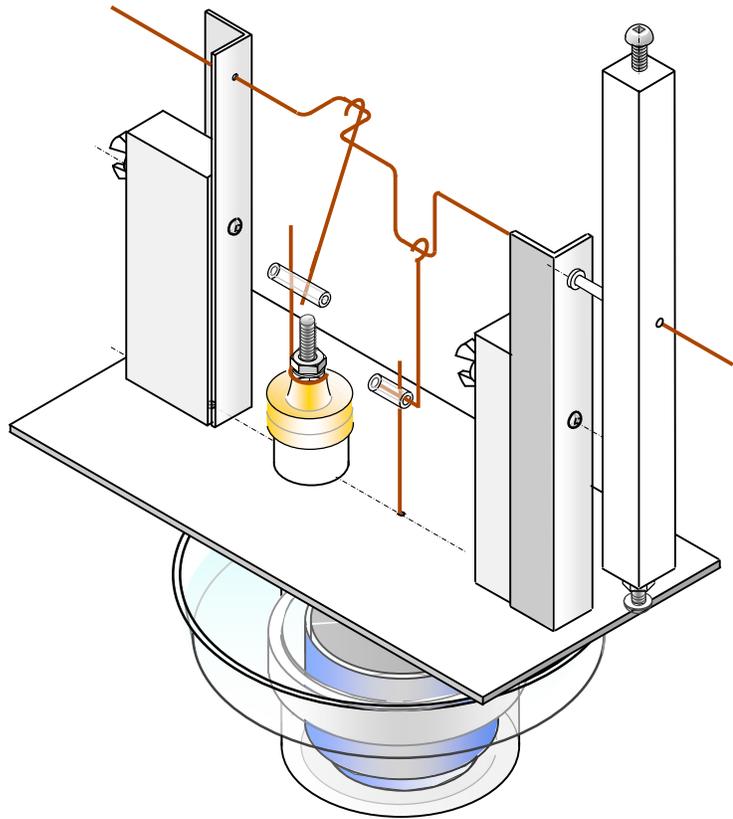
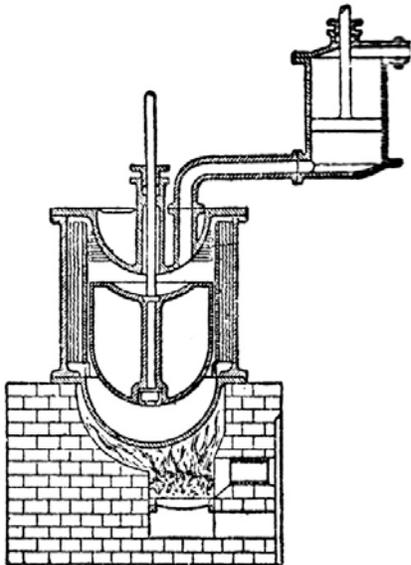




**centre de
développement
pédagogique**
*pour la formation générale
en science et technologie*

Document de travail

LE MOTEUR STIRLING



CAHIER DE L'ÉLÈVE

Janvier 2009

Table des matières

Il était une fois une machine surprenante!	3
Réchauffons-nous un peu	4
Théorie cinétique des gaz	6
Nombre de molécules et volume d'un gaz	9
Effet de la température sur le volume d'un gaz (La loi de Charles).....	15
Effet de la pression sur le volume d'un gaz (La loi de Boyle-Mariotte).....	21
Fonctionnement d'un manomètre à eau (facultatif)	27
Effet de la température sur la pression d'un gaz (La loi de Gay-Lussac).....	36
Questionnaire sur la loi générale des gaz.....	43
Revenons maintenant au moteur Stirling	44
Nomenclature du moteur Stirling	45
Guide de mise en marche du moteur Stirling	46
Analyse du moteur Stirling de laboratoire	47
Intégration et réinvestissement	52
Webographie.....	54

Il était une fois une machine surprenante!

NOTE Cette activité a été élaborée dans le cadre de sessions de formation. Elle nécessite des adaptations avant de l'utiliser auprès d'élèves.



Les gaz sont présents partout autour de nous. Dans certains cas, ils entretiennent la vie comme le fait l'oxygène et dans d'autres ils sont mortels comme le chlore. Les applications technologiques des gaz sont nombreuses. Nous n'avons qu'à penser au coussin gonflable, au barbecue et au moteur à explosions de nos automobiles pour nous en convaincre.

Nous vous invitons maintenant à découvrir une des plus incroyables machines fonctionnant à l'aide d'un gaz. Le type de moteur que nous vous présentons maintenant saura à coup sûr vous passionner.

En effet, le moteur à air chaud est une machine très surprenante. Dans ce type de moteur, il n'y a aucune explosion comme dans les moteurs utilisés dans nos véhicules actuels. Il est donc tout à fait sécuritaire pour une étude en laboratoire.



Son invention ne date pas d'hier. En effet, le brevet du moteur à air chaud (moteur Stirling) fut déposé le 27 septembre 1816. Pour des raisons de compétitivité, le moteur de l'Écossais Robert Stirling n'a jamais connu un succès commercial. Il a été supplanté tour à tour par la chaudière à vapeur et par le moteur à combustion interne.

Cependant, avec un rendement nettement supérieur aux moteurs à explosions, le moteur Stirling a sûrement un bel avenir. En effet, les préoccupations écologiques actuelles en matière de conservation d'énergie et de biocarburants rendent ce moteur très intéressant puisqu'il peut fonctionner avec n'importe quel carburant (paille, bois, alcool, rayons solaires...)

Votre défi

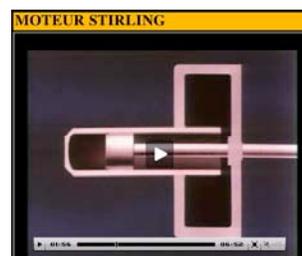
Nous vous proposons ici de découvrir expérimentalement les principes scientifiques et technologiques utilisés dans la construction du moteur Stirling. Pour ce faire, vous aurez à vous approprier les concepts liés aux propriétés physiques des gaz. Par la suite, vous aurez l'occasion de mettre en marche un vrai moteur Stirling de façon à analyser scientifiquement cette belle application technologique.

Pour débiter, nous vous invitons à découvrir ce moteur exceptionnel en écoutant ce reportage d'à peine 7 minutes.

- http://leweb2zero.tv/video/alfred_42461927d59459f

Le début du reportage suivant vous présente une application actuelle du moteur Stirling touchant la production d'énergie solaire (ce reportage est en anglais).

- <http://www.eco-energie.ch/content/view/112/47/>



Réchauffons-nous un peu

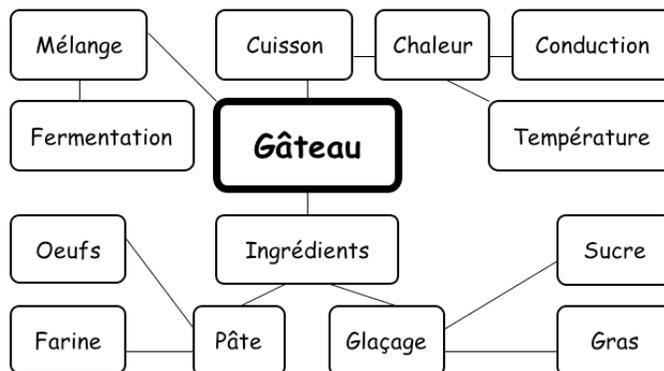


Voici maintenant un court vidéo vous montrant le moteur Stirling que vous aurez à faire fonctionner un peu plus tard au cours du projet. Ce moteur a été spécialement conçu pour vous. Sa faible vitesse de rotation ainsi que son côté transparent vous permettent de bien voir ses composants en action. Observez bien la façon dont il bouge et prenez des notes! <http://www2.cslaval.qc.ca/star/Le-moteur-Stirling>

<p>À partir de vos connaissances actuelles et de ce que vous avez compris des documents vidéos précédents, rédigez une explication sommaire du fonctionnement du moteur Stirling.</p>	<p>Se donner une représentation du moteur (croquis)</p>
<hr/>	

Construisez maintenant un réseau des concepts reliés à l'étude du fonctionnement du moteur Stirling. Bâtir ce réseau vous permettra d'organiser vos connaissances sous forme d'une carte visuelle. Cette carte donnera une bonne idée des stratégies qui vous permettront de mieux comprendre le fonctionnement du moteur Stirling.

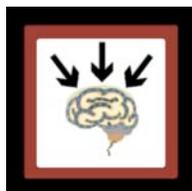
Exemple d'un réseau de concepts



Réseau de concepts

Moteur Stirling

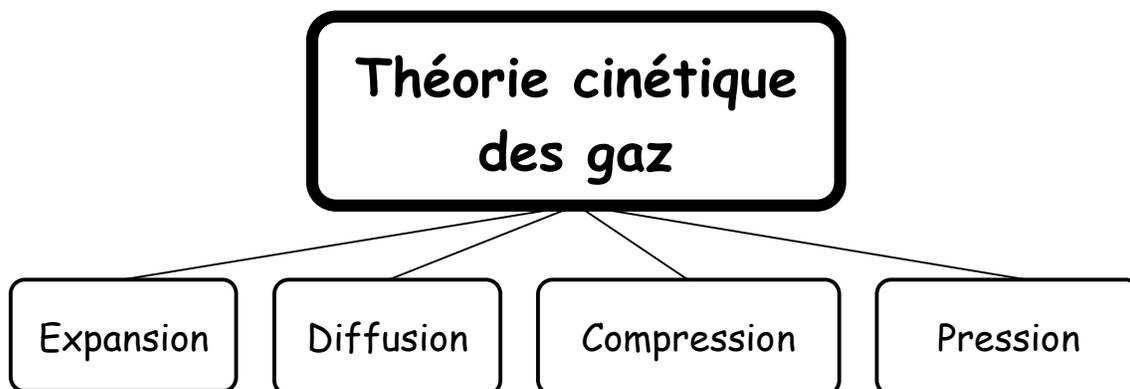
Théorie cinétique des gaz



Question : De quelle façon les gaz se comportent-ils?

Observer les démonstrations et compléter les textes suivant de façon à retenir l'essentiel.

Carte d'exploration



Expansion d'un gaz (mouvement moléculaire des gaz)

Banque de mots

- remplissent
- droite
- billes
- forme



Les molécules d'un gaz sont comme des petites _____ qui se déplacent dans toutes les directions. Normalement, ces particules se déplacent en ligne _____ à moins qu'ils ne frappent d'autres particules de gaz, de liquide ou de solide. De cette façon, les gaz _____ toujours leur récipient en prenant tout l'espace disponible. Le ballon de soccer ci-contre en est un bon exemple. Finalement, un gaz n'a ni _____ ni volume précis contrairement aux solides par exemple.

Diffusion d'un gaz

Banque de mots

- parfum
- toutes
- odeur
- diffusion



Les molécules d'un gaz se déplacent dans _____ les directions. Un certain gaz peut, de cette façon, se répandre à travers un autre gaz. La _____ d'un gaz dans une pièce prend un certain temps. Combien de secondes prend le _____ pour se rendre à tes narines? Que faire si l'_____ devient insupportable?

Compression d'un gaz

Banque de mots

- petite
- pression
- volume
- liquides



Contrairement aux _____, les gaz sont compressibles. Il est possible de faire varier considérablement le _____ d'un gaz en modifiant la pression que l'on exerce sur lui. Cette augmentation de _____ rapproche les molécules du gaz les unes des autres. C'est pourquoi on peut envoyer un grand volume d'air à l'intérieur d'une _____ chambre à air d'un vélo par exemple.

Pression d'un gaz

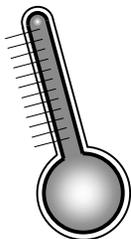
Banque de mots

- plus
- poussées
- frappe
- atmosphérique



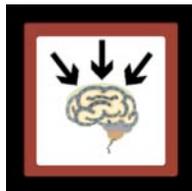
La pression _____ que nous subissons
présentement est le résultat d'innombrables collisions que font
les molécules d'air avec notre corps. Chaque molécule d'air qui
nous _____ possède une masse et une vitesse et produit
une petite poussée sur notre peau. C'est la somme de toutes
ces petites _____ qui engendre la pression
atmosphérique. Dans le cas de l'air comprimé dans les
bouteilles d'un plongeur, ces collisions sont _____
nombreuses puisque les molécules d'air sont entassées dans un
plus petit volume. La pression est une mesure de la force par
unité de surface (Newton par mètre carré par exemple).

Chauffage d'un gaz



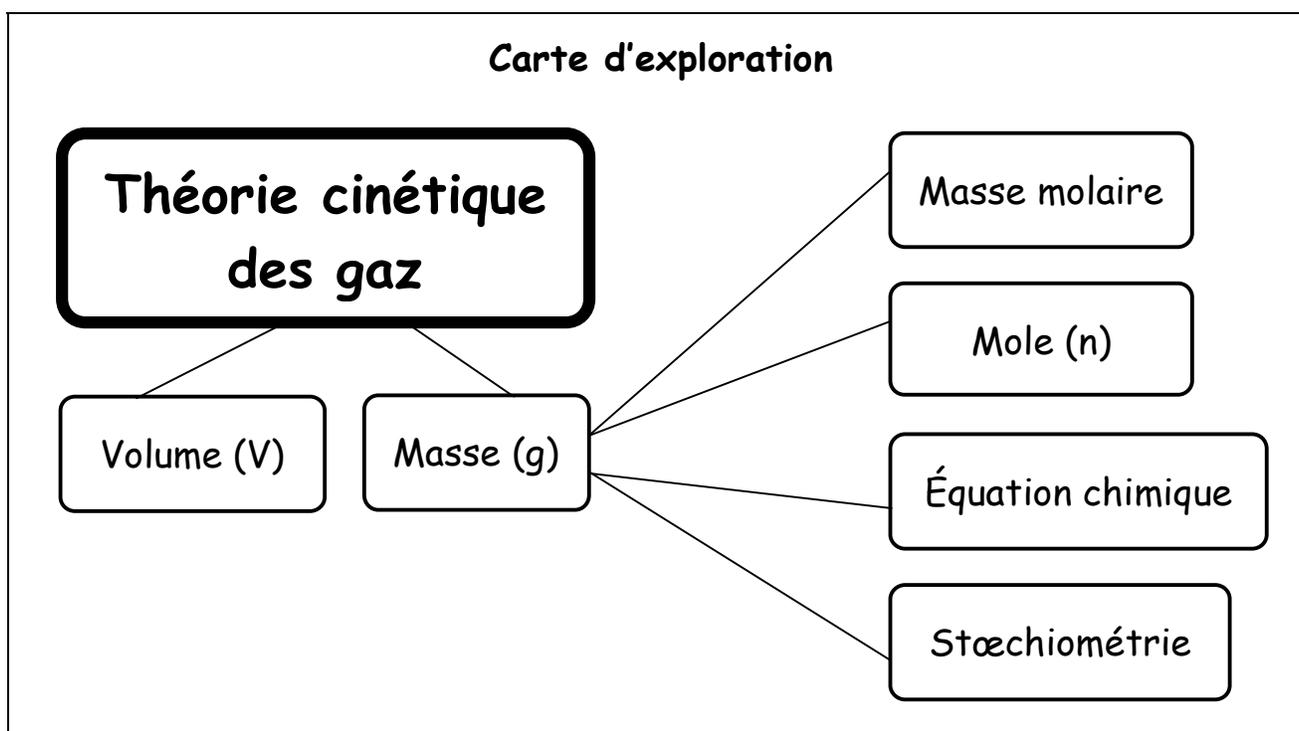
Le mercure du thermomètre ci-contre nous rappelle que le
chauffage d'une substance provoque une _____ de
son volume. De plus, chacun sait que ce n'est pas une bonne
idée de jeter au feu une bombonne aérosol. L'augmentation de
température engendrerait donc aussi une _____
de la pression d'un gaz.

Nombre de molécules et volume d'un gaz



Questions : De quelle façon varie le nombre de molécules gazeuses (le nombre de moles) lorsqu'on fait varier le volume d'un gaz? Quelle sorte de courbe peut-on tracer expérimentalement? Quelle relation mathématique unit ces deux grandeurs physiques? Qu'est-ce qui devrait demeurer constant au cours de l'expérimentation? Comment cette étude peut vous amener à mieux comprendre le fonctionnement du moteur Stirling?

Prouver expérimentalement et démontrer mathématiquement.



Matériel	Schéma du montage
<ul style="list-style-type: none"> • Lunettes de protection • 125 mL d'acide chlorhydrique • 1 cylindre gradué de 100 mL • 1 compte-goutte • 20 cm de ruban de magnésium • 1 balance • 1 règle • 1 paire de ciseau • 1 bouchon #5 adapté au cylindre de 100 mL et ayant un support de cuivre • 400 mL d'eau du robinet • Du colorant alimentaire • 1 agitateur • 1 contenant ou cabaret pour effectuer la manipulation du débordement • 1 becher de 400 mL • 1 becher de 600 mL 	

Équation chimique utile	
$\text{Mg}_{(s)} + \text{HCl}_{(aq)} \rightarrow \text{MgCl}_{2(aq)} + \text{H}_{2(g)}$	(Est-elle équilibrée?)

Manipulations

1. Couper 20 cm de ruban de magnésium.
2. Peser le ruban de magnésium et noter sa valeur.
3. Couper le ruban pour former 5 petits bouts de 2,3,4,5 et 6 cm de long.
4. Calculer les masses de ces petits bouts en faisant une proportion et noter ces masses.
5. Verser 500 mL d'eau colorée dans un becher de 600 mL (la présence du colorant permet de bien distinguer l'acide de l'eau lors du mélange).
6. Verser 250 mL d'eau du robinet dans un becher de 400 mL. Il servira de contenant à récupération de l'acide.
7. Déposer et replier les extrémités du premier échantillon de magnésium (2 cm) au centre du boudin de cuivre fixé au bouchon.
8. Mesurer 25 mL d'acide chlorhydrique à 6 mol/L à l'aide du cylindre gradué.
9. Ajouter doucement l'eau colorée au-dessus de l'acide de façon à remplir complètement le cylindre (le tout devrait former deux phases car la masse volumique de l'acide est plus grande que celle de l'eau).
10. Placer ce bouchon sur le cylindre et l'enfoncer de façon à provoquer le débordement de l'eau colorée (il ne faut pas trop enfoncer au risque de casser le bec du cylindre. De toute façon, il n'est pas nécessaire de rendre le cylindre étanche).
11. Renverser, rapidement, le cylindre tête en bas dans le becher de récupération d'acide de 400 mL. Noter qu'il est préférable d'orienter le bec du cylindre vers le bas lors du renversement (cela évite l'entrée d'air).
12. Observer l'acide entrer en contact avec le magnésium et attendre la disparition complète du magnésium.
13. Noter le volume de gaz accumulé dans le cylindre.
14. Récupérer l'eau et l'acide dans un contenant approprié.
15. Rincer le boudin de cuivre et le cylindre gradué.
16. Recommencer les manipulations no. 6 à 15 à l'aide des quatre autres échantillons.

Laboratoire dirigé

En une phrase, résumez votre but :

En une phrase, formulez votre hypothèse :

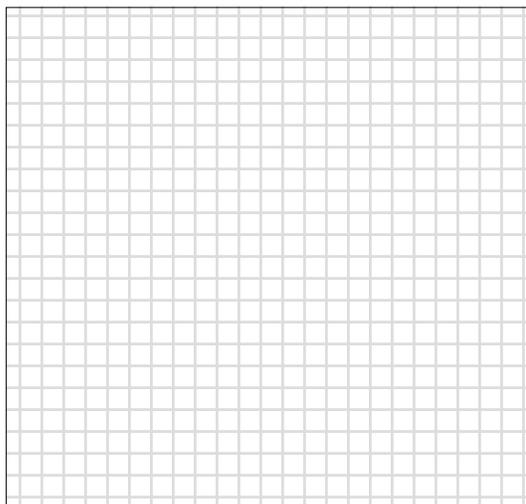
Quels sont les facteurs constants lors de cette expérimentation (nombre de mol, température, pression, volume)?

Résumez votre protocole sous forme d'un diagramme.

Tableau de données		
	Masse du magnésium (gramme)	Volume d'hydrogène (millilitre)
Bout de magnésium de 2 cm		
Bout de magnésium de 3 cm		
Bout de magnésium de 4 cm		
Bout de magnésium de 5 cm		
Bout de magnésium de 6 cm		
Bout de magnésium de 20 cm		

Analyser les résultats	
<i>Traitez vos données.</i>	
Question 1	
Balancez l'équation suivante : $\text{Mg}_{(s)} + \text{HCl}_{(aq)} \rightarrow \text{MgCl}_{2(aq)} + \text{H}_{2(g)}$	
Question 2	
En considérant l'équation balancée précédente, combien de moles d'hydrogène sont produites par les quantités de magnésium présentes dans le tableau de données ci-dessus?	
	Quantité d'hydrogène (mole)
Bout de magnésium de 2 cm	
Bout de magnésium de 3 cm	
Bout de magnésium de 4 cm	
Bout de magnésium de 5 cm	
Bout de magnésium de 6 cm	

Traitez vos données (suite).



Faites ressortir les tendances.

Question 3

En traçant le graphique du volume en fonction du nombre de moles d'hydrogène, quel genre de relation mathématique retrouvez-vous?

Question 4

Calculer le taux de variation de cette relation.

Tirez vos conclusions

Question 5

En tenant compte de ce taux de variation, mettez en relation deux points de la courbe. Autrement dit, pour deux points quelconques du graphique, complétez la relation suivante :

$$\frac{V_1}{n_1} = \frac{\text{-----}}{\text{-----}}$$

Question 6

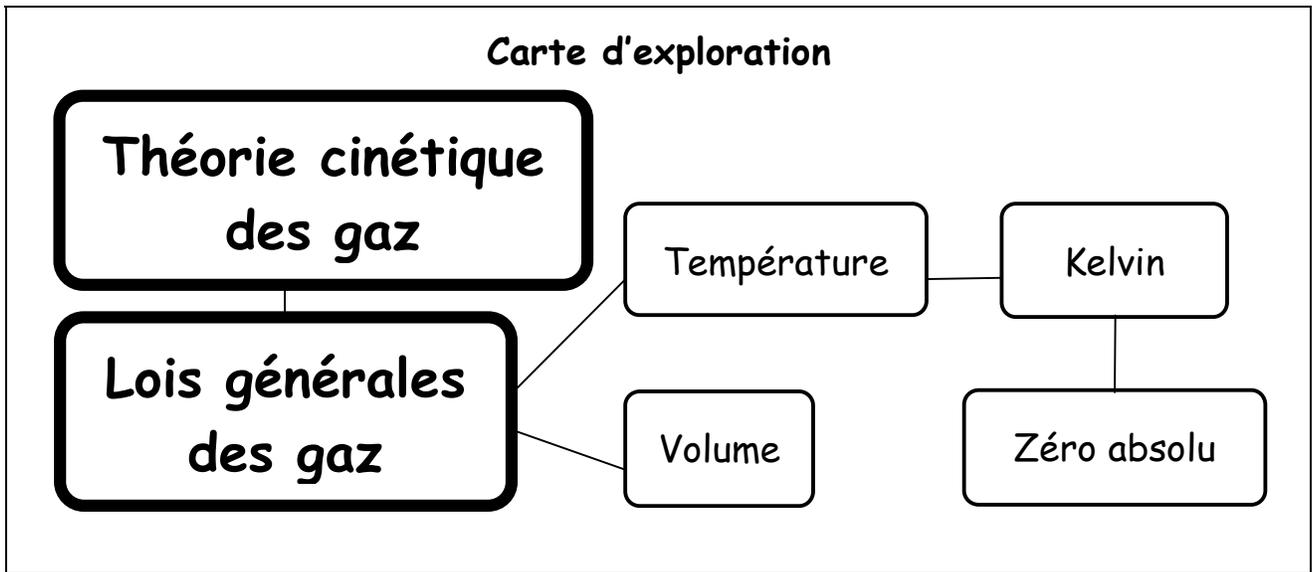
Dans le cas du moteur Stirling, pourquoi un plus grand volume de gaz peut-il être souhaitable?

Effet de la température sur le volume d'un gaz (La loi de Charles¹)



Questions : Quel est l'effet d'une variation de température sur le volume d'un gaz? Quelle sorte de courbe peut-on tracer expérimentalement? Quelle relation mathématique unit ces deux grandeurs physiques? Qu'est-ce qui devrait demeurer constant au cours de l'expérimentation? Comment cette étude peut vous amener à mieux comprendre le fonctionnement du moteur Stirling?

Prouver expérimentalement et démontrer mathématiquement.



Matériel	Schéma du montage
<ul style="list-style-type: none">• 1 tube de verre flint de 5mm de diamètre et de 10 cm de long• 5 supports universels• 5 pinces à thermomètre• 5 bechers de 600 mL• 5 thermomètres• 3 plaques chauffantes• 1 pince à becher• Glace• Eau à température de la pièce• Eau du robinet• 1 règle	

¹ Physicien français Jacques Alexandre César Charles (1746-1823)

Manipulations

1. Remplir le becher no.1 de 600 mL avec de la glace et de l'eau et attendre que la température de l'eau se stabilise.
2. Remplir le becher no.2 de 600 mL d'eau à la température de la pièce.
3. Remplir trois autres bechers de 600 mL avec de l'eau et porter leur température aux valeurs suivantes à l'aide de plaques chauffantes: becher no.3 $\approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, becher no.4 $\approx 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ et becher no.5 $\approx 85\text{ }^{\circ}\text{C}$.
4. Plonger le tube de verre tour à tour dans ces cinq bechers en prenant bien soin de noter la hauteur du volume d'air emprisonné ainsi que la température de l'eau dans laquelle le tube est plongé (prenez soin d'attendre que la température de l'air comprise dans le tube atteigne la température de l'eau).
5. Noter ces hauteurs et les températures correspondantes dans votre tableau de données.

Rappel d'une équation utile (volume d'un cylindre)

$V=h \cdot S$ Où $V \Rightarrow$ volume du cylindre en cm^3 , $h \Rightarrow$ hauteur du volume d'air emprisonné en cm, $S \Rightarrow$ surface en cm^2
 $S=\pi \cdot r^2$ Où $S \Rightarrow$ surface d'un cercle en cm^2 , $\pi \Rightarrow$ constante égale à 3,1415927, $r \Rightarrow$ rayon du cercle en cm

Information importante (diamètre interne du tube de verre) : 0,295 cm
(Il faudrait valider cette information auprès de ton enseignant)

Laboratoire dirigé

En une phrase, résumez votre but :

En une phrase, formulez votre hypothèse :

Quels sont les facteurs constants lors de cette expérimentation (nombre de mol, température, pression, volume)?

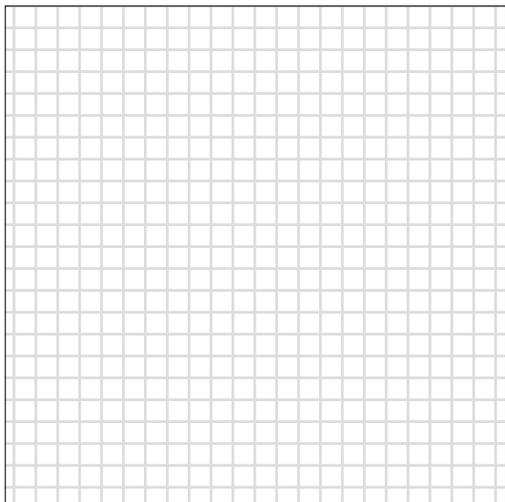
Résumez votre protocole sous forme d'un diagramme.

Tableau de données		
	Température de l'air emprisonné (°C)	Hauteur du volume d'air emprisonné (cm)
Dans la glace fondante		
À la température de la pièce		
À environ 50 °C		
À environ 75 °C		
À environ 85 °C		

Analyser les résultats		
<i>Traitez vos données.</i>		
Question 1		
Convertissez les températures (degré Celsius \Rightarrow Kelvin). De plus, en considérant l'équation donnant le volume d'un cylindre ainsi que le diamètre du tube de verre flint quel est le volume d'air emprisonné pour chaque situation?		
<hr/>		
<hr/>		
	Température de l'air emprisonné (K)	Volume de l'air emprisonné (cm ³)
Dans la glace fondante		
À la température de la pièce		
À environ 50 °C		
À environ 75 °C		
Dans l'eau bouillante		

Analyser les résultats

Traitez vos données (suite)



Faites ressortir les tendances.

Question 2

En traçant le graphique du volume en fonction de la température, quel genre de relation mathématique retrouvez-vous?

Question 3

Calculer le taux de variation de cette relation.

Tirez vos conclusions

Question 4

En tenant compte du graphique fait lors de cette expérimentation et de l'équation mathématique qui en découle, mettez en relation deux points de la courbe?

Autrement dit, pour deux points quelconques du graphique, complétez la relation suivante :

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{\quad}{\quad}$$

Question 5

Sur votre graphique, si vous extrapolez votre courbe vers les basses températures, à quelle température le volume du gaz tend à devenir nul?

Question 6

À quoi correspond la température trouvée au numéro précédent?

Question 7

À quelle température en Kelvin (K) correspond une température de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$?

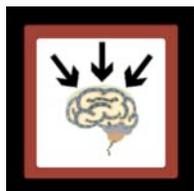
Question 8

Quel est l'avantage d'utiliser le Kelvin plutôt que le degré Celsius dans les calculs à venir?

Question 9

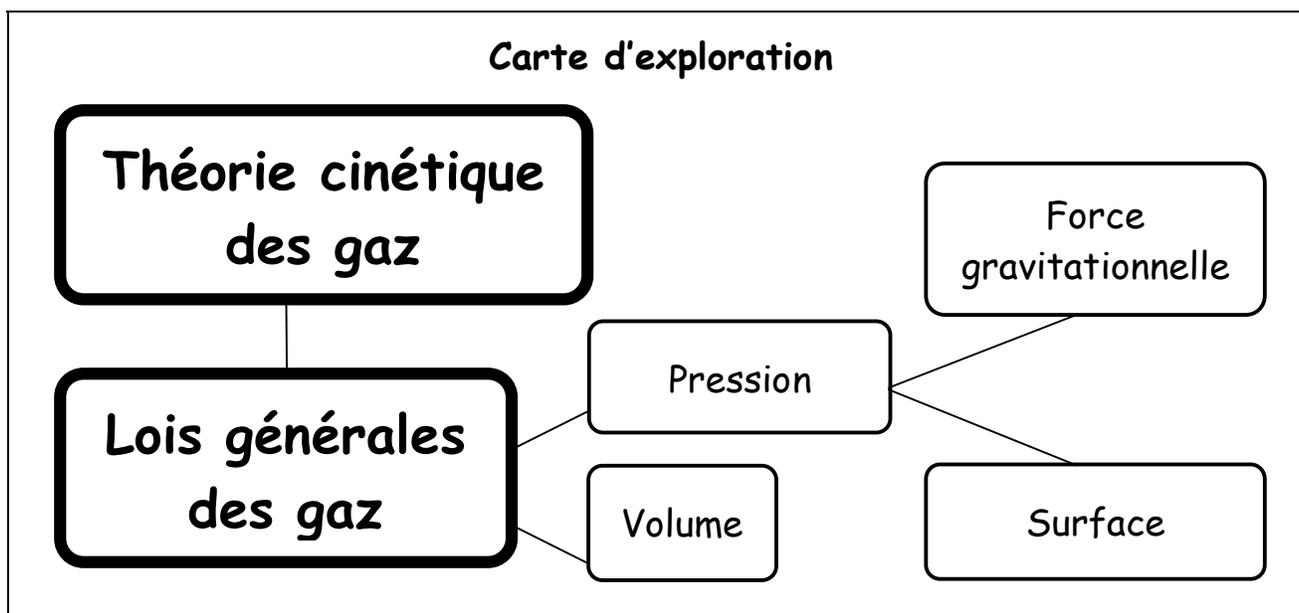
Quelle est la température finale de 10 L d'air à $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ si son volume final devient 1 L? (attention, la température doit être en Kelvin lors de ton calcul!)

Effet de la pression sur le volume d'un gaz (La loi de Boyle-Mariotte²)



Questions : Quel est l'effet d'une variation de pression sur le volume d'un gaz? Quelle sorte de courbe peut-on tracer expérimentalement? Quelle relation mathématique unit ces deux grandeurs physiques? Qu'est-ce qui devrait demeurer constant au cours de l'expérimentation? Comment cette étude peut vous amener à mieux comprendre le fonctionnement du moteur Stirling?

Prouver expérimentalement et démontrer mathématiquement.



Matériel	Schéma du montage
<ul style="list-style-type: none"> • 1 support universel • 1 pince universelle (noix) • 1 tube de plexiglas de 7 cm de long et d'un diamètre de 1,6 cm • 1 seringue graduée de 1 mL • 1 bouchon à seringue ou un peu de colle chaude • 5 masses (100g, 200g, 300g, 400g et 500g) 	

² Chimiste irlandais Robert Boyle (1627-1691), Physicien français Edme Mariotte (1620-1684).

Manipulations

1. Fixer le tube de plexiglas à l'aide de la pince et du support universels.
2. Introduire la seringue dans celui-ci (voir le schéma ci-dessus).
3. Déposer une masse de 100 g sur la plaque et noter le volume de la seringue dans votre tableau de données.
4. Recommencer la manipulation précédente avec les masses suivantes : 200g, 300g, 400g et 500g

Rappel des équations utiles

$F = m \cdot g$ Où $F \Rightarrow$ force en N (newton), $m \Rightarrow$ masse en kg, $g \Rightarrow$ accélération gravitationnelle $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

$p = F/S$ Où $p \Rightarrow$ pression en N/m^2 ou Pa (Pascal), $F \Rightarrow$ force en N, $S \Rightarrow$ surface de la seringue en m^2

Information importante (diamètre du piston de la seringue) : 4,4 mm
(Il faudrait valider cette information auprès de ton enseignant)

Laboratoire dirigé

En une phrase, résumez votre but :

En une phrase, formulez votre hypothèse :

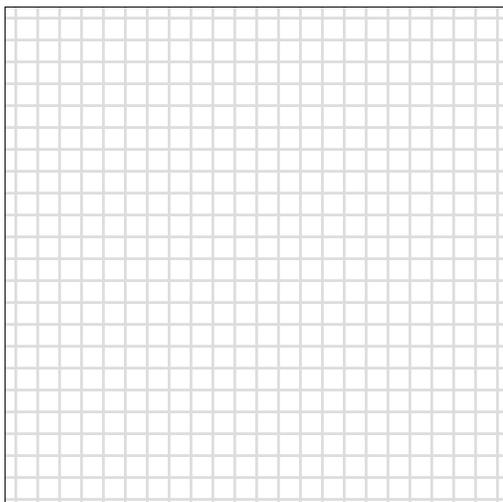
Quels sont les facteurs constants lors de cette expérimentation (nombre de mole, température, pression, volume)?

Résumez votre protocole sous forme d'un diagramme.

Tableau de données		
	Masse (g)	Volume d'air (mL)
1	100	
2	200	
3	300	
4	400	
5	500	

Analyser les résultats		
<i>Traitez vos données.</i>		
Question 1		
À l'aide de l'équation $F=m \cdot g$, calculez les forces engendrées par les différentes masses et complétez le tableau ci-dessous.		
Question 2		
À l'aide de l'équation $p=F/S$ et du diamètre du piston de la seringue, calculez les pressions à l'intérieur de la seringue et complétez le tableau ci-dessous.		
Masse (g)	Force (N)	Pression (kPa)
100		
200		
300		
400		
500		

Traitez vos données (suite).



Faites ressortir les tendances.

Question 3

En traçant le graphique du volume en fonction de la pression, quel genre de relation mathématique retrouvez-vous?

Question 4

Sur votre graphique, si vous extrapolez votre courbe vers un volume très petit, vers où tendra la pression?

Tirez vos conclusions

Question 5

En tenant compte du graphique fait lors de cette expérimentation mettez en relation deux points de la courbe? Autrement dit, pour deux points quelconques du graphique, complétez la relation suivante :

$$p_1 \cdot V_1 =$$

Question 6

Lorsque le volume quadruple, qu'arrive-t-il à la pression?

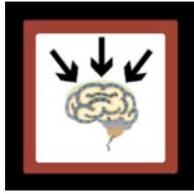
Question 7

Les unités de pressions les plus utilisées en chimie sont le kilopascal (kPa), le millimètre de mercure (mm de Hg) et l'atmosphère (atm). Sachant que la pression atmosphérique normale est : 101,325 kPa = 760 mm de Hg = 1 atm. Calculer à combien correspond une pression de 800 mm de Hg en kilopascal.

Question 8

Un volume de 40 mL d'hydrogène a une pression de 101,3 kPa. Quel sera son volume si la pression augmente à 198,5 kPa?

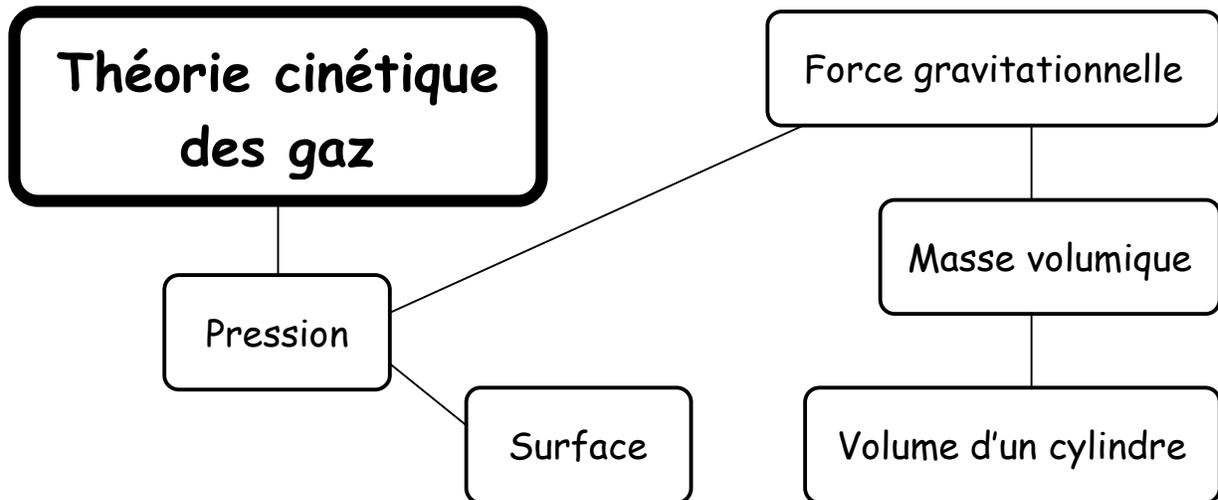
Fonctionnement d'un manomètre à eau (facultatif)



Question : Quelle variation de pression (en kPa) un manomètre à eau formé d'un tube en U de 60 centimètres peut-il mesurer?

Percevoir à l'aide d'une démonstration et démontrer mathématiquement.

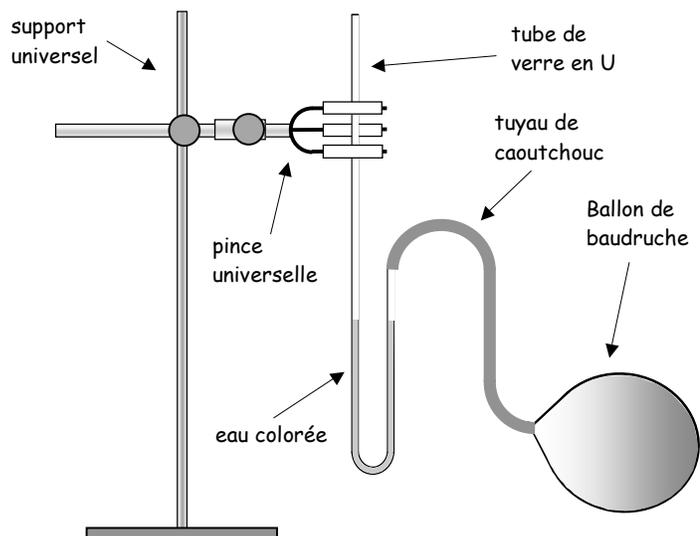
Carte d'exploration



Matériel

- 1 support universel
- 1 pince universelle (noix)
- 1 tube de verre en U de 60 cm
- 1 compte-goutte
- De l'eau colorée
- 1 crayon marqueur non permanent
- 1 tuyau de caoutchouc (qui s'adapte au tube de verre)
- 1 attache pour câble «ty-rap» de 10 cm
- 1 ballon de baudruche

Schéma du montage



Manipulations

1. Fixer le tube de verre en U à l'aide de la pince et du support universels comme sur le schéma ci-dessus.
2. Remplir le tube en U avec de l'eau colorée à l'aide un compte-goutte de façon à former un U coloré d'environ 15 cm de hauteur.
3. Fixer un tuyau de caoutchouc à l'une des extrémités du tube en U (sur le schéma, il s'agit du côté le plus court du tube en U).
4. À l'aide d'un crayon marqueur, indiquer le niveau d'eau du côté libre du tube en U (sur le schéma, il s'agit du côté le plus long sur le tube en U).
5. Installer un ballon de baudruche à l'autre extrémité du tube de caoutchouc à l'aide d'un «Ty-rap».
6. Appuyer sur le ballon de baudruche avec la main et observer le déplacement de l'eau.

Laboratoire dirigé

En une phrase, résumez votre but :

Pensez-vous qu'un tel manomètre peut mesurer de forte pression ? Nommer une action qui, d'après-vous, génère une trop grande pression pour ce manomètre.

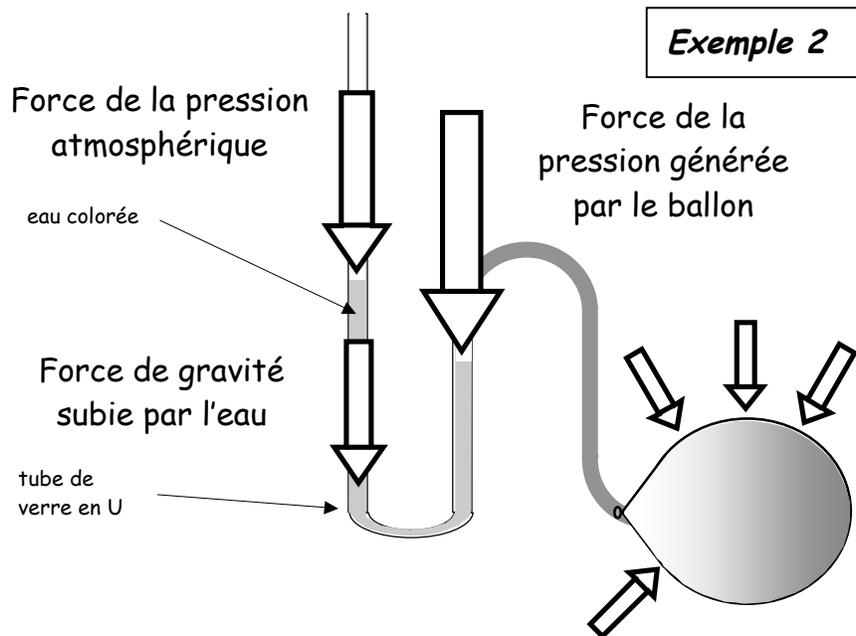
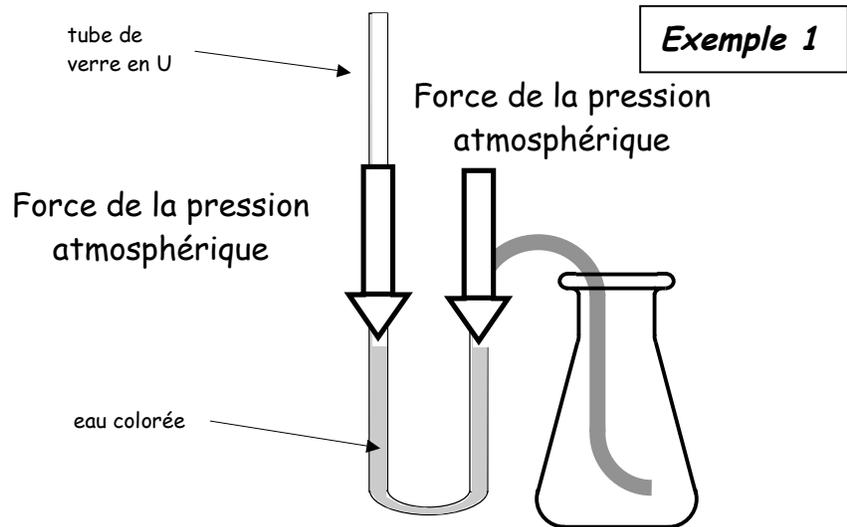
Résumez votre protocole sous forme d'un diagramme.

Décrivez vos observations.

Principes de base

Dans le cas représenté à droite, le manomètre à eau est en équilibre entre deux forces. De chaque côté, c'est la force de la pression atmosphérique qui pousse. C'est pourquoi, les niveaux d'eau de chaque côté sont égaux.

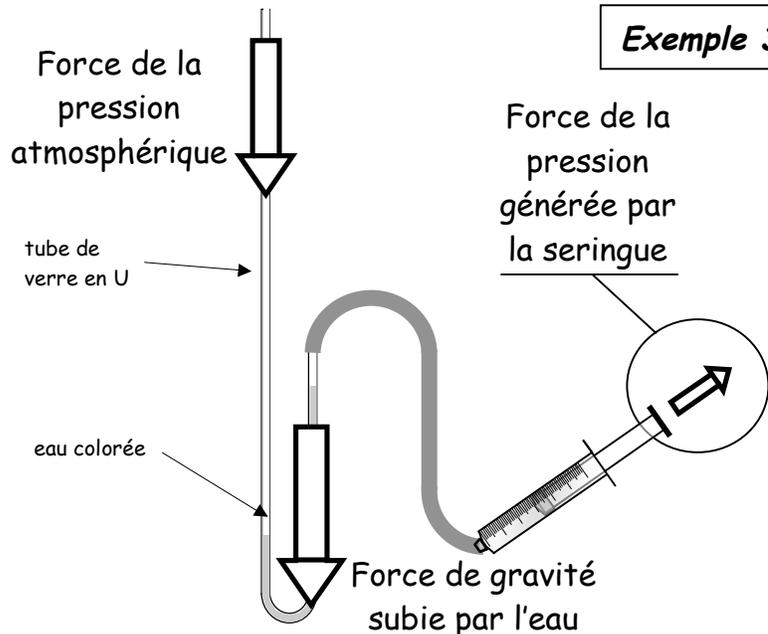
Ici, en appuyant sur le ballon on génère une force plus grande sur le côté droit. C'est la raison pour laquelle la colonne d'eau se déplace vers la gauche. Plus l'eau monte à gauche, plus la force de gravité cherchera à ramener ces particules d'eau vers le bas de façon à rejoindre l'équilibre. L'eau arrête de monter lorsque la somme des deux forces de gauche équilibre exactement la force de droite.



Analyser les résultats

Principes de base (suite)

Ici, en tirant le poussoir de la seringue, on provoque une dépression qui génère une force dans le même sens que la force de la pression atmosphérique. La colonne d'eau se déplace alors vers la droite. Plus l'eau monte à droite, plus la force de gravité cherchera à ramener ces particules d'eau vers le bas de façon à rejoindre l'équilibre. L'eau arrête de monter lorsque la force de gravité équilibre exactement les deux autres forces.



Dans les trois exemples décrits ci-dessus, la force de la pression atmosphérique était toujours présente. Il est donc clair que la pression atmosphérique influence la mesure de ce type de manomètre.

Cette constatation nous amène à réaliser qu'un manomètre à tube comme celui-ci ne mesure pas une **pression absolue**. Il mesure une **pression relative**. La pression qu'il nous donne est toujours par rapport à la pression atmosphérique.

Il est à noter que la pression atmosphérique change en fonction du poids de l'air présent dans l'atmosphère. En moyenne, elle a une valeur de 101,325 kPa.

Exemple 1: pression réelle = pression atmosphérique : 101,325 kPa

Exemple 2: pression réelle = pression atmosphérique + pression du manomètre

Exemple 3: pression réelle = pression atmosphérique - pression du manomètre

Réinvestissement possible : Torricelli (invention du baromètre au mercure en 1643)

Analyser les résultats

Rappel des équations utiles

$F_g = m \cdot g$ Où $F_g \Rightarrow$ force en N (newton), $m \Rightarrow$ masse en kg, $g \Rightarrow$ accélération gravitationnelle $g = 9,8 \text{ N/kg}$

$\rho = m/V$ Où $\rho \Rightarrow$ masse volumique en kg/m^3 , $m \Rightarrow$ masse en kg, $V \Rightarrow$ volume en m^3

$V = h \cdot S$ Où $V \Rightarrow$ volume en m^3 , $h \Rightarrow$ hauteur de la colonne d'eau en m, $S \Rightarrow$ surface de l'eau en m^2

$p = F_p/S$ Où $p \Rightarrow$ pression en N/m^2 ou Pa (Pascal), $F_p \Rightarrow$ force en N (newton), $S \Rightarrow$ surface de l'eau en m^2

Question 1

Essayons maintenant de mieux comprendre ce type de manomètre. L'eau qui monte, sur le côté libre du tube en U, subit une force de gravité orientée vers le bas. Écrivez l'équation qui décrit cette force et numérotez-la comme étant l'équation (1).

$$F_g =$$

Question 2

Essayons de déterminer la masse de l'eau qui est soulevée. Isolez la masse dans l'équation décrivant la masse volumique. Écrivez l'équation résultante ci-dessous et numérotez-la comme étant l'équation (2).

$$m =$$

Question 3

Remplacer la masse dans l'équation (1) par son équivalent présent dans l'équation (2). Écrivez l'équation résultante ci-dessous et numérotez-la comme étant l'équation (3).

$$F_g =$$

Question 4

La colonne d'eau subissant l'attraction gravitationnelle a la forme d'un cylindre. Écrivez l'équation décrivant le volume d'un cylindre et numérotez-la comme étant l'équation (4).

$$V =$$

Question 5

Remplacer le volume présent dans l'équation (3) par son équivalent dans l'équation (4). Écrivez l'équation résultante ci-dessous et numérotez-la comme étant l'équation (5).

$$F_g =$$

Question 6

Transportons-nous maintenant à l'autre bout du tube de caoutchouc. Voyons maintenant la force que tu as appliquée sur le ballon de baudruche. Isolez la force dans l'équation décrivant la pression. Écrivez l'équation résultante ci-dessous et numérotez-la comme étant l'équation (6).

$$F_p =$$

Question 7

Supposons maintenant que nous appliquons une force sur le ballon qui maintient à une hauteur fixe l'eau dans le tube de verre. À ce moment, la force de gravité (F_g) égale la force engendrée par la pression de ta main (F_p) puisqu'il n'y a pas de mouvement. Égaler maintenant F_g et F_p , c'est-à-dire égaler les équations (5) et (6). Numérotez cette nouvelle équation comme étant l'équation (7).

Question 8

Simplifier l'égalité précédente et indiquer ce que cette simplification implique? Numérotez cette équation simplifiée comme étant l'équation (8).

Question 9

Enfin, trouvons la valeur maximale que la pression peut prendre dans ce type de manomètre. Pour ce faire, vous devriez avoir besoin des quantités suivantes :

- La masse volumique de l'eau (ρ) = 1 g/cm³
- L'accélération gravitationnelle de la terre (g) = 9,8 N/kg
- La hauteur maximale de la colonne d'eau. Celle-ci se mesure en mesurant la distance verticale entre les niveaux de l'eau des deux côtés du U de verre.

N.B. Pour réussir ce calcul, une attention particulière doit être accordée aux unités de mesure. Traitez vos unités de façon à obtenir une pression en (N/m²) car cela correspond à l'unité de mesure du Pascal³ (Pa). Enfin, il ne vous restera qu'à convertir cette pression en (kPa).

Pression maximale = kPa

³ Physicien français Blaise Pascal (1623-1662)

Tirez vos conclusions

Question 1

Que pourrait-on faire pour mesurer une plus grande variation de pression avec ce manomètre à eau?

Question 2

Est-il possible de mesurer une variation de pression négative (suction) avec ce manomètre à eau? Quelle modification devait-on apporter à l'appareil?

Question 3

Ce genre de manomètre fonctionne habituellement avec du mercure (Hg). Pour des raisons de toxicités, nous avons remplacé ce métal liquide par de l'eau colorée. D'après toi, quel est l'avantage d'utiliser le mercure à la place de l'eau?

Question 4

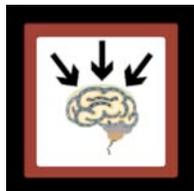
Sachant que la pression atmosphérique du laboratoire est de 100 kPa, déterminer la pression réelle à l'intérieur d'un erlenmeyer si le manomètre qui y est branché indique une pression positive de 3 kPa?

Question 5

À partir de l'équation (8) de la section précédente, trouver un facteur qui permet de déterminer la pression mesurée en (kPa) en y incorporant directement la hauteur de la colonne d'eau en (cm). Autrement dit, par quelle constante doit-on multiplier la hauteur de la colonne d'eau du manomètre pour obtenir la pression ?

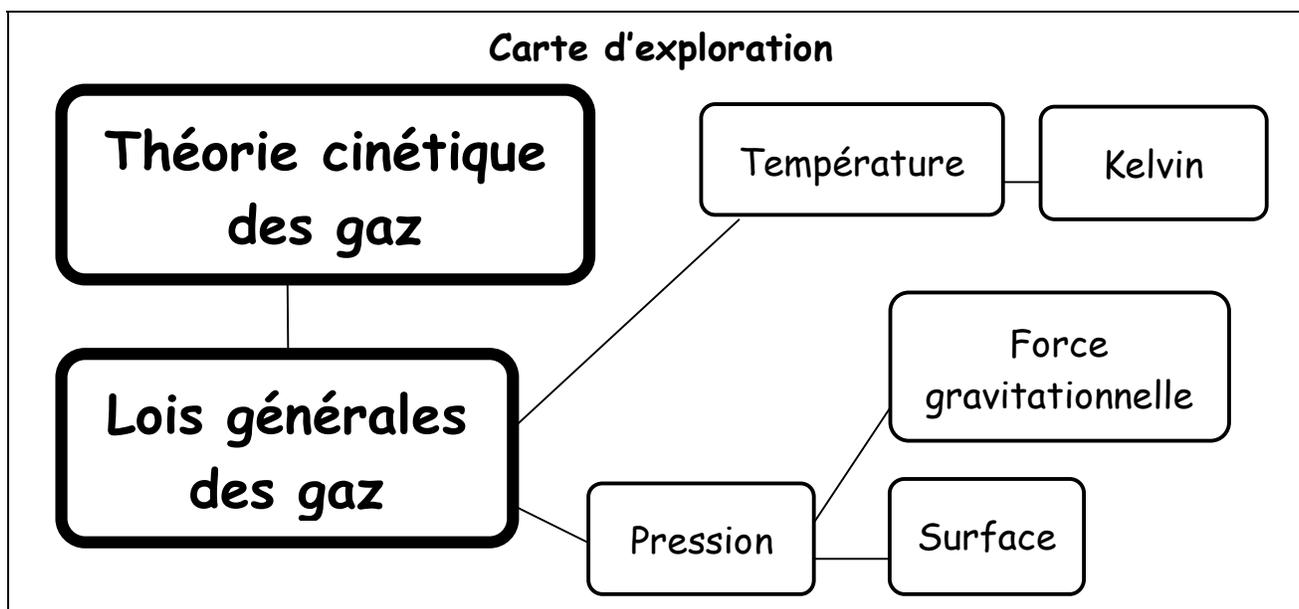
$$p(\text{kPa}) = \text{_____} \cdot \text{hauteur (cm)}$$

Effet de la température sur la pression d'un gaz (La loi de Gay-Lussac⁴)



Questions : Quel est l'effet d'une variation de température (en K) sur la pression d'un gaz (en kPa)? Quelle sorte de courbe peut-on tracer expérimentalement? Quelle relation mathématique unit ces deux grandeurs physiques? Qu'est-ce qui devrait demeurer constant au cours de l'expérimentation? Comment cette étude peut vous amener à mieux comprendre le fonctionnement du moteur Stirling?

Prouver expérimentalement et démontrer mathématiquement.



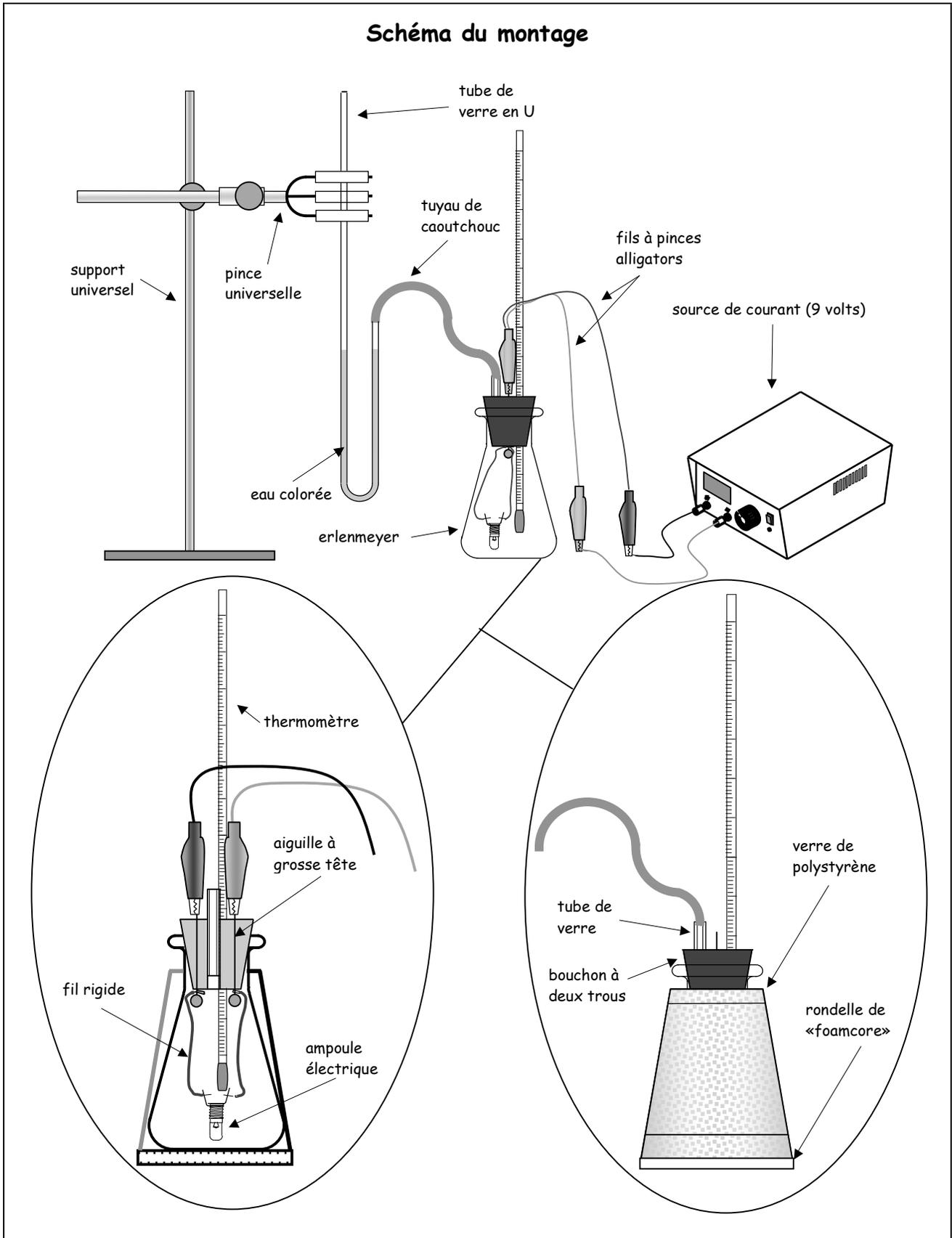
- 1 support universel
- 1 pince universelle (noix)
- 1 tube de verre en U de 60 cm
- 1 compte-goutte
- De l'eau colorée
- 1 crayon marqueur non permanent
- 1 tuyau de caoutchouc (qui s'adapte au tube de verre)

Matériel

- 1 bouchon de caoutchouc no. 5 à deux trous (déjà préparé comme sur le montage)
- Un peu de glycérine
- 1 erlenmeyer de 125 mL
- 1 verre de polystyrène
- 1 rondelle de «foamcore» de 5 mm d'épaisseur de d'un diamètre de 8 cm
- 1 source fournissant 9 volts
- 2 fils à pinces alligators
- 1 baromètre

⁴ Chimiste français Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850)

Schéma du montage



Il est à noter qu'il faut bien comprendre le fonctionnement d'un manomètre à eau pour mener à bien les calculs nécessaires aux traitements des données. Si ce n'est pas le cas, effectuer la section précédente s'intitulant «Fonctionnement d'un manomètre à eau».

Manipulations

1. Fixer le tube de verre en U à l'aide de la pince et du support universels comme sur le schéma ci-dessus.
2. Remplir le tube de verre en U avec de l'eau colorée à l'aide du compte-goutte. Il faudrait former un U coloré d'environ 15 cm de hauteur.
3. Fixer un tuyau de caoutchouc à l'une des extrémités du tube en U (sur le schéma, il s'agit du côté le plus court du tube en U).
4. Installer le bouchon de caoutchouc sur l'erlenmeyer.
5. Fixer l'extrémité libre du tuyau de caoutchouc sur le petit tube de verre présent sur le bouchon de caoutchouc.
6. À l'aide d'un crayon marqueur, indiquer le niveau d'eau du côté libre du tube en U (ce niveau est la hauteur zéro et correspond à la pression atmosphérique).
7. Noter la température de l'air de l'erlenmeyer ainsi que la pression atmosphérique environnante.
8. Relier les extrémités libres des aiguilles à la source à l'aide de fils à pinces alligators. Ajuster la source à 9 volts. **Attention, le chauffage débute!**
9. Mesurer la hauteur du niveau d'eau pour plusieurs températures situées sous 35 °C. Par exemples à 25°C, 26°C, 27°C...

Laboratoire dirigé

En une phrase, résumez votre but :

En une phrase, formulez votre hypothèse :

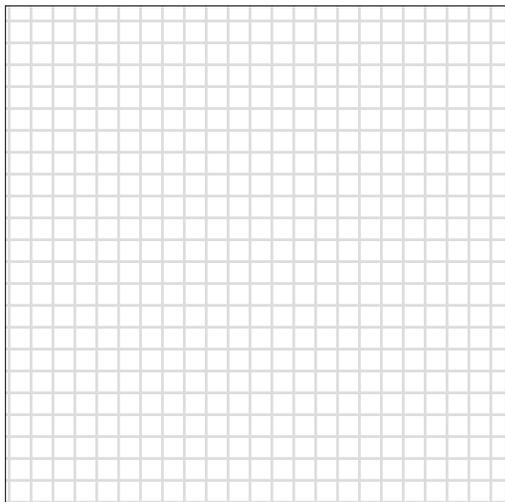
Quels sont les facteurs constants lors de cette expérimentation (nombre de mol, température, pression, volume)?

Résumez votre protocole sous forme d'un diagramme.

Tableau de données		
No.	Température de l'air de l'erlenmeyer (°C)	Hauteur de la colonne d'eau colorée (cm)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
Pression atmosphérique (kPa)		

Analyser les résultats			
<i>Traitez vos données.</i>			
Question 1			
Convertissez les températures (degré Celsius \Rightarrow Kelvin). De plus, à l'aide de la section précédente s'intitulant « Fonctionnement d'un manomètre à eau », calculez les pressions suivantes : (Si cette section n'est pas complétée, une équation te sera donnée par ton enseignant)			
No.	Température de l'air (K)	Pression relative de l'air (kPa)	Pression absolue de l'air (kPa)
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Traitez vos données (suite).



Faites ressortir les tendances.

Question 2

En traçant le graphique de la pression en fonction de la température, quel genre de relation mathématique retrouvez-vous?

Question 3

Calculer le taux de variation de cette relation.

Tirez vos conclusions

Question 4

En tenant compte du graphique fait lors de cette expérimentation et de l'équation mathématique qui en découle, mettez en relation deux points de la courbe?

Autrement dit, pour deux points quelconques du graphique, complétez la relation suivante :

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{\quad}{\quad}$$

Question 5

Sur votre graphique, si vous extrapolez votre courbe vers les basses températures, à quelle température la pression du gaz tend à devenir nulle?

Question 6

À quoi correspond la température trouvée au numéro précédent?

Tirez vos conclusions (suite)

Question 7

Le réservoir à air comprimé du système de freinage d'un camion est à sa pression normale de 931 kPa (135 psi) lors d'une belle journée d'hiver. La température du réservoir est de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sachant que le réservoir risque de se rompre si la pression excède 1034 kPa (150 psi), quelle est la température à ne pas excéder?

Question 8

Vous avez en classe deux sphères de Magdebourg unies par une basse pression interne de 735 mm de Hg. La température de la classe est de $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ et la pression atmosphérique y est de 760 mm de Hg. En mettant les sphères au soleil, la température de celles-ci montent jusqu'à $31\text{ }^{\circ}\text{C}$. Est-ce que cette hausse de température est suffisante pour que les deux sphères se séparent d'elle-même?

Question 9

Vous avez de l'air dans la bouche à $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ et à 1 atm (atmosphère). À quelle pression devez-vous compresser cet air dans votre bouche pour élever sa température de trois degrés Celsius?

Questionnaire sur la loi générale des gaz

Question 1

Complète le tableau synthèse ci-dessous :

Grandeurs physiques	Équation
Effet de la variation de température sur le volume d'un gaz	$\frac{V_1}{T_1} = \text{-----}$
Effet de la variation de pression sur le volume d'un gaz	$p_1 \cdot V_1 = \text{-----}$
Effet de la variation de température sur la pression d'un gaz	$\frac{p_1}{T_1} = \text{-----}$

Question 2

Lorsqu'on met ensemble les trois lois précédentes, nous obtenons la loi générale des gaz. D'après cette loi, le produit de la pression d'un gaz par le volume de celui-ci est proportionnel à sa température en kelvin $\{p \cdot V = k \cdot T \rightarrow (p \cdot V)/T = k\}$. Il aurait été possible de trouver cette équation expérimentalement tout en conservant la quantité de molécule de gaz constante.

$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$

Supposons qu'un ballon d'hélium de 4 litres est lâché, par un enfant lorsque qu'il fait 20 °C. La pression atmosphérique est de 101 kPa. Sachant que le ballon éclate lorsque son volume atteint 7 litres à une température de 275 K, quelle est la pression sur le

ballon lorsque celui-ci rend l'âme?

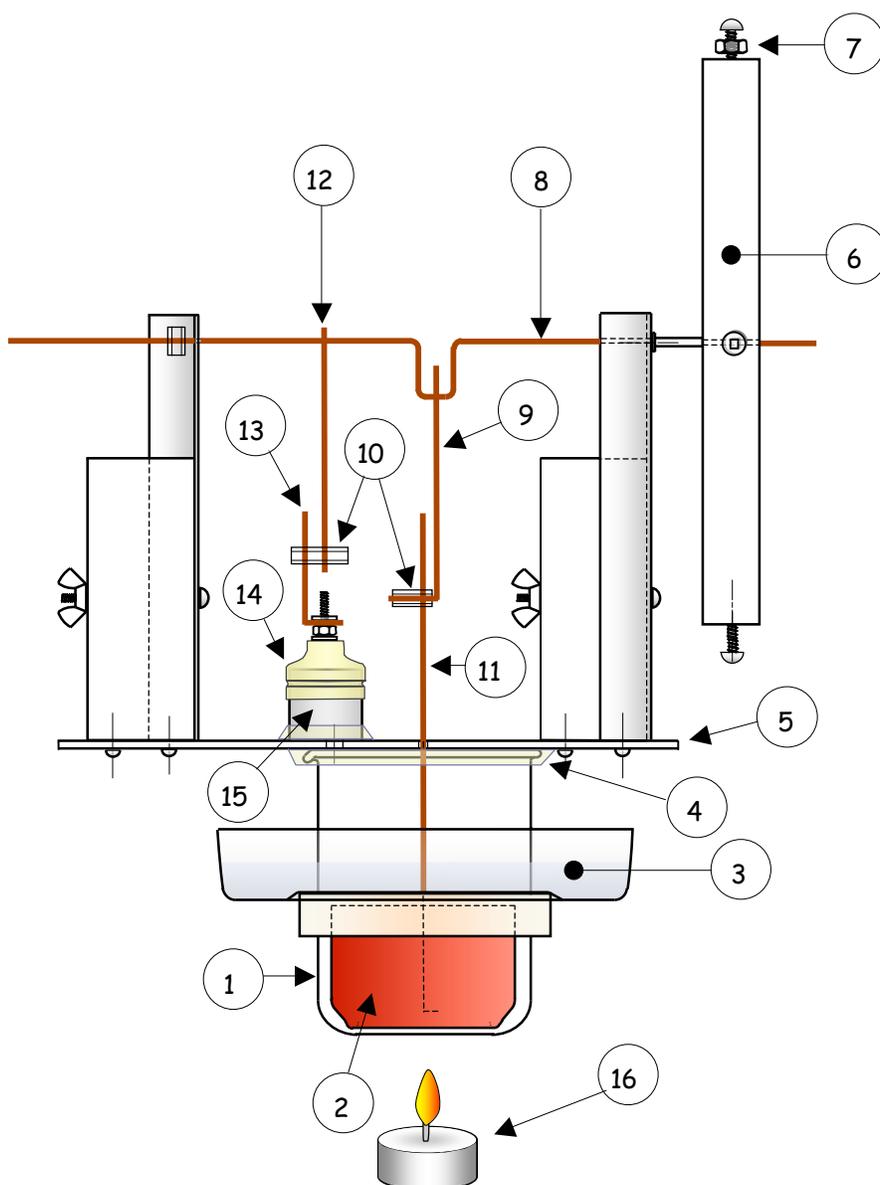
N.B. D'autres exercices sur le sujet te seront donnés par ton enseignant.

Nomenclature du moteur Stirling



Ton étude du comportement des gaz devrait t'aider à parfaire ton analyse de son fonctionnement. Mais avant d'analyser le fonctionnement d'un moteur Stirling, il est préférable d'en voir un, tourner devant soi. Le moteur que nous vous présentons est pratiquement fonctionnel. Il n'y manque que des ajustements. Pour commencer, voyons ses différents composants.

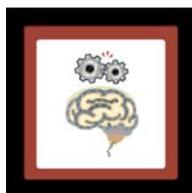
No.	Désignation
1	Becher de 400 mL
2	Déplaceur de gaz
3	Bac de refroidissement
4	Joint de colle chaude
5	Plaque support
6	Volant d'inertie
7	Vis et écrou d'ajustement
8	Vilebrequin
9	Bielle du déplaceur
10	Tubes de liaison
11	Tringle du déplaceur
12	Bielle de la membrane
13	Tringle de la membrane
14	Membrane
15	Chambre d'expansion
16	Source de chaleur



Guide de mise en marche du moteur Stirling

- Veuillez maintenant suivre ces étapes pour la mise en marche du moteur Stirling.
1. Fixer le moteur à l'aide d'une pince et d'un support universel en insérant la pince sous le bac de refroidissement (3).
 2. Déposer un lampion éteint sous le becher et ajuster le support de façon à ce qu'une éventuelle flamme soit très proche du becher sans pour autant y toucher.
 3. Désunir la bielle de la membrane (12) et la tringle de la membrane (13) en les glissant hors du tube de liaison (10).
 4. Tourner le vilebrequin (8) en actionnant le volant d'inertie (6). Ajuster le tube de liaison (10) du déplaceur de façon à ce que le déplaceur (2) bouge librement sans heurter le haut ou le bas du becher.
 5. Lubrifier toutes les zones où la friction risque de freiner le mouvement. Il faut s'assurer que le déplacement de chaque pièce se fasse sans coincement ni hésitation.
 6. Sur le volant d'inertie, compenser complètement la masse du déplaceur en se servant des vis et écrou d'ajustement (7) comme contrepoids. On devrait pouvoir positionner le volant d'inertie (6) dans n'importe laquelle position sans que celui-ci ne bouge par la suite.
 7. Remplir le bac de refroidissement (3) avec de la glace et de l'eau. Attention au débordement, l'eau glacée ne doit pas entrer en contact avec la base du becher lorsque celui-ci est brûlant. Le pyrex composant le becher ne le supporterait pas.
 8. Allumer le lampion sous le becher et attendre au moins trois minutes pour un chauffage adéquat. Il est possible que deux lampions soient nécessaires si la flamme est petite.
 9. Étanchéifier le trou pratiqué dans la plaque support (5) par lequel passe la tringle du déplaceur (11) en y ajoutant une goutte d'huile.
 10. Vérifier l'étanchéité du système en tournant le volant d'inertie. Lorsque le déplaceur est vers le haut, la membrane (14) devrait se gonfler. Et inversement, lorsque le déplaceur est vers le bas, la membrane (14) devrait se contracter. Si la membrane ne bouge pas de cette façon, le système n'est pas étanche ou le moteur n'a pas atteint les températures d'opération. Il faut corriger le problème avant d'aller plus loin.
 11. Unir maintenant la bielle de la membrane (12) et la tringle de la membrane (13) en les glissant à travers le tube de liaison (10). Ajuster le tube de liaison de la membrane de façon à ce que l'élasticité de la membrane ne crée aucune résistance à la rotation du moteur. Il est possible que la membrane ait à glisser sur la chambre d'expansion (15) pour ajuster l'amplitude du mouvement.
 12. Démarrer maintenant le moteur. Amorcer la rotation de façon à ce que le déplaceur devance le mouvement de la membrane. Par exemple, si la bielle du déplaceur (9) est en haut de sa course, la bielle de la membrane (12) est en train de s'élever.

Analyse du moteur Stirling de laboratoire



Ça y est, votre moteur tourne et vous en savez assez dans le domaine pour expliquer ce qui se passe. Une excellente façon de décrire un phénomène en mouvement comme celui-là est de décomposer son évolution dans le temps. Nous vous demandons donc de décrire qualitativement ce qui se passe au cours d'une rotation complète du moteur. Pour ce faire, nous vous présentons quatre images décrivant ce qui se passe à quatre moments précis. Vous avez donc à expliquer le phénomène et à justifier vos explications à l'aide de la loi générale des gaz. Pour débiter votre réflexion, complétez le tableau ci-dessous. Il traite du rôle de chaque composant du moteur. Une attention particulière devrait être accordée aux composants écrits en caractères gras puisqu'ils sont plus directement liés à la loi générale des gaz.

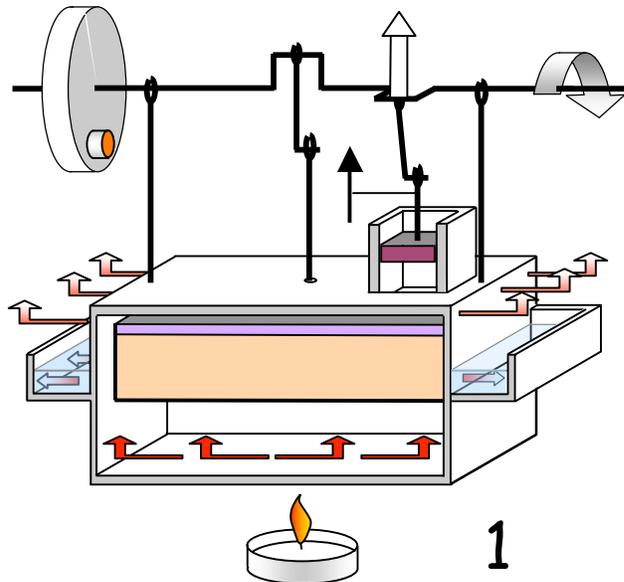
Le rôle de chaque composant

No.	Composant	Rôle du composant
1	Becher de 400 mL	
2	Déplaceur de gaz	
3	Bac de refroidissement	
4	Joint de colle chaude	
5	Plaque support	
6	Volant d'inertie	
7	Vis et écrou d'ajustement	
8	Vilebrequin	
9	Bielle du déplaceur	
10	Tubes de liaison	
11	Tringle du déplaceur	
12	Bielle de la membrane	
13	Tringle de la membrane	
14	Membrane	
15	Chambre d'expansion	
16	Source de chaleur	

Décomposition d'une rotation complète du moteur Stirling

Schéma de la phase 1 (déplaceur en haut)

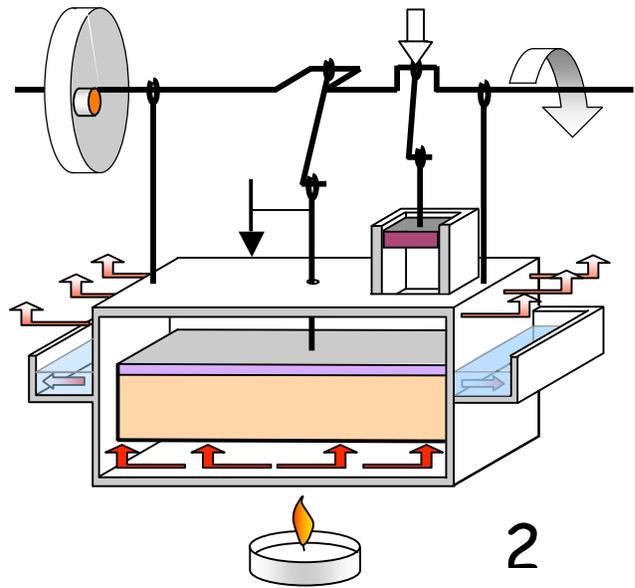
Explication complète du phénomène



Justifications à l'aide des concepts et des lois

Schéma de la phase 2 (déplaceur en train de descendre)

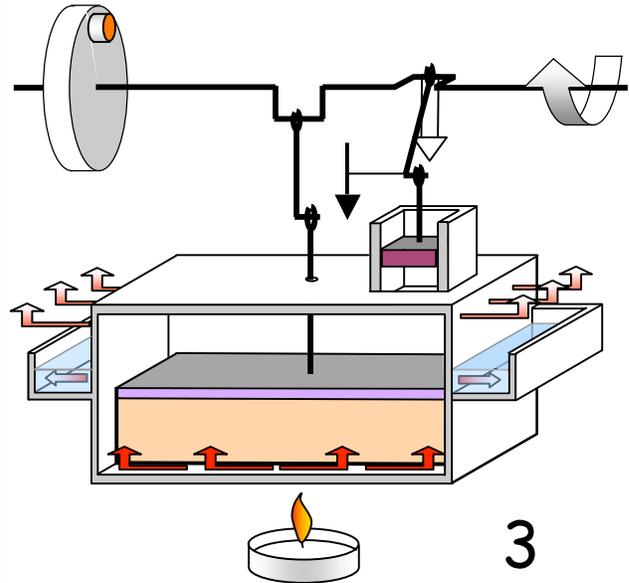
Explication complète du phénomène



Justifications à l'aide des concepts et des lois

Schéma de la phase 3 (déplaceur en bas)

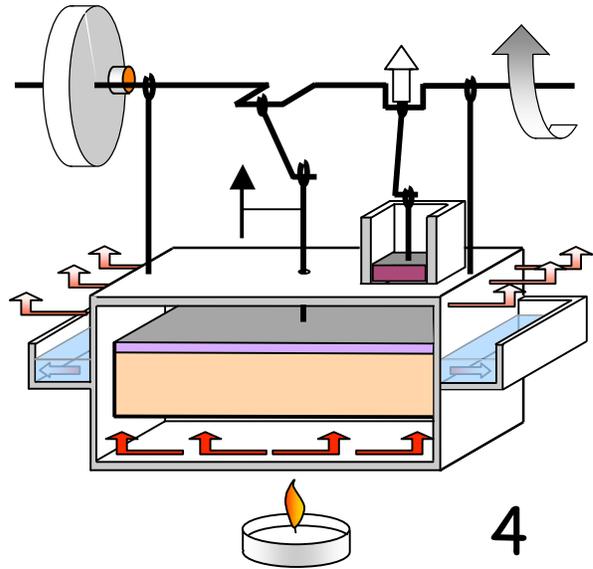
Explication complète du phénomène



Justifications à l'aide des concepts et des lois

Schéma de la phase 4 (déplaceur en train de monter)

Explication complète du phénomène



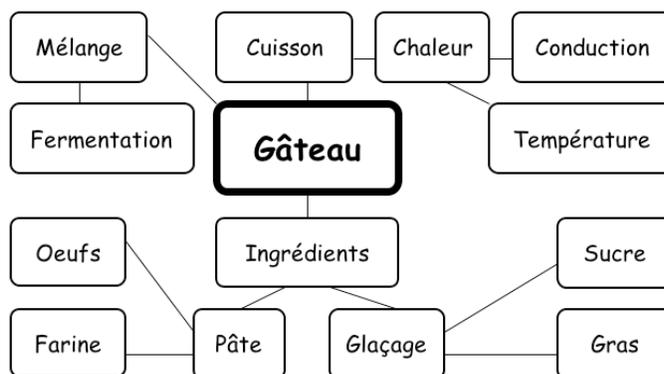
Justifications à l'aide des concepts et des lois



Intégration et réinvestissement

À la lumière de l'étude du moteur, reconstruisez un réseau des concepts reliés à l'étude du fonctionnement du moteur Stirling. Le nouveau réseau que vous bâtirez sera sans doute bien différent de celui que vous avez fait au tout début de cette activité. Cet exercice vous permettra d'apprécier le chemin parcouru en étudiant ce fabuleux moteur.

Exemple d'un réseau de concepts



Réseau de concepts

Moteur Stirling

Webographie

1. Moteur diesel et à essence (Principes, rendement, ...) <http://www.ifp.fr/espace-decouverte-mieux-comprendre-les-enjeux-energetiques/les-cles-pour-comprendre/automobile-et-carburants/les-moteurs-conventionnels>
2. Moteur Stirling (Principes, rendement, ...) http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Stirling
3. Avantages et inconvénients du moteur Stirling <http://www.moteurstirling.com/avanconvenient.php>
4. Applications du moteur Stirling
<http://www.eco-energie.ch/content/view/112/47/>
<http://www.moteurstirling.com/applications2.php>
<http://www.moteurstirling.com/applications1.php>