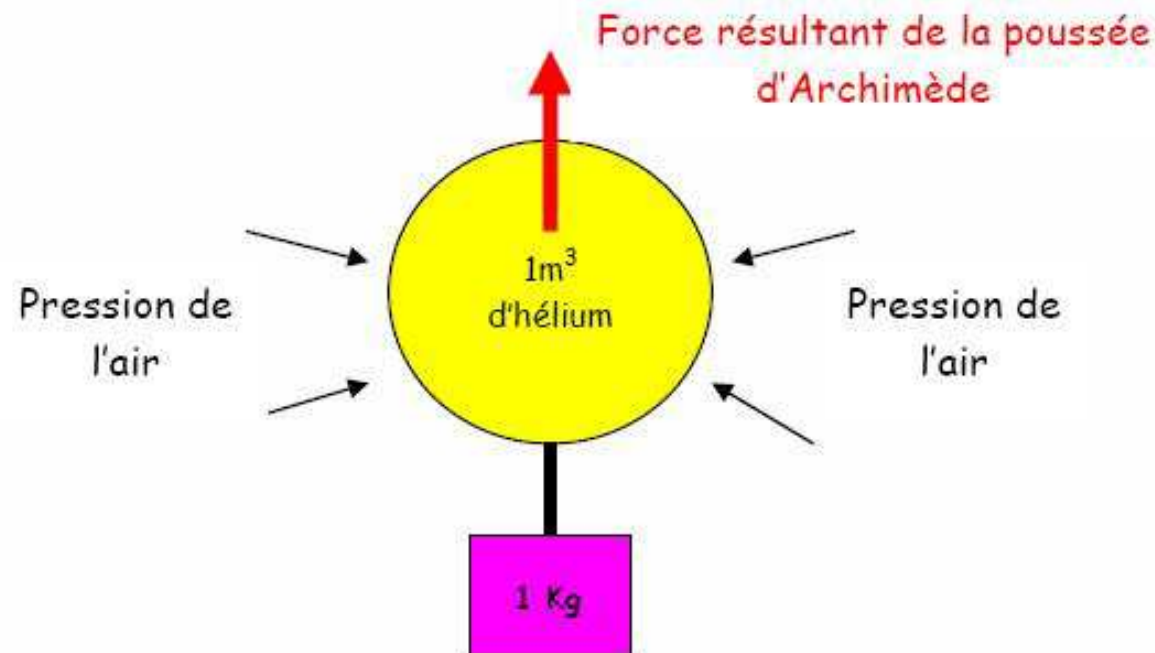
$$1\text{m}^3 \text{ d'air} = 1,3 \text{ Kg}$$

$$1\text{m}^3 \text{ d'hélium} = 0,3 \text{ Kg}$$

Grâce à cela on obtient :

Poids du volume d'air = Poids du volume d'hélium + Poids de la masse déplaçable

⇒ $(1\text{m}^3 \text{ d'Air}) \text{ Poids de } 1,3 \text{ Kg} = (1 \text{ m}^3 \text{ d'Hélium}) \text{ Poids de } 0,3 \text{ Kg} + (1 \text{ Kg à lever}) \text{ Poids de } 1 \text{ Kg}$



Comment obtenir du plus léger que l'air ?



Pour élever un objet dans les airs il faut avoir recours à un ballon contenant **un fluide moins dense que l'air**.

C'est le cas de certains gaz tel que, l'hélium (0,14) ou , l'hydrogène (0,07).

Attention, l'hydrogène est inflammable...

Et l'air chaud ?

Pourquoi l'air chaud est-il plus léger que l'air froid ?

L'explication commence par l'équation d'état des gaz parfaits (découverte par Amedeo Avogadro en 1811)

$$P \times V = n \times R \times T$$

Dans cette expression,

P est la pression du gaz (en pascal) ;

V est le volume occupé par le gaz (en mètre cube) ;

n est la quantité de matière (en mole) ;

R est la constante universelle des gaz parfaits : $R = 8,314\,472\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

T est la température absolue (en kelvin).

Lorsque la température augmente, la pression ou le volume augmente (équation des gaz parfaits). Dans le cas de la montgolfière, la pression est constante (air libre) et le volume disponible est constant (il est fixé par l'enveloppe): **de l'air s'échappe donc. Chauffé, il y a moins de gaz dans le ballon !!!**
Pour que l'équation reste « équilibrée, « n » a donc baissé, pour compenser l'augmentation de « T »

Pourquoi l'air chaud est-il plus léger que l'air froid ? (suite)

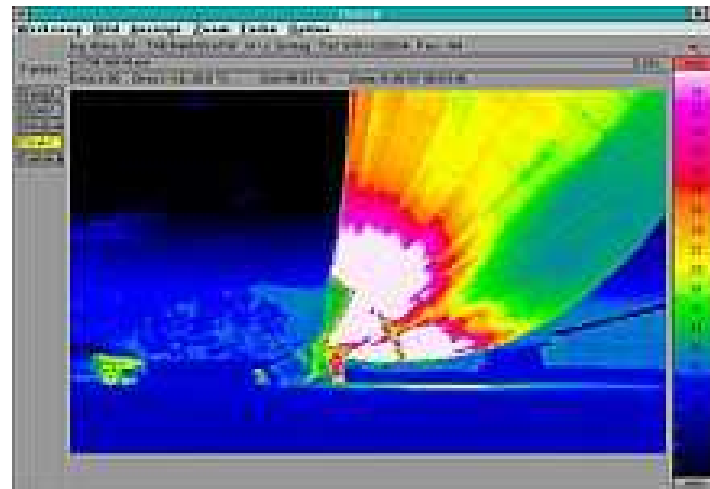
L'explication se poursuit par la relation sur la densité:

$$\rho = m / V \text{ avec } m \text{ la masse}$$

Ainsi, on peut dire que la **densité de l'air chaud est inférieure à celle de l'air froid**, la **masse d'air chaud contenu dans le ballon est donc inférieure à la masse d'air plus froid qui se trouve à l'extérieur du ballon**.

L'explication se termine donc par la relation d'Archimède.

Avec l'air chauffé, le poids de l'ensemble {nacelle + ballon + air} va devenir inférieur à la poussée d'Archimède qui est **une force constante et dirigée vers le haut** (poids de l'air déplacé).



Jusqu'où un ballon peut-il s'élever?

La pression atmosphérique diminuant avec l'altitude (d'environ 1hP pour 28 pieds au niveau de la mer, soit environ 1mbar pour 8,53 m), **la masse de l'air déplacé par le ballon se réduit avec l'élévation du ballon.**

$\Delta P = h \cdot \rho \cdot g$ (ρ étant la masse volumique de l'air et g le champ de pesanteur)

Le point d'équilibre sera atteint lorsque **le poids de la montgolfière sera égal au poids de l'air déplacé.**



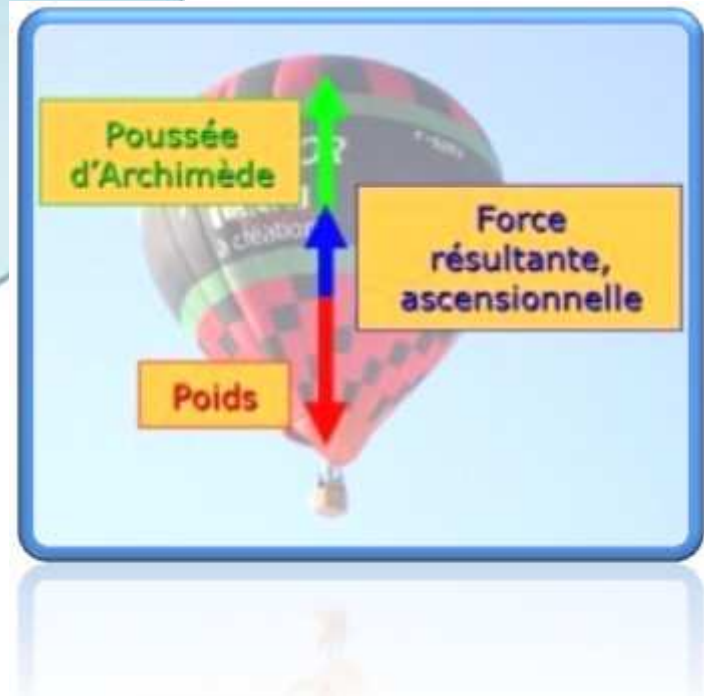
Exercice: bilan des forces exercées sur la montgolfière

On cherche à connaître la valeur de la température de l'air du ballon pour que $P = P_a$

En sachant que :

- La masse de tous les éléments de la montgolfière (nacelle ...) : $m_{na} = 500\text{kg}$
- Pression atmosphérique : $p = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
- $\rho_{air} = 1,241 \text{ kg.m}^{-3}$ (À 10°C)
- Volume de la montgolfière : $V_{mgt} = 2500 \text{ m}^3$

Le volume de la montgolfière est égal au volume d'air déplacé.



Exercice: bilan des forces exercées sur la montgolfière (éléments de correction)

Calcul de la valeur de la masse de l'air déplacé par la poussée d'Archimède

$$m_{\text{air_déplacé}} = \rho_{\text{air_10°C}} \times V = 1,241 \times 2\,500 = 3\,102,5 \text{ kg}$$

Calcul de la valeur de la masse de l'air chauffé à la température finale θ_f

$$m_{\text{air_}\theta_f} = m_{\text{air_déplacé}} - m_{\text{na}} = 3\,102,5 - 500 = 2\,602,5 \text{ kg}$$

Calcul de la température finale θ_f

$$P \times V = n_{\text{air_}\theta_f} \times R \times \theta_f \text{ (équation d'état des gaz parfaits)}$$

$$\text{avec } n_{\text{air_}\theta_f} = m_{\text{air_}\theta_f} / M_{\text{air}} \quad (M_{\text{air}} = 28,8 \text{ g.mol}^{-1})$$

$$\text{soit } \theta_f = (P \times V) / ((m_{\text{air_}\theta_f} / M_{\text{air}}) \times R)$$

$$\theta_f = (1,013 \cdot 10^5 \times 2\,500) / ((2\,602,5 \cdot 10^3 / 28,8) \times 8,314\,472)$$

$$\theta_f = 337,06 \text{ °K},$$

$$\text{soit } \theta_{f(\text{°C})} = 337,06 - 273,15 = 63,9 \text{ °C}$$

***Exercice: bilan des forces exercées sur la montgolfière
(éléments de correction, fin)***

Conclusion

Lorsque l'air du ballon de la montgolfière définie précédemment atteint 64°C, les forces se compensent et la montgolfière est prête à décoller ou elle est stationnaire à l'équilibre dans l'air (elle flotte).

Si la température augmente au-delà de 64°C, la poussée d'Archimède devient plus importante et la montgolfière a un mouvement vertical vers le haut (elle s'élève). Cependant, avec l'augmentation de l'altitude, la pression atmosphérique diminue, la densité de l'air diminue, la masse volumique diminue et ...
... il faut refaire tous les calculs!

Fin