Physique
ECG

ECCG Monthey

Raphaël Nanchen, ECCG
Raphael-math.NANCHEN@eduvs.ch
http://nanchen.info

1 QU'EST-CE QUE LA PHYSIQUE

1.1 Objectif

Le but des sciences est de comprendre et de décrire les phénomènes de la nature.

La physique est une discipline scientifique qui vise à décrire les phénomènes « observables » ou à les prévoir, souvent à l'aide d'outils mathématiques.
Qu'entend-on par « observables » ? Il ne faut pas le comprendre comme « visibles », mais « mesurables ».
Par exemple, l'électricité n'est pas visible, mais on peut faire certaines mesures à son sujet ; elle sera donc un sujet d'étude de la physique.

Selon les sujets, on commence par effectuer les mesures, puis on en élabore des modèles, des théories et en déduit des lois. Ce fut le cas, par exemple, pour la célèbre expérience de Newton, physicien du 17e siècle, qui reçut une pomme sur sa tête alors qu'il faisait une sieste sous le pommier. De cette expérience, il en déduisit la théorie de la mécanique qui régit les mouvements des corps.

Pour d'autres sujets, on a commencé imaginer des modèles purement théoriques et les mesures ne seront réalisées que plus tard pour les vérifier. Par exemple, l'existence du boson de Higgs, dont on a beaucoup parlé ces dernières années avec les nouveaux accélérateurs de particules du CERN, a été prédite dans les années 60 par le physicien Higgs ; à ce jour, certaines expériences tendraient à prouver son existence. Un autre exemple est celui de la structure de l'atome, composé d'un noyau de protons et de neutrons, autour duquel se déplacent des électrons. Cette structure a longtemps fait l'objet de débat et a été prédite avant de pouvoir effectuer des mesures pour vérification.

Dans tous les cas, les grandeurs mesurables sont les éléments essentiels du travail scientifique.

1.2 Mesure – Grandeur – Symbole – Unité

> *A l'aide d'un exemple, précisons le vocabulaire : Mesure – Grandeur – Symbole – Unité*
> *Quelle est la longueur de la salle de classe ?*

Mesure : Action de déterminer la valeur d'une grandeur ou la valeur elle-même de la grandeur.
Dans l'exemple : il s'agit de l'action de « prendre un ruban métrique, de le dérouler le long de la classe et de lire la valeur » ou il peut s'agir du « chiffre lu sur le ruban métrique ».

Grandeur : ce qui est mesuré.
Dans l'exemple, la grandeur est la distance entre les deux murs les plus éloignés de la salle de classe.

Symbole : lettres qui représente, pour des questions de commodité mathématique, une grandeur.
Dans l'exemple, le symbole souvent utilisé pour la longueur est « L ».

Unité : est l'étalon qui permet de mesurer la valeur d'une grandeur par comparaison. Elle accompagne toujours la valeur de la mesure.
Dans l'exemple, l'unité pourrait être le « mètre », abrégé « m ». Si la longueur mesurée est de 9m, cela signifie qu'on peut étaler 9 fois de suite un objet étalon de 1m dans la longueur de la pièce.

Attention à ne pas confondre « symbole » et « unité » ! Par exemple « m » peut signifier, selon le contexte, masse ou mètre. Dans le 1er cas, il s'agit du symbole de la masse et dans le 2^{e} cas, c'est une unité de longueur.

Dans la physique classique, il existe deux types de grandeurs mesurées : ce sont les grandeurs scalaires et les grandeurs vectorielles.

1.2.1 Grandeurs scalaires

Les grandeurs scalaires, comme le temps ou la distance, sont définies par une seule caractéristique : leur valeur. On les exprime par un nombre **accompagné d'une unité**.

1.2.2 Grandeurs vectorielles

Les grandeurs vectorielles, comme la vitesse ou la force, sont définies par trois caractéristiques : leur valeur (ou intensité, ou norme,…), leur direction et leur sens, et éventuellement aussi leur point d'application. On les représente graphiquement par une flèche. Leur valeur (ou intensité, ou norme, …) est exprimée par un nombre accompagné d'une unité.

1.3 Système international de mesure (S.I.)

Pour des raisons de commodités, il est agréable que toute la communauté scientifique utilise les mêmes unités de mesure. Ainsi on a créé le système international de mesure dans lequel on a défini précisément à l'aide d'étalon : la distance, la masse, la durée, l'intensité du courant électrique, la température, la quantité de matière et l'intensité lumineuse ; ce sont les grandeurs de base du SI. Ce sont toutes des grandeurs scalaires.
Toutes les autres unités se déduisent par combinaison de ces unités de bases.

1.3.1 Grandeurs de base

Grandeur	**Symbole (Abréviation de la grandeur)**	**Unité**	**Abréviation de l'unité**
Distance	d, l, Δx, …	Mètre	[m]
Masse	m	Kilogramme	[kg]
Temps – durée	t, Δt	Seconde	[s]
Intensité du courant électrique	I	Ampère	[A]
Température	Θ ou T	Kelvin	[K]
Intensité lumineuse		Candela	[cd]
Quantité de matière		Mole	[mol]

1.3.2 Grandeurs dérivées

Une grandeur dérivée est une grandeur qu'on obtient à partir des grandeurs de base.

Pour déduire une unité à partir des grandeurs de base, on utilise les relations physiques, par ex :

> ***Quelle est l'unité S.I. d'une vitesse ?***
> *La vitesse est donnée par :* $v = \frac{distance}{temps}$, *donc* $[v] = \left[\frac{m}{s}\right]$

Voici quelques grandeurs dérivées bien connues :

Grandeur	**Symbole (Abréviation de la grandeur)**	**Unité**	**Abréviation de l'unité**
Aire - surface	A, S	Mètre carré	[m^2]
Volume	V	Mètre cube	[m^3]
Angle	α, β, …	Radian	[rad]
Masse volumique	ρ	Kilogramme par mètre cube	[$\frac{kg}{m^3}$], [kg/m^3], [$kg \cdot m^{-3}$]
Vitesse (grandeur vectorielle)	$\vec{v}$	Mètre par seconde	[$\frac{m}{s}$], [m/s], [$m \cdot s^{-1}$]
…			

2 CHALEUR

2.1 Qu'est-ce « l'énergie » ?

Question difficile dont la réponse ressemble souvent à « force », « vitalité », « puissance ». Dans l'esprit populaire, ces notions sont vagues et ne correspondent pas à une définition scientifique.
La difficulté pour définir l'énergie réside dans le fait qu'elle est invisible, intouchable, qu'elle est en quelque sorte une vision mathématique.
Par contre, on peut mettre en évidence une forme d'énergie en la transformant en une autre forme d'énergie.

Toute action requiert l'utilisation d'énergie, si bien que Rankine a défini l'énergie ainsi :

« **L'énergie**, c'est la capacité d'effectuer des changements, c'est une caractéristique commune aux différents états de la matière auxquels se rapportent les branches de la physique »
Notations : Q ou E,
Unité S.I. : le **joule** [J] ou [$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$]
Autres unités : calorie, Calorie, watt-heure, kilowat-heure, electron-volt, erg

Qu'entend Rankine par « effectuer des changements » et comment « mieux visualiser » ce que vaut 1 joule ?
Le changement pourrait être par exemples :

1. *Un déplacement d'un objet immobile : pour lever d'un mètre un objet de 100 grammes, on dépense une énergie d'environ 1 joule.*
2. *Elever la température d'un objet : pour élever d'un degré Celsius, 1kg d'eau, on dépense une énergie d'environ 4180 joules.*

2.1.1 Formes d'énergie

Les deux exemples précédents montrent que l'énergie est utilisée dans des contextes très différents : celui du mouvement et celui d'une variation de température. L'énergie peut donc se trouver sous différentes formes, apparemment sans aucun lien entre elles. Leur point commun réside dans la possibilité de permettre un « changement » et de se transformer en une autre forme d'énergie.
Pour illustrer cette transformation :

> *Une ampoule électrique va consommer une énergie dite électrique, liée au mouvement des électrons. Cette énergie électrique sera transformée en une énergie dite rayonnante, liée aux photons (« grains » de lumière) émis par l'ampoule et en une forme d'énergie thermique, liée au mouvement des particules du filament et qui cause l'échauffement de la lampe.*
> *On remarque que l'énergie électrique est celle qui fait fonctionner l'ampoule, on l'appelle « énergie consommée ». L'énergie rayonnante est celle qui sert au but de l'ampoule, à savoir éclairer, on l'appelle « énergie utile ». L'énergie thermique est une énergie « parasite » : au lieu de transformer l'énergie consommée en énergie utile, on en perd une partie sous forme de chaleur, c'est pourquoi l'énergie thermique est appelée dans ce cas « énergie perdue ».*

Voici différentes formes d'énergie :

2.1.1.1 Energie thermique, chaleur ou énergie calorifique

L'énergie thermique, chaleur ou énergie calorifique est liée aux mouvements des particules d'un corps.
Elle se manifeste lors de l'élévation de la température, de la dilatation d'un corps, …

2.1.1.2 Energie électrique

L'énergie électrique est liée aux différences de charges électriques entre deux corps. Elle est particulièrement commode à transformer et à transporter, mais difficile à stocker.

2.1.1.3 Energie mécanique

L'énergie mécanique est liée au mouvement des objets, à leur vitesse (énergie cinétique) ainsi qu'à leur position, leur forme et à leurs interactions (énergie potentielle).

2.1.1.4 Energie chimique

L'énergie chimique est liée à la structure de la matière, aux liaisons entre atomes ou entre molécules.

2.1.1.5 Energie nucléaire

L'énergie nucléaire est liée à la cohésion entre particules constituant le noyau de l'atome. Elle se manifeste lorsque des noyaux lourds se cassent (fission nucléaire) ou lorsque des noyaux légers s'assemblent (fusion nucléaire). La radioactivité est liée à ce type d'énergie.

2.1.1.6 Energie rayonnante

L'énergie rayonnante est liée aux radiations (photons) émises par des corps. Celle du Soleil est la plus connue, car indispensable à la vie sur la Terre.

2.2 Température

2.2.1 Le chaud, le froid, subjectivité de la sensation

La température est une notion liée à la sensation de chaud et de froid. On ne peut cependant pas se fier à une « sensation » en sciences, car d'une part, on veut quantifier les grandeurs et d'autre part, les sensations sont subjectives.

> *Prenons un bac d'eau froide et un autre d'eau chaude et plongeons simultanément dans chacun de ces récipients une de nos mains durant 10s.*
> *Ensuite plongeons simultanément les deux mains dans un bac d'eau tiède. Quelle sensation pour chacune des mains ?*

2.2.2 Interprétation microscopique de la température

Mesurer la **température** équivaut au niveau microscopique à mesurer l'énergie cinétique moyenne des particules, c'est à dire à mesurer « le mouvement », l'agitation des particules (molécules ou atomes).
Unité S.I. : le **Kelvin** [K]
Autres unités : le degré Celsius [°C], le degré Fahrenheit [°F]

A partir de cette définition, on peut expliquer pourquoi pour un même élément on a :

$T_{\text{état solide}} < T_{\text{état liquide}} < T_{\text{état gazeux}}$

On modélise la matière ainsi :

1. **Etat solide :** les particules ont un mouvement propre, mais elles ne se déplacent pas les unes par rapport aux autres ; elles vibrent « sur place ». Leur position forme une structure ordonnée.
2. **Etat liquide :** les particules ont aussi un mouvement propre ; elles ont une structure dense, mais elles peuvent tout de même se déplacer légèrement les unes par rapport aux autres.
3. **Etat gazeux :** les particules ont un mouvement aléatoire, elles sont très éloignées les unes des autres et ont un mouvement libre, à grande vitesse.

Si mesurer la température revient à mesurer l'agitation des particules, une matière à l'état solide sera plus froide qu'à l'état liquide, car ses particules ne peuvent pas avoir une forte agitation puisqu'elles sont réduites à vibrer sans se déplacer les unes par rapport aux autres. On peut raisonner de manière identique pour la température à l'état gazeux par rapport à celle de l'état liquide.

Cette définition de la température permet également d'expliquer pourquoi il est impossible de baisser la température à l'infini : si les particules n'ont pas d'agitation, il ne sera pas possible de mesurer une température plus basse.

On définit cette température où l'agitation est minimale comme le « **zéro absolu** » : $0K$ ou environ $-273°C$.

2.2.3 Unité et échelle de température

L'unité de température utilisée quotidiennement est le degré Celsius °C. Pour définir cette échelle, on a fixé la température de fusion de la glace à 0°C et celle d'ébullition de l'eau à pression normale (1013 hPa) à 100°C.

En physique, l'unité de température est le Kelvin, noté K.

Pour convertir une température degré Celsius en Kelvin, on ajoute 273°C et pour passer de Kelvin en degré Celsius, on enlève 273°C.

Donc, si une température augmente de 1°C, elle augmentera également de 1K.

Comme dans les formules que nous appliquerons seule la variation de température sera utilisée, il sera possible de travailler en degré Celsius, plutôt qu'en Kelvin. Cela rendra plus aisé la représentation de la température (30°C est plus explicite pour beaucoup que 303K, bien que cela soit la même température).

2.3 Différence entre chaleur et température

L'usage courant confond les termes chaleur (énergie) et température. Par exemple :

1. *« Quelle chaleur ! » signifie que la température est élevée.*
2. *« Chauffer une maison » signifie qu'il faut fournir de la chaleur pour maintenir ou augmenter la température.*
3. *Un habit chaud signifie qu'il est isolant, il protège des variations de température, mais ne fournit pas de chaleur (sauf ceux contenant un système de chauffage électrique…)*

La **chaleur**, notée Q ou E, est l'énergie nécessaire pour faire varier la température d'un système ou la maintenir.
Synonymes de chaleur : **énergie thermique, énergie calorifique**
Unité S.I. : le **joule** [J]
Autres unités : la calorie [cal], la Calorie ou grande calorie [kcal]

Ainsi chaque corps a une température et contient de la chaleur.
Pour illustrer la différence, considérons l'exemple suivant :

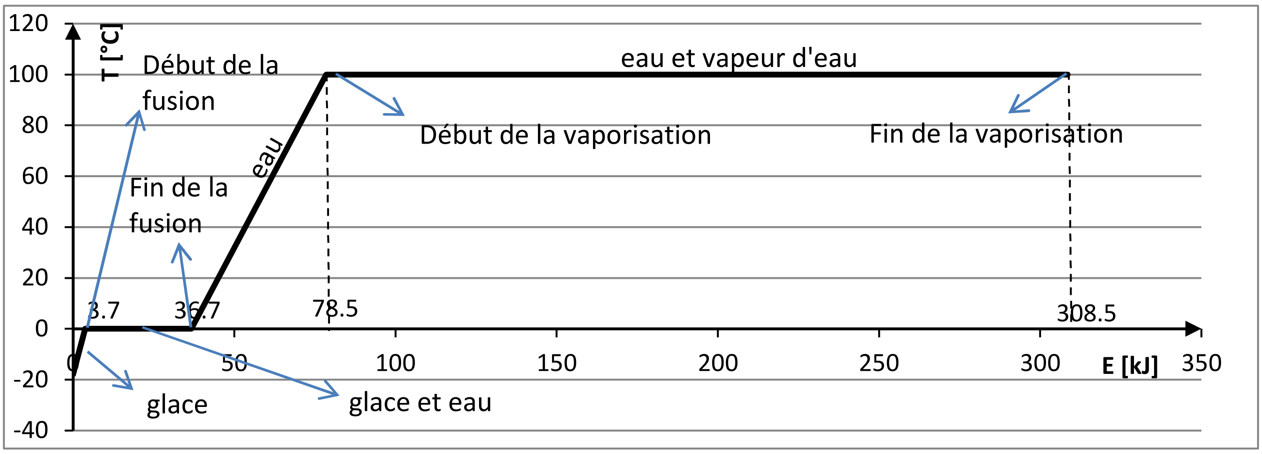
> *On a trois récipients :*
> 1. *une tasse à café contenant 0,5 dl d'eau à 90°C*
> 2. *un jerrican contenant 50l d'eau à 50°C*
> 3. *une baignoire contenant 100 l d'eau à 30°C.*
>
> *La température est clairement définie pour ces trois quantités d'eau : la plus chaude étant celle contenue dans la tasse à café, puis celle dans le jerrican et enfin celle de la baignoire.*
>
> *La température d'un bain agréable est d'environ 37°C (c'est la température corporelle). Dans l'exemple ci-dessus, l'eau dans la baignoire n'est pas assez chaude et si l'on désirait augmenter sa température, il faudrait apporter de la chaleur (définition de la chaleur).*

Qu'est-ce qui va apporter le plus de chaleur : l'eau de la tasse ou celle du jerrican ?
Autrement formulé : la température de l'eau dans la baignoire sera-t-elle plus élevée en versant l'eau de la tasse ou celle du jerrican ?
Notre intuition nous dit qu'il faut utiliser le jerrican et non la tasse. Ainsi l'eau contenue dans le jerrican, pourtant à 50°C seulement, contient plus de chaleur que celle, à 90°C, contenue dans la tasse.
On le devine aisément pourquoi : la chaleur d'un corps ne dépend pas uniquement de sa température, mais aussi de sa masse.

2.4 Courbe de température d'un corps pur

Illustrons par un exemple :

100g d'eau à $-18°C$ *(donc sous forme de glace) sont chauffés, jusqu'à vaporisation complète.*
On peut relever alors la température de l'eau en fonction de la chaleur apportée et en tirer le graphique commenté ci-dessous.



Constations :

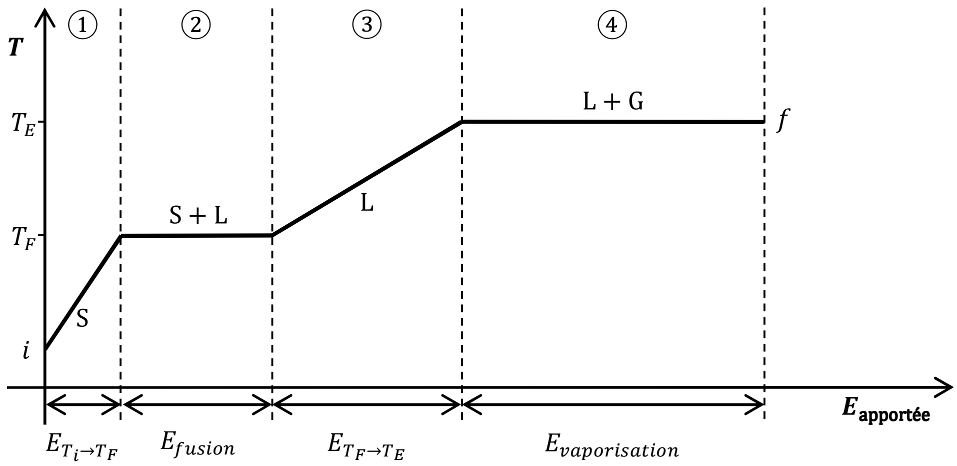
1. *On distingue quatre zones : 1ère zone de* $-18°C$ *à* $0°C$*, 2e zone stable à* $0°C$*, 3e zone de* $0°C$ *à* $100°C$ *et 4e zone stable à* $100°C$*.*

2. *On constate deux cas particuliers :*
   a. *il y a des zones où la température augmente lorsqu'on apporte de l'énergie (droite oblique). On constate que ces zones correspondent à un état unique de la matière : solide pour la première zone (de* $-18°C$ *à* $0°C$*), puis liquide pour la 3e zone (de* $0°C$ *à* $100°C$*),*
   b. *il y a des zones où la température ne varie pas, même si on apporte de l'énergie. On constate que ces zones correspondent à un changement d'état de la matière, avec la coexistence de deux états de la matière : fusion (solide + liquide) pour la 2e zone à* $0°C$ *(*T_{fusion} *de l'eau) et vaporisation (liquide + gaz) pour la 4e zone à* $100°C$ *(*$T_{ébullition}$ *de l'eau)*

3. *On constate que les énergies nécessaires pour chacune des zones n'est pas la même :*
   a. *zone 1 : il faut peu d'énergie (*$\simeq 3{,}7kJ$*) pour faire passer la glace de de* $-18°C$ *à* $0°C$
   b. *zone 2 : il faut davantage d'énergie (*$\simeq 36{,}7 - 3{,}7 = 33kJ$*) pour fondre la glace, mais cela reste relativement faible*
   c. *zone 3 : il faut encore légèrement plus d'énergie (*$\simeq 78{,}5 - 36{,}7 = 41{,}8kJ$*) pour amener l'eau de* $0°C$ *à* $100°C$
   d : *zone 4 : pour vaporiser l'eau, il faut énormément d'énergie (*$\simeq 308{,}5 - 78{,}5 = 230kJ$*).*

4. *Il est plus facile de chauffer la glace que l'eau. On le remarque en constatant que pour une même quantité de chaleur apportée, la glace augmente davantage sa température que l'eau. (Pente plus grande pour la glace que pour l'eau)*

Cette « courbe » de température se retrouve pour les autres corps purs. Par contre, il est évident que les valeurs numériques vont varier en fonction de la matière : par exemple, le fer ne fondra pas à 0°C, mais selon le « Formulaires et Tables » à 1538°C (température de fusion).
Ainsi de manière générale, on obtient le graphique suivant :



i/f : initial/final
T_i : température initiale
E : énergie/chaleur à fournir pour chauffer
T_F : température de fusion (☞F majuscule !)
T_E : température d'ébullition
T_f : température finale (dans ce cas $T_f = T_E$)

S : Solide
L : Liquide
G : Gaz

$E_{T_i \to T_F}$: chaleur à apporter pour passer de la température initiale à celle de fusion
E_{fusion} : chaleur à apporter pour fondre entièrement la matière, si celle-ci se trouve à la température de fusion
$E_{T_F \to T_E}$: chaleur à apporter pour passer de la température de fusion à celle d'ébullition
$E_{vaporisation}$: chaleur à apporter pour vaporiser entièrement la matière, si celle-ci se trouve à la température d'ébullition

Remarques importantes :
Nous avons considéré que l'objet était chauffé, qu'on lui apportait de la chaleur, si bien que sa température augmentait.
Nous pouvons imaginer que l'objet soit refroidi (en la plaçant dans un congélateur par exemple). Dans ce cas, on lui retirerait de l'énergie et sa température diminuerait. Comment adapter le graphique ci-dessus ?

1. on garde exactement le même tracé
2. on échange les positions initiales et finales
3. $E_{vaporisation}$ devient $E_{liquéfaction}$ et E_{fusion} devient $E_{solidification}$

Cela signifie que :

1. $T_{fusion} = T_{solidification}$
2. $T_{ébulliton} = T_{liquéfaction}$
3. Pour refroidir un corps d'un certain nombre de degrés Celsius, il faut lui retirer la même chaleur qu'on aurait dû lui apporter pour le chauffer de ce nombre de degrés Celsius.

Pour la suite, il s'agira d'établir les formules qui nous permettrons de :

1. déterminer la chaleur à apporter pour varier la température d'un corps pur d'un certain nombre de degrés Celsius,
2. déterminer l'énergie nécessaire à faire changer d'état de la matière un corps pur.

2.4.1 Energie et changement de température

On chauffe deux récipients identiques contenant chacun des quantités différentes d'eau. Si l'on chauffe les deux récipients de manière identique (même appareil et même durée de chauffage), on y aura apporté la même chaleur (énergie), mais la température finale de la plus grande quantité d'eau sera plus basse que celle de la plus petite quantité d'eau.

Comment l'expliquer à l'aide du modèle microscopique ?
La mesure de la température est la mesure de l'agitation moyenne des molécules d'eau. En apportant de la chaleur aux récipients, on augmente cette agitation des molécules ; cependant, le nombre de molécules d'eau n'étant pas le même dans les deux récipients, la chaleur apportée devra « se répartir » pour plus de molécules d'eau dans un des récipients et ne pourra pas autant augmenter l'agitation que dans l'autre récipient, la température sera donc plus basse.

1ère constatation : cet exemple montre que la chaleur nécessaire pour chauffer un corps dépend de la quantité de matière à chauffer : plus la masse de la matière est grande, plus il est difficile d'augmenter la température, donc plus il faudra apporter de l'énergie. On déduit intuitivement que la chaleur à fournir est proportionnelle à la masse : si je veux chauffer deux fois plus de matière, je dois amener deux fois plus de chaleur…

On chauffe deux récipients identiques contenant chacun une même quantité d'eau. Si l'on chauffe les deux récipients avec des appareils identiques, mais avec des durées de chauffage différentes, on constate évidemment que l'eau chauffée plus longtemps a une température plus élevée.

Comment l'expliquer à l'aide du modèle microscopique ?
Considérons d'abord la partie de chauffage commune : chacun des deux récipients reçoit la même chaleur, ce qui va agiter les particules de manière similaire, donc les températures sont identiques à ce moment. On continue alors de chauffer un des récipients et la chaleur reçue en supplément élèvera la température de l'eau…

2e constatation : cet exemple montre que plus la chaleur fournie est grande plus l'augmentation de température sera importante. ✋ : si je double la chaleur fournie, c'est l'augmentation de température qui double et non la température elle-même ! La chaleur est proportionnelle aux variations de température.

On élève la température de manière identique de deux mêmes quantités d'eau et d'huile (par exemple de 60°C), avec des appareils identiques. Lequel des deux liquides chauffera-t-on le plus ? Quiconque fait un peu de cuisine sait que l'eau est plus difficile à chauffer que l'huile.

Comment l'expliquer à l'aide du modèle microscopique ?
La structure moléculaire de l'eau et de l'huile est différente. La structure de l'eau ne favorise pas l'agitation moléculaire, si bien qu'il est particulièrement difficile de faire varier la température de l'eau.

3e constatation : cet exemple montre que pour une même chaleur fournie, la variation de température dépend de la matière. Nous définissons alors une caractéristique des corps purs :

La **chaleur massique**, notée c, qui est la capacité d'une substance à s'opposer aux variations de température. Sa valeur est l'énergie qu'il faut apporter pour faire augmenter de 1K, 1kg de la substance.
✋ : $c \in \mathbb{R}_+^*$
Unité S.I. : [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] qui se lit « Joule par kg et par Kelvin »
Pour notre cours : [$J \cdot kg^{-1} \cdot °C^{-1}$] qui se lit « Joule par kg et par degré Celsius ».
Les valeurs sont les mêmes dans les deux unités, car une différence de température de $1K$ est égale à une différence de $1°C$

Reprenons l'exemple précédent de l'eau et de l'huile. On trouve dans le « Formulaires et Tables »
$c_{eau} = 4180\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ *et sur d'autres sources* $c_{huile} \simeq 2000\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ *(cela dépend du type et de la qualité de l'huile).*
Cela signifie qu'il faut 4180 J pour élever 1kg d'eau d'un degré Celsius contre seulement 2000 J pour de l'huile. L'eau est deux fois plus difficile à chauffer que l'huile.

Les constatations de la page précédente sont formalisées dans la relation suivante :

$$\underset{\substack{fournie\ ou \\ retirée}}{\boldsymbol{E_{thermique}}} = \boldsymbol{m \cdot c \cdot \underbrace{(T_f - T_i)}_{\Delta T}}$$

$E_{thermique}$	:	Chaleur ou énergie thermique [J] à fournir ou retirer
m	:	Masse du corps pur [kg]
c	:	Chaleur massique du corps pur [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] ou [$J \cdot kg^{-1} \cdot °C^{-1}$]
T_f	:	Température finale du corps pur (après l'échange de chaleur) [K] ou [°C]
T_i	:	Température initiale du corps pur (avant l'échange de chaleur) [K] ou [°C]
ΔT	:	Variation de température du corps pur [K] ou [°C]

Analysons deux cas :

1. $\boldsymbol{T_f > T_i}$ **:** cela signifie que la température du corps a <u>augmenté</u> et $\Delta T = T_f - T_i > 0$; on en déduit que $E_{thermique} = m\ c\ \Delta T > 0$, car la masse et la chaleur sont positives.
2. $\boldsymbol{T_f < T_i}$ **:** cela signifie que la température du corps a <u>baissé</u> et $\Delta T = T_f - T_i < 0$; on en déduit que $E_{thermique} = m\ c\ \Delta T < 0$, car la masse et la chaleur sont positives, mais $\Delta T < 0$.

Cela nous permet de fixer la convention de signes :

$E_{thermique} > 0$: la chaleur est reçue par le corps pur et sa température augmente.
$E_{thermique} < 0$: la chaleur est cédée par le corps pur et sa température diminue.

Illustrons l'utilisation de cette formule à l'aide de deux exercices résolus :

1. Quelle était la température initiale d'un litre et demi d'eau à laquelle on a apporté 438'900 J pour atteindre une température de 92°C ?

Données : $E_{thermique} = 438'900\ J$; $m_{eau} = 1{,}5kg$; $T_f = 92°C$; $T_i = ?$
Remarque importante : *la masse est 1,5kg car il s'agit de l'eau. Pour toute autre matière, 1,5 l n'a pas une masse de 1,5kg (Explication au point suivant).*

$$\begin{aligned} E_{thermique} &= m_{eau} \cdot c_{eau} \cdot (T_f - \boldsymbol{T_i}) && |\text{Toujours partir d'une formule littérale} \\ 438'900 &= 1{,}5 \cdot 4180 \cdot (92 - \boldsymbol{T_i}) && | \div (1{,}5 \cdot 4180) \\ 70 &= 92 - \boldsymbol{T_i} && | + \boldsymbol{T_i} - 70 \\ \boldsymbol{T_i} &= 22°C \end{aligned}$$

Réponse : la température initiale était de 22°C.

2. Quelle est la chaleur massique d'un alliage, sachant que si deux kilogrammes de celui-ci reçoit 45'000J, sa température augmente de 50K ?

Données : $E_{thermique} = 45'000J$; $m_{alliage} = 2kg$; $\Delta T_{alliage} = 50K$

$$\begin{aligned} E_{thermique} &= m_{alliage} \cdot \boldsymbol{c_{alliage}} \cdot \Delta T_{alliage} && |Substitution \\ 45'000 &= 2 \cdot \boldsymbol{c_{alliage}} \cdot 50 && |Simplification \\ 45'000 &= 100 \cdot \boldsymbol{c_{alliage}} && | \div 100 \\ \boldsymbol{c_{alliage}} &= 450 \frac{J}{kg \cdot K} \end{aligned}$$

Réponse : la chaleur massique de l'alliage est $450 \frac{J}{kg \cdot K}$

2.4.1.1 Masse, Volume et Masse volumique

: dans la formule $E_{thermique} = m\ c\ \Delta T$ apparaît la <u>**masse**</u>. Or il arrive souvent que le volume du corps pur soit donné et non sa masse. Le volume n'est pas la masse, mais le connaissant, il est possible de la calculer.

Cas particulier de l'eau : 1 litre d'eau pèse pratiquement 1kg. Donc pour trouver la masse d'eau à partir de son volume, il suffit de l'exprimer en litre, puis en kg.

Pour tous les autres corps : la notion de masse volumique, notée ρ, permet de faire le lien entre masse et volume. La masse volumique est la masse de 1 m^3 du corps. On a donc la formule suivante : $\rho = \frac{m}{V}$. C'est une caractéristique des corps purs et on trouve sa valeur dans le « Formulaires et Tables ».
Comment utiliser cette formule pour retrouver la masse à partir du volume ? Réponse à travers l'exercice résolu suivant :

Quelle est la masse de 2,5 dl de glycérine ?

***Méthode 1** : on inverse la formule de la masse volumique en la considérant comme une équation :*

$$\begin{aligned}
\rho &= \frac{m}{V} && |\cdot V \\
m &= \rho\, V && |\text{Substitue par les valeurs :}\rho_{glycérine} = 1260\ kg\cdot m^{-3} \\
&= 1260\,\frac{kg}{m^3}\cdot 2{,}5\ dl && |\text{Les unités ne correspondent pas : } m^3 \neq dl \\
&= 1260\,\frac{kg}{m^3}\cdot 0{,}000'25 m^3 && |\text{Les unités de volumes se simplifient} \\
&= 0{,}315\ kg && |\text{Ce qui paraît plausible (2,5 dl} \simeq \text{1 verre de sirop)}
\end{aligned}$$

***Méthode 2** : on utilise le fait que* $1\ kg\cdot m^{-3} = 1\ \frac{kg}{m^3} = 1\ \frac{g}{l}$*. On travaille alors en litres et en grammes, tout en se souvenant que <u>la masse devra être exprimée en kg</u>.*

	Masse volumique	Donnée problème
Masse $[g]$	1260	$\mathbf{?: 0{,}25\cdot 1260 = 315}$
Volume $[l]$	1	0,25

D'où la masse : $m = 315\ g = 0{,}315\ kg$

2.4.1.2 Calorimètre

La formule précédemment établie est valable pour une matière donnée par exemple de l'eau ou du fer ou de l'air… Lorsqu'on réalise un transfert d'énergie entre deux liquides (le liquides dont la température est la plus élevée chauffe l'autre liquide et se refroidit lui-même), on a besoin d'un récipient qui lui-même va recevoir ou donner de l'énergie. Le but de ce récipient est d'isoler au mieux les liquides de l'extérieur, ce sera une sorte de thermos qu'on appelle <u>calorimètre</u>. Il est souvent conçu de telle sorte qu'on puisse mesurer les températures à l'intérieur et peser les liquides. Par contre, on ne peut pas lui attribuer de chaleur massique, car il est composé de différentes matières, souvent inconnues. Pour tenir compte du calorimètre dans le procédé d'échange de chaleur, on a défini :

La **capacité calorifique**, notée µ (mu), est la capacité d'un objet à s'opposer aux variations de température. Sa valeur est l'énergie qu'il faut apporter pour le faire augmenter de 1K.
✋ : $\mu \in \mathbb{R}_+^*$
Unité S.I. : [$J\cdot K^{-1}$] qui se lit « Joule par Kelvin » ; ou pour notre cours [$J\cdot °C^{-1}$]

On a la relation :

$$\boldsymbol{E_{thermique} = \mu\cdot \underbrace{(T_f - T_i)}_{\Delta T}}$$

$E_{thermique}$	:	Chaleur ou énergie thermique [J] à fournir ou retirer
μ	:	Capacité calorifique du calorimètre [$J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$] ou [$J\cdot kg^{-1}\cdot °C^{-1}$]
T_f	:	Température finale du corps pur (après l'échange de chaleur) [K] ou [°C]
T_i	:	Température initiale du corps pur (avant l'échange de chaleur) [K] ou [°C]
ΔT	:	Variation de température du corps pur [K] ou [°C]

2.4.2 Energie et fusion/solidification

Sous l'effet de la chaleur, un corps change de température selon la loi $E_{thermique} = c \cdot m \cdot \Delta T$. Cette loi n'est cependant valable que pour un état donné de la matière, par exemple pour l'état solide pour un morceau de cuivre. D'un autre côté, un corps solide qui reçoit suffisamment de chaleur va fondre, c'est la fusion. Que se passe-t-il au niveau énergétique lors de ce changement de matière ?

> *L'expérience (Cf. courbe de température de l'eau étudiée précédemment) montre qui si l'on chauffe de la glace sortant d'un congélateur à* $-18°C$*, celle-ci augmentera sa température selon la règle* $E = m \cdot c_{glace} \cdot \Delta T$*, jusqu'à 0°C. A cette température se forme un mélange d'eau et de glace.* ***La température ne varie plus tant que subsiste de la glace, malgré l'apport extérieur de chaleur.***
>
> *Comment l'expliquer à l'aide du modèle microscopique ?*
> *Pour passer de l'état solide à liquide, il faut casser les « liaisons » qui relient les atomes ou molécules entre eux. Toute l'énergie thermique est mobilisée à cet effet.*

Deux questions pour amener la formule liant la chaleur et la fusion :

> 1. *Si on dispose de deux blocs de glace à 0°C, de masse différente, auquel des deux blocs faut-il amener le plus de chaleur pour le fondre ?*
>   *Evidemment pour le bloc dont la masse est la plus grande. Intuitivement, on sent que cette chaleur doit être proportionnelle à la masse de la glace.*
> 2. *Faut-il plus de chaleur pour fondre 1kg de glace à 0°C ou 1kg de fer à* $T_{fusion \rightarrow fer} = 1538°C$ *?*
>   *Aussi surprenant que cela paraisse, le fer est plus facile à fondre que la glace ! En effet, il faudra 330'000 J pour fondre 1 kg de glace à 0°C, contre seulement 247'000 J pour 1 kg de fer à 1538°C.*
>   *(On ne tient pas compte de l'énergie nécessaire pour amener le fer de la température ambiante à 1538°C).*
>   *Cela signifie que l'énergie nécessaire pour fondre la matière dépend de la nature de cette matière.*

On introduit :

> La **chaleur latente de fusion,** notée $\boldsymbol{L_F}$, est l'énergie par unité de masse nécessaire à la fusion d'un corps.
> Unité : [J/kg]

De cette définition s'ensuivent les formules suivantes :

> $$\boldsymbol{E_{fusion} = m \cdot L_F}$$
>
> E_{fusion} : Chaleur ou énergie thermique [J] à fournir pour fondre la matière,
> m : Masse de la matière à fondre [kg] ,
> L_F : Chaleur latente de fusion [J/kg].

Comme mentionné précédemment, la courbe de température serait la même si on refroidissait la matière. Donc, en retirant une chaleur égale à $m \cdot L_F$, à un liquide à température de fusion, ce dernier se solidifierait. Par convention, nous avions déjà vu que l'énergie retirée est négative, on en déduit :

> $$\boldsymbol{E_{solidification} = -\, m \cdot L_F}$$
>
> $E_{solidification}$: Chaleur ou énergie thermique [J] à retirer pour solidifier la matière,
> m : Masse de la matière à solidifier [kg],
> L_F : Chaleur latente de fusion [J/kg].

Illustrons l'emploi de ces formules :

> ***Quelle énergie est dégagée lors de la solidification de 4 l de glycérine à*** $\boldsymbol{T_F}$ ***?***
>
> *Données :* $V_{glycérine} = 4\ l = 0{,}004\ m^3, T_i = T_{fusion}$*, état initial : solide*

$$\begin{aligned} \boldsymbol{E_{solidification}} &= -m_{glycérine} \cdot L_F & &|Substitution \\ &= -5{,}04 \cdot 2 \cdot 10^5 & &car\ \rho_g = \frac{m_g}{V_g} \Rightarrow m_g = \rho_g \cdot V_g = 1260 \cdot 0{,}004 = 5{,}04kg \\ &\cong -10 \cdot 10^5\,J \end{aligned}$$

Réponse : Lors de la solidification de 4l de glycérine, il se dégagera environ $10^6 J$. *(Remarque : le signe moins dans le calcul indique que cette énergie est perdue par la glycérine, qu'elle se dégage de la glycérine. Il ne faut pas la mettre dans cette réponse, car le verbe utilisé est « se dégager » qui remplace le moins…)*

2.4.3 Energie et vaporisation/liquéfaction

De même qu'un solide fond s'il reçoit suffisamment de chaleur, si un liquide est assez chauffé, il se vaporisera après avoir atteint sa température d'ébullition.
Que se passe-t-il au niveau énergétique lors de ce changement de matière ?

L'expérience (Cf. courbe de température de l'eau étudiée précédemment) montre qui si l'on chauffe de l'eau, celle-ci augmentera sa température selon la règle $E = m \cdot c_{eau} \cdot \Delta T$, *jusqu'à 100°C. A cette température se forme un mélange d'eau et de vapeur d'eau (qui s'échappe si le système n'est pas fermé).* ***La température ne varie plus tant que subsiste de l'eau, malgré l'apport extérieur de chaleur.***
Comment l'expliquer à l'aide du modèle microscopique ?
Pour passer de l'état liquide à gazeux, il faut « éjecter les atomes ou molécules » du reste du liquide. Lorsque le corps arrive à sa température d'ébullition, les atomes ou molécules ne peuvent plus « vibrer » davantage, car « ils sont compressés » par leurs voisins, un liquide étant dense. Toute l'énergie thermique est alors mobilisée dans les atomes ou molécules de la surface libre, si bien qu'en augmentant leur vitesse et leur amplitude de mouvement, ils sont éjectés du reste du liquide par collision avec les voisins situés plus à l'intérieur du liquide.

Deux questions pour amener la formule liant la chaleur et l'ébullition :

1. *Si on dispose de deux quantités d'eau différentes à 100°C, auquel de ces deux liquides faut-il amener le plus de chaleur pour le vaporiser ?*
   Evidemment pour le liquide dont la masse est la plus grande. Intuitivement, on sent que cette chaleur doit être proportionnelle à la masse de l'eau.
2. *Faut-il plus de chaleur pour vaporiser 1kg d'eau à 100°C ou 1kg de fer à* $T_{ébullition \to fer} = 2861°C$ *?*
   Cette fois, c'est le fer qui est plus difficile à vaporiser ! En effet, il faudra 2'300'000 J pour vaporiser 1 kg d'eau à 100°C, contre 6'310'000 J pour 1 kg de fer à 2861°C. (De plus, on ne tient pas compte de l'énergie nécessaire pour amener le fer à 2861°C).
   Cela signifie que l'énergie nécessaire pour fondre la matière dépend de la nature de cette matière.

Par analogie au point précédent concernant la fusion :

La **chaleur latente de vaporisation,** notée $\boldsymbol{L_V}$, est l'énergie par unité de masse nécessaire à la vaporisation d'un corps. Unité : [J/kg]

$$\boldsymbol{E_{vaporisation} = m \cdot L_V}$$

$E_{vaporisation}$	:	Chaleur ou énergie thermique [J] à fournir pour vaporiser la matière,
m	:	Masse de la matière à vaporiser [kg] ,
L_V	:	Chaleur latente de vaporisation [J/kg].

Comme mentionné précédemment, la courbe de température serait la même si on refroidissait la matière. Donc, en retirant une chaleur égale à $m \cdot L_V$, à un gaz à température de liquéfaction, ce dernier se liquéfierait. Par convention, nous avions déjà vu que l'énergie retirée est négative, on en déduit :

$$\boldsymbol{E_{liquéfaction} = -m \cdot L_V}$$

$E_{liquéfaction}$	:	Chaleur ou énergie thermique [J] à retirer pour liquéfier le gaz,
m	:	Masse du gaz à liquéfier [kg],
L_V	:	Chaleur latente de vaporisation [J/kg].

Illustrons l'emploi de ces formules :

3l d'eau ont été chauffés à T_E. Depuis le moment où l'eau atteint T_E, quelle chaleur faut-il encore apporter pour que l'eau soit entièrement vaporisée ?
Données : $m_{eau} = 3kg$; $T_i = T_{ébullition} = 100°C$

$$\begin{aligned} E_{vaporisation} &= m \cdot L_V && |Substitution \\ &= 3 \cdot 2'300'000 && |Substitution \\ &= 6'900'000\,J \end{aligned}$$

2.5 Système thermodynamique à plusieurs corps

Jusqu'à présent, nous nous sommes intéressés qu'à un seul corps qu'on chauffe ou refroidit, sans jamais s'interroger sur la chaleur fournie/retirée.

Comment peut-on chauffer de l'eau ? ou formulé autrement : d'où vient la chaleur qui chauffe de l'eau ?
On étudiera deux cas différents :

1. *On plonge dans l'eau, un bloc dont la température est supérieure à celle de l'eau. Les températures vont s'équilibrer après un certain temps, si bien que l'eau verra sa température monter et le bloc baissera de température.*
   Comment l'expliquer à l'aide du modèle microscopique ?
   Le bloc étant plus chaud que l'eau, ses particules sont plus agitées que celles de l'eau. A la surface de contact, l'agitation des particules du bloc va être transférée par collision à celles de l'eau. Puis, toujours par collision, les différentes molécules d'eau vont être davantage « agitées ». Les particules du bloc verront par contre leur agitation diminuer lors de ces collisions. Finalement la température de l'eau monte et celle du bloc diminue. Ce mode de propagation de la chaleur s'appelle ***la conduction****.*
2. *On utilise un appareil de chauffage qui transformera une forme d'énergie en une autre (souvent de la chaleur).*
   a. *Un plaque électrique transforme l'énergie électrique en chaleur qui est ensuite propagée par conduction. Un microonde transforme l'énergie électrique en énergie rayonnante, qui traverse l'eau et fait vibrer par résonnance les molécules.*
   b. *Un appareil à combustion (réchaud à gaz) consiste à brûler un combustible, ce qui transforme de l'énergie chimique en chaleur qui est ensuite propagée par conduction.*

On pourrait croire que le bloc joue le rôle d'un appareil de chauffage, mais en fait ce n'est pas le cas : le bloc ne transforme pas une forme d'énergie en une autre, mais utilise sa propre chaleur. Coupons l'électricité et essayons de chauffer l'eau avec une plaque électrique ou un microonde… ils ne vont pas pouvoir utiliser leur propre chaleur !
En fait, on dira que le bloc fait partie du système thermique, tout comme l'eau.

2.5.1 Système thermodynamique isolé

Un système thermodynamique est dit **isolé**, s'il n'y a aucun échange d'énergie avec l'extérieur du système.

Dans un système isolé, pour qu'un corps change de température, il devra être en contact avec d'autre(s) corps à températures différentes.

Le principe de conservation de l'énergie : « Rien ne se crée, rien ne se perd. Tout se transforme. » permet d'affirmer que les corps les plus chauds vont céder de la chaleur au profit des corps les plus froids et que globalement un système thermodynamique ne varie pas sa quantité de chaleur :

$$\underbrace{E_{reçues}}_{\substack{\text{certains corps}\\ \text{recoivent de}\\ \text{l'énergie, leur}\\ \text{température}\\ \text{augmente}}} + \underbrace{E_{cédées}}_{\substack{\text{certains corps}\\ \text{perdent de}\\ \text{l'énergie, leur}\\ \text{température}\\ \text{baisse}}} = \underbrace{0}_{\substack{\text{Globalement}\\ \text{Ce qui est "reçu"}\\ \text{est exactement}\\ \text{compensé par}\\ \text{ce qui est perdu}}}$$ avec la convention $E_{reçues} > 0$ et $E_{cédées} < 0$

Après l'échange de chaleur, tous les corps atteignent la même température : **la température d'équilibre.**

Remarque : souvent, on ne précise pas si l'énergie est reçue ou cédée par un corps, et ce pour deux raisons :

1. C'est plus rapide de ne pas le préciser, par contre, on a tendance à oublier qu'il s'agit bien d'un échange d'énergie
2. Dès qu'il y a trois corps, il est difficile de savoir pour tous les corps s'ils vont gagner ou perdre de la chaleur.

Illustrons la théorie par deux exercices résolus, complets, le premier sans changement d'état de la matière et le second avec changement d'état de la matière

1. On mélange 200g d'eau à 90°C et 0,1kg de cuivre à -35°C dans un calorimètre dont la capacité calorifique vaut 200 $J \cdot K^{-1}$ et dont la température avant le mélange était de 22°C. Quelle est la température d'équilibre ?

Données :

$m_{eau} = 0{,}2kg; T_{i\to eau} = 90°C; m_{cu} = 0{,}1kg;\ T_{i\to cu} = -35°C; \mu_{cal} = 200J \cdot K^{-1}; T_{i\to cal} = 22°C$

Attention aux unités ! Les masses sont en kg !

Pour cet exercice, on aurait pu éventuellement se demander si l'eau pouvait geler et par conséquent il y aurait eu un changement d'état de la matière. Cependant la chaleur massique de l'eau est plus de dix fois supérieure à celle du cuivre. Cela signifie que l'eau est plus de 10 fois plus difficile que le cuivre à changer sa température, de plus il y a le double de masse d'eau que de cuivre…

Méthode : on additionne les énergies échangées de chaque corps, et on pose = 0, car le système est isolé (pas d'appareil de chauffage).

$$\begin{array}{rcll}
E_{eau} + E_{cu} + E_{cal} & = & 0 & |Substitution \\
m_{eau}c_{eau}(\boldsymbol{T_f} - T_{i\to eau}) + m_{cu}c_{cu}(\boldsymbol{T_f} - T_{i\to cu}) + \mu_{cal}(\boldsymbol{T_f} - T_{i\to cal}) & = & 0 & |Substitution \\
0{,}2 \cdot 4180 \cdot (\boldsymbol{T_f} - 90) + 0{,}1 \cdot 390\left(\boldsymbol{T_f} - (-35)\right) + 200(\boldsymbol{T_f} - 22) & = & 0 & |Simplification \\
836\boldsymbol{T_f} - 75'240 + 39\boldsymbol{T_f} + 1365 + 200\boldsymbol{T_f} - 4400 & = & 0 & | + 78'275 \\
1075\boldsymbol{T_f} & = & 78'275 & | \div 1075 \\
\boldsymbol{T_f} & \cong & 73°C & |
\end{array}$$

Réponse : La température d'équilibre est environ 73°C

2. Quelle masse d'acier à 400°C faut-il ajouter à un mélange eau(4dl à 0°C)+glace(100g à 0°C) pour vaporiser les 4/5 de l'eau totale ?

Méthode : pour chaque corps, décrire l'évolution de sa température et de son état de la matière.

Considérons 2 corps (eau et glace sont de même nature) :

Acier : $\genfrac{}{}{0pt}{}{S}{400°C} \to \genfrac{}{}{0pt}{}{S}{100°C}$*, on sait que* $T_f = 100°C$*, car seuls les 4/5 de l'eau sont vaporisés.*

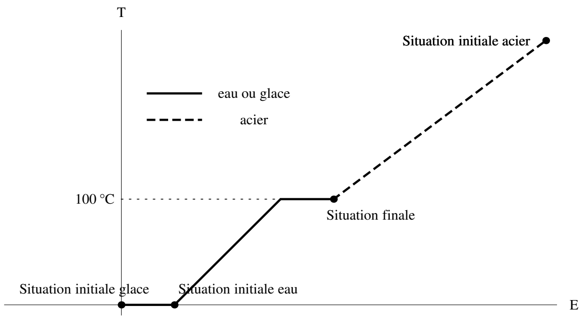
Eau : $\genfrac{}{}{0pt}{}{S}{0°C} \to \genfrac{}{}{0pt}{}{L}{0°C} \to \genfrac{}{}{0pt}{}{L}{100°C} \to \genfrac{}{}{0pt}{}{G}{100°C}$

Pour établir les schémas fléchés ci-dessus, il faut respecter les règles suivantes :

1. *A chaque flèche, <u>une</u> des deux lignes exactement change : soit l'état de la matière, soit la température.*
2. *Les changements d'état de la matière s'effectuent soit à la température de fusion, soit à celle d'ébullition.*
3. *La dernière température est identique pour tous les corps, c'est la température d'équilibre.*

Chaque flèche du schéma correspond à une des formules d'échange d'énergie étudiées précédemment. On additionnera chaque formule et on posera le tout = 0 : le système est isolé (pas de chauffage extérieur).

Attention, il y a seulement $m_{glace} = 0{,}1kg$ à fondre, puis $m_{eau} = 0{,}5kg$ (4dl+100g) est à chauffer jusqu'à 100°C, et enfin, seule $m_{vaporisée} = 4/5 \cdot 0{,}5 = 0{,}4kg$ d'eau est à vaporiser.
On peut également représenter graphiquement la situation :



$$\begin{array}{llllcc}
E_{fusion} & + E_{eau\to 100°C} & + E_{vaporisation} & + E_{acier\to 100°C} & = & 0 \\
m_{glace}\cdot L_F & + m_{eau}\cdot c_{eau}\cdot \Delta T_{eau} & + m_{vaporisée}\cdot L_V & + \boldsymbol{m_{acier}}\cdot c_{acier}\cdot \Delta T_{acier} & = & 0 \\
\multicolumn{3}{l}{\underbrace{0{,}1\cdot 330'000 \quad + 0{,}5\cdot 4180\cdot 100 \quad + 0{,}4\cdot 2'300'000}_{1'162'000}} & + \boldsymbol{m_{acier}}\cdot \underbrace{460(100-400)}_{-138'000} & = & 0 \\
 & & & 1'162'000 & = & 138'000\boldsymbol{m_{acier}} \\
 & & & \dfrac{1'162'000}{138'000} & = & \boldsymbol{m_{acier}} \\
 & & & 8{,}42\ kg & \simeq & \boldsymbol{m_{acier}}
\end{array}$$

Il faudra donc environ 8,40 kg d'acier.

2.5.2 Système thermodynamique avec apport extérieur d'énergie

Un système thermodynamique n'est pas isolé lorsqu'une source d'énergie extérieure au système lui fournit de la chaleur. Cette chaleur provient d'une transformation d'une forme d'énergie en chaleur. Nous étudierons les transformations, par combustion, d'énergie chimique en chaleur et d'énergie électrique en chaleur. Nous n'étudierons pas les systèmes de refroidissement comme les réfrigérateurs ou les climatisations.

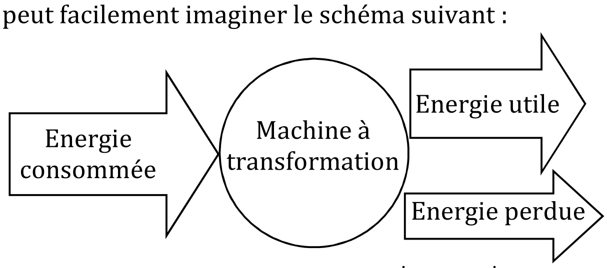
Dans tous les cas, la chaleur est fournie par un appareil, qu'on appelle en physique une machine. Dans un premier temps, nous étudierons les principes énergétiques des machines, puis plus spécialement celles consommant de l'énergie chimique ou électrique.

2.5.2.1 Machine et rendement

Comme mentionné en tout début de chapitre, l'énergie n'est palpable qu'à travers une transformation. Elle ne peut apparaître de nulle part et ne peut pas disparaître ; c'est :

Le principe de conservation de l'énergie :
Rien ne se crée, rien ne se perd. Tout se transforme.

A partir de ce principe, on peut facilement imaginer le schéma suivant :



$$|E_{consommée}| = |E_{utile}| + |E_{perdue}|$$

Toute machine ou transformation fonctionne grâce à de l'énergie qui sera transformée durant un processus en une énergie désirée, l'énergie utile. Au cours de cette transformation, une partie de l'énergie reçue se transforme en une forme d'énergie non désirée, elle est perdue. La machine parfaite serait atteinte si l'énergie perdue était nulle.
Dans le cas d'un appareil de chauffage, l'énergie utile est la chaleur.

Pour déterminer l'efficacité d'un processus de transformation d'énergie ou d'une machine, on définit :

Le **rendement**, noté η, comme le rapport de l'énergie utile produite par la machine à l'énergie consommée par cette machine :

$$\eta = \frac{E_{utile}}{E_{consommée}}$$

Unité : le rendement **n'a pas d'unité** ($[\,\eta\,] = \frac{[E_{utile}]}{[E_{consommée}]} = \frac{[\,J\,]}{[\,J\,]}$: les unités s'annulent)
Remarque 1 : $0 \leq \eta < 1$, lorsque $\eta = 0$, aucune énergie utile n'est produite, la machine ne marche pas. Si η valait 1, l'énergie reçue serait entièrement transformée en énergie utile, ce serait la machine parfaite (qui n'existe pas).
Remarque 2 : on exprime souvent le rendement η sous forme de pourcentage. Exemple : $\eta = 0{,}3$ ou $\eta = 30\%$ sont équivalents.

: % n'est pas une unité, c'est une façon différente du code décimal de noter un nombre, au même titre qu'une fraction ou qu'une notation scientifique. Exemple : $0{,}5 = 50\% = 1/2 = 5 \cdot 10^{-1}$ sont autant de manière différente d'écrire un même nombre et il n'y a pas d'unité !

Illustrons l'emploi du rendement

Un chauffage électrique a consommé une énergie de 24'000J. Son rendement étant estimé à 60%, quelle chaleur a été produite ?
La chaleur est l'énergie utile car le but d'un chauffage est de produire de la chaleur.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\boldsymbol{E_{utile}}}{E_{consommée}} \qquad | \cdot E_{consommée} \\ \boldsymbol{E_{utile}} &= \eta \cdot E_{consommée} \\ &= 0{,}6 \cdot 24'000 \\ &= 14'400\, J \end{aligned}$$

On obtient une relation importante pour les « chauffages » :

On considère une machine dont le but est de produire de la chaleur :

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\boldsymbol{E_{thermique}}}{E_{consommée}} \qquad | \cdot E_{consommée} \\ \boldsymbol{E_{thermique}} &= \eta \cdot E_{consommée} \end{aligned}$$

L'énergie thermique, celle qui servira à chauffer le système thermique, est le produit du rendement de la machine par l'énergie consommée par cette machine.

Il faut donc déterminer l'énergie consommée pour les deux types machines que l'on veut étudier : les appareils à combustion et les appareils électriques.

2.5.2.2 Energie chimique transformée en chaleur

La combustion est une réaction chimique qui dégage de la chaleur.

On dispose de deux réchauds à gaz butane. La quantité de gaz butane n'est pas la même dans les deux bonbonnes. Lequel des deux réchauds doit-on utiliser si l'on veut produire un maximum de chaleur ?

Il est évident que plus on a de combustible (ce qui est brûlé), plus on obtiendra de chaleur.
Intuitivement, on devine que l'énergie dégagée par une combustion est proportionnelle à la quantité de matière brûlée.
Obtient-on plus de chaleur en brûlant 1kg de bougie ou 1kg de bois ?
A nouveau un résultat surprenant : la bougie dégage plus de chaleur que le bois par combustion (32 MJ contre 16 MJ). Par contre, pour brûler 1kg de bougie, il faudra être patient et l'énergie dégagée sera grandement perdue : le système aura le temps de se refroidir au contact de l'air…

On définit donc :

Le **pouvoir calorifique**, noté H, est la capacité d'un combustible à dégager de la chaleur.
Sa valeur correspond à l'énergie dégagée la combustion de 1kg de matière.
Unité S.I. : $[J \cdot kg^{-1}]$

On obtient la relation suivante :

$$\boldsymbol{E_{combustion} = m_{brûlée} \cdot H}$$

$E_{combustion}$	:	Energie chimique dégagée par combustion [J]
$m_{brûlée}$	:	Masse brûlée [kg]
H	:	Pouvoir calorifique $[J \cdot kg^{-1}]$

En tenant compte du rendement lors de la transformation de l'énergie chimique en chaleur et sachant que l'énergie consommée est l'énergie de combustion, l'énergie utile est la chaleur, on obtient :

$$\eta = \frac{E_{utile}}{E_{consommée}} = \frac{E_{thermique}}{E_{combustion}}$$

d'où

$$\begin{aligned} \mathbf{E_{thermique}} &= \eta \cdot E_{combustion} && |Substitution \\ &= \boldsymbol{\eta \cdot m_{brûlée} \cdot H} \end{aligned}$$

Illustrons par deux exercices résolus, le second étant très complet.

Pour chauffer un appartement de 100m² durant une année, on a utilisé une énergie de 88GJ. Détermine :

1. La masse de mazout consommée

Données : $E_{combustion} = 88GJ = 88 \cdot 10^9 J$

$$\begin{aligned} E_{combustion} &= \boldsymbol{m_{brûlée}} \cdot H_{mazout} && | \div H_{mazout} \\ \boldsymbol{m_{brûlée}} &= \frac{E_{combustion}}{H_{mazout}} && |Substitution \\ &= \frac{88 \cdot 10^9}{42 \cdot 10^6} \\ &\cong 2095\ kg \end{aligned}$$

Remarque : le mazout s'appelle également : diesel, huile de chauffage.

Réponse : La masse brûlée de mazout est d'environ 2095 kg.

2. Le volume de mazout que cela représente.

$$\begin{aligned} \rho_{mazout} &= \frac{m_{mazout}}{\boldsymbol{V_{mazout}}} && | \cdot \boldsymbol{V_{mazout}} \div \rho_{mazout} \\ \boldsymbol{V_{mazout}} &= \frac{m_{mazout}}{\rho_{mazout}} && |Substitution \\ &= \frac{2095}{840} \\ &\cong 2{,}49\ m^3 \end{aligned}$$

Réponse : 2095 kg de mazout représente $2{,}49\ m^3$ *de mazout.*

On réalise un dessert particulier, en plongeant un bloc cubique d'éthanol de 2cm d'arête, dont la température est de $-114,1°C$, dans 2dl de jus d'orange à 5°C et on chauffe le tout jusqu'à 50°C à l'aide d'un réchaud à gaz butane de 30% de rendement. Ensuite, on verse le liquide sur une boule de glace vanille à $-12°C$ et de 6 cm de diamètre. Quelle masse de gaz a été utilisée ? *On suppose que* $\rho_{ethanol,l} = \rho_{ethanol,s}$

Méthode :

1. ***Combien de corps composent le système thermodynamique ? Quelles données dispose-t-on à leur propos ?***
   Deux corps (jus d'orange, qu'on assimilera à de l'eau, et éthanol). La glace vanille ne fait pas partie du système qui nous intéresse, car on lui verse le liquide déjà chauffé …
   Jus d'orange : $T_i = 5°C$, *liquide ;* $T_f = 50°C$, *liquide*
   Ethanol : $T_i = -114,1°C$, *solide (bloc) ;* $T_f = 50°C > T_{fusion}$, *liquide*

2. ***Etablir le schéma fléché pour le système thermodynamique :***

   Jus d'orange : $\underset{5°C}{L} \xrightarrow{\Delta T_j = 50-5 = 45°C} \underset{50°C}{L}$

   Ethanol : $\underset{-114,1°C}{S} \rightarrow \underset{-114,1°C}{L} \xrightarrow{\Delta T_e = 50-(-114,1) = 164,1°C} \underset{50°C}{L}$

3. ***Le système est-il isolé ? chauffé avec un appareil combustion (combustible, rendement ?) ? chauffé avec un appareil électrique (puissance, rendement ?) ?***
   Appareil à combustion : $E_{thermique} = \eta \cdot m_{\text{brûlée}} \cdot H_{butane}$, $\eta = 0,3$ *et* $m_{\text{brûlée}} = ?$

4. ***Poser l'équation :***
   « Energies échangée dans le système thermodynamique = Energies fournies par le(les) appareil(s) »

$$E_{fusion \to Ethanol} + E_{\substack{Ethanol \\ -114,1°C \to 50°C}} + E_{\substack{Jus\ d'orange \\ 5°C \to 50°C}} = E_{\substack{thermique \\ réchaud\ à\ gaz}}$$

$$m_e \cdot L_{F \to e} + m_e \cdot c_e \cdot \Delta T_e + m_j \cdot c_j \cdot \Delta T_j = \eta \cdot \boldsymbol{m}_{\textbf{brûlée}} \cdot H_{butane}$$

5. ***Résoudre l'équation obtenue.***

$$m_e \cdot L_{F \to e} + m_e \cdot c_e \cdot \Delta T_e + m_j \cdot c_j \cdot \Delta T_j = \eta \cdot \boldsymbol{m}_{\textbf{brûlée}} \cdot H_{butane} \quad | \div (\eta \cdot H_{butane})$$

$$\frac{m_e \cdot L_{F \to e} + m_e \cdot c_e \cdot \Delta T_e + m_j \cdot c_j \cdot \Delta T_j}{\eta \cdot H_{butane}} = \boldsymbol{m}_{\textbf{brûlée}} \quad | \ m_e \text{ ci-dessous}$$

$$\frac{0,00632 \cdot 109000 + 0,00632 \cdot 2460 \cdot 164,1 + 0,2 \cdot 4180 \cdot 45}{0,3 \cdot 45,6 \cdot 10^6} = \boldsymbol{m}_{\textbf{brûlée}}$$

$$0,00298\ kg \simeq \boldsymbol{m}_{\textbf{brûlée}}$$

$$3\ g \simeq \boldsymbol{m}_{\textbf{brûlée}}$$

Il faut brûler environ 3 g de gaz butane.

Calcul de la masse d'éthanol :
$V_e = 2^3 = 8\ cm^3$ *et* $\frac{m_e}{V_e} \Rightarrow m_e = \rho_e V_e = 790 \frac{kg}{m^3} \cdot 8cm^3 = 790 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,000'008m^3 = 0,00632kg$

2.5.2.3 Energie électrique transformée en chaleur

Les machines sont décrites par leur puissance : on parle de la puissance d'une voiture, d'un ordinateur ou d'une ampoule électrique par exemples. Mais qu'est-ce la puissance ?

La **puissance**, notée P, est la rapidité avec laquelle une machine consomme une forme d'énergie, on l'appelle également **puissance consommée.** Sa valeur correspond à l'énergie consommée en 1s.
La **puissance utile**, notée P_{utile}, est la rapidité avec laquelle une machine produit de l'énergie utile.
Sa valeur correspond à l'énergie utile produite en 1s.
Unité S.I. : le **watt** [W] ou [$J \cdot s^{-1}$]

✋ : Sans précision, lorsqu'on mentionne la puissance d'un appareil, il s'agit de puissance consommée maximale.

Que signifie un microonde de 900W ou une bouilloire électrique de 800W ? Le microonde chauffe-t-il réellement plus rapidement que la bouilloire ?
1ère question : un microonde de 900W signifie que chaque seconde d'utilisation, il consommera une énergie électrique de 900 J. Pour la bouilloire, à chaque seconde d'utilisation, elle consommera une énergie électrique de 800 J.
2e question : la puissance consommée seule ne permet absolument pas de dire lequel des deux appareils est le plus efficace pour chauffer. Cela dépend également du rendement : à rendements égaux, le microonde sera plus rapide pour chauffer que la bouilloire. Par contre si par exemple le rendement de bouilloire est le double de celui du microonde, elle sera largement plus rapide que le microonde…
Autre exemple : une Ferrari dernier modèle est très certainement plus puissance qu'une 2 Chevaux. Supposons maintenant qu'on pousse les deux moteurs à fond et que la Ferrari soit au point neutre, quelle voiture accélérera le mieux ? Evidemment la 2 Chevaux puisque la Ferrari ne bougera pas…

On a la relation suivante :

$\boldsymbol{E_{\text{consommée}} = P \cdot t}$ ou $\boldsymbol{E_{\text{consommée}} = P_{\text{consommée}} \cdot t}$

$E_{\text{consommée}}$	:	énergie consommée [J]
P	:	puissance [W]
t	:	durée d'utilisation [s]

En tenant compte du rendement lors de la transformation de l'énergie électrique en chaleur, on obtient :

$$\eta = \frac{E_{utile}}{E_{consommée}} = \frac{\mathrm{E}_{\text{thermique}}}{E_{électrique}}$$

d'où

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\textbf{thermique}} &= \eta \cdot E_{électrique} \quad |Substitution \\ &= \boldsymbol{\eta \cdot P \cdot t} \end{aligned}$$

Remarque : on pourra également utiliser cette formule pour un appareil à combustion si sa puissance est indiquée.

Illustrons ce dernier point du chapitre par un exercice résolu :

On chauffe 2 kg de glace à -20°C à l'aide d'une plaque électrique de 1500 W et de 40% de rendement durant 1 heure. Quelle sera la température finale et quel sera l'état de la matière ?

Méthode classique *(elle ne marchera pas dans ce cas, mais il faut en comprendre les raisons)* ***:***

1. ***Combien de corps composent le système thermodynamique ? Quelles données dispose-t-on à leur propos ?***
   Un corps
   Eau : $T_i = -20°C$*, Solide ;* T_f *=?, état de la matière ? ;* $m_{glace} = 2\ kg$
2. ***Etablir le schéma fléché pour le système thermodynamique :***
   Eau : $\underset{-20°C}{S} \rightarrow ?$
3. ***Le système est-il isolé ? chauffé avec un appareil combustion (combustible, rendement ?) ? chauffé avec un appareil électrique (puissance, rendement ?) ?***
   Appareil électrique : $E_{thermique} = \eta \cdot P \cdot t, \eta = 0{,}4\ et\ P = 1500W$
4. ***Poser l'équation :***
   « Energies échangée dans le système thermodynamique = Energies fournies par le(les) appareil(s) »
   Il est impossible de poser l'équation, car nous ne connaissons ni la température finale, ni l'état de la matière.

Méthode lorsqu'on ne connait ni la température finale, ni l'état de la matière d'un système thermodynamique chauffé par un appareil :

1. ***Calculer l'énergie utile produite par l'appareil :***
   $E_{utile \to extérieur} = \eta \cdot P \cdot t = 0{,}4 \cdot 1500 \cdot 3600 = 2'160'000\,J$. *Cette énergie est la chaleur disponible pour chauffer la glace.*

2. ***Reprendre le schéma fléché et déterminer l'énergie nécessaire pour l'étape suivante :***
   Eau : $\underset{-20°C}{S} \rightarrow \underset{0°C}{S}$: $E_{glace} = m \cdot c_{glace} \cdot \Delta T_{glace} = 2060 \cdot 2 \cdot 20 = 82'400\,J$

   Pour chauffer la glace jusqu'à 0°C, il faut 82'400 J. A-t-on assez d'énergie à disposition ?
   Les $2'160'000\,J$ *à disposition sont suffisants. Il en reste donc :* $2'160'000 - 82'400 = 2'077'600\,J$ *pour poursuivre le « chauffage »*

3. ***Poursuivre le « chauffage », jusqu'à ce que l'énergie à disposition ne soit plus suffisante :***
   Eau : $\underset{0°C}{S} \rightarrow \underset{0°C}{L}$: $E_{fusion} = m \cdot L_F = 2 \cdot 330'000 = 660'000\,J$

   Il restait $2'077'600\,J$ *: encore suffisant. Il restera ensuite :* $2'077'600\,J - 660'000\,J = 1'417'600\,J$

   Eau : $\underset{0°C}{L} \rightarrow \underset{100°C}{L}$: $E_{eau} = m \cdot c_{eau} \cdot \Delta T_{eau} = 4180 \cdot 2 \cdot 100 = 836'000\,J$

   Il restait $1'417'600\,J$ *: encore suffisant. Il restera ensuite :* $1'417'600\,J - 836'000\,J = 581'600 J$

   Eau : $\underset{100°C}{L} \rightarrow \underset{100°C}{G}$: $E_{vaporisation} = m \cdot L_V = 2 \cdot 2'300'000 = 4'600'000\,J$.

   Il faudrait $4'600'000\,J$ *pour vaporiser l'entier de l'eau, mais il n'en reste que* $581'600 J$ *à disposition. Cela signifie que seule une partie de l'eau pourra être vaporisée.*

4. ***Déterminer l'inconnue en fonction de la situation. Les différentes possibilités sont :*** T_f, m_{fondue} ***ou*** $m_{\text{vaporisée}}$.
   Dans l'exercice, nous avons atteint 100°C et une partie seulement de l'eau va être vaporisée. Cela signifie que la température finale sera de 100°C, qu'il y aura un état liquide et un état gazeux. Reste à préciser quelle quantité sera vaporisée. Donc, la nouvelle inconnue est $m_{\text{vaporisée}}$ *:*

   Eau : $\underset{100°C}{L} \rightarrow \underset{100°C}{G}$ *: avec une masse «* $m_{\text{vaporisée}}$ *» vaporisée par l'énergie restante* $581'600 J$

$$\begin{aligned} E_{restante} &= m_{\text{vaporisée}} \cdot L_V \quad | \div L_V \\ m_{\text{vaporisée}} &= \frac{E_{restante}}{L_V} \\ &= \frac{581'600}{2'300'000} \\ &\simeq 0{,}25\,kg \end{aligned}$$

Réponse : la température finale sera de 100°C, il y aura 1,75 kg d'eau sous forme de liquide et 0,25kg d'eau auront été vaporisé.

2.6 Série d'exercices

Exercice 1 Un train de marchandises franchit le Saint-Gothard. Sachant que l'énergie électrique consommée par la locomotive est fournie par une usine hydroélectrique, décrire les transformations d'énergie qui apparaissent dans cette chaîne.
Est-il possible à un train descendant le Saint-Gothard de restituer l'énergie électrique au réseau?

Exercice 2 On mange une pomme.

1. D'où provient l'énergie contenue dans cette pomme ?
2. Sous quelle forme se trouve l'énergie dans cet aliment ?
3. Sous quelle forme se transforme-t-elle dans l'organisme?

Exercice 3 Expliquer la chaîne des transformations d'énergie réalisées depuis l'eau du Rhône qui passe dans l'usine hydroélectrique de Verbois jusqu'au tube fluorescent qui éclaire la salle de cours.

Exercice 4 Les appareils ou processus ci-dessous effectuent des transformations d'énergie. Indique l'énergie utilisée et celle produite.

1. grille-pain
2. se frotter les mains
3. muscle
4. ver luisant
5. réacteur nucléaire
6. haut-parleur

Exercice 5 Activité de recherche : quel est le principe de fonctionnement de ces différents thermomètres, et leur plage d'utilisation :

1. Thermomètre à résistance
2. Thermomètre à dilatation
3. Thermomètre à couple thermoélectrique
4. Thermomètre optique : pyromètre et spectromètre

Exercice 6 Un thermomètre indique sa propre température. Vrai ou faux?

Exercice 7 Compléter les phrases suivantes par les mots «chaleur» ou «température».

1. Marc a eu de la fièvre, sa .... est très élevée. 2. Un feu dégage de la .... 3. Le cuivre est un bon conducteur de .... 4. On élève la .... d'un corps en lui fournissant de la .... 5. Sarah s'est ébouillantée en manipulant une casserole. La différence de .... entre sa main et la casserole devait être importante. 6. La .... libérée par la combustion de 1 kg de charbon est de 33000kJ. 7. La .... se mesure avec un thermomètre. 8. La .... à la surface du Soleil est de 5600 °C.

Exercice 8 Estimer le temps nécessaire pour mesurer la température d'un enfant malade avec un thermomètre à mercure. Trouver une explication à ce phénomène.

Exercice 9 Deux objets, l'un en métal et l'autre en plastique, sont sur une table depuis assez longtemps. On en prend un dans chaque main; que ressent-on ? Que dire de leurs températures ?

Exercice 10 Pourquoi les températures des climats océaniques sont-elles plus constantes que celles des climats continentaux ?

Exercice 11 Etablir les courbes de température du fer et de l'aluminium de 20°C jusqu'à vaporisation complète. On prendra une masse de 20g.

Exercice 12 Faut-il plus de chaleur pour augmenter la température du lac Léman de 0,1°C (Volume du lac : 89 km³) ou augmenter de 50°C la température de 10'000 litres d'eau sanitaire d'un immeuble ?

Exercice 13 On mélange 20 litres d'eau à 20 °C avec 30 litres d'eau à 70 °C.

1. Quelle est la température d'équilibre du mélange ?
2. Quelle chaleur a-t-il fallu fournir aux 30 litres d'eau pour la chauffer de 20 °C à 70 °C ?
3. On utilise cette même chaleur pour chauffer 50 litres d'eau à 20°C. Quelle température atteindra-t-elle ?

Exercice 14 On prend des cubes de béton, de fer et d'aluminium ayant tous une même masse de 1kg et une même température de 20°C. Afin de chauffer l'un de ces cubes, on dispose d'une énergie de 22'000J. Quelle est la température maximale possible ?

Exercice 15 On plonge un morceau de cuivre de 150g à 450°C dans 2,5 litres d'eau à 15°C. Quelle sera la température d'équilibre, en supposant le système isolé ?

Exercice 16 Quelle masse de fer chauffé à 600°C faut-il plonger dans 1,8 l d'éthanol pour l'amener à ébullition ?

Exercice 17 Je refroidis à l'aide de morceaux de cuivre identiques à 20°C une même quantité de glycérine et d'éthanol, les deux étant à 30°C. Lequel des deux liquides se refroidira le plus ?

Exercice 18 Que dire d'une masse d'éthanol par rapport à une masse d'eau si je veux que les deux liquides varient de façon similaire leur température lors d'un apport identique de chaleur ?

Exercice 19 Je plonge un morceau de matière inconnue de 110g chauffé à 280°C dans 710ml de glycérine à 20°C. La température s'équilibre à 25°C. De quelle matière peut-il s'agir ?

Exercice 20 Un bon calorimètre doit-il être bon conducteur de chaleur ? avoir une petite capacité calorifique ? Justifie.

Exercice 21 Pour déterminer la chaleur massique de l'or, on utilise un calorimètre ($\mu = 80\ J \cdot K^{-1}$) contentant 400 g d'eau à 20°C. On place dans le calorimètre 50 g d'or à 400°C. On mesure une température d'équilibre de 21,4°C. Calcule la chaleur massique de l'or.

Exercice 22 Dans un récipient en aluminium de 0,5kg contenant de 0,6 l d'eau à 30°C, on place 0,2 dm³ d'acier à 200°C. Calcule la température d'équilibre.

Exercice 23 Dans un calorimètre de 180 $J \cdot K^{-1}$, quelle quantité d'or chauffé à 900°C faut-il mélanger à 2,5 litres d'éthanol pour l'amener à ébullition ?

Exercice 24 On sort d'un congélateur deux blocs de même masse, l'un en fonte, l'autre en acier. Lequel refroidira le plus l'atmosphère ?

Exercice 25 Dans un calorimètre laissé à température ambiante, on plonge dans de l'eau très chaude un morceau de cuivre de très basse température.

1. Sans tenir compte du calorimètre, calcule de manière analytique la température d'équilibre $T_{f\ théorique}$.
2. Si l'on obtient $T_{f\ mesurée} > T_{f\ théorique}$, compare la température initiale du calorimètre par rapport à sa température finale ?

Exercice 26 Pourquoi les nuits où le ciel est clair sont-elles plus fraîches que lorsqu'il y a une couverture nuageuse?

Exercice 27 En combien de temps une plaque électrique de 1200W consommera-t-elle autant d'énergie qu'un micro-onde de 800W qui a fonctionné 2min30s ?

Exercice 28 Qu'est qui est plus rentable : une bouilloire de 1500W avec un rendement de 75% ou une de 2000W avec un rendement de 60% ? Et le plus rapide ?

Exercice 29 On chauffe 2,5 l de glycérine à l'aide d'une plaque électrique de 2000W durant 4min50s. De combien augmentera la température de la glycérine durant cette opération si le rendement de l'installation est de 60% ?

Exercice 30 On chauffe 3 l d'eau à 15°C et un morceau de 300g de cuivre à 125°C dans une casserole (μ = 200J/K, $\boldsymbol{T_i} = 22°C$) à l'aide d'un réchaud à gaz butane. On a relevé la masse de la bombonne de gaz à 470g avant l'utilisation, puis 420g après. Quel est le rendement de l'installation si la température après équilibre vaut 80°C ?

Exercice 31 On chauffe 3 l de glycérine à 20°C et un morceau de 300g d'aluminium à 205°C dans une casserole (μ = 200J/K, $T_i =$ 22°C) à l'aide d'un réchaud à gaz butane. On a relevé la masse de la bombonne de gaz à 470g avant l'utilisation, puis 420g après. Quelles sont les températures finales possibles ? Explication des cas extrêmes.

Exercice 32 On chauffe 3 l d'eau à 15°C et un morceau de 300g de cuivre à -19°C dans une casserole (μ = 200J/K, $T_i = 22°C$) durant 4min30s à l'aide d'une plaque électrique. La température d'équilibre est de 40°C. Calcule la puissance de la plaque si on estime le rendement de l'installation à 60%.

Exercice 33 Une piscine de 60'000 l est chauffée à l'aide d'une installation électrique de $P = 40kW$ et de $\eta = 70\%$.

1. Quelle est la durée de chauffage si l'on veut 26°C, alors que l'eau est initialement à 15°C ?
2. Que coûte cette opération si le prix du kilowattheure est de 15 centimes ?

Exercice 34 L'eau chaude d'un immeuble est fournie par un boiler à gaz butane dont le rendement est environ de 75%.

1. Quelle masse de gaz est nécessaire pour chauffer l'eau d'un bain de 200 l de 12°C à 40°C ?
2. Même question mais pour une douche qui a nécessité 30l d'eau ?

Exercice 35 Lorsqu'une personne est atteinte de forte fièvre, on peut lui faire baisser la température en lui donnant un bain « froid ». Imaginons une température de 40°C pour un homme de 70kg (80% d'eau compose l'homme et on néglige le reste). On le plonge dans un bain de 200l à 36°C. En supposant que la température du bain et de la personne se soit équilibrée en 15min à 37,5°C, calcule la puissance calorifique du malade ? (indication : le corps fonctionne d'une part comme un corps et d'autre part comme source de chaleur extérieure)

Exercice 36 A quelle température devrait se trouver de la glace pour que l'énergie nécessaire à la faire fondre se répartissent à parts égales entre l'énergie de chauffage de cette glace jusqu'à T_F et l'énergie de fusion elle-même ?

Exercice 37 On stocke dans le compartiment à glace du frigo dont la température est de $-6°C$, une bouteille de 2,5 litres d'huile d'olive. On suppose que l'huile est sous forme solide. Combien de gaz butane faut-il brûler pour chauffer cette huile à 180°C, si le rendement de l'appareil est de 65% ?
Pour cet exercice, on utilisera, si nécessaire, les grandeurs physiques suivantes :
$c_{huile} \simeq 2000\ J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$; $\rho_{huile} \simeq 920\ kg \cdot m^{-3}$; $T_{F\to huile} = -6°C$; $L_{F\to huile} \simeq 2 \cdot 10^5\ J\ \cdot K^{-1}$; $T_{E\to huile} > 180°C$

Exercice 38 On chauffe un « glaçon » d'éthanol (2,4 kg) à T_F à l'aide d'un système électrique (2500W, η=60%) durant 5min. Quelle sera la température finale ?

Exercice 39 Combien faut-il ajouter de glace (-18°C) à 3dl de jus d'orange à 20°C pour obtenir une température de 8°C ? (Les propriétés physiques du jus d'orange sont proches de celles de l'eau)

Exercice 40 On ajoute un glaçon (-18°C) de 5g à 4cl de whisky à 20°C (45% d'alcool et le reste est assimilable à de l'eau). Que vaut T_f ? (Indication : A la température finale, tout est liquide)

3 MÉCANIQUE

3.1 Cinématique

En physique, la cinématique est la discipline de la mécanique qui étudie le mouvement des corps, en faisant abstraction des causes du mouvement (celles-ci sont généralement modélisées par des forces et des moments, étudiés dans les chapitres suivants).

> *Par exemple, si on laisse tomber une bille d'acier depuis la fenêtre de la salle de classe, on peut prévoir la vitesse à laquelle la bille percute le sol et la durée de sa chute.*
>
> *Autre exemple : en connaissant la force d'un lanceur de poids et sa taille, on peut déterminer la longueur maximale de son lancer et l'angle du jet avec l'horizontale pour y parvenir.*

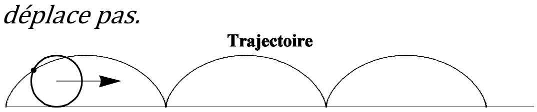
3.1.1 Référentiel et trajectoire

Un **référentiel** est un repère de l'espace et une référence pour le temps, une horloge. Il sert à préciser le point de vue selon lequel on observe l'objet étudié.

On utilise en général le référentiel lié au laboratoire, par exemple dont les axes suivent les arêtes des murs de la pièce, ou bien celle de la table, ou encore les directions géographiques Nord-Sud, Est-Ouest et haut-bas (si le laboratoire est immobile par rapport au sol). L'objet de base est le point, de dimensions nulles.

D'une manière générale, un point M, appelé **mobile**, est défini par le quadruplet (x, y, z, t) et noté M(x, y, z, t), où x, y et z sont les coordonnés spatiales du point M au temps t. Ces coordonnées (x, y, z, t) dépendent du référentiel choisi.

La **trajectoire** d'un point M est l'ensemble des points par lesquels est passé le point M à un moment donné. La trajectoire dépend également du référentiel.

> *Imaginons le pneu d'un vélo sur lequel on a peint une marque blanche bien visible, qu'on observera selon deux référentiels différents :*
>
> 1. *Le référentiel est défini par rapport à un observateur situé au bord de la route, qui ne se déplace pas.*
>
> 
>
>
> 2. *Le référentiel est défini par rapport à un observateur qui se déplace à côté et à la même vitesse que le cycliste.*
> *La trajectoire de la marque sera un cercle, comme si on faisait tourner la roue du vélo sur place en ayant soulevé celui-ci.*

Dans le cadre de ce cours, nous n'étudierons que les mouvements de mobile à une dimension. Si bien que pour définir un mobile M, il faudra définir un couple (x, t), où x est la position le long de la trajectoire au temps t.

> *Exemples : la bille qu'on laisse tomber : on connait d'avance la trajectoire qui sera verticale et pour définir la boule, on précisera sa position/altitude aux différents temps.*
> *Un cycliste qui circule le long d'une route et pour le définir, on donnera sa position à chaque temps.*

3.1.2 Horaire

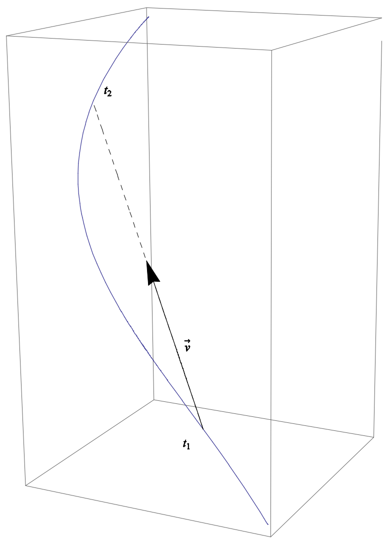
A une dimension, l'**horaire** d'un point M est l'équation qui permet de déterminer la position spatiale x de M au temps t : $x = f(t)$, avec f une fonction dont la variable est le temps t.
Remarque : on note souvent $x(t)$ au lieu de x, pour montrer que la position dépend du temps.

On considère un cycliste circulant à vitesse constante entre Monthey et Le Bouveret. Un exemple d'horaire serait : $x(t) = 7t$. Cela signifie qu'au temps :
- $t = 1800s = 30\ min$, *le cycliste est à la position* $x(60) = 7 \cdot 1800 = 12'600m$,
- $t = 3600s$ *=1 h, le cycliste est à la position* $x(60) = 7 \cdot 3600 = 25'200m$

Cependant, concrètement cela ne signifie pas grand-chose, car le référentiel n'a pas été précisé : on ne sait pas comment est « gradué » la route, ni quand est enclenché le chronomètre. Par contre si on avait précisé que l'axe de la position était défini de telle sorte que le 0m est à Monthey et dirigé vers Le Bouveret. Les « 12'600m » et « 25'200m » signifie que le cycliste se trouve à 12'600m de Monthey, puis à 25'200m de Monthey.
Si de plus, on avait indiqué que le chronomètre démarrait à 14h17, on saurait que le cycliste, à 14h47, se trouve à 12km600 de Monthey et qu'à 15h17, il serait à 25km200 de Monthey, soit presqu'au Bouveret.

3.1.3 Vitesse moyenne – vitesse instantanée

La vitesse n'est pas une notion aussi élémentaire qu'il y paraît au quotidien : imaginons un puck de hockey, qu'on considérera comme le point M, situé sur le rond central d'une patinoire au début de notre expérience. Imaginons ensuite que ce puck se déplace à 50 km/h.



Cette information est-elle suffisante pour prédire la position du puck quelques secondes plus tard ?
On pourra aisément trouver à quelle distance du rond central se trouvera le puck, mais il est impossible de préciser quelle direction a pris le puck.
En physique, la vitesse est habituellement définie comme un vecteur (une flèche) lié à un point M. La longueur de cette flèche indique la « vitesse » et la flèche indique la direction que va prendre le point M : le vecteur vitesse est toujours tangent à la trajectoire. Cependant, les notions mathématiques liées à ces définitions dépassent le niveau de ce cours.

Nous étudierons par la suite des mouvements pour lesquelles la notion vectorielle ne sera pas nécessaire.

La **vitesse moyenne** d'un mobile est définie comme le rapport entre la distance parcourue par le mobile et la durée pour effectuer ce déplacement :

$$v_{moyenne} = \frac{\Delta d}{\Delta t}, \text{où } \Delta t \text{ est la durée entre } t_1 \text{ et } t_2$$

Remarquons que le vecteur de vitesse moyenne n'est pas tangent à la trajectoire.

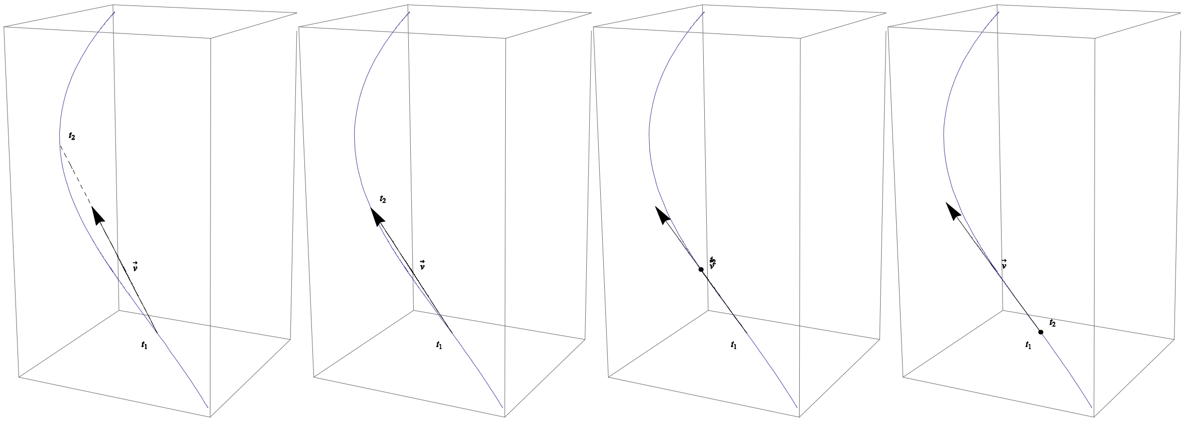
Notons également que la vitesse moyenne ne tient pas compte des variations de vitesse :

Si un cycliste parcourt 35km en 1h, cela signifie que sa vitesse moyenne est de 35km/h. Par contre, rien n'indique s'il a roulé à cette vitesse à chaque instant : on peut imaginer que dans les descentes, il roule plus vite que dans les montées.

Lorsqu'on regarde la vitesse affichée par le compteur de sa voiture, il ne s'agit manifestement pas d'une vitesse moyenne, puisqu'elle change à chaque instant en fonction des freinages et accélérations. On parle alors d'une vitesse instantanée.

Nous définirons dans ce cours la **vitesse instantanée** d'un mobile comme la vitesse moyenne pour de très petits intervalles de temps. Plus l'intervalle est petit, plus on se rapproche de la **vitesse instantanée**… Dans ce cas, le vecteur vitesse devient tangent à la trajectoire.

Illustration : l'intervalle de temps entre t_1 et t_2 est de plus en plus court ; le vecteur vitesse devient de plus en plus tangent à la trajectoire.



Par la suite, lorsqu'on mentionne vitesse, il s'agira de la vitesse instantanée.

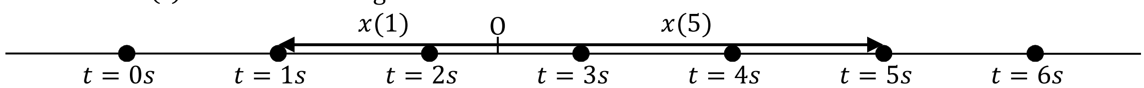
3.1.4 Mouvement rectiligne uniforme

Le mouvement d'un mobile M est appelé **mouvement rectiligne uniforme (MRU)**, si la trajectoire de M est une droite et si sa vitesse est constante.
<u>Conséquence</u> : La vitesse étant constante, la vitesse moyenne est égale à la vitesse instantanée et correspond à la distance parcourue en 1s

Exemple : un objet en chute libre qui a stabilisé sa vitesse.

3.1.4.1 Horaire d'un MRU

Pour commencer il s'agit de fixer un repère pour l'espace. Comme le mobile se déplace sur une droite, un repère a une dimension sera suffisant : il faut placer arbitrairement l'origine, notée O, sur la droite et on mesurera la distance $x(t)$ du mobile à l'origine :



Si l'on connait la position x_0 $\big($abréviation de $x(t_0)\big)$ pour le temps t_0 et la vitesse v, il est possible de prévoir la position x_1 $\big($abréviation de $x(t_1)\big)$ pour n'importe quel temps t_1 :

$$v = \frac{distance}{temps} = \frac{x_1 - x_0}{t_1 - t_0} \Rightarrow x_1 - x_0 = v(t_1 - t_0) \Rightarrow x_1 = v(t_1 - t_0) + x_0$$

Si on déclenche le chronomètre en $t_0 = 0$s et si on pose $x_1 = x$ et $t_1 = t$ on obtient la relation :
$\boldsymbol{x(t) = v \cdot t + x_0}$ qui est **l'horaire d'un MRU**,
où x_0 est la position de l'objet au moment où le chronomètre est enclenché et $x(t)$ sa position après un temps t lu sur le chrono.

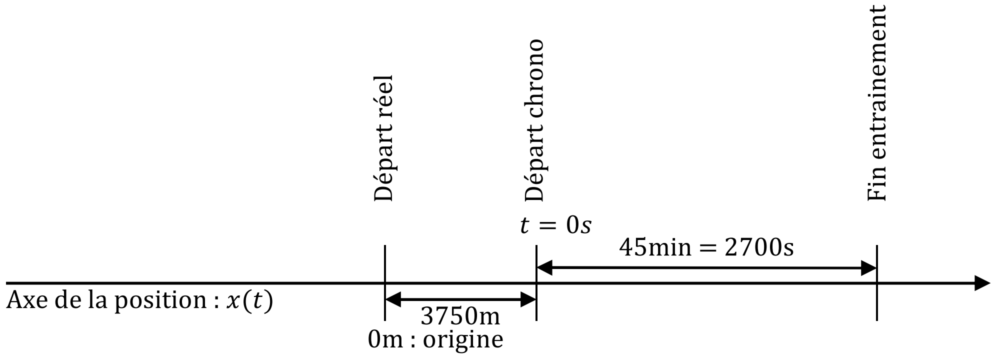
Dans le cas où l'on ne connait pas la position à $t = 0s$, mais qu'on la connait pour un autre moment $t = t_0$, on peut utiliser la formule générale
$\boldsymbol{x(t) = v \cdot (t - t_0) + x_0}$,
où x_0 est la position de l'objet au temps t_0 et $x(t)$ sa position après un temps t lu sur le chrono.

Attention : si l'objet se déplace dans le sens contraire de l'axe de la position, on définit que sa vitesse est <u>négative</u> !

Un cycliste se déplace à 27km/h. Il a oublié de déclencher son chronomètre au début de son entrainement et le fait après 3km750, puis il a roulé durant 45min.

1. *Détermine l'horaire du cycliste avec pour origine du repère le point de départ de l'entrainement*
2. *Détermine l'horaire du cycliste avec pour origine du repère le point où il a enclenché le chrono.*
3. *Détermine la durée totale et la distance totale de l'entrainement.*

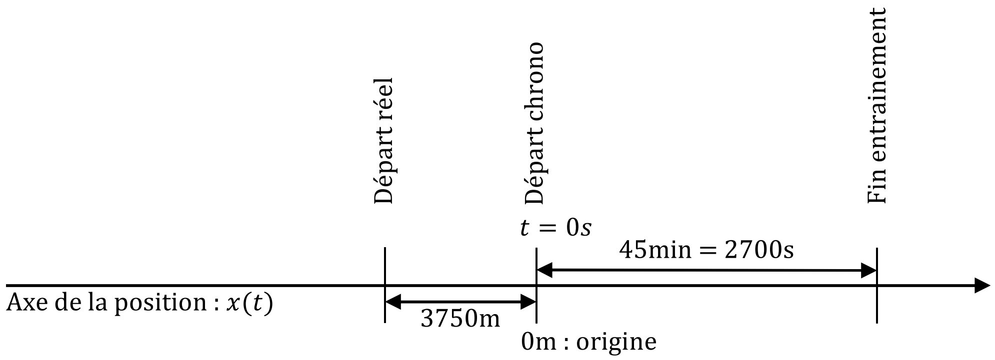
1. Schéma de la situation :



L'horaire est donné par : $x(t) = v \cdot t + x_0$, où x_0 est la coordonnée au moment où démarre le chronomètre et v la vitesse exprimée en mètre par seconde :

$x_0 = 3750\ m\ et\ v = 27\ km\ h^{-1} = 7{,}5\ ms^{-1}$ d'où : $\boldsymbol{x(t) = 7{,}5t + 3750}$

2. Schéma de la situation :



L'horaire est donné par : $x(t) = v \cdot t + x_0$, où x_0 est la coordonnée du cycliste au moment où démarre le chronomètre et v la vitesse exprimée en mètre par seconde :

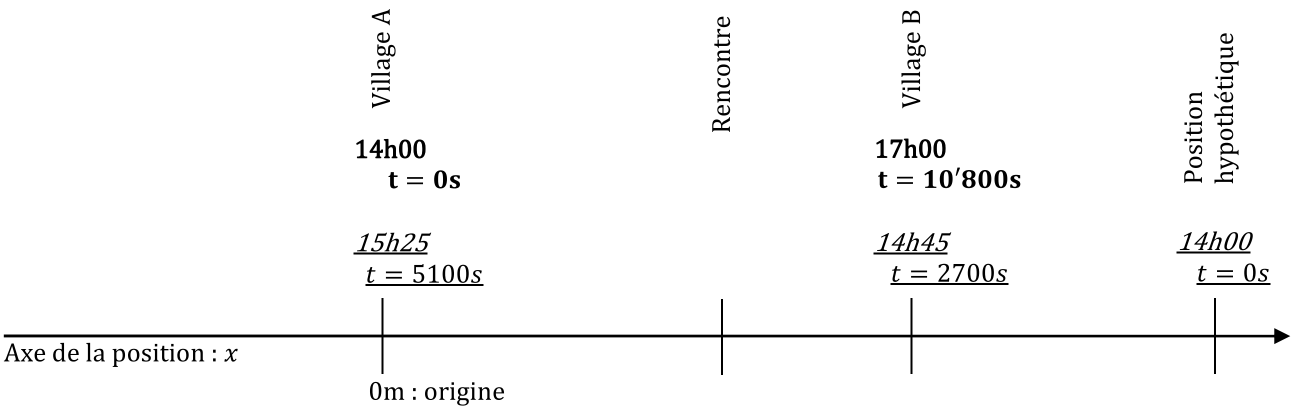
$x_0 = 0\ m\ et\ v = 27\ km\ h^{-1} = 7{,}5\ ms^{-1}$ d'où : $\boldsymbol{x(t) = 7{,}5t}$

3.
   a. Pour calculer la durée totale, il faut trouver la durée des 3750m initiaux :
   $v = \frac{d}{t} \Rightarrow t = \frac{d}{v} = \frac{3750}{7{,}5} = 500s$
   La durée totale sera donc de $500 + 2700 = 3200s$
   b. Pour calculer la distance totale, il faut trouver la distance des 2700s finales :
   $$v = \frac{d}{t} \Rightarrow d = v \cdot t = 7{,}5 \cdot 2700 = 20'250m$$
   La distance totale sera donc de $3'750 + 20'250 = 24'000m$

Un piéton part du village A pour le village B à 14h. Il chemine à la vitesse constante de 5,4 km/h. Il arrive à B à 17h. A 14h45, un cycliste part de B en direction de A, qu'il atteint à 15h25. On suppose qu'il a roulé à vitesse constante.

1. *Détermine l'horaire du piéton et du cycliste en choisissant le village A pour origine et 14h comme origine du temps*
2. *Détermine le lieu et l'heure du croisement piéton-cycliste.*

*Schéma de la situation : **en gras** → piéton, <u>en italique-souligné</u> → cycliste*



<u>Remarque pour le schéma :</u>
*Le chrono est enclenché à 14h00. **La lettre t représente ce qu'affiche le chrono en secondes**.*
Donc à 14h45, il s'est écoulé 45min, soit 2700s. Même raisonnement pour trouver qu'à 15h25, $t = 5100s$ *et qu'à 17h,* $t = 10'800s$

1. **<u>Piéton :</u>**
L'horaire du piéton est donné par : $x_{piéton}(t) = v_{piéton} \cdot t + x_{0\rightarrow piéton}$, où $x_{0\rightarrow piéton}$ est la coordonnée du piéton au moment où démarre le chronomètre et $v_{piéton}$ la vitesse du piéton exprimée en mètre par seconde :

$x_{0\rightarrow piéton} = 0\ m\ et\ v_{piéton} = 5{,}4\ km/h = 1{,}5\ ms^{-1}$ d'où : $\boldsymbol{x_{piéton}(t) = 1{,}5t}$

<u>Cycliste :</u>
L'horaire du cycliste est donné par : $x_{cycliste}(t) = v_{cycliste} \cdot t + x_{0\rightarrow cycliste}$, où x_0 est la coordonnée du cycliste au moment où démarre le chronomètre et $v_{cycliste}$ la vitesse du cycliste exprimée en mètre par seconde. On ne connait ni la vitesse, ni la position à $t = 0s$.

Calcul de $\boldsymbol{v_{cycliste}}$ ***:*** Pour trouver la vitesse du cycliste, il faut connaître le temps nécessaire pour parcourir une distance donnée. Dans cet exercice, en ce qui concerne le cycliste, on sait qu'il part de B à 14h45 et arrive à A à 15h25, soit 40 min plus tard. Pour trouver la vitesse, il faut donc la distance entre les villages. On peut calculer la distance entre les villages en utilisant les infos du piéton : il marche à 1,5 ms^{-1} durant 3h (de 14h à 17h) :

$$d_{A\leftrightarrow B} = v \cdot t = 1{,}5 \cdot 10'800 = 16'200\ m$$

Donc : $v_{cycliste} = \frac{-16'200}{40\cdot 60} = -6{,}75\ ms^{-1}$ **Attention : le signe – indique que le cycliste se déplace dans le sens opposé de l'axe (Voir flèche de l'axe sur le schéma)**

Calcul de $\boldsymbol{x_0}$ ***pour le cycliste :*** Il faut calculer où se trouve le cycliste à t = 0s, soit à 14h. Or le cycliste ne part qu'à 14h45 ! Dans cette situation, on fera comme si le cycliste était parti à 14h et traversait le village B à 14h45. x_1 est la position fictive du cycliste à 14h !
Quelle distance a parcourue le cycliste en 2700s (45 min de 14h à 14h45) ? d = v · t = 6,75 · 2700 = 18'225 m. On trouve alors : $x_{0\rightarrow cycliste} = 16'200 + 18'225 = 34'425\ m$

Finalement : $\boldsymbol{x_{cycliste}(t) = -6{,}75t + 34'425}$

2. La rencontre a lieu lorsque **la position du piéton et du cycliste est la même pour un temps donné**, soit :

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x_{piéton}(t)} &= \boldsymbol{x_{cycliste}(t)} \\ 1{,}5t &= -6{,}75t + 34'425 \quad | + 6{,}75t \\ 8{,}25t &= 34'425 \quad | \div 8{,}25 \\ t &\simeq 4'173\ s \end{aligned}$$

On trouve donc l'heure de rencontre 4173s (1h09min33s) après 14h soit à 15 h 09 min 33 s à $\boldsymbol{x_{piéton}(4173) \simeq 1{,}5 \cdot 4173 = 6259\ m}$ du village A.

3.1.5 Accélération moyenne

La notion d'accélération est difficile à appréhender. Au quotidien, accélérer signifie « aller plus vite ». L'accélération est donc liée à la vitesse, plus précisément aux changements de vitesse.

L'**accélération moyenne** est la variation de vitesse par unité de temps : $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$. On en déduit que l'unité de l'accélération est « ms^{-2} »

<u>**Remarques :**</u>

1. En physique, le freinage correspond à une accélération puisque la vitesse de la voiture change.
2. L'accélération est un vecteur, donc elle peut être représentée par une flèche. Si cette flèche est dans parallèle au vecteur vitesse, deux situations se présentent :
   i. les deux flèches sont de même sens. Dans ce cas, la valeur absolue de la vitesse augmente, le mobile accélère au sens courant du terme.
   ii. les deux flèches sont de sens contraire. Dans ce cas, la valeur absolue de la vitesse diminue, le mobile freine ou décélère au sens courant du terme.

Calcule l'accélération moyenne d'une voiture passant de 0 km/h à 100 km/h en 7,2 s.

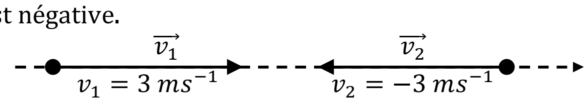
$$\Delta v = 100 - 0 = 100\ km/h = 27{,}8\ ms^{-1}\ d'où\ a_{moyenne} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \simeq \frac{27{,}8}{7{,}2} \simeq 3{,}85\ ms^{-2}$$

3.1.6 Mouvement rectiligne uniformément accéléré

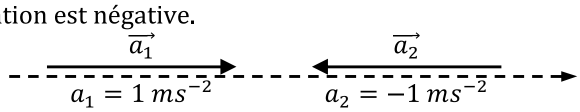
Le mouvement d'un mobile M est appelé **mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)**, si la trajectoire de M est une droite et si son accélération est constante.

<u>**Convention :**</u>

1. On choisit que comme repère spatial un axe confondu avec la trajectoire
2. Une vitesse dont le vecteur est de même sens que l'axe spatial est positive. Si le vecteur est de sens opposé à l'axe, la vitesse est négative.



3. Une accélération dont le vecteur est de même sens que l'axe spatial est positive. Si le vecteur est de sens opposé à l'axe, l'accélération est négative.



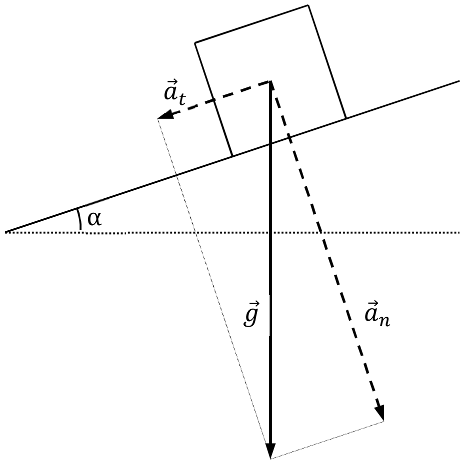
Lorsque les forces de frottements sur un mobile sont négligeables, le mouvement d'un mobile causé par une force de gravité est celui d'un MRUA.

1. <u>La chute libre</u> : l'accélération subie par un corps à la surface de la Terre se note $\vec{g}$ et vaut environ $9{,}8\ ms^{-2}$*. Cette accélération est dirigée vers de centre de la Terre. En fait cette accélération varie légèrement selon les lieux et en fonction de l'altitude. Pour des commodités de calcul, nous arrondirons cette valeur à* $g = 10\ ms^{-2}$.

2. <u>Mouvement dû à la gravité</u> : un mobile qui se déplace librement (c.à.d. sans subir de force) le long d'un plan dont l'inclinaison est α subit une accélération constante le long du plan $\overrightarrow{a_t}$, avec $a_t = g\ sin(\alpha)$.

En réalité, le mobile subit l'accélération dû à la gravité $\vec{g}$. Cette accélération se décompose en deux parties fictives :
l'accélération tangentielle $\vec{a}_t$ qui fait accélérer le mobile le long du plan.
l'accélération normale $\vec{a}_n$, qui tend à enfoncer le mobile dans le sol.
On a la relation $\vec{a}_t + \vec{a}_n = \vec{g}$, ce qui signifie que ensemble les deux accélérations $\vec{a}_t$ et $\vec{a}_n$ produisent le même effet que $\vec{g}$.

On a décomposé l'accélération selon les effets produits : bouger – enfoncer dans le sol.



L'horaire d'un mobile suivant un MRUA est donné par :
$$\boldsymbol{x(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0}$$
avec a l'accélération constante du mobile, v_0 la vitesse au temps $t = 0s$ et x_0 la position au temps $t = 0s$

La vitesse d'un mobile suivant un MRUA est donnée par :
$$\boldsymbol{v(t) = at + v_0}$$
avec a l'accélération constante du mobile, v_0 la vitesse au temps $t = 0s$

On peut également utiliser les formules générales, lorsqu'on ne connait pas la vitesse ou la position au temps $t = 0s$:
$$\boldsymbol{x(t) = \frac{1}{2}a(t - t_0)^2 + v_0(t - t_0) + x_0}$$
avec a l'accélération constante du mobile, v_0 la vitesse au temps $t = t_0$ et x_0 la position au temps $t = t_0$

La vitesse d'un mobile suivant un MRUA est donnée par :
$$\boldsymbol{v(t) = a(t - t_0) + v_0}$$
avec a l'accélération constante du mobile, v_0 la vitesse au temps $t = t_0$

Pour calculer la vitesse moyenne d'un MRUA entre les temps t_0 et t_1, on peut utiliser la formule :
$$\boldsymbol{v_{moyenne} = \frac{v(t_0) + v(t_1)}{2}}$$

Exemple d'un MRUA en chute libre :

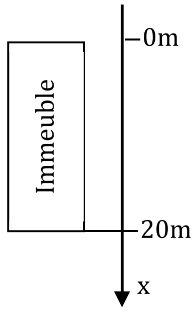
1. Calcule le temps mis par un objet pour tomber d'un immeuble de 20m de haut.
2. Calcule sa vitesse au moment de l'impact avec le sol.

Méthode *: La plupart du temps dans les exercice avec MRUA, deux questions sont posées :*
1. La durée du mouvement,
2. La position ou la vitesse à un moment donné. Remarque la distance parcourue est liée la position, donc si la question demande une distance, l'inconnue sera une position

Il s'agit donc de trouver deux équations pour déterminer les inconnues t et soit x, soit v. Pour ce faire, on va utiliser les équations :
$x(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$ *et* $v(t) = at + v_0$
On commence soit par l'équation $x(t)$ si une des inconnues est v, soit par l'équation $v(t)$ si une des inconnues est x, ce qui permet de trouver t. Puis avec l'autre équation, on détermine la 2e inconnue.

Résolution : *Dans cet exercice, les inconnues sont la durée de chute t et la vitesse au sol v. Donc, on devra commencer par travailler avec l'équation de l'horaire.*

Définissons un repère pour la position et une horloge. Souvent, pour éviter des accélérations et vitesses négatives, lors d'une chute libre, on définit le repère spatial avec une « flèche » pointée vers le sol.
Définissons la position $x = 0m$ à l'endroit où l'objet est lâché et le temps $t = 0s$ au moment où l'objet est lâché.
On obtient ainsi : $x_0 = 0\ m$; $v_0 = 0\ ms^{-1}$ en supposant l'objet lâché et non jeté et on trouve :



$$x(t) = \frac{1}{2}gt^2 + 0t + 0 \quad et\ v(t) = gt + v_0 = gt + 0$$

1. *Nous aimerions connaître le temps lorsque l'objet atteint le sol, donc la position $x = 20m$.*

$$\begin{array}{rcll} x(t) & = & 20 & |horaire \\ \frac{1}{2}gt^2 & = & 20 & |g = 10\ ms^{-2} \\ 5t^2 & = & 20 & |\div 5 \\ t^2 & = & 4 & |-4 \\ t^2-4 & = & 0 & |Factorisation \\ (t-2)(t+2) & = & 0 & | \\ t & = & \pm 2s & \end{array}$$

La solution $t = -2s$ n'a pas de sens par rapport au problème. Cela signifierait que l'impact aurait lieux 2s avant de lâcher l'objet. L'impact a lieu après 2s.

2. *Il faut trouver la vitesse lorsque l'objet est au sol, soit pour $t = 2s$.*

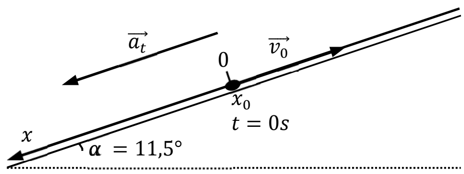
$$\begin{array}{rcl} v(2) & = & g \cdot 2 \\ & = & 20\ ms^{-1} \\ & = & 72km/h \end{array}$$

La vitesse au moment de frapper le sol est de $20\ ms^{-1}$ ou $72km/h$.

Exemple d'un MRUA sur un plan incliné :

On lance avec une vitesse initiale de $5\ ms^{-1}$ dans le sens de la montée un mobile posé sur un plan incliné dont l'inclinaison est de 11,5°. On suppose qu'il se déplace sans frottement.
1. Détermine l'accélération du mobile subie le long du plan incliné.
2. Détermine le temps et la vitesse du mobile lorsque celui-ci se retrouve à sa position initiale.
3. Où et après quel temps le mobile aura-t-il une vitesse $3\ ms^{-1}$?

1. L'accélération subie par le mobile est donnée par
$$a_t = g\ sin(\alpha) \simeq 2\ ms^{-2}$$
2. On a l'horaire $x(t) = \frac{1}{2}a_t t^2 + v_0 t + x_0 = t^2 - 5t$



$$\begin{array}{rcll} x(t) & = & 0 & | \\ t^2 - 5t & = & 0 & |factorisation \\ t(t-5) & = & 0 & \end{array}$$
On cherche à résoudre : $t^2 - 5t = 0$

D'où $t = 0s$ (situation initiale) ou $t = 5s$ qui correspond au moment où le mobile passe à nouveau sur le point de départ, mais en descente cette fois.
La vitesse du mobile est donnée par : $v(t) = a_t t + v_0 = 2t - 5$
Comme le mobile repasse à sa position initiale pour $t = 5s$, sa vitesse est alors :
$$v(5) = 2 \cdot 5 - 5 = 5\ ms^{-1}$$
Remarque : on trouve la même vitesse que pour la situation initiale, mais de sens opposé. Ceci est dû à l'absence de frottement.

3. On reprend l'équation de la vitesse : $v(t) = a_t t + v_0 = 2t - 5$ et comme on veut une vitesse de $3\ ms^{-1}$, on a les équations suivantes :

A la montée :

A la descente :

$$\begin{aligned} v(t) &= -3 \\ 2t-5 &= -3 \\ t &= 1\,s \end{aligned}$$

d'où la position :

$$x(1) = 1^2 - 5 \cdot 1 = -4\,m$$

$$\begin{aligned} v(t) &= 3 \\ 2t-5 &= 3 \\ t &= 4\,s \end{aligned}$$

d'où la position :

$$x(4) = 4^2 - 5 \cdot 4 = -4\,m$$

3.1.7 Série d'exercices

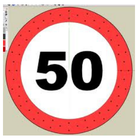
Exercice 41 Calcule la vitesse moyenne d'un promeneur qui parcourt 3km en 40min.

Exercice 42 En supposant circulaire la trajectoire de la Terre autour du Soleil, détermine la vitesse de celle-ci. (Terre-Soleil $\simeq 1{,}5 \cdot 10^8 km$)

Exercice 43 Un cycliste gravit une côte à 15km/h de moyenne et la redescend à 45km/h. Quelle est sa vitesse moyenne ?

Exercice 44 Convertir 1km/h et m/s

Exercice 45 Vitesse moyenne ou instantanée :

1. 

2. La vitesse d'un coureur qui effectue son 100m en 10s
3. La vitesse du service de Federer
4. Un vent soufflant à 40km/h avec des pointes à 70km/h

Exercice 46 Un mobile M se déplace le long d'une droite et sa position est donnée par $x(t) = 5t^2 + 8$. Calcule les vitesses moyennes pour les intervalles de temps entre :

1. 2s et 3s
2. 2s et 2,5s
3. 2s et 2,01s
4. 2s et 2,00001s

Dans quel(s) cas peut-on parler de vitesse instantanée ?

Exercice 47 Une personne observe le mouvement d'un mobile. La distance qui la sépare du mobile est donnée par $x(t) = 8t - 50$, avec x en mètres et t en secondes.

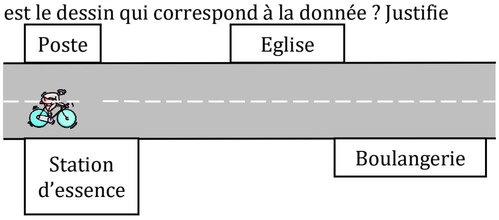
1. Quelle est la position du mobile quand $t = 3\,s$?
2. Quelle est la vitesse du mobile quand $t = 10\,s$?
3. Quelle est la vitesse du mobile quand $t = 0\,s$?
4. Quelle est la distance parcourue par le mobile entre les instants $t = -2\,s$ et $t = 7\,s$?
5. Quand le mobile « percute-t-il » l'observateur ?

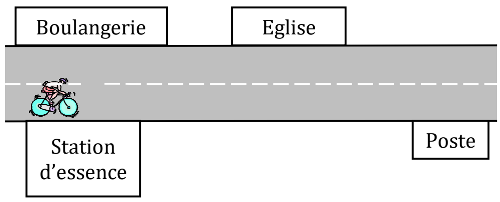
Exercice 48 Un piéton se déplace à 5 km/h. Il se trouve à 3 km d'un village.
1. Donne l'horaire du piéton (2 cas possibles)
2. A quelle distance du village se trouvera-t-il 50 minutes plus tard ? (2 cas possibles)

Exercice 49 Un cycliste roule à 5 ms^{-1}. Il passe à côté de l'horloge de la gare à midi exactement. Détermine la position du cycliste en fonction du temps affiché par l'horloge. L'origine de l'axe de la position se situe :
1. à l'horloge
2. à l'église, distante de 300 m de l'horloge, dans le sens opposé de celui de la progression du cycliste
3. au restaurant vers lequel se dirige le cycliste, distant de 500 m de l'horloge.

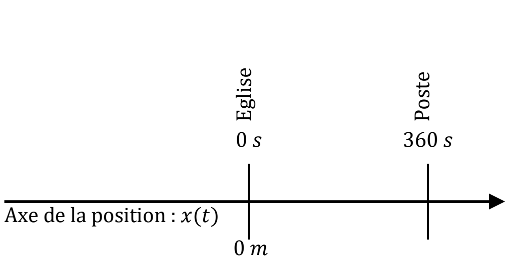
Exercice 50 Un cycliste traverse une ville à la vitesse de 36 km/h. Il passe devant la boulangerie à 12h34 : c'est l'instant où l'on déclenche le chronomètre. Il passe devant la poste à 12h40.

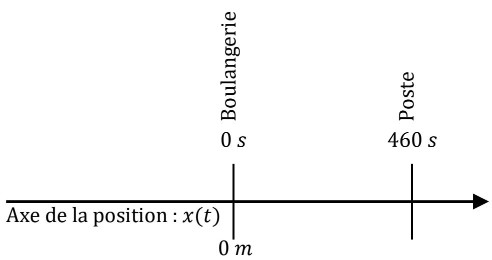
1. Quel est le dessin qui correspond à la donnée ? Justifie

a.


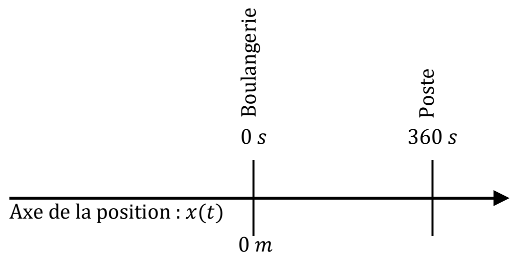
b.


2. Quel schéma correspond à la donnée ? Justifie *(attention sur 2 pages)*

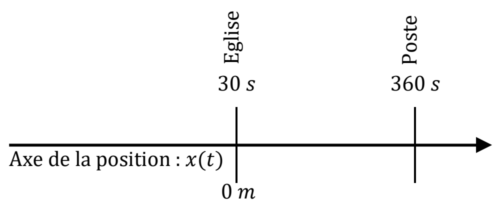
a.


b.


c.



d.

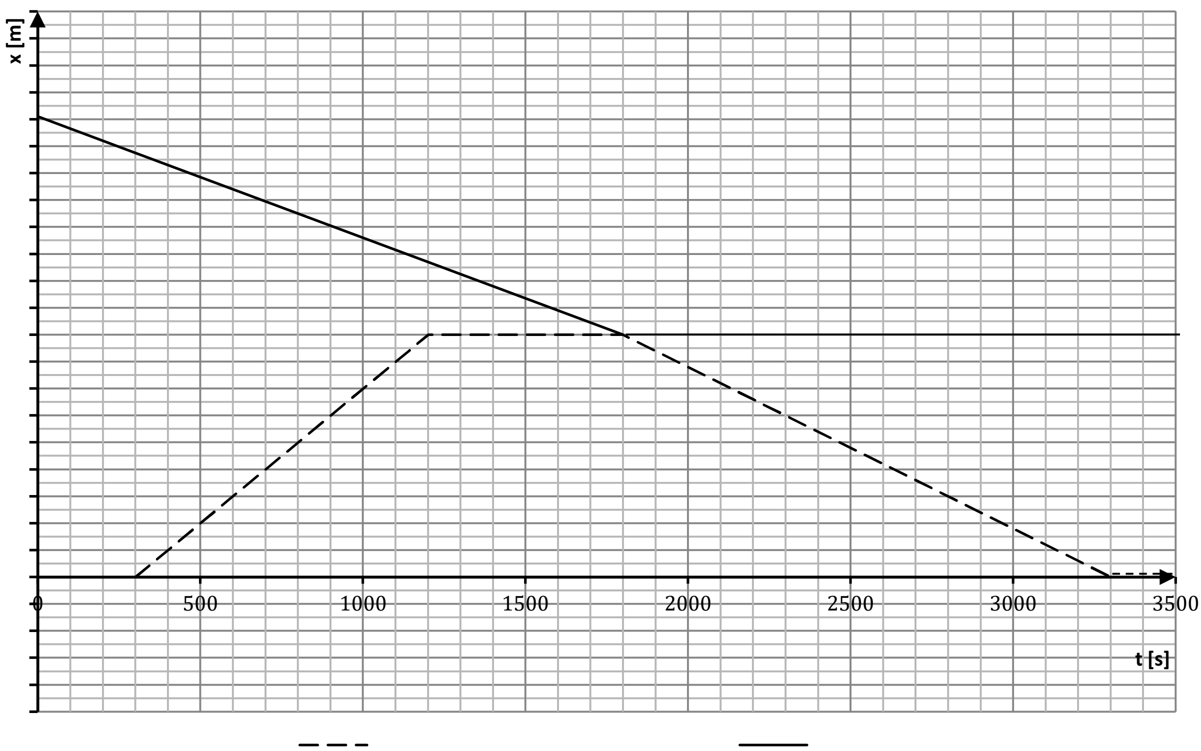


3. Détermine l'horaire du cycliste d'après le bon schéma précédent
4. Calcule la distance qui sépare la boulangerie de la poste.

Exercice 51 Une personne A appelle une personne B pour lui fixer un rendez-vous pour lui rendre des affaires. Ils conviennent de se rencontrer chez B qui rentre en vélo chez lui. Il lui reste encore 8km100 à parcourir. 5min plus tard, A enfourche son vélo et se rend chez B. A l'aide du graphique de la page suivante :

1. Complète la légende. Justifie
2. Qui arrive en premier au rendez-vous ?
3. Qui circule le plus rapidement ?
4. Quelle est la durée d'attente du premier arrivé ?
5. « Nomme » les trois parties de la courbe du cycliste en tiret.
6. Dans quelle des trois parties ce cycliste parcourt-il la distance la plus longue ?
7. La rencontre se passe à 14h45. Quand A a-t-il appelé B ?
8. Gradue l'axe vertical
9. Détermine la vitesse de chaque cycliste. Pour le cycliste en tiret, donne la vitesse de chaque partie du graphique.
10. Détermine l'horaire du cycliste en trait plein.
11. Complète l'horaire du cycliste en tiret :

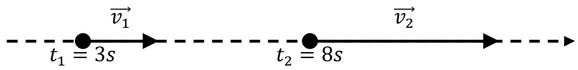
$$x_{tiret}(t) = \begin{cases} \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ & si\ 300 \leq t < 1200 \\ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ & si\ 1200 \leq t < 1800 \\ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ & si\ 1800 \leq t \leq 3300 \end{cases}$$



Exercice 52 Un camion passe au point A à 15h20 et se dirige vers le point B, distant de 4km580 à la vitesse constante de 54 km/h. Une minute plus tard, une voiture quitte B en direction de A, à la vitesse constante de 72 km/h.

1. Détermine graphiquement la position et l'heure de la rencontre. (1carreau =5s ; 1carreau = 100m)
2. Détermine l'horaire de chaque véhicule
3. Vérifie algébriquement les réponses trouvées à la question 1.

Exercice 53 Détermine l'accélération du mobile :

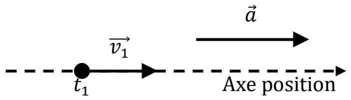


Echelle : $1cm$ correspond à 4 ms^{-1}

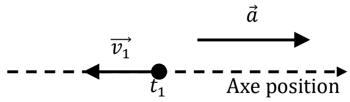
Exercice 54 Détermine dans chaque cas :

1. si les mobiles accélèrent ou freinent au sens courant du langage,
2. le signe de la vitesse
3. Le signe de l'accélération

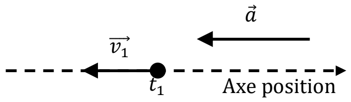
1.



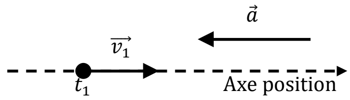
2.



3.



4.



Exercice 55 Le mouvement d'un mobile est donné par : $x(t) = -2t^2 + 3t - 5$

1. De quel mouvement s'agit-il ?
2. Quelle accélération subit le mobile ?
3. Quelle est la vitesse du mobile à $t = 0\ s$?
4. Quelle est la position du mobile à $t = 0\ s$?
5. Quand et où le mobile aura-t-il une vitesse nulle ?

Exercice 56 Un cycliste démarre et atteint 30 km/h après 50 m. En supposant son accélération constante :

1. Quelle est sa vitesse moyenne ?
2. Combien de temps lui aura-t-il fallu pour atteindre les 30 km/h ?
3. Que vaut son accélération ?

Exercice 57 Une pierre est lancée verticalement vers le haut à la vitesse initiale de 25 m/s. Quelle est la hauteur atteinte par la pierre ? *(Indication : quelle sera la vitesse de la pierre à son point le plus élevé ?)*

Exercice 58 Deux autos A et B se déplacent sur une même route, dans le même sens. A un moment donné, leurs vitesses respectives sont de 1 m/s et 3 m/s, et leurs accélérations de 2 m/s^2 et 1 m/s^2. Si, à ce moment-là, l'auto A a 1,5 m d'avance sur B, à quel moment les deux voitures seront à la même hauteur ?

Exercice 59 Depuis quelle hauteur faut-il laisser tomber un objet pour qu'il arrive au sol avec une vitesse de 100 km/h ? Quelle est la durée de la chute ? Tous les frottements sont négligés.

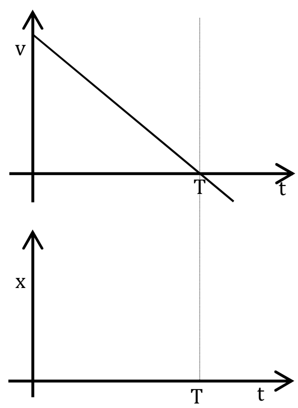
Exercice 60 Un taxi est arrêté à un feu rouge sur une route rectiligne. Au moment où le feu passe au vert (temps t = 0), il démarre et atteint la vitesse de 14 m/s en 7 secondes. Il roule ensuite pendant 10 secondes à vitesse constante puis freine avec une décélération $a = -3{,}5\ m/s^2$ pour s'arrêter devant le feu rouge suivant.

1. Calculer l'intervalle de temps pendant lequel il freine.
2. Représente graphiquement la position en fonction du temps, la vitesse en fonction du temps et l'accélération en fonction du temps.

Exercice 61 Le graphique du mouvement ci-contre représente un :

- o MRU, le mobile recule.
- o MRUA, le mobile recule.
- o MRUA, le mobile accélère dès que t >T.
- o MRUA, le mobile change de sens dès que t >T.
- o MRU, le mobile avance.

Esquisse le graphique de la position en fonction du temps



Exercice 62 Une souris court le long d'un tube étroit et droit. Si le graphique de sa vitesse en fonction du temps est une droite parallèle à t axe du temps, alors l'accélération est :

- ○ une constante non nulle
- ○ nulle
- ○ variable linéairement avec le temps
- ○ variable linéairement avec la distance

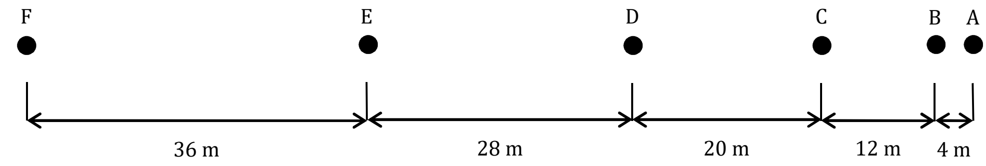
Exercice 63 Un sac de sable, lâché d'une montgolfière, qui se trouve à une altitude h_1, frappe le sol avec une certaine vitesse. La montgolfière monte lentement puis s'arrête à une altitude h_2. Si un deuxième sac identique au premier est lâché de cette dernière position, il frappe alors le sol avec une vitesse double. On a alors :

- ○ $h_2 = h_1/2$
- ○ $h_2 = 2h_1$
- ○ $h_2 = 4h_1$
- ○ $h_2 = 8h_1$
- ○ aucune des réponses ci-dessus

Exercice 64 Une voiture, à l'arrêt, commence à accélérer régulièrement sur une route droite et horizontale. Calculer la vitesse après un parcours de 300 m si l'accélération vaut 1,2 m/s^2

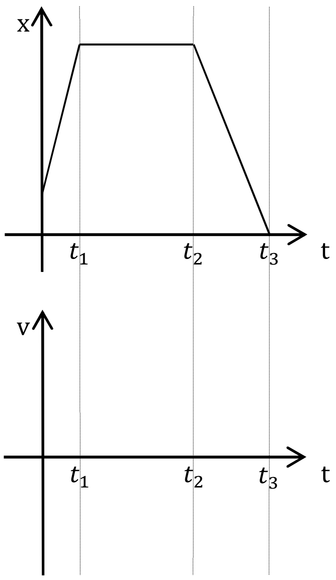
Exercice 65 Le moteur d'une voiture présente une fuite d'huile. Une goutte d'huile s'échappe toutes les deux secondes et tombe à terre. Sur la figure ci-dessous, on a reporté les taches que ces gouttes d'huile ont laissées sur la route pendant le freinage de la voiture. Les deux gouttes extrêmes ont été lâchées respectivement au début du freinage et à l'arrêt. La voiture a commencé son freinage alors que sa vitesse était de 72 km/h.

1. A quelle position (A ou F) le freinage a-t-il commencé ? Justifiez votre choix.
2. Quelle a été la durée du parcours depuis le début jusqu'à l'arrêt ?
3. Que valait l'accélération (supposée constante) de la voiture durant le freinage ?
4. Quelle vitesse la voiture avait-elle encore au point D ?
5. Etablir les graphiques x(t), v(t) et a(t), en choisissant pour origine du temps le moment où le véhicule est arrêté et pour origine de la position le point F.
6. Etablir les fonctions x(t), v(t) et a(t).



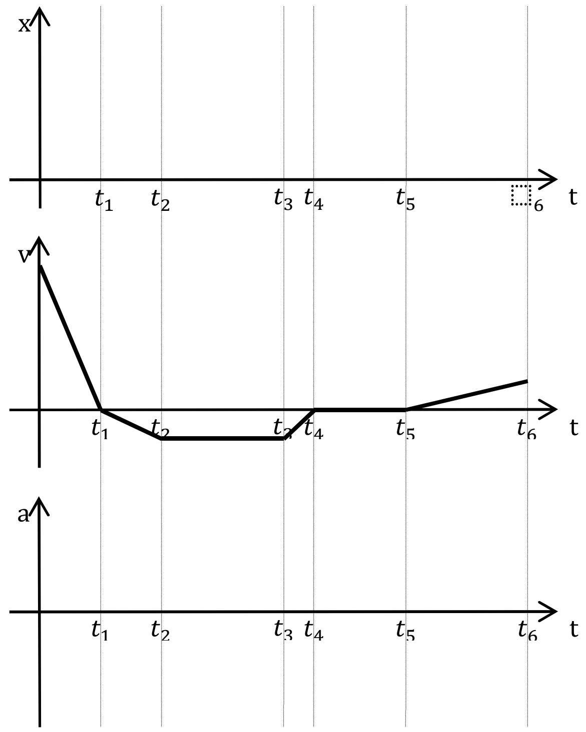
Exercice 66 A partir des graphiques…

a.



1. Esquisse le graphique de la vitesse en fonction du temps
2. Quand le mobile avance-t-il ?
3. Quand le mobile recule-t-il ?
4. En valeur absolue, quand la vitesse du mobile est-elle la plus grande ?

b.



1. Esquisse les graphiques x(t) et a(t)
2. Quand le mobile avance-t-il ?
3. Quand le mobile recule-t-il ?
4. En valeur absolue, quand l'accélération du mobile est-elle la plus grande ?
5. En valeur absolue, quand l'accélération du mobile est-elle la plus petite ?

3.2 Force

Quand on parle de force, la première idée qui vient à l'esprit est notre force musculaire. Il existe cependant d'autres forces dans la nature comme par exemple : les forces qui maintiennent les atomes ensemble pour former des molécules, les forces électromagnétiques qui font que des aimants s'attirent ou se repoussent, les forces de gravité qui font s'attirer les objets entre eux.
Notre force musculaire nous permet de :

- déformer des objets
- déplacer des objets

De plus, on se rend compte que l'effet de notre force n'est pas le même selon :

- sa direction
- son sens
- son intensité
- son point d'application (selon où une force est appliquée, un objet peut soit glisser, soit pivoter)

En partant de ces constats, on peut définir la notion de force comme suit :

Une force est une cause d'une déformation et/ou d'une variation de vitesse.
La force est de nature vectorielle et l'unité de son intensité est le **Newton** $[N] = [kg \cdot m \cdot s^{-2}]$

3.2.1 Force de rappel d'un ressort

Lorsqu'on déforme un ressort jusqu'à une certaine limite, appelée **limite élastique**, le ressort exerce une force qui tend à le ramener dans sa position initiale ou de repos ; elle est appelée **force de rappel**.

$\boldsymbol{F = k \cdot d}$ où **F** est **l'intensité de la force de rappel** du ressort, **d** est l'**allongement** ou la contraction du ressort en **mètre** et **k** est le coefficient de proportionnalité, appelé **constante élastique ou raideur du ressort**, en $\boldsymbol{N \cdot m^{-1}}$.

3.2.1.1 Dynamomètre

On mesure une force à l'aide d'un dynamomètre, qui est un appareil composé d'un ressort qui se déforme sous l'action de la force à mesurer. Cette force est égale à la force de rappel du ressort, si bien que connaissant la raideur du ressort et en mesurant la déformation, on peut déduire la force appliquée. Le dynamomètre est gradué directement en Newton. Il faut cependant veiller à l'utiliser dans son domaine élastique, car dans le cas contraire, la déformation du ressort serait permanente.

3.2.2 Force de pesanteur

La **force de pesanteur, notée $\vec{F}_p$, ou poids d'un objet, noté $\vec{P}$**, est la force avec laquelle la Terre et l'objet s'attire mutuellement. Comme toute force, l'unité de l'intensité de la force de pesanteur est le newton : N.
La force de pesanteur est toujours dirigée vers le centre de la Terre et **définit la verticale.** Elle s'applique sur le **centre de gravité** du corps.

> *Au quotidien, on n'entend jamais parler de poids en newton ! Combien pèse cette personne ? → 70kg ! Au niveau de la physique cela n'est pas correct : il y a une confusion entre la masse et le poids d'un objet. D'ailleurs pour éviter cette confusion, on parle de force de pesanteur plutôt que de poids !*

3.2.2.1 Masse et force de pesanteur

En physique, il existe deux façons de définir la masse :
- la **masse inerte d'un corps** caractérise la difficulté à changer le mouvement de ce corps ;
- la **masse pesante** caractérise la quantité de matière du corps.

La masse inerte et la masse pesante d'un objet ont la même valeur et l'unité de la masse est le kilogramme : kg.
La masse est une **propriété** d'un corps, elle est **invariable.**

Le poids d'un objet est la force avec laquelle la Terre et l'objet s'attire mutuellement. Cette force serait différente si l'objet se trouvait sur la Lune, car celle-ci attire environ 6 fois moins les objets vers elle que la Terre. Le poids est donc une **grandeur variable**, qui dépend de la Planète ou du corps sur lequel se trouve l'objet, alors que la **masse ne change pas** en fonction du lieu.

3.2.2.2 Lien entre masse et force de pesanteur

En mesurant à l'aide d'un dynamomètre une série de masses différentes, on peut établir que le poids est proportionnel à la masse et que le facteur de proportionnalité est l'accélération terrestre $\vec{g}$, la formule suivante :

$$\vec{F}_p = m \cdot \vec{g}$$

Il n'est pas surprenant que le facteur de linéarité soit l'accélération terrestre, car la force est la cause des variations de vitesses et l'accélération sert à caractériser précisément les variations de vitesse.

Dans la définition de la force de pesanteur, on affirme qu'un corps et la Terre s'attire avec la même force. Cela semble bizarre, car en chute libre, un corps tombe sur la Terre, qui, elle, ne bouge pas ! Cela s'explique ainsi : la force de pesanteur exercée sur le corps est importante vis-à-vis de sa masse m. Par contre cette même force est négligeable par rapport à la masse de la Terre. On ne verra donc pas bouger la Terre.

3.2.3 Force d'Archimède

Scène 1, acte I

Prof	Pourquoi une boule en bois flotte-t-elle dans l'eau, tandis qu'une boule d'acier coule ?
Elève	Le bois est plus « léger » que l'eau, tandis que l'acier est plus « lourd ».
Prof, *agaçant*	Que signifie plus léger et plus lourd ? Une bille d'acier de 1 cm de diamètre est-elle vraiment plus lourde que les 200 l d'eau d'une baignoire ?
Elève, pertinent	Il faut comparer pour un même volume : si on pouvait construire une boule d'eau de 1cm de diamètre, elle serait plus légère que celle d'acier.
Prof	D'accord, dans ce cas quelle notion de physique lie le « lourd ou léger » au volume…
Silence prolongé…	
Prof, consterné	La masse volumique ! Fin du cours… Faites l'Exercice 85 en devoir.

Scène 2, acte I

Prof	Observez : je suspends cette masse à mon dynamomètre qui indique … 20 N. Je le plonge ensuite dans un bac d'eau et … surprise, Le dynamomètre indique 15 N. Le poids a-t-il changé ? Comment expliquer le phénomène ?
Elève, audacieux	Le poids d'un corps est la force avec laquelle la Terre attire ce corps vers elle. C'est exactement ce que vous mesurez dans les deux cas. L'eau diminue donc cette force, « freine » l'attraction…
Prof, amusé	Raisonnement intéressant, mais erroné… La force de pesanteur est donnée par $\vec{F}_p = m \cdot \vec{g}$ et cela ne dépend pas d'un liquide dans lequel le corps serait plongé.
Elève, insistant	Pourtant, apparemment ce n'est pas le même poids. Vous devez vous tromper…
Prof	Tu as utilisé le bon terme : apparemment ! Cette expérience nous montre qu'il existe ce qu'on appelle des « poids apparents » d'un objet lorsqu'il est immergé…

Scène 3, acte I

Prof	Chaque corps subit une force de pesanteur dirigée vers le bas, qui tend à faire « tomber » le corps. Lorsque celui-ci repose sur une surface solide, une force de réaction du sol l'empêche de s'enfoncer. Ce n'est pas pareil lorsque le corps est sur un liquide, car ce dernier se dérobe, si bien que le corps s'enfonce dans le liquide, qu'il flotte ou non…
Auditoire captivé ou endormi – silence absolu.	
Prof	En fait, tout corps immergé subit une force de poussée vers le haut égale au poids du volume du fluide déplacé, c'est la force d'Archimède et … puisque vous dormez,… fin du spectacle, rideaux ! Copiez cette théorie :

La **force d'Archimède** est une force verticale ascendante que subit tout corps immergé dans un fluide. Son intensité vaut :

$\boldsymbol{F_A = \rho g V_{im}}$ où ρ est la masse volumique du fluide, V_{im} est le volume immergé.

Son point d'application est le centre de gravité du fluide déplacé.

Lorsque, pour un corps immergé :

1. $\boldsymbol{F_A < F_p}$**, le corps descend**, car la résultante des forces est dirigée ver le bas. Le corps coule.
2. $\boldsymbol{F_A = F_p}$**, le corps est en équilibre** car la résultante des forces est nulle.
3. $\boldsymbol{F_A > F_p}$**, le corps monte**, car la résultante des forces est dirigée vers le haut. Le corps flotte.

Le **poids apparent** mesuré dans un fluide est la force de pesanteur « réelle » diminuée de la force d'Archimède :

$$\boldsymbol{F_{p \rightarrow apparent} = F_p - F_A}$$

3.2.4 Lien entre les forces et le mouvement

Ce paragraphe a pour objectif de montrer le lien entre les différentes forces agissant sur un corps et le mouvement de celui-ci.

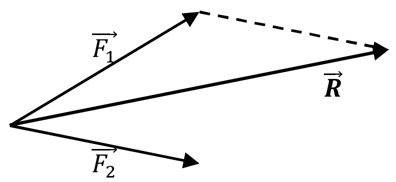
3.2.4.1 Résultante des forces

Empiriquement, on sait que si deux personnes tirent sur un objet, dans les mêmes directions et sens, les forces produites se cumulent. Par contre, si les deux personnes tirent l'objet de façon non parallèle, leur effort n'a pas un rendement optimal et le cas extrême consiste à tirer dans deux sens opposés.

Ces constations se formalisent facilement à l'aide de l'addition vectorielle :

Si un objet subit un ensemble de forces $\overrightarrow{F_1}, \overrightarrow{F_2}, \overrightarrow{F_3}, \dots, \overrightarrow{F_n}$ de même point d'application, on peut remplacer l'ensemble de ces forces par une seule force, appelée **résultante**, notée $\boldsymbol{\vec{R}}$, avec :

$$\vec{R} = \overrightarrow{F_1} + \overrightarrow{F_2} + \overrightarrow{F_3} + \dots + \overrightarrow{F_n}$$

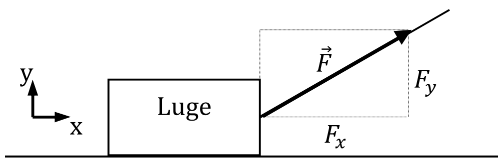


Pour déterminer graphiquement la résultante $\vec{R}$, on crée « un chemin » à l'aide de chaque force et le mettant bout à bout, par translation. La résultante $\vec{R}$ est le vecteur reliant le début du chemin à la fin de celui-ci.

3.2.4.2 Décomposition des forces

Imaginons une personne qui tire une luge sur une route horizontale. La ficelle attachée à la luge fait un angle avec l'horizontale de α°.

La force exercée par la personne sur la luge n'est pas utilisée de façon optimale car la force n'est pas dans la direction du déplacement.



Cette force a deux rôles dans le mouvement :
1. Une partie sert réellement à faire avancer la luge.
2. Une autre partie a tendance à faire soulever la luge.

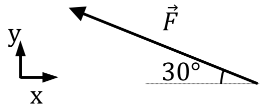
Ces deux parties sont les **composantes** de la force $\vec{F}$ dans le système d'axes Ox et Oy et l'on note $\vec{F} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix}$,

La composante F_x représente l'influence de $\vec{F}$ dans la direction de l'axe des x
La composante F_y représente l'influence de $\vec{F}$ dans la direction de l'axe y.

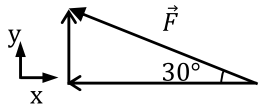
F_x sera positive si elle est dans le même sens que l'axe des x et négative si elle est de sens opposé.
F_y sera positive si elle est dans le même sens que l'axe des y et négative si elle est de sens opposé.

Deux exemples pour apprendre à manier les composantes :

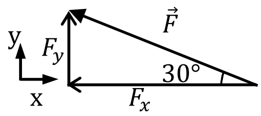
Comment calculer les composantes d'une force $\vec{F}$ d'intensité de 5 N et dont l'angle avec l'horizontale est de 30°, dans un système d'axe horizontal et vertical (voir schéma)



Etape 1 :
Relier le point d'application de $\vec{F}$ à son extrémité à l'aide de deux flèches mises bout à bout, l'une étant parallèle à l'axe x et l'autre à l'axe y.



Etape 2 :
F_x est égale au signe près à la longueur de la flèche parallèle à l'axe des x.
F_y est égale au signe près à la longueur de la flèche parallèle à l'axe des y.



Etape 3 :
On trouve F_x et F_y par trigonométrie, F=5N est l'hypoténuse et F_x le côté adjacent à 30° et F_y le côté opposé à 30° :

$$\begin{aligned} \cos 30 &= \frac{F_x}{F} \\ F_x &= F\cos 30 \\ &= 5\cos 30 \\ &\simeq 4{,}33N \end{aligned} \qquad\qquad \begin{aligned} \sin 30 &= \frac{F_y}{F} \\ F_y &= F\sin 30 \\ &= 5\sin 30 \\ &= 2{,}5N \end{aligned}$$

Etape 4 :
On note $\vec{F}$ à l'aide de l'écriture en composantes, en tenant compte des signes :
F_x et l'axe des x sont de sens contraire, donc F_x sera négatif.
F_y et l'axe des y sont de même sens, donc F_y sera positif.

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} -4{,}33\ N \\ 2{,}5\ N \end{pmatrix}$$

Remarque importante : cette méthode s'appliquera de manière identique lorsque le système d'axe ne sera pas horizontal-vertical, mais de biais.

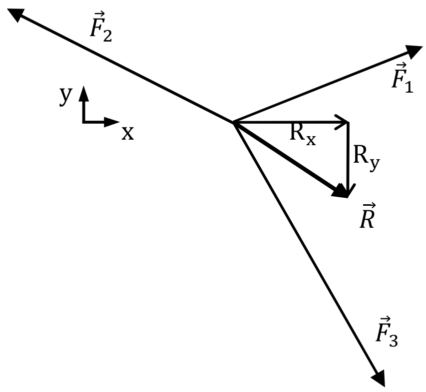
On donne les forces $\vec{F}_1 = \begin{pmatrix} 5\ N \\ 2\ N \end{pmatrix}$, $\vec{F}_2 = \begin{pmatrix} -6\ N \\ 3\ N \end{pmatrix}$ et $\vec{F}_3 = \begin{pmatrix} 4\ N \\ -7\ N \end{pmatrix}$ agissant sur un point A. Calcule :

1. *La résultante $\vec{R}$ de ces forces*
2. *L'intensité R de $\vec{R}$*
3. *L'angle α de $\vec{R}$ par rapport à l'axe des x.*

Pour calculer R_x de la résultante $\vec{R}$, il suffit d'additionner les composantes x des différentes et de même pour trouver R_y :

$$\begin{aligned} \vec{R} &= \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 \\ &= \begin{pmatrix} 5\ N \\ 2\ N \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -6\ N \\ 3\ N \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 4\ N \\ -7\ N \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 3\ N \\ -2\ N \end{pmatrix} \end{aligned}$$

On représente alors $\vec{R}$, R_x et R_y sur le graphe ci-contre.



On trouve R avec le théorème de pythagore :

$$R = \sqrt{3^2 + (-2)^2} = \sqrt{13} \simeq 3{,}6\ N$$

On trouve α avec une des relations trigonométriques :
R_x est le côté adjacent à α et R_y est le côté opposé à α

$$\begin{aligned} \tan\alpha &= \left|\frac{R_y}{R_x}\right| \\ \alpha &= \arctan\left|\frac{R_y}{R_x}\right| \\ &= \arctan\frac{2}{3} \\ &\simeq 33{,}7° \end{aligned}$$

3.2.4.3 1ère loi de Newton – condition d'équilibre

La statique étudie les corps dont le mouvement ne varie pas. Ces corps peuvent soit être au repos, vitesse nulle, soit se déplacer à vitesse constante. Un corps en équilibre est un corps immobile.

Lorsque nous exerçons une force sur un corps, celui-ci devrait bouger, puisque la force est la cause des variations de vitesse. Evidemment ce n'est pas toujours le cas : nous n'avons pas suffisamment de force pour trainer un camion qui freine par exemple.
On remarque donc que malgré l'application d'une force, on peut rester dans le domaine statique. En fait, à chaque fois qu'une force est exercée sur un corps immobile et que celui-ci ne bouge pas, il apparaît une autre force qui annule la première. On le formule ainsi :

1ère Loi de Newton ou loi d'inertie : S'il n'y a pas de force qui s'exerce sur un corps, ou si la résultante des forces s'exerçant sur lui est égale au vecteur nul, noté par commodité 0 au lieu de $\vec{0}$, la direction et la norme de sa vitesse ne changent pas ou, ce qui revient au même, son accélération est nulle.

$$\Sigma\vec{F} = \vec{R} = 0$$

Cela signifie que le corps est soit immobile, soit il se déplace selon un mouvement rectiligne uniforme.

3.2.4.4 2e loi de Newton

Dans le cas où la résultante des forces exercées sur un corps n'est pas nulle, ce dernier subit un accélération dans le sens de la résultante. Ce résultat est donné par la 2e loi de Newton :

$$\Sigma\vec{F} = \vec{R} = m \cdot \vec{a}$$

On obtient l'intensité de l'accélération :

$$a = \frac{R}{m}$$

Cela montre que plus le corps est massif, plus il est difficile de l'accélérer, car l'accélération est inversement proportionnelle à la masse.

La force de pesanteur, étudiée précédemment, est une application directe de la deuxième loi de Newton :

$$F_p = m \cdot g$$

g étant l'accélération causée par l'attraction terrestre.

3.2.5 Force de réaction

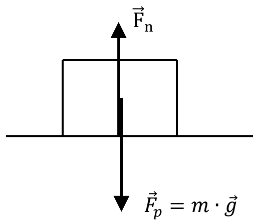
Nous avons étudié que n'importe quel corps subit la force de pesanteur à la surface de la Terre. Cette force « s'observe » facilement lors d'une chute libre par exemple ou lors d'un MRUA sur un plan incliné en l'absence de frottement. Il est par contre moins aisé de concevoir qu'un objet posé sur une table subit cette force, car il ne bouge pas : la force de gravité « tire » les objets vers le bas, si bien qu'on s'attend à ce qu'un objet qui subit cette force tombe.
« - Pourquoi l'objet posé sur la table ne tombe-t-il pas ? - A cause de la table évidemment. » Il faut traduire cette réponse du point de vue de la physique : l'objet ne bougeant pas, on déduit que la force de pesanteur est contrée par une force exercée par la table sur le corps.

On considère un corps exerçant une force sur une surface, ce corps étant libre de glisser le long de la surface.
La force normale ou force de réaction, notée $\vec{F}_n$ est une force exercée par la surface sur le corps pour s'opposer à l'action du corps sur la surface.
La force normale est toujours **perpendiculaire** à la surface.

3.2.5.1 Force de réaction sur plan horizontal

En considérant la première loi de Newton, lorsque la surface est horizontale, les intensités des forces de soutien et de pesanteur doivent être égales :

$$F_n = m \cdot g$$



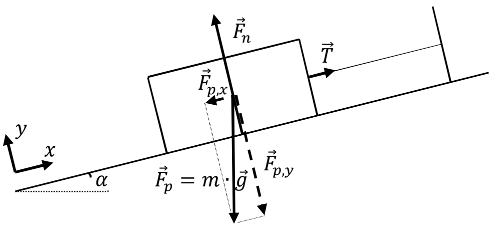
3.2.5.2 Force de réaction sur plan incliné

Une surface de masse m est posée sur un plan incliné à α° par rapport à l'horizontale. On suppose qu'il n'y a pas de frottement entre le corps et la surface. La masse m est retenue par un fil attaché à un mur. Détermine, en fonction de m et de α, la force de réaction du sol et la force exercée par le fil sur la masse m.
Solution :

La première loi de Newton affirme :

$$\vec{F}_p + \vec{F}_n + \vec{T} = 0$$

En statique, on résout souvent les problèmes en travaillant à l'aide des composantes des vecteurs. Pour ce faire, il faut choisir un système d'axe adéquat. En prenant les axes x et y, parallèle et perpendiculaire au plan incliné, $\vec{F}_n$ et $\vec{T}$ sont parallèles à l'axe y et l'axe x, si bien qu'une de leur composante est nulle. Seule la force de pesanteur a deux composantes non nulles, qu'on peut exprimer en fonction de m à l'aide de la trigonométrie :



$$\vec{F}_p = \begin{pmatrix} -F_{p,x} \\ -F_{p,y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -mg \sin\alpha \\ -mg \cos\alpha \end{pmatrix} \qquad \vec{F}_n = \begin{pmatrix} 0 \\ F_n \end{pmatrix} \qquad \vec{T} = \begin{pmatrix} T \\ 0 \end{pmatrix}$$

$\vec{F}_p + \vec{F}_n + \vec{T} = 0$ *s'écrit alors :*

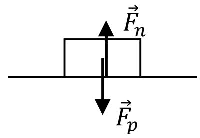
$\begin{pmatrix} -mg \sin\alpha \\ -mg \cos\alpha \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ F_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ *, ce qui donne sous forme de système d'équations :*

$$\begin{cases} -mg \sin\alpha + T = 0 \\ -mg \cos\alpha + F_n = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \boldsymbol{T = mg \sin\alpha} \\ \boldsymbol{F_n = mg \cos\alpha} \end{cases}$$

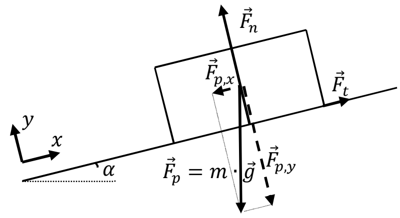
3.2.6 Force de frottement

On distingue deux types principaux de frottements : lorsque deux surfaces sont en contact et que l'on glisse l'un par rapport à l'autre, il y a un frottement que l'on appelle « frottement sec ».
Tout objet se déplaçant dans un fluide (liquide ou gaz) est freiné par le fluide. On parle alors de « frottements fluides »

3.2.6.1 Force de frottement sec



__Situation 1__ : Une gomme est posée sur une règle horizontale.
Le système est à l'équilibre. Il n'y a que deux forces $\vec{F}_n$ et $\vec{F}_p$.



__Situation 2__ : On incline légèrement la règle. Le système est à l'équilibre.
Selon la 1ère loi de Newton, pour maintenir l'équilibre, on doit rajouter une force pour compenser la composante $\vec{F}_{p,x}$ de la force de pesanteur qui tend à faire descendre la gomme le long du plan incliné. D'où vient cette force $\vec{F}_t$? Jusqu'à présent, nous avons toujours négligé le frottement entre le plan et le corps. Ce frottement engendre une force qui s'oppose au mouvement, appelée force de frottement.

__Situation 3__ : On incline la règle de sorte à ce que la gomme soit à la limite de se mettre en mouvement.
La force de frottement s'adapte à la force qui fait déplacer le corps : lorsque la gomme est posée sur la règle horizontale, il n'y a pas de force de frottement.
Si l'on augmente l'inclinaison de la règle, il apparaît une force de frottement. Plus l'inclinaison augmente, plus la force de frottement augmente, car le bloc a davantage tendance à glisser.
Le point critique est atteint lorsque l'objet commence à glisser. On est dans le cas limite entre statique (immobile) et dynamique (en mouvement). C'est à ce moment précis que la force de frottement est maximale.

Le frottement entre deux surfaces en contact, engendre une force qui s'oppose au mouvement, potentiel ou non, du corps. Cette force est appelée **force de frottement sec**, notée $\vec{F}_t$ *ou* $\vec{F}_{fr}$.
Dans le cas d'équilibre (le corps est immobile), on a :
$F_t \leq \mu_s \cdot F_n$ où μ_s est le **coefficient de frottement statique** entre les deux surfaces.
Dans le cas dynamique (le corps bouge) :
$F_t = \mu \cdot F_n$ où μ est le **coefficient de frottement dynamique** entre les deux surfaces.

μ_s et μ dépendent uniquement de la matière des objets en contact, et non de leur surface !

$\mu_s \geq \mu$, ce qui signifie que lorsque la gomme se met à bouger, elle ne pourra plus s'arrêter !

3.2.6.2 Force de frottement fluide

L'étude mathématique des frottements fluides est assez difficile et nous ne l'aborderons pas.

Dans tous les cas, les forces de frottements fluides dépendent de la forme du corps. C'est pour cela que dans des épreuves de vitesses comme le contre-la-montre en cyclisme, le kilomètre lancé à ski, la formule 1, on essaie de trouver des formes très aérodynamiques, pour les limiter le freinage par frottements.

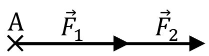
Ensuite, on distingue deux situations :

1. Ecoulement laminaire : lorsque l'objet ne crée pas de turbulence, remous dans le fluide, les forces de frottements fluides sont proportionnelles à la vitesse de l'objet. Cela se déroule lorsque l'objet se déplace à de faibles vitesses.
2. Ecoulement turbulent : lorsque l'objet se déplace suffisamment rapidement, il se crée des turbulences, remous dans le fluide ; les forces de frottements fluides sont alors proportionnelles à la vitesse au carré de l'objet. Cela signifie que la résistance par frottement augmente fortement si la vitesse augmente : on double la vitesse, le frottement quadruple !

3.2.7 Série d'exercices

Exercice 67 On exerce sur le point A des forces. Détermine graphiquement :

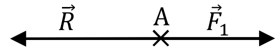
1. la résultante $\vec{R}$



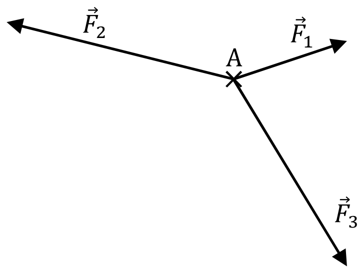
2. la force manquante $\vec{F}_2$

3. la résultante $\vec{R}$

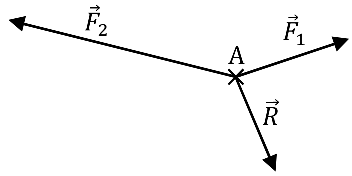
4. la force manquante $\vec{F}_2$



5. la résultante $\vec{R}$

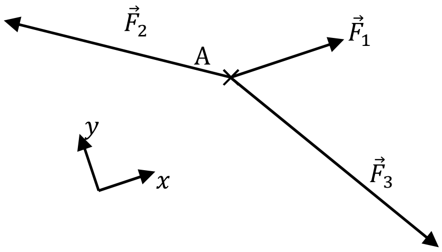


6. la force manquante $\vec{F}_3$



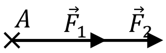
Exercice 68 Détermine les composantes de F_x et F_y dans l'exemple de la luge ci-dessus (3.2.4.2 Décomposition des forces) en fonction de F et α, l'angle entre $\vec{F}$ et l'horizontale. (Application numérique : $F = 50\ N$; $\alpha = 30°$)

Exercice 69 Prends les mesures de F_2 et F_3, ainsi que les angles nécessaires, puis calcule les composantes de la résultante des forces appliquées à A dans le système d'axe x, y. L'axe des x est parallèle à $\vec{F}_1$; $F_1 = 100\ N$.

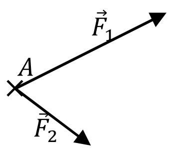


Exercice 70 $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ sont appliquées à A. Ajoute une force $\vec{F}_3$ de sorte que le système soit à l'équilibre.

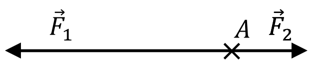
1.



2.



3.



Exercice 71 Le ressort d'un tampon de wagon de chemin de fer se comprime de 8 cm lorsqu'il subit une poussée de 16 kN d'intensité. Quelle est la raideur de ce ressort ?

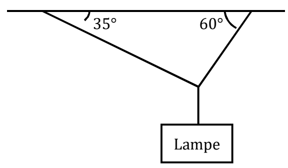
Exercice 72 Un ressort s'allonge de 200 mm lorsqu'on lui applique une traction de 10 N.
1. Quelle est l'intensité d'une traction qui provoque un allongement de 96 mm ?
2. Quel est l'allongement de ce ressort si on lui applique une traction de 7,5 N ?

Exercice 73 Une balance à plateau est en équilibre à Monthey. Le sera-t-elle encore sur la Lune ?

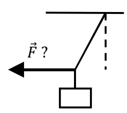
Exercice 74 Un pèse-personne est souvent composé d'un ressort sur lequel est posé un plateau. Lorsqu'une personne se pèse, elle monte sur le plateau et le ressort se comprime. En mesurant cette déformation, on peut afficher le résultat en kg. Sera-t-il le même sur la Lune ?

Exercice 75 Une personne de 70kg monte sur le plateau d'un pèse-personne à ressort qui s'enfonce de 5mm. Quelle est la raideur du ressort utilisé ?

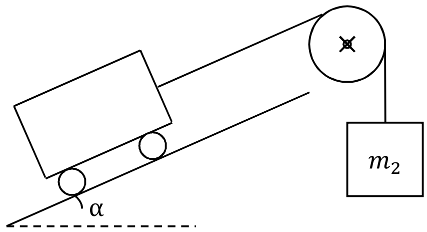
Exercice 76 On suspend une lampe de 3kg à l'aide de trois fils selon le schéma ci-contre.
1. Construis à l'échelle la situation et dessine les forces s'exerçant sur le point d'attache des trois fils. ($1N : 1mm$)
2. Détermine algébriquement les forces construites au point 1.



Exercice 77 Un bloc de 20kg est suspendu par un fil. Avec quelle intensité faut-il tirer horizontalement pour faire dévier le bloc de 30° par rapport à la verticale.



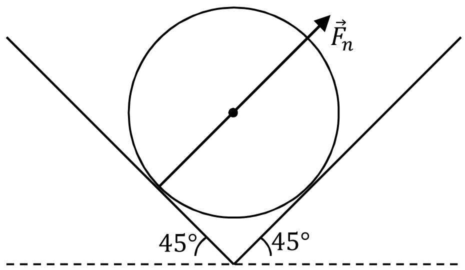
Exercice 78
1. Calculer la masse du chariot de pour maintenir l'équilibre si $m_2 = 2kg$ et $\alpha = 30°$.
2. Calculer m_2 pour maintenir l'équilibre si $\alpha = 20°$ et $m_{chariot} = 5kg$
3. Calculer α pour maintenir l'équilibre si $m_{chariot} = 2m_2$



Exercice 79 On veut fabriquer une balance. L'objet dont on veut mesurer la masse m est déposé dans un chariot de masse m_1 qui peut rouler sur un plan à inclinaison variable. Le chariot est relié par un fil, via une poulie, à un contrepoids de masse m_2.
On fait varier l'angle d'inclinaison α jusqu'à créer l'équilibre. Selon l'angle, on détermine la masse de l'objet.
Trouve la relation $m = f(\alpha)$

Exercice 80 Un chariot de masse m_1 peut glisser sans frottement le long d'un plan incliné à α°. Il est retenu par un ressort de raideur k. Détermine la déformation d que subit le ressort. (Application numérique : $m_1 = 4\ kg$; $\alpha = 30°$; $k = 400\ Nm^{-1}$)

Exercice 81 Détermine m_{bille}, sachant que $F_n = 12{,}8N$:
1. graphiquement
2. algébriquement



Exercice 82 Quelle est l'unité du coefficient de frottement statique ?

Exercice 83 Un objet de 3 kg est posé sur une surface horizontale. Les coefficients de frottement valent : 0,7 (statique) et 0,5 (dynamique). Détermine dans chaque cas la force de frottement :
1. On appuie horizontalement sur l'objet avec une force de 19N.
2. On appuie horizontalement sur l'objet avec une force de 21N.
3. On appuie horizontalement sur l'objet avec une force de 23N.

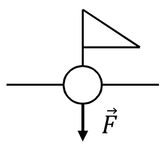
Exercice 84 Pour déterminer le coefficient de frottement statique entre un corps m et une surface, on peut procéder de deux manières :
1. **Surface horizontale :** on tire le corps à l'aide d'un dynamomètre et on lit la force F au moment où le corps se met en mouvement.
2. **Plan incliné :** on incline le plan et on relève l'angle maximal θ_{max} au moment où le corps se met en mouvement.

Détermine pour chaque situation μ_s en fonction des paramètres m, F, θ_{max}. (Indication pour n°2 : $\tan\theta = \frac{\sin\theta}{\cos\theta}$)

Exercice 85
1. Le fer flotte-t-il sur du mercure ?
2. Pourquoi un œuf coule dans de l'eau, mais flotte lorsqu'on rajoute suffisamment de sel ?
3. Pourquoi un bateau, fait d'acier, flotte-t-il tout de même dans l'eau ?

Exercice 86 Un corps est immergé dans un fluide. Démontrer que :
1. si $\rho_{corps} > \rho_{fluide}$, alors le corps coule ;
2. si $\rho_{corps} < \rho_{fluide}$, alors le corps flotte.

Exercice 87 Une bouée est constituée d'une sphère en sagex de 50 cm de diamètre sur laquelle est fixé un fanion. Avec quelle force $\vec{F}$ faut-il tirer verticalement sous la bouée pour que la moitié exactement de la bouée dépasse de la surface de l'eau ? (Le fanion a une masse de 1 kg)



Exercice 88 L'intensité de la force de pesanteur d'une boule métallique vaut 3,50 N. Quand on plonge cette boule dans de la glycérine, sa pesanteur apparente n'est plus que de 3,16 N.
Quelle est la masse volumique du métal ?

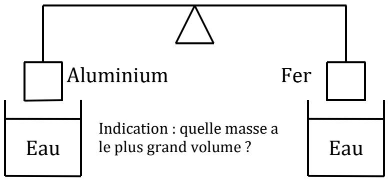
Exercice 89 Un morceau de bois flotte sur de l'alcool. Un quart du volume du morceau de bois dépasse de la surface. Les affirmations suivantes sont-elles vraies ou fausses ?
1. La masse volumique du bois est plus grande que celle de l'alcool.
2. La masse volumique du bois vaut le quart de celle de l'alcool.
3. Si on chauffe l'alcool, le morceau de bois va s'enfoncer davantage.
4. La force d'Archimède est égale à la pesanteur du morceau de bois.
5. Si on appuie sur le morceau de bois, la force d'Archimède va rester constante.

Exercice 90 Une boule d'acier plongée dans de la glycérine est suspendue à un dynamomètre qui indique 15 N. Le rayon de la boule est de 4cm. La boule est-elle creuse ?

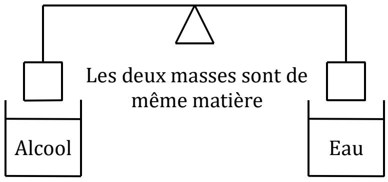
Exercice 91 Une boule d'acier de rayon r_1 est creuse : il y a une sphère d'air à l'intérieur de rayon r_2.
1. Calcule le rapport des rayons r_1 et r_2 pour que la boule flotte tout juste dans de l'eau. (indication : quelle est la condition pour qu'un objet flotte tout juste dans de l'eau ?)
2. Est-ce que la boule flotte dans de l'huile ? dans de la glycérine ?

Exercice 92 Que se passe-t-il lorsqu'on immerge les poids de la balance ?

1.



2.



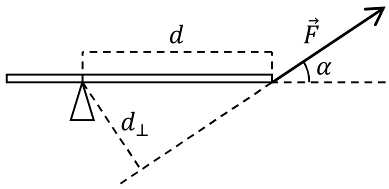
La balance :
a. reste à l'équilibre
b. descend du côté de l'alu
c. descend du côté du fer

La balance :
a. reste à l'équilibre
b. descend du côté de l'alcool
c. descend du côté de l'eau

Exercice 93 Un glaçon flotte à la surface de l'eau contenue dans un verre complètement plein. Le glaçon fond. L'eau déborde-t-elle ?

3.3 Moment de force

Imaginons une lourde porte d'abri atomique. Si nous voulons ouvrir cette porte, comment faut-il appliquer une force pour qu'elle soit minimale ?
De notre expérience quotidienne, nous savons qu'il faudra :
1. *appliquer cette force le plus loin possible des gonds (axe de rotation de la porte),*
2. *appliquer cette force perpendiculairement à la porte.*



De même, nous savons que la porte ne bougera pas, quelle que soit l'intensité de la force, si :
1. *la force appliquée « pointe » sur l'axe de rotation, (cela correspond à pousser sur le tranchant de la porte)*
2. *la force appliquée est parallèle à l'axe de rotation. (Cela correspond par exemple à la force de pesanteur de la porte qui le fait pas tourner)*

De cette illustration, nous apprenons que chaque force ne produit pas le même « effet de rotation » de l'objet sur lequel elle agit. Nous définissons donc une grandeur pour traduire cet « effet de rotation » :

Considérons une force $\vec{F}$ appliquée sur un objet qui peut tourner autour d'un axe de rotation. Le **moment $M_{\vec{F}}$ de la force $\vec{F}$ par rapport à l'axe de rotation** mesure l'effet de rotation que la force provoque sur l'objet. La valeur du moment de force est donnée par :

$$\boldsymbol{M_{\vec{F}} = F \cdot d_\perp = F_\perp \cdot d = F \cdot d \cdot \sin\alpha}$$

$\boldsymbol{d_\perp}$ est appelé **« bras de levier »** : il s'agit de la distance entre l'axe de rotation et la droite passant par la force $\vec{F}$, elle se mesure perpendiculairement à la force $\vec{F}$, d'où le symbole $\perp$
$\boldsymbol{F_\perp}$ est la décomposition de $\vec{F}$ dans un système d'axe parallèle et perpendiculaire à la droite reliant l'axe de rotation et le point d'application de $\vec{F}$.

3.3.1 Rotation – condition d'équilibre

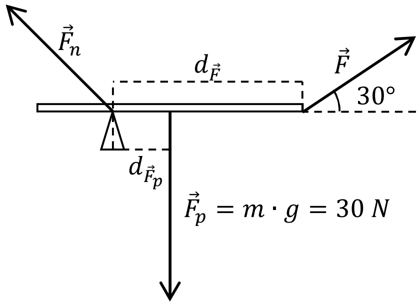
Chaque force exercée sur un corps est susceptible de le mettre en rotation. Pour déterminer si un objet subit une rotation, il faut considérer l'ensemble des moments de force. Deux approches sont alors à choix :

1. On additionne les moments de forces qui tendent à faire tourner l'objet dans le sens inverse des aiguilles de la montre et on obtient $\overset{\curvearrowleft}{M}$
   On additionne les moments de forces qui tendent à faire tourner l'objet dans le sens des aiguilles de

la montre et on obtient $\overset{\curvearrowright}{M}$.
- L'objet sera en équilibre si $\overset{\curvearrowleft}{M} = \overset{\curvearrowright}{M}$,
- il tournera autour de l'axe de rotation dans le sens inverse des aiguilles de la montre si $\overset{\curvearrowleft}{M} > \overset{\curvearrowright}{M}$,
- il tournera autour de l'axe de rotation dans le sens des aiguilles de la montre si $\overset{\curvearrowleft}{M} < \overset{\curvearrowright}{M}$

2. On considère qu'un moment de force est positif si la force fait tourner l'objet dans le sens inverse des aiguilles de la montre et négatif dans le cas contraire.
On additionne tous les moments de force et on obtient le moment total : M_{total}.
- L'objet sera en équilibre si $M_{total} = 0$,
- il tournera autour de l'axe de rotation dans le sens inverse des aiguilles de la montre si $M_{total} > 0$,
- il tournera autour de l'axe de rotation dans le sens des aiguilles de la montre si $M_{total} < 0$

Quelle force F, dirigée à 30° par rapport à l'horizontal, faut-il appliquer pour que la barre (2m et 3kg) reste à l'équilibre, horizontalement, avec le point de rotation situé à 40 cm de l'extrémité de la barre (extrémité opposée à celle où est appliquée la force) ?
On considère que la barre est fixée au point de rotation, qu'elle ne peut pas glisser sur cet appui.
***1ère étape :** déterminer toutes les forces s'exerçant sur cette barre et les distances à l'axe de rotation :*



<u>1ère Force :</u> $\vec{F}$ force cherchée
distance à l'axe de rotation $d_{\vec{F}} = 2 - 0{,}4 = 1{,}6m$
<u>2e force :</u> $\vec{F}_p$ force de pesanteur s'exerçant au centre de gravité, soit au milieu de la barre.
distance à l'axe de rotation $d_{\vec{F}_p} = 1 - 0{,}4 = 0{,}6m$
<u>3e force :</u> $\vec{F}_n$ force de réaction entre la barre et le point de rotation. Cette force n'est pas perpendiculaire au plan, car sinon la barre glisserait sur la droite, rien ne s'opposerait à $\vec{F}_{\rightarrow}$.
Cette force de réaction peut être non perpendiculaire au plan, car la barre est fixée au point de rotation.
distance à l'axe de rotation $d_{\vec{F}_n} = 0m$
***2e étape :** choisir entre utiliser l'équilibre des forces ou l'équilibre des moments.*
Dans ce cas présent, nous avons deux forces inconnues et l'angle formé par $\vec{F}_n$ avec l'horizontale.
L'équilibre des forces nous donnera deux équations pour trois inconnues, cette méthode ne peut pas marcher.
L'équilibre des moments fonctionnera dans le cas présent car $d_{\vec{F}_n} = 0m$, donc $M_{\vec{F}_n} = F_n \cdot d_{\vec{F}_n} = 0\ Nm$.
Ainsi les inconnues F_n et l'angle entre $\vec{F}_n$ et l'horizontal disparaitront :

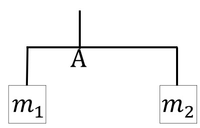
$$\begin{aligned}\overset{\curvearrowleft}{M} &= \overset{\curvearrowright}{M}\\ M_{\vec{F}} &= M_{\vec{F}_p}\\ F \cdot d_{\vec{F}} \cdot \sin 30 &= F_p \cdot d_{\vec{F}_p} \cdot \sin 90\\ F \cdot 1{,}6 \cdot \sin 30 &= 30 \cdot 0{,}6\\ F &= 22{,}5\ N\end{aligned}$$

La force cherchée $\vec{F}$ a une intensité de 22,5 N.

Remarque : l'utilisation à ce stade de l'équilibre des forces permettrait de trouver l'intensité de la force $\vec{F}_n$ et l'angle entre $\vec{F}_n$ et l'horizontal.

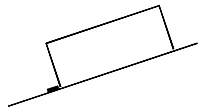
3.3.2 Série d'exercices

Exercice 94 On veut réaliser un mobile avec une baguette de 20cm et dont la masse est de 20g. On accroche une décoration à chaque extrémité ; les décorations ont des masses respectivement de 40g et 60g. Où doit-on accrocher (point A) le fil de suspension pour que la baguette du mobile reste horizontale à l'équilibre ?



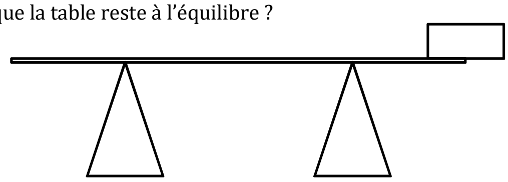
Exercice 95 On découpe un carton en forme de triangle pour en faire un mobile. Où accrocher le fil pour que le triangle reste horizontal à l'équilibre ? Justifie.

Exercice 96 On pose un parallélépipède rectangle de 10x20x30cm sur un plan inclinable, contre un petit arrêt qui l'empêche de glisser. Ensuite, on incline le plan jusqu'à la limite de basculement du bloc.
Quel est l'angle maximal entre le plan et l'horizontale ? Dépend-il du choix de la face posée sur le plan ?



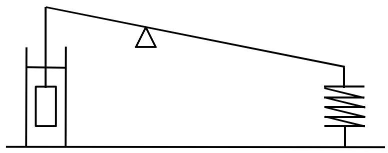
Exercice 97 Une table de 2m de longueur est formée d'une planche de 20kg posée sur deux chevalets. Les chevalets sont placés à 40cm du bord de la table. On pose sur un des bords de la table une masse m_1. Cette masse est tout juste en équilibre sur le plateau de la table.

1. Quelle est la masse maximale de m_1 pour que le plateau de la table reste à l'équilibre ?
2. On place une autre masse m_2, à cheval sur le bord libre de la table, à l'opposé de m_1. Si la masse m_1 est de 45 kg, quelles sont les valeurs limites de m_2 pour que la table reste à l'équilibre ?



Exercice 98 On a suspendu une masse m_a d'acier à l'extrémité d'un balancier de masse m_b, à une distance d_1 d'un axe de rotation. La masse d'acier est entièrement immergée dans de l'eau. L'autre extrémité du balancier et le sol sont reliés par un ressort de raideur k. Lorsque le ressort est au repos la distance qui sépare ses points de fixation est l_0. La distance entre le point d'attache du ressort sur le balancier et l'axe de rotation est appelée d_2 et h est la hauteur de l'axe de rotation par rapport au sol. On appelle d_r, la déformation du ressort.
Quand le système est à l'équilibre, le ressort est vertical et le balancier fait un angle de 30° par rapport à l'horizontale.
On connaît : $m_a = 3kg, m_b = 1kg, d_1 = 50cm, d_2 = 150cm, k = 10N/m, l_0 = 15cm$

1. Quelle force exerce la masse d'acier sur le balancier ?
2. Quel moment de force est exercé par la masse d'acier sur le balancier ?
3. Quel moment de force est exercé par le poids du balancier ?
4. Le ressort sera-t-il comprimé ou étiré ? Comment changer la masse du balancier pour inverser la réponse ?
5. Quelle force est exercée par le ressort sur le balancier ?
6. Quel moment de force est exercé sur le balancier par le ressort ?
7. Quelle est la déformation du ressort lorsque le balancier est à l'équilibre
8. A quelle hauteur a été placé l'axe de rotation ?



3.4 Travail d'une force

La notion de travail d'une force permet de traduire, dans certains cas, la notion d'effort physique, de fatigue.

- *Lorsqu'on gravit une montagne, la fatigue ressentie est liée au travail de la force de pesanteur de notre corps.*
- *Lorsqu'on pousse une voiture pour la déplacer, l'effort à fournir est lié au travail de la force de poussée.*

Dans d'autres cas, malgré une fatigue ressentie, il n'y a pas de travail des forces.

- *Une personne, portant sur ses épaules un sac de 50kg, reste immobile. Son travail sera nul, malgré une importante sensation de fatigue.*
- *Un haltérophile effectuera un travail pour soulever les haltères, par contre lorsqu'il reste immobile en maintenant les haltères au-dessus de la tête, il n'effectue plus de travail.*

La notion de travail est en fait liée au déplacement du point d'application d'une force : dans chaque exemple ci-dessus, le travail existe dès qu'il y a mouvement.
On sent intuitivement que le travail d'une force est d'autant plus grand que :

1. la force est grande,
2. le déplacement est grand.

Pour gravir une montagne, une personne devra fournir un effort d'autant plus grand que :
1. *son sac à dos est lourd → grande force de pesanteur*
2. *la montagne est haute → grand déplacement*

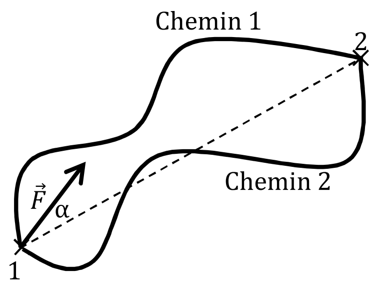
On considère un système sur lequel agit une force.
Le **travail de cette force** est l'énergie échangée entre le système et l'extérieur pour déplacer le point d'application de cette force. Son unité est donc le joule.
Ce travail est **positif** s'il ne faut pas fournir de l'énergie pour effectuer le déplacement de la force : c'est le cas si la force **favorise** le déplacement, on parle alors de **travail moteur.** L'énergie est alors **transférée du système vers l'extérieur.**
Ce travail est **négatif** s'il faut fournir de l'énergie pour effectuer le déplacement de la force : c'est le cas si la force **s'oppose au déplacement**, on parle alors de **travail résistant.** L'énergie est alors **transférée de l'extérieur vers le système.**

La force de frottement cause toujours un travail résistant, car elle s'oppose toujours au mouvement.

La force de pesanteur causera alternativement des travaux moteur ou résistant, selon que le mouvement sera en montée ou en descente.

3.4.1 Travail d'une force constante

Le travail pour déplacer une force constante $\vec{F}$ entre un point 1 et un point 2, ne dépend pas du chemin de déplacement et vaut :
$\boldsymbol{A_{1,2} = F \cdot d \cdot \cos\alpha}$ où :
d est la distance entre les points 1 et 2 et α est l'angle entre la force $\vec{F}$ et la demi-droite d'origine 1, passant par 2. L'unité du travail est le joule.
Le **travail** sera **moteur,** donc **positif,** si $0° \leq \alpha < 90°$.
Le **travail** sera **résistant,** donc **négatif,** si $90° < \alpha \leq 180°$.
Si la force $\vec{F}$ **n'influence pas** le mouvement, elle **ne travaille pas.** Ceci est le cas lorsque la force est perpendiculaire au déplacement, donc $\alpha = 90°$.



d est la longueur du segment pointillé

D'après cette dernière définition, le travail de la force de pesanteur est nul si le déplacement à lieu à plat.
Ceci paraît étrange : en effet, en roulant en vélo à plat, on se rend compte qu'il faut faire un effort pour se déplacer, ce qui tend à prouver que le travail n'est pas nul.
Pour expliquer ce « paradoxe », imaginons un trajet en aller-retour à plat. A l'aller, un fort vent de face rend l'effort plus important, tandis qu'au retour, le cycliste peut « se laisser porter par le vent ». Dans les deux cas, la force de pesanteur est la même et le déplacement également et pourtant l'effort à fournir n'est pas du tout le même. Ceci prouve donc que l'effort à fournir n'est pas lié au travail de la force de pesanteur. Celui-ci est vraiment nul, comme mentionné plus haut.
Dans cet exemple, l'effort à fournir est celui pour vaincre le travail résistant, à savoir le travail des forces de frottements. A l'aller la force du vent s'oppose au déplacement et son travail est alors résistant, la force du vent est une force de frottement. L'effort à fournir sera élevé. Au retour, la force du vent contribue au déplacement, son travail est moteur. On peut comprendre que le vent diminue les forces de frottements de l'air et si sa vitesse est supérieure à celle du cycliste, seul le frottement mécanique du vélo (roulements à bille des roues) cause un travail résistant. Il ne faudra alors que peu d'énergie pour contrer ce travail résistant, voire même aucune énergie : si le vent est assez fort, il poussera le cycliste qui n'aura pas besoin de pédaler.

3.4.2 Energie cinétique de translation

En utilisant les lois de la cinématique et la 2e loi de Newton $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ ($\vec{F}$ est la force nécessaire pour causer une accélération $\vec{a}$ de la masse m), on peut montrer que le travail de la force $\vec{F}$ pour faire passer la masse m d'une vitesse nulle à la vitesse v vaut :

$$A = \frac{1}{2}mv^2$$

Ce travail correspond à l'énergie acquise par la masse m, liée à sa vitesse. On appelle cette énergie : **énergie cinétique** (de translation) :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

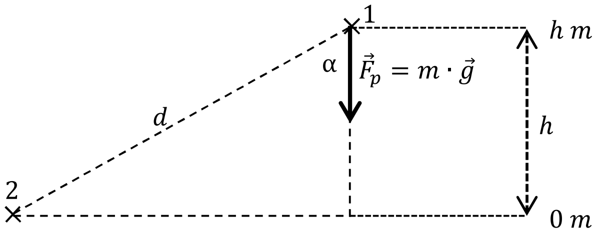
3.4.3 Energie potentielle de gravitation

Etudions le travail à effectuer pour déplacer la force de pesanteur entre les points 1 et 2.

Comme la force de pesanteur est constante, on peut appliquer la formule :

$$A_{1,2} = F_p \cdot d \cdot \cos\alpha$$

Or $d \cdot \cos\alpha = h$ (par trigonométrie), h étant la différence d'altitude entre les points 1 et 2. Si le point 2 est à l'altitude 0 m, h représente l'altitude du point 1.



On obtient alors : $A_{1,2} = m \cdot g \cdot h$

Ce travail représente l'énergie qu'on peut obtenir en faisant passer la masse m de l'altitude h à 0 m.

L'énergie potentielle de la masse m est l'énergie de la masse m liée à son altitude h : $E_p = mgh$

Remarques : le travail de la force de pesanteur ne dépend pas du chemin, mais seulement du changement d'altitude. Ainsi le travail pour lever un tonneau sur une table est le même en le portant directement du sol sur la table ou en le « roulant » le long d'un plan incliné, même s'il semble plus facile de le rouler. En effet, il faudra moins de force en le roulant, mais la distance à parcourir est plus grande...

3.4.4 Energie mécanique de translation

L'énergie mécanique de translation d'un objet est la somme des énergies potentielle et cinétique de cet objet.
$E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$, avec m la masse de l'objet, v sa vitesse et h son altitude.

3.4.4.1 Conservation de l'énergie mécanique : sans force de frottement.

Si toutes les forces agissant sur un objet sont dites conservatives (c'est-à-dire qu'elles ne dissipent pas de l'énergie hors du corps), l'énergie mécanique est conservée :
$E_m(1) = E_m(2)$, où 1 et 2 sont deux points d'observation.

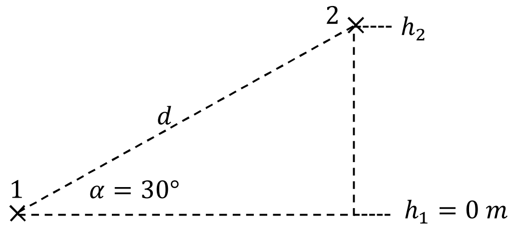
Remarques : les seules forces non-conservatives que nous avons étudiées sont les forces de frottements. Donc, en l'absence de forces de frottement, l'énergie mécanique est conservée.

> *On lance une masse de 300g le long d'un plan incliné à 30° avec une vitesse de 5m/s. Quelle distance sera parcourue par cette masse jusqu'au haut de sa trajectoire, si on néglige le frottement ?*
>
> *Considérons le point 1 du lâcher de la masse et le point 2 du sommet de la trajectoire. Comme on néglige les frottements, on considérera que l'énergie mécanique est conservée entre les points 1 et 2.*

$$\begin{aligned}
E_{mec}(1) &= E_{mec}(2)\\
E_c(1)+E_p(1) &= E_c(2)+E_p(2)\\
\frac{1}{2}mv_1^2+mgh_1 &= \frac{1}{2}mv_2^2+mgh_2 \quad |v_2 = 0\ (sommet)\ et\ fixons\ l'altitude\ h_1 = 0\ m\ au\ point\ 1\\
\frac{1}{2}mv_1^2 &= mgh_2 \quad | \div (mg)\\
h_2 &= \frac{v_1^2}{2g}\\
&\simeq 1{,}25m
\end{aligned}$$

La masse atteint une altitude de 1,25 m au-dessus du point 1. Avec la trigonométrie, on peut calculer la distance parcourue d :

$$\begin{aligned}
sin\,30° &= \frac{h_2}{d}\\
d &= \frac{h_2}{sin\,30°}\\
&\simeq 2{,}5\ m
\end{aligned}$$

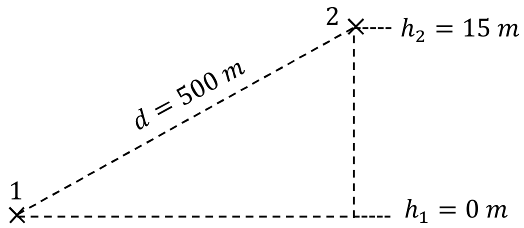


La distance parcourue est d'environ 2,5 m.

3.4.4.2 Variation de l'énergie mécanique : avec forces de frottement

Si l'énergie mécanique varie entre deux points 1 et 2, sa variation correspond au travail des forces non-conservatives (forces de frottement pour notre cours) :
$A_{1,2}^{nc} = E_m(2) - E_m(1)$, où 1 et 2 sont deux points d'observation.

Un wagonnet de 1 tonne lancé à la vitesse de 20 m/s sur un rail en pente s'arrête après avoir parcouru une distance de 500m et gravi une dénivellation de 15 m. Calculer l'intensité des forces de frottements, supposées constantes.



L'énergie mécanique varie dans ce problème, car les forces de frottement dissipent de l'énergie.

On sait : $v_1 = 20m/s$ *et* $v_2 = 0\ m/s$ *(arrêt). En fixant* $h_1 = 0\ m$*, on obtient* $h_2 = 15\ m$
Le travail des forces de frottement correspond à la variation de l'énergie mécanique :

$$\begin{aligned}
A_{1,2}^{nc} &= E_m(2) - E_m(1) \quad |\vec{F}_{fr} est\ parallèle\ au\ déplacement\\
-F_{fr}\cdot d &= \frac{1}{2}mv_2^2+mgh_2-\left(\frac{1}{2}mv_1^2+mgh_1\right) \quad | \div(-d)\ et\ h_1 = 0\ m\ et\ v_2 = 0\ m/s\\
F_{fr} &= -\frac{mgh_2-\frac{1}{2}mv_1^2}{d}\\
&= -\frac{1000\cdot 10\cdot 15-\frac{1}{2}1000\cdot 20^2}{500}\\
&\simeq 100N
\end{aligned}$$

3.4.5 Série d'exercices

Exercice 99 Un homme tire sur un wagonnet de 800 kg avec une force de 500N sur une distance de 40m. L'homme étant placé sur le côté du rail, la corde sur laquelle il tire fait un angle de 30° par rapport au rail. Calculer le travail effectué par cet homme.

Exercice 100 Pour déplacer un chariot sur une route plane, il faut exercer une force de 250N.
1. Pour quelle raison doit-on exercer une force ?
2. Quel est le travail de cette force pour un déplacement de 1 km ?

Exercice 101 Un tuyau métallique de 3m de longueur et de diamètre négligeable est posé horizontalement sur le sol. La masse de ce tuyau est de 8 kg. Quel travail doit-on fournir pour le faire pivoter sur une de ces extrémités et l'amener en position verticale ?

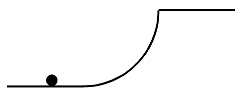
Exercice 102 Une voiture de 1 tonne entre en collision frontale avec un 2e véhicule. Est-il « préférable » qu'il s'agisse :
a. d'un camion de 12 tonnes circulant à 36 km/h
b. d'une autre voiture de 1,5 tonne circulant à 100 km/h
Justifie.

Exercice 103 Une bille de 200 g roule le long d'un rail horizontal avec une vitesse de 9 m/s. Le rail forme ensuite un anneau vertical de 2,8 m de hauteur (sorte de montagne russe). On néglige les forces de frottements et le diamètre de la boule.
1. Quelle sera la vitesse de la bille au sommet de l'anneau ?
2. Quelle sera la vitesse de la bille à la sortie de l'anneau ?

Exercice 104 Une balle de 100 g est lâchée d'une hauteur de 1m et rebondit jusqu'à une hauteur de 80 cm. Quelle énergie s'est dissipée durant cette opération.

Exercice 105 Un cycliste et son vélo ont une masse de 80 kg. La route qu'il gravit a une longueur de 5 km pour une dénivellation de 300m. Les frottements opposent à son déplacement une force constante de 100N.
1. Quelle énergie aura-t-il dépensée pour atteindre le haut de la pente ? (Départ et arrivée sont à l'arrêt)
2. Sachant que le rendement d'un corps humain est d'environ 20%, combien faudra-t-il manger de « Mars » pour obtenir cette énergie ?

Exercice 106 Quelle vitesse initiale minimale faut-il donner à la bille pour qu'elle atteigne le plat, sachant que le rayon du quart de cercle est de 5m ? On néglige les forces de frottements et le diamètre de la bille.



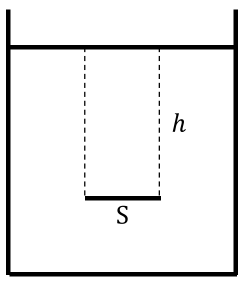
3.5 Pression

A choisir le moindre mal : se faire marcher sur la main par une personne chaussée de baskets ou de patins à glace ?
La force exercée par cette personne sera la même dans les deux cas : ce sera sa force de pesanteur. Pourtant, l'effet de cette force ne sera pas du tout le même. On l'explique en considérant le fait que la force se répartit sur une surface différente : plus la surface est petite, plus l'effet sera grand.

La **pression** est une grandeur physique qui caractérise le contact entre deux corps. Lorsqu'une force $\vec{F}$ est exercée sur une surface S, on définit la pression comme :
$p = \frac{F_\perp}{S}$
$F_\perp$ est la composante de $\vec{F}$ perpendiculaire à la surface S.
L'unité de la pression est donc $\left[\frac{N}{m^2}\right]$, qu'on appellera le pascal $[Pa]$.
Le bar et l'atmosphère est encore souvent utilisé : $1bar = 100'000Pa \simeq 1atm$

3.5.1 Pression dans les fluides

Un objet de surface S immergé dans un fluide subira une pression, liée au poids du liquide au-dessus de l'objet. On obtient en partant de la définition de la pression :



$$\begin{aligned} p_{fluide\to S} &= \frac{F_{p,fluide}}{S} \\ &= \frac{m_{fluide}\cdot g}{S} && |or\ m_{fluide} = \rho_{fluide}\cdot V\ et\ V = S\cdot h \\ &= \frac{\rho_{fluide}\cdot S\cdot h\cdot g}{S} && |Simplification \\ &= \rho_{fluide}\cdot g\cdot h \end{aligned}$$

On a donc obtenu :

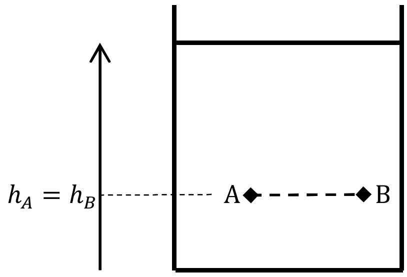
La **pression exercée par un fluide** sur une surface S horizontale dépend de la nature du fluide et de la hauteur du fluide sur S. En considérant une surface S très petite, on généralise ce résultat à un point dans le fluide :
$p_{A,fluide} = \rho_{fluide} \cdot g \cdot h$
La pression totale au point A dans un fluide est donnée par :
$p_A = p_{surface\ du\ fluide} + p_{A,fluide} = p_{surface\ du\ fluide} + \rho_{fluide} \cdot g \cdot h$,
avec p_A la pression totale et $p_{surface\ du\ fluide}$, la pression exercée sur la surface du fluide. ($p_{surface}$ est souvent la pression atmosphérique)

3.5.2 Condition d'équilibre d'un liquide

Deux points A et B, situés dans un même liquide au repos (sans écoulement), à la même altitude sont soumis à des pressions identiques :

$$p_A = p_B$$

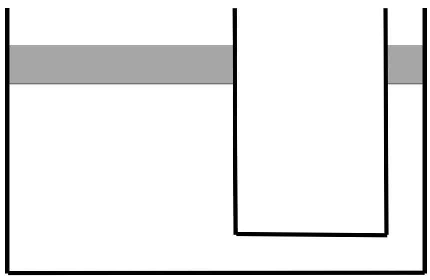
Si $p_A \neq p_B$, il y a un écoulement du liquide de la plus grande pression vers la plus basse pression.



3.5.3 Principe de Pascal

Le liquide étant incompressible, toute modification de la pression en un point d'un liquide est transmise en tout point du liquide.

Si on place des masses sur les deux pistons en gris de sorte à ce que les pistons restent à la même hauteur l'un par rapport à l'autre, la pression dans le liquide va augmenter partout de la même manière.
Il sera impossible de faire descendre les deux pistons. Si l'un descend, l'autre doit monter.
Attention, si le grand piston descend, le petit piston montera beaucoup plus que ce qu'est descendu l'autre : le volume de liquide déplacer sera le même :

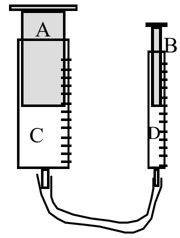


$$S_1 \cdot \Delta h_1 = S_2 \cdot \Delta h_2$$

Δh es la variation de hauteur des pistons.

3.5.4 Série d'exercices

Exercice 107 Deux seringues de diamètres différents sont reliées par un tube rempli d'eau (voir ci-dessous.) Répondre par vrai ou faux



...... Il faut la même force pour enfoncer le piston A que pour enfoncer le piston B.

...... Il faut plus de force pour enfoncer le piston A que pour enfoncer le piston B.

...... Quand on appuie sur le piston A, la pression est plus grande dans le réservoir C.

...... Quand on appuie sur le piston A, la pression est la même dans les réservoirs C et D.

...... Quand le piston A avance de 1 cm, le piston B recule de 1 cm.

...... Quand le piston A avance de 1 cm, le piston B recule de plus de1 cm.

Exercice 108
1. Quelle est la pression exercée par les pattes d'un éléphant de 5 tonnes, si l'on admet que son poids est réparti uniformément sur les quatre pattes (disques d'environ 30cm de diamètre) ?
2. Quelle est la pression exercée par les sabots d'une vache de 600 kg, si l'on admet que son poids est réparti uniformément sur les quatre sabots (disques d'environ 10cm de diamètre) ?
3. Quelle est la pression exercée par les talons aiguille d'une femme de 60 kg, si l'on admet que le quart de son poids est réparti uniformément sur les deux talons (surface d'environ $1cm^2$) ?

Exercice 109 Une collision navale provoque une voie d'eau à 3 mètres sous la ligne de flottaison d'un bateau. L'aire du trou dans la coque est de 100 cm^2.
Quelle est l'intensité minimale de la force qu'il faut exercer sur un tampon pour colmater la voie d'eau ?

Exercice 110
1. Le tube en U ci-après est rempli d'eau.
   Complète le dessin en indiquant la hauteur exacte de l'eau dans le tube fin.
2. Le tube en U ci-après est rempli d'eau et de pétrole.
   Calcule la hauteur h2.

Schéma question 1

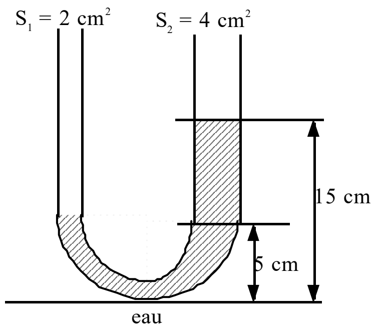
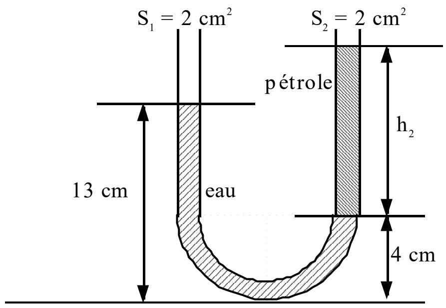


Schéma question 2



Exercice 111 Une baignoire en forme de parallélépipède rectangle mesure 70 cm de large sur 140 cm de long et 50 cm de profondeur et elle contient 250 litres d'eau.
Quelle force minimale faut-il exercer pour enlever le bouchon circulaire de 6 cm de diamètre situé au fond ?

Exercice 112 On considère un tube en U dont une branche a une section de $4cm^2$ et l'autre $1cm^2$. On y verse de la glycérine de façon à remplir le fond du tube. Dans la branche de $4cm^2$ on verse 5 dl d'eau. Sur cette eau, il y a un piston d'acier de 5cm de hauteur. Dans la branche de $1cm^2$, on a versé 2dl d'alcool, sur lequel on a placé un piston en acier de 10cm de hauteur.
1. Calcule la pression à l'interface eau-glycérine et à l'interface alcool-glycérine, sans tenir compte de la pression atmosphérique. Attention aux unités…
2. Sur quel piston doit-on appuyer pour maintenir la surface eau-glycérine à même hauteur que la surface alcool-glycérine ? (justifie) Avec quelle force ? Indication : si tu n'as pas réussi le point 1, utilise $p_{eau-glycérine} = 16'000\ Pa$ et $p_{alcool-glycérine} = 24'000\ Pa$

4 OPTIQUE – ONDE

La lumière est un phénomène complexe du point de vue de la physique. Il existe deux approches de la lumière qui cohabitent :

1. la nature corpusculaire de la lumière : photons, « grain de lumière » émis lors du retour d'un électron dans sa couche électronique.
2. la nature ondulatoire de la lumière : la lumière est une onde électromagnétique qui se propage, un peu à l'image des ondes qui se propagent dans de l'eau lorsqu'on y jette une pierre. Les caractéristiques de cette onde (longueur d'onde et fréquence) déterminent par exemple la couleur, mais aussi l'énergie transportée par la lumière.

Ce cours n'aborde que brièvement ces notions complexes et analysera plutôt la lumière sous sa forme la plus triviale : l'optique géométrique dont le principe de base consiste à voir la lumière comme un ensemble de « rayons lumineux ».

4.1 Propagation de la lumière

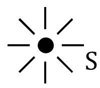
4.1.1 Source lumineuse – point lumineux

Un **objet lumineux ou source lumineuse primaire** est un corps dont chaque point de la surface émet de la lumière dans toutes les directions de l'espace.

La plupart des objets qui nous entourent ne sont pas lumineux par eux-mêmes. Ils ne deviennent lumineux que si on les éclaire. Dans ce cas, chaque point de leur surface, lorsqu'il est éclairé, réémet de la lumière dans toutes les directions de l'espace. On dit alors que la surface de ces objets **diffuse** la lumière.

L'objet diffusant la lumière est une **source lumineuse secondaire.**

Un **point lumineux ou source de lumière ponctuelle** est un objet lumineux que l'on peut assimiler à un point. La surface de tout objet lumineux peut être considérée comme la juxtaposition d'un très grand nombre de points lumineux.



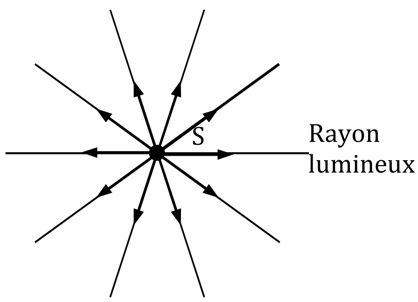
Remarques :

1. Un objet qui ne diffuse pas la lumière apparaît noir à l'œil humain.
2. Souvent, les surfaces, non seulement diffusent la lumière, mais en plus, réfléchissent une partie de la lumière. Dans ce cas, la lumière est renvoyée dans une direction bien précise. C'est cette lumière réfléchie qui donne un aspect brillant à certaines surfaces. Les objets, qui comme les miroirs, réfléchissent uniquement la lumière ne sont donc pas des objets lumineux.
3. Certains corps se laissent traverser par la lumière sans que cette dernière soit diffusée. Ces corps, qui sont dits **transparents**, ne peuvent être considérés comme des objets lumineux. Par exemple, une vitre très propre ne diffuse pas la lumière ; elle paraît d'ailleurs invisible !

4.1.2 Propagation de la lumière

Dans un milieu transparent homogène, la lumière se déplace suivant des demi-droites issues des points lumineux. Si la lumière subit des déviations, à l'aide de miroir par exemple, elle se déplace suivant des lignes brisées.

On appelle **rayons lumineux**, les lignes suivant lesquelles la lumière se propage.



4.1.3 Récepteur de la lumière

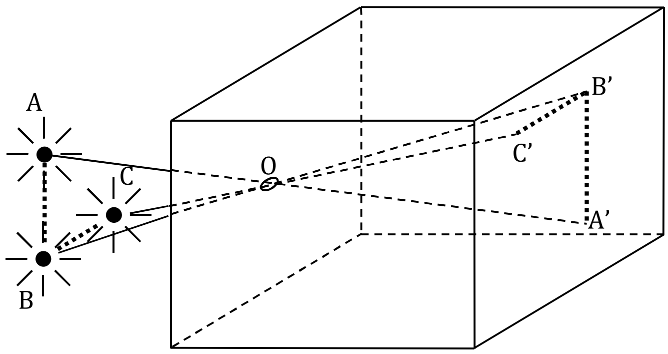
On appelle **récepteur de lumière**, un dispositif qui permet de recevoir et utiliser de la lumière.

L'œil est l'exemple le plus connu.
Attention : Un objet ne peut être vu par une personne que si de la lumière, émise depuis cet objet ou diffusée par celui-ci, pénètre dans l'œil de l'observateur. L'œil reçoit de la lumière, la lumière vient à l'œil et non l'inverse !

Notons également comme exemple les pellicules ou papiers photographiques et leurs successeurs les cellules photoélectriques.

4.1.4 Boite noire

Une **chambre noire** est une boîte étanche à la lumière ayant sur l'une de ses faces un petit trou, appelé **diaphragme**. La lumière, qui entre par le diaphragme dans la chambre noire, forme, sur la face opposée, une image des objets lumineux placés devant le diaphragme.



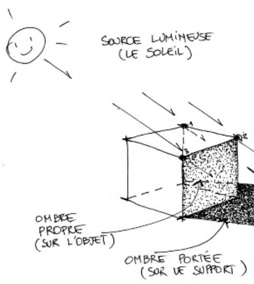
Le théorème de Thalès donne les relations suivantes :

$$\overbrace{\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'C'}{BC}}^{\text{Rapport des tailles : image / objet}} = \overbrace{\frac{A'O}{AO} = \frac{B'O}{BO} = \frac{C'O}{CO}}^{\text{Rapport des distances au diaphragme : image – objet}}$$

Cette relation est valable lorsque l'objet lumineux se trouve dans un plan parallèle à celui sur lequel se forme l'image.

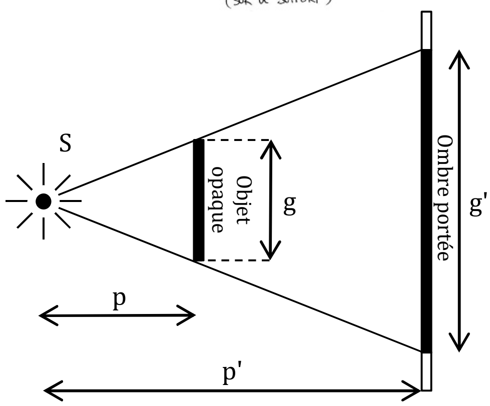
4.1.5 Ombre et pénombre

Un objet opaque, placé entre un point lumineux et un écran, intercepte les rayons lumineux et détermine de cette manière une zone non éclairée sur l'arrière de l'objet, appelé **ombre propre de l'objet** et une sur l'écran, appelée **ombre projetée de l'objet**. La zone entre l'ombre propre et l'ombre projetée n'est pas traversée par des rayons lumineux, elle est appelée **zone d'ombre**.



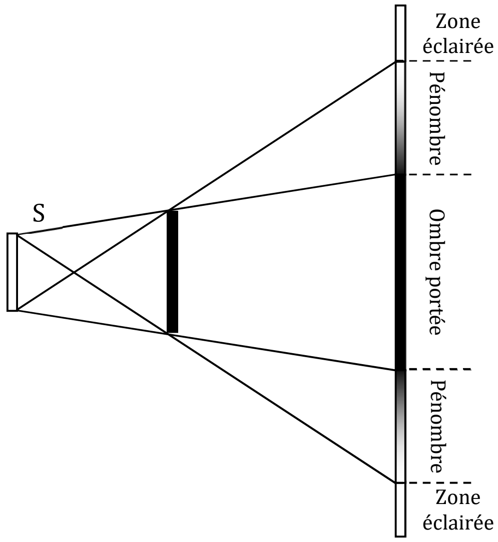
Pour une source ponctuelle, lorsque l'objet opaque et l'écran sont parallèles, le théorème de Thalès s'applique :

$$\frac{g'}{g} = \frac{p'}{p}$$



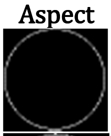
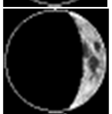
Lorsqu'une source lumineuse est étendue, on observe une zone de l'écran sur laquelle seule une partie de la lumière arrive. On parle de **pénombre**.

Cette zone d'éclairement partielle est difficile à délimiter en pratique car il s'agit d'un dégradé lumineux entre l'ombre et la zone éclairée.
En théorie, pour établir les limites, on imagine qu'il y a une source ponctuelle à chaque extrémité de la source étendue. On établit alors pour ces deux sources les zones d'ombre. L'ombre portée se situe dans les zones d'ombre de chaque source ponctuelle. La zone de pénombre n'est éclairée que par une seule des deux sources lumineuses.



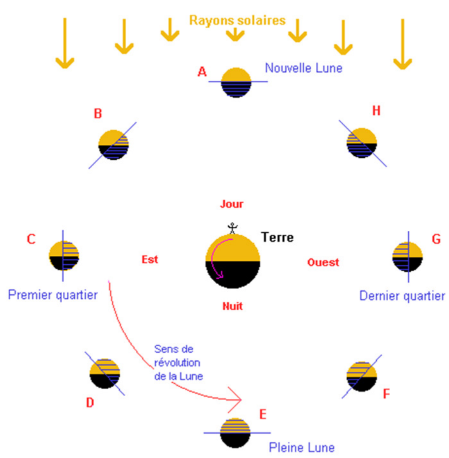
4.1.6 Phases de la lune

Il est de connaissances générales que l'apparence de la Lune varie à chaque soir. Elle est tantôt pleine et tantôt à demi pleine. On peut également percevoir qu'un petit morceau ou même ne pas l'apercevoir du tout. Ces différentes configurations de la Lune se répètent sans fin depuis la nuit des temps. La succession régulière de l'apparence de la Lune se nomme le **cycle lunaire**.
Les différentes formes de la Lune telles que perçues par un observateur sur Terre se nomment les phases de la Lune. Le cycle lunaire s'étend sur 29,5 jours; il correspond à une rotation complète de la Lune autour de la Terre. Voici les principales formes de la Lune et leur nom:

Nom	Aspect	Nom	Aspect
1 A- Nouvelle lune		5 E- Pleine lune	
2 B- Premier croissant de lune		6 F- Lune gibbeuse décroissante	
3 C- Premier quartier de lune		7 G- Dernier quartier de lune	
4 D- Lune gibbeuse croissante		8 H- Dernier croissant de lune	

Le mécanisme de la variation de l'apparence de la Lune au cours d'un mois s'explique simplement. La Lune n'est pas une source de lumière. Elle ne fait que réfléchir la lumière du soleil sur la Terre. La Lune réfléchit, en fait, qu'une petite partie de la lumière du soleil qui l'atteint; soit environ 7 %.

Le schéma suivant montre la Lune à différentes positions sur son orbite autour de la Terre :



Remarquez que la face éclairée de la Lune est toujours du même côté car la lumière solaire vient toujours du même côté.

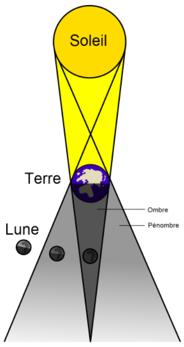
La première phase lunaire est la nouvelle lune. Cette phase est caractérisée par une absence de Lune dans le ciel. En ce moment, la Lune se situe entre le Soleil et la Terre. Aucune lumière réfléchie par la Lune ne peut parvenir à un observateur car sa face obscure nous fait face.

Peu à peu, la face éclairée de la Lune nous devient visible à mesure de son déplacement autour de la Terre. Un mince croissant est d'abord perçu le soir. Mais, de jour en jour, le croissant s'épaissit et reste visible de plus en plus tard.

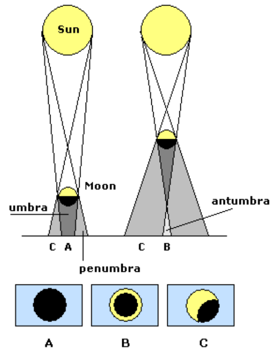
Après la pleine lune, la partie visible diminue. Le dernier quartier est visible durant la deuxième partie de la nuit alors que le dernier croissant est visible seulement tôt le matin.

4.1.7 Eclipses

Eclipse lunaire :
Une éclipse lunaire se produit lorsque la Lune se trouve dans l'ombre de la Terre. La Lune n'est donc plus visible, car la lumière du soleil ne l'atteint pas. Elle ne peut réfléchir la lumière sur Terre. Cette configuration ne peut donc se produire uniquement durant la pleine lune.



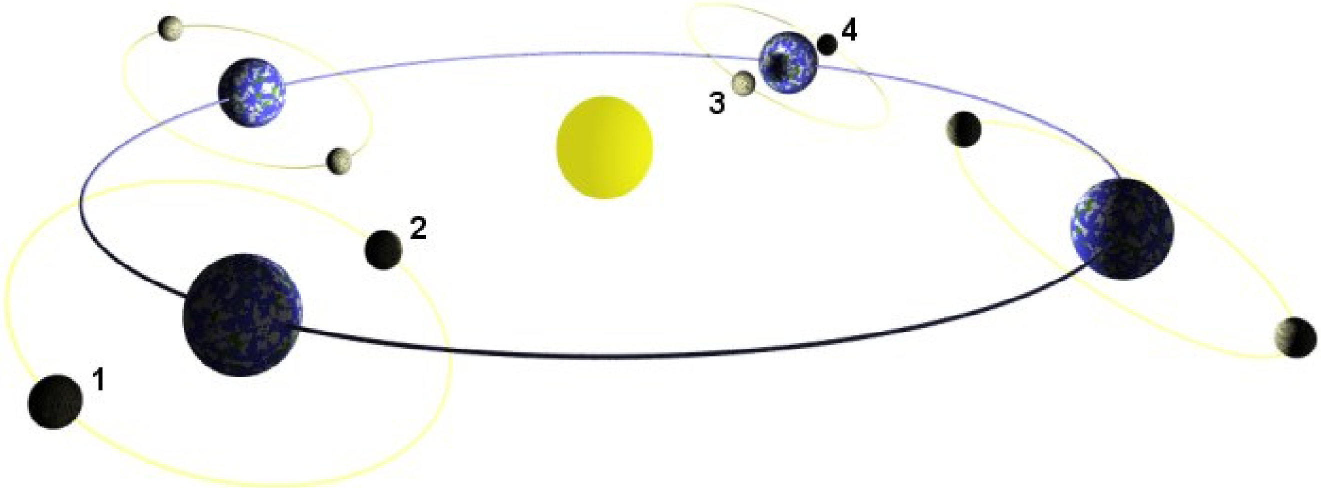
Eclipse solaire :
Une éclipse solaire se produit lorsque la Lune se place devant le Soleil, occultant totalement ou partiellement l'image du Soleil depuis la Terre. Cette configuration peut se produire uniquement durant la nouvelle lune.



A Éclipse totale dans l'ombre.
B Éclipse annulaire dans l'anté-ombre.
C Éclipse partielle dans la pénombre.

Pourquoi n'y a-t-il pas d'éclipses lunaires ou solaires lors de chaque nouvelle ou pleine lune ?

Comme le plan orbital de la Lune est incliné de 5° par rapport au plan orbital de la Terre (l'écliptique), les alignements « Soleil – Terre – Lune » et « Soleil – Lune – Terre» ne sont pas fréquents. Le schéma ci-dessous illustre les différentes situations.



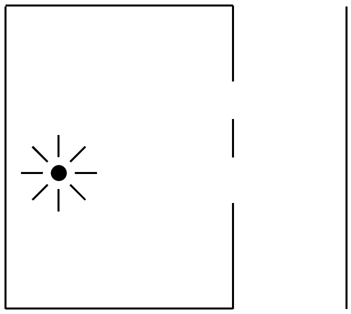
Les éclipses lunaires ne peuvent survenir que pour les situations 1 et 4, tandis que les éclipses solaires n'arrivent que pour les situations 2 et 3.

Dans les autres situations, la Lune ne passe pas dans le cône d'ombre de la Terre, il n'y a donc pas d'éclipse lunaire. De même l'ombre de la Lune ne porte pas sur la Terre.

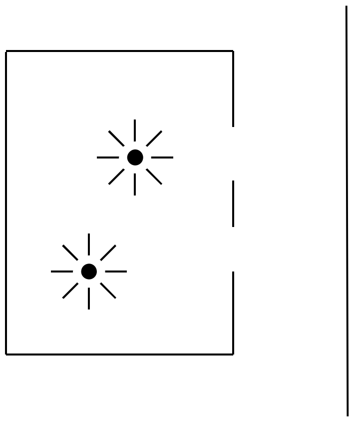
4.1.8 Série d'exercices

Exercice 113 Dessiner les différentes zones d'éclairage.

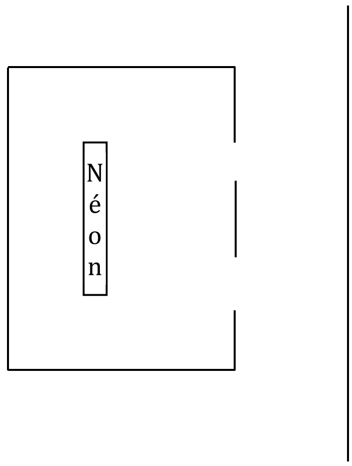
1.



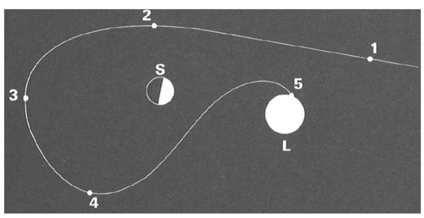
2.



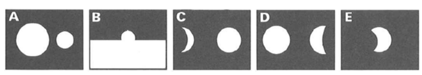
3.



Exercice 114 On considère la situation suivante: une lampe sphérique L est située à proximité d'une boule de sagex S. La seule source de lumière est constituée par la lampe L. Un papillon de nuit, après avoir passé près de la lampe, tourne autour de la boule, puis vient se poser sur la lampe. La figure ci-dessous à gauche représente cette situation vue depuis dessus.

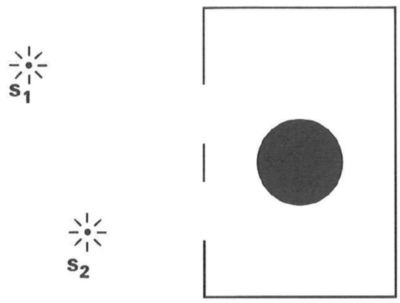


Les figures A, B, C, D et E représentent diverses vues perçues par les yeux du papillon pendant son vol (en supposant qu'ils sont semblables aux yeux humains, ce qui est faux bien entendu). Ces vues correspondent chacune à l'une des cinq positions numérotées sur le trajet du papillon



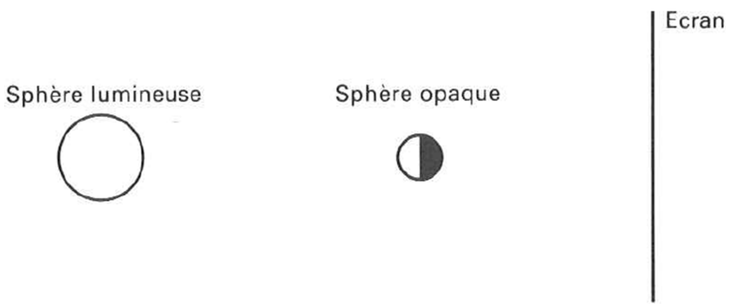
Mettre en relation chaque vue avec chaque numéro.

Exercice 115 Dessiner les zones d'ombre et de pénombre à l'intérieur de la boîte. Cette dernière est munie de deux ouvertures et contient un objet opaque de section circulaire.



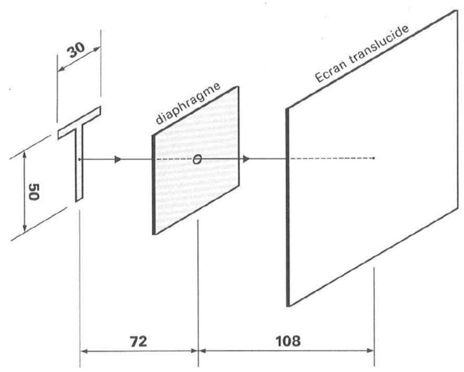
Exercice 116 La sphère lumineuse éclaire l'écran. La sphère opaque crée, sur l'écran, une zone d'ombre et une zone de pénombre.

1. Dessiner ces zones sur l'écran.
2. Peut-on, en réalité, distinguer les limites de la pénombre?



Exercice 117 Un T lumineux est placé devant un diaphragme à trou circulaire.

1. Esquisser l'image du T sur l'écran translucide.
2. Calculer les dimensions de l'image du T (données en mm).



Exercice 118 A l'aide d'une chambre noire dont la base en papier calque est un carré de 10cm de côté et dont la profondeur maximale mesure 20cm, on observe un objet de 15m de hauteur situé à une distance de 20m.

1. Détermine la grandeur de l'image obtenue en fonction du réglage de la profondeur p' de la chambre noire.
2. Déduis-en le réglage optimal pour obtenir la plus grande image entière possible.

Exercice 119 Quelle est la longueur de l'ombre portée sur le sol d'un homme de 1m80 se tenant debout, lorsque celui-ci se trouve à 2m de la verticale passant une lampe ? Cette lampe est fixée à une hauteur de 2m50 par rapport au sol.

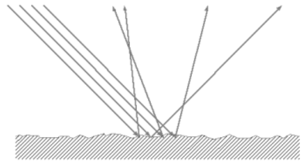
Exercice 120 Une ampoule située à une hauteur de 2,5m éclaire une personne et projette une ombre de 1mètre 40 sur un mur vertical situé à 2m de la personne. La distance entre la personne et la verticale passant par la lampe est de 2,5m. Calcule la hauteur de la personne.

Exercice 121 Une planète dont le rayon est de 8000 km se trouve à $160 \cdot 10^6$ km de son étoile dont le rayon mesure $8 \cdot 10^5$ km. A quelle distance minimale de la planète doit se trouver un satellite pour que celui-ci puisse se trouver dans l'anté-ombre de la planète ?

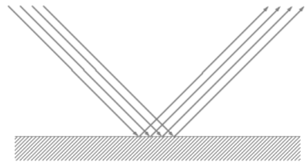
4.2 Réflexion

La réflexion de la lumière peut être **spéculaire** ou bien **diffuse** suivant la nature de l'interface. Les lois géométriques de la réflexion ne s'appliquent qu'à la réflexion spéculaire ; il faut faire appel à des modélisations plus complexes pour traiter la réflexion diffuse.

La **réflexion diffuse** intervient sur les interfaces irrégulières, la lumière est réfléchie dans un grand nombre de directions et l'énergie du rayon incident est redistribuée dans une multitude de rayons réfléchis. Cette diffusion permet de créer, de la manière la plus simple possible, une source ponctuelle (dite isogène) à partir du simple impact d'un seul rayon lumineux sur une surface diffusante. Un exemple d'application : l'écran de cinéma.

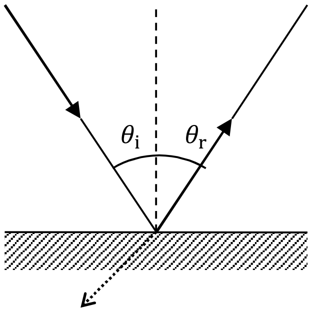


La **réflexion est dite spéculaire** lorsque le rayon incident donne naissance à un rayon réfléchi unique. Idéalement, l'énergie du rayon incident se retrouve totalement dans le rayon réfléchi, en pratique une partie de l'énergie peut être absorbée ou diffusée au niveau de l'interface.
La qualité de la réflexion dépend de la qualité de l'interface, dès que la taille des défauts de l'interface est inférieure ou de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, l'interface tend à devenir parfaitement réfléchissante. C'est pourquoi une surface de métal brut qui diffuse fortement devient parfaitement réfléchissante quand on la polit (on l'abrase jusqu'à ce que la taille des défauts soit comparable à la longueur d'onde de la lumière).



4.2.1 Loi de Snell-Descartes pour la réflexion

Le rayon lumineux est dit **incident** avant d'avoir rencontré la surface réfléchissante, il est dit **réfléchi** après.
Le point de rencontre du rayon incident et de la surface réfléchissante est appelé **point d'incidence.**
La droite orthogonale à la surface réfléchissante au point d'incidence est appelée **normale** (à la surface réfléchissante).
Le plan contenant le rayon incident et la normale à la surface réfléchissante au point d'incidence est dit **plan d'incidence.**
L'angle orienté $\boldsymbol{\theta_i}$ pris entre la normale au point d'incidence et le rayon incident est dit **angle d'incidence.**
L'angle orienté $\boldsymbol{\theta_r}$ pris entre la normale au point d'incidence et le rayon réfléchi est dit **angle de réflexion.**



Moyennant ces définitions la loi de la réflexion s'énonce ainsi :

1. le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans le plan d'incidence.
2. $\theta_i = \theta_r$

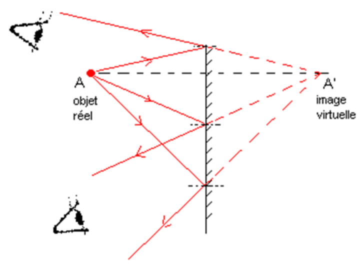
4.2.2 Miroir et image

Un **miroir plan** est, en optique, une surface plane parfaitement réfléchissante. La **réflexion** est **totale** : aucun rayon ne traverse le miroir.

Lorsqu'on observe une vitre, il arrive qu'on aperçoive son image, comme si la vitre était en partie miroir. En réalité, seule une partie des rayons sont réfléchis ; l'autre partie traverse la vitre et poursuit son chemin. On parle dans ce cas de ***réflexion partielle***, et la vitre est appelée un dioptre (séparation de deux milieux, ici : air-verre).

Les lois de la réflexion sont valables pour les miroirs.

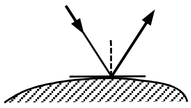
Dans la figure ci-contre, ont été représentés quelques rayons issus d'un objet lumineux réel et venant se réfléchir sur le miroir selon les lois de Snell-Descartes. Un observateur, et ce quelle que soit sa position, recevra de la lumière qui lui ***semble*** provenir d'un point symétrique de l'objet par rapport au miroir, point appelé ***image virtuelle*** de l'objet.



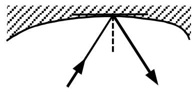
Cette image est dite virtuelle car il n'y a pas de rayons qui proviennent réellement de l'image. En réalité, les rayons partent de l'objet, se réfléchissent sur le miroir et atteignent l'œil. Le cerveau interprète la position de l'image en prolongeant les rayons (partie pointillée).

Dans le cas d'un miroir courbe, on considère localement le plan tangent à l'endroit de l'impact du rayon sur le miroir, et on applique la loi de la réflexion à ce plan tangent.

Le miroir est dit **convexe** si les rayons se réfléchissent à l'extérieur de la calotte, et **concave** si la réflexion se produit à l'intérieur de la calotte.



Miroir convexe

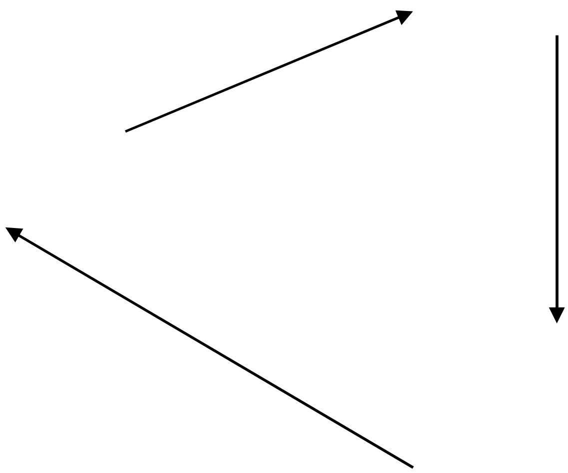


Miroir concave

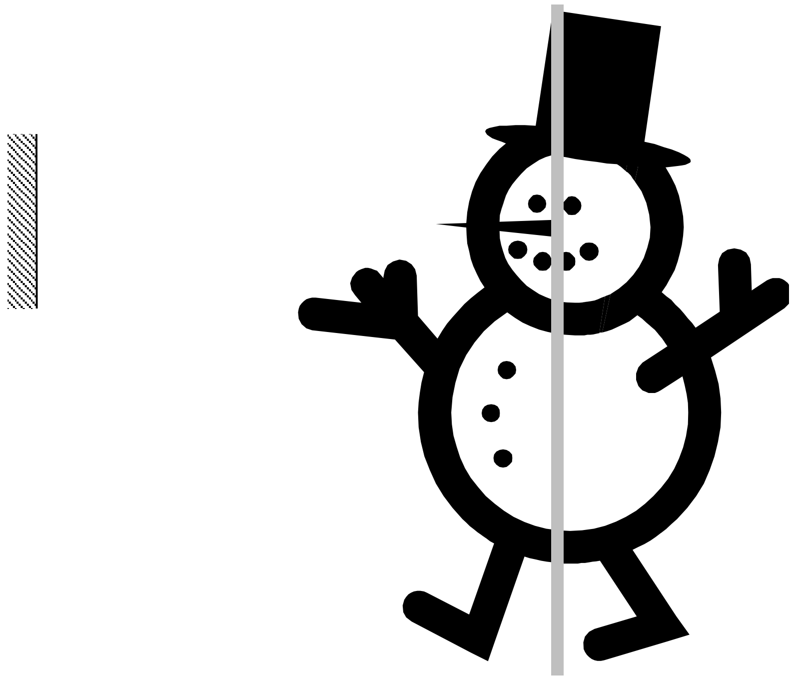
Notons que les miroirs courbes ne donnent pas d'image nette, car tous les rayons ne semblent pas provenir d'un même point. On peut tout de même obtenir des images, plus ou moins nettes, et déformées.

4.2.3 Série d'exercices

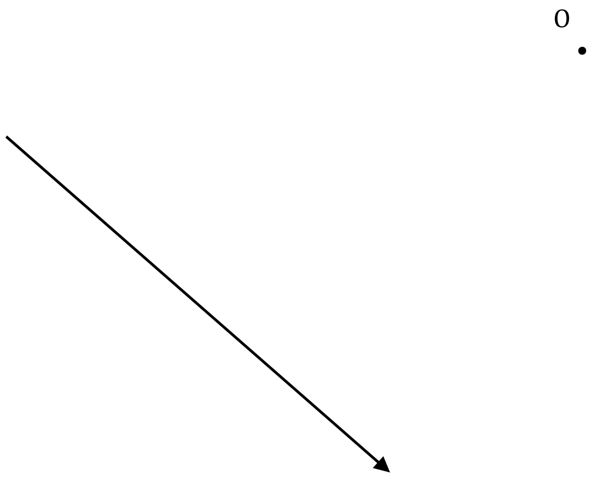
Exercice 122 Complète la figure ci-dessous à l'aide de trois miroirs… Il s'agit d'un même rayon qui tourne en « boucle ». Place une source de lumière qui aurait pu créer ce rayon



Exercice 123 Quelle partie de son corps peut voir ce bonhomme dans le miroir ? Travaille à partir du trait gris pour éviter la 3D.

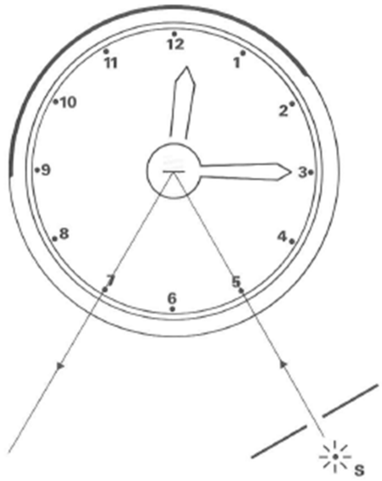


Exercice 124 Place un miroir qui dévie de 80° le rayon et de telle sorte que l'observateur O puisse voir le rayon.

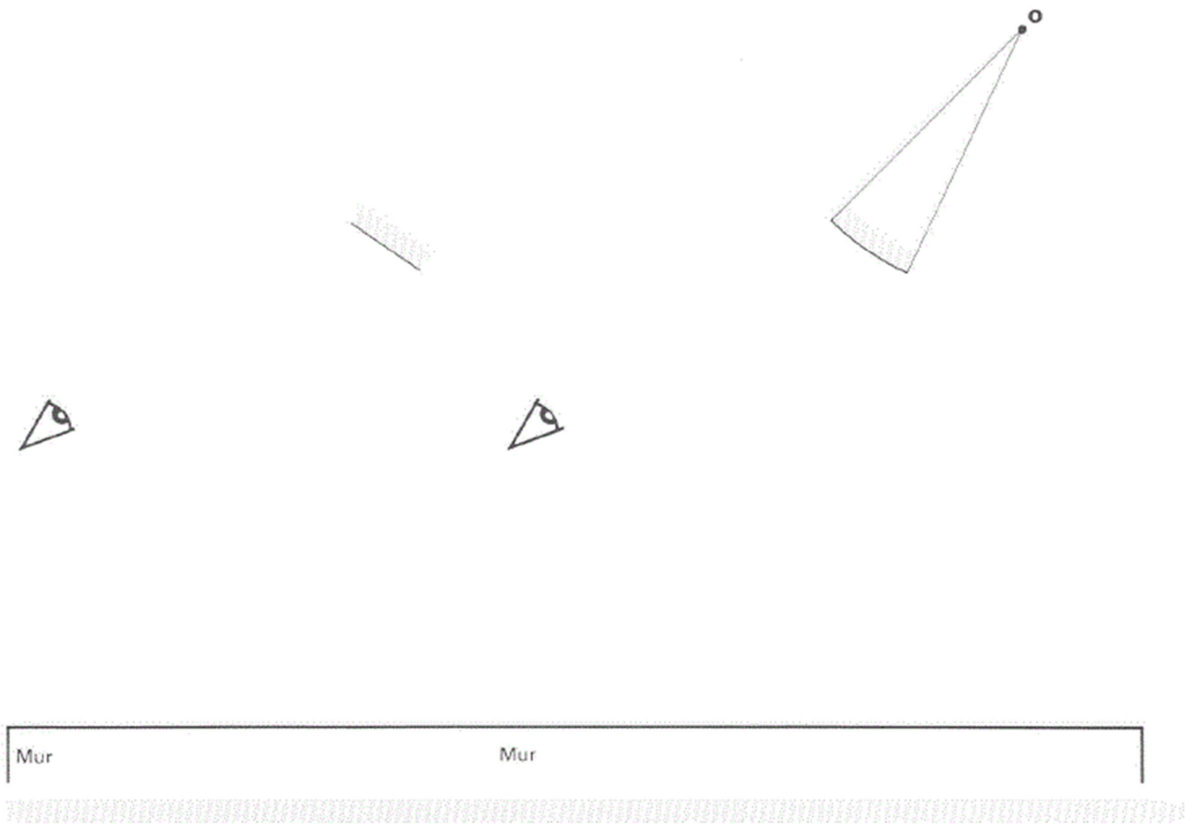


Exercice 125 Un miroir est placé sur la grande aiguille d'une pendule. Un rayon lumineux issu d'une source fixe S est réfléchi par ce miroir de la façon indiquée par la figure.

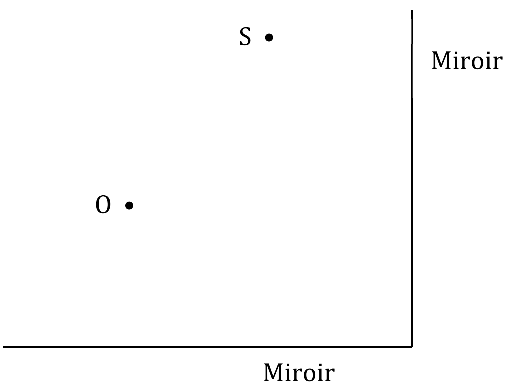
1. A quelle heure le rayon réfléchi passera-t-il par 10 h?
2. A quelle heure le rayon réfléchi passait-il par 6 h?



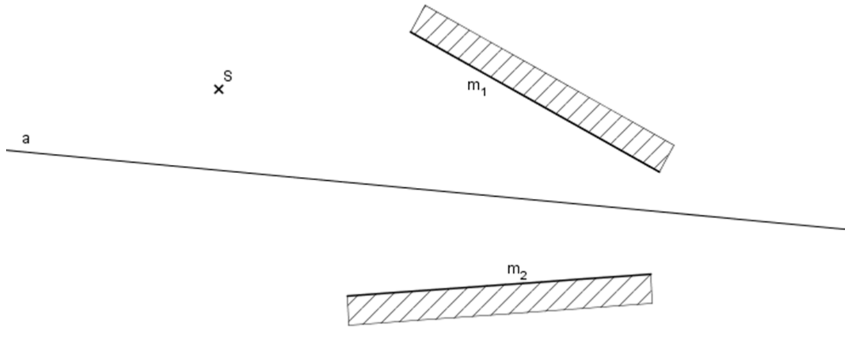
Exercice 126 1. Déterminer sur chaque figure la portion de mur que voit l'œil «dans» le miroir.
2. Les portions de mur visibles dépendent-elles de la distance de l'œil au miroir ?
3. Expliquer pourquoi les rétroviseurs sont souvent des portions de miroir sphérique (ou cylindrique).



Exercice 127 Trace tous les rayons lumineux produits par la source S et vus par l'observateur O



Exercice 128 Détermine la zone de la droite a sur laquelle un observateur doit se trouver pour voir la source S par une double réflexion (sur m_1, puis sur m_2)



4.3 Réfraction

La lumière est déviée lorsqu'elle passe d'un milieu transparent à un autre (par exemple : de l'air à l'eau, ou le contraire…) : c'est la **réfraction**. On observe ce phénomène lorsque l'on regarde une paille dans un verre : celle-ci paraît brisée. Cette fracture apparente est à l'origine du mot réfraction.

La lumière est dite **réfractée**. La propriété qui caractérise les différents milieux transparents est la **réfringence**, qui se traduit par une valeur numérique : l'**indice de réfraction**. Le plan qui sépare les différents milieux s'appelle le **dioptre**.

4.3.1 Vitesse de la lumière et indice de réfraction

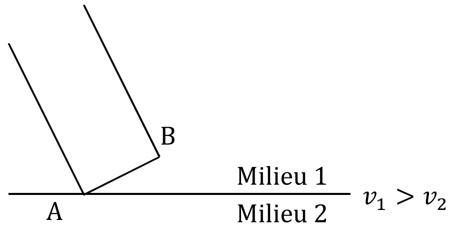
La **vitesse de la lumière dans le vide**, notée **c** (pour « célérité »), est une constante physique : $c \cong 300'000\ km/s$

Par contre, la vitesse de la lumière n'est constante que dans le vide. Dans tous les autres milieux, la vitesse de la lumière, notée v_{milieu} , est plus faible que c :

$$v_{milieu} < c$$

Le changement de direction des rayons de lumière lors du passage d'un matériau à un autre s'explique par la différence de vitesse de la lumière dans les différents milieux.

Imaginons que le rayon lumineux présente un « front » arrivant de biais sur le dioptre. Pour mieux saisir, on imagine deux personnes, A et B, se tenant par le bras de manière tendue, marchant sur une plage et rentrant de biais dans l'eau.



Au moment où le point A atteint l'eau, il va se déplacer plus lentement que le point B. Le segment AB va devoir pivoter pour rester de longueur constante, ce qui fait dévier la trajectoire.

L'**indice de réfraction** $\boldsymbol{n_{milieu}}$ d'un milieu déterminé est égal au rapport de la vitesse de la lumière c dans le vide, à la vitesse de la lumière v_{milieu} dans ce milieu :

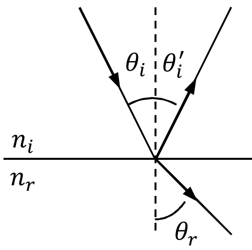
$$n_{milieu} = \frac{c}{v_{milieu}},\ n_{milieu} \text{ n'a pas d'unité}$$

Comme $c > 0$, $v_{milieu} > 0$ et $c > v_{milieu}$, on obtient que :

1. $n_{milieu} \geq 1$
2. $n_{milieu} = 1$ si le milieu est le vide.

Dans le cadre de ce cours, nous considérerons que $n_{gaz} \simeq 1$

4.3.2 Loi de Snell-Descartes pour la réfraction



n_i : *indice de réfraction du milieu d'incidence*
θ_i : *angle d'incidence*
θ_i' : *angle de réflexion*
n_r : *indice de réfraction du milieu de réfraction*
θ_r : *angle de réfraction*

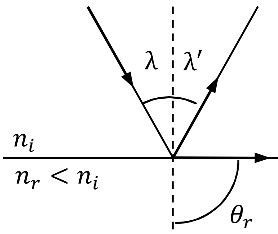
1. Le rayon incident, la normale et les rayons réfléchi et réfracté sont dans un même plan, le plan d'incidence
2. On a la relation :

$$n_\mathrm{i} \sin\theta_\mathrm{i} \quad = \quad n_\mathrm{r} \sin\theta_\mathrm{r}$$

4.3.3 Réflexion totale

Dans le cas où $n_r < n_i$, on constate qu'à partir d'une certaine valeur de l'angle d'incidence, **le rayon réfracté disparaît**; seul subsiste le rayon réfléchi. On dit qu'il y a **réflexion totale** : toute la lumière est réfléchie.
L'angle d'incidence à partir duquel le rayon réfracté n'existe plus est appelé **angle limite de réfraction**; il se note λ (lambda). Si l'angle d'incidence vaut λ alors l'angle de réfraction vaut 90°.

Cas limite :



n_i	:	*indice de réfraction du milieu d'incidence*
$\theta_i = \lambda$	:	*angle limite de réfraction*
$\theta_i' = \lambda'$	:	*angle de réflexion*
n_r	:	*indice de réfraction du milieu de réfraction*
$\theta_r = 90°$	:	*angle de réfraction*

Si un rayon incident est tel que $\theta_i > \lambda$, il n'y a pas de rayon réfracté.

Pour calculer l'angle limite de réfraction :

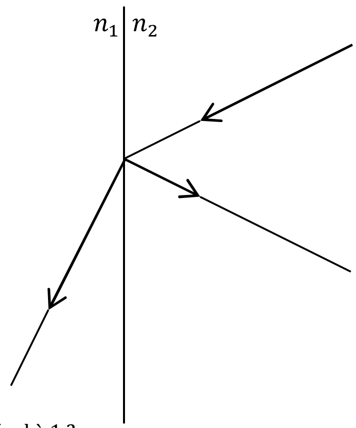
$$\begin{aligned} n_i \sin\lambda &= n_r \overbrace{\sin 90}^{1} \\ \sin\lambda &= \frac{n_r}{n_i} \\ \lambda &= \arcsin\frac{n_r}{n_i} \end{aligned}$$

4.3.4 Série d'exercices

Exercice 129 1. Mesure les angles d'incidence, de réflexion et de réfraction.

$\Theta_i =$ .... $\Theta_{réflexion} =$ .... $\Theta_{réfraction} =$ ....

2. Complète à l'aide de < , > ou = : n_1 .... n_2



Exercice 130 Pourquoi l'indice de réfraction d'un milieu est-il supérieur ou égal à 1 ? Quand est-il égal à 1 ?

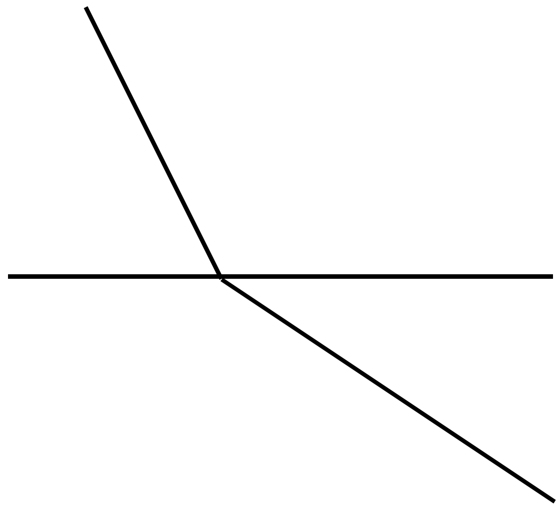
Exercice 131 Soit deux milieux d'indice de réfraction n_i et $n_r > n_i$. Indique V (vrai) ou F (faux) pour les affirmations :

1. n_r ne peut pas être l'indice de réfraction de l'air
2. $v_i < v_r$
3. Il n'y a pas de réflexion totale possible pour un rayon se dirigeant vers le dioptre
4. Il n'existe qu'un seul rayon traversant le dioptre par un point donné qui ne soit pas dévié

Exercice 132 Réponds aux questions à l'aide d'une résolution algébrique, puis vérifie (en option) en utilisant la construction de Maxwell.

Ce rayon arrive sous l'angle limite de réfraction. Que vaut l'indice de réfraction n_2 de l'autre milieu ?

Un des deux milieux est de l'air. Lequel ? Pourquoi ? Que vaut l'indice de réfraction n_2 de l'autre milieu ?

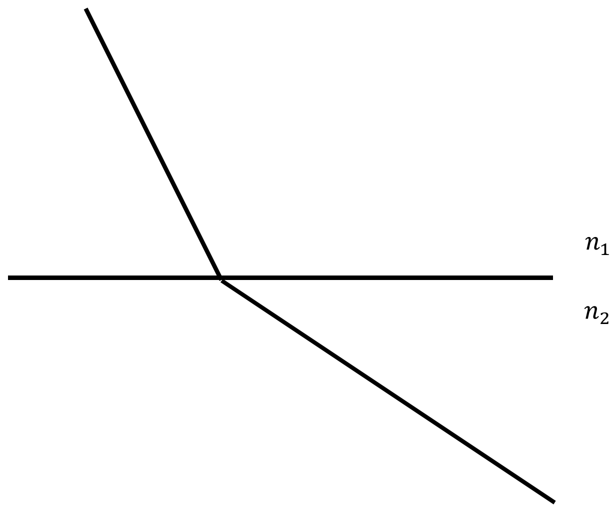


Exercice 133 Quel est l'angle limite de réfraction entre le plexiglas $\left(n_{plex} = 1{,}5\right)$ et le diamant $(n_{diam} = 2{,}4)$?

Exercice 134 Réponds aux questions suivantes.

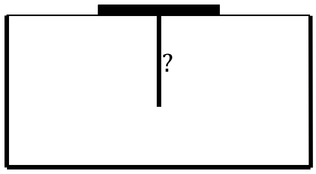
Peut-il y avoir réflexion totale ? Si oui, quelles sont les conditions sur n_1 ? Si non, pourquoi ?

$Que\ vaut\ \frac{n_1}{n_2}$?



Exercice 135 Un oiseau vole à 80 m au-dessus du bord droit d'un lac dont la largeur est 100 m. Le bord gauche du lac est surplombé d'une falaise verticale de 50m.
Un homme couché sur le bord de la falaise regarde le reflet de l'oiseau dans le lac.
Un poisson qui se trouve à 10m de profondeur voit l'oiseau sous un angle de 22° par rapport à la verticale.

1. Sous quel angle avec l'horizontal l'homme voit-il le reflet de l'oiseau
2. A quelle distance du bord droit du lac se trouve le poisson ?

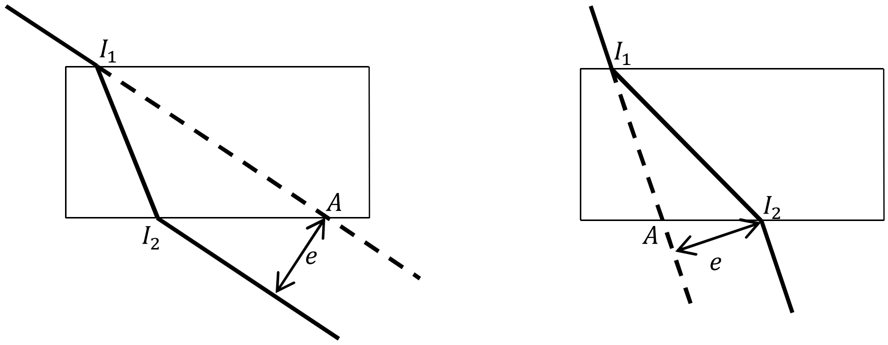


Exercice 136 Un bouchon de liège circulaire flotte à la surface d'un récipient opaque à la lumière, rempli d'eau à ras-bord. Le diamètre du bouchon est de 6cm. On enfonce une aiguille verticalement par le centre du bouchon, si bien que la pointe de l'aiguille soit dans l'eau.

1. Combien de centimètres peut-on enfoncer l'aiguille sous l'eau sans qu'on puisse la voir, quelles que soient la position de l'observateur et celle du bouchon. (On néglige l'enfoncement du bouchon dans l'eau.)
2. Si on remplace l'eau par un liquide tel que $n_{liquide} > n_{eau}$, pourra-t-on enfoncer davantage l'aiguille avant de la voir ? Répondre par raisonnement, sans calcul.

Exercice 137 On considère un rayon incident (dans l'air) sur une vitre de verre de 5mm d'épaisseur, tel que l'angle d'incidence soit de 60°. Un rayon sera réfracté dans le verre et servira de rayon incident pour le dioptre verre-air. Un rayon réfracté sortira de la vitre.

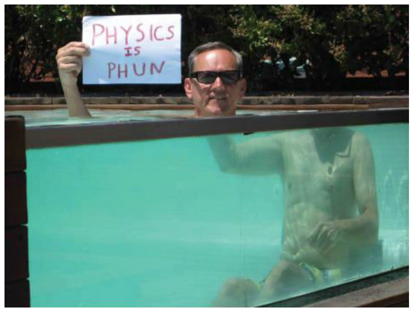
1. Lequel des deux schémas pourraient correspondre à la situation du point de vue de la déviation des rayons ?



2. Pourquoi le rayon incident initial (dans l'air) et le rayon réfracté final (dans l'air) sont-ils parallèles ?
3. Calcule la distance AI_2
4. Calcule la distance e.

Exercice 138

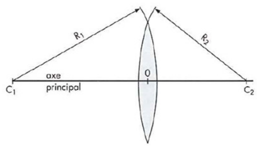
1. Explique cette illusion d'optique à l'aide de schéma, avec vue du dessus.
2. Pour aller plus loin : estime la position du baigneur dans le bac, tête et corps, et calcule l'épaisseur du verre.

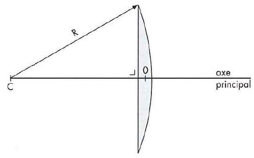


4.4 Lentille

Les lentilles sont des objets transparents que l'on trouve dans des appareils courants: lunettes, verres de contact, appareil de photo, projecteur de diapositives ou dans des appareils plus spécialisés: microscope, lunette astronomique. Dans tous les cas, leur rôle est d'obtenir des images d'objets que l'on désire observer.

4.4.1 Description





Une **lentille** est un corps transparent limité par deux surfaces sphériques ou par une surface sphérique et une surface plane.
L'axe principal d'une lentille limitée par deux surfaces sphériques est la droite reliant les centres des deux portions de sphères.
L'**axe principal** d'une lentille limitée par une surface sphérique et un plan est la perpendiculaire à ce plan passant par le centre de la surface sphérique.
Une **lentille est mince** si son épaisseur mesurée sur l'axe principal est négligeable face aux rayons R, R_1 et R_2 de ses faces. Le **centre optique O** d'une telle lentille est son point d'intersection avec l'axe principal.
Les réfractions subies par les rayons lumineux à l'entrée et à la sortie de la lentille vont permettre d'obtenir les images désirées.

4.4.2 Type de lentilles

4.4.2.1 Lentilles convergentes

Les lentilles plus minces aux bords qu'au centre sont appelées **lentilles convergentes.**

Lorsqu'on envoie un faisceau parallèle à l'axe principal d'une lentille convergente, on constate que le faisceau, après son passage dans la lentille **converge** en un point de l'axe principal appelé **foyer image** et noté **F'.**

4.4.2.2 Lentilles divergentes

Les lentilles plus minces au centre qu'aux bords sont appelées **lentilles divergentes.**

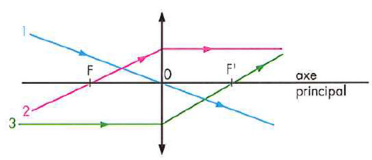
Lorsqu'on envoie un faisceau parallèle à l'axe principal d'une lentille divergente, on constate que le faisceau, après son passage dans la lentille **diverge** comme s'il provenait d'un point de l'axe principal appelé **foyer image** et noté **F'.**

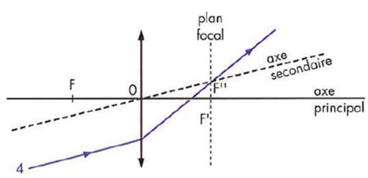
Pour chaque lentille, convergente ou divergente :

Le **foyer objet**, noté **F**, est le symétrique de F' par rapport au centre optique de la lentille.
La distance **f** entre le centre optique et chacun des foyers est la **distance focale** (ou **focale**) de la lentille.
Le **plan focal objet** d'une lentille est le plan perpendiculaire à l'axe principal et contenant F. Le **plan focal image** est le plan perpendiculaire à l'axe principal et contenant F'.

4.4.3 Construction géométrique

4.4.3.1 Lentilles convergentes





L'expérience montre que :

1. Un rayon passant par le centre optique O n'est pas dévié.
2. Un rayon incident passant par le foyer objet F ressort de la lentille parallèlement à l'axe principal.
3. Un rayon incident parallèle à l'axe principal ressort de la lentille en passant par le foyer image F'.
4. L'axe secondaire correspondant à un rayon incident quelconque est la parallèle à ce rayon passant par le centre optique. Cet axe coupe le plan focal image et le rayon émergent en un point F'' appelé foyer secondaire.

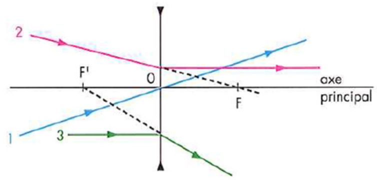
   A tout rayon correspondent un axe secondaire et un foyer secondaire; cette construction permet de déterminer le trajet du rayon à la sortie de la lentille.

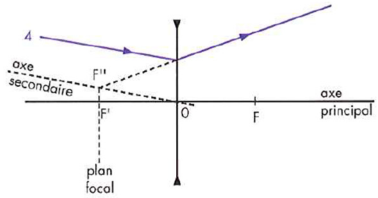
4.4.3.2 Lentilles divergentes

L'expérience montre que :

1. Un rayon passant par le centre optique O n'est pas dévié.
2. Un rayon incident dont le prolongement passe par le foyer objet F ressort de la lentille parallèlement à l'axe principal.
3. Un rayon incident parallèle à l'axe principal ressort de la lentille comme s'il provenait du foyer image F'.
4. L'axe secondaire et le foyer secondaire F''correspondant à un rayon quelconque se construisent de la même manière que dans le cas d'une lentille convergente.

   Un rayon incident quelconque ressort de la lentille comme s'il provenait du foyer secondaire F" qui lui correspond.

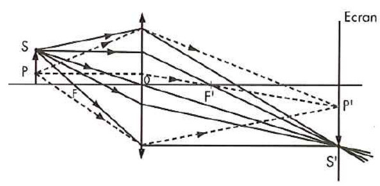




4.4.4 Image d'un objet

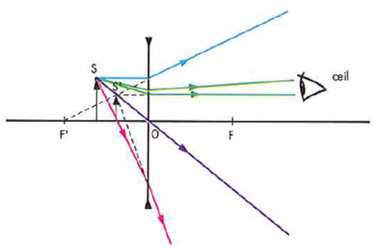
4.4.4.1 Lentilles convergentes

Considérons les rayons issus d'un point S d'une source lumineuse située dans un plan perpendiculaire à l'axe principal d'une lentille; en construisant leurs trajets, on constate qu'ils convergent en un point S' derrière la lentille. Un écran placé à cet endroit serait donc éclairé en S'. Cette propriété étant valable pour chaque point de la source, il se constitue ainsi; point par point sur l'écran, une image nette et fidèle de l'objet lumineux.
Si l'écran était placé plus en avant ou plus en arrière, le faisceau issu de S n'y formerait plus un point mais une tache; l'image serait floue. La recherche de la position de l'écran donnant une image nette s'appelle la mise au point. On peut aussi faire la mise au point en déplaçant la lentille.



4.4.4.2 Lentilles divergentes

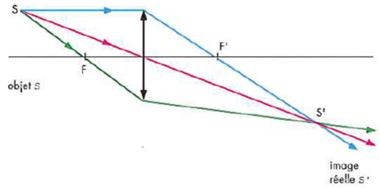
La même expérience réalisée avec une lentille divergente montre que les rayons issus du point S de la source divergent après leur passage dans la lentille.
Leurs prolongements se coupent en un point S' et la lumière semble provenir de ce point. Cette propriété valable pour chaque point de la source permet à un observateur d'en voir une image.

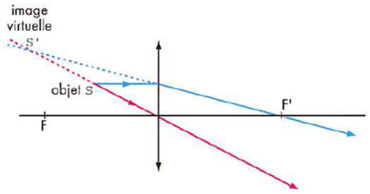


4.4.5 Nature d'une image

Lors de la formation d'une image par une lentille, deux cas peuvent se présenter :

1. Les rayons issus de la source ponctuelle S convergent en un point S' après leur passage dans la lentille; ce point est alors appelé **image réelle**, car les rayons lumineux passent réellement à cet endroit.
   C'est ce type d'image qui se forme sur le film d'un appareil de photo.
2. Les rayons issus de la source ponctuelle S divergent après leur passage dans la lentille. L'image S' se trouve alors à l'intersection du prolongement de ces rayons lumineux ; ce point est appelé **image virtuelle**, car il n'y a aucun rayon lumineux qui passe réellement à cet endroit.
   Une telle image ne peut pas être reçue sur un écran (car il n'y a pas de rayon pour éclairer l'écran), mais peut être vue directement en plaçant l'œil sur le trajet des rayons



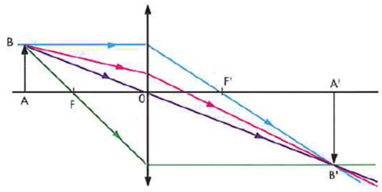


émergeant de la lentille. Le cerveau interprètera ces rayons comme provenant de S'.

4.4.6 Sens de l'image

Un objet ou une image situés au-dessus de l'axe principal sont considérés comme **droit(e).** S'ils se trouvent au-dessous de l'axe principale, ils sont **renversé(e).**

On parle d'une **image renversée relativement à son objet**, s'ils sont de part et d'autre de l'axe principal et d'une **image droite relativement à son objet** s'ils sont du même côté de l'axe principal.

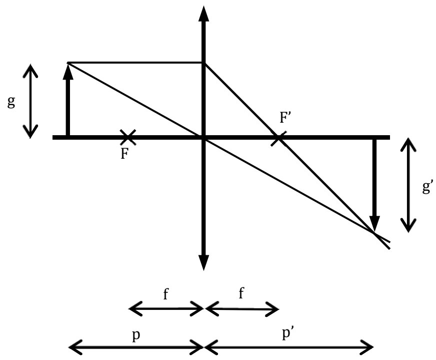


Objet droit, image renversée ; image renversée par rapport à l'objet.

4.4.7 Lois des lentilles

Les lois des lentilles mettent en relation l'objet, son image et la lentille à travers deux équations :

1. $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$ 2. $\frac{g}{g'} = -\frac{p}{p'}$



où :
f est la distance focale de la lentille,
p est la distance entre l'objet et le centre optique de la lentille,
p' est la distance entre l'image et le centre optique de la lentille,
g est la taille de l'objet
g' est la taille de l'image

Pour que ces deux équations soient valables pour n'importe quelle situation, on doit respecter les conventions de signes suivantes :

$f > 0$ si la lentille est convergente	et	$f < 0$ si la lentille est divergente
$p > 0$ si l'objet est réel	et	$p < 0$ si l'objet est virtuel
$p' > 0$ si l'image est réelle	et	$p' < 0$ si l'image est virtuelle
$g > 0$ si l'objet est droit (au-dessus de l'axe principal)	et	$g < 0$ si l'objet est renversé (au-dessous de l'axe principal)
$g' > 0$ si l'image est droite (au-dessus de l'axe principal)	et	$g' < 0$ si l'image est renversée (au-dessous de l'axe principal)

4.4.8 Systèmes de lentilles

Un système de lentilles est un dispositif optique formé de plusieurs lentilles dont les axes optiques sont tous confondus.

Les lois des lentilles étudiées sont applicables en utilisant les conventions suivantes :

- les lentilles sont numérotées depuis celle qui est la plus proche de l'objet L_1 jusqu'à la plus éloignée L_n.
- Chaque grandeur, objet, image, etc., se rapportant à l'une des lentilles du système est indicée par rapport à l'indice de la lentille : exemple g_2 est la grandeur de l'objet de la 2e lentille.

Pour appliquer les lois des lentilles, on applique le principe suivant : l'image d'une lentille L_n devient l'objet pour la lentille suivante L_{n+1}. Exemple : l'image $A_2'B_2'$ de la 2e lentille et l'objet A_3B_3 pour la 3e lentille sont identiques : $A_2'B_2' \equiv A_3B_3$.

On rajoute ensuite une relation qui relie p'_n et p_{n+1} :

$$p_{n+1} = L_nL_{n+1} - p'_n$$

Avec L_nL_{n+1} la distance entre les lentilles L_n et L_{n+1}

Un système comporte une lentille convergente L_1 de focale de $100\ mm$ et une lentille divergente L_2 de focale de $100\ mm$. Les centres optiques O_1 et O_2 de ces deux lentilles sont distants de $90\ mm$. Un objet lumineux de $150\ mm$ est situé à $300\ mm$ de O_1.
Analyse l'image obtenue par le système de lentilles.

La résolution se déroule en 2 étapes :

Etape 1 : Autour de la 1ère lentille :

1.
$$\begin{aligned}
\frac{1}{f_1} &= \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p'_1} \\
\frac{1}{100} &= \frac{1}{300} + \frac{1}{p'_1} && \left| -\frac{1}{300} \right. \\
\frac{1}{100} - \frac{1}{300} &= \frac{1}{p'_1} && |inverse \\
p'_1 &= \frac{1}{\frac{1}{100} - \frac{1}{300}} \\
&= 150\ mm \\
&= L_1L_2 - p_2
\end{aligned}$$

2.
$$\begin{aligned}
\frac{g'_1}{g_1} &= -\frac{p'_1}{p_1} \\
\frac{g'_1}{150} &= -\frac{150}{300} \\
g'_1 &= -75\ mm \\
&= g_2
\end{aligned}$$

Etape 2 : Autour de la 2e lentille :

Attention :
- $f_2 = -100\ mm$, *négative car la lentille est divergente.*
- $$\begin{aligned}
p_2 &= L_1L_2 - p'_1 \\
&= 90 - 150 \\
&= -60\ mm
\end{aligned}$$
  L'objet est donc virtuel.

1.
$$\begin{aligned}
\frac{1}{f_2} &= \frac{1}{p_2} + \frac{1}{p'_2} \\
\frac{1}{-100} &= \frac{1}{-60} + \frac{1}{p'_2} && \left| +\frac{1}{60} \right. \\
\frac{-1}{100} + \frac{1}{60} &= \frac{1}{p'_2} && |inverse \\
p'_2 &= \frac{1}{\frac{-1}{100} + \frac{1}{60}} \\
&= 150\ mm
\end{aligned}$$

2.
$$\begin{aligned}
\frac{g'_2}{g_2} &= -\frac{p'_2}{p_2} \\
\frac{g'_2}{-75} &= -\frac{150}{-60} \\
g'_2 &= -187{,}5\ mm
\end{aligned}$$

L'image produite mesure 187,5 mm, elle est réelle et renversée. Elle se forme à 150 mm après la 2e lentille.

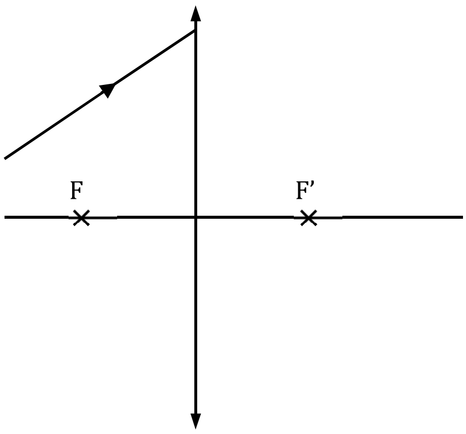
4.4.9 Série d'exercices

Exercice 139 Ces affirmations sont-elles vraies ou fausses ? Justifie lorsque c'est faux.

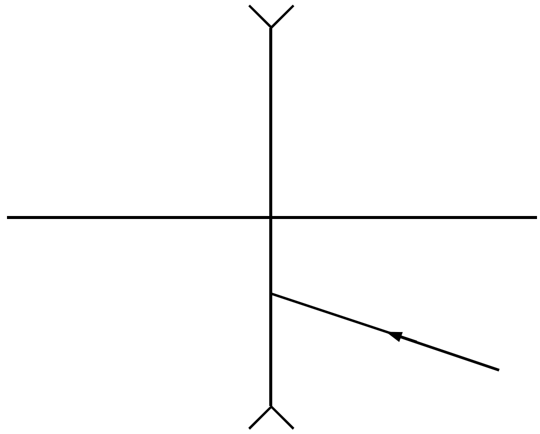
1, Une lentille à bord mince est convergente.
2. Tous les rayons qui traversent une lentille convergente sont déviés.
3. Le foyer d'une lentille est en son centre.
4. Le foyer image d'une lentille convergente est à droite de la lentille.
5. L'image obtenue par une lentille convergente est réelle et renversée si l'objet est placé plus loin de la lentille que le foyer objet.
6. En éloignant suffisamment un objet, on obtient une image réelle à l'aide d'une lentille divergente.

Exercice 140 Trace le chemin du rayon lumineux

1.

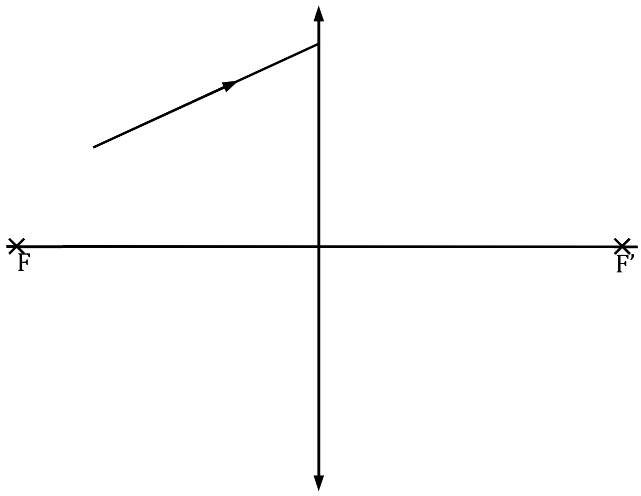


2.

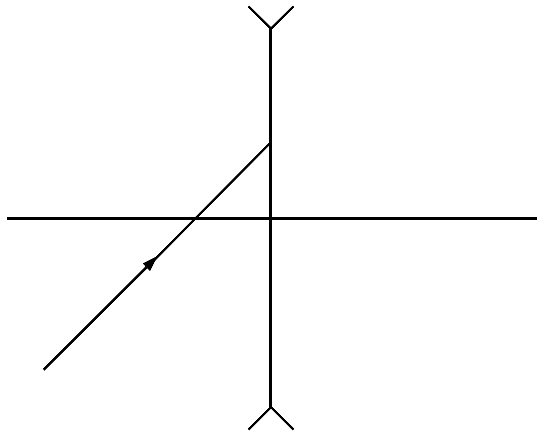


Distance focale : -3 cm

3.



4.



Distance focale : -3 cm

Exercice 141 Trouver par construction la position d'un objet de 4 cm si son image réelle, par une lentille dont la distance focale est de 3 cm, a une hauteur de 3 cm.

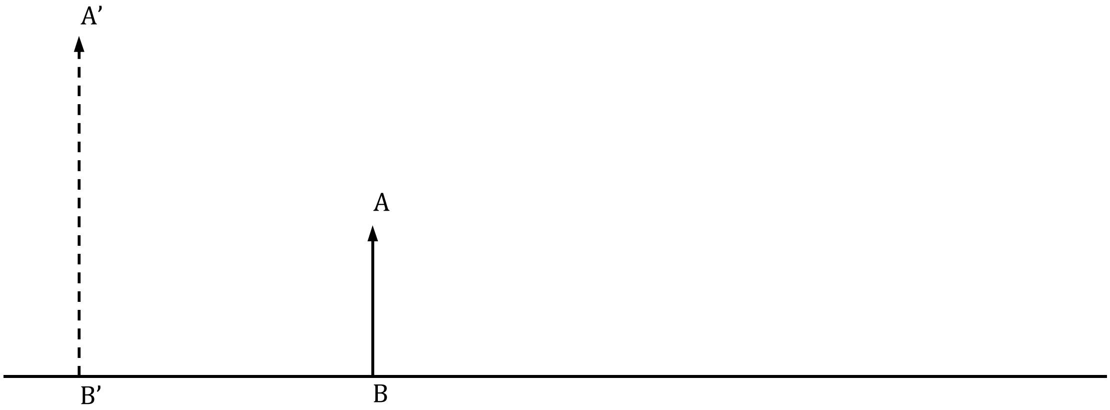
Exercice 142 Un objet de 6 cm donne une image de 18 cm sur un écran situé à 30 cm de la lentille. Détermine d'abord par construction la distance focale de la lentille et la position de l'objet, puis vérifie par calcul.

Exercice 143 Sur un écran placé à 7,5 cm d'une lentille de 3cm de distance focale, on désire projeter un objet de 3cm. Place l'objet et l'image par construction, puis vérifie par calcul ta solution graphique.

Exercice 144 Complète ce tableau pour lentille convergente en marquant « droite » ou « renversée » dans les cases correctes des 2 premières colonnes et d'une croix les cases correctes des 3 dernières colonnes

	Image virtuelle	Image réelle	$\|g'\| > \|g\|$	$\|g'\| = \|g\|$	$\|g'\| < \|g\|$
$p < f$					
$p = f$					
$f < p < 2f$					
$p = 2f$					
$p > 2f$					

Exercice 145 La flèche A'B' est l'image virtuelle de la flèche lumineuse AB produite par une lentille. Dessine sur la figure cette lentille et ses foyers.



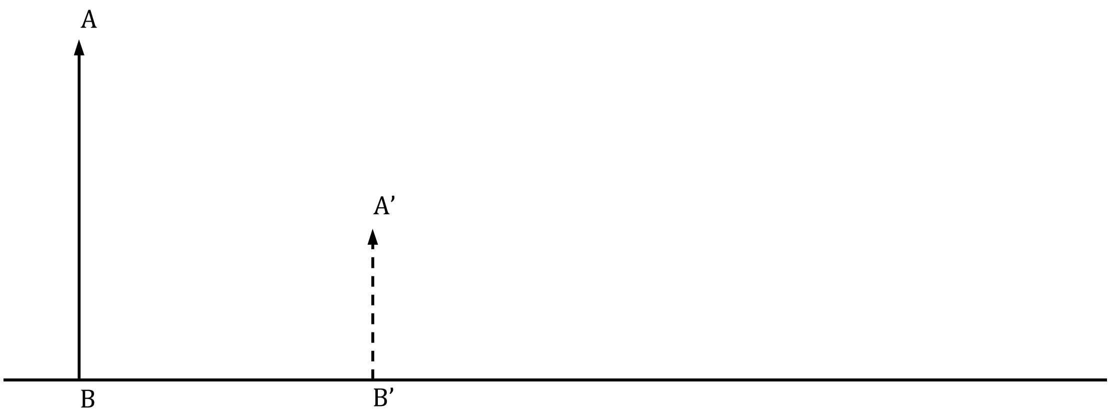
Exercice 146 Au moyen d'une lentille L dont $|f| = 4\ cm$, on désire obtenir d'un objet lumineux AB de 12 mm de hauteur une image virtuelle A'B' de hauteur égale à 23 mm. Représente graphiquement ce montage optique, puis vérifie-le algébriquement.

Exercice 147 Une image de 6 cm est obtenue à l'aide d'une lentille divergente de 8 cm de focale. On sait que l'objet est placé à 12 cm du centre optique. Détermine algébriquement ce système puis complète la phrase.

L'objet droit de .... cm est placé à .... cm du centre optique ; l'image de .... cm est .... et .... ,

elle est placée à .... cm du centre optique.

Exercice 148 La flèche A'B' est l'image virtuelle de la flèche lumineuse AB produite par une lentille. Dessine sur la figure cette lentille et ses foyers.



Exercice 149 A l'aide d'une lentille de 10 cm de distance focale, on veut obtenir sur un écran une image de 12cm d'un objet de 8cm. Détermine algébriquement ce système puis complète la phrase.

L'objet droit de .... cm est placé à .... cm du centre optique ; l'image de .... cm est .... et .... ,

elle est placée à .... cm du centre optique ; l'écran est placé à .... cm du centre optique.

Exercice 150 On a projeté une diapositive de 36x24mm de sorte que l'image ait 1,8x1,2m pour grandeur.

1. La lentille utilisée est :

a. Convergente b. Divergente c. On peut choisir soit une lentille convergente, soit divergente.

2. On se trouve alors dans la situation :

a. $|p| > |2f|$ b. $|p| = |2f|$ c. $|2f| > |p| > |f|$ d. $|p| = |f|$ e. $|f| > |p|$ f. Impossible

Exercice 151 A l'aide d'une lentille, on obtient d'un objet de 4cm une image de 6cm.

1. Quel type de lentille a-t-on utilisé ?

a. Convergente b. Divergente c. On peut choisir soit une lentille convergente, soit divergente.

2. L'image est :

a. Réelle b. Virtuelle c. Elle peut être soit réelle, soit virtuelle.

Exercice 152 Un système de deux lentilles comporte une lentille convergente L_1 de focale $f_1 = +30\ mm$ et une lentille divergente L_2 de focale $f_2 = -20\ mm$. Les centres optiques O_1 et O_2 de ces deux lentilles sont distants de 90 mm.
Un objet lumineux A_1B_1, de 8 mm de hauteur, est situé à 40 mm de O_1 (A_1, O_1 et O_2 sont alignés dans cet ordre).

1. Sur une figure, à l'échelle 1:1, construire l'image $A_2'B_2'$ de l'objet A_1B_1 produite par ce système de lentilles.
2. Vérifier par calcul les résultats graphiques.
3. Ce système a produit une image .... et .... de .... mm à partir de l'objet lumineux A_1B_1.

Exercice 153 Un système comporte une lentille convergente L_1 de focale $f_1 = +100\ mm$ et une lentille divergente L_2 de focale $f_2 = -100\ mm$. Les centres optiques O_1 et O_2 de ces deux lentilles sont distants de 90 mm.
Un objet lumineux A_1B_1 de 90 mm de hauteur est situé à 300 mm de O_1 (A_1, O_1 et O_2 sont alignés dans cet ordre).

1. Sur une figure, à l'échelle 1:3, construire l'image $A_2'B_2'$ de l'objet A_1B_1 produite par ce système de lentilles.
2. Vérifier par calcul les résultats graphiques.
3. Ce système a produit une image .... et .... de .... mm à partir de l'objet lumineux A_1B_1.

Exercice 154 Une lunette astronomique est constituée par le système de lentilles comprenant :

- l'objectif L_1 de 150mm de distance focale,
- l'oculaire L_2 de 50mm de distance focale.

On oriente cette lunette dans la direction d'un pylône A_1B_1 de 32m de hauteur, situé à 300m du centre optique O_1 de l'objectif. La distance $L_1L_2 = 200mm$.

1. A quelle distance de O_1 se trouve l'image $A'_1B'_1$ produite par la lentille L_1 ?
2. Quelle est la hauteur de $A'_1B'_1$?
3. Ce système a produit une image .... et .... de .... mm à partir du pylône de 32m.
4. Pourquoi a-t-on l'impression que l'image est plus grande que le pylône lorsqu'on utilise ce système ?
5. Quel est le grossissement de la lunette ?

Exercice 155 Une lunette de Galilée est constituée par le système de lentilles comprenant :

- l'objectif L_1 de 300mm de distance focale
- l'oculaire L_2 de -100mm de distance focale

On oriente cette lunette dans la direction d'un arbre AB de 30m de hauteur, situé à 300m du centre optique O_1 de l'objectif. La distance $L_1L_2 = 160mm$.

1. A quelle distance de O_1 se trouve l'image $A'_1B'_1$ produite par la lentille L_1 ?
2. Quelle est la hauteur de $A'_1B'_1$?
3. Ce système a produit une image .... et .... de .... mm à partir de l'arbre de 30m.
4. Pourquoi a-t-on l'impression que l'image est plus grande que l'arbre lorsqu'on utilise ce système ?
5. Quel est le grossissement de la lunette ?

Exercice 156

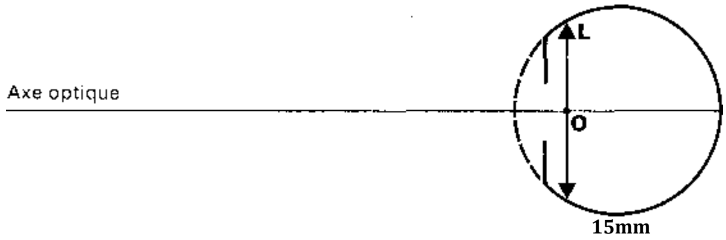
1. Par rapport à l'objectif, où doit être placé l'objet observé à l'aide d'un microscope ?
2. En déplaçant l'oculaire, comment rejeter à l'infini, l'image observée à l'aide d'un microscope ?

Exercice 157 Les lunettes de Galilée et les longues-vues sont des lunettes dites « terrestres ». En analysant les propriétés des images produites par ces deux systèmes et celles des images d'une lunette astronomique, explique pourquoi ces deux systèmes sont adaptés à l'utilisation sur Terre, contrairement à la lunette astronomique.

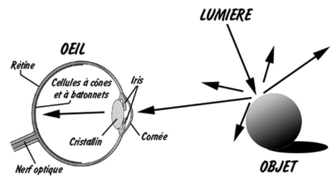
4.5 Instruments d'optique

4.5.1 L'œil

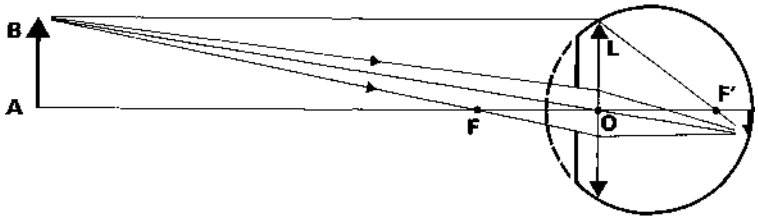
Du point de vue de l'optique, l'œil peut être assimilé à une chambre noire dont l'ouverture variable (pupille) est munie d'une lentille convergente de focale variable. Cette lentille est constituée par les organes transparents de l'œil : cornée, humeur aqueuse, cristallin et corps vitré.



La lumière qui arrive sur un objet repart de celui-ci dans toutes les directions, dont une en particulier : celle de l'œil.



Pour que la vision d'un objet soit nette, il faut que son image se forme sur le fond de l'œil où se trouve l'organe sensible à la lumière, la rétine. La rétine comprend de l'ordre de 100 millions de récepteurs de lumière.



4.5.1.1 L'accommodation

Pour un œil emmétrope (normal), l'image d'un objet éloigné est nette sur sa rétine lorsqu'il est au repos. Si un objet éloigné se rapproche d'un œil au repos, son image ne se forme plus sur sa rétine, mais au-delà de celle-ci. Sans adaptation de l'œil, l'image serait floue.

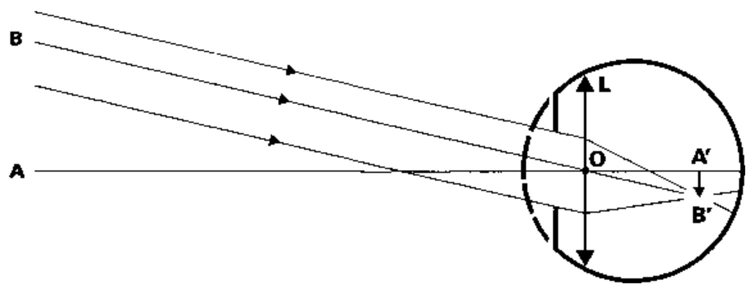
La mise au point pour que l'image devienne nette sur la rétine s'appelle l'accommodation. Elle se fait à l'aide des muscles ciliaires qui modifient la courbure du cristallin et la forme de l'œil. On peut associer cette déformation à une diminution de la distance focale de l'œil. La lentille-œil devient plus convergente.

L'accommodation se fait inconsciemment lorsque l'objet est à environ au moins 25 cm (jeune adulte) de l'œil. Dans cette plage, l'œil ne se fatigue que peu. En « forçant », l'œil emmétrope peut voir correctement jusqu'à 5 cm pour un enfant, 15 cm pour un jeune adulte et plus de 1 m pour un vieillard.

Lorsqu'un objet est placé plus près de l'œil que la distance minimale de vision distincte, son image se fera devant la rétine et l'image sera floue.

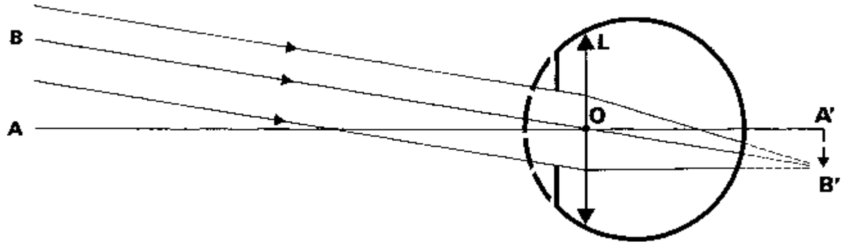
4.5.1.2 La myopie

Un œil est myope si l'image d'un objet éloigné se forme devant la rétine. L'œil est « trop convergent ». Il n'est pas possible de corriger ce défaut de la vue par l'accommodation, car celle-ci rend l'œil encore plus convergent, ce qui va éloigner l'image de la rétine. D'un autre côté, la distance minimale de vision est inférieure à celle d'un œil emmétrope. Pour compenser, on ajoute des lunettes à lentilles divergentes.



4.5.1.3 L'hypermétropie

Un œil est hypermétrope si l'image d'un objet éloigné se forme derrière la rétine. L'œil n'est pas « assez convergent ». Cependant un œil hypermétrope permet la vision d'objet éloigné, car il va s'accommoder et devenir ainsi plus convergent ; l'image pourra ainsi se former sur la rétine. Par contre la distance minimale de vision est supérieure à celle d'un œil emmétrope. Pour compenser, on ajoute des lunettes à lentilles convergentes.

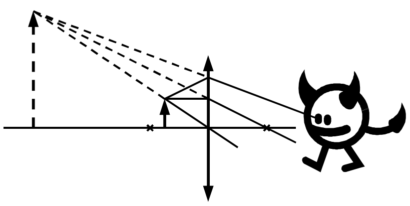


4.5.1.4 La presbytie

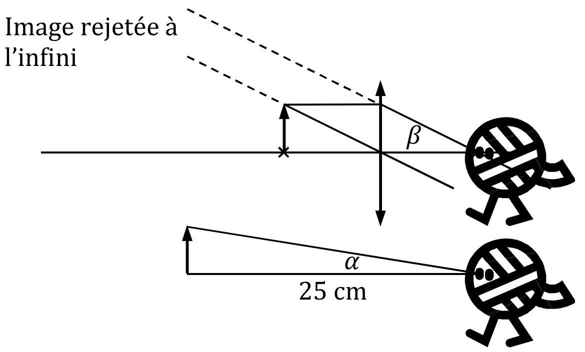
Un œil est presbyte si sa faculté d'accommodation est diminuée. C'est une affection qui apparaît avec l'âge, car les muscles ciliaires ne sont plus aussi performants. On ne pourra plus voir les objets de près correctement. C'est la presbytie qui explique l'évolution de la distance minimale de vision en fonction de l'âge.
Il y a souvent confusion entre presbytie et hypermétropie, car dans les deux cas, la vision d'un objet éloigné ne pose pas de problème.
La presbytie est un défaut des muscles ciliaire, tandis que la myopie et l'hypermétropie sont liées à la forme de l'œil, si bien que la presbytie concerne les yeux emmétrope, myope ou presbyte. Le problème devient particulièrement problématique pour des personnes myopes qui, sans lunettes, ne voient alors bien ni de près, ni de loin.

4.5.2 La loupe

Une **loupe** est une lentille convergente fixée sur une monture munie d'un manche.
Un objet placé entre la lentille et son foyer crée une image virtuelle droite, agrandie. Cette image est observable directement.

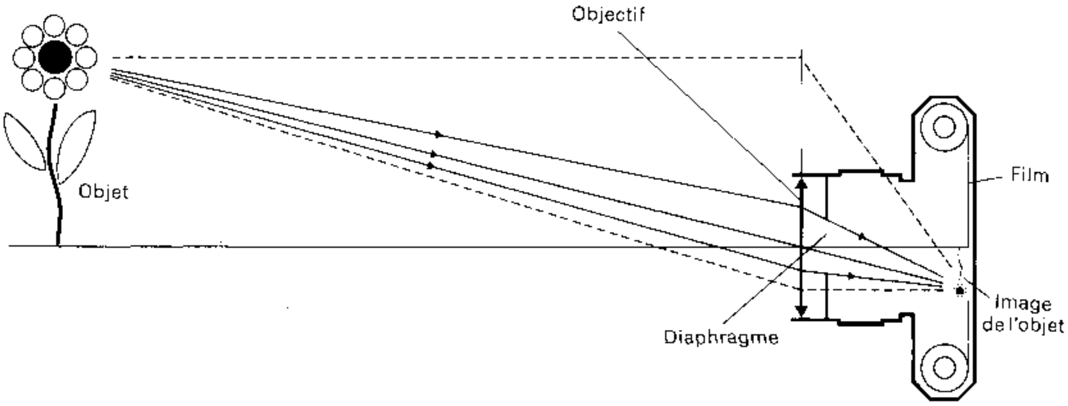


Le **grossissement optique** est une grandeur sans dimension définie comme le rapport entre l'angle sous lequel est vue l'image formée par le système optique et l'angle sous lequel est vu l'objet à l'œil nu. Pour avoir une comparaison possible, le **grossissement commercial** précise que l'objet qu'on observe à l'œil nu se trouve à 25 cm.



4.5.3 L'appareil de photographie

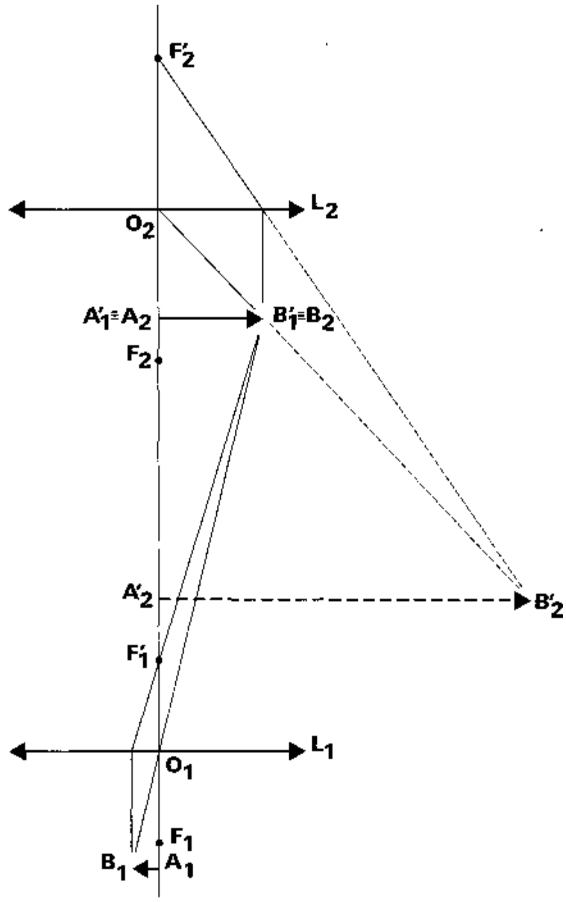
Un appareil de photographie simplifié est constitué une chambre noire munie d'une lentille convergente. On place dans cette chambre noire un récepteur de lumière (film ou récepteur numérique).
Le diaphragme est fermé par un obturateur et lorsqu'on tire une photo, on ouvre et ferme cet obturateur : c'est ce qui crée le bruit caractéristique de la photo : clic clic. Durant ce temps d'ouverture, de la lumière entre dans l'appareil et impressionne le récepteur, ce qui donnera la photo.
Pour qu'une photographie soit nette, il faut que l'image formée par le système soit sur le récepteur de lumière. On peut régler cette netteté en éloignant ou en approchant légèrement l'objectif du récepteur.
La taille du diaphragme permet de contrôler la quantité de lumière qui atteint le récepteur : trop de lumière rend l'image trop clair (blanche dans le cas extrême) et pas assez de lumière donne une image trop sombre (noire dans le cas extrême).
On peut également travailler la luminosité d'une photographie en ajustant le temps d'ouverture de l'obturateur.



4.5.4 Le microscope

Un microscope est un instrument destiné à l'observation de très petits objets, il comprend les deux éléments optiques suivants :

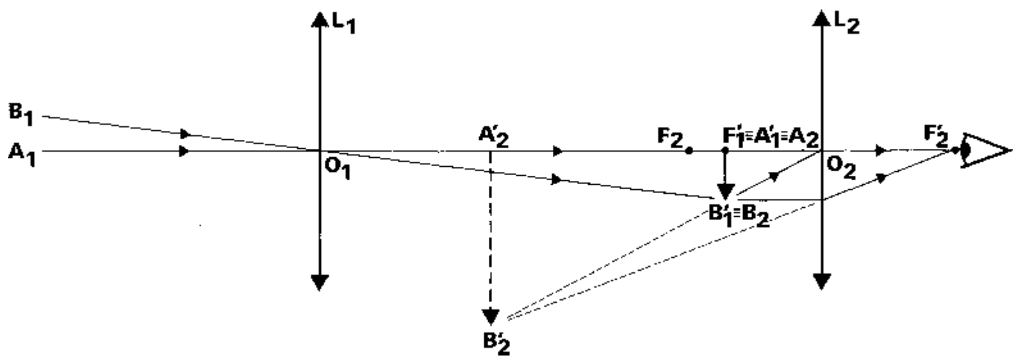
- l'objectif L_1 dont la fonction est de donner d'un petit objet lumineux A_1B_1 une image réelle $A'_1B'_1$ fortement agrandie,
- l'oculaire L_2 qui est une loupe donnant de l'image $A'_1B'_1$, (qui devient l'objet A_2B_2) l'image virtuelle $A'_2B'_2$



4.5.5 La lunette astronomique

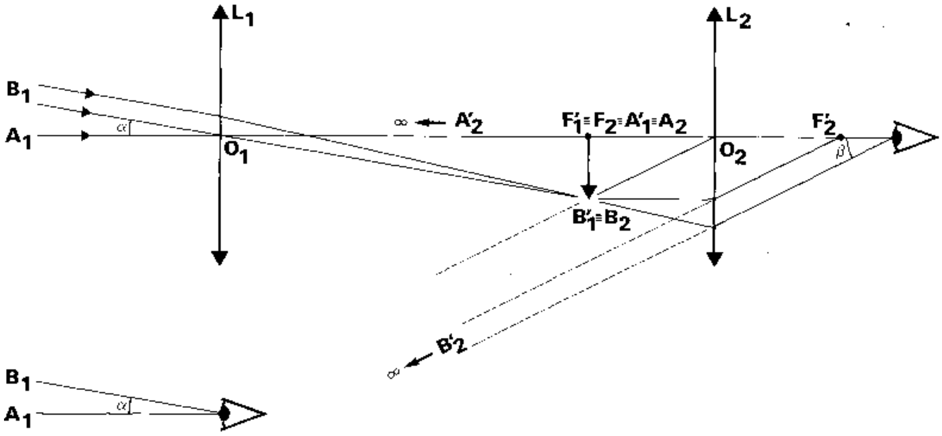
Une lunette astronomique est un instrument destiné à l'observation des astres. Une lunette astronomique comprend les deux éléments optiques suivants :

- L'objectif L_1, dont la fonction est de donner, d'un objet A_1B_1 très éloigné de son centre optique O_1, une image réelle $A'_1B'_1$ située dans un de ses plans focaux.
- L'oculaire L_2, qui est une loupe donnant de l'image $A'_1B'_1$ une image virtuelle $A'_2B'_2$



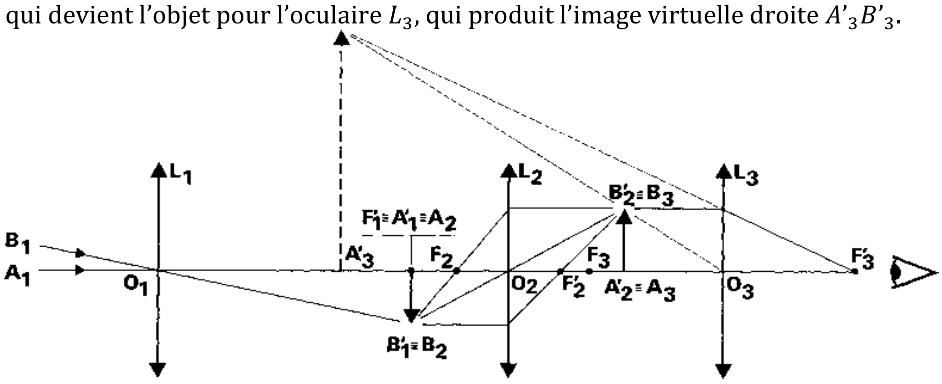
Le grossissement G d'une lunette est le rapport du diamètre apparent β de l'image virtuelle produite par l'oculaire quand elle est rejetée à l'infini, au diamètre apparent α de l'objet observé à l'œil nu. On a donc par définition :

$$G = \frac{\alpha}{\beta}$$



4.5.6 La longue-vue

Une longue-vue est une lunette astronomique comprenant une lentille convergente L_2 placée entre l'objectif L_1 et l'oculaire L_3. Cette lentille donne de l'image $A'_1B'_1$produite par l'objectif L_1, une image réelle droite $A'_2B'_2$ qui devient l'objet pour l'oculaire L_3, qui produit l'image virtuelle droite $A'_3B'_3$.



4.5.7 La lunette de Galilée

Une lunette de Galilée est un système comprenant un objectif convergent L_1 associé à une lentille divergente L_2 dont le centre optique O_2 est situé entre le centre optique O_1 et le foyer F'_1 de l'objectif L_1. Par ce système, l'image $A'_1B'_1$, d'un objet éloigné A_1B_1, produite par l'objectif devient l'objet virtuel A_2B_2 pour la lentille L_2 qui en donne l'image virtuelle et droite $A'_2B'_2$.
Galilée n'est pas l'inventeur de cette lunette, mais c'est à l'aide de telle lunette qu'il fit des observations qui révolutionnèrent les conceptions de l'univers. On attribue la paternité de ces lunettes à l'inventeur du microscope, un opticien hollandais du nom de Jansen.
Les jumelles de théâtre sont habituellement constituées par deux petites lunettes de Galilée montées en parallèle.