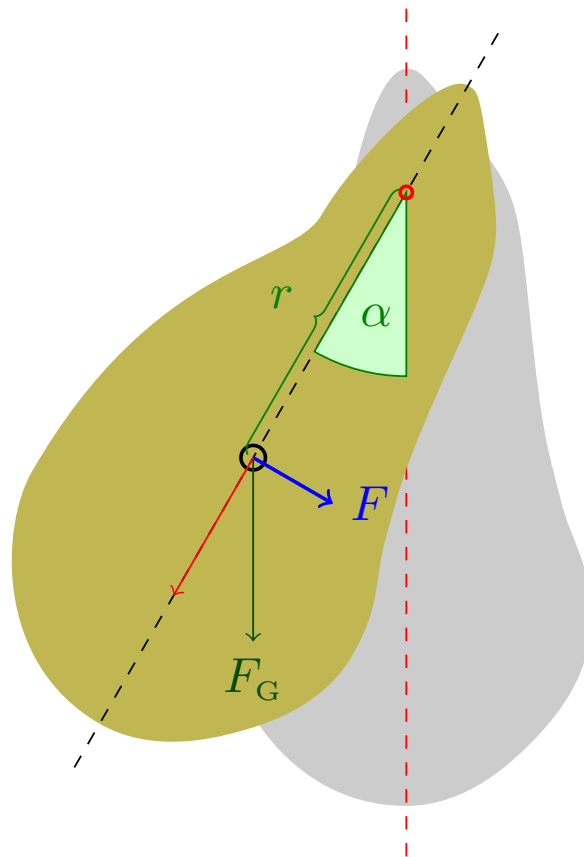

Cours de Physique
Yves Delhaye

Cours de physique

Yves Delhaye

2016



Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Partage des Conditions Initiales à l'Identique 2.0 France

- Vous êtes libres :
 - de reproduire, distribuer et communiquer cette création au public,
 - de modifier cette création.
- Selon les conditions suivantes :
 - Paternité : Vous devez citer le nom de l'auteur original de la manière indiquée par l'auteur de l'oeuvre ou le titulaire des droits qui vous confère cette autorisation (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous soutiennent ou approuvent votre utilisation de l'oeuvre).
 - Pas d'Utilisation Commerciale : Vous n'avez pas le droit d'utiliser cette création à des fins commerciales.¹
 - Partage des Conditions Initiales à l'Identique : Si vous modifiez, transformez ou adaptez cette création, vous n'avez le droit de distribuer la création qui en résulte que sous un contrat identique à celui-ci.
- voir <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/fr/legalcode>

1. Vous pouvez cependant faire des copies et les distribuer à prix coûtant (par exemple à vos élèves).

Sommaire

I	Métrie	1
1	Les unités de mesures	3
2	Les erreurs de mesures	9
II	Cinématique	15
3	Positions, trajectoires et systèmes de référence	17
4	Déplacements et vitesses	29
5	Mouvements rectilignes	39
6	MRU	45
7	Variation de vitesse et accélération	51
8	MRUA	59
9	Chute libre	67
III	Cinématique dans l'espace	73
10	MCU	75
11	MCUA	87
12	Le tir horizontal	95
13	Le tir oblique ou parabolique	111
14	Mouvements à trois dimensions	129
IV	Statique	135
15	Les forces	137
16	Les forces : équilibres de translation	145
17	Équilibres de rotation et moments de force	153

V Dynamique	169
18 Les lois de Newton	171
19 Les forces de frottements	179
20 Chute libre	183
21 La force centripète	185
VI Les lois de conservation	193
22 Travail	195
23 Énergie	201
24 Puissance	211
25 Quantité de mouvement	215
26 Moment angulaire	221
VII Modèles de l'univers et gravitation universelle	223
27 Tailles de l'univers	225
28 Géocentrisme et héliocentrisme	227
29 La gravitation universelle	235
VIII Optique géométrique	243
30 L'oeil	247
31 Faisceaux de lumière	253
32 Couleurs	255
33 Images	261
34 Miroirs	265
35 Réfraction	277
36 Prismes	283
37 Lentilles minces	291
38 Combinaisons de lentilles	301
39 Les défauts de l'oeil	305

40	Télescopes et microscopes	313
IX	Électricité	317
41	Électrostatique	321
42	Courants, circuits	323
43	Énergie électrique : le "kWh"	333
44	Différence de potentiel	337
45	Association de générateurs	341
46	La loi d'Ohm	345
47	Force électromotrice	353
X	Electromagnétisme	355
48	Le magnétisme	357
49	Les champs magnétiques induits	365
50	Les courants induits	371
51	Force électromagnétique	373
XI	Les ondes	375
52	Les ondes : généralités	377
53	La réflexion des ondes	383
54	Les ondes sonores	387
55	L'effet Doppler	393
56	La diffraction des ondes	397
57	Les fentes de Young	401
58	Les ondes électromagnétiques	405
XII	Physique atomique	409
59	La radioactivité	411

XIII Annexes	419
A Listes diverses	421
B Bibliographie	431
C Index	433
D Table des matières	435

Première partie

Métrologie

Chapitre 1

Les unités de mesures

Sommaire

1	Le système international d'unités	4
	A Le système SI	4
	B Les volumes	7
2	Les unités dérivées	7
	A Les unités dérivées comme produit de puissances des unités de base	7
	B Analyse dimensionnelle	8
3	Exercices	8

Introduction

Lorsqu'on fait de la physique, on fait des calculs impliquant des grandeurs "concrètes" : ainsi, des vitesses sont multipliées par des temps. On mesure ces grandeurs et il faut s'accorder avec d'autres pour communiquer ces résultats et ces calculs de manière cohérente.

Les scientifiques utilisent des systèmes d'unités pour lesquels ils se sont accordés internationalement. Les unités de la vie de tous les jours représentent une petite partie de ces unités.

Remarque 1. Il faut bien faire la distinction entre grandeur (par exemple, une longueur) et unité (ici le mètre).

Une hauteur, une largeur auront pour unité le mètre. Pourtant votre hauteur n'est pas identique à votre largeur.

1 Le système international d'unités

Jusqu'à la fin du dix huitième siècle, de multiples systèmes d'unités existaient. Un commerçant qui achetait cinq toises de tissu à Lyon, à Paris, Lille, Bruxelles ou Berlin recevait à chaque fois des longueurs différentes de tissu.

Les industriels, les commerçants et les scientifiques de cette fin du dix huitième siècle ont donc ressenti la nécessité de rationaliser les mesures. C'est après la révolution française que le système international d'unités s'est imposé.

A Le système SI

Le système international d'unités (ou système SI) est un système *décimal*. Toutes les unités mesurant un même type de grandeur ont des rapports entre elles qui sont des puissances de dix. (exemple : $1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$)

Les unités de temps usuelles représentent la seule exception. (60 secondes par minutes, 24 heures dans une journée, 365,25 jours par an)

Il existe encore de nos jours un système "unifié" qui n'est pas le système international : le système "impérial" que nombre d'américains continuent à utiliser. Ce système n'est pas décimal ! (Il faut 12 pouces pour faire un pied, trois pieds pour faire un yard et 1760 yards pour faire un mile.) Les erreurs d'arrondi ont tendance à s'accumuler de manière problématique dès que l'on fait des calculs non élémentaires.

(suggestion d'exercice pour vous en convaincre : Si un camion consomme deux pieds cubiques de carburant pour faire cent miles, à quelle vitesse passe le carburant dans le tuyau à la sortie du réservoir si ce tuyau fait cinq pouces de diamètre ?)

a) Majuscule ou minuscule

Avant de commencer, faisons une remarque sur l'écriture des unités. La distinction entre majuscules et minuscules est importante. Les unités dont le nom correspond au nom d'une personne auront un nom écrit en minuscule puisqu'il s'agit dès lors d'un nom commun (mais ce n'est pas nécessairement le cas pour le symbole) : Lord Kelvin donne son nom au kelvin, symbole K.

b) les unités de base

Toutes les unités de la physique peuvent être ramenée à des produits de puissances de quelques unités de base. Ainsi l'unité de vitesse ms^{-1} est clairement le rapport de l'unité de longueur par l'unité de temps.

(i) **mksA** Le système dit "mksA" est l'ancêtre du système international d'unités. Dans ce système, toutes les unités sont exprimables à partir de quatre unités de base : le mètre, le kilogramme, la seconde et l'ampère.

(i).1 **Le mètre** La définition initiale du mètre était que cette longueur représentait $1/40\,000\,000$ de la longueur de la circonférence terrestre mesurée à l'équateur. Un mètre étalon était précieusement conservé au bureau international des poids et mesures près de Paris.

Voici sa définition moderne :

Définition 1 (mètre). Un mètre (symbole : m) est une longueur qui vaut $1\,650\,763,73$ fois la longueur d'onde de la radiation orangée émise par l'isotope 86 du krypton.

(i).2 **Le kilogramme** C'est la seule unité qui commence par un préfixe (k pour 1000) . C'est aussi la seule unité qui soit encore définie par un objet matériel.

Définition 2 (kilogramme). Le kilogramme est la masse d'un litre d'eau pure à 4°C .

Le kilogramme étalon conservé au bureau international des poids et mesures est comparé à d'autres étalons qui servent alors de référence. D'infimes variations de masse font que de nouvelles définitions sont à l'étude.

(i).3 **La seconde** La seconde fut d'abord définie comme $1/86400$ du jour solaire terrestre moyen.

Sa définition moderne est désormais celle-ci :

Définition 3 (seconde). La seconde est la durée de $9\,192\,631\,770$ périodes de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins $F=3$ et $F=4$ de l'état fondamental $6S_{1/2}$ de l'atome de césium 133 au repos, à une température de 0 K .

(i).4 **L'ampère**

Définition 4 (ampère). Un ampère est l'intensité d'un courant constant qui, s'il est maintenu dans deux conducteurs linéaires et parallèles, de longueurs infinies, de sections négligeables, et distants d'un mètre dans le vide, produit entre ces deux conducteurs, une force linéaire égale à $2 \times 10^{-7}\text{ N m}^{-1}$ (newton par mètre).

(ii) **Les autres unités de base du système international** D'autres unités ont ajoutées (pour différentes raisons que nous ne développerons pas ici) pour former le système international.

(ii).1 **Le kelvin**

Définition 5 (kelvin). Le kelvin (symbole : K) est l'unité de température^a. Un écart de température d'un kelvin correspond à un écart d'un degré Celsius (ou centigrade). L'origine de l'échelle kelvin est fixée par le zéro absolu : 0 k correspond donc à $-273,15^{\circ}\text{C}$.

a. plus exactement de température thermodynamique

Depuis 1954, la conférence internationale des poids et mesures a fixé qu'on ne disait plus "degré kelvin" mais uniquement "kelvin".

(ii).2 la mole

Définition 6 (mole). la mole (symbole : mol) est l'unité SI de quantité de matière. Une mole contient autant d'atomes (ou de molécules) que le nombre d'atomes de carbone compris dans 12 grammes de carbone pur. Ce nombre est de $6,02214040 \cdot 10^{23}$ atomes et est appelé le nombre d'Avogadro.

Nous retiendrons cette définition mais faisons remarquer que ce n'est plus ainsi que la conférence internationale des poids et mesures définit la mole!

(ii).3 La candela

Définition 7 (candela). La candela ^a (symbole : cd) est l'unité SI d'intensité lumineuse. C'est l'intensité, dans une direction donnée, d'une source lumineuse monochromatique de fréquence $5,40 \times 10^{14}$ Hz (càd. une longueur d'onde dans le vide de 555 nm) dont l'intensité énergétique est de 1/683 W par sr (steradian) dans cette direction.

a. ou candéla, un mot latin qui signifie chandelle

La couleur choisie (définie par la fréquence) est proche du vert et correspond à un maximum de sensibilité de l'œil humain.

Un candela équivaut approximativement à l'intensité lumineuse d'un bougie.

(iii) Résumé Résumons ceci sous forme de tableau :

Grandeur nom	symbole	unité nom	symbole
Longueur	l	mètre	m
temps	t	seconde	s
masse	m	kilogramme	kg
intensité de courant	I	ampère	A
température	T (θ)	kelvin	K
quantité de matière	n	mole	mol
intensité lumineuse	I_V	candela	cd

TABLE 1.1 – Les unités de base du SI.

c) Multiples et sous-multiples

Les mesures physiques peuvent énormément varier pour une même grandeur. Ainsi, pour la longueur, la taille d'un atome est approximativement de 1×10^{-10} m, la taille de notre galaxie est, elle, d'approximativement 100 000 années-lumière càd. $9,4608 \times 10^{20}$ m. Des préfixes placés devant les unités correspondent à des multiples et sous-multiples de ces unités. Ces multiples et sous-multiples sont toujours des puissances de dix.

Préfixe	Symbole	Facteur
peta	P	10^{15}
téra	T	10^{12}
giga	G	10^9
méga	M	10^6
kilo	k	10^3
hecto	h	10^2
déca	da	10^1
-	-	-
déci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
milli	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}

TABLE 1.2 – Multiples et sous-multiples.

B Les volumes

À l'école primaire nous avons appris à utiliser des "abaques" pour convertir des volumes en litre vers des volumes en m^3 . Si ces abaques sont des outils pratiques ils nous font parfois oublier le sens derrière ces opérations.

Rappelons donc la définition d'un litre !

Définition 8 (Litre). Un litre (symbole : L) ^a est le volume équivalent au volume d'un cube de 1 dm de côté.

a. Le symbole "l" est toléré mais déconseillé.

Un litre est donc un volume d'un dm^3 . Comme un dm vaut 10 cm, un litre est donc un volume de $1 \times 10^3 \text{ cm}^3$ ou 1000 cm^3 .

De même, comme un mètre vaut 10 dm, un m^3 vaut $1 \times 10^3 \text{ dm}^3$ c'est-à-dire $1 \times 10^3 \text{ L}$.

Le volume d'un mL est un 1 cm^3 . Par contre, un dL est un dixième de litre et donc 100 cm^3 .

2 Les unités dérivées

Toutes les autres unités de la physique peuvent se déduire à partir des unités de base.

A Les unités dérivées comme produit de puissances des unités de base

Nous allons exprimer les unités dérivées comme produits de puissances des unités de base du système SI. Nous nous limiterons, pour illustrer notre sujet, au sous système $mk(g)sA$.

c'est-à-dire :

$$m^w \cdot kg^x \cdot s^y \cdot A^z$$

où $w, x, y, z \in \mathbb{Q}$

La question est de savoir que valent ces w, x, y, z .

a) Notations

À ce stade, il nous faut faire un peu de formalisme et introduire la notation des unités d'une grandeur.

Le joule est l'unité de l'énergie et va se noter :

$$J = [E]$$

Les crochets droits "[...]" signifient donc "unités de ..."

b) Exemple : le joule

$$J = [E]$$

Toute énergie aura pour unité le joule dans le système "mksA", prenons donc l'énergie cinétique de translation :

$$[E] = \left[\frac{1}{2}mv^2\right]$$

$$[E] = \left[\frac{1}{2}\right][m][v]^2$$

$$[E] = (\text{nbre. pur} : \text{ss. dim}) \text{ kg } (\text{m s}^{-1})^2$$

$$[E] = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

B Analyse dimensionnelle

L'analyse dimensionnelle exploite le fait que toute unité soit un produit de puissances des unités de base.

3 Exercices

Les exercices sont communs à ceux du chapitre suivant et se trouvent à la fin de celui-ci.

Chapitre 2

Les erreurs de mesures

Sommaire

1	Imprécisions sur les mesures	10
	A Précision des mesures	10
	B Erreur aléatoire	10
	C Erreur systématique	10
2	Types d'erreurs	11
	A Erreur absolue	11
	B Erreur relative	11
3	Calcul d'erreur	11
	A Types de grandeurs	11
	B Exemple : erreur sur une surface	12
	C Règles de calcul d'erreur	12
4	La notation scientifique et les chiffres significatifs	12
	A Les chiffres significatifs	12
	B La notation scientifique	13
5	Exercices	13

Introduction

La précision infinie est impossible. La manière dont nous mesurons une grandeur implique nécessairement une imprécision. Annoncer une mesure sans préciser dans quelle proportion cette mesure est fiable n'est pas acceptable.

Cette position de principe étant cependant intenable car trop lourde dans le cadre d'un cours du secondaire. Elle est donc souvent ignorée. Nous en ferons souvent de même. Mais il faut néanmoins bien garder à l'esprit que l'on fait cet abus !

La publication de résultats scientifiques dans un cadre professionnel s'accompagne *toujours* d'une estimation sur la précision de ces résultats. Ceux-ci seraient considérés comme non fiables si ce n'était pas le cas.

On parle d'imprécision ou d'incertitude sur une mesure ou sur le résultat d'un calcul basé sur des mesures.

1 Imprécisions sur les mesures

Mesurez la longueur d'un objet dont la taille est comprise entre deux et neuf cm avec votre équerre ou votre latte puis notez ce résultat en cm . (pour fixer les idées, mesurez la longueur du pouce d'un même élève)

Combien de chiffres après la virgule conservez-vous ?

Allez-vous garder jusqu'à huit chiffres après la virgule ? Ceci correspondrait à la taille d'un atome d'hydrogène. Êtes vous capable de mesurer l'épaisseur d'un atome ?

En pratique, on estime que la mesure à l'aide d'une latte ou d'une équerre munie de graduations au millimètre ne permet pas d'être précis qu'au demi millimètre près !

Vous pouvez donc garder deux chiffres après la virgule mais en noter plus n'aura simplement pas de sens.

A Précision des mesures

Différents facteurs vont affecter la précision de toute mesure. Augmenter la précision et la fiabilité des instruments de mesure est un "job" à temps plein pour certains scientifiques. Les experts en précision des mesures sont appelés des "métrologues". La métrologie est la science de la précision des mesures.

B Erreur aléatoire

Si le même objet est mesuré par un groupe de personne (les différents élèves d'une classe), tous les résultats ne vont pas être identiques ! Ces résultats seront cependant répartis autour d'une valeur moyenne. Des petites erreurs aléatoires (causées par un coup reçu par la table sur laquelle on fait la mesure par exemple ou les dilatations-contractions de la latte dues à des écarts de température) vont faire fluctuer les mesures enregistrées autour de la valeur "vraie". Faire un "grand" nombre de mesures et en faire la moyenne permet donc de s'approcher de cette valeur "vraie".

Dans ce cas, on parle d'erreurs aléatoire.

C Erreur systématique

Nos lattes et équerres sont "calibrées" pour être utilisées au alentour de 20°C. C'est la "température de confort" à la quelle il y a le plus de chance que nous les utilisions. Imaginons que toutes nos mesures soient faites un jour de grande chaleur à 40°C. Toutes les lattes et équerres seront

dilatées. Si l'objet à mesurer ne subit pas dilatation, nous allons mesurer une longueur qui sera systématiquement trop petite par rapport à la longueur vraie.

Ce type d'erreur ne va pas disparaître en faisant un grand nombre de mesure puis en prenant leur moyenne.

Ce type d'erreur est une erreur systématique.

Il s'agit là d'erreurs où la crédibilité des chercheurs est en jeu. L'annonce faite, il y a quelques années, de la découverte de neutrinos voyageant plus vite que la lumière était due à un glissement de terrain qui avait allongé un câble. Cette erreur a coûté sa place au directeur du projet !

2 Types d'erreurs

L'estimation de l'erreur se fait de deux manières. Comparons les ici.

A Erreur absolue

Si la mesure de longueur citée comme exemple avait donné comme valeur moyenne pour la classe 3,421 cm (càd. 34,21 mm). On aurait noté le résultat comme $34,2 \pm 0,5$ mm (le 0,01 mm est abandonné comme n'ayant pas de sens puis qu'une puissance de dix sous la précision maximale possible). Nous aurions aussi pu écrire $3,42 \pm 0,05$ cm.

B Erreur relative

Maintenant, une question : Quelle est l'erreur la plus importante, un demi-mm ou un cm ?

Réponse : ça dépend !

Il faut comparer ce qui est comparable !

Si vous comparez la longueur de dix mètres d'un rectangle peint au sol avec sa largeur de 10 cm et que vous faites l'erreur d'un centimètre sur sa longueur et d'un demi-millimètre sur sa largeur, vous faites une erreur d'un millième sur la longueur et une erreur d'un deux centièmes sur sa largeur. Proportionnellement, vous faites une erreur cinq fois plus grande sur la largeur !

Cette estimation de l'imprécision est appelée l'erreur relative et est souvent indiquée en pourcent.

Dans notre exemple, pour la longueur, on écrirait : $10 \text{ m} \pm 0,1\%$.

Pour la largeur cela donnerait $10 \text{ cm} \pm 0,5\%$.

La comparaison de la qualité des deux mesures est immédiate.

Dans la mesure de la longueur du pouce, nous obtenons $34,2 \text{ mm} \pm 1,46\%$.

3 Calcul d'erreur

A Types de grandeurs

Lors de la résolution d'un problème en physique, on va plus loin que "juste" mesurer une ou plusieurs grandeurs. On fait des calculs avec ces grandeurs : on les additionne, soustrait, multiplie, divise entre elles après les avoir mis à des puissances diverses etc.

Comment, dès lors, estimer la précision du résultat final ? Il ne s'agit seulement de "bien faire" les opérations mathématiques pour arriver au "bon" résultat !

Ceci implique donc qu'il y ait deux types de grandeurs :

- les grandeurs directes (ou premières) qui sont le résultat d'une mesure directe,
- les grandeurs composées qui sont le résultat d'une combinaison par calcul de plusieurs grandeurs directes (Une surface comme le produit de deux longueurs par exemple) .

B Exemple : erreur sur une surface

Si nous voulions maintenant mesurer la surface du rectangle peint au sol au point précédent pour estimer la quantité de peinture nécessaire. L'imprécision sur la mesure va nous donner une estimation de la marge de peinture supplémentaire qu'il faut prévoir pour être sur de ne pas "tomber trop juste".

La surface va être $(10\text{ m} \pm 0,1\%) \times (10\text{ cm} \pm 0,5\%)$.

Il est immédiat de constater que notre rectangle a une surface de 1 m^2 .

Mais avec quelle incertitude ?

La pratique est d'additionner les deux erreurs relatives : L'imprécision sur la surface est donc de 0,6% càd. ici de 60 cm^2 .

C Règles de calcul d'erreur

Voici les règles élémentaires de calcul d'erreur entre deux grandeurs (" a " et " b ") dont les erreurs absolues (" Δa " et " Δb ") sont connues. Nommons x le résultat de l'opération mathématique entre a et b , Δx l'erreur absolue sur cette dernière grandeur et $\Delta x/x$ l'erreur relative correspondante.

Opération	x	Δx	$\Delta x/x$
addition	$a + b$	$\Delta a + \Delta b$	$(\Delta a + \Delta b)/(a + b)$
soustraction	$a - b$	$\Delta a + \Delta b$	$(\Delta a + \Delta b)/(a - b)$
multiplication	$a \times b$	$b\Delta a + a\Delta b$	$(\Delta a/a) + (\Delta b/b)$
division	a/b	$(b\Delta a + a\Delta b)/b^2$	$(\Delta a/a) + (\Delta b/b)$
puissance	a^n	$na^{n-1}\Delta a$	$n\Delta a/a$

TABLE 2.1 – Erreurs absolues et relatives de grandeurs composées.

Pour les sommes et différences, Δx est donc la somme des Δ absolus. Pour les produits et quotients, $\Delta x/x$ est donc la somme des Δ relatifs.

4 La notation scientifique et les chiffres significatifs

Nous l'en avons remarqué, noter une infinité de chiffres pour un résultat de mesure n'a pas de sens. Où s'arrêter ? Comment noter ces résultats ? Nous allons en discuter ici.

A Les chiffres significatifs

Imaginons une mesure dont le résultat est $0,000\,3275\text{ m}$. Le zéro à gauche de la virgule et ceux à sa droite nous renseignent sur "l'ordre de grandeur" de la mesure (ici, l'objet mesuré est de l'ordre du dixième de millimètre).

C'est le premier chiffre différent de zéro (ici le 3) qui nous permet d'affirmer ceci. On dit que c'est le *premier* chiffre significatif. Les zéros ne sont *pas* des chiffres significatifs.

"327 et 5" sont les chiffres significatifs.

Le dernier "5" est *le* (seul et unique) chiffre incertain (mais il est *aussi* significatif). Le chiffre incertain correspond à l'incertitude sur la mesure.

B La notation scientifique

Il est important, en science, de noter ses résultats en notation scientifique. Les intérêts de cette notation sont de permettre de comparer rapidement diverses mesures, de connaître directement leur ordre de grandeur et de savoir quelle est la précision de ces mesures.

La notation avec des puissances de dix se justifie d'autant plus si on considère, par exemple, des échelles de distance. Ainsi, la taille de notre galaxie est d'approximativement 100 000 années-lumière càd. $9,4608 \times 10^{20}$ m. D'un autre côté, si on regarde du côté de l'infiniment petit, la taille d'un noyau est de l'ordre de 1×10^{-14} m. C'est plus facile (et plus clair) que d'écrire : 0,000 000 000 000 01 m

L'expression d'une quantité en notation scientifique répond aux règles suivantes :

1. On écrit le premier chiffre compris entre 1 et 9,
2. puis, éventuellement des chiffres après la virgule.
(Le nombre *total*¹ de chiffres est appelé le nombre de chiffres significatifs.)
3. Cette première partie est multipliée par une puissance de dix.
 - La première partie est appelée la *mantisse*;
 - la puissance de dix dans la deuxième partie est l'exposant.

5 Exercices

1. Convertir dans les unités indiquées et écrire en notation scientifique :

(a) $5,08 \text{ mm} = ? \mu\text{m}$

$$5,08 \text{ mm} = 5,08 \times 10^3 \mu\text{m} = 5080 \mu\text{m}$$

m	dm	cm	mm	5	0	8	μm
							0

(b) $0,543 \text{ mg} = ? \text{ g}$

$$0,543 \text{ mg} = 5,43 \times 10^{-1} \text{ mg} = 10^{-1} \times 5,43 \times 10^{-3} \text{ g} = 5,43 \times 10^{-4} \text{ g}$$

g	dg	cg	mg	5	4	μg
						3

(c) $5,098 \times 10^{-4} \text{ s} = ? \mu\text{s}$

$$5,098 \times 10^{-4} \text{ s} = 10^{-4} \times 5,098 \times 10^6 \mu\text{s} = 5,098 \times 10^2 \mu\text{s}$$

(d) $9913 \text{ ng} = ? \text{ mg}$

$$9913 \text{ ng} = 9,913 \times 10^3 \text{ ng} = 10^3 \times 9,913 \times 10^{-9} \text{ g} = 10^{-6} \times 9,913 \times 10^3 \text{ mg} = 9,913 \times 10^{-3} \text{ mg}$$

(e) $0,58 \text{ km} = ? \text{ cm}$

$$5,8 \times 10^4 \text{ cm}$$

(f) $54 \times 10^{-20} \text{ Ms} = ? \text{ ms}$

$$5,4 \times 10^{-10} \text{ ms}$$

(g) $3656,3 \text{ cm}^3 = ? \text{ hL}$

$$3656,3 \text{ cm}^3 = 3,6563 \times 10^3 \text{ cm}^3 = 10^3 \times 3,6563 \times 10^{-3} \text{ dm}^3 = 3,6563 \text{ dm}^3 = 3,6563 \text{ L} = 3,6563 \times 10^{-2} \text{ hL}$$

(h) $3,69 \text{ m}^3 = ? \text{ L}$

$$3,69 \times 10^3 \text{ L}$$

2. Voici différentes longueurs, en *respectant cet ordre*,

- les écrire en notation scientifique,
- les convertir en mètres.
- (Attention aux chiffres significatifs!)

1. càd. avant et après la virgule

- (a) 107,30 km
 $1,0730 \times 10^5 \text{ m}$
- (b) 2741,94 cm
 $2,74194 \times 10^1 \text{ m}$
- (c) 0,000000001 μm
 $1 \times 10^{-15} \text{ m}$
- (d) 0,12 km
 $1,2 \times 10^2 \text{ m}$
- (e) 0,4000 mm
 $4,000 \times 10^{-4} \text{ m}$
- (f) 3,1415 pm
 $3,1415 \times 10^{-12} \text{ m}$
- (g) 10000000 m
 $1 \times 10^7 \text{ m}$
- (h) 0,0000254 Mm
 $2,54 \times 10^1 \text{ m}$
- (i) 32,01 μm
 $3,201 \times 10^{-5} \text{ m}$
- (j) 680 nm
 $6,80 \times 10^{-7} \text{ m}$
- (k) 1325 dm
 $1,325 \times 10^2 \text{ m}$
- (l) 50,03 hm
 $5,003 \times 10^3 \text{ m}$

3. Pour chacune des grandeurs des exercices précédents, calculer :

- (a) l'erreur absolue,
- (b) l'erreur relative.

4. Effectuez les calculs suivants. À chaque fois, calculez :

- l'erreur absolue,
- l'erreur relative.

- (a) $50,03 \text{ hm} + 1325 \text{ dm}$
- (b) $50,03 \text{ hm} \times 1325 \text{ dm}$
- (c) $\frac{32,01 \mu\text{m}}{680 \text{ nm}}$

Deuxième partie

Cinématique

Chapitre 3

Positions, trajectoires et systèmes de référence

Sommaire

1	Le mobile ponctuel	18
2	Le temps	19
	A Date et instant	19
	B Durée	20
3	Positions, trajectoires	20
	A Repos et mouvement	20
	B Positions	20
	C Trajectoires	20
4	Les systèmes de référence	21
	A Cartésiens	21
	B Polaires, cylindriques et sphériques	23
	C Différentes coordonnées sphériques	24
	D Vecteurs unités	25
	E Degrés de libertés	27
	F Changement de système	28
5	Exercices	28

Introduction

Nous traiterons ici de généralités. Il va s'agir de définir quelques concepts de base concernant l'étude du mouvement

Tous les jours nous sommes en mouvement. Nous marchons, courrons, nageons, sautons, grimpons descendons, tournons... Ces mouvements si naturels, nous allons les analyser au "filtre" de la physique. Les mots de tous les jours vont prendre un sens plus précis, parfois en contradiction avec le sens courant.

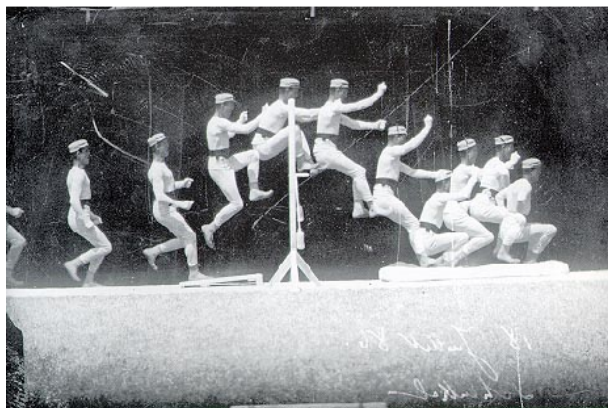


FIGURE 3.1 – Un saut.

Ces concepts sont ceux qui sont utilisés pour analyser les mouvements des sportifs, pour expliquer le comportement d'une machine, mais aussi dans les jeux vidéos. Si le graphisme des jeux vidéos n'obéit pas à ces lois, les mouvements n'ont pas l'air naturels. De nombreux physiciens travaillent d'ailleurs dans le monde de l'informatique et du jeu vidéo.

Nous allons suivre aussi une logique de simplification.

1 Le mobile ponctuel

La démarche de la physique consiste, entre autre, à "aller à l'essentiel" pour étudier une situation. Les physiciens vont ainsi réduire l'étude du mouvement d'un corps à l'étude du mouvement d'un point. Nous nous limiterons donc à l'étude du mouvement du centre de masse (ou de gravité) du corps considéré.

Nous appellerons ce point le mobile ponctuel. On dit aussi "le point matériel".

C'est à partir de cette idéalisation de la réalité que nous pourrons étudier des situations plus complexes. Ainsi, pour étudier le mouvement d'un cylindre roulant sur un plan incliné, nous étudierons d'abord le mouvement de son centre de masse, réduisant ainsi l'étude du mouvement à celui d'une translation parallèle à la surface du plan incliné. Pour étudier le mouvement de rotation, nous étudierons le mouvement de certains points privilégiés du cylindre mais, à nouveau, en nous limitant à certains points.

Cette démarche est utilisée pour analyser les mouvements des sportifs.



FIGURE 3.2 – Seuls les mouvements de quelques points sont analysés.

Plutôt que d'étudier tout un corps en mouvement, nous allons nous concentrer sur les mouvements des points de ce corps.



FIGURE 3.3 – Les différentes positions de quelques points.

2 Le temps

Les temps se mesurent en secondes.

A Date et instant

Définition 9 (instant). Un instant est une date. C'est un temps infiniment court.

Si on trace la droite du temps, c'est un point sur cette droite.

Nous traiterons une date comme un "point de repère", une sorte de "panneau" ou de "drapeau" "accroché" à un événement et permettant de l'identifier.

B Durée

Définition 10 (durée).

Une durée est la différence entre une date ultérieure et une date antérieure .

$$\Delta t = t_b - t_a \quad (3.1)$$

Où

- Δt = la durée (s),
- t_a = une première date (s),
- t_b = une date postérieure à la première (s).

3 Positions, trajectoires

A Repos et mouvement

Les notions de repos et de mouvement dépendent du point de vue adopté. On parle de "relativité du mouvement".

Pour nous en convaincre, imaginons une situation qui vous est peut être familière : Des amis se séparent dans une station de métro. Certains (groupe Albert) restent sur le quai ; d'autres (groupe Bertrand) montent dans une rame ; un troisième groupe (groupe Caroline) embarque dans la rame allant en sens inverse.

La rame A démarre et pourtant les passagers du groupe B ont une sensation de nausée en croyant que c'est leur rame qui démarre.

Étudions la question de "qui est en mouvement", "qui est au repos" selon le point de vue des différents groupes.

Résumons cette situation sous forme de tableau :

observateur \ mobile	A	B	C
	A	r	m
B	m	r	r
C	m	r	r

TABLE 3.1 – Repos et mouvement selon l'observateur.

La notion de repos ou de mouvement n'a du sens que si on précise l'observateur : la personne ou l'objet qui va servir de référence.

B Positions

Définition 11 (position). La position d'un mobile est le lieu où se trouve le mobile ponctuel à un instant donné tel que définit par un observateur donné.

C Trajectoires

Définition 12 (trajectoire). Une trajectoire c'est l'ensemble de positions occupées par un mobile.

C'est une courbe continue.

Relativité

La trajectoire dépend du système de référence choisi.

Exemple : bateau ou clown

4 Les systèmes de référence

Pour indiquer des positions, on a besoin d'un système de référence.

Un système de référence a toujours une origine. Ensuite un certain nombre de valeurs permette de déterminer de manière *univoque* l'emplacement d'un objet dans ce système.

Le système choisi va dépendre de la situation étudiée. Il faut se poser des questions : Sommes-nous à une, deux ou trois dimensions ? La situation présente t' elle des symétries particulières ?

A Cartésiens

Les systèmes les plus connus sont les systèmes cartésiens¹ ou orthonormés.

a) À une dimension

La droite réelle graduée fournit un repère pour les situations se déroulant sur une seule droite.

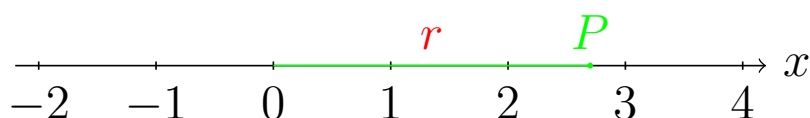


FIGURE 3.4 – Un axe à une dimension : l'emplacement du point "P" est donné par le réel "r".

1. Le terme cartésien vient du nom de leur inventeur le français René Descartes.

b) À deux dimensions

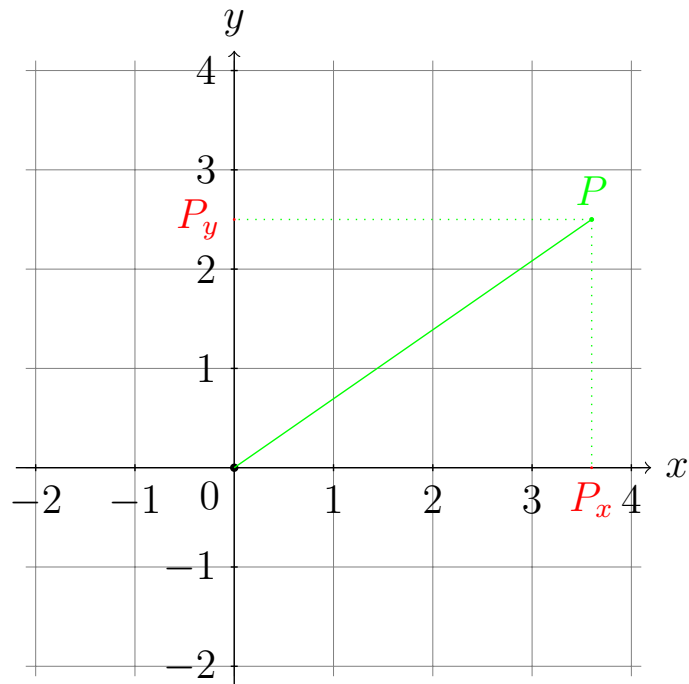


FIGURE 3.5 – Un système cartésien à deux dimensions : l'emplacement du point "P" est donné par les réels " P_x " et " P_y ".

c) À trois dimensions

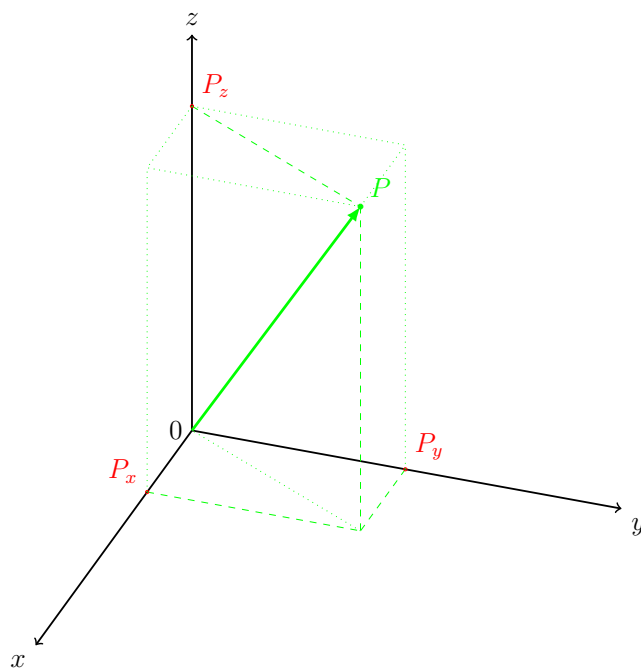


FIGURE 3.6 – Un système cartésien à trois dimensions : l'emplacement du point "P" est donné par les réels " P_x ", " P_y " et " P_z ".

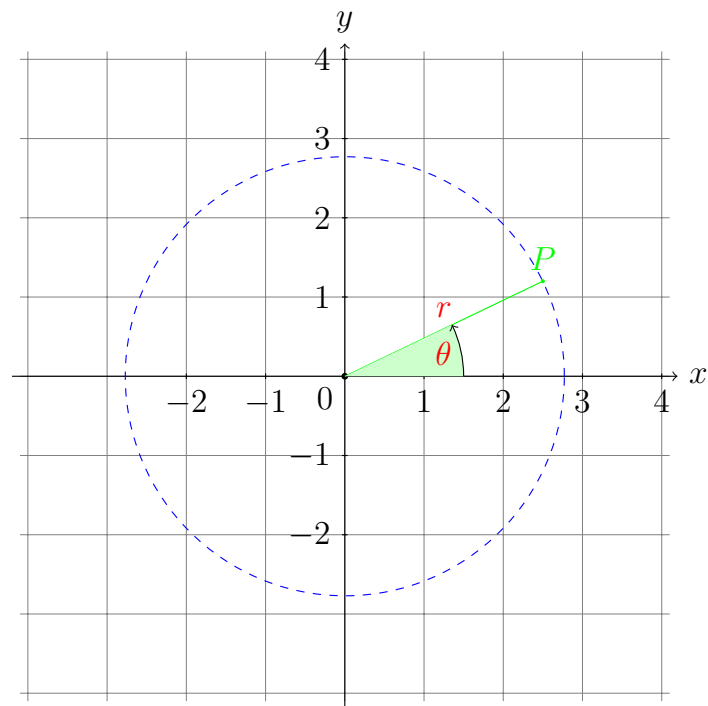
B Polaires, cylindriques et sphériques**a) Polaires**

FIGURE 3.7 – Un système polaire à deux dimensions : l'emplacement du point "P" est donné par les réels " r " et " θ ".

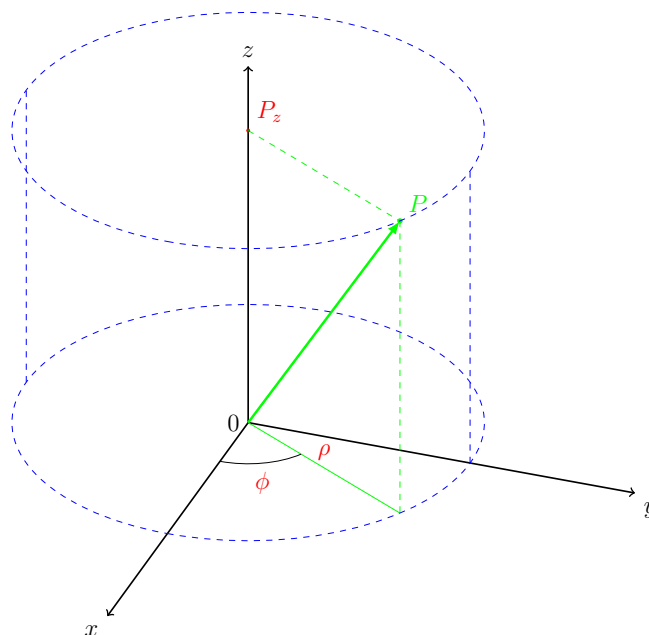
b) Cylindriques

FIGURE 3.8 – Un système de référence en coordonnées cylindriques : l'emplacement du point "P" est donné par les réels " ρ ", " P_z " et " Φ ".

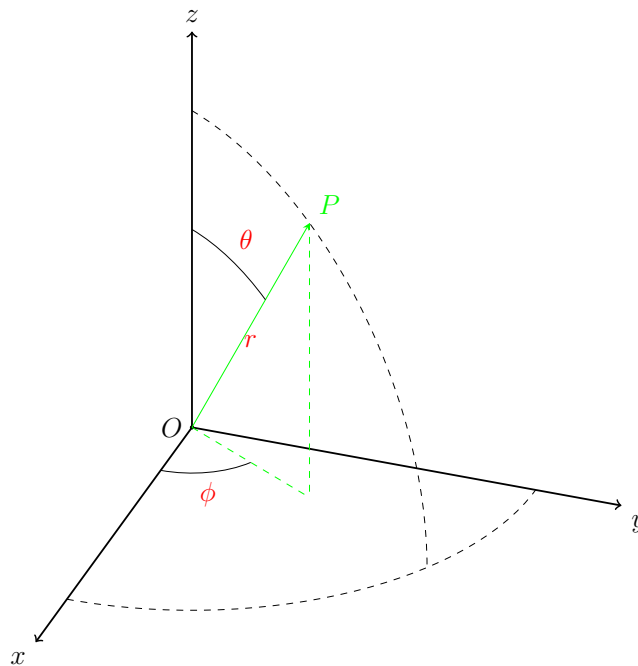
c) Sphériques

FIGURE 3.9 – Un système de référence en coordonnées sphériques : l'emplacement du point "P" est donné par les réels " r ", " Φ " et " θ ".

C Différentes coordonnées sphériques

Pour des questions de cohérence interne dans chacune de leur branche, les physiciens, mathématiciens et géographes n'emploient pas exactement les mêmes systèmes de coordonnées sphériques.

a) Physiciens

Les conventions des physiciens sont celles utilisées pour la figure 3.9 p. 24.
La distance " r " entre l'origine et le point "P" est souvent notée " ρ ".

b) Mathématiciens

Dans la convention des mathématiciens, les angles " θ " et " Φ " sont inversés par rapport aux conventions des physiciens.

c) Géographes

Dans la convention des géographes, l'angle entre la demi-droite reliant l'origine au point "P" et l'axe vertical est remplacé par l'angle entre la demi-droite reliant l'origine au point "P" et le plan " xy ". Cet angle vaut donc 0° à l'équateur et respectivement 90° et -90° aux pôles. C'est la latitude.

d) Astronomes

Les astronomes emploient deux systèmes de coordonnées sphériques obéissant aux mêmes conventions que les géographes.

— Le premier système est appelé alt-azimutal et repère les astres du point de vue local de l'observateur.

— l'autre système est appelé "dec-ra" pour déclinaison et ascension droite ("right ascension" en anglais).

Ce dernier système est préféré par les astronomes car il définit la position des astres de manière plus "globale" par rapport à une sphère d'étoiles fixes. L'axe "z" est parallèle à l'axe de rotation de la Terre et pointe vers le nord. Dans le plan "xy" l'angle de référence est mesuré à partir du "point vernal".

D Vecteurs unités

Lorsqu'on utilise une base dans un système de référence quel qu'il soit, il est souvent nécessaire de décomposer le vecteur " \overrightarrow{OP} " issu de l'origine et allant au point "P". Les composantes vont être des multiples de vecteurs unités caractéristiques de la base choisie.

a) Cartesiens

Dans les repères cartésiens, nous choisirons de noter ces vecteurs unités : " \vec{i}_x , \vec{i}_y et \vec{i}_z ".

Le vecteur \overrightarrow{OP} va donc être décomposé en trois vecteurs : $\overrightarrow{OP_x}$, $\overrightarrow{OP_y}$ et $\overrightarrow{OP_z}$.

Si nous considérons que chacun de ces vecteurs est un multiple des vecteurs unités correspondant, nous pourrions donc écrire :

Propriété 1 (Décomposition en vecteurs unités).

$$\overrightarrow{OP} = P_x \vec{i}_x + P_y \vec{i}_y + P_z \vec{i}_z \quad (3.2)$$

On dit que le vecteur \overrightarrow{OP} est une combinaison linéaire des vecteurs \vec{i}_x , \vec{i}_y et \vec{i}_z .

D'autres conventions existent pour représenter ces vecteurs unités : " \vec{e}_1 , \vec{e}_2 et \vec{e}_3 " ou encore " \vec{i} , \vec{j} et \vec{k} ". Elles sont équivalentes.

b) \vec{i}_r , \vec{i}_θ

Nous étudierons des mouvement circulaires où la base choisie correspondra à un système de coordonnées polaires.

Là aussi des vecteurs unités seront utiles : un vecteur unité \vec{i}_r selon le rayon "r" et un vecteur unité \vec{i}_θ perpendiculaire au rayon et donc tangent à la circonférence.

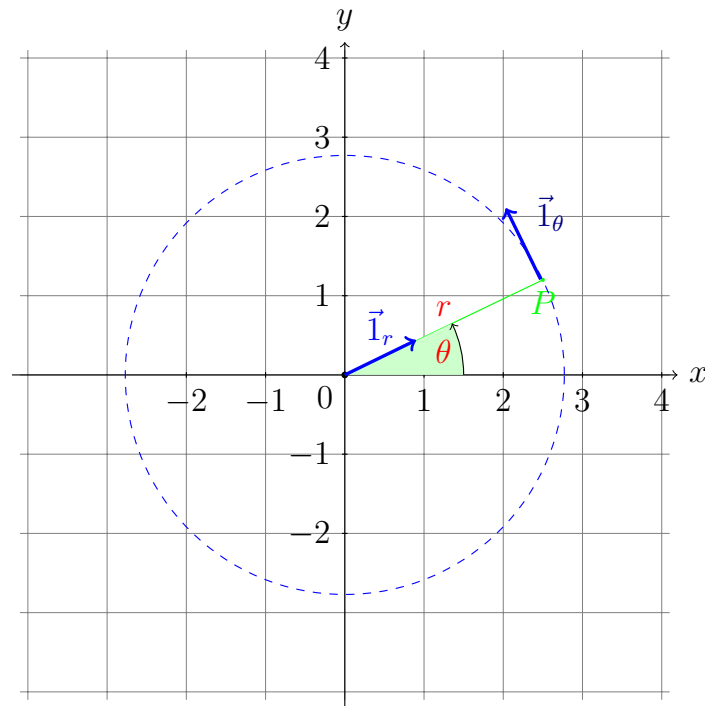


FIGURE 3.10 – Vecteurs unités dans système de référence en coordonnées polaires.

Ces vecteurs peuvent être ramenés à l'origine.

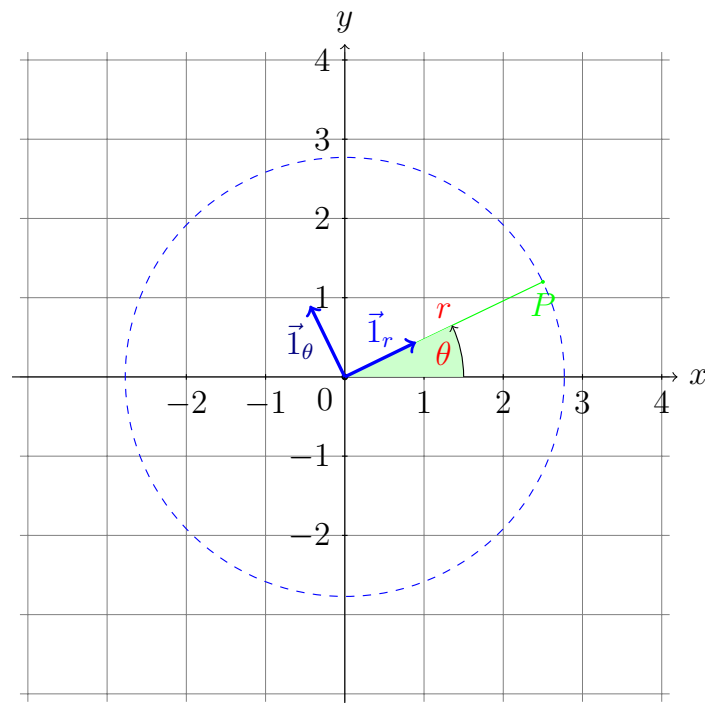


FIGURE 3.11 – Vecteurs unités ramenés à l'origine dans système de référence en coordonnées polaires.

Il peuvent aussi être placés au point "P".

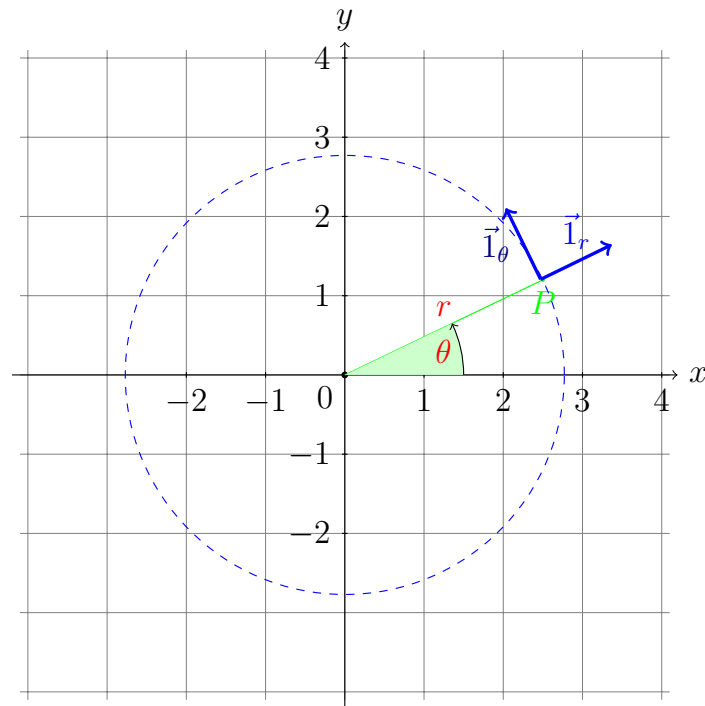


FIGURE 3.12 – Vecteurs unités au point P dans système de référence en coordonnées polaires.

E Degrés de libertés

Les degrés de liberté appartiennent à une classe d'objet qu'on appelle des coordonnées généralisées.

Imaginons une coccinelle marchant régulièrement le long d'un ressort. Certes le mouvement est dans l'espace mais pourtant on n'a pas besoin de trois paramètres pour préciser l'emplacement de l'insecte, un seul suffit. Ainsi, trois équations avec un seul paramètre (par exemple le temps ou la "longueur" de ressort parcourue) définiront la position du coléoptère.

La "hauteur" de la coccinelle le long du ressort donnera aussi la position de la coccinelle en "x" et en "y".

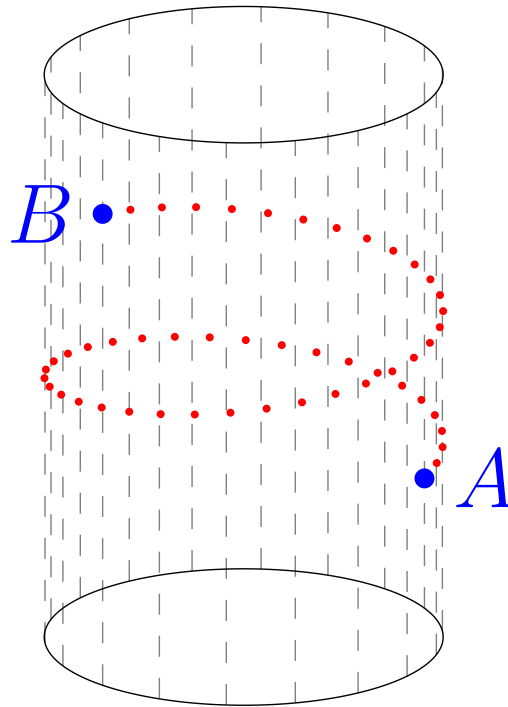


FIGURE 3.13 – Le mouvement d’une coccinelle sur un ressort.

Dans ce type de mouvement, on parle de degré de liberté. Dans l’exemple de la coccinelle, bien que nous soyons à trois dimensions, un seul paramètre suffit pour déterminer la position : nous dirons que le mouvement est à *un* degré de liberté.

La longueur parcourue le long du ressort depuis une origine est une *coordonnée curviligne*.

F Changement de système

Il est parfois important de connaître les coordonnées d’un point dans plusieurs systèmes (un cartésien et un polaire par exemple). Des techniques existent pour passer de l’un à l’autre.

a) Jacobien

Le changement de coordonnées pour passer d’un système à l’autre se fait via des matrices. Une matrice qui permet de traiter ce changement est appelée un *jacobien*.

5 Exercices

Chapitre 4

Déplacements et vitesses

Sommaire

1	Vecteurs positions et déplacements	30
	A Vecteur position	30
	B Vecteur déplacement	30
2	Vitesses	32
	A Histoire du concept de vitesse	32
	B Le vecteur vitesse moyenne	33
	C Vecteur vitesse instantanée	35
3	Exercices	38

Introduction

Nous allons ici formaliser une série de notions. Ainsi, les positions vont être renseignées par des vecteurs. La définition de vitesse va sembler devenir presque contre-intuitive pour pouvoir se préciser. Le concept de déplacement va établir le lien entre ces nouvelles définitions. Nous réaliserons ainsi une première approche du calcul différentiel en physique.

1 Vecteurs positions et déplacements

A Vecteur position

Nous savons qu'il y a correspondance entre les coordonnées d'un point et les composantes d'un vecteur issu de l'origine et se terminant en ce point.

a) Définition

Désormais nous utiliserons le vecteur position pour définir l'emplacement d'un mobile.

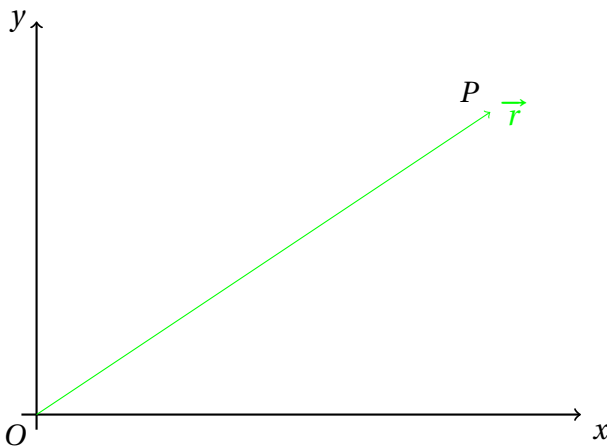


FIGURE 4.1 – Le vecteur position.

Définition 13 (vecteur position). Le vecteur position \vec{r} est la grandeur vectorielle \overrightarrow{OP} caractérisant la position du mobile M par rapport à l'origine du système de référence.

Le vecteur position \vec{r} a toutes les caractéristiques d'un vecteur (direction, sens, norme). Mais c'est une grandeur vectorielle. Ceci signifie qu'il est susceptible d'avoir des unités.

La norme (notée "r") du vecteur position \vec{r} se mesure en mètre (m) .

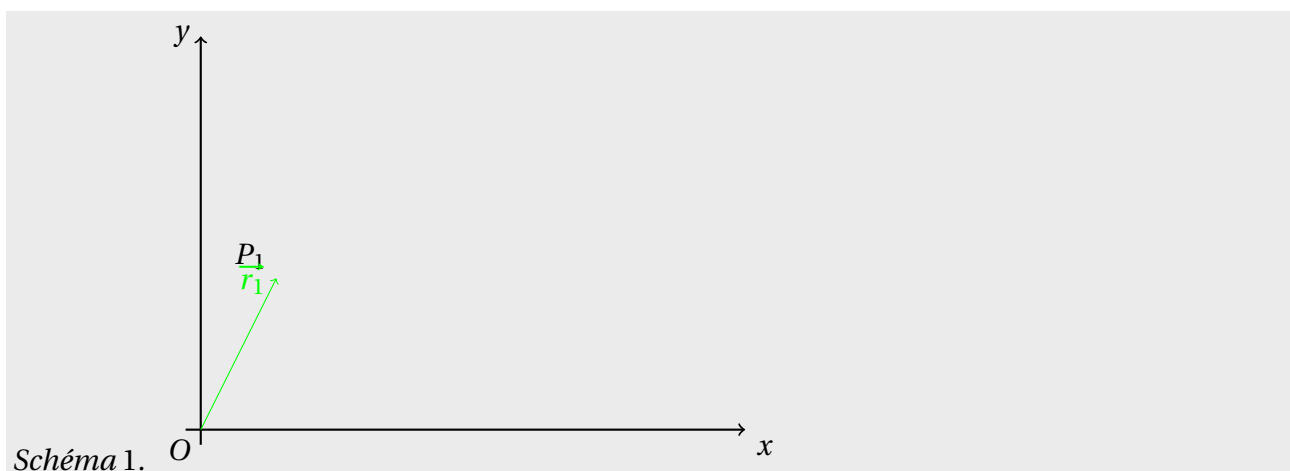
b) Relativité

Il est bien clair que le choix d'un autre repère avec une autre origine va changer le vecteur position "repérant" le mobile M.

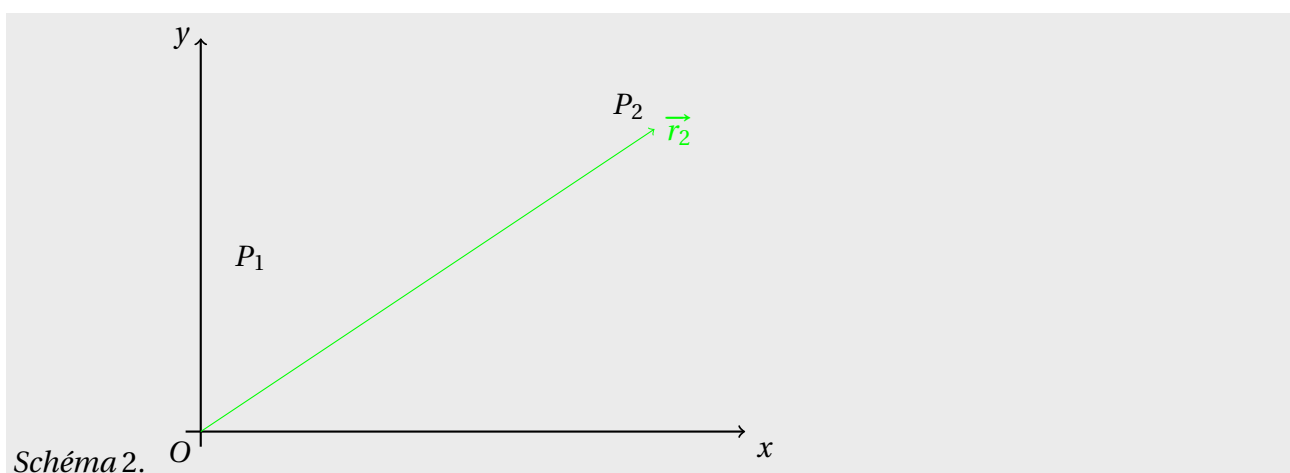
B Vecteur déplacement

a) Justification

Observons deux positions consécutives d'un mobile.



Le vecteur position du mobile M est donc : $\vec{r}_1 = \overrightarrow{OP_1}$



Le vecteur position du mobile M est devenu : $\vec{r}_2 = \overrightarrow{OP_2}$

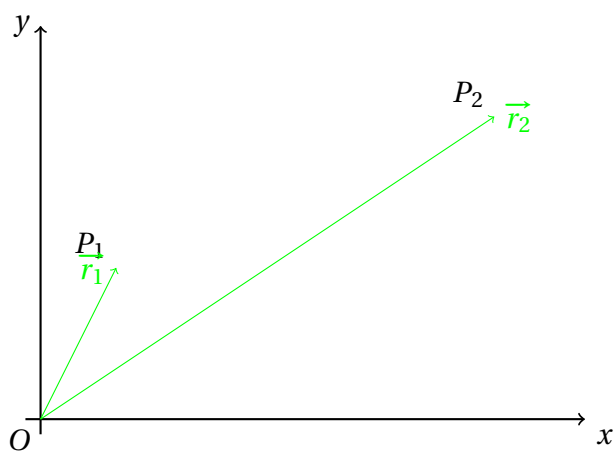
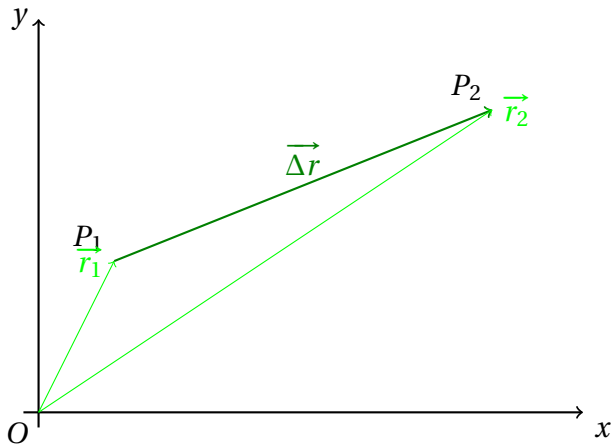


FIGURE 4.2 – Le vecteur position en t_1 et t_2 .

Le vecteur position du mobile M est passé de $\vec{r}_1 = \overrightarrow{OP_1}$ à $\vec{r}_2 = \overrightarrow{OP_2}$

FIGURE 4.3 – Le vecteur déplacement entre t_1 et t_2 .

Donc, si le déplacement se fait de P_1 à P_2 , nous pouvons écrire que le vecteur déplacement est égal à $\overrightarrow{P_1P_2}$.

Réécrivons maintenant ce déplacement en terme de \vec{r}_1 et de \vec{r}_2 :

$$\overrightarrow{P_1P_2} = \overrightarrow{P_1O} + \overrightarrow{OP_2} = \overrightarrow{OP_2} - \overrightarrow{OP_1} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

b) Définition

Si nous décidons de noter la différence $\vec{r}_2 - \vec{r}_1$ comme $\vec{\Delta r}$, la définition suivante vient naturellement :

Définition 14 (vecteur déplacement). Le vecteur déplacement $\vec{\Delta r}$ est la grandeur vectorielle $\overrightarrow{P_1P_2}$ caractérisant la variation de position du mobile M de P_1 vers P_2 .

$$\vec{\Delta r} = \vec{r}_b - \vec{r}_a \quad (4.1)$$

Où

- $\vec{\Delta r}$ = le vecteur déplacement (Unité SI : m),
- \vec{r}_a = la position antérieure (m),
- \vec{r}_b = la position ultérieure (m).

Remarque 2 (positions de départ et d'arrivée). La position \vec{r}_a est souvent appelée la "position de départ" ou "position initiale". Ce n'est pas nécessairement le cas. Il s'agit de la position où "on commence à regarder" pour l'étude du cas considéré.

De même, la position \vec{r}_b est souvent appelée la position "finale" ou "d'arrivée".

c) Relativité

Ici, par contre, le choix d'un autre repère avec une autre origine, pour autant que cette dernière soit immobile par rapport à la première, ne va pas changer le vecteur déplacement du mobile M.

2 Vitesses

A Histoire du concept de vitesse

C'est au jésuite Pierre Varignon (1654 - 1722) que nous devons l'invention du concept "moderne" de vitesse. Avant lui, on comparait entre eux des rapports de grandeurs différentes mais on ne faisait jamais de rapport de grandeurs n'ayant pas les mêmes unités.

Ainsi Galilée compare des rapports de distances parcourues et des temps nécessaires pour les parcourir : $\frac{d_1}{d_2} = \frac{t_1}{t_2}$. Mais il ne compare pas les vitesses au sens moderne : $\frac{d_1}{t_1} = \frac{d_2}{t_2}$

B Le vecteur vitesse moyenne

a) Définition

Définition 15 (vecteur vitesse moyenne). Le vecteur vitesse moyenne $\overrightarrow{v_{moy}}$ d'un mobile est le rapport entre le vecteur déplacement $\overrightarrow{\Delta r}$ et la durée Δt nécessaire pour accomplir ce déplacement.

$$\overrightarrow{v_{moy}} = \frac{\overrightarrow{\Delta r}}{\Delta t} \quad (4.2)$$

où

- $\overrightarrow{v_{moy}}$ est le vecteur vitesse moyenne (Unité SI : ms^{-1}) ;
- $\overrightarrow{\Delta r}$ est le vecteur déplacement (Unité SI : m) ;
- $\Delta t = t_f - t_i$ est la durée nécessaire pour effectuer le déplacement (Unité SI : s) ;
- t_f et t_i sont les dates, respectivement finale et initiale, du déplacement considéré (Unité SI : s) .

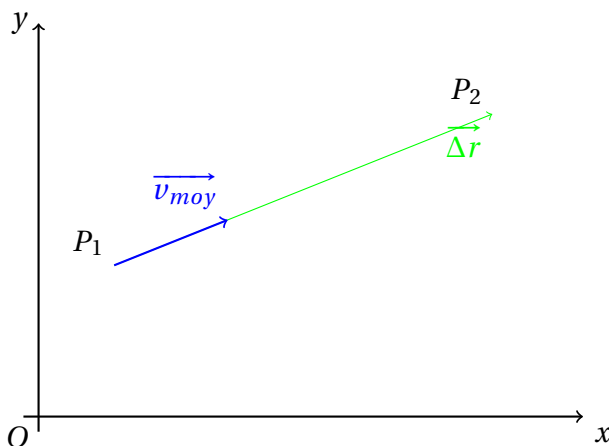


FIGURE 4.4 – Le vecteur vitesse moyenne et le vecteur déplacement.

Le vecteur vitesse moyenne est :

- de même direction que le vecteur déplacement,
- de même sens que le vecteur déplacement,
- de norme égale à $v_{moy} = \frac{\Delta r}{\Delta t}$ ¹

Justifions ce point :

Les propriétés des vecteurs nous apprennent que : $\overrightarrow{AB} = k \cdot \overrightarrow{CD} \Leftrightarrow AB // CD$

Et comme, $\overrightarrow{v_{moy}} = \frac{\overrightarrow{\Delta r}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \overrightarrow{\Delta r}$ avec $\Delta t \in \mathbb{R}$. alors $\overrightarrow{v_{moy}} // \overrightarrow{\Delta r}$

De même, si $k > 0$ les deux vecteurs sont de même sens. Ici $\Delta t > 0$ et donc $\overrightarrow{v_{moy}}$ et $\overrightarrow{\Delta r}$ sont de même sens.

b) Du km h^{-1} au ms^{-1}

En physique, il faut toujours, sauf dans des cas triviaux, utiliser les vitesses en ms^{-1} . Dans la vie courante, cependant, les vitesses sont souvent renseignées en km h^{-1} .

1. Par convention, lorsque nous faisons référence à un vecteur sans mettre de "flèche", c'est que nous ne considérons que sa norme.

Il est facile de passer d'une unité à l'autre si on se souvient que :

— 1 km = 1000 m ,

— 1 h = 3600 s.

Il en découle que :

Propriété 2 (Du km h^{-1} au m s^{-1}).

$$1 \text{ km h}^{-1} = \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = \frac{1}{3,6} \text{ m s}^{-1} \quad (4.3)$$

(i) **Exemples** Une vitesse de $72 \text{ km h}^{-1} = \frac{72}{3,6} \text{ m s}^{-1} = 20 \text{ m s}^{-1}$.

c) Ordres de grandeur

vitesse mobile	m s^{-1}	$\approx \text{km h}^{-1}$
escargot	0,001	0,004
Marche (homme)	1	4
Course (100 m)	10	40
Guépard	30	120
TGV	100	360
Avion (ligne)	220	800
Son (air sec à 20 °C)	340	1020
Avion (supersonique)	400	1400

TABLE 4.1 – Vitesses de différents mobiles.

d) La vitesse moyenne n'est pas la moyenne des vitesses

Remarquons de suite, qu'en général, la vitesse moyenne n'est pas la moyenne des vitesses.

(i) **Exemple** Prenons un cas extrême, effectuons un tour complet sur un circuit de grand prix à une vitesse constante de 200 km h^{-1} .

Le vecteur déplacement est *nul*!

Selon notre définition, la vitesse moyenne est donc elle aussi nulle !

e) Limitations de la vitesse moyenne

La vitesse moyenne telle que nous venons de la définir permet de répondre à certaines questions mais connaît aussi des limitations. Faisons une rapide revue de celles-ci.

(i) **Vitesses variables en grandeur** Imaginons, pour simplifier les choses, un mouvement rectiligne. qui nous dit que ce mouvement se fait à vitesse constante? On eut très bien pu se faire "flasher" sur l'autoroute à plus de 120 km/h alors que notre vitesse moyenne était de 90 km/h!

(ii) **Vitesses variables en sens** Qui nous dit que ces vitesses sont toutes de même sens? Même sur un mouvement rectiligne, nous pouvons faire des allers retours!

(iii) **Vitesses variables en direction** Imaginons maintenant un mouvement dans l'espace. Le vecteur vitesse moyenne pointe dans une direction qui n'est pas nécessairement la direction du mouvement au départ.

(iv) **Cas général** Nous pouvons même imaginer une combinaison de toutes ces situations.

(v) **Conclusion** Il est donc clair que la vitesse moyenne n'est pas adaptée pour caractériser la vitesse du mobile dans toutes les situations possibles à tout instant.

C Vecteur vitesse instantanée

Pour répondre aux problèmes soulevés au point précédent, nous allons étudier la vitesse à chaque instant² du parcours. Nous étudierons donc la vitesse instantanée!

a) Une solution aux limitations de la vitesse moyenne

Construisons la trajectoire d'un mobile M dans le plan xy et considérons un point de départ P et un point d'arrivée Q. Considérons aussi quelques points intermédiaires sur cette trajectoire et nommons les de P_1 (=P) à P_5 (=Q). Traçons le vecteur déplacement entre ces points puis le vecteur vitesse moyenne associé : $\overrightarrow{v_{1;5}}$ ou vecteur vitesse entre P_1 et P_5 .

Comme précédemment, le vecteur vitesse moyenne $\overrightarrow{v_{1;5}}$ ne pointe pas dans la direction de la trajectoire ce qui n'est pas satisfaisant.

Prenons une durée Δt un peu plus courte et étudions le mouvement entre P_1 et P_4 . Il y a une légère amélioration : $\overrightarrow{v_{1;4}}$ se "rapproche" de la trajectoire.

Considérons donc une durée Δt encore un peu plus courte et étudions le mouvement entre P_1 et P_3 . Il y a une amélioration de $\overrightarrow{v_{1;3}}$ mais ce n'est pas encore idéal.

Finalement, si nous prenons le point P_2 comme point d'arrivée, le vecteur vitesse $\overrightarrow{v_{1;2}}$ "va" dans la direction du mouvement.

Remarque 3 (vitesses moyennes plus ou moins constantes). La longueur des différentes vitesses reste à peu près constante. En effet, si nous ne sommes pas dans un cas "trop exotique" où la vitesse "au compteur" ne varie pas de trop et nous supposons que c'est le cas ici, chaque fois que Δt diminue, la longueur du déplacement diminue en même proportion. Et donc $\frac{v_{1;5}}{\Delta t_{1;5}} \simeq \frac{v_{1;4}}{\Delta t_{1;4}} \simeq \dots \simeq \frac{v_{1;2}}{\Delta t_{1;2}} = cste$.

2. et donc, aussi, en chaque point du parcours

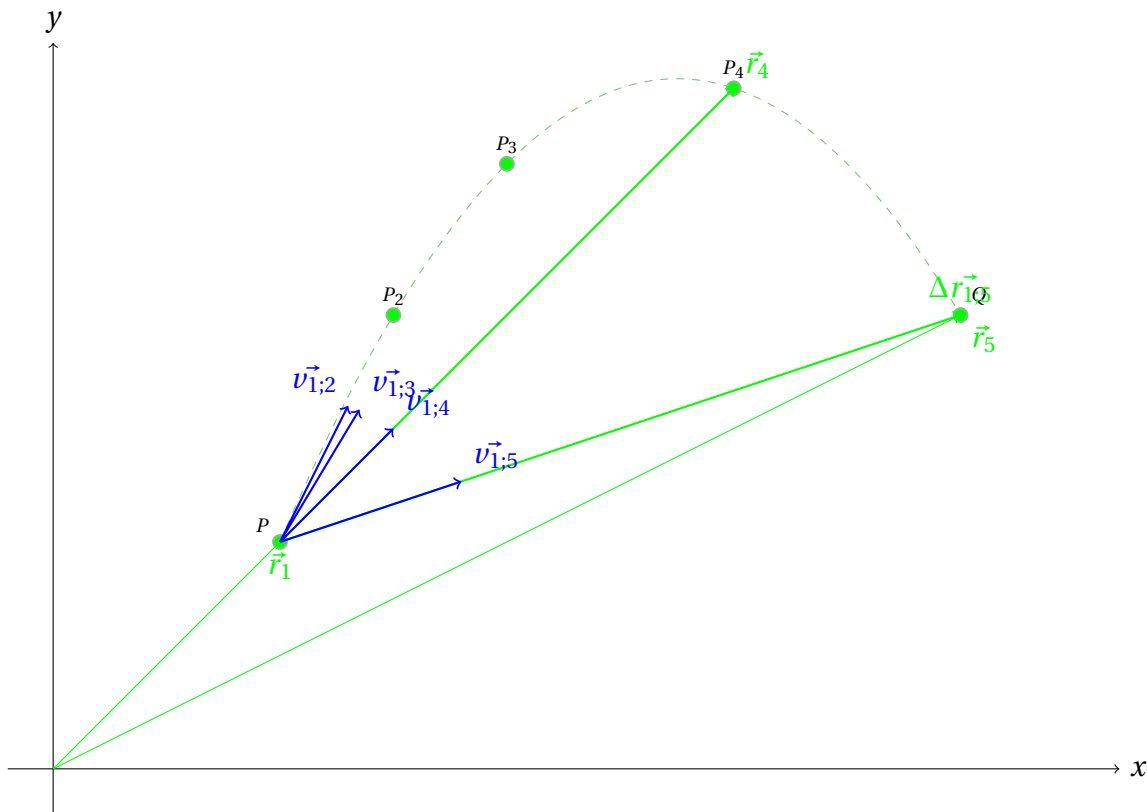


FIGURE 4.5 – De la vitesse moyenne à la vitesse instantanée.

Nous dirons que :

- Le point P_2 tend vers P_1 ;
- la date t_2 tend vers t_1 ;
- le vecteur vitesse moyenne tend vers le vecteur vitesse instantanée.

(i) **Tangente** Il est aussi évident que le vecteur vitesse instantanée au point P est tangent à la trajectoire.

C'est une propriété importante que nous exploiterons par la suite.

b) Définition

Le point précédent suggère donc de prendre la vitesse instantanée comme limite de la vitesse moyenne.

Définition 16 (vecteur vitesse instantanée). Le vecteur vitesse instantanée $\overrightarrow{v_{inst}(t)}$ d'un mobile à un instant t est le rapport entre le vecteur déplacement $\overrightarrow{\Delta r}$ (à partir de la position de départ c.à.d. au temps t) et la durée Δt nécessaire pour accomplir ce déplacement, avec un Δt très petit.

$$\overrightarrow{v_{inst}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{\Delta r}}{\Delta t} \quad (4.4)$$

où

- $\overrightarrow{v_{inst}}$ est le vecteur vitesse instantanée (Unité SI : ms^{-1}) ;
- $\overrightarrow{\Delta r}$ est le vecteur déplacement (Unité SI : m) ;
- Δt est la durée tendant vers zéro (Unité SI : s).

c) En pratique : Δt petit ! Mais petit comment ?

En pratique, Δt est aussi petit que le contexte le précise : Si on étudie le mouvement d'une balle de fusil, un Δt d'un millième de seconde sera peut-être nécessaire ; si nous étudions le mouvement d'un escargot, un Δt d'une dizaine de secondes est sans doute suffisant.

(i) Chronophotographie Une des techniques que nous utiliserons pour étudier le mouvement sera celle de la "chronophotographie".

Ces techniques consistent à éclairer un objet ou une scène avec un stroboscope. Les flash du stroboscope sont réguliers : la durée entre chaque flash est notre Δt (typiquement 1/30s). Un appareil photographique est placé face à l'objet en parallèle avec le stroboscope. L'appareil photographique est ouvert "en pose" pendant toute la durée du mouvement. Les différentes positions de l'objet apparaissent donc sur une photographie. Une règle graduée est placée à la même distance de l'appareil photographique que l'objet.

En faisant quelques simples règles de trois pour faire des calculs d'échelle, on peut analyser numériquement le mouvement.

Souvent, on photographie ainsi un objet clair sur un fond sombre.

(ii) Exercices En supposant que notre athlète fait deux mètres de haut, déterminez les déplacements et les vitesses instantanées des figures du cours :

1. fig. 3.1 p. 18
2. fig. 3.3 p. 19

d) Propriétés du point de vue de la physique mathématique

Nous savons bien sûr qu'une limite comme celle de la définition 4.4 est une dérivée. Réécrivons la définition (et pour simplifier l'écriture, sans les vecteurs) dans ce sens :

$$v_{inst} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad (4.5)$$

La vitesse instantanée est la dérivée de la position par rapport au temps. Inversement, nous pouvons réécrire l'équation 4.5 comme suit :

$$dr = v_{inst} \cdot dt \quad (4.6)$$

Et si nous intégrons sur un déplacement d'une position initiale r_i occupée à une date t_i vers une position finale r_f occupée à une date t_f , nous obtenons :

$$\Delta r = \int_{r_i}^{r_f} dr = \int_{t_i}^{t_f} v_{inst} dt \quad (4.7)$$

Le déplacement d'un mobile entre deux positions est égal à l'intégrale de la vitesse de ce mobile sur la durée du déplacement.

Nous reviendrons sur cette propriété.

Notons également que cette propriété est valable en notation vectorielle :

$$\vec{\Delta r} = \int_{\vec{r}_i}^{\vec{r}_f} d\vec{r} = \int_{t_i}^{t_f} \vec{v}_{inst} dt \quad (4.8)$$

3 Exercices

1. Vitesses moyennes :

(a) Si un mobile parcourt 1 km à la vitesse de 90 km h^{-1} puis 1 km à la vitesse de 180 km h^{-1} . Quelle aura été sa vitesse moyenne sur ces 2 km.

— Données :

— $v_1 = 90 \text{ km h}^{-1} = 25 \text{ m s}^{-1}$

— $v_2 = 180 \text{ km h}^{-1} = 50 \text{ m s}^{-1}$

— $\Delta r_1 = 1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$

— $\Delta r_2 = 1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$

— Inconnue : $v_{moy} = ?$

— Formules :

— $v_{moy} = \frac{\Delta r_{tot}}{\Delta t_{tot}}$

— $\Delta t = \frac{\Delta r_{tot}}{v}$

— Résolution :

— $\Delta t_1 = \frac{\Delta r_1}{v_1} = \frac{1000 \text{ m}}{25 \text{ m s}^{-1}} = 40 \text{ s}$

— $\Delta t_2 = \frac{\Delta r_2}{v_2} = \frac{1000 \text{ m}}{50 \text{ m s}^{-1}} = 20 \text{ s}$

— $v_{moy} = \frac{\Delta r_{tot}}{\Delta t_{tot}} = \frac{2000 \text{ m}}{60 \text{ s}} \approx 33,33 \text{ m s}^{-1}$

Chapitre 5

Mouvements rectilignes

Sommaire

1	Définition	40
	A L'axe OX : mouvements dans \mathbb{R}	40
2	Simplification des notations	40
	A Le vecteur déplacement	40
	B Les vecteurs vitesses	40
	C Définitions (ou de l'art de faire du neuf avec du vieux)	41
3	Sens et signes des vecteurs déplacements et vitesses	41
	A Graphiques déplacement et vitesse	41
	B Vitesses négatives	42
4	Étude d'un mouvement rectiligne : différents types de mouvements rectilignes . . .	42
	A MRU	43
	B Repos	43
	C MRUV	43
5	Exercices	43

Introduction

Nous nous intéresserons ici aux mouvements rectilignes en toute généralité.

1 Définition

Définition 17 (mouvement rectiligne). Un mouvement est dit rectiligne si tous les déplacements se font dans une seule direction.

Et donc, comme la trajectoire est une courbe continue, tout mouvement rectiligne a lieu sur une seule droite.

Tout vecteur déplacement aura la même direction que celle du mouvement et le sens de tout vecteur déplacement sera aussi celui du mouvement.

A L'axe OX : mouvements dans \mathbb{R}

Tous les mouvements rectilignes sont à une dimension.

Tous les mouvements rectilignes ayant lieu sur une droite, le choix d'un système de référence s'impose naturellement : la droite sera la droite des réels et aussi l'axe (par ex. OX) du système de référence.

2 Simplification des notations

A Le vecteur déplacement

Étudions le vecteur déplacement à une dimension :

$$\overrightarrow{\Delta r} = \overrightarrow{\Delta r_x} = \Delta r_x \vec{1}_x$$

En effet, seule la composante du vecteur parallèle à l'axe OX existe.

Ceci suggère des simplifications supplémentaires :

$$\overrightarrow{\Delta r} = \overrightarrow{\Delta r_x} = \Delta r_x = \Delta r$$

En effet, la seule composante du vecteur étant en x , donner la norme du vecteur (avec son signe) suffit pour donner toute l'information nécessaire pour déterminer le vecteur.

B Les vecteurs vitesses

Étudions les vecteurs vitesses à une dimension, sans nous préoccuper pour l'instant de s'il s'agit de vitesse moyenne ou instantanée.

$$\vec{v} = \vec{v}_x$$

Ici aussi, seule la composante du vecteur parallèle à l'axe OX existe puisque nous savons que les vecteurs vitesses sont parallèles aux vecteurs déplacements et que TOUS les vecteurs déplacements dans le cas qui nous occupe sont parallèles à l'axe !

Ceci suggère des simplifications supplémentaires :

$$\vec{v}_x = v_x = v$$

C Définitions (ou de l'art de faire du neuf avec du vieux)

Et nous pourrons dès lors écrire :

Définition 18 (déplacement rectiligne). Dans le cas d'un mouvement rectiligne, le déplacement Δr est la grandeur $r_f - r_i$ caractérisant la variation de position du mobile M de P_i vers P_f .

Définition 19 (vitesse rectiligne). Dans le cas d'un mouvement rectiligne, la vitesse est le rapport entre le déplacement et la durée nécessaire pour l'accomplir.

$$v = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (5.1)$$

où

- v est la vitesse (Unité SI : ms^{-1});
- Δr est le déplacement (Unité SI : m);
- $\Delta t = t_f - t_i$ est la durée nécessaire pour effectuer le déplacement (Unité SI : s);
- t_f et t_i sont les dates, respectivement finale et initiale, du déplacement considéré (Unité SI : s).

Nous ne précisons volontairement pas s'il s'agit d'une vitesse moyenne ou instantanée!

3 Sens et signes des vecteurs déplacements et vitesses

Utilisons encore un peu les vecteurs.

A Graphiques déplacement et vitesse

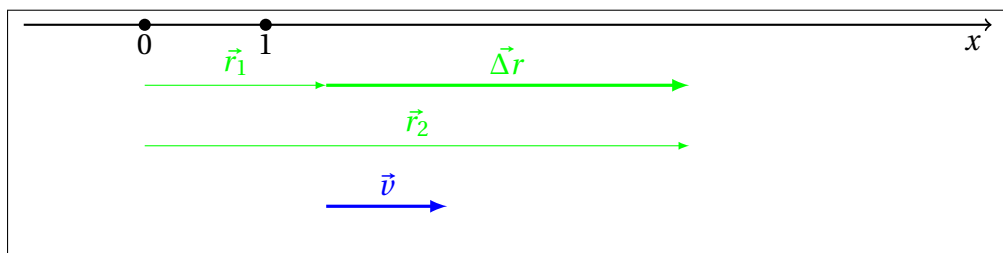


FIGURE 5.1 – Sens et signes des vecteurs déplacements et vitesses : $r_1 \& r_2 \geq 0, r_2 > r_1 \Rightarrow v > 0$.

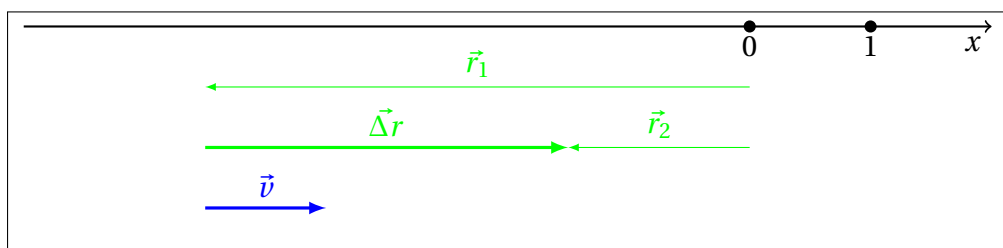


FIGURE 5.2 – Sens et signes des vecteurs déplacements et vitesses : $r_1 \& r_2 \leq 0, r_2 > r_1 \Rightarrow v > 0$.

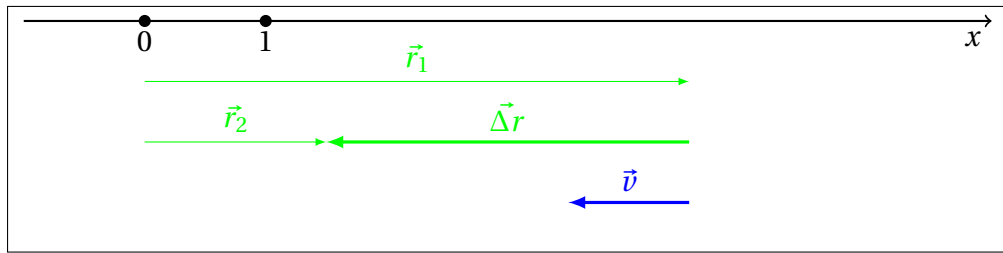


FIGURE 5.3 – Sens et signes des vecteurs déplacements et vitesses : $r_1 \& r_2 \geq 0, r_2 < r_1 \Rightarrow v < 0$.

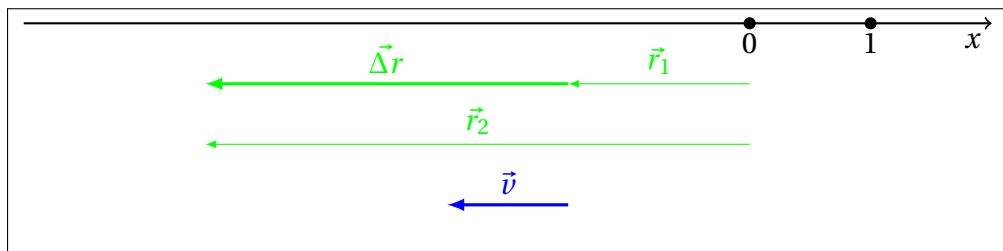


FIGURE 5.4 – Sens et signes des vecteurs déplacements et vitesses : $r_1 \& r_2 \leq 0, r_2 < r_1 \Rightarrow v < 0$.

Si le mouvement est dans le sens de l'axe, le déplacement est positif. QUELQUES SOIENT les positions de départ et d'arrivée.

Si le mouvement est dans le sens contraire de l'axe, le déplacement est négatif. QUELQUES SOIENT les positions de départ et d'arrivée.

Les vitesses obéiront aux mêmes règles.

B Vitesses négatives

La définition vectorielle de la vitesse fait apparaître ici des vitesses négatives. Il peut sembler absurde à certains d'avoir des vitesses négatives.

Propriété 3 (Signe et sens de la vitesse). *Le signe de la vitesse nous donne son sens sur l'axe choisi !*

4 Étude d'un mouvement rectiligne : différents types de mouvements rectilignes

Étudions le mouvement rectiligne d'un mobile et réalisons un graphique de sa position en fonction du temps.



FIGURE 5.5 – Un objet important en mouvement.

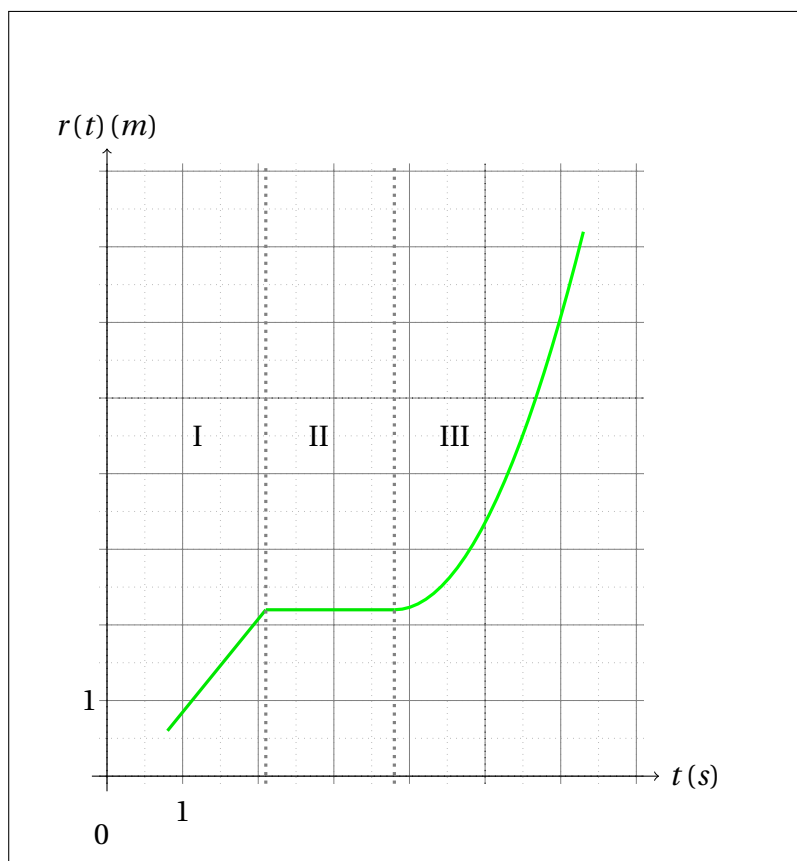


FIGURE 5.6 – L'évolution de la position au cours du temps.

Clairement, ce graphique nous renseigne sur l'existence de différents types de mouvements rectilignes.

Distinguons les :

A MRU

Dans la première partie du mouvement, la vitesse est constante.

B Repos

Dans la deuxième partie du mouvement, la position est constante. Le mobile est immobile ! On parle de "repos".

C MRUV

Finalement, dans la troisième partie du graphique, la vitesse augmente. Il faut réintroduire la vitesse instantanée.

Pour l'instant, nous parlerons de "mouvement rectiligne uniformément varié" ou MRUV.

5 Exercices

Chapitre 6

MRU

Sommaire

1	Définition et conséquences	46
	A Conséquences	46
2	Graphe de la position en fonction du temps	46
3	Graphe de la vitesse en fonction du temps	47
4	Problèmes de croisement	48
	A Croisement et systèmes d'équations	48
	B Détermination des paramètres	48
5	exercices	49

Introduction

Dans le chapitre précédent (Positions, déplacements vitesses), nous avons étudié la manière dont la distance change avec le temps qui passe. Nous avons discuté de la vitesse. La relation (la loi) qui liait l'évolution de la position au temps qui passait avait été définie comme la vitesse : $v = \Delta r / \Delta t$ (m/s).

1 Définition et conséquences

Définition 20 (MRU). Si la trajectoire d'un mobile est rectiligne et sa vitesse constante, le mouvement est défini comme "Mouvement Rectiligne Uniforme" ou MRU.

A Conséquences

Il n'y a pas lieu de faire la différence entre la vitesse moyenne et la vitesse instantanée puisque la vitesse est constante !

En MRU :

$$\text{MRU} : v_{\text{moy}} = v_{\text{inst}} = v \quad (6.1)$$

2 Graphe de la position en fonction du temps

Si nous faisons un graphique avec t en x et r en y, nous avons une droite.

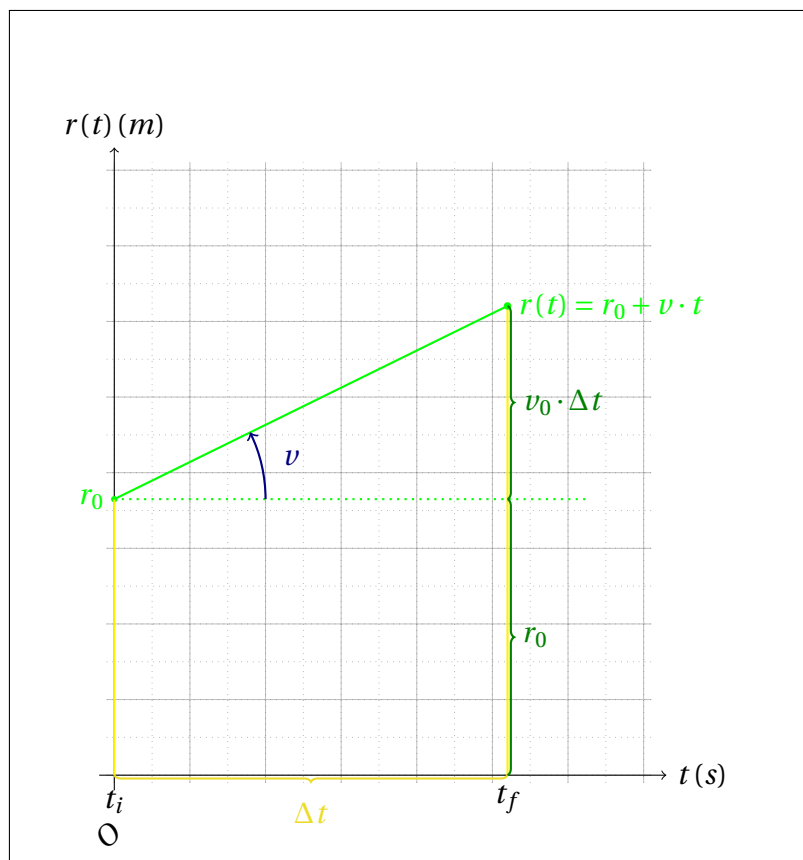


FIGURE 6.1 – Graphique de la position en fonction du temps en MRU.

Faisons un parallèle entre l'équation de la droite et l'équation de droite en général :

$$y = m \cdot x + p \quad (6.2)$$

$$r_f = v \cdot \Delta t + r_i \quad (6.3)$$

- (i) **Conclusion** L'étude d'un MRU peut se ramener à l'étude d'une fonction du premier degré. La vitesse correspond à la pente de la droite. r_0 correspond à l'ordonnée à l'origine de la droite. La pente de la droite permet de distinguer un mouvement rapide d'un mouvement lent.

3 Graphe de la vitesse en fonction du temps

Réalisons le graphique de $v(t)$,

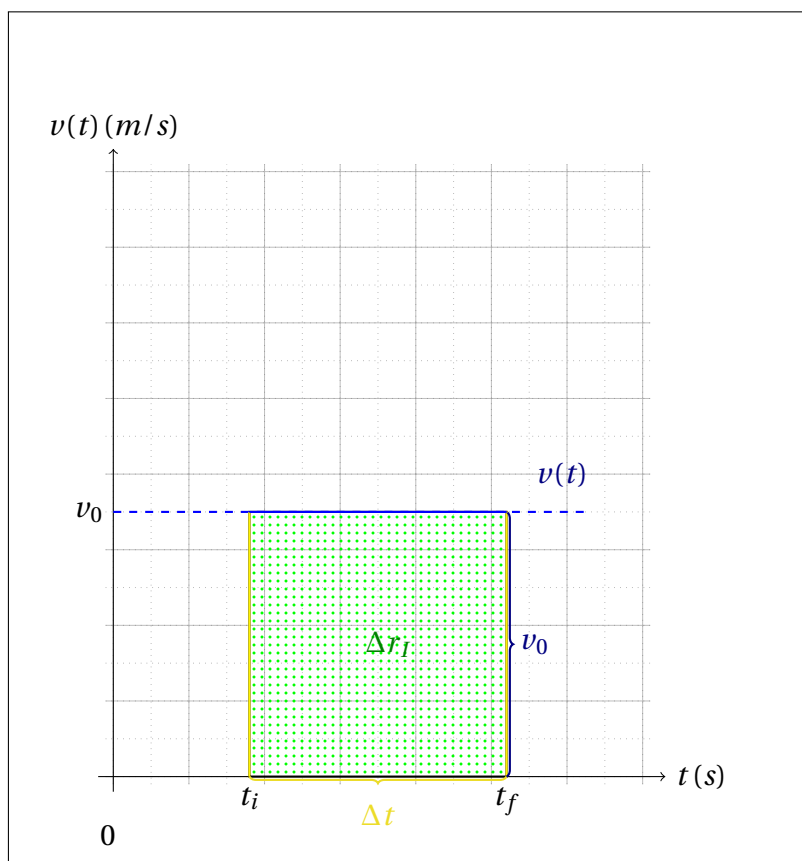


FIGURE 6.2 – Graphique de la vitesse en fonction du temps en MRU.

La surface sous la courbe de $v(t)$ est le déplacement parcouru en une durée Δt . La surface est ici un rectangle.

Ceci correspond bien à l'intégrale 4.7 vue à la page 37.

$$r_f - r_i = v \cdot \Delta t \quad (6.4)$$

peut aussi s'écrire :

$$\Delta r = v \cdot \Delta t \quad (6.5)$$

4 Problèmes de croisement

Les problèmes de croisement impliquent d'étudier le mouvement d'au moins deux mobiles.

A Croisement et systèmes d'équations

Clairement, les problèmes de MRU peuvent donc être résolus en utilisant une équation du premier degré. Et donc s'il y a deux mobiles, il y aura deux équations du premier degré.

Une pour le mobile "A" :

$$r_{Af} = v_A \cdot \Delta t_A + r_{Ai} \quad (6.6)$$

Et une pour le mobile "B" :

$$r_{Bf} = v_B \cdot \Delta t_B + r_{Bi} \quad (6.7)$$

Que signifie : "croisement" ?

a) Croisement

Deux mobiles se croisent lorsqu'ils occupent la même position au même instant.

Si nous appelons respectivement r_c la position du croisement et t_c l'instant du croisement.

Et si nous substituons dans les équations 6.6 et 6.7, nous obtenons les équations suivantes :

$$r_c = v_A \cdot (t_c - t_{Ai}) + r_{Ai} \quad (6.8)$$

$$r_c = v_B \cdot (t_c - t_{Bi}) + r_{Bi} \quad (6.9)$$

Déterminer r_c et t_c revient donc à résoudre le système de deux équations à deux inconnues (r et t) suivant :

$$\begin{cases} r = v_A \cdot (t - t_{Ai}) + r_{Ai} \\ r = v_B \cdot (t - t_{Bi}) + r_{Bi} \end{cases} \quad (6.10)$$

B Détermination des paramètres

Des difficultés peuvent surgir s'il y a plusieurs mobiles qui ne démarrent pas nécessairement en même temps, ni du même point de départ. La notion de Δt doit alors être convenablement considérée. Il faut réaliser que ce Δt n'est pas le même pour les différents mobiles.

Développons cette formule :

$$r(t) - r_0(t_0) = v \cdot (t - t_0)$$

a) En partant de la position 0, en fixant l'instant du départ comme zéro.

$$\Delta r = v \cdot \Delta t$$

devient

$$r(t) = v \cdot t$$

b) En partant de la position r_0 , en fixant l'instant du départ comme zéro.

$$\Delta r(\Delta t) = v \cdot \Delta t$$

devient

$$r(t) = r_0 + v \cdot t$$

c) En partant de la position r_0 , l'instant du départ est t_0 .

$$\Delta r(\Delta t) = v \cdot \Delta t$$

devient

$$r(\Delta t) = r_0 + v \cdot \Delta t$$

5 exercices

- Un marcheur parcourt 3 km en 40 min. Quelle est sa vitesse moyenne ?
 $1,25 \text{ m s}^{-1} = 4,5 \text{ km h}^{-1}$
- En ski de fond, un sportif a une vitesse de $2,5 \text{ m s}^{-1}$. Combien de temps lui faut-il pour parcourir 4,5 km ?
 30 min
- Dans l'air, on considère que la vitesse du son vaut 343 m s^{-1} . La vitesse de la lumière, elle, vaut approximativement $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Lors d'un feu d'artifice, un spectateur se trouve à 2 km du lieu de tir. Après combien de temps percevra-t'il la lumière et le son de l'explosion ?
 $6,67 \times 10^{-6} \text{ s}$ et 5,83 s
- Un sonar est utilisé pour mesurer la profondeur de la mer. Des ultrasons sont émis. Ils se réfléchissent sur le fond et reviennent vers le bateau émetteur. La vitesse des ultrasons dans l'eau est 1450 m s^{-1} . Si l'écho est reçu 1,6 s après son émission, quelle est la profondeur de la mer à cet endroit ?
 1160 m
- Quelle est la vitesse moyenne d'un point à l'équateur ? (Rayon de la Terre = $6,38 \times 10^3 \text{ km}$)
 $464 \text{ m s}^{-1} = 1671 \text{ km h}^{-1}$
- Deux voitures partent en même temps d'un même point de départ. Elles doivent se rendre à une localité située à 120 km de là. La première voiture fait tout le trajet à une vitesse constante de 60 km h^{-1} . La seconde fait les 60 premiers kilomètres à une vitesse de 40 km h^{-1} , puis les 60 derniers kilomètres à une vitesse de 80 km h^{-1} . Quelle voiture arrive la première ? (Justifiez par calcul et par graphique.)
 Première voiture : 2 h
 Deuxième voiture : 2,25 h (ou 2 h 15 min.)
- Un jeune enfant joue à 5 m de sa mère et se met soudain à courir en s'éloignant d'elle à la vitesse de $1,8 \text{ km h}^{-1}$. Deux secondes plus tard, la mère démarre pour le rattraper à la vitesse constante de $7,2 \text{ km h}^{-1}$. Quelle distance l'enfant aura-t'il parcouru ? Pendant combien de temps a-t'il couru ? (Résoudre par graphique "position en fct. du temps" et par calcul.)
 L'enfant court pendant 6 s et aura couru sur 3 m. La mère aura couru pendant 4 s sur 8 m.
- Deux voitures sont éloignées de 180 km et partent en même temps l'une vers l'autre. La première voiture fait tout le trajet à une vitesse constante de 60 km h^{-1} . La seconde roule à une vitesse de 90 km h^{-1} . À quelle distance du point de départ de la première voiture et combien de temps après leur départ, les voitures vont-elles se croiser ? (Justifiez par calcul et par graphique.)
 72 km, 1,2 h (ou 1 h 12 min.)
- Une automobile parcourt un trajet de 60 km en 1 h. Le premier tiers de la distance est parcouru à une vitesse qui est double de celle à laquelle la voiture roule sur les deux derniers tiers du trajet. Quelles sont ces vitesses ?
 50 km h^{-1} et 100 km h^{-1}

10. Deux frères Borlée partent simultanément pour une course. Le premier a une vitesse v_1 et le second une vitesse v_2 . Le second franchit la ligne de départ avec un temps T de retard par rapport au premier. Quelle distance les deux coureurs ont-ils franchie ?

Résolvez littéralement !

$$\begin{cases} v_1 = \frac{\Delta r}{\Delta t} & \Delta r = v_1 \Delta t \\ v_2 = \frac{\Delta r}{\Delta t + T} & \Delta r = v_2 (\Delta t + T) \end{cases}$$

$$v_1 \Delta t = v_2 (\Delta t + T)$$

$$v_1 \Delta t - v_2 \Delta t = v_2 T$$

$$\Delta t = \frac{v_2 T}{v_1 - v_2}$$

$$\Delta r = \frac{v_1 v_2 T}{v_1 - v_2}$$

Calculez le temps et la distance si $v_1 = 36 \text{ km h}^{-1}$, $v_2 = 34,2 \text{ km h}^{-1}$ et $T = 0,6 \text{ s}$.

$$\Delta t = \frac{9,5 \cdot 0,6}{10 - 9,5} = \frac{5,7}{0,5} = 11,4 \text{ s}$$

$$\Delta r = \frac{10 \cdot 9,5 \cdot 0,6}{0,5} = 114 \text{ m}$$

Chapitre 7

Variation de vitesse et accélération

Sommaire

1	Vitesses variables	52
	A Vecteur variation de vitesse	52
	B Démarrage de voiture	53
	C Centrifugeuse	53
2	Variation de vitesse et accélération	53
	A Vecteur accélération	53
	B Vecteur accélération instantanée	55
3	Accélération, dérivées et intégrales	55
	A L' accélération instantanée et les dérivées	55
	B Accélération et intégrales	55
4	Le vecteur accélération comme somme de vecteurs perpendiculaires	57
	A Retour sur les exemples	57
	B Accélérations normale et tangentielle	57
5	Exercices	57

Introduction

1 Vitesses variables

A Vecteur variation de vitesse

a) Mise en situation

Décrivons le mouvement de lancer d'une boule de pétanque!



FIGURE 7.1 – "Tu tires ou tu pointes?"

Étudions le vecteur vitesse instantanée entre des instants très proches.

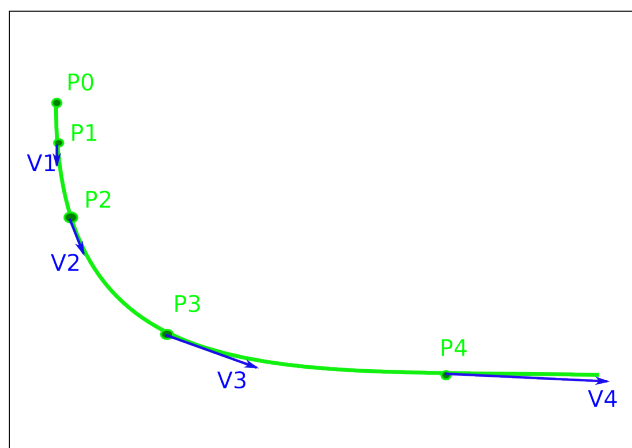


FIGURE 7.2 – Le vecteur vitesse à la pétanque.

Clairement il y a une évolution entre deux vitesses successives.

b) Définition

Il est donc nécessaire d'étudier la variation entre deux vitesses successives.
C'est pourquoi on définit le vecteur variation de vitesse.

Définition 21 (Vecteur variation de vitesse). Nous définirons le vecteur variation de vitesse comme la différence entre le vecteur vitesse instantanée final et le vecteur vitesse instantanée initial.

$$\vec{\Delta v} = \vec{v}_f - \vec{v}_i \quad (7.1)$$

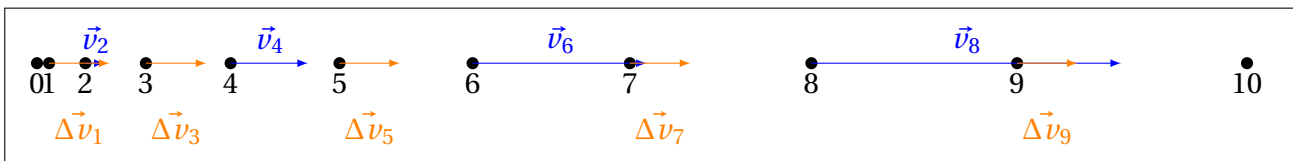
B Démarrage de voiture

FIGURE 7.3 – La voiture accélère. La différence de vitesse est constante.

Ici, la vitesse augmente en grandeur mais pas en direction. Le vecteur variation de vitesse est de même direction que la vitesse.

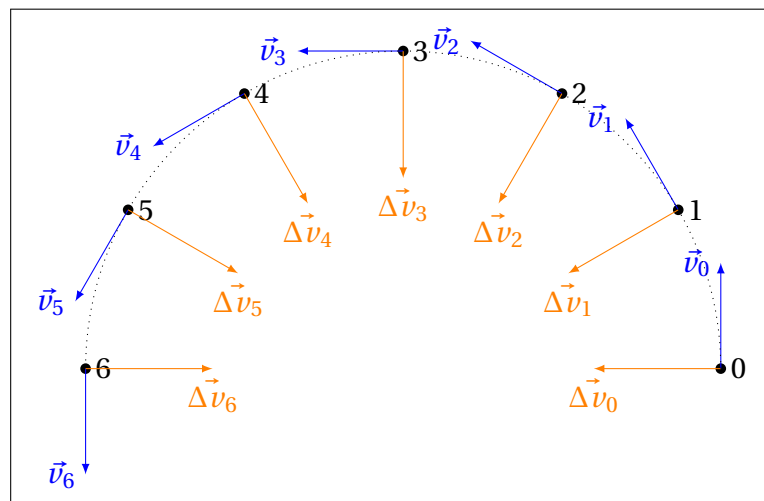
C Centrifugeuse

FIGURE 7.4 – Dans ce mouvement circulaire, la différence de vitesse est dirigée vers le centre.

Ici, la vitesse ne change pas en grandeur mais uniquement en direction. Le vecteur variation de vitesse est perpendiculaire à la vitesse.

2 Variation de vitesse et accélération**A Vecteur accélération**

Pour que l'étude de la variation de vitesse prenne tout son sens, il faut pouvoir comparer ce qui est comparable. Nous allons donc diviser la variation de vitesse par la durée nécessaire pour l'accomplir.

a) Définition

Ce faisant, nous définissons une nouvelle grandeur : le "vecteur accélération". Et nous dirons, plus simplement, "l'accélération"¹.

Définition 22 (vecteur accélération). L'accélération \vec{a} est la variation de vitesse par unité de temps.

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (7.2)$$

où,

— \vec{a} = l'accélération (ms^{-2}).

Une accélération de 1 ms^{-2} correspond donc à une vitesse qui augmente de 1 ms^{-1} par seconde.

t (s)	a (ms^{-2})	v (ms^{-1})
0	1	0
1	1	1
2	1	2
3	1	...
0	2	0
1	2	2
2	2	4
3	2	...
0	-3	5
1	-3	2
2	-3	-1
3	-3	...

TABLE 7.1 – Relations accélérations – vitesses.

b) Ordres de grandeur

Exemples	a (ms^{-2})
Démarrages	
TGV	0,4
métro	1,3
ascenseur	2
auto (+)	3
bille dans une catapulte	50
flèche	5000
Freinages :	
auto	-8
parachute à l'ouverture	- 200
ballon entrant en contact avec un mur	- 5000

TABLE 7.2 – Ordre de grandeurs d'accélération.

1. C'est volontairement que nous confondons les termes "accélération" et "vecteur accélération". Nous les considérons désormais comme interchangeables.

B Vecteur accélération instantanée

Ici aussi, pour étudier l'accélération en toute généralité, il faut envisager de l'étudier à chaque instant. Il faut étudier l'accélération *instantanée*.

a) Définition

Définition 23 (vecteur accélération instantanée). L'accélération instantanée $\vec{a}(t)$ est l'accélération à un instant t .

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{\Delta v}}{\Delta t} \quad (7.3)$$

où, $\vec{a}(t)$ = l'accélération instantanée (m s^{-2}).

3 Accélération, dérivées et intégrales

A L'accélération instantanée et les dérivées

Comme pour la vitesse instantanée (voir éq. 4.5 p. 37), l'accélération peut être vue comme une dérivée. Mais ici, l'accélération sera la dérivée première de la vitesse en le temps. Ici aussi, nous oublions un instant l'écriture vectorielle pour alléger les notations.

$$a(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (7.4)$$

Mais nous pouvons aller plus loin! Comme la vitesse instantanée est elle-même la dérivée de la position, l'accélération sera la dérivée *seconde* de la position.

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d \frac{dr}{dt}}{dt} = \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (7.5)$$

B Accélération et intégrales

a) variation de vitesse

Si l'accélération peut être traitée comme une dérivée première de la vitesse, nous pouvons faire un raisonnement analogue à celui fait concernant la vitesse instantanée (voir éq. 4.6 p. 37).

$$dv = a(t) \cdot dt \quad (7.6)$$

Et si nous intégrons l'équation précédente, nous obtenons :

$$\Delta v = \int_{v_i}^{v_f} dv = \int_{v_i}^{v_f} a(t) dt \quad (7.7)$$

b) déplacement

Poussons le raisonnement précédent un peu plus loin. Comme le déplacement est l'intégrale de la vitesse en le temps et que la variation de vitesse est l'intégrale de l'accélération, le déplacement sera l'intégrale seconde de l'accélération.

$$\Delta r = \int_{t_i}^{t_f} v_{inst} dt = \int_{t_i}^{t_f} \int_{t_i}^{t_f} a(t) dt^2 \quad (7.8)$$

c) Une application : frottement aérodynamique

Comme premier exemple d'application des points précédents, nous allons traiter le cas du frottement dynamique d'un projectile dans un fluide. Le fluide pouvant être l'air, de l'eau ou d'autres gaz ou liquides.

L'accélération sera du type "freinage" et s'opposera à la vitesse.

Choisissons une situation telle qu'il n'y ait pas d'autre accélération que celle due au freinage.

En première approximation, supposons que la relation entre l'accélération et la vitesse instantanée soit la suivante :

$$a(t) = -bv(t) \quad (7.9)$$

où :

— $a(t)$ est l'accélération instantanée du projectile (en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

— b est un coefficient² traduisant le frottement³;

— $v(t)$ est la vitesse instantanée du projectile (en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

Alors :

$$\frac{dv}{dt} = -bv(t) \quad (7.10)$$

$$\frac{dv}{v} = -bdt \quad (7.11)$$

Intégrons.

$$\int \frac{dv}{v} = \int -bdt \quad (7.12)$$

Les primitives sont bien connues et nous sommions les constantes d'intégration :

$$\ln v = -bt + C \quad (7.13)$$

"Sortons" v du logarithme.

$$v(t) = e^{(-bt+C)} \quad (7.14)$$

$$v(t) = e^{(-bt+C)} \quad (7.15)$$

$$v(t) = Ke^{(-bt)} \quad (7.16)$$

Il faut déterminer la constante " K ". Pour traiter ce genre de problème, la connaissance de conditions dites "aux bords" fournit l'information relevante. Ici, les conditions de bords sont les conditions initiales.

Si " $t = 0$ " alors $v(t) = v_0$.

Alors :

$$v_0 = K \cdot e^{(-b \cdot 0)} \quad (7.17)$$

C'est-à-dire :

$$K = v_0 \quad (7.18)$$

Et donc :

$$v(t) = v_0 \cdot e^{(-bt)} \quad (7.19)$$

La vitesse va donc décroître comme une exponentielle décroissante en le temps.

2. A parfois de coefficient de traînée.

3. " b " dépendra, entre autres, de la géométrie du projectile et de sa densité.

4 Le vecteur accélération comme somme de vecteurs perpendiculaires

A Retour sur les exemples

Revenons sur les exemples du début de ce chapitre.

a) La voiture

Lorsque la voiture accélérât ou freinât sur une trajectoire rectiligne, seule la norme du vecteur accélération était modifiée.

Remarquons aussi que, dans nos exemples, lorsque le mouvement est rectiligne et que la variation de vitesse ne se fait qu'en grandeur (le cas des voitures), l'accélération est dans la direction de la vitesse.

Comme la vitesse est tangentielle à la trajectoire, l'accélération l'est aussi : on dit que c'est l'accélération "*tangentielle*".

L'accélération tangentielle rend compte du changement en norme de la vitesse.

b) L'essoreuse

Dans le cas de l'essoreuse, le vecteur accélération était dirigé vers l'axe de rotation.

Par contre, si la grandeur de la vitesse ne change pas mais que sa direction change (c'est aussi le cas de la fronde), l'accélération est dans une direction perpendiculaire à celle de la vitesse.

Ici aussi, comme la vitesse est tangentielle à la trajectoire : on dit que c'est l'accélération "*normale*".

L'accélération normale rend compte de la variation de la vitesse en direction.

B Accélérations normale et tangentielle

Dans l'espace, un vecteur peut toujours être vu comme la somme de deux autres vecteurs.

Le vecteur accélération a donc deux composantes :

- une composante tangentielle $\vec{a}_t(t)$
- et une composante normale $\vec{a}_n(t)$.

En toute généralité, nous pouvons écrire

$$\vec{a}(t) = \vec{a}_t(t) + \vec{a}_n(t) \quad (7.20)$$

L'accélération tangentielle rend compte du changement en norme de la vitesse.

L'accélération normale rend compte du changement de la vitesse en direction.

Remarque 4. L'accélération normale pointe toujours vers la partie concave de la trajectoire.

Par contre, la partie tangentielle peut pointer dans le sens du mouvement (accélération) ou dans le sens opposé (freinage).

5 Exercices

1. Déterminez la position d'un mobile freiné par une accélération proportionnelle et opposée à sa vitesse.

$$a(t) = -bv(t)$$

Chapitre 8

MRUA

Sommaire

1	MRUA	60
	A Notations	60
	B Définition	60
2	Sens des vitesses et signe de l'accélération	60
	A En utilisant les vecteurs	60
	B En n' utilisant <i>pas</i> les vecteurs	61
3	Lois du MRUA	62
	A La loi des vitesses	62
	B La loi des espaces	63
4	Exercices	65

Introduction

1 MRUA

A Notations

Comme pour le MRU (voir 2 p. 40), les notations peuvent se simplifier du fait que nous étudions un mouvement à une seule dimension.

Donc, " $\vec{\Delta v}$ " deviendra " Δv " et " \vec{a} " deviendra " a ".

B Définition

Définition 24 (MRUA). Le *Mouvement Rectiligne Uniforme* (ou MRUA) est un mouvement rectiligne (rappel : Mouvement continu sur une seule direction) et d'accélération constante.

2 Sens des vitesses et signe de l'accélération

Nous allons établir les liens entre l'évolution des vitesses et le signe de l'accélération.

A En utilisant les vecteurs

a) La vitesse "compteur" augmente : une accélération

(i) **Mouvement dans le sens de l'axe** Premier cas : $v_1 \& v_2 \geq 0, v_2 > v_1 \Rightarrow a > 0$

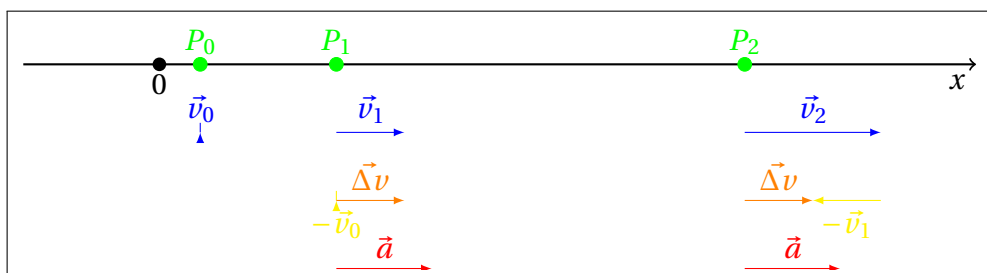


FIGURE 8.1 – Variation de la vitesse avec un mouvement dans le sens de l'axe.

(ii) **Mouvement dans le sens opposé à celui de l'axe** $v_1 \& v_2 < 0, v_2 < v_1 \Rightarrow a < 0$

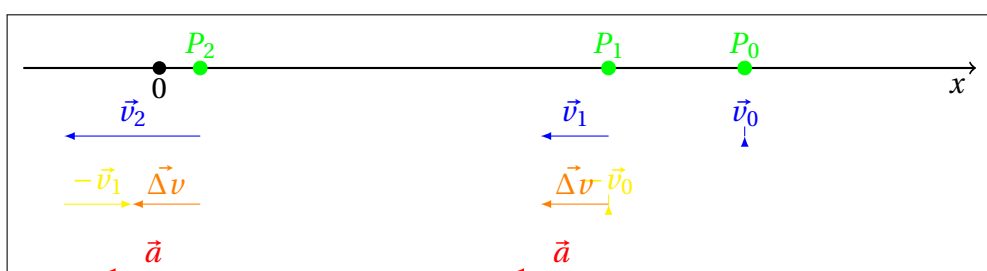


FIGURE 8.2 – Variation de la vitesse avec un mouvement dans le sens opposé de celui de l'axe.

b) La vitesse "compteur" diminue : une décélération

(i) **Mouvement dans le sens de l'axe** $v_1 \& v_2 < 0, v_2 < v_1 \Rightarrow a < 0$

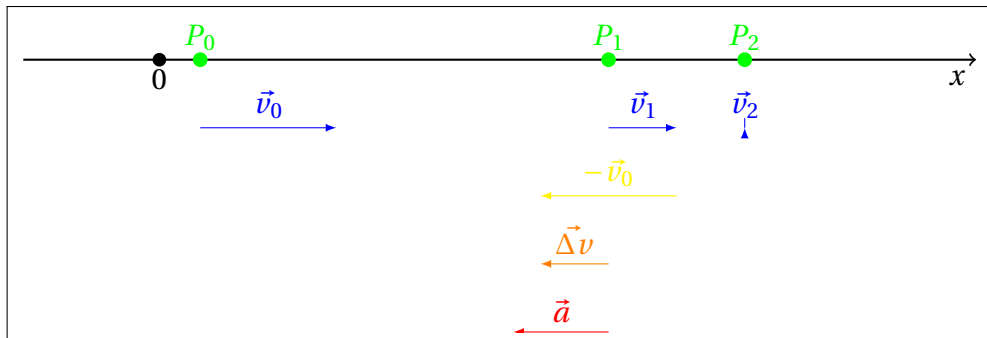


FIGURE 8.3 – Variation de la vitesse avec un mouvement dans le sens de l'axe.

(ii) **Mouvement dans le sens opposé à celui de l'axe** $v_1 \& v_2 < 0, v_2 < v_1 \Rightarrow a > 0$

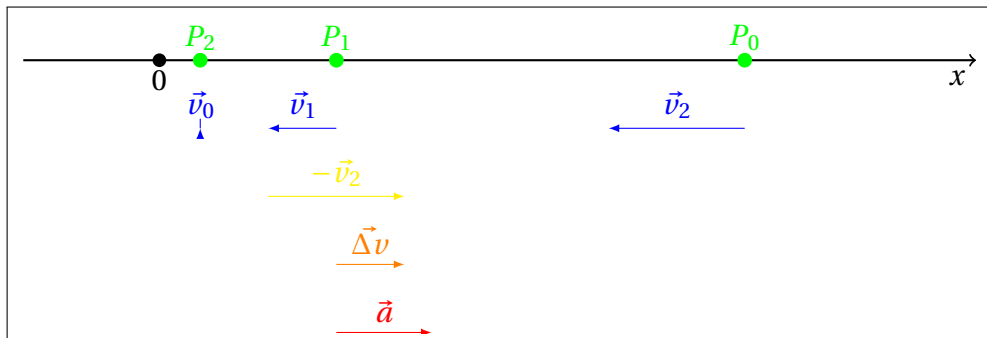


FIGURE 8.4 – Variation de la vitesse avec un mouvement dans le sens opposé de celui de l'axe.

c) Conclusion

\vec{v} et $\vec{\Delta v}$ de même sens = accélération
 \vec{v} et $\vec{\Delta v}$ de sens opposés = décélération

B En n' utilisant *pas* les vecteurs

Prenons quelques exemples numériques pour éclaircir la chose. On pourra comparer ces exemples aux schémas vectoriels précédents.

a) La vitesse "compteur" augmente : une accélération

(i) **Mouvement dans le sens de l'axe** Si Le mobile se déplace dans le sens de l'axe et "accélère".

Si $v_1 = 2 \text{ ms}^{-1}$ et si, un seconde plus tard, $v_2 = 5 \text{ ms}^{-1}$ alors $\Delta v = 5 - 2 = 3 \text{ ms}^{-1}$ et $a = 3/1 = 3 \text{ ms}^{-2}$.

(ii) **Mouvement dans le sens opposé à celui de l'axe** Si $v_1 = -2 \text{ ms}^{-1}$ et si, un seconde plus tard, $v_2 = -5 \text{ ms}^{-1}$ alors $\Delta v = -5 - (-2) = -3 \text{ ms}^{-1}$ et $a = -3/1 = -3 \text{ ms}^{-2}$.

b) La vitesse "compteur" diminue : une décélération

(i) **Mouvement dans le sens de l'axe** Si $v_1 = 5 \text{ ms}^{-1}$ et si, un seconde plus tard, $v_2 = 2 \text{ ms}^{-1}$ alors $\Delta v = 2 - 5 = -3 \text{ ms}^{-1}$ et $a = -3/1 = -3 \text{ ms}^{-2}$.

(ii) **Mouvement dans le sens opposé à celui de l'axe** Si $v_1 = -5 \text{ ms}^{-1}$ et si, un seconde plus tard, $v_2 = -2 \text{ ms}^{-1}$ alors $\Delta v = -2 - (-5) = 3 \text{ ms}^{-1}$ et $a = 3/1 = 3 \text{ ms}^{-2}$.

c) Conclusion

Résumons ces exemples dans un tableau.

Ex.	signe de v	signe de a	signification
1	+	+	Mvt. ds. sens de l'axe, accéléré
2	-	-	Mvt. ds. sens contraire de l'axe, accéléré
3	+	-	Mvt. ds. sens de l'axe, décéléré
4	-	d	Mvt. ds. sens contraire de l'axe, décéléré

TABLE 8.1 – Signes de v et de a.

\vec{v} et $\vec{\Delta v}$ de même sens = accélération
 \vec{v} et $\vec{\Delta v}$ de sens opposés = décélération

3 Lois du MRUA**A La loi des vitesses**

Dans un mouvement rectiligne, la définition de l'accélération s'écrit sous forme scalaire. Comme l'accélération est constante, nous pouvons écrire :

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad (8.1)$$

Si nous utilisons un chronomètre, $t_1 = 0$. Fixons la vitesse v_1 à la mise en marche du chronomètre comme v_0 .

De plus, si nous cherchons la vitesse à un temps t , nous pouvons décider que cet instant t est t_2 et que la vitesse v_2 est la vitesse à l'instant t : $v(t)$.

La loi des vitesses s'en déduit facilement :

$$v(t) = v_0 + a \cdot t \quad (8.2)$$

a) Graphique de $v(t)$

La vitesse est une fonction du premier degré en t .

L'étude du graphique de la fonction $v(t)$ nous fournit une série d'informations.

— v_0 l'ordonnée à l'origine,

— a est la pente.

Exemples : $a_1 < a_2$

$a_3 < 0$

B La loi des espaces

En MRUA, la vitesse $v(t)$ croît uniformément. La vitesse moyenne v_m peut se calculer comme la moyenne des vitesses¹ v_0 et $v(t)$:

$$v_m = \frac{v_0 + v(t)}{2} \quad (8.3)$$

Comme nous sommes dans un mouvement rectiligne, la distance parcourue est égale au déplacement.

Dès lors, par définition de la vitesse moyenne, la distance parcourue est donc égale à

$$\Delta r = v_m \cdot \Delta t \quad (8.4)$$

et comme $t_0 = 0$

$$\Delta r = v_m \cdot t \quad (8.5)$$

Si nous fixons r_0 comme la position initiale et $r(t)$ comme la position à l'instant t , alors :

$$r(t) = r_0 + v_m \cdot t \quad (8.6)$$

Et, si nous nous souvenons de notre définition de la vitesse moyenne, alors :

$$r(t) = r_0 + \frac{v_0 + v(t)}{2} \cdot t \quad (8.7)$$

Mais, par la loi des vitesses, nous savons que $v(t) = v_0 + a \cdot t$, et donc :

$$r(t) = r_0 + \frac{v_0 + v_0 + a \cdot t}{2} \cdot t \quad (8.8)$$

En simplifiant, on obtient la loi des espaces :

$$r(t) = r_0 + v_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2} \quad (8.9)$$

Celle-ci peut aussi s'écrire :

$$r(t) = r_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad (8.10)$$

a) Graphique de $v(t)$

En utilisant la loi des vitesses, il est évident que la fonction $v(t)$ est une fonction du premier degré

- (i) Caractéristiques de $v(t)$** Remarquons que l'ordonnée à l'origine est la vitesse initiale v_0 . La pente de la droite est l'accélération a .

1. En général, la vitesse moyenne n'est pas la moyenne des vitesses.

(ii) **Démonstration graphique de la loi des espaces.** Si nous utilisons une propriété vue auparavant (voir 4.7 p. 37) et que nous avons déjà exploitée dans le cas du MRU (voir le point 3 p. 47), il est remarquablement facile de démontrer la loi des espaces.

Nous savons que l'aire de la surface sous la courbe de $v(t)$ est égale au déplacement.

Calculons donc l'aire de cette surface.

Remarquons de suite que la partie inférieure a la forme d'un rectangle. Appelons Δr_I le déplacement correspondant. Il est clair que

$$\Delta r_I = v_0 \cdot \Delta t \quad (8.11)$$

Ce déplacement est la contribution de la vitesse initiale au déplacement total.

La deuxième partie a la forme d'un triangle rectangle. Dès lors, cette surface a pour aire $\frac{1}{2}B \cdot h$. Nommons Δr_{II} le déplacement correspondant. La base du triangle est Δt ; sa hauteur est $\Delta v = a \cdot \Delta t$. Donc

$$\begin{aligned} \Delta r_{II} &= \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot a \cdot \Delta t \\ &= \frac{1}{2} \cdot a \cdot (\Delta t)^2 \end{aligned} \quad (8.12)$$

Cette partie est la contribution de l'accélération seule au déplacement.

L'aire de la surface totale est égale au déplacement total : $\Delta r_{tot.} = \Delta r_I + \Delta r_{II}$.

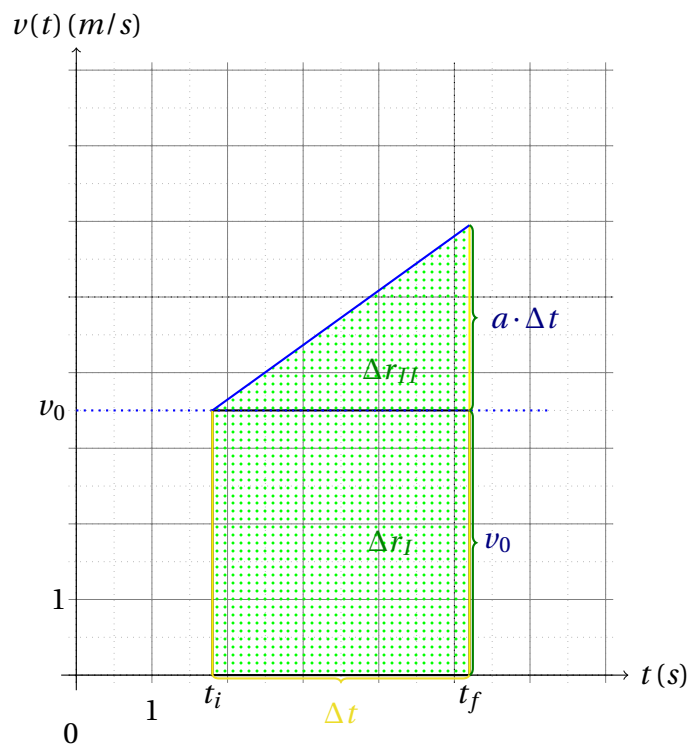
Et donc

$$\Delta r_{tot.} = v_0 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (\Delta t)^2 \quad (8.13)$$

Décidons que nous déclenchons notre chronomètre et que nous commençons à mesurer le temps à l'instant $t_0 = 0$. Rappelons nous aussi que $\Delta r = r(t) - r_i$.

Si nous disons que $r - i = r_0$, nous retrouvons la loi des espaces :

$$r(t) = r_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (8.14)$$

FIGURE 8.5 – Le graphe de $v(t)$ en MRUA.

b) Graphique de $r(t)$

La position est une fonction du deuxième degré en t . Son graphique sera donc celui d'une parabole.

L'étude du graphique de la fonction $r(t)$ nous fournit une série d'informations :

- r_0 l'ordonnée à l'origine,
- $\frac{1}{2}a$ est le coefficient du deuxième degré.

Cas à envisager :

- r_0 à droite du sommet (mouvement toujours dans le même sens) ,
- r_0 à gauche du sommet (mouvement dans un sens puis demi-tour).

4 Exercices

1. Une voiture démarre et atteint la vitesse de 144 km/h en 10 s.

— Quelle distance a-t-elle parcourue ?

— Données :

- $v_0 = 0 \text{ m/s}$
- $v_f = 144,0 \text{ km/h} = 40,0 \text{ m/s}$
- $t_f = 10 \text{ s}$

— Inconnues :

— $\Delta r = ?$

— Schéma :

— Formule(s) :

— $v_f = v_0 + a \cdot \Delta t$

- $\Delta r = v_0 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a \cdot \Delta t^2$
- Résolution :
 - $a = (v_f - v_0) / \Delta t = \frac{40}{10} = 4 \text{ m/s}^2$
 - $\Delta r = \frac{1}{2} a \cdot \Delta t^2 = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 10^2 = 200 \text{ m}$

2. E pericoloso sporgersi

Un train démarre avec une accélération de $0,2 \text{ m/s}^2$. Il atteint alors la vitesse de 252 km/h . Après avoir roulé à cette vitesse pendant $40,0$ minutes, il freine avec une décélération de $-0,3 \text{ m/s}^2$ jusqu'à l'arrêt. Quelle est la distance parcourue ?

$$\Delta r_{\text{tot}} = 188,416 \text{ km}$$

Chapitre 9

Chute libre

Sommaire

1	Chute d'objets dans l'atmosphère	68
2	Chute libre	68
	A Définition	69
3	L'accélération de gravité sur Terre	69
4	Choix d'axes pour résoudre des problèmes	70
	A Pure chute	70
	B Lancer vers le haut	70
5	Exercices	70

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons discuter d'un cas particulier de MRUA¹ : la chute libre. Nous en rediscuterons dans le cadre de la dynamique sous un chapitre du même nom.

1 Chute d'objets dans l'atmosphère

Nous vivons à proximité de la surface de la Terre et dans son atmosphère. Cette dernière affecte la chute des corps matériels. La chute d'une feuille ou d'une plume seront différentes de la chute d'une grosse sphère métallique.

Les chutes de feuilles ou de plumes sont plus proches, en tout cas pour la plus grande partie du temps, d'un mouvement de type MRU. Nous discuterons ce type de chute dans le cadre de la dynamique quand nous parlerons des forces de frottements.

Les chutes d'objets denses et aérodynamiques sont proches d'un mouvement de type MRUA de direction verticale. Ce seront ces mouvements dont nous discuterons ici.

2 Chute libre

Galilée a réalisé une célèbre expérience en laissant tomber deux objets massifs mais différents du haut de la tour de Pise. Les deux objets arrivent au sol en même temps.

Si on fait le vide dans un tube enfermant des plumes et des objets massifs, lorsqu'on met le tube à la verticale ces objets tombent tous en MRUA. Les différents objets arriveront au fond du tube en même temps. Ce type de tube est appelé un "tube de Newton".

Les astronautes de la mission Apollo XV ont réalisé l'expérience à la surface de la Lune en laissant tomber une plume et un marteau dans le vide.



FIGURE 9.1 – Expérience de la plume et du marteau sur la Lune (Apollo XV - Juillet 1971).

Ce sont bien les effets dus à l'atmosphère qui "ralentissent" la plume.

1. Mouvement Rectiligne Uniformément Accélééré

A Définition

Nous dirons qu'un mouvement est une "chute libre" lorsqu'on peut négliger les effets de l'atmosphère dans la chute.

Définition 25 (chute libre). Une *chute libre* est une chute à proximité de la surface de la Terre en absence d'effet de l'atmosphère. Le mouvement sera un MRUA de direction verticale et de sens dirigé vers le centre de la Terre. L'accélération sera la même pour tout objet.

3 L'accélération de gravité sur Terre

Étudions une chronophotographie de chute libre.

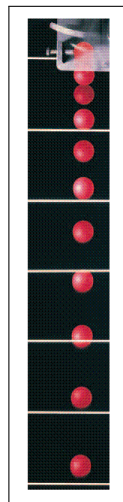


FIGURE 9.2 – Chute de bille sur la Terre (Novembre 2015).

Une analyse de cette chronophotographie produit les résultats suivants :

Analyse chute libre						
*	t (s)	r (m)	t ² (s ²)	r (m)	a=2r/t ² (m/s ²)	*
	0	0,05	0	0,05		
	0,037	0,08	0,001369	0,08	43,8276113952	
	0,072	0,11	0,005184	0,11	23,1481481481	
	0,108	0,14	0,011664	0,14	15,4320987654	
	0,144	0,18	0,020736	0,18	12,5385802469	
	0,18	0,23	0,0324	0,23	11,1111111111	
	0,216	0,29	0,046656	0,29	10,2880658436	
	0,252	0,355	0,063504	0,355	9,6056941295	
	0,288	0,44	0,082944	0,44	9,4039351852	
	0,324	0,6	0,104976	0,6	10,4785855815	

(selon chronophotographie)

FIGURE 9.3 – Analyse de la chute de bille sur la Terre (Novembre 2015).

Remarque 5 (Choix d'axe en chute libre). Nous avons fait un choix d'axe de direction verticale et où le sens positif était vers le bas.

La valeur de l'accélération déterminée expérimentalement est aux alentours de 10 ms^{-2} .

Définition 26 (Accélération de pesanteur). En chute libre, la valeur de l'accélération est de $9,81 \text{ ms}^{-2}$. Son symbole est **g**. On dit que **g** est l'accélération de pesanteur (terrestre).

"g" varie légèrement selon la latitude (à l'équateur $9,78 \text{ ms}^{-2}$, aux pôles $9,81 \text{ ms}^{-2}$) et l'altitude. La valeur de "g" est différente sur d'autres astres. Nous en discuterons.

4 Choix d'axes pour résoudre des problèmes

Selon le type de problème à résoudre, un choix correct d'axe peut grandement faciliter la tâche. Il faudra cependant alors être attentif au *signe* de "g" qui pourra être positif ou négatif selon le choix qui est fait.

Les différents choix discutés ici sont simplement différentes manières de représenter une même situation. Les objets tomberont toujours de la même manière. Mais les équations pour décrire ces mouvements seront différentes. Un choix correct produit des équations plus simples à résoudre.

A Pure chute

Si le point de départ de la chute est connu, il est plus commode de diriger le sens de l'axe vertical vers le bas. Alors "g" est de signe *positif*.

On peut choisir le niveau du sol comme origine du système. On aussi peut choisir le point de départ comme origine du système. (C'est ce que nous avons fait pour la chronophotographie puisque l'arrivée au sol ne nous intéressait pas.)

B Lancer vers le haut

Lors de lancer d'objets vers le haut, le point le plus élevé de la trajectoire n'est pas nécessairement connu. Dans ce type de situation, il vaut mieux fixer l'origine du système au sol et orienter l'axe vers le haut. Alors "g" est de signe *négatif*.

5 Exercices

Sauf mention contraire, faire les exercices en prenant une valeur de "g" de 10 ms^{-2} .

- On laisse tomber des colis de vivres de 80 m de haut. La descente au sol est considérée comme une chute libre.
 - Quelle est la durée de la chute ?
 $t = 4 \text{ s}$
 - Quelle est la vitesse des colis en arrivant au sol ?
 $v = 40 \text{ ms}^{-1}$ (= 144 km h^{-1})
- On lance un poids en métal vers le haut avec une vitesse de 20 ms^{-1} .
 - Après combien de temps reviendra t' il au sol ?
2 X le temps de monter ! C'est-à-dire $2 \times 2 \text{ s} = 4 \text{ s}$
 - À quelle hauteur (max.) va t' il monter ?
20 m

3. Dans la dernière seconde de sa chute un corps parcourt 10 m . De quelle hauteur est-il tombé au total?
11,25 m
4. Pour calculer la profondeur d'un puit, un physicien laisse tomber un baromètre dans le puit. Il entend "plouf" 3 secondes plus tard. Sachant que la vitesse du son dans l'air est de 340 m s^{-1} , déterminez la profondeur du puit.

Troisième partie

Cinématique dans l'espace

Chapitre 10

MCU

Sommaire

1	mouvement circulaire uniforme	76
2	Vitesse linéaire et vitesse angulaire	77
	A Vitesse linéaire	77
	B Vitesse angulaire	79
3	L'accélération en MCU	79
	A L'accélération centripète	79
	B Grandeur de l'accélération centripète	81
	C Résumé	84
4	Exercices :	85

Introduction

Il va s'agir, ici, de décrire le mouvement d'un mobile ponctuel en rotation régulière.

Les exemples typiques sont :

- le mouvement d'une feuille de salade dans uneessoreuse,
- celui de la pipette d'une roue de vélo lorsqu'on fait tourner la roue pour détecter une fuite,
- un objet dans une centrifugeuse,
- une pierre dans une fronde,
- une voiture dans un tournant,
- un enfant sur un carrousel,
- une planète en orbite autour du soleil,
- et en général un satellite (naturel ou artificiel) en orbite autour d'un astre.

1 mouvement circulaire uniforme

Introduisons ici des notations particulières à notre question.

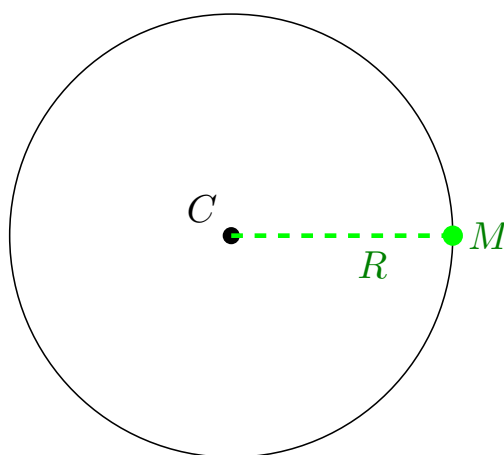
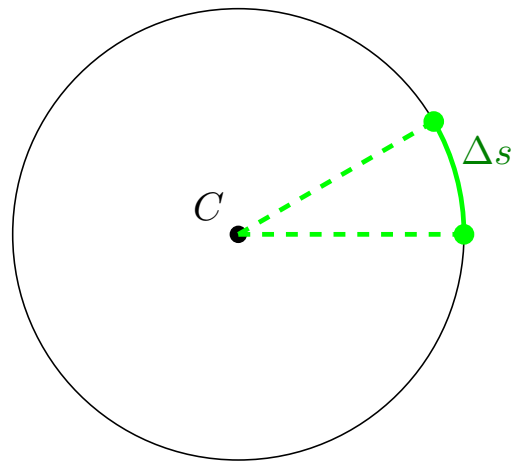


FIGURE 10.1 – L'objet M est en rotation autour de C à une distance R de C.

- * Un objet de masse m
- * en mouvement circulaire uniforme
 - * de rayon R (m)
 - * et de centre C
 - * décrit des arcs Δs (m)
 - * en des durées égales Δt . (s)
- * La durée d'une révolution complète est la période T (s)

FIGURE 10.2 – L'objet M parcourt un arc de cercle Δs .

Remarque 6. La position sur la circonférence est repérée par la grandeur s . " s " est une abscisse curviligne. (Unité SI : m)

Exemples de périodes :

- * Ex : L'aiguille des secondes d'un horloge est en *MCU* et a une période T de 60s.
- * Ex : L'aiguille des minutes d'un horloge a une période T de
- * Ex : L'aiguille des heures d'un horloge a une période T de

2 Vitesse linéaire et vitesse angulaire

A Vitesse linéaire

En *MCU*, la vitesse v est égale à la longueur d'arc de cercle parcourue par unité de temps. Càd.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

où

- Δt est la durée nécessaire (s)
- pour parcourir
- Δs la longueur d'arc (m).

Attention : Rappel le sens positif est le sens contraire des aiguilles d'une montre.

Pour un tour (une circonférence) : $\Delta s = 2\pi R$ et $\Delta t = T$

Et donc :

Définition 27 (norme de la vitesse linéaire en *MCU*).

$$v = \frac{2\pi R}{T} \quad (10.1)$$

où

- v = la vitesse linéaire (m),
- T = la durée d'une révolution complète ou période (s),
- R = le rayon de la circonférence parcourue (m).

a) Exemple :

L'horloge de l'hôtel de ville a une trotteuse qui fait exactement 1m de long. Quelle est la vitesse v de la pointe de la trotteuse ?

* Données :

* $R = 1m$

* $T = 60s$

* Inconnue :

* $v = ?(m/s)$

* Formule :

* $v = \frac{2\pi R}{T}$

* Solution :

* $v = \frac{2\pi 1}{60}(m/s)$

* $v = \frac{6,28}{60}(m/s)$

* $v = 0,1(m/s)$

b) Caractéristiques du vecteur vitesse

Rappelons que les caractéristiques d'un vecteur sont :

- * sa direction,
- * son sens,
- * sa grandeur et
- * son point d'application.

Dans un chapitre précédent, nous avons vu qu'en tout point de la trajectoire, le vecteur vitesse \vec{v} est tangent à la trajectoire.

Ici, dans un mouvement circulaire, la trajectoire est la circonférence du cercle. Si \vec{v} est tangent à la circonférence du cercle, alors \vec{v} est perpendiculaire au rayon R .

$$\vec{v} \perp R$$

Le vecteur vitesse \vec{v} est dans le sens du mouvement. La grandeur de \vec{v} est v . Son point d'application est le centre de masse du mobile en mouvement sur la circonférence.

Et donc, les caractéristiques du vecteur \vec{v} sont :

- * sa direction : $\vec{v} \perp R$
- * son sens : le sens du mouvement
- * sa grandeur : $v = \frac{2\pi R}{T}$
- * son point d'application : le centre de masse du mobile désigné par P .

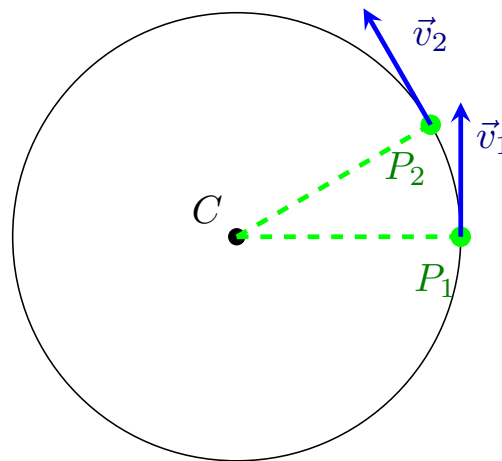


FIGURE 10.3 – Les vecteurs vitesses sont de même grandeur et perpendiculaires aux rayons.

B Vitesse angulaire

La vitesse \vec{v} mesure le déplacement (m). Il peut être utile de mesurer la vitesse angulaire. La vitesse angulaire est liée à la période et au "nombre de tours" par seconde. Elle est une mesure de l'angle fait par unité de temps. Plutôt que de mesurer l'angle en degré, par convention, elle est donnée en "radians par seconde".

Définition 28 (Vitesse angulaire). La vitesse angulaire ω est l'angle balayé par unité de temps.

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

où :

- ω = la vitesse angulaire (rads^{-1})
- T = la période (s^{-1})

3 L'accélération en MCU

A L'accélération centripète

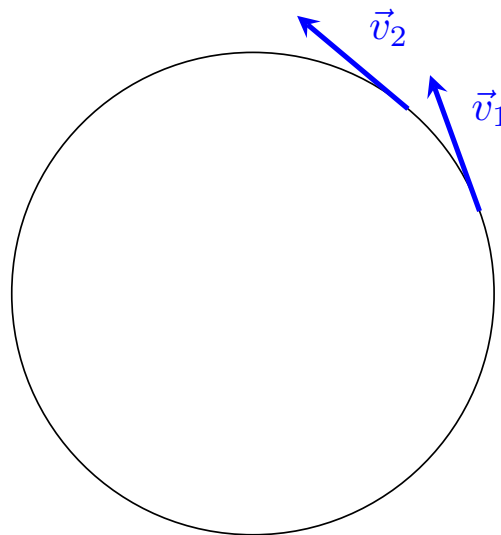
La vitesse v est certes constante, mais nous ne sommes plus en *MRU*. Le vecteur \vec{v} est bien de grandeur v constante MAIS la **direction** du vecteur \vec{v} change continuellement. Notons que ce changement est régulier, nous y reviendrons.

Rappelons la définition de l'accélération vectorielle !

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

a) Différence de vitesses vectorielles

Ce changement de vitesse $\Delta \vec{v}$ est une différence de vitesse.

FIGURE 10.4 – Les vecteurs vitesses à deux instants t_1 et t_2 .

En MRU, nous faisons $\Delta v = v_2 - v_1$, ici, avec des grandeurs vectorielles nous faisons

$$\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$$

Faire une différence de vecteurs revient à additionner un vecteur \vec{v}_2 et l'opposé de \vec{v}_1 .

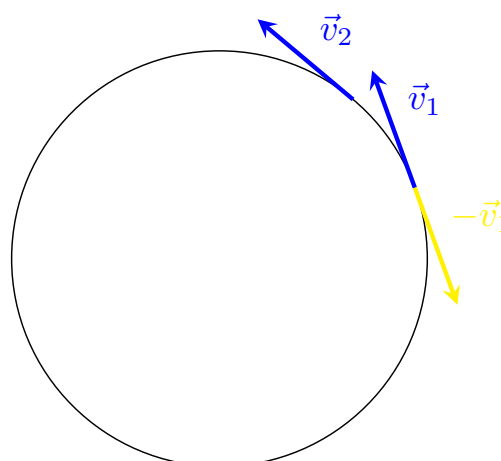


FIGURE 10.5 – Soustraire un vecteur : somme d'un vecteur et de l'opposé de l'autre.

Comme nous pouvons déplacer un vecteur pour faire la différence, nous avons maintenant :

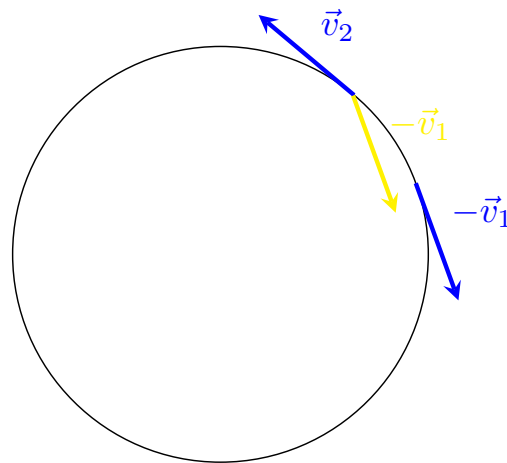


FIGURE 10.6 – Les vecteurs vitesses comme vecteurs libres.

Remarque : Le vecteur $\Delta \vec{v}$ ne pointe pas parfaitement vers le centre car souvenons-nous que les définitions de la vitesse et de l'accélération impliquent de prendre Δt petit. Ce qui n'est pas le cas dans les illustrations précédentes.

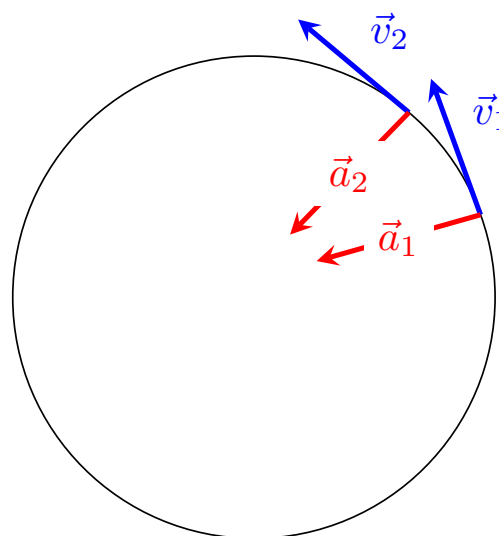


FIGURE 10.7 – Les vecteurs accélérations.

Conclusion

$\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1 = \vec{v}_2 + (-\vec{v}_1)$ est donc bien dirigé vers le centre et que l'accélération \vec{a} sera aussi dirigée vers le centre. L'accélération \vec{a} est donc bien centripète.

B Grandeur de l'accélération centripète

introduction

Nous connaissons maintenant

- * le point d'application (le point P : centre de masse de l'objet de masse m)
- * la direction (selon une droite reliant le centre C et le point P) et
- * le sens (pointant vers le centre C)

de l'accélération centripète.

Mais nous ne connaissons pas encore la grandeur (ou norme) de l'accélération en MCU. Étudions ici cette question.

a) Équations du mouvement : position

Sans beaucoup insister, nous avons défini la position du mobile en coordonnées polaires. Le vecteur position $\vec{r}(t)$ est défini par un angle θ et la longueur R du vecteur.

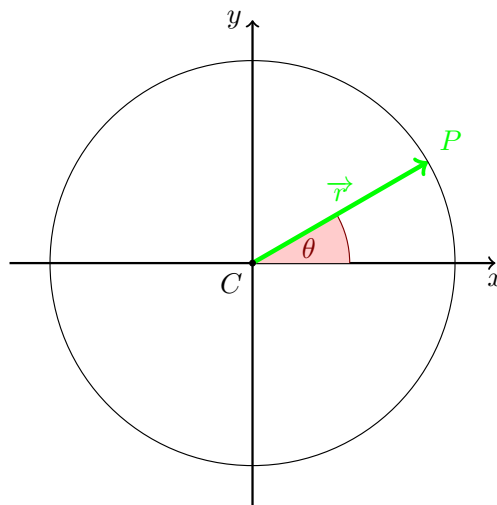


FIGURE 10.8 – La position de P en coordonnées polaires : $P(\theta, R)$.

Nous savons que notre mobile M se déplace à une vitesse linéaire constante et donc à une vitesse angulaire constante.

L'angle θ indiquant la position de M sur la circonférence est déterminé par la vitesse angulaire via la relation suivante :

$$\theta = \omega \cdot t \quad (10.2)$$

Exprimons maintenant la position de notre mobile en fonction du temps dans un système de référence cartésien dont l'origine est le centre de rotation.

Le vecteur position $\vec{r}(t)$ peut être vu comme la somme de deux vecteurs orientés selon les axes du système cartésien : $\vec{r}(t) = \vec{r}_x(t) + \vec{r}_y(t)$

Les normes des composantes de $\vec{r}(t)$ sont liées à R et ω par les relations suivantes :

$$\begin{cases} r_x = R \cdot \cos(\omega t) \\ r_y = R \cdot \sin(\omega t) \end{cases} \quad (10.3)$$

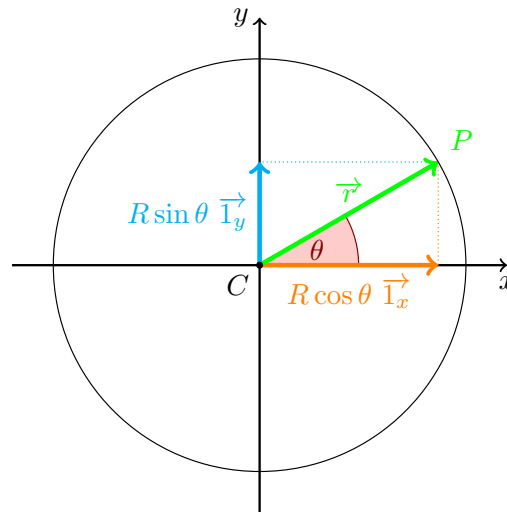


FIGURE 10.9 – La position de P en coordonnées cartésiennes : $P(r_x, r_y)$.

Les équations 10.3 nous fournissent les coordonnées du point P où se trouve le mobile M mais aussi les composantes du vecteur position $\vec{r}(t)$ en fonction du temps.

Les équations 10.3 rendent bien compte de la position de M.

En effet :

- la norme de $\vec{r}(t)$ est égale à $\sqrt{r_x^2 + r_y^2}$
 $= \sqrt{R^2 \cdot \cos^2(\omega t) + R^2 \cdot \sin^2(\omega t)} = R\sqrt{\cos^2(\omega t) + \sin^2(\omega t)} = R$;
- et donc la distance de M au centre de rotation est constante et vaut R ;
- De plus, si $t = T$, alors $\omega t = \omega T = \frac{2\pi}{T} T = 2\pi$;
- et nous avons $\cos(\omega T) = \cos(2\pi) = 1$ et $\sin(\omega T) = \sin(2\pi) = 0$.

b) Équations du mouvement : vitesse

Nous avons vu dans l'équation 4.5 (page 37)

que le vecteur vitesse s'obtient comme la dérivée du vecteur position.

Dérivons donc par rapport au temps le vecteur position obtenu par les équations 10.3.

$$\begin{cases} r'_x = (R \cdot \cos(\omega t))' = -R\omega \sin(\omega t) \\ r'_y = (R \cdot \sin(\omega t))' = R\omega \cos(\omega t) \end{cases} \quad (10.4)$$

Les composantes du vecteur vitesse sont donc :

$$\begin{cases} v_x = -R\omega \sin(\omega t) \\ v_y = R\omega \cos(\omega t) \end{cases} \quad (10.5)$$

$$\begin{cases} v_x = R\omega \cos(\omega t + \pi/2) \\ v_y = R\omega \sin(\omega t + \pi/2) \end{cases} \quad (10.6)$$

Ici aussi, ces équations sont cohérentes avec les résultats précédents : La norme de $v(t) = R\omega$ et un schéma peut nous convaincre que la direction du vecteur est correcte.

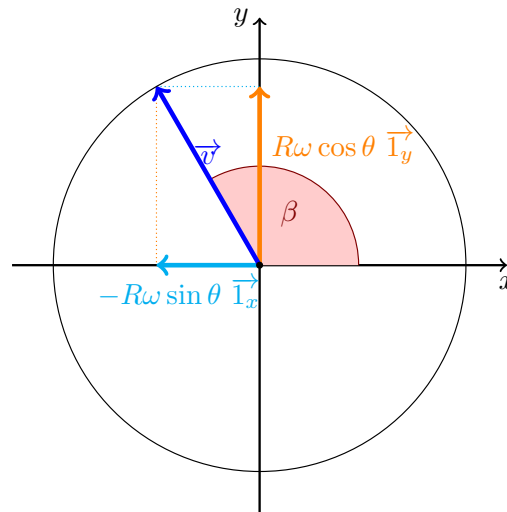


FIGURE 10.10 – Le vecteur vitesse en coordonnées cartésiennes.

En effet l'angle β que fait le vecteur vitesse avec l'horizontale est l'anti-complémentaire de l'angle formé par le vecteur position avec l'horizontale : le cosinus de β est égal à moins le sinus de θ et le sinus de β est égal au cosinus de θ . Le vecteur vitesse fait bien un angle droit avec le rayon. Si nous plaçons le vecteur vitesse en P, nous retrouvons le vecteur \vec{v} tangent au cercle.¹

c) Équations du mouvement : accélération

Si le vecteur vitesse est la dérivée du vecteur position, nous avons aussi vu (voir éq. 7.4 p. 55) que le vecteur accélération est la dérivée du vecteur vitesse.

Appliquons ce résultat à notre cas.

$$\begin{cases} a_x = v'_x = (-R\omega \sin(\omega t))' = -R\omega^2 \cos(\omega t) \\ a_y = v'_y = (R\omega \cos(\omega t))' = -R\omega^2 \sin(\omega t) \end{cases} \quad (10.7)$$

Et donc en MCU :

$$\begin{cases} a_x = -R\omega^2 \cos(\omega t) \\ a_y = -R\omega^2 \sin(\omega t) \end{cases} \quad (10.8)$$

Observons de suite que nous obtenons la valeur de la norme de $\vec{a}(t)$: $R\omega^2$.

Mais aussi les deux composantes sont affublées d'un signe moins. Ceci est cohérent avec le fait que l'accélération est *centripète* en MCU !

C Résumé

Nous connaissons donc maintenant toutes les caractéristiques du vecteur accélération $\vec{a}(t)$ en MCU.

Résumons les ici et déterminons ainsi complètement le vecteur accélération en MCU :

Définition 29 (accélération en MCU). En MCU, l'accélération $\vec{a}(t)$ a les caractéristiques suivantes :

- sa norme est $a = R\omega^2$. (m s^{-2}) ;
- sa direction est selon le rayon R ;
- son sens est dirigé vers le centre C de rotation (centripète).

1. Pour simplifier les schémas nous avons pris un vecteur vitesse de même longueur que le vecteur \vec{r} .

4 Exercices :

1. La circonférence de la Terre est approximativement de 40 000 km et elle effectue un tour sur elle-même en approximativement 24h. Quelle est la vitesse v de quelqu'un se trouvant à l'équateur ?

* Données :

$$* \text{Circ} \approx 40000 \text{ km} = 4 \times 10^7 \text{ m}$$

$$* T \approx 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$$

* Inconnue :

$$* v = ? (\text{m/s})$$

* Formule :

$$* \text{Circ} = 2\pi R$$

$$* v = \frac{2\pi R}{T}$$

$$* v = \frac{\text{Circ}}{T}$$

* Solution :

$$* v = \frac{\text{Circ}}{T}$$

$$* v = \frac{4 \cdot 10^7}{86400} (\text{m/s})$$

$$* v \approx 462,9 (\text{m/s})$$

2. La Terre tourne autour du soleil en approximativement 365 jours. La lumière met approximativement 8 minutes pour parcourir la distance entre la Terre et le Soleil. Sachant que la vitesse de la lumière est approximativement 300 000 km/s, quelle est la vitesse v de la Terre dans son mouvement orbital autour du Soleil ?
3. La Lune tourne autour de la Terre en approximativement 28 jours. La lumière met approximativement 1 seconde pour parcourir la distance entre la Terre et la Lune. Sachant que la vitesse de la lumière est approximativement 300 000 km/s, quelle est la vitesse v de la Lune dans son mouvement orbital autour de la Terre ?
4. On fait tourner un poids de 1 kg attaché à une corde de longueur = 2m, un tour est fait en 4s. Quelle est la valeur de v .
5. Valeurs de ω et de a pour tous les problèmes précédents.

Chapitre 11

MCUA

Sommaire

1	Hypothèses de départ	88
	A ω croissant et accélération angulaire	88
2	Équations du mouvement	89
	A Le vecteur position	89
	B Le vecteur vitesse	90
	C le vecteur accélération	90
3	Exercices :	94

Introduction

Nous allons élaborer ici sur les raisonnements faits au chapitre consacré au MCU.

1 Hypothèses de départ

Au lieu d'avoir une rotation régulière (et donc une vitesse angulaire constante) nous allons avoir une vitesse angulaire qui augmente régulièrement avec le temps. Supposons aussi que l'objet est initialement au repos.

Par ailleurs, l'objet M est toujours à une distance fixe R d'un centre C.

A ω croissant et accélération angulaire

Définition 30 (Accélération angulaire en MCUA).

$$\alpha(t) = \alpha (= \text{cst.}) \quad (11.1)$$

où :

- $\alpha(t)$ est l'accélération *angulaire* instantanée (rad s^{-2});
- elle est, dans tout le chapitre, constante càd. indépendante du temps.

Nous allons avoir une vitesse angulaire augmentant régulièrement avec le temps.

Définition 31 (Vitesse angulaire en MCUA).

$$\omega(t) = \alpha \cdot t \quad (11.2)$$

où :

- $\omega(t)$ est la vitesse angulaire *dépendante* du temps (rad s^{-1}),
- t est la durée écoulée depuis le début du mouvement (s),
- α est une accélération *angulaire* ici indépendante du temps (rad s^{-2}).

L'angle θ indiquant la position de M sur la circonférence est déterminé par la vitesse angulaire. Par analogie avec le MRUA, nous pouvons utiliser un argument d'intégration et alors écrire :

Définition 32 (Angle instantané en MCUA (cas particulier)).

$$\theta(t) = \frac{1}{2} \alpha \cdot t^2 \quad (11.3)$$

où :

- $\theta(t)$ est l'angle donnant la direction (et le sens) du vecteur position (rad).

Nous ne pourrons plus parler de période "T" puisque la valeur de l'angle n'augmente plus linéairement avec le temps mais comme le carré de celui-ci.

a) Vitesse angulaire initiale

Nous allons, dans un premier temps, traiter la question du MCUA sans vitesse angulaire initiale. Ceci afin d'alléger les notations. Nous traiterons le cas général avec vitesse angulaire initiale plus tard.

Écrivons cependant déjà ici les équations angulaires dans le cas général du MCUA. En effet, certains choix d'écriture faits plus loin se justifient par le cas général.

Nous ne légendons que les nouvelles grandeurs qui apparaissent ici.

$$\alpha(t) = \alpha (= \text{cst.}) \quad (11.4)$$

$$\omega(t) = \alpha \cdot t + \omega_0 \quad (11.5)$$

où :

— ω_0 est la vitesse angulaire *initiale* (rad s^{-1}).

Définition 33 (Angle en fonction du temps en MCUA (cas général)).

$$\theta(t) = \frac{1}{2} \alpha \cdot t^2 + \omega_0 \cdot t + \theta_0 \quad (11.6)$$

où :

— θ_0 est l'angle initial du vecteur position (rad),

2 Équations du mouvement

En imitant la démarche que nous avons adoptée pour le MCU, étudions maintenant les différentes grandeurs du mouvement : les vecteurs position, vitesse et accélération.

A Le vecteur position

En coordonnées polaires, le vecteur position $\vec{r}(t)$ est toujours défini par un angle θ et la longueur R du vecteur.

Nous savons aussi que le vecteur position $\vec{r}(t)$ peut être vu comme la somme de deux vecteurs orientés selon les axes du système cartésien : $\vec{r}(t) = \vec{r}_x(t) + \vec{r}_y(t)$

Les normes des composantes de $\vec{r}(t)$ sont liées à R et ω par les relations suivantes :

$$\begin{cases} r_x = R \cdot \cos\left(\frac{1}{2} \alpha t^2\right) \\ r_y = R \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \alpha t^2\right) \end{cases} \quad (11.7)$$

Les équations 11.7 nous fournissent les coordonnées du point P où se trouve le mobile M mais aussi les composantes du vecteur position $\vec{r}(t)$ en fonction du temps.

Les équations 11.7 rendent compte de la position de M.

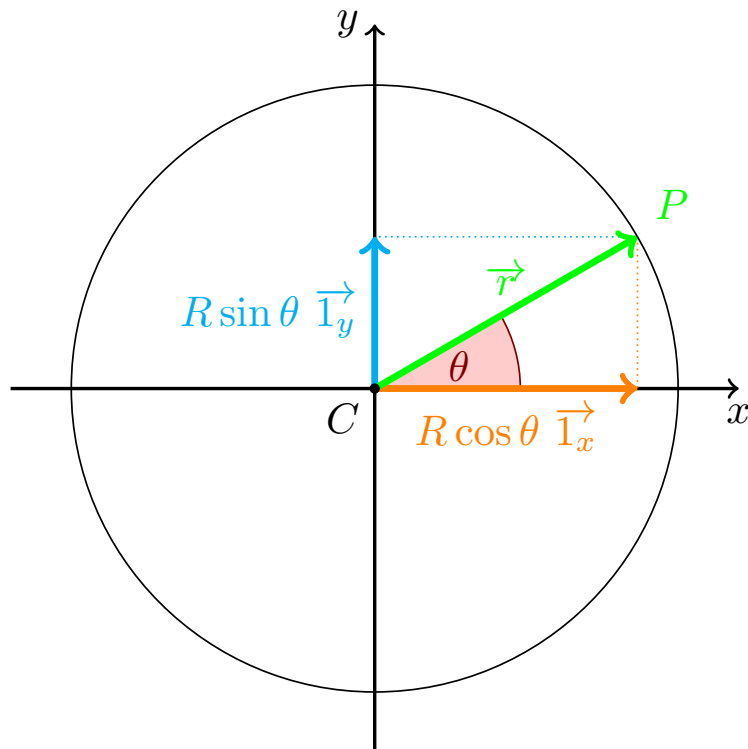
— la norme de $\vec{r}(t)$ est égale à $\sqrt{r_x^2 + r_y^2}$

$$= \sqrt{R^2 \cdot \cos^2\left(\frac{1}{2} \alpha t^2\right) + R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{1}{2} \alpha t^2\right)}$$

$$= R \sqrt{\cos^2\left(\frac{1}{2} \alpha t^2\right) + \sin^2\left(\frac{1}{2} \alpha t^2\right)}$$

$$= R;$$

— et donc la distance de M au centre de rotation est constante et vaut R ;

FIGURE 11.1 – La position de P en coordonnées cartésiennes : $P(r_x, r_y)$.

B Le vecteur vitesse

Nous avons vu dans l'équation 4.5 (page 37)

que le vecteur vitesse s'obtient comme la dérivée du vecteur position.

Dérivons donc par rapport au temps le vecteur position obtenu par les équations 11.7.

$$\begin{cases} r'_x = (R \cdot \cos(\frac{1}{2}\alpha t^2))' = -2R\frac{1}{2}\alpha t \sin(\frac{1}{2}\alpha t^2) \\ r'_y = (R \cdot \sin(\frac{1}{2}\alpha t^2))' = 2R\frac{1}{2}\alpha t \cos(\frac{1}{2}\alpha t^2) \end{cases} \quad (11.8)$$

Les composantes du vecteur vitesse sont donc :

$$\begin{cases} v_x = -R\alpha t \sin(\frac{1}{2}\alpha t^2) \\ v_y = R\alpha t \cos(\frac{1}{2}\alpha t^2) \end{cases} \quad (11.9)$$

La norme de $v(t) = R\alpha t$

$$v(t) = R\alpha t \quad (11.10)$$

La direction du vecteur est toujours tangente à la trajectoire.

En effet l'angle β que fait le vecteur vitesse avec l'horizontale est l'anti-complémentaire de l'angle formé par le vecteur position avec l'horizontale : le cosinus de β est égal à moins le sinus de θ et le sinus de β est égal au cosinus de θ . Le vecteur vitesse fait bien un angle droit avec le rayon. Si nous plaçons le vecteur vitesse en P, nous retrouvons le vecteur v tangent au cercle.¹

C le vecteur accélération

Nous savons (voir éq. 7.4 p. 55) que le vecteur accélération est la dérivée du vecteur vitesse.

1. Pour simplifier les schémas nous avons pris un vecteur vitesse de même longueur que le vecteur \vec{r} .

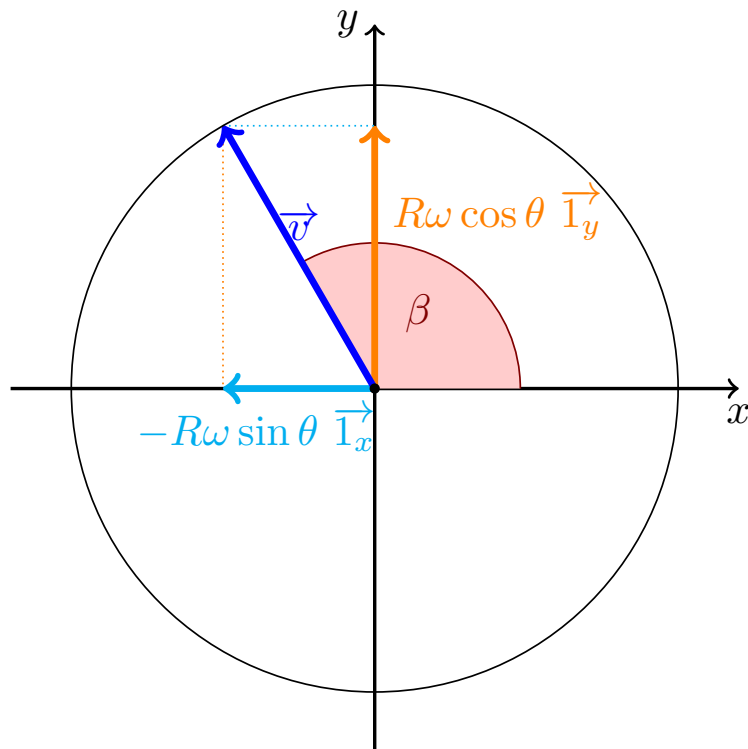


FIGURE 11.2 – Le vecteur vitesse en coordonnées cartésiennes.

Appliquons ce résultat à notre cas.

$$\begin{cases} a_x = v'_x = (-R\alpha t \sin(\frac{1}{2}\alpha t^2))' \\ a_y = v'_y = (R\alpha t \cos(\frac{1}{2}\alpha t^2))' \end{cases} \quad (11.11)$$

Et donc en MCUA :

$$\begin{cases} a_x = -R\alpha \sin(\frac{1}{2}\alpha t^2) - R t^2 \alpha^2 \cos(\frac{1}{2}\alpha t^2) \\ a_y = R\alpha \cos(\frac{1}{2}\alpha t^2) - R t^2 \alpha^2 \sin(\frac{1}{2}\alpha t^2) \end{cases} \quad (11.12)$$

Cette expression est plus complexe que celle du MCU. (voir éq. 10.8 p. 84) .

a) Accélérations normale et tangentielle

(i) Accélération tangentielle : Observons tout d'abord que nous avons la partie de l'accélération en " $R\alpha$ " a une composante en " x " en " $-\sin(\frac{1}{2}\alpha t^2)$ " et une composante en " y " en " $\cos(\frac{1}{2}\alpha t^2)$ ".

Cette partie de l'accélération est donc alignée comme le vecteur vitesse.

Il s'agit de l'accélération tangentielle discutée précédemment

Sa norme sera donc :

$$\|\vec{a}_{tg.}\| = \sqrt{a_{tg.x}^2 + a_{tg.y}^2} \quad (11.13)$$

Comme nous en avons l'habitude nous écrivons la norme du vecteur en n'écrivant pas la flèche du vecteur.

$$a_{tg.} = \|\vec{a}_{tg.}\| \quad (11.14)$$

$$a_{tg.} = \sqrt{R^2 \cdot \alpha^2 \cdot \cos^2\left(\frac{1}{2}\alpha t^2\right) + R^2 \cdot \alpha^2 \cdot \sin^2\left(\frac{1}{2}\alpha t^2\right)} \quad (11.15)$$

$$a_{tg.} = R\alpha \sqrt{\cos^2\left(\frac{1}{2}\alpha t^2\right) + \sin^2\left(\frac{1}{2}\alpha t^2\right)} \quad (11.16)$$

Donc :

$$a_{tg.} = R\alpha \quad (11.17)$$

(ii) Accélération normale : La partie de l'accélération en " $Rt^2\alpha^2$ " a une composante en "x" en " $-\cos\left(\frac{1}{2}\alpha t^2\right)$ " et une composante en "y" en " $-\sin\left(\frac{1}{2}\alpha t^2\right)$ ".

Cette partie de l'accélération est donc de même direction que le vecteur position mais de sens opposé.

Il s'agit de l'accélération normale discutée précédemment

Sa norme sera donc :

$$a_n = \sqrt{a_{n.x}^2 + a_{n.y}^2} \quad (11.18)$$

$$a_n = \sqrt{R^2 t^4 \alpha^4 \cos^2\left(\frac{1}{2}\alpha t^2\right) + R^2 t^4 \alpha^4 \sin^2\left(\frac{1}{2}\alpha t^2\right)} \quad (11.19)$$

$$a_n = Rt^2\alpha^2 \sqrt{\sin^2\left(\frac{1}{2}\alpha t^2\right) + \cos^2\left(\frac{1}{2}\alpha t^2\right)} \quad (11.20)$$

Et donc :

$$a_n = Rt^2\alpha^2 \quad (11.21)$$

b) Norme de l'accélération

Comme l'accélération normale et tangentielle sont perpendiculaires, il est très facile de déterminer la norme de \vec{a} .

$$\|\vec{a}(t)\| = \sqrt{a_n^2 + a_{tg.}^2} = \sqrt{R^2 t^4 \alpha^4 + R^2 \alpha^2} \quad (11.22)$$

$$\|\vec{a}(t)\| = R\sqrt{t^4 \alpha^4 + \alpha^2} \quad (11.23)$$

Ce qui peut aussi s'écrire :

$$\|\vec{a}(t)\| = R\sqrt{\omega^4 + \alpha^2} \quad (11.24)$$

Il aurait été tentant de mettre α en évidence dans l'équation 11.23.

Remarquons cependant que si la vitesse angulaire initiale n'avait pas été nulle, alors on aurait eu

$$\omega(t) = \alpha t + \omega_0 \quad (11.25)$$

C'est pourquoi on préfère la forme de l'équation 11.24 à la précédente.

c) Direction de l'accélération

La direction du vecteur accélération peut se déterminer par le raisonnement suivant :

Soit θ_a l'angle formé par le vecteur \vec{a} et l'horizontale.

Soit θ_v l'angle formé par le vecteur vitesse \vec{v} et l'horizontale.

$$\theta_v = \omega t + \pi/2 \quad (11.26)$$

La partie tangentielle de l'accélération forme donc aussi le même angle θ_v avec l'horizontale.

θ_a est donc égal à l'angle θ_v auquel il faut ajouter l'angle φ entre \vec{a} et l'accélération tangentielle \vec{a}_{tg} .

$$\theta_a = \theta_v + \varphi \quad (11.27)$$

$$\theta_a = \omega t + \pi/2 + \varphi \quad (11.28)$$

$$\varphi = \arctan \frac{a_n}{a_{tg}} = \arctan \frac{Rt^2\alpha^2}{R\alpha} = \arctan \left(\frac{t^2\alpha^2}{\alpha} \right) = \arctan \left(\frac{t\omega^2}{\alpha} \right) \quad (11.29)$$

Finalement on obtient donc :

$$\theta_a = \omega t + \arctan \left(\frac{t\omega^2}{\alpha} \right) + \pi/2 \quad (11.30)$$

C'est-à-dire dans le cas qui nous occupe :

$$\theta_a = \omega t + \arctan \left(\frac{t^2\alpha^2}{\alpha} \right) + \pi/2 \quad (11.31)$$

Un raisonnement simple va nous permettre de comprendre cette expression.

À l'instant initial, il faut "démarrer" le mobile M. L'accélération sera uniquement tangentielle. Cette accélération tangentielle reste constante (dans le cadre que nous nous sommes donné).

Plus la vitesse linéaire augmente, plus l'accélération normale doit être grande (comme dans le MCU).

Le vecteur accélération va donc devenir de plus en plus centripète au fur et à mesure du temps sans jamais tout à fait le devenir à cause de l'accélération tangentielle qui reflète l'augmentation de vitesse.

d) En résumé

Nous connaissons donc maintenant toutes les caractéristiques du vecteur accélération $\vec{a}(t)$ en MCUA.

Résumons les ici et déterminons ainsi complètement le vecteur accélération en MCUA :

Définition 34 (accélération en MCUA). En MCUA, l'accélération $\vec{a}(t)$ a les caractéristiques suivantes :

- sa norme est $\|\vec{a}(t)\| = a = R\sqrt{\omega^4 + \alpha^2}$. (m s^{-2});
- sa direction est donnée par $\theta_a = \omega t + \arctan \left(\frac{t\omega^2}{\alpha} \right) + \pi/2$;
- son sens est dirigé vers l'intérieur du cercle (mais plus vers le centre).

Remarque 7. Notons que si l'accélération angulaire α est constante, ce n'est pas le cas du vecteur accélération $\vec{a}(t)$. Sa norme augmente avec le temps et sa direction évolue de manière non triviale avec le temps.

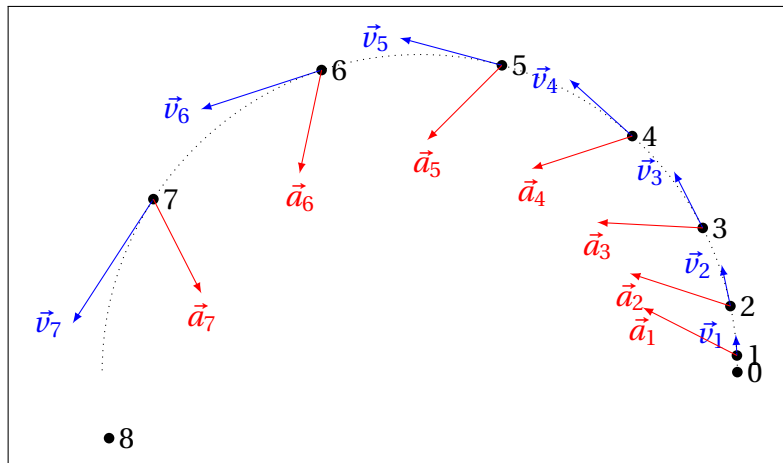


FIGURE 11.3 – L'accélération linéaire en MCUA.

3 Exercices :

Chapitre 12

Le tir horizontal

Sommaire

1	Mise en situation	96
	A Expérience	96
	B Autres exemples	97
	C La notion de trajectoire d'Aristote à Galilée en passant par Léonard de Vinci : les boulets de canons	98
2	Chronophotographie	102
	A analyse du mouvement vertical	102
	B Analyse quantitative du mouvement	102
3	Conclusions	104
4	Les équations du mouvement	104
	A Tableau récapitulatif : Les équations horaires ou paramétriques	104
	B Trajectoire : les équations cartésiennes	105
5	Portée	106
6	Autres	107
	A Vitesse en fonction de l'altitude	107
	B Angles	107
	C \vec{a}_n, \vec{a}_{tg}	108
7	Exercices	110

Introduction

Le tir horizontal est le mouvement d'un objet à proximité de la surface de la Terre (ou d'une planète) et qui, au départ, n'a qu'une vitesse horizontale. Comme pour la chute libre, les effets de l'atmosphère peuvent être négligés.

Exemples

- Si nous lâchons une balle, nous savons que le mouvement sera une chute libre en MRUA. Si, maintenant, nous sommes dans un train en marche et désirons laisser tomber une balle dans un seau posé sur le quai, nous savons que nous ne devons pas laisser tomber la balle à la verticale du seau mais "avant". Une personne se trouvant sur le quai verra la balle tomber selon une trajectoire courbée et pas à la verticale. Si nous sommes dans le train, comment nous apparaît la trajectoire ?
- Si maintenant, nous sommes sur un pont et désirons laisser tomber une balle dans un seau ... posé sur le toit du train ! Qu'allons nous faire ? Quelle sera l'apparence de la trajectoire si nous sommes dans le train ou sur le pont ?

La notion de système de référence, rappelée aux chapitres précédents, prend clairement beaucoup d'importance dans ces exemples. Les courbes ne seront pas les mêmes selon l'endroit où se trouve l'observateur : Si vous êtes sur le pont la balle tombe tout droit (en MRUA), si vous êtes sur le train la trajectoire est courbe. Pourtant, c'est la même balle qui tombe et elle prend autant de temps pour tomber quelque soit l'endroit où se trouve l'observateur. En y réfléchissant, est-ce si différent dans le premier exemple ?

1 Mise en situation

A Expérience

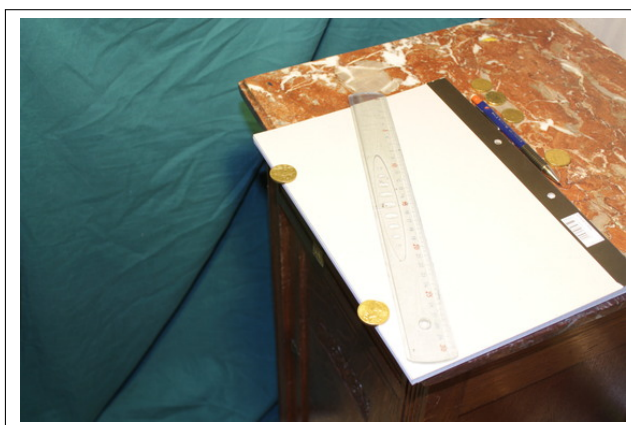


FIGURE 12.1 – Deux pièces, une latte, un axe sur une table.

Disposons deux pièces identiques en équilibre au bord d'une table. Ensuite nous faisons pivoter, à la surface de la table, une latte autour d'un axe (un bic ou un crayon) pour que la latte frappe les deux pièces simultanément.

Les deux pièces vont tomber en même temps. La pièce la plus proche de l'axe, ayant reçu la plus petite impulsion, va tomber presque au pied de la table. L'autre pièce va tomber plus loin.



FIGURE 12.2 – Les deux pièces vont tomber.

Conclusion 1. *Mais les deux pièces arrivent au sol en même temps!*

B Autres exemples

a) Dans le train

Si, dans un train en MRU, nous laissons tomber un objet, cet objet va tomber à nos pieds. Tout se passe, de notre point de vue, comme si l'objet était en chute libre.

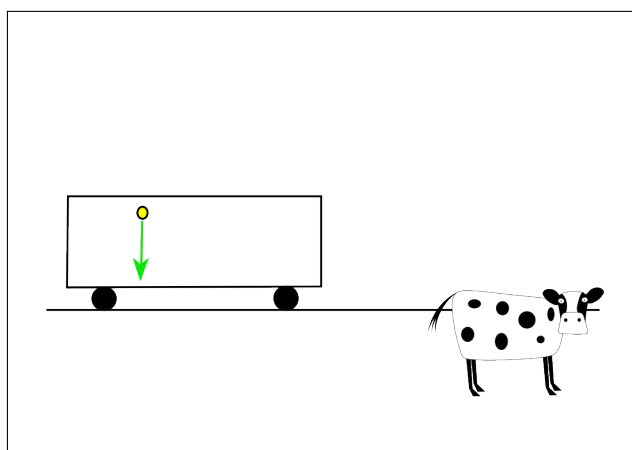


FIGURE 12.3 – Chute dans le train : point de vue du passager.

Du point de vue de la vache qui regarde passer le train, pourtant, la trajectoire est courbe!

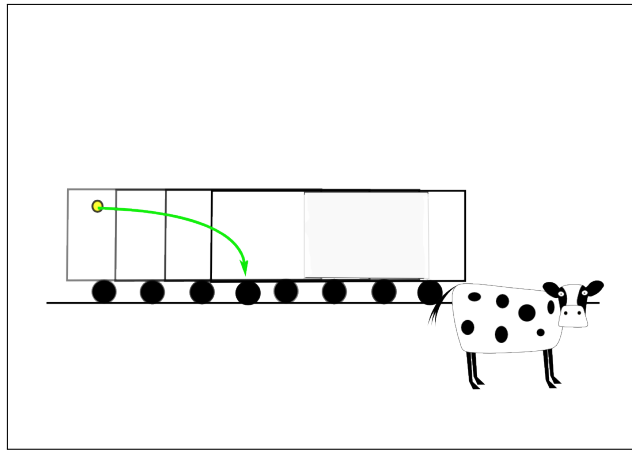


FIGURE 12.4 – Chute dans le train : point de vue de la vache.

b) Largage depuis un avion

Observons le largage de bombes depuis un avion. Si l'observateur se trouve dans un autre avion volant en formation avec le bombardier, les bombes tombent à la verticale de l'avion.



FIGURE 12.5 – Bombardement.

C La notion de trajectoire d'Aristote à Galilée en passant par Léonard de Vinci : les boulets de canons

Si il nous apparaît difficile d'étudier ce mouvement, nous pouvons nous rassurer en étudiant l'histoire des sciences. Le type de trajectoire supposée a parfois été franchement fantaisiste.

Ainsi, selon Aristote, lorsqu'on projette une balle en l'air, on lui donne une certaine "réserve" de mouvement (comme lorsque nous faisons le plein d'une voiture). Lorsque cette réserve est épuisée, la balle tombe à la verticale car le sol est "son lieu naturel".

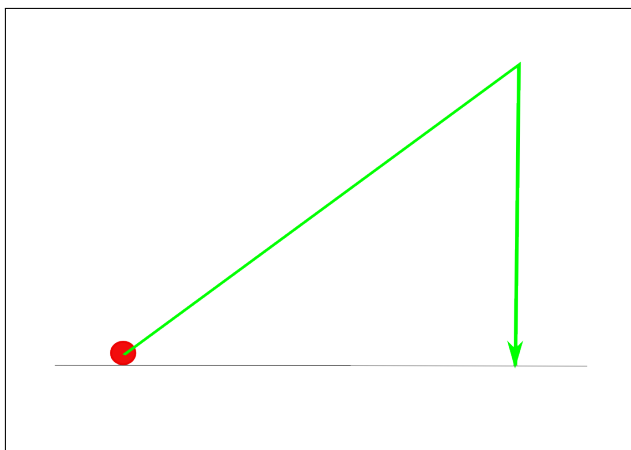


FIGURE 12.6 – Le lancer d'une balle selon Aristote.

Aristote est plutôt un biologiste. Ses opinions sur la physique sont plus de l'ordre de la philosophie. Il affirme qu'il y a quatre éléments : l'eau, l'air, la terre et le feu. Le point de vue d'Aristote est celui adopté par l'Église pendant le Moyen Âge.

À la fin du Moyen Âge, la poudre noire commence à être utilisée. Les premiers canons font leur apparition. Des manuels pour artilleurs commencent à circuler.

Au début, la trajectoire décrite reste celle d'Aristote.

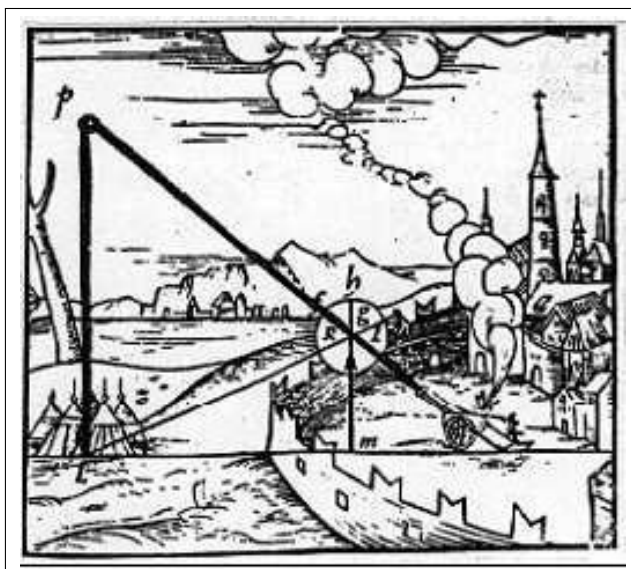


FIGURE 12.7 – Tir de canon selon Aristote.

Des mesures d'angles de plus en plus précises sont réalisées.



FIGURE 12.8 – Mesure d'angle de tir.

Le pragmatisme fait apparaître des schémas qui vont progressivement s'approcher de la réalité.

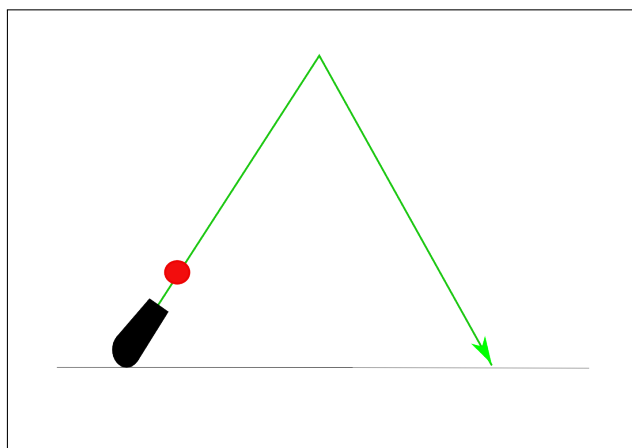


FIGURE 12.9 – Le lancer du boulet de canon au Moyen Âge : deuxième version.

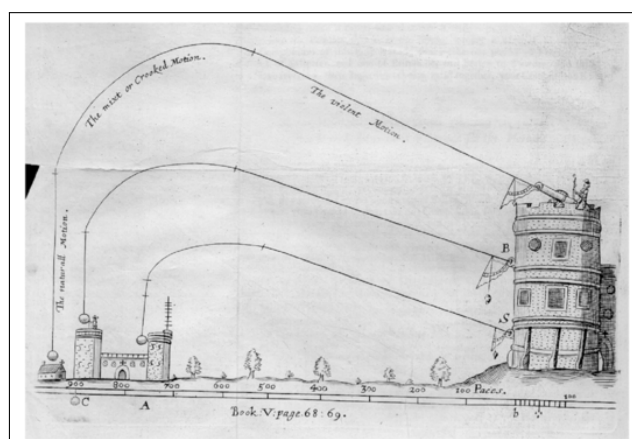


FIGURE 12.10 – Le lancer du boulet de canon au Moyen Âge : troisième version.

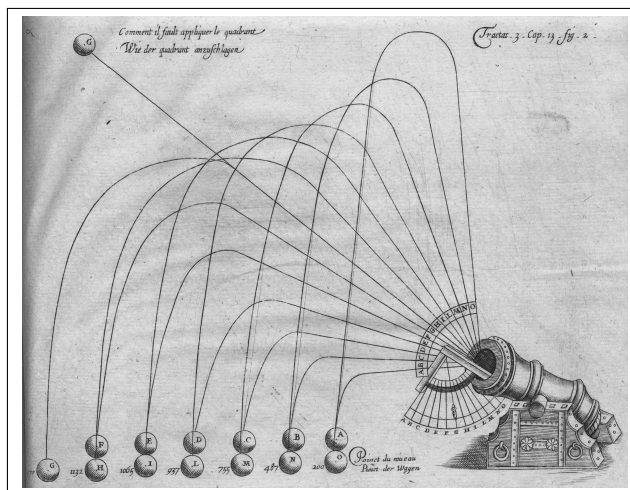


FIGURE 12.11 – Le lancer du boulet de canon au Moyen Âge : quatrième version.

Léonard de Vinci est le premier à dessiner une parabole mais sans le dire !

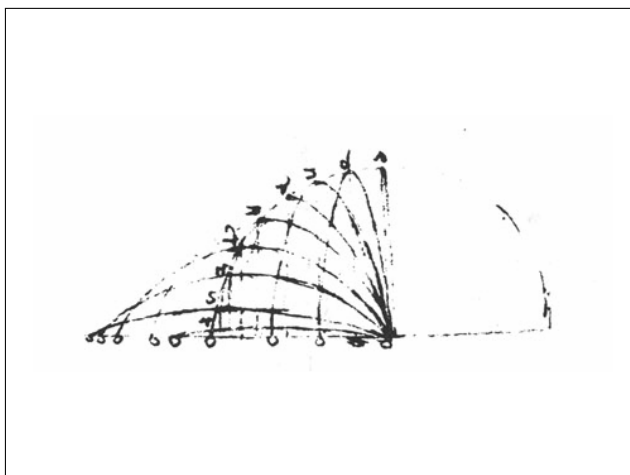


FIGURE 12.12 – Le lancer du boulet de canon selon Léonard de Vinci (1493).

Finalement, c'est Galilée qui identifie clairement la trajectoire comme parabolique.

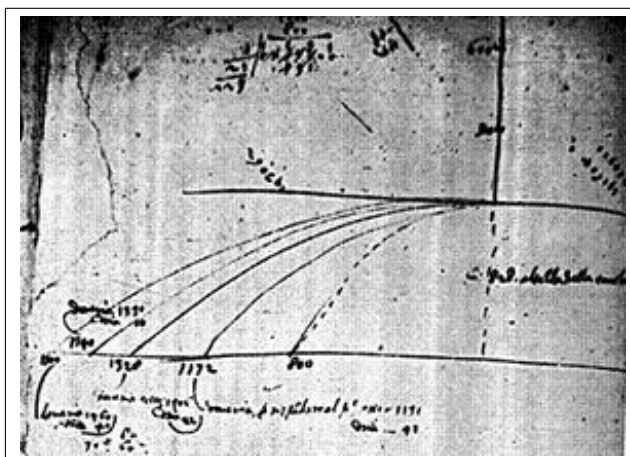


FIGURE 12.13 – Le lancer du boulet de canon selon Galilée.

2 Chronophotographie

Clarifions notre point de vue en faisant une analyse plus quantitative de ce type de mouvement. Nous connaissons la technique de la chronophotographie. Utilisons-la.

A analyse du mouvement vertical

Faisons la chronophotographie de deux balles identiques qui tombent. Elles démarrent simultanément. L'une chute à la verticale, l'autre est poussée sur le côté au début de la chute. (De même, quand je lâche ma balle depuis le train, je cesse de la pousser. Je lui ai donné une poussée horizontale qui est la vitesse du train et donc une vitesse horizontale, sans plus.)

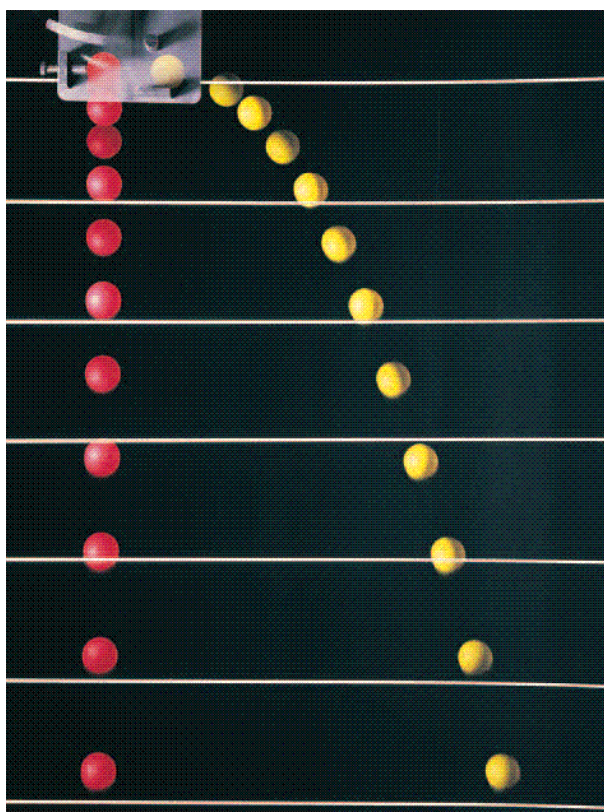


FIGURE 12.14 – Chronophotographie de deux balles.

Comptons les spots correspondants aux balles, le nombre est le même. Nous pouvons conclure que les balles mettent le même temps pour arriver au sol.

Le mouvement vertical est le même !

Nous remarquons que les deux balles sont toujours à la même hauteur au même instant.

Propriété 4. *La composante verticale de leur position est donc identique à tout instant.*

$$\forall t : r_{1y}(t) = r_{2y}(t)$$

B Analyse quantitative du mouvement

Représentons une chronophotographie décrivant une même situation sur un diagramme avec un système d'axes.

Les images de la chronophotographie sont prises tous les $20^{\text{èmes}}$ de seconde, le sommet gauche est l'origine (0,0) du repère. Les positions de la bille sur la chronophotographie sont représentées par les points en vert. La trajectoire (également en vert) a été extrapolée mais est correcte .

Nous avons fait un choix d'axes où le sens positif de la direction verticale est vers le bas.

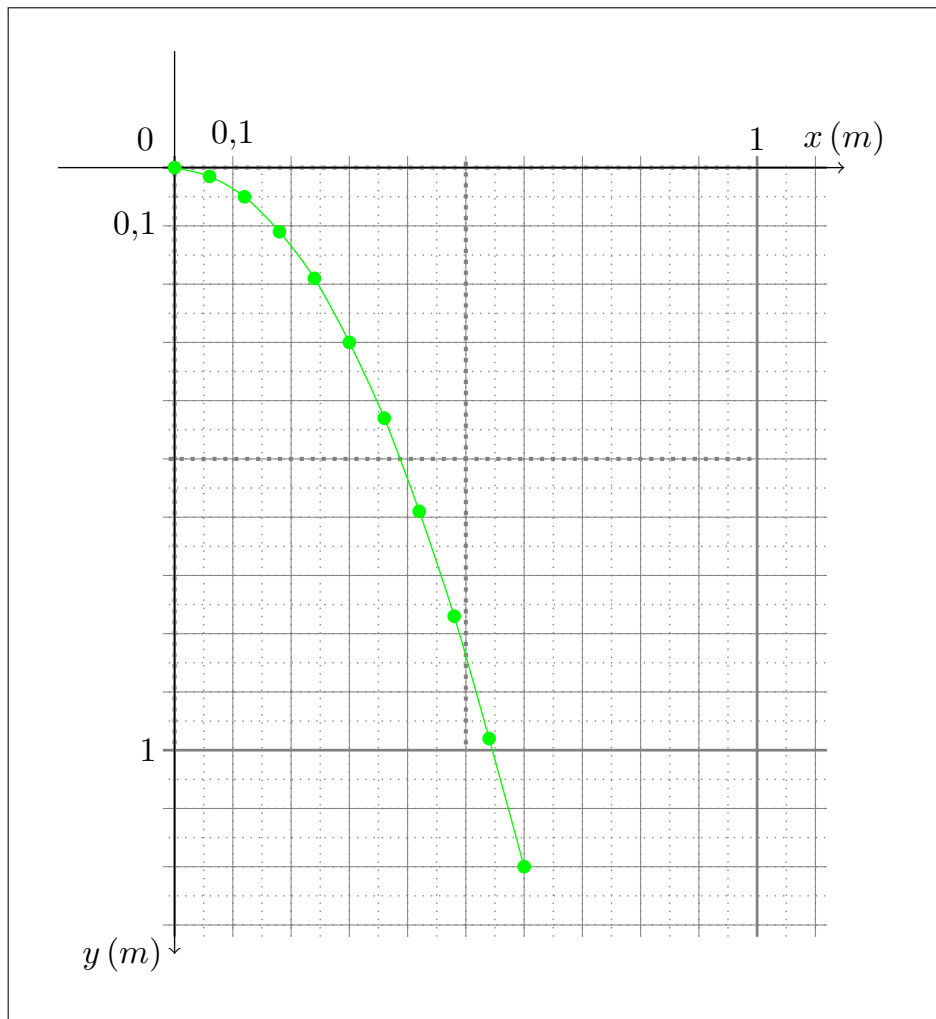


FIGURE 12.15 – Graphique de la chronophotographie.

Répondez aux questions suivantes :

1. Écrivez les coordonnées (x;y) de chaque image de la balle. Ces coordonnées nous donnent les composantes (x;y) du vecteur position \vec{r} .
2. Oubliez la composante y et faites un tableau de la composante x de \vec{r} en fonction du temps (tous les $20^{\text{èmes}}$ de seconde).
Cette composante s'écrit : \vec{r}_x et comme elle dépend du temps elle s'écrira : $\vec{r}_x(t)$
(par facilité nous ne regarderons que la norme $r_x(t)$ de $\vec{r}_x(t)$)
Ce mouvement horizontal est il un MRU ou un MRUA ?
3. idem pour $\vec{r}_y(t)$
4. Après une demi-seconde, déterminez la vitesse horizontale $\vec{v}_x(0,5)$.
5. Après une demi-seconde, déterminez la vitesse verticale $\vec{v}_y(0,5)$.
6. Déterminez le vecteur vitesse instantanée $\vec{v}(0,5)$ alors par l'addition des vecteurs : Sa longueur $v(0,5)$ et l'angle qu'il fait avec l'horizontale.

Organisons les mesures sous la forme d'un tableau.

n^0	t (s)	$r_x(t)$ (m)	$r_y(t)$ (m)
1	0	0	0
2	0,05		
3	0,10		
4	0,15		
5	0,20		
6	0,25		
7	0,30		
8	0,35		
9	0,40		
10	0,45		
11	0,50		

3 Conclusions

Si un objet est lancé horizontalement (à la surface de la terre), alors

— les mouvements horizontaux et verticaux sont indépendants!

— Le mouvement horizontal est un MRU. La vitesse horizontale $\vec{v}_x(t)$ est **constante**; Le déplacement horizontal est proportionnel au temps :

$$\vec{\Delta r}_x(t) = \vec{v}_x(t) \cdot \Delta t \quad (12.1)$$

— Le mouvement vertical, lui, est un MRUA. L'accélération \vec{a}_y est constante, dirigée vers le bas est égale g ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

— sa vitesse verticale $\vec{v}_y(t)$ est égale à

$$\vec{v}_y(t) = \vec{g} \cdot \Delta t \quad (12.2)$$

— La position verticale est égale à

$$\vec{r}_y(t) = \frac{1}{2} \cdot \vec{g} \cdot \Delta t^2 \quad (12.3)$$

— Le vecteur vitesse de l'objet est obtenu à tout instant par l'addition de $\vec{v}_x(t)$ et de $\vec{v}_y(t)$.

— La norme du vecteur se calcule par la relation de Pythagore

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 \quad (12.4)$$

et

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (12.5)$$

— le vecteur vitesse est tangent à la trajectoire. Son angle avec l'horizontale se calcule par la relation :

$$\text{tg}(\Theta) = \frac{v_y}{v_x} \quad (12.6)$$

4 Les équations du mouvement

A Tableau récapitulatif : Les équations horaires ou paramétriques

Attention! Ici, l'axe vertical est choisi dirigé vers le haut. L'origine du système de référence est au niveau du sol au pied du point de départ qui se trouve lui à une hauteur "h".

Grandeur	en X	en Y	Unité
\vec{r}_i	$r_{ix} = 0$	$r_{iy} = h$	(m)
\vec{v}_i	$v_{ix} = \dots$	$v_{iy} = 0$	(m/s)
\vec{a}_i	$a_{ix} = a_x = 0$	$a_{iy} = a_y = -g = -9,81$	(m/s ²)
$\vec{r}(t)$	$r_x(t) = r_{ix} + v_{ix} \cdot t + 1/2 \cdot a_x \cdot t^2$ $= 0 + v_{ix} \cdot t + 0$ $= v_{ix} \cdot t$	$r_y(t) = r_{iy} + v_{iy} \cdot t + 1/2 \cdot a_y \cdot t^2$ $= h + 0 \cdot t + 1/2 \cdot (-9,81) \cdot t^2$ $= h + 1/2 \cdot (-9,81) \cdot t^2$	(m)
$\vec{v}(t)$	$v_x(t) = v_{ix} + a_x \cdot t$ $= v_{ix}$ $= v_{ix}$	$v_y(t) = v_{iy} + a_y \cdot t$ $= a_y \cdot t$ $= -9,81 \cdot t$	(m/s)
$\vec{a}(t)$	$a_x(t) = a_{ix} = a_x = 0$	$a_y(t) = a_{iy} = -9,81$	(m/s ²)
\vec{r}_f	$r_{fx} = v_{ix} \cdot t_f$	$r_{fy} = h - (1/2 \cdot 9,81 \cdot t_f) = 0$	(m)
\vec{v}_f	$v_{fx} = v_{ix}$	$v_{fy} = (-9,81) \cdot t_f$	(m/s)
\vec{a}_f	$a_{fx} = 0$	$a_{fy} = a_x = -9,81$	(m/s ²)

TABLE 12.1 – Les équations horaires du tir horizontal.

B Trajectoire : les équations cartésiennes

Pour savoir quelle trajectoire exacte le mobile va suivre, il faut, ici, obtenir une équation reliant " r_x " et " r_y " à tout instant " t ".

$$\begin{cases} r_x(t) = v_0 \cdot t \\ r_y(t) = h - 1/2 \cdot g \cdot t^2 \end{cases} \quad (12.7)$$

Il faut isoler " t " dans la première équation et substituer ce " t " dans la deuxième. (Pour alléger les notations, nous n'écrirons plus " $r_x(t)$ " dans ce qui suit mais " x ", de même en " y ".)

$$\begin{cases} t = \frac{x}{v_0} \\ y = h - 1/2 \cdot g \cdot \left(\frac{x}{v_0}\right)^2 \end{cases} \quad (12.8)$$

L'équation de la trajectoire peut s'écrire :

Conclusion 2 (Équation de la trajectoire du tir horizontal).

$$y = \frac{-g}{2v_0^2} x^2 + h \quad (12.9)$$

Cette équation est clairement une équation d'une branche de parabole.

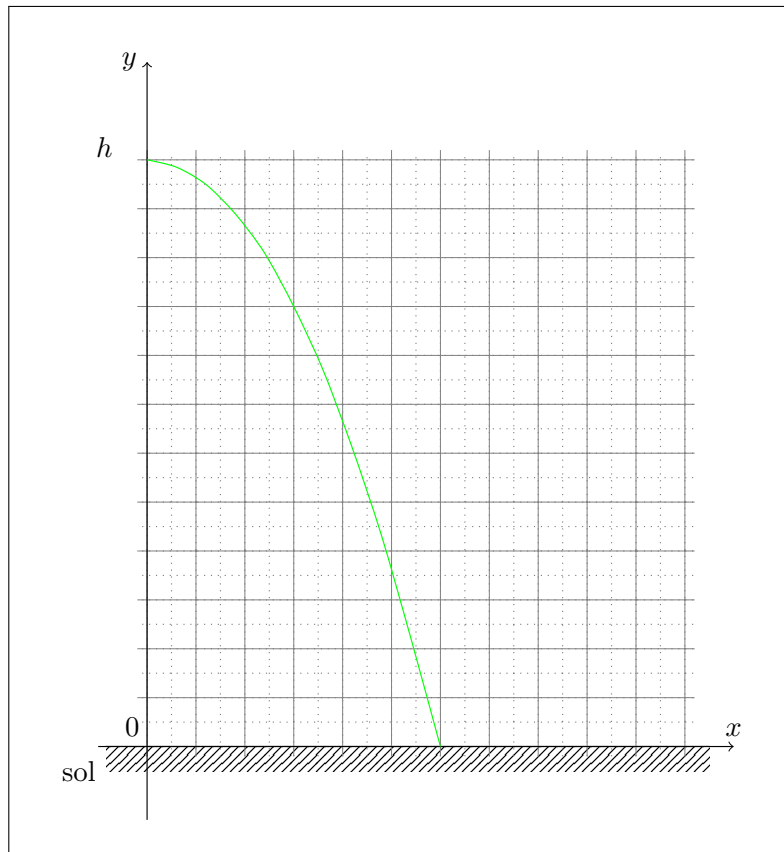


FIGURE 12.16 – La trajectoire est parabolique.

La trajectoire du mobile est une branche de parabole dans le tir horizontal.

5 Portée

La portée " R " est la distance maximale susceptible d'être atteinte. Elle se mesure au sol depuis la verticale du point de départ.

Elle s'obtient en cherchant les racines de l'équation de la trajectoire. Il faut donc poser " $y = 0$ " dans l'équation 2 p. 105. Comme le sommet de la parabole est au dessus de l'origine, les deux racines sont opposées l'une de l'autre. Nous garderons la racine positive.

Définition 35 (Portée du tir horizontal).

$$R = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (12.10)$$

La portée " R " du tir horizontal est purement fonction de la vitesse horizontale initiale et de l'altitude de départ.

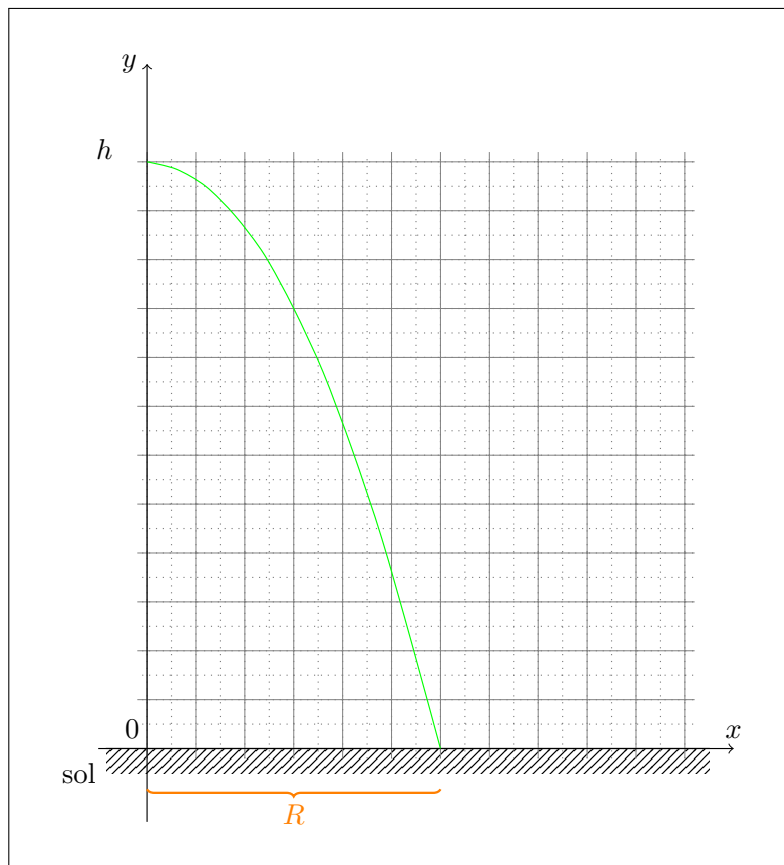


FIGURE 12.17 – La portée du tir horizontal.

6 Autres

A Vitesse en fonction de l'altitude

$$v_y(r_y) = \sqrt{2g\Delta r_y} \quad (12.11)$$

B Angles

L'angle θ que fait la vitesse par rapport à l'horizontale en tout point de la trajectoire est fourni par les composantes du vecteur vitesse.

$$\theta = \arctan \frac{v_y}{v_x} \quad (12.12)$$

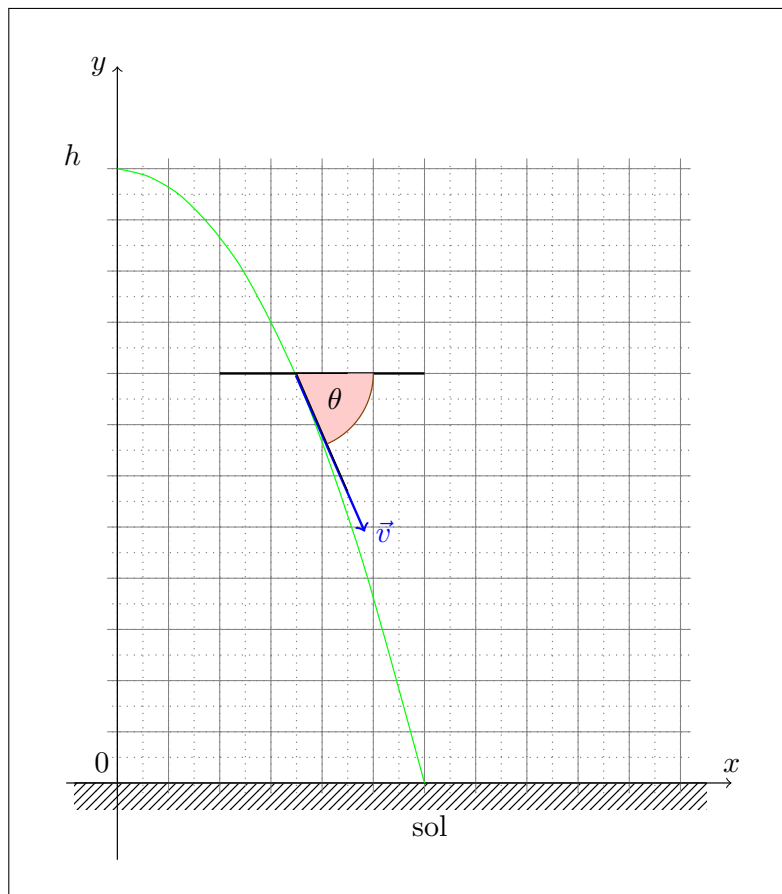


FIGURE 12.18 – L'angle de la vitesse avec l'horizontale dans le tir horizontal.

Ceci explique, en partie, pourquoi il a été si difficile d'analyser le tir horizontal.

Rappelons que les frottements introduisent une accélération s'opposant au mouvement, proportionnelle mais opposée à la vitesse :

$$\vec{a} = -b\vec{v} \quad (12.13)$$

où b est un coefficient dit "de traînée" dépendant de la densité de l'objet, de sa géométrie et du milieu traversé (ici de l'air).

L'accélération dans un mouvement "réel" va donc être l'addition de l'accélération constante de gravité "g" qui est verticale et de cette accélération due aux frottements qui est oblique et variable en grandeur et direction avec le temps. Ceci complique sérieusement les équations et il faut avoir recours à un système d'équations différentielles. Cette démarche est non triviale et dépasse le cadre de ce cours.

C \vec{a}_n, \vec{a}_{tg}

En combinant le fait que l'accélération g est constante en norme et en direction avec le point précédent, il est possible de déterminer les accélérations normales et tangentielles.

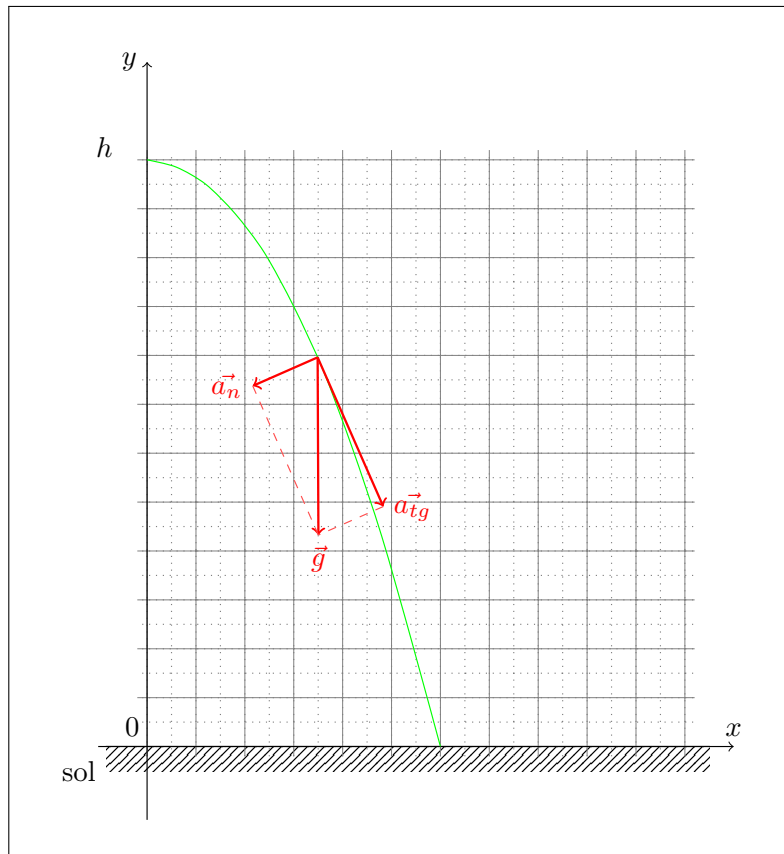


FIGURE 12.19 – Les accélérations normales et tangentielles.

Remarquons simplement qu'au départ l'accélération est purement normale et qu'elle devient de plus en plus tangentielle avec le temps.

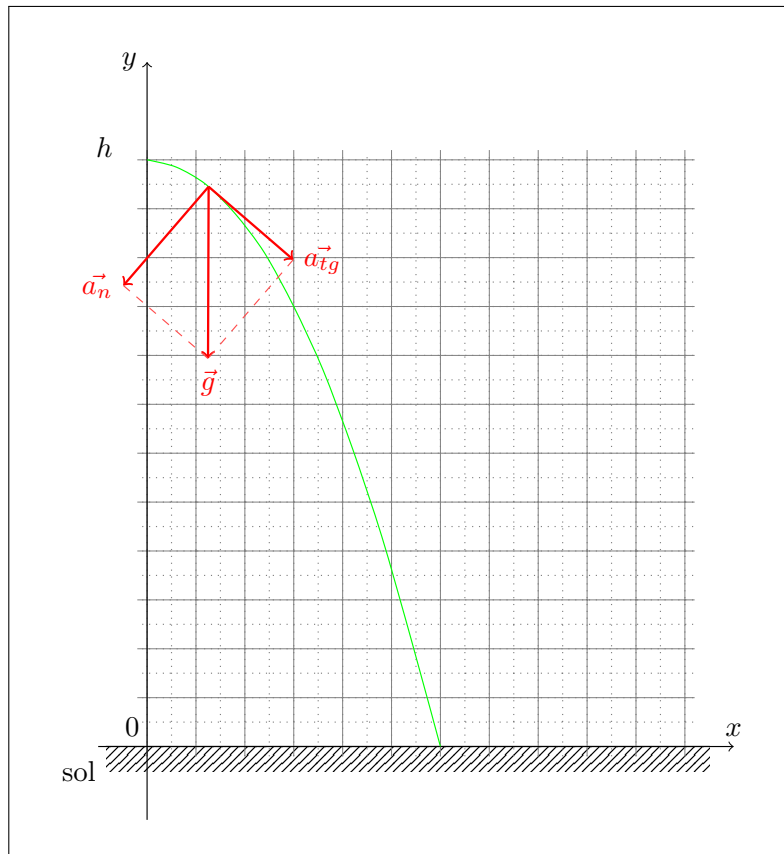


FIGURE 12.20 – Les accélérations normales et tangentielles peu après le départ.

7 Exercices

Chapitre 13

Le tir oblique ou parabolique

Sommaire

1	Équations du mouvement	112
	A Les règles du jeu	112
	B Vitesse initiale oblique	113
	C Vitesse	113
	D Équations paramétriques ou horaires	114
2	Trajectoire : équation cartésienne	114
	A Hauteur maximale	115
3	Portée	116
	A En général	116
	B Portée maximale	117
4	Autres	118
	A Vitesse en fonction de l'altitude	118
	B Angles	118
	C \vec{a}_n, \vec{a}_{tan}	118
5	Cibles	118
	A Équations générales	119
	B De haut, c'est plus beau : la citadelle	124
6	Avec les frottements	126
7	Exercices	126

Introduction

Un lancer d'objet à proximité de la surface terrestre comme dans le cas du tir horizontal représente plutôt l'exception que la règle. Très souvent, la vitesse initiale de l'objet n'est ni purement horizontale ni purement verticale mais oblique.

Les exemples typiques de ce type de mouvement sont :

- les lancers de balles (golf, football, tennis ...)
- et les lancers de projectiles *non* auto-propulsés (canons, balles de fusil, catapultes, et balistes ...).

Nous allons ici traiter le problème au travers des équations du mouvement.

1 Équations du mouvement

A Les règles du jeu

Nous allons donc étudier des mouvements où la seule accélération est due à la gravité terrestre¹.

La vitesse initiale est une vitesse oblique à la surface de la Terre.

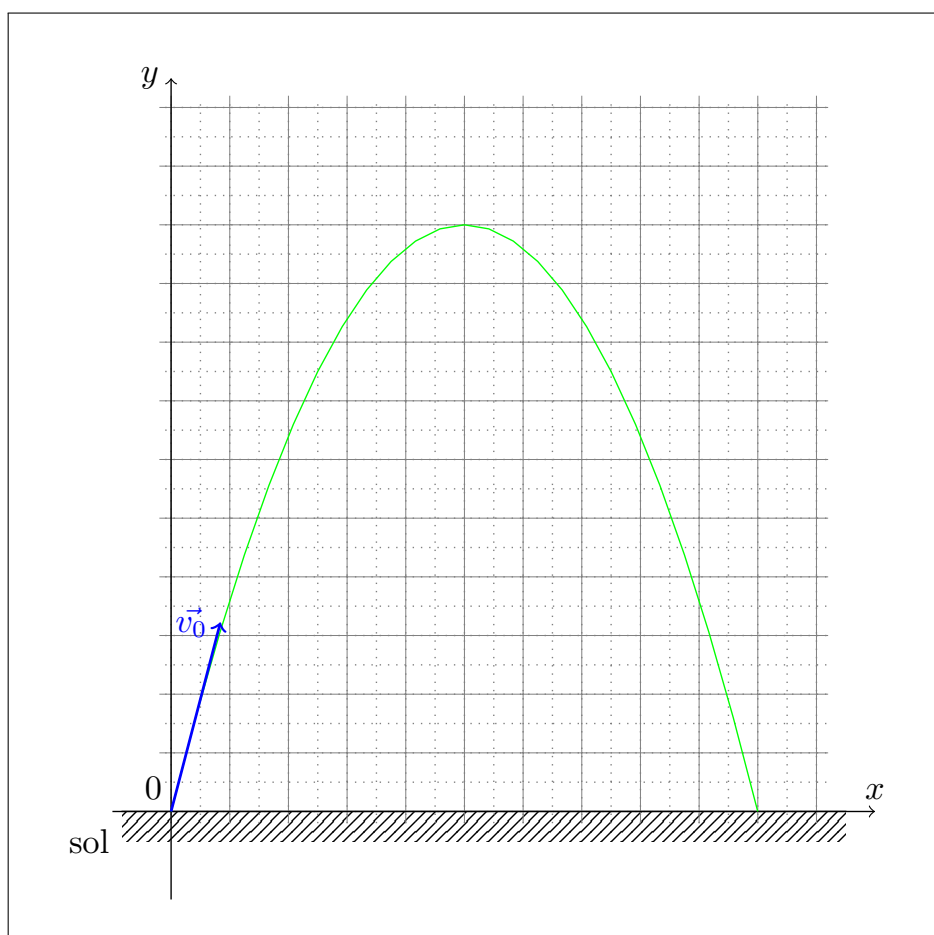


FIGURE 13.1 – Le tir oblique.

Les équations du mouvement, dans notre cas, doivent tenir compte de l'indépendance des mouvements horizontaux et verticaux.

1. Cette étude peut s'étendre à tout mouvement à la surface d'un astre. Il suffira de prendre une valeur de "g" adaptée à l'astre en question.

Nous négligerons aussi les frottements.

B Vitesse initiale oblique

Le premier point à traiter est la vitesse initiale.

Cette vitesse est oblique par rapport à la surface de la Terre, puisque c'est ainsi que nous définissons le mouvement que nous étudions.

La vitesse initiale peut toujours se décomposer en une vitesse horizontale et une vitesse verticale.

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y \quad (13.1)$$

Si la vitesse initiale est fournie par un dispositif comme un canon ou le pied d'un joueur de football, il est raisonnable de considérer que la norme (maximale) de la vitesse initiale est constante.

Ce qui va faire varier les valeurs des vitesses horizontale et verticale sera l'angle θ que fait le vecteur vitesse initiale l'horizontale.

Si " v " est la norme du vecteur vitesse, nous pourrions écrire :

$$\begin{cases} v_{0x} = v_0 \cos \theta \\ v_{0y} = v_0 \sin \theta \end{cases} \quad (13.2)$$

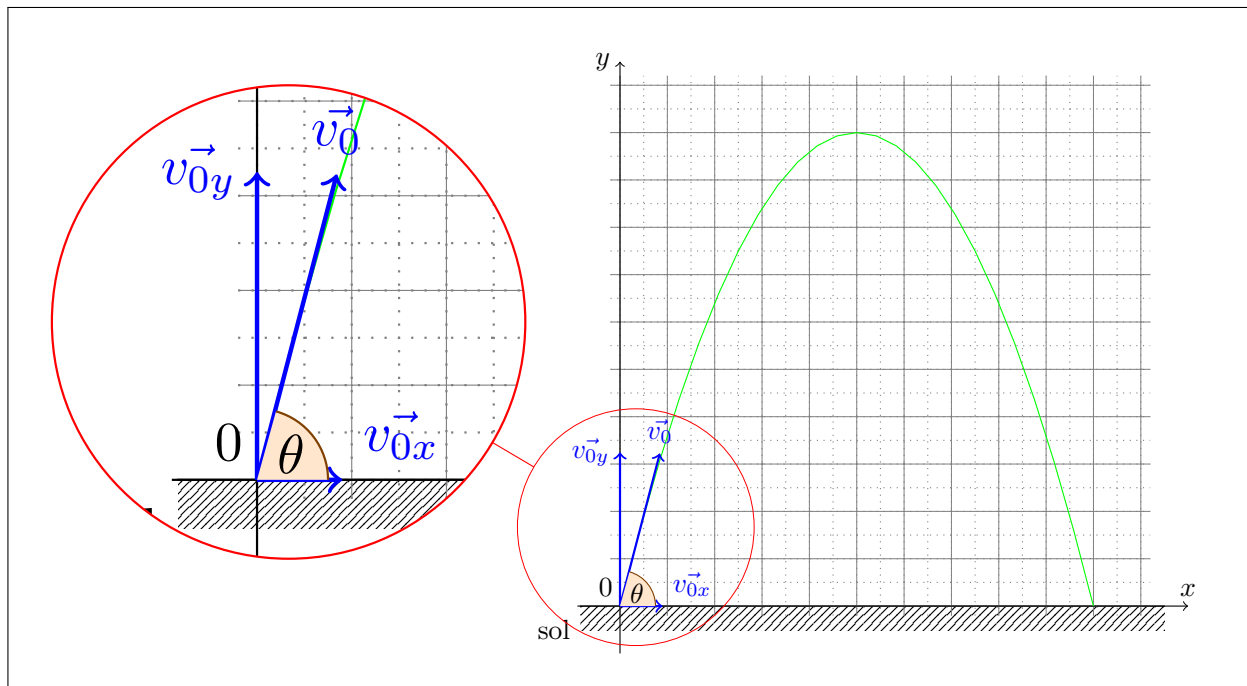


FIGURE 13.2 – Les composantes de la vitesse initiale.

C Vitesse

a) Composante horizontale

Comme dans le cas du tir horizontal, le mouvement horizontal ne connaît pas d'accélération. la vitesse horizontale est donc constante.

$$v_x(t) = v_x = \text{cste.} \quad (13.3)$$

La partie horizontale du mouvement obéira aux équations du MRU.

b) Composante verticale

Contrairement au cas du tir horizontal, la vitesse initiale verticale n'est pas nulle.

Le mouvement vertical connaît une accélération : la gravité.

La vitesse verticale obéira donc aux équations du MRUA : la loi des vitesses.

$$v_y(t) = v_{0y} + gt \quad (13.4)$$

(i) Signes Il faut être attentif aux signes.

Nous avons écrit " gt ", mais ceci il faut préciser le signe de " g ".

Si nous discutons d'un tir de canon ou du lancer d'une balle de tennis, il est raisonnable de prendre le lieu du tir comme origine du système de référence. Dans la direction verticale, le sens positif est "vers le haut".

Dans ce cas, " g " est négatif!

$$v_y(t) = v_{0y} - 9,81t \quad (13.5)$$

D Équations paramétriques ou horaires

Rassemblons les équations sous forme de tableau :

Grandeur	en X	en Y	Unité
\vec{r}_0	$r_{0x} = 0$	$r_{0y} = 0$	(m)
\vec{v}_0	$v_{0x} = v_0 \cos\theta$	$v_{0y} = v_0 \sin\theta$	(m/s)
\vec{a}_0	$a_{0x} = a_x = 0$	$a_{0y} = a_y = -9,81 (= -g)$	(m/s ²)
$\vec{a}(t)$	$a_x(t) = a_{0x} = a_x = 0$	$a_y(t) = a_{0y} = a_y = -9,81$	(m/s ²)
$\vec{v}(t)$	$v_x(t) = v_{0x} + a_x \cdot t$ $v_x(t) = v_0 \cos\theta$	$v_y(t) = v_{0y} + a_y \cdot t$ $v_y(t) = v_0 \sin\theta - g \cdot t$	(m/s)
$\vec{r}(t)$	$r_x(t) = r_{0x} + v_{0x} \cdot t + 1/2 \cdot a_x \cdot t^2$ $r_x(t) = 0 + v_0 \cos\theta \cdot t + 1/2 \cdot 0 \cdot t^2$ $r_x(t) = v_0 \cos\theta \cdot t$	$r_y(t) = r_{0y} + v_{0y} \cdot t + 1/2 \cdot a_y \cdot t^2$ $r_y(t) = v_0 \sin\theta \cdot t - 1/2 \cdot 9,81 \cdot t^2$ $r_y(t) = v_0 \sin\theta \cdot t - 1/2 \cdot g \cdot t^2$	(m)

2 Trajectoire : équation cartésienne

Pour savoir quelle trajectoire exacte le mobile va suivre, il faut, ici, obtenir une équation reliant " r_x " et " r_y " à tout instant " t ".

$$\begin{cases} r_x(t) = v_0 \cos\theta \cdot t \\ r_y(t) = v_0 \sin\theta \cdot t - 1/2 g t^2 \end{cases} \quad (13.6)$$

Il faut isoler " t " dans la première équation et substituer ce " t " dans la deuxième. (Pour alléger les notations, nous n'écrirons plus " $r_x(t)$ " dans ce qui suit mais " x ", de même en " y ".)

$$\begin{cases} t = \frac{x}{v_0 \cos\theta} \\ y = v_0 \sin\theta \cdot \frac{x}{v_0 \cos\theta} - 1/2 g \left(\frac{x}{v_0 \cos\theta} \right)^2 \end{cases} \quad (13.7)$$

L'équation de la trajectoire est :

$$y = x \tan\theta - x^2 \frac{g}{2v_0^2 \cos^2\theta} \quad (13.8)$$

Cette équation est clairement une équation de parabole.

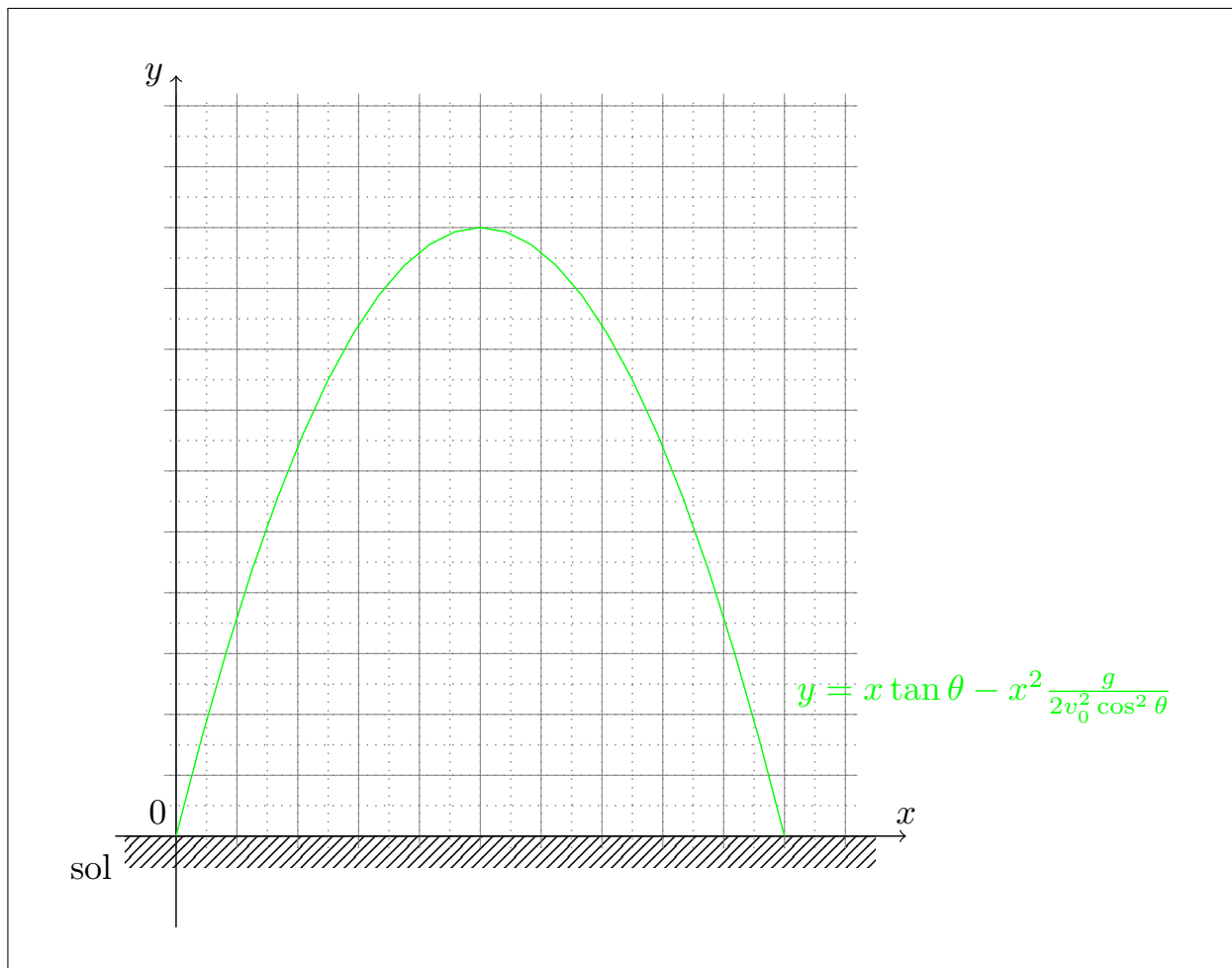


FIGURE 13.3 – La trajectoire du tir oblique est une parabole.

La trajectoire du mobile est parabolique dans le tir oblique.

A Hauteur maximale

On peut montrer que la hauteur maximale atteinte par le mobile est exprimée par l'équation suivante :

$$y_{\max} = \frac{v_0^2}{2g} \sin^2 \theta \quad (13.9)$$

Si le projectile est lancé à la verticale, alors θ vaut $\pi/2$ et la hauteur maximale "h" est

Définition 36 (Hauteur maximale h du tir oblique).

$$h = \frac{v_0^2}{2g} \quad (13.10)$$

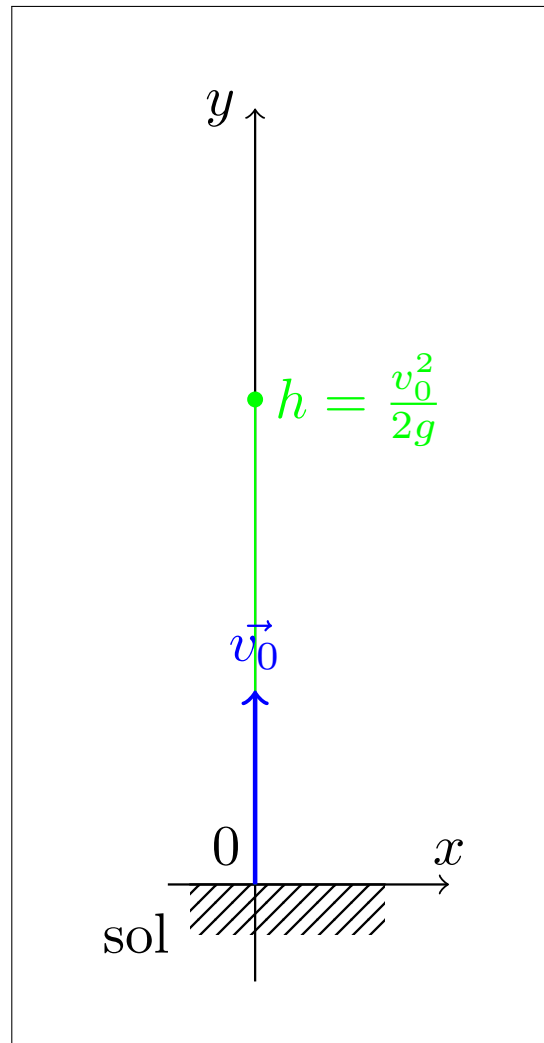


FIGURE 13.4 – La hauteur "h" est la hauteur maximale dans le tir oblique.

3 Portée

Déterminons maintenant le point de chute du mobile.

A En général

Le point de chute est un point de la trajectoire tel que $r_y(t) = 0$. Une solution triviale est le point de départ où $t = 0$, $r_y = 0$ et $r_x = 0$.

Il faut donc trouver un r_x qui sera la solution non triviale du système d'équation :

$$\begin{cases} r_x(t) = v_0 \cos \theta \cdot t \\ 0 = v_0 \sin \theta \cdot t - 1/2 g t^2 \end{cases} \quad (13.11)$$

Utilisons l'équation 13.8 (page 114) de la trajectoire. Ceci implique de résoudre l'équation

$$0 = x \tan \theta - x^2 \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta} \quad (13.12)$$

Celle-ci se factorise facilement.

$$0 = x \left(x \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta} - \tan \theta \right) \quad (13.13)$$

Si on élimine la solution triviale en $x = 0$, il reste :

$$x \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta} = \tan \theta \quad (13.14)$$

On obtient donc :

$$x = \frac{2 \sin \theta \cos \theta v_0^2}{g} \quad (13.15)$$

si on se souvient que $2 \sin \theta \cos \theta = \sin 2\theta$, il vient alors :

Définition 37 (Portée du tir oblique).

$$R = \sin 2\theta \frac{v_0^2}{g} \quad (13.16)$$

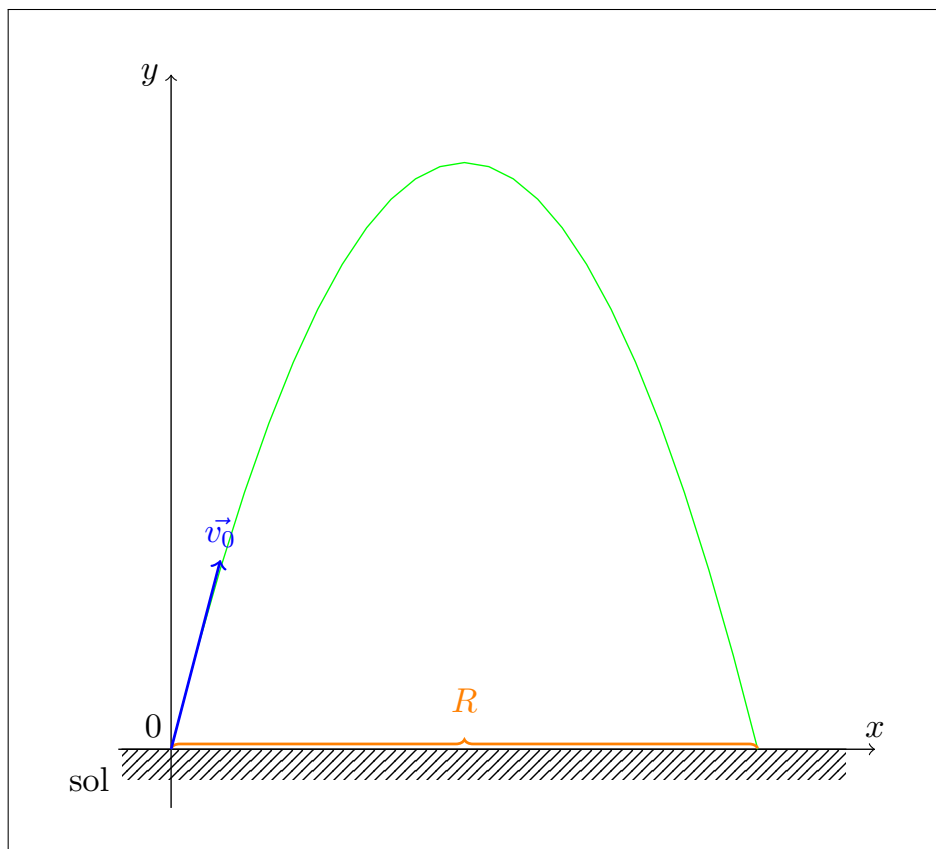


FIGURE 13.5 – La portée dans le tir oblique.

B Portée maximale

Nous venons de trouver la solution si l'angle " θ " est quelconque.

On peut se demander s'il n'existe pas, pour un v_0 donné, un angle " θ " tel que la portée est maximale.

La question précédente se ramène donc à chercher un angle " θ " tel que " $\sin 2\theta$ " est maximum.

Le bon sens nous dit qu'il faut un angle " θ " tel que $\sin 2\theta = 1$.

L'angle " θ " est donc égal à $\pi/4$ ou 45° .

Définition 38 (Portée maximale du tir oblique).

$$R_{\max} = \frac{v_0^2}{g} = 2h \quad (13.17)$$

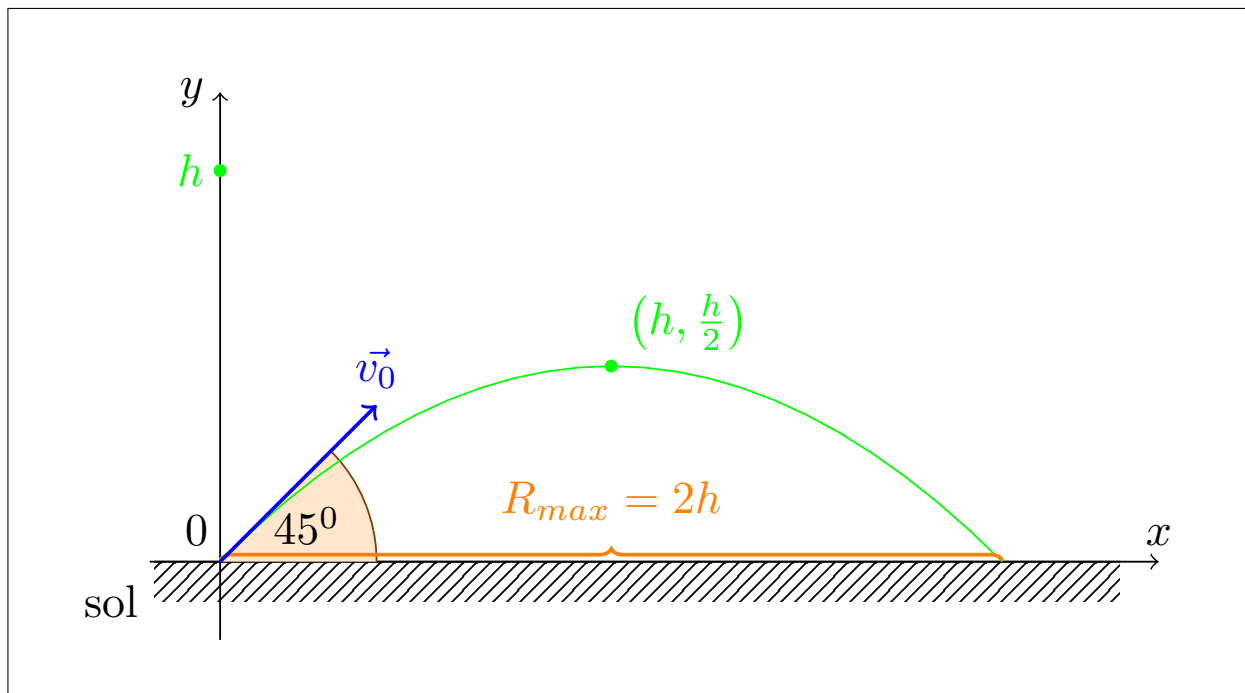


FIGURE 13.6 – La portée maximale dans le tir oblique.

a) Optimisation

La solution précédente peut aussi se trouver en cherchant le maximum de $\sin 2\theta \frac{v_0^2}{g}$ et donc dérivant l'expression précédente en θ . La valeur où la dérivée s'annule sera un optimum.

4 Autres

A Vitesse en fonction de l'altitude

$$v_y(r_y) = \sqrt{v_0^2 \sin^2 \theta - 2g(r_y - r_{y0})} \quad (13.18)$$

B Angles

L'angle d'impact en tout point de la trajectoire est donné par le vecteur vitesse.

C \vec{a}_n, \vec{a}_{tan}

En combinant le fait que l'accélération g est constante en norme et en direction avec le point précédent, il est possible de déterminer les accélérations normales et tangentielles.

5 Cibles

Il faut étudier le cas où il faut atteindre une cible ne se trouvant pas à la même altitude que le point de départ du mobile.

Les exemples typiques sont le panier du ballon de basketball ou un canon devant atteindre une cible sur une colline.



FIGURE 13.7 – La cible dans le tir oblique.

Traitons le cas du ballon de basket.

D'après les règles du basketball, l'anneau du panier doit se trouver à 3,05m de haut (disons 3 mètres pour simplifier les choses).

Toujours pour simplifier les choses disons que le joueur lance le ballon depuis une hauteur de 2 mètres et qu'il est à 3 mètres de distance du panier.

Si la vitesse v_0 à laquelle le joueur lance le ballon est fixe, le joueur doit modifier son angle de lancer pour atteindre le panier.

A Équations générales

Essayons de traiter le problème en toute généralité.

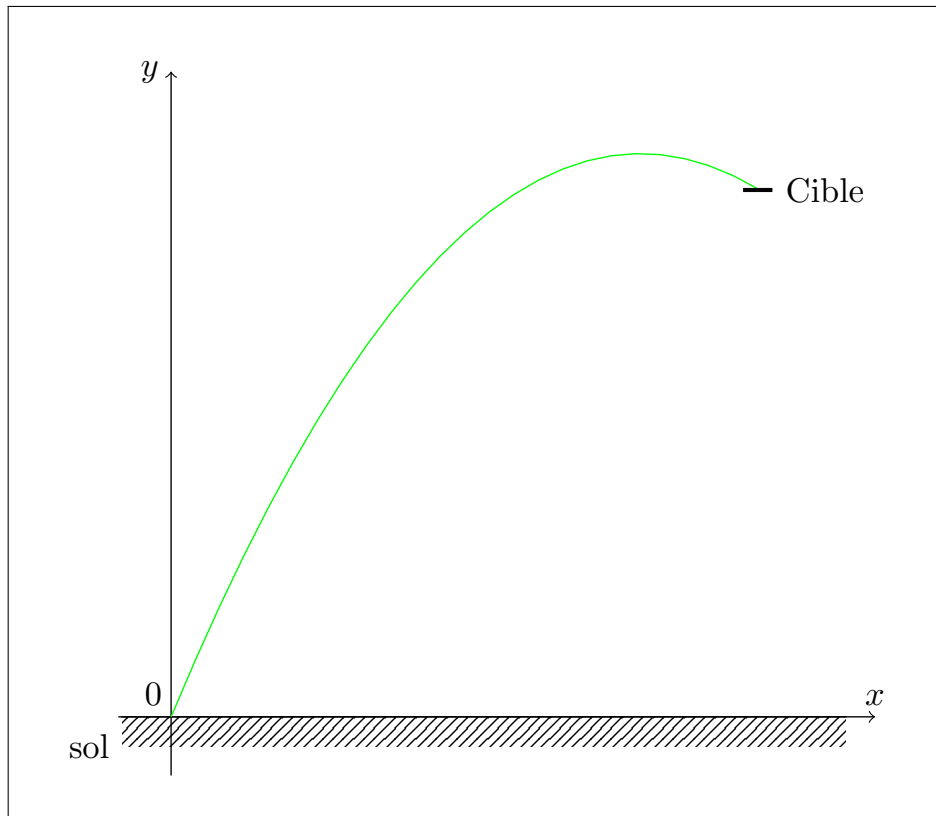


FIGURE 13.8 – La position de la cible, cas général dans le tir oblique.

La cible est donc à une position (r_{xf}, r_{yf}) .²

À nouveau simplifions quelque peu les notations : r_{xf} et r_{yf} deviendront respectivement x_f et y_f .

Il faut substituer x_f et y_f dans l'équation 13.8 (page 114).

$$y_f = x_f \tan \theta - x_f^2 \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta} \quad (13.19)$$

Supposons que v_0 soit fixée et essayons de déterminer l'angle θ qui nous permettra d'atteindre la cible.

$$y_f = x_f \tan \theta - x_f^2 \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta} \quad (13.20)$$

Si on se souvient que $1 + \tan^2 \theta = \frac{1}{\cos^2 \theta}$, il vient :

$$y_f = x_f \tan \theta - x_f^2 \frac{g}{2v_0^2} (1 + \tan^2 \theta) \quad (13.21)$$

Nous avons vu dans l'équation 13.10 (p. 115) que

$h = \frac{v_0^2}{2g}$ où h est la hauteur maximale que le projectile peut atteindre. Si nous utilisons cette égalité, il vient :

$$y_f = x_f \tan \theta - x_f^2 \frac{1}{4h} (1 + \tan^2 \theta) \quad (13.22)$$

Transformons cette équation où l'inconnue est désormais " $\tan \theta$ ".

2. r_{xf} et r_{yf} car il s'agira de la position finale du mobile!

$$x_f \tan \theta - x_f^2 \frac{1}{4h} \tan^2 \theta - \left(y_f + x_f^2 \frac{1}{4h} \right) = 0 \quad (13.23)$$

$$x_f^2 \frac{1}{4h} \tan^2 \theta - x_f \tan \theta + \left(y_f + x_f^2 \frac{1}{4h} \right) = 0 \quad (13.24)$$

Nous avons obtenu une équation du second degré en $\tan \theta$

$$A \tan^2 \theta + B \tan \theta + C = 0 \quad (13.25)$$

dont les coefficients sont respectivement

$$\begin{cases} A = \frac{x_f^2}{4h} \\ B = -x_f \\ C = y_f + \frac{x_f^2}{4h} \end{cases} \quad (13.26)$$

a) Solutions de l'équation du second degré

Les solutions \tan_1 et \tan_2 de cette équation du second degré se déterminent comme à l'habitude!

(i) Le discriminant

Il faut tout d'abord discuter l'existence de solutions!

Δ (ou ρ) vaut $B^2 - 4AC$

C'est-à-dire ici :

$$\Delta = x_f^2 - 4x_f^2 \frac{1}{4h} \left(y_f + x_f^2 \frac{1}{4h} \right) \quad (13.27)$$

$$\Delta = x_f^2 - \frac{x_f^2}{h} \left(y_f + \frac{x_f^2}{4h} \right) \quad (13.28)$$

(ii) Discriminant nul ou la parabole de sûreté

Étudions le cas limite où le discriminant est nul et où il n'y a donc qu'une seule solution.

$$\Delta = 0 = x_f^2 - \frac{x_f^2}{h} \left(y_f + \frac{x_f^2}{4h} \right) \quad (13.29)$$

Cette expression peut se simplifier et donner :

Définition 39 (Parabole de sûreté).

$$y_f = h - \frac{x_f^2}{4h} \quad (13.30)$$

Cette expression est appelée la parabole de sûreté. Cette parabole englobe toutes les trajectoires possibles si l'on fait varier l'angle de tir pour une même vitesse initiale.

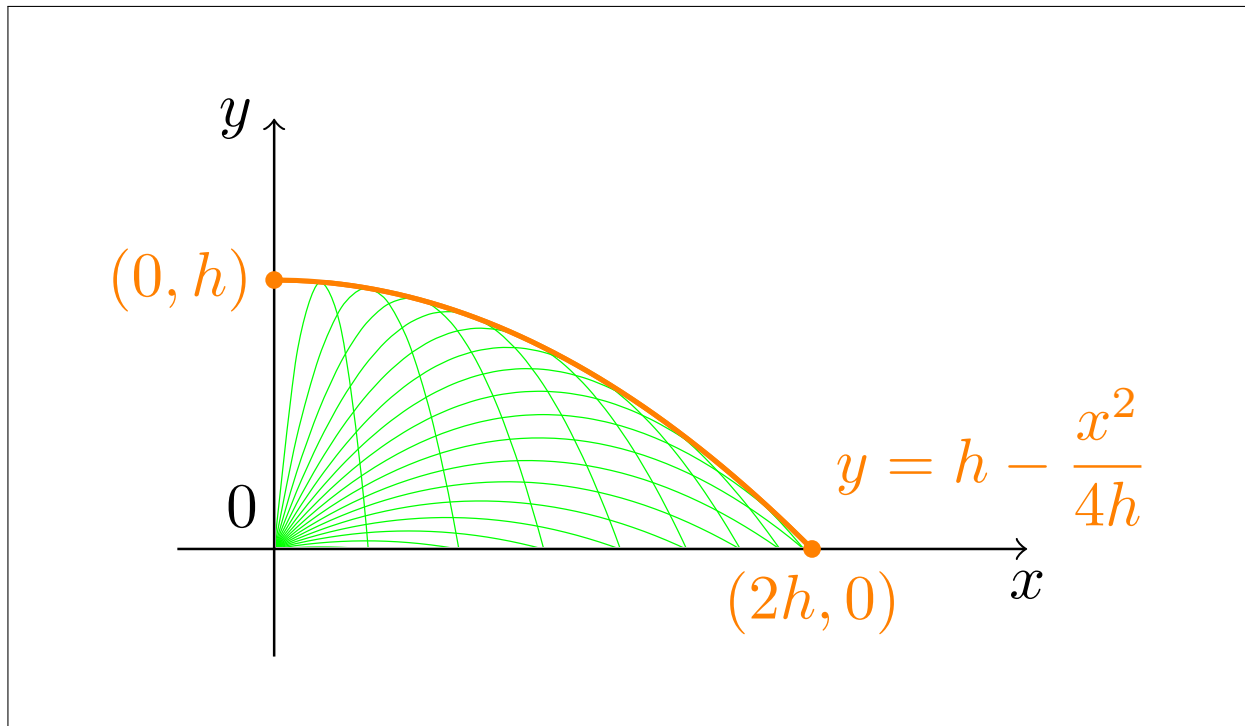


FIGURE 13.9 – La parabole de sûreté enveloppe les trajectoires possibles.

L'expression de la parabole de sûreté exprime la limite de la portée du projectile.

Si $x_f = 0$, alors $y_f = h$.

Et si $x_f = 2h$, alors $y_f = 0$ et on retrouve la portée maximale horizontale.

Pour atteindre un point sur cette parabole de sûreté, il faut résoudre l'équation trigonométrique où $\tan \theta_0 = \frac{-b}{2a}$, c'est-à-dire :

$$\tan \theta_0 = \frac{x_f}{2 \frac{x_f^2}{4h}} \quad (13.31)$$

$$\tan \theta_0 = \frac{2h}{x_f} \quad (13.32)$$

Et donc l'angle θ_0 devra être :

$$\theta_0 = \arctan \frac{2h}{x_f} \quad (13.33)$$

Remarquons que le croquis de Léonard de Vinci vu au chapitre "Tir Horizontal" reproduit notre parabole de sécurité.

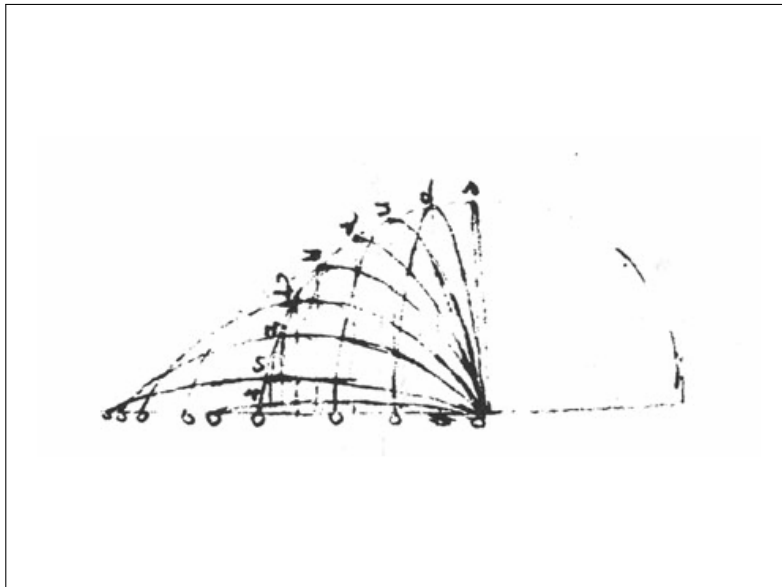


FIGURE 13.10 – La parabole de sûreté de Léonard de Vinci.

Les sommets des trajectoires sont sur une même ellipse et c'est ce qu'indique Léonard de Vinci dans son croquis. Cette propriété géométrique permet d'affirmer que de Vinci avait une vision théorique correcte de la trajectoire.

C'est un autre italien, Torricelli, qui a découvert la parabole de sûreté. Mais il fût la risée des canonniers de l'époque car il ne savait pas expliquer l'asymétrie de la trajectoire réelle. Pourtant, pour pouvoir appliquer la théorie des frottements, il faut tout d'abord passer par cette vision théorique sans frottement.

(iii) Trop loin!

Si le discriminant est négatif,

$$h - \frac{x_f^2}{4h} - y_f < 0 \quad (13.34)$$

alors la cible n'est pas atteignable.

Cette condition peut aussi s'écrire

$$h < y_f + \frac{x_f^2}{4h} \quad (13.35)$$

où, rappelons-le, $h = \frac{v_0^2}{2g}$.

$$\frac{v_0^2}{2g} < y_f + \frac{g x_f^2}{2v_0^2} \quad (13.36)$$

(iv) Deux solutions

Si le discriminant est strictement positif,

$$h - \frac{x_f^2}{4h} - y_f > 0 \quad (13.37)$$

et si nous nous souvenons que $a = \frac{x_f^2}{4h}$, $b = -x_f$ et $c = y_f + \frac{x_f^2}{4h}$, alors les solutions \tan_1 et \tan_2 sont

$$\begin{cases} \tan_1 = \frac{x_f - \sqrt{h - \frac{x_f^2}{4h} - y_f}}{\frac{x_f^2}{2 \cdot \frac{1}{4h}}} \\ \tan_2 = \frac{x_f + \sqrt{h - \frac{x_f^2}{4h} - y_f}}{\frac{x_f^2}{2 \cdot \frac{1}{4h}}} \end{cases} \quad (13.38)$$

Ces solutions peuvent aussi s'écrire

$$\begin{cases} \tan_1 = \frac{2h \left(x_f - \sqrt{h - \frac{x_f^2}{4h} - y_f} \right)}{x_f^2} \\ \tan_2 = \frac{2h \left(x_f + \sqrt{h - \frac{x_f^2}{4h} - y_f} \right)}{x_f^2} \end{cases} \quad (13.39)$$

Il faut calculer la fonction inverse pour trouver la valeur des angles " θ_1 " et " θ_2 ".

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan \frac{2h \left(x_f - \sqrt{h - \frac{x_f^2}{4h} - y_f} \right)}{x_f^2} \\ \theta_2 = \arctan \frac{2h \left(x_f + \sqrt{h - \frac{x_f^2}{4h} - y_f} \right)}{x_f^2} \end{cases} \quad (13.40)$$

B De haut, c'est plus beau : la citadelle

Si le lancer se fait en hauteur par rapport à la cible, la portée sera plus grande.

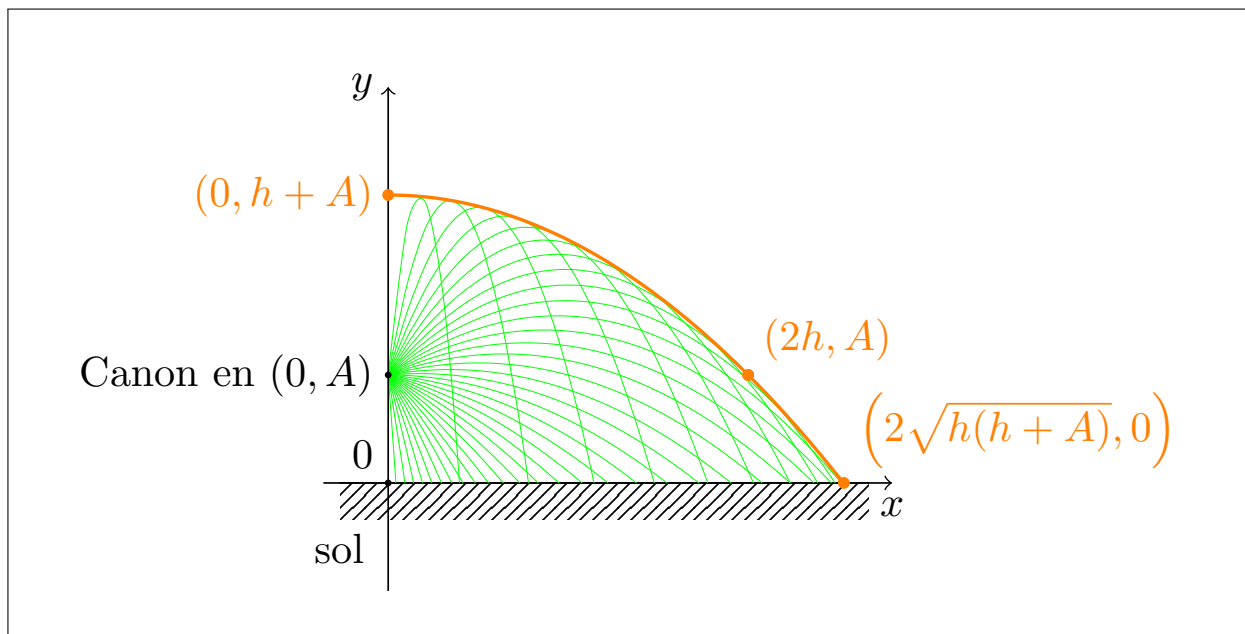


FIGURE 13.11 – La cible est dans la plaine, le canon en hauteur.

Soit " A " la hauteur de la "citadelle" par rapport à la plaine où se trouve la cible.

Si on considère la portée maximale du canon, la cible doit se trouver sur la parabole de sûreté.

$$y_f = h - \frac{x_f^2}{4h} \quad (13.41)$$

Comme la cible est en contrebas, son ordonnée est négative.

$$y_f = -A \quad (13.42)$$

La relation entre l'ordonnée et l'abscisse de la cible " x_f " devient alors

$$-A = h - \frac{x_f^2}{4h} \quad (13.43)$$

et donc la portée horizontale est

$$x_f = 2\sqrt{h(h+A)} \quad (13.44)$$

Traçons la ligne directe entre le canon et la cible et cherchons sa longueur " d ". Cette longueur " d " sera l'hypoténuse d'un triangle rectangle dont les longueurs des côtés seront " A " et " x_f ". Par le théorème de Pythagore, nous avons donc que la distance entre la citadelle et la cible sera :

$$d = 2h + A \quad (13.45)$$

a) Cible en hauteur

Les assaillants, s'ils disposent de la même puissance de feu, devront être plus proches. Faisons le même raisonnement avec la cible en hauteur.

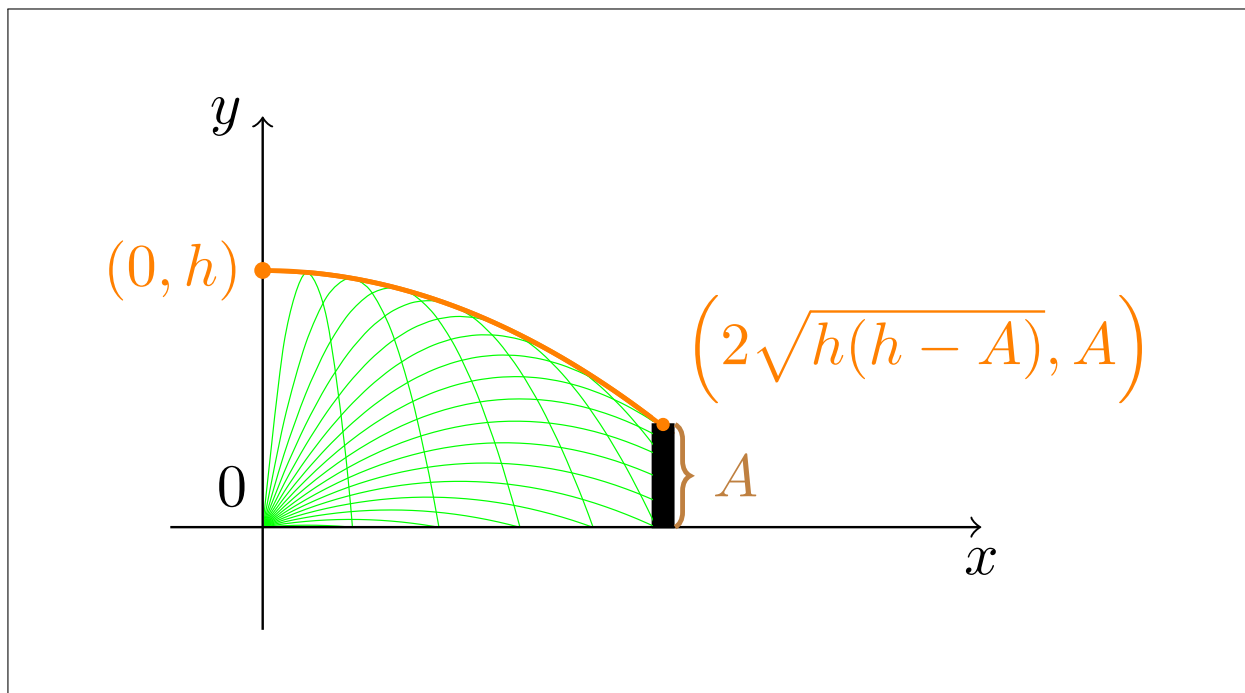


FIGURE 13.12 – La cible est en hauteur.

Leur portée horizontale sera

$$x_f = 2\sqrt{h(h-A)} \quad (13.46)$$

Et la distance entre la citadelle et leurs canons sera :

$$d = 2h - A \quad (13.47)$$

6 Avec les frottements

Dans tous les raisonnements effectués ici les frottements ont été négligés. S'il faut en tenir compte, les équations horaires deviennent beaucoup plus lourdes et il devient très difficile³ d'éliminer le temps pour obtenir une équation de trajectoire indépendante du temps. On doit se contenter des équations horaires qui sont alors des équations paramétriques en "t" et utiliser des méthodes numériques pour estimer la trajectoire. Ceci demande de la "puissance de calcul" sur ordinateur.

7 Exercices

- Depuis une fenêtre à 3 m de haut, on lance trois fois de suite une même balle avec une même vitesse de 2 m s^{-1} .
Pour chaque cas, déterminez le temps nécessaire pour que la balle arrive au sol.
 - La première fois, on lance la balle vers le bas,
0,6 s
 - la deuxième vers l'avant,
0,77 s
 - la troisième fois vers le haut.
1 s
- Un obus est lancé à l'horizontale avec une vitesse de 350 m s^{-1} depuis le sommet d'une falaise de 90 m de haut.
 - Après combien de temps arrive t' il au sol?
4,3 s
 - À quelle distance du pied de la falaise se situera l'impact ?
1500 m
 - Avec quelle vitesse frappe t' il le sol ?
 353 m s^{-1}
 - Quelle est l'équation de la trajectoire ?
 $y = 90 - 0,00004x^2$
- On lance un projectile avec une vitesse de 300 m s^{-1} . La direction du lancer est de 30° avec l'horizontale.
 - A quelle distance du point de départ le projectile retombe t' il au sol ?
7794,21 m
 - Jusqu'à quelle altitude l'objet est il monté ?
1125 m
 - Quelle est l'équation de la trajectoire ?
 $y = 0,58x - 0,00007x^2$
- Quelle est l'inclinaison qu'il faut donner à d'un canon qui lance un obus avec une vitesse de 400 m s^{-1} si la cible est 5000 m plus loin ?
 9°
- Un singe en peluche (Nous avons eu quelques réclamations suite au traitement infligé à Cheeta!) est à 1 m de haut et à 1,5 m d'un fusil à fléchette pointant vers l'animal. La vitesse

3. Voire même impossible!

de ma fléchette est de 10 ms^{-1} . Un système automatique libère la peluche qui chute alors dès l'instant du départ de la fléchette.

La fléchette va-t-elle atteindre sa cible? (Justifiez.)

Oui

6. On fait lancer une balle dans un anneau situé 7 m du lanceur et 1 m au dessus du point de départ de la balle. La balle monte, passe dans l'anneau et commence alors à descendre.

Quelles étaient la vitesse initiale et l'angle de tir de la balle?

$$\alpha = 15,93^\circ, v_0 = 16,28 \text{ ms}^{-1}$$

7. On lance un objet avec une vitesse de 54 km h^{-1} . Peut-on atteindre un objet qui est à 3 m de haut et situé à 20 m à l'horizontale du lanceur? Justifiez

NON

Chapitre 14

Mouvements à trois dimensions

Sommaire

1	Coordonnées et vecteurs dans \mathbb{R}^3	130
2	Équations paramétriques	130
	A Équations de droites	130
	B Généralisation	130
3	Exemples	131
	A Exemples généraux	131
	B Mécanique céleste	133

Introduction

Nous avons décrit des mouvements :

- rectilignes, c'est à dire à une dimension (MRU, MRUA),
- dans le plan, c'est-à-dire à deux dimensions (MCU, MCUA, tir horizontal, tir oblique).

Mais les mouvements que nous connaissons au quotidien se déroulent dans un espace euclidien à trois dimensions.

Nous nous limiterons à quelques exemples. Nous allons discuter ici de la manière de les décrire en mécanique.

1 Coordonnées et vecteurs dans \mathbb{R}^3

Considérons le cas d'un système de référence cartésien dans \mathbb{R}^3 .

Les coordonnées d'un point P quelconque dans ce système seront (P_x, P_y, P_z) .

De même, tout vecteur flottant \overrightarrow{AB} peut être vu comme le représentant d'un vecteur \overrightarrow{OP} partant de l'origine O du système et se terminant en un point P . Si les \overrightarrow{AB} et \overrightarrow{OP} sont de même direction, de même sens et de même norme, ils seront donc bien deux vecteurs égaux.

Les coordonnées du point P détermineront le vecteur \overrightarrow{OP} .

$$\overrightarrow{OP} \equiv \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} \quad (14.1)$$

2 Équations paramétriques

Nous avons vu que, dans le plan, la trajectoire pouvait être écrite comme une équation cartésienne indépendante du temps.

Dans l'espace, une équation décrit un plan ou, de manière plus générale, une surface. Pour décrire une courbe, on peut utiliser *des* équations *paramétriques* mais plus une "simple" équation.

A Équations de droites

Pour avoir une représentation des droites dans l'espace, on peut avoir recours à des vecteurs.

Nous nous limiterons à cette méthode de représentation des droites.

Une droite sera représentée par la somme d'un vecteur partant de l'origine jusqu'à un point P de la droite et d'un autre vecteur \overrightarrow{PQ} reliant deux points de la droite. Un paramètre t (ou λ ou m ou ...) multiplie le vecteur de la droite. En faisant varier ce paramètre on pourra atteindre tous les points S de la droite.

$$\overrightarrow{OS} = \overrightarrow{OP} + t\overrightarrow{PQ} \quad (14.2)$$

En mathématique, on parle de la "méthode des vecteurs directeurs".

B Généralisation

Pour décrire la position instantanée d'un point P par son vecteur position $\vec{r}(t) = \overrightarrow{OP}$, on donnera donc les composantes en x , y et z . Ces composantes seront des fonctions de t .

$$\vec{r}(t) \equiv \begin{cases} r_x(t) = f_1(t) \\ r_y(t) = f_2(t) \\ r_z(t) = f_3(t) \end{cases} \quad (14.3)$$

3 Exemples

Nous illustrons ici notre propos par quelques exemples. Une figure illustre un mouvement et nous indiquons des équations correspondantes.

A Exemples généraux

a) Mouvement hélicoïdal simple

$$\begin{cases} r_x(t) = R \cos(\omega t) \\ r_y(t) = R \sin(\omega t) \\ r_z(t) = kt \end{cases} \quad (14.4)$$

où

— ω , k et R sont des constantes.

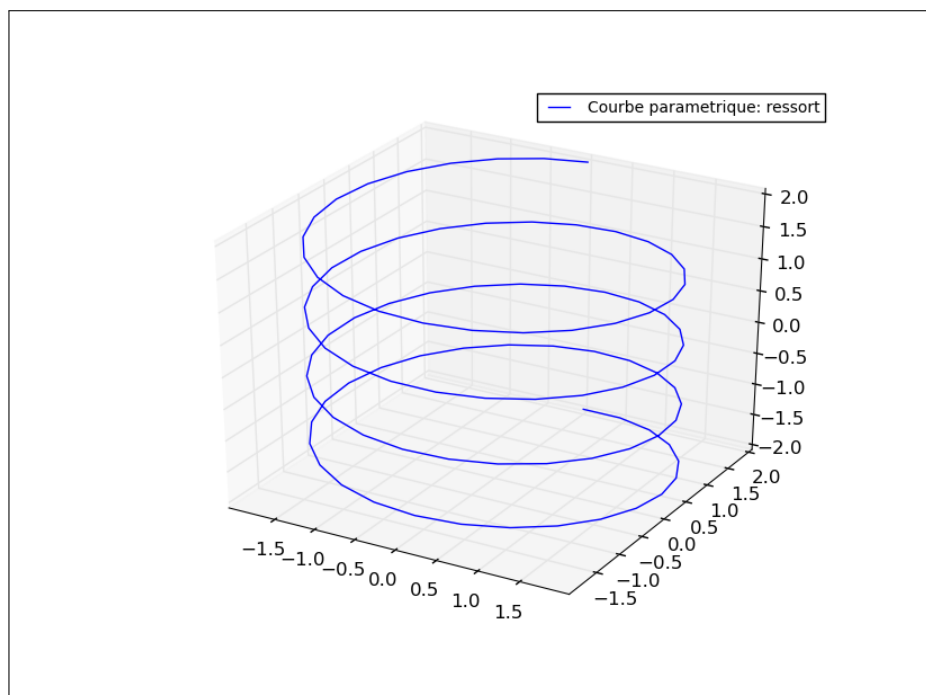


FIGURE 14.1 – Mouvement hélicoïdal simple.

b) "Tornado"

$$\begin{cases} r_x(t) = R(t^2 + 1) \cos(\omega t) \\ r_y(t) = R(t^2 + 1) \sin(\omega t) \\ r_z(t) = kt \end{cases} \quad (14.5)$$

où

— ω , k et R sont des constantes.

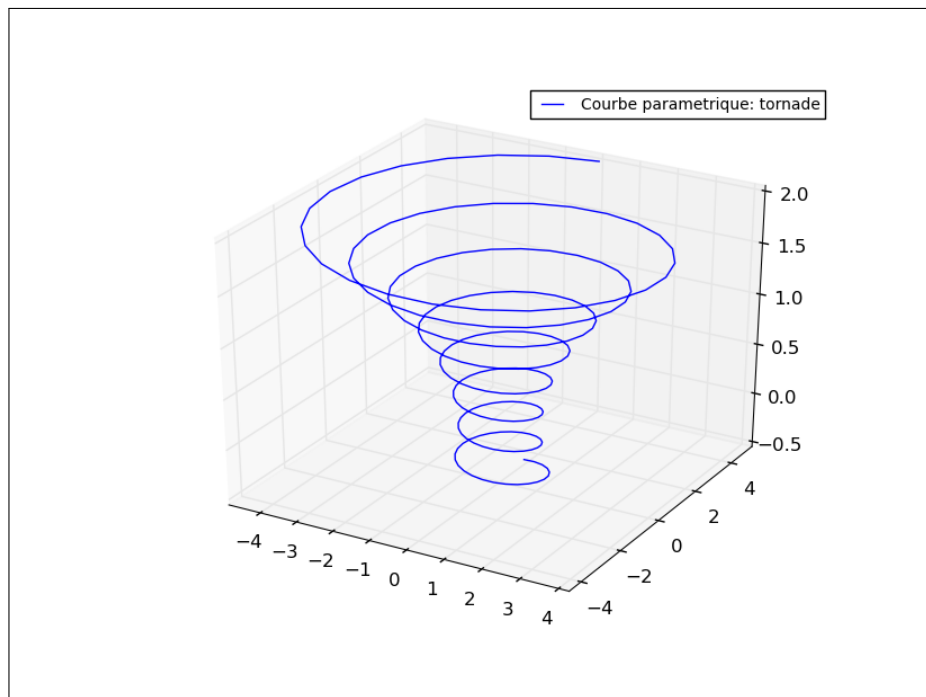


FIGURE 14.2 – Une tornade.

c) Spirale à la surface d'une sphère

$$\begin{cases} r_x(t) = R \sin(\theta t) \cos(\omega t) \\ r_y(t) = R \sin(\theta t) \sin(\omega t) \\ r_z(t) = k \cos(\theta t) \end{cases} \quad (14.6)$$

où

— ω , θ , k et R sont des constantes.

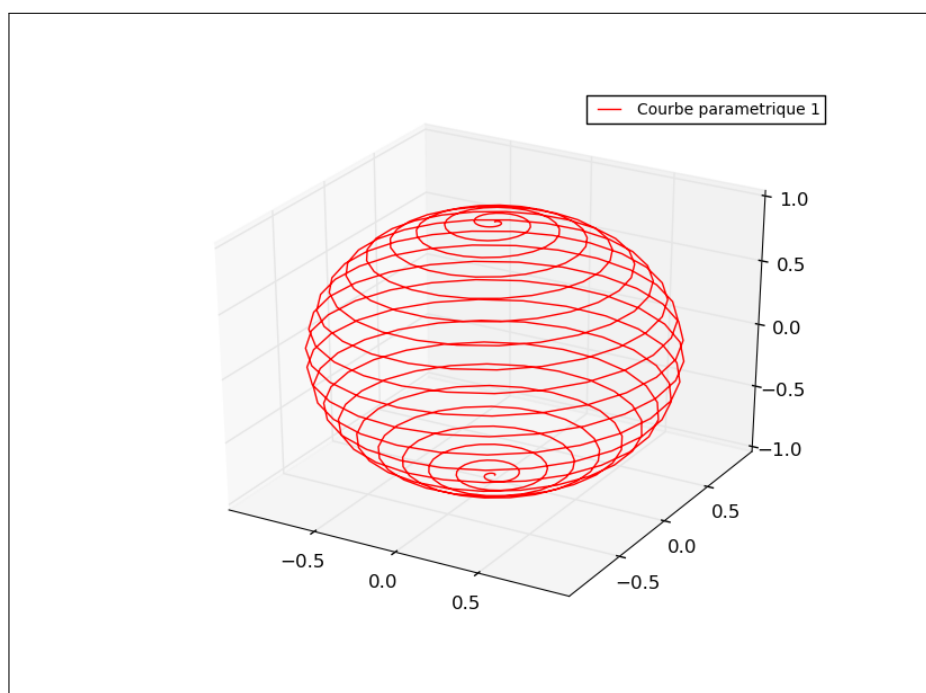


FIGURE 14.3 – Une spirale à la surface d'une sphère.

B Mécanique céleste

En mécanique céleste aussi les trajectoires des astres (et des objets lancés par l'homme dans l'espace) sont décrites par des courbes paramétriques.

Ainsi les orbites des planètes autour du Soleil sont des ellipses.

L'orbite de la Lune autour de la Terre est aussi une ellipse.

Mais ces deux ellipses ne sont pas dans un même plan. Le plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil s'appelle l'écliptique.

La paramétrisation de la rotation de la Terre sur elle-même (en tenant compte de l'angle que son axe de rotation fait avec le plan de l'écliptique) et la mise en équations de l'orbite de la Terre autour du soleil permettent d'expliquer la variation de la longueur du jour au cours de l'année.

Pour expliquer et prévoir les éclipses, ainsi que les lieux où elles seront observables sur Terre, il faut écrire les équations paramétriques de ces différents mouvements.

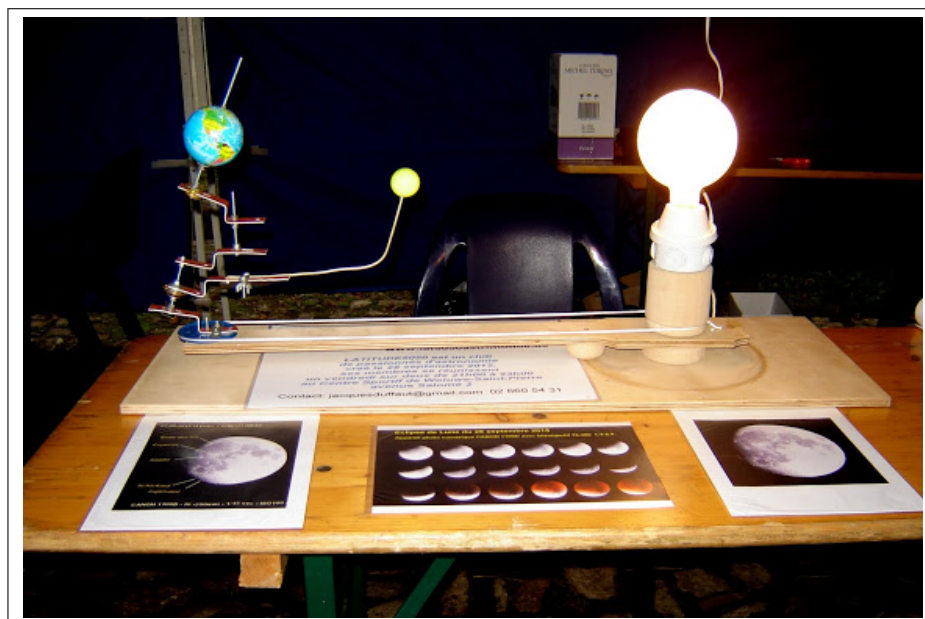


FIGURE 14.4 – Une maquette pour expliquer les éclipses.

Quatrième partie

Statique

Chapitre 15

Les forces

Sommaire

1	Définitions et caractéristiques	138
	A Mesure des forces	138
	B Loi des ressorts	138
2	La force de pesanteur	139
	A Les caractéristiques de la force de pesanteur	139
	B Différences entre masse et poids	140
3	Autres forces	140
	A Forces électrostatique	140
	B La force magnétique	141
	C La force électromagnétique	141
	D Les forces de frottement	141
	E Les forces fondamentales	141
4	Additions de forces	141
	A En pratique : Méthodes	141
5	Exercices	143

Introduction

Nous avons déjà fait connaissance avec les forces. Nous savons qu'elles peuvent s'équilibrer ou que si elles s'exercent sur une surface, il faut parler de pression.

1 Définitions et caractéristiques

Définition 40 (Force). Une force est toute cause capable de provoquer une déformation ou de modifier la trajectoire ou la vitesse d'un objet.

Elle caractérisée par :

- une direction : dans laquelle elle exerce ses effets (du point de vue des mathématiques, une direction est une famille de droites parallèles),
- un sens : 2 sens pour une direction,
- un point d'application : où s'applique la force (nous devons garder à l'esprit le point de vue des mathématiques où un vecteur peut avoir de multiple représentants),
- une intensité : qui exprime la grandeur.

Unité : L'unité d'intensité pour la force est le *newton* (N), qui correspond à l'intensité avec laquelle la Terre attire un corps de masse d'environ 101,9 g.

Une force est une grandeur physique orientée, on la **représente** par un vecteur, le vecteur \vec{F} .

- Son origine est le point d'application de la force.
- La direction est indiquée par son inclinaison.
- Le sens est indiqué par la pointe de la flèche.
- L'intensité de la force est indiquée par la longueur du vecteur.

Remarque : On notera une force sous forme vectorielle \vec{F} ou scalaire F selon les besoins.

A Mesure des forces

L'**instrument de mesure** des forces est le dynamomètre, basé sur la déformation d'un ressort.

B Loi des ressorts

La mesure des forces est basée sur la loi de Hooke. Nous nous limiterons à sa version concernant les ressorts. Les forces seront toujours dans l'axe des ressorts. Tous les cas envisagés ici seront donc à une dimension. Nous pourrions donc éventuellement écrire les forces sans la "flèche" des vecteurs.

Loi 1 (de Hooke). Si une force extérieure F_{ext} est exercée sur un ressort, celui va se déformer et, à l'équilibre, exercer une force intérieure F_{int} égale et opposée à cette déformation causée par la force extérieure.

Ces deux forces seront proportionnelles à la déformation et dépendront en grandeur de la géométrie et du matériau du ressort.

$$F_{ext} = k \cdot \delta l \quad (15.1)$$

où

- F_{ext} = la force extérieure à mesurer (N),
- k = la constante de raideur du ressort (dépend de la géométrie et du matériau du ressort) (Nm^{-1}),
- $\delta l = l_F - l_0$ = la déformation du ressort (m)
 - l_0 = longueur du ressort au repos (m)
 - l_F = longueur du ressort déformé (m)

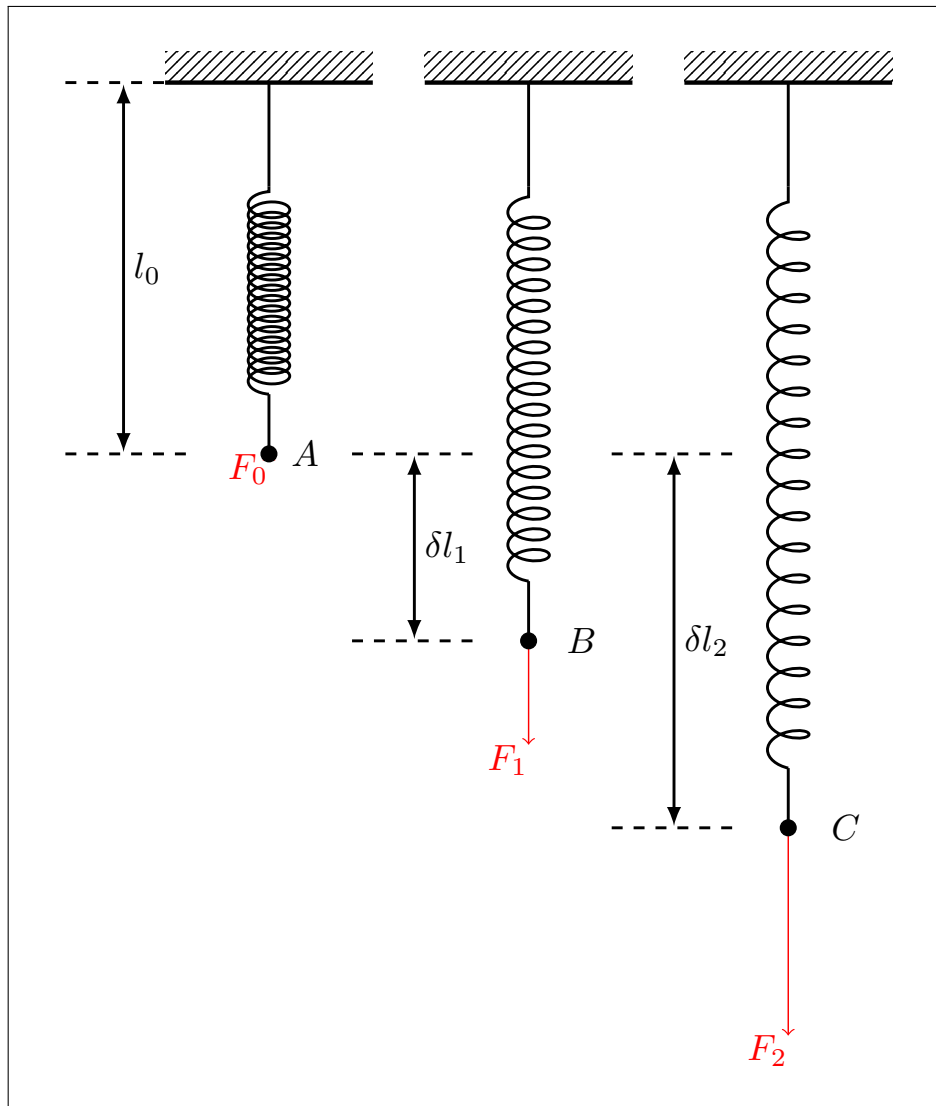


FIGURE 15.1 – La loi des ressorts : $F_0 = 0$ et $F_1/\delta l_1 = F_2/\delta l_2$.

2 La force de pesanteur

On appelle le **poinds** d'un corps, la force qui attire le corps vers le centre de la terre.

A Les caractéristiques de la force de pesanteur

Les caractéristiques de la force de pesanteur sont :

- direction : verticale (toutes les verticales convergent au centre de la terre),
- sens : vers le centre de la terre,
- point d'application : le centre de gravité du corps,
- intensité : le poids du corps.

Remarque : le poids du corps varie en fonction de la **masse** du corps et de la **distance** qui le sépare du centre de la terre.

Nous représenterons le vecteur force-poids par la lettre " \vec{G} "

B Différences entre masse et poids

Masse	Poids
~ à la qté. de matière	Force avec laquelle le corps est attiré par la planète
grandeur scalaire	grandeur vectorielle
grandeur constante	grandeur variable
unité = kg	Newton
instrument de mesure : la balance	le dynamomètre

Un corps de masse 1 kg pèse

- 274 N sur le Soleil
- 1,6 N sur la Lune
- 11 N sur Saturne
- 9,81 sur Terre
- 3,5 N sur Mercure

Le **poids** d'un corps dépend de sa **masse** et de l'**astre** (planète, lune, étoile) où il se trouve. La Terre attire un corps d'**1 kg de masse** avec une force de **9,81 N**.

Tableau à compléter :

.	Terre	Lune	Mars	Jupiter
Le corps est	6X + lourd que sur la lune	6X + léger que sur Terre	2X + lourd que sur la Lune	2,6X + lourd que sur la Terre
			3X + léger que sur Terre	
poids (N)	1000 N	166,6 N	333,3 N	2600 N
masse (kg)	101,9 kg	101,9 kg	101,9 kg	101,9 kg

3 Autres forces

A Forces électrostatique

Faisons quelques expériences rapides en frottant verre, ambre et plastique avec des fibres diverses (soie, laine, peau de chat ...).

Nous pouvons alors attirer des petits morceaux de papier, faire dévier un filet d'eau, ...

Nous voyons que dans certains cas, il y a attraction, dans d'autre répulsion.

a) Note historique

Les grecs signalaient déjà l'existence de forces électrostatiques sans les comprendre.

elektron = ambre

b) A retenir

- Les charges électriques sont de 2 espèces :
 - * soit positives : verre frotté avec un drap,
 - * soit négatives : plastique ou ambre frotté avec une peau ou de la laine.
- Les charges électriques exercent des forces entre elles :

- * Si les charges sont de même signe, elles se repoussent.
- * Si les charges sont de signes opposés, elles s'attirent.
- Un corps initialement neutre, amené au contact d'un corps électrisé prend une charge de même signe que celle de ce corps.
- Les charges portées par les corps électrisés ont leur origine dans les atomes : un atome peut céder ou recevoir des électrons.
 - * S'il en cède, il se charge positivement.
 - * S'il en acquiert, il se charge négativement.
- Dans un isolant, les électrons circulent difficilement. Dans un conducteur au contraire, ils circulent facilement.
- Un isolant comme l'ébonite, le plastique, le verre ou l'ambre, s'il est frotté, s'électrise. C'est-à-dire que l'on fait apparaître des charges électriques sur les parties frottées.
- Un conducteur ne peut être électrisé que s'il est tenu par un isolant.

B La force magnétique

Les aimants peuvent aussi s'attirer ou se repousser selon le pôle :

- Il existe des pôles sud et nord ;
 - les pôles opposés s'attirent. Les pôles identiques se repoussent.
- Il s'agit ici des forces magnétiques (magnétostatiques exactement).

C La force électromagnétique

Les forces électriques et magnétiques sont une seule et même chose : la force électromagnétique. C'est cette force qui nous permet d'expliquer le fonctionnement des moteurs électriques, des génératrices mais aussi les aurores boréales ou les transmissions radios.

D Les forces de frottement

Nous connaissons tous les frottements. Dans un bon vélo, dans une voiture et dans tous les moteurs en général, on cherche à les éliminer. Ces forces, omniprésentes, sont de nature chimique. C'est à dire qu'elles découlent aussi des forces électromagnétiques.

E Les forces fondamentales

Toutes les forces que nous connaissons dérivent de la gravité, de la force électromagnétique, de la force faible et de la force forte. Ces deux dernières agissent au niveau subatomique (noyau, particules élémentaires ...) et nous n'en parlerons pas ici.

4 Additions de forces

On parle aussi de composition de forces. Comme les forces sont des grandeurs vectorielles, les règles d'addition des vecteurs sont applicables.

A En pratique : Méthodes

Les deux premières méthodes sont purement graphiques.

a) Le parallélogramme de forces

Si le nombre de forces à additionner est petit (idéalement seulement 2), on peut utiliser la méthode dite du "parallélogramme".

Les deux forces sont placées avec un point de départ commun. Ce point de départ sera aussi le point de départ du vecteur résultant. On trace alors les parallèles aux deux forces passant par leur extrémités.

Le point d'intersection des deux parallèles est choisi comme point d'arrivée du vecteur résultant.

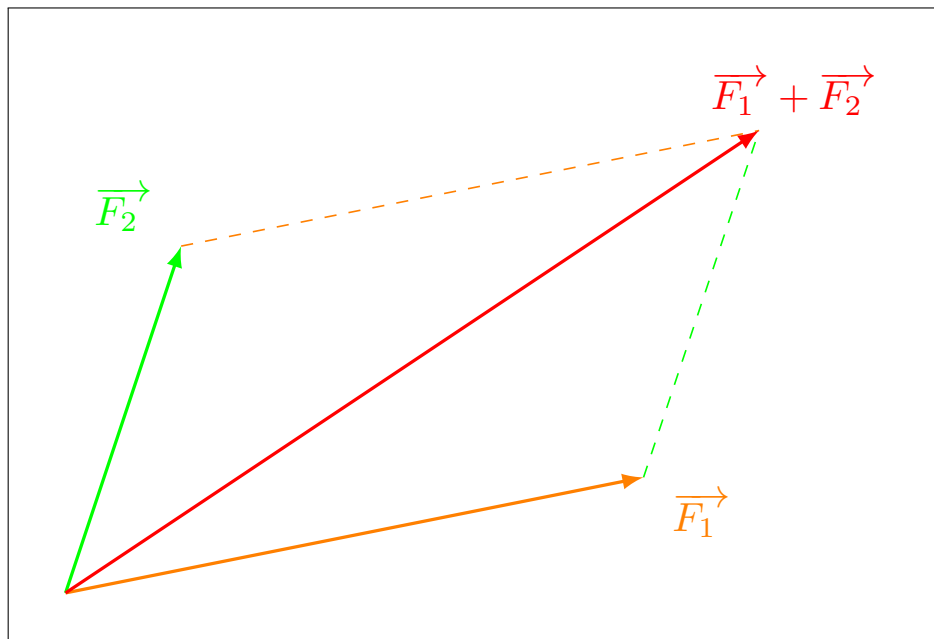


FIGURE 15.2 – La méthode du parallélogramme de forces.

Le vecteur résultant est donc une diagonale du parallélogramme.

b) Le polygone des forces

Dès que le nombre de forces augmente, il vaut mieux utiliser la méthode dite du "polygone des forces". En terme d'algèbre vectorielle, ceci doit vous rappeler la loi de Chasles. Nous exploitons le fait que les forces sont des vecteurs "représentants" de vecteurs libres qui peuvent être placés à volonté par translation.

Le point de départ de chaque vecteur successif est placé au point d'arrivée du précédent. En reliant le point de départ du premier vecteur au point d'arrivée du dernier vecteur, on représente le vecteur résultant de la somme de toutes les forces en jeu.

Comme l'addition des vecteurs est commutative, l'ordre n'est pas important.

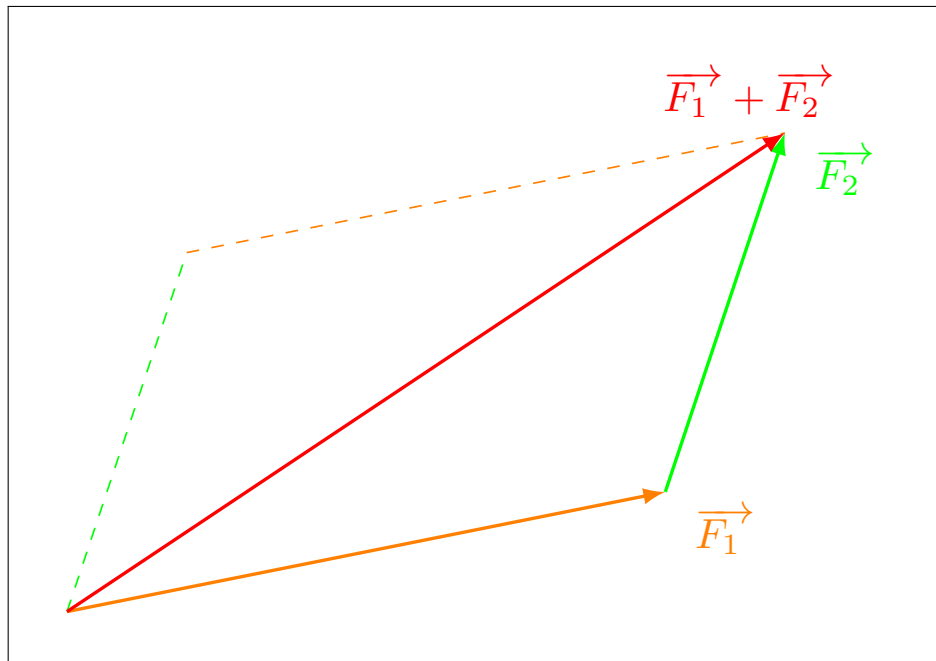


FIGURE 15.3 – La méthode du polygone de forces.

c) Composantes

Si, dans un repère (que nous prendrons orthonormé mais ce n'est pas obligatoire), les coordonnées des vecteurs sont connues, il suffit d'additionner les coordonnées dans chacune des directions de l'espace.

5 Exercices

Chapitre 16

Les forces : équilibres de translation

Sommaire

1	Énoncé du principe	146
2	En pratique : Méthodes	146
	A Parallélogramme	146
	B Polygone	147
	C Composantes	147
	D Exemples	148
3	La résistance	148
4	Le plan incliné	148
	A Caveat	148
	B Identifier les forces en présence	148
	C Déterminer les forces en présence	149
	D Point de vue analytique	150
	E Marche à suivre	150
5	Exercices	151

Introduction

Nous allons étudier la condition d'équilibre statique d'un corps. Nous nous limiterons ici à des forces concourantes.

1 Énoncé du principe

Pour qu'un objet soit immobile, la somme des forces qui s'exercent sur cet objet doit être nulle.

Loi 2 (Loi d'équilibre statique des forces).

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{0} \quad (16.1)$$

2 En pratique : Méthodes

Supposons que (n-1) forces soient connues, comment déterminer la nième force qui va faire en sorte que la somme de toutes les forces soit nulle ?

Il faut additionner toutes les (n-1) forces connues et trouver ainsi leur résultante. La nième force doit être égale et opposée à cette résultante.

$$\vec{F}_n = - \sum_{i=1}^{n-1} \vec{F}_i \quad (16.2)$$

A Parallélogramme

Si on connaît deux forces et si nous désirons déterminer la troisième force qui fera que la somme des trois forces sera nulle, il faut suivre la procédure suivante :

- Additionner les deux premières forces par la méthode du parallélogramme (on obtient ainsi la résultante) ;
- tracer, à partir du point d'application, un vecteur de même direction, de même "longueur" mais de sens opposé à la résultante ;
- ce dernier vecteur est la troisième force cherchée.

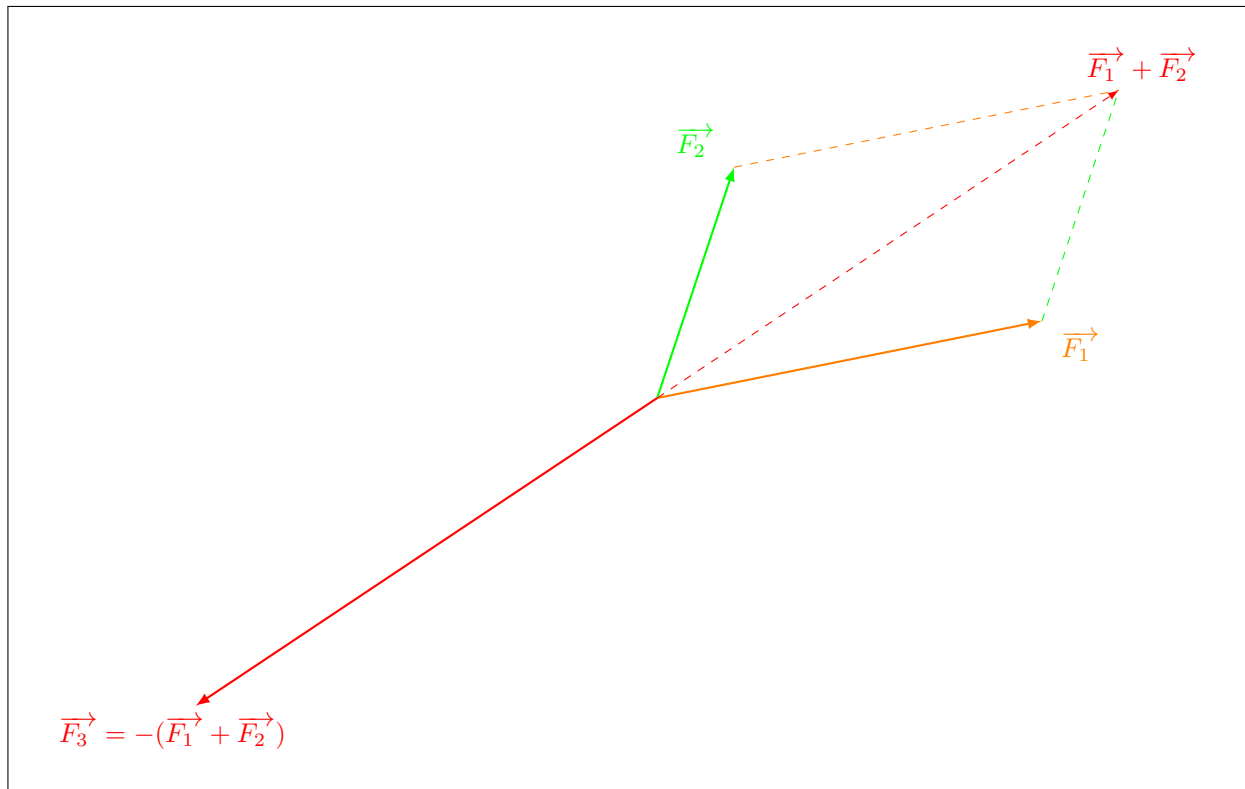


FIGURE 16.1 – La méthode du parallélogramme de forces.

B Polygone

S'il y a plus que deux forces. Il faut les additionner par la méthode du polygone, tracer la résultante. La "nième" force cherchée sera le vecteur égal et opposé à la résultante.

Si la même méthode est appliquée pour trouver la force à opposer à deux premières forces, on parle de "triangles des forces".

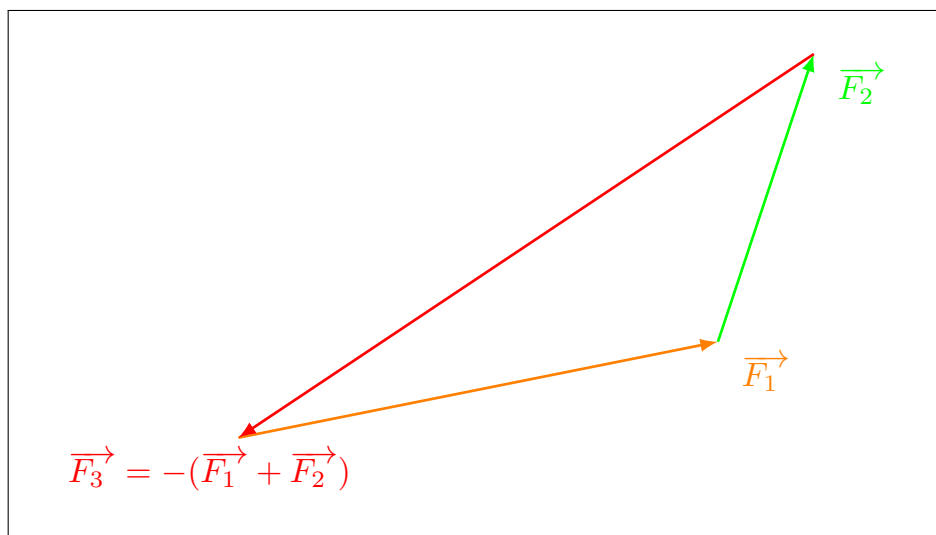


FIGURE 16.2 – Le triangle des forces.

C Composantes

Si on travaille dans un repère (nous le choisirons orthonormé mais ce n'est pas obligatoire), on peut travailler avec les composantes.

Les composantes du vecteur cherché sont les opposés des sommes des composantes de tous les autres vecteurs.

$$\begin{cases} F_{nx} = - \sum_{i=1}^{n-1} F_{ix} \\ F_{ny} = - \sum_{i=1}^{n-1} F_{iy} \\ F_{nz} = - \sum_{i=1}^{n-1} F_{iz} \end{cases} \quad (16.3)$$

D Exemples

3 La résistance

Si nous sautons du haut d'un mur au sol, seule la force poids due à la gravité s'exerce sur nous (pour autant que nous négligions les frottements) et nous met en mouvement.

Lorsque nous sommes debout sur le plancher, nous subissons la gravité et donc la force poids. Pourtant nous sommes immobiles et ne nous déformons pas. Tout se passe donc comme si les forces s'exerçant sur nous étaient à l'équilibre !

C'est parce qu'une autre force est en jeu : la "*résistance*".

La résistance est une force exercée par les surfaces avec lesquelles un objet est en contact. La résistance est perpendiculaire à la surface et s'oppose à la force qui agit sur la surface (dans notre exemple à notre poids).

C'est la résistance qui nous donne la sensation d'être "pesant". La sensation de "flottement" que nous éprouvons dans un ascenseur qui descend très vite, lorsque nous plongeons est la même que celle des cosmonautes. En fait nous sommes alors en chute libre !

Si notre poids est perpendiculaire à la surface, la résistance aura la même direction, la même valeur en newton mais sera de sens opposé !

4 Le plan incliné

Le plan incliné permet de faire monter des objets d'une certaine hauteur. Il est plus facile de monter un escalier ou une rampe que d'escalader un mur vertical.

A Caveat

Le cas du plan incliné est donné à titre d'exemple. Le traitement présenté ici n'est pas une "recette" à suivre avec des formules qui "marchent" toujours. Il s'agit d'une démarche typique qui doit être imitée mais pas copiée littéralement.

Ce sont plutôt le plan et les étapes du traitement qui sont intéressants.

B Identifier les forces en présence

Si un corps est sur un plan incliné, il y a trois forces en présence :

- son poids \vec{G} (direction : verticale, sens : vers le bas, norme : $m \cdot g$),
- la résistance du plan incliné \vec{R} (direction : perpendiculaire à la surface du plan, sens : vers l'extérieur du plan, norme : à priori inconnue),
- et une force de retenue \vec{F} (souvent les frottements ou une tension dans un câble) (direction : parallèle au plan, sens : "vers le haut", norme : à priori inconnue mais éventuellement mesurable).

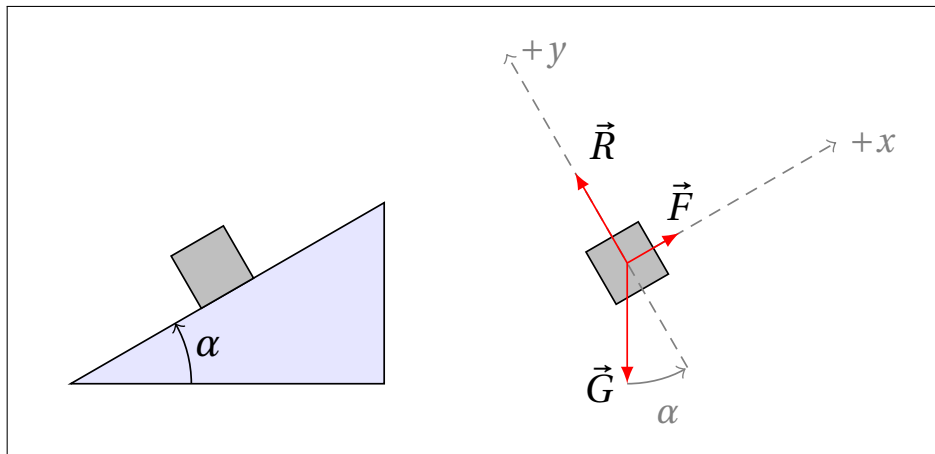


FIGURE 16.3 – Le plan incliné et les forces en présence

C Déterminer les forces en présence

Comme nous sommes à l'équilibre, les forces doivent s'annuler et la méthode du polygone de forces (ici un triangle de forces) doit pouvoir s'appliquer.

Il faut fixer une échelle, puis d'abord tracer un vecteur vertical \vec{G} dirigé vers le bas dont la longueur correspond à la valeur du poids.

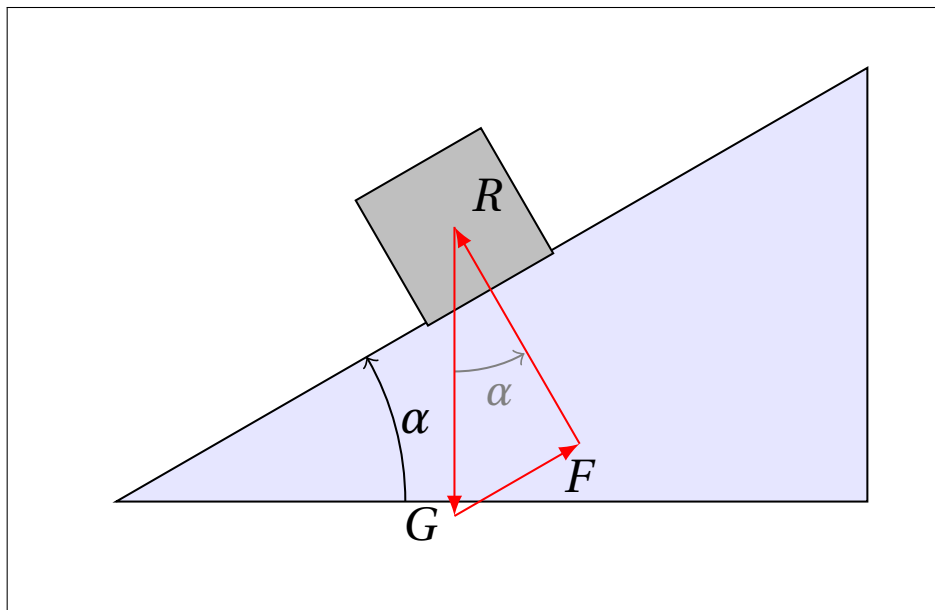


FIGURE 16.4 – Triangle de forces et plan incliné.

Ensuite, il faut tracer une demi-droite partant de l'extrémité du vecteur poids, parallèle à la surface du plan incliné et dirigée vers le haut du plan incliné (Ceci correspond à la direction et au sens de la force de retenue \vec{F}).

Puis, partant du début du vecteur poids, il faut tracer une demi-droite dont la direction est perpendiculaire au plan et dirigée vers le bas (La résistance \vec{R} aura son extrémité à l'origine de cette demi-droite).

L'intersection des deux demi-droites fixe les extrémités des vecteurs \vec{F} et \vec{R}

D Point de vue analytique

Comme la figure 16.4 (p. 149) le laisse entendre, \vec{G} est l'hypoténuse d'un triangle rectangle dont \vec{R} et \vec{F} sont les côtés.

Dès lors nous pouvons appliquer les relations d'angle dans les triangles rectangles.

$$\begin{cases} R = G \cos \alpha \\ F = G \sin \alpha \end{cases} \quad (16.4)$$

Ce qui entraîne immédiatement :

$$\tan \alpha = \frac{F}{R} \quad (16.5)$$

a) Force parallèle et normale

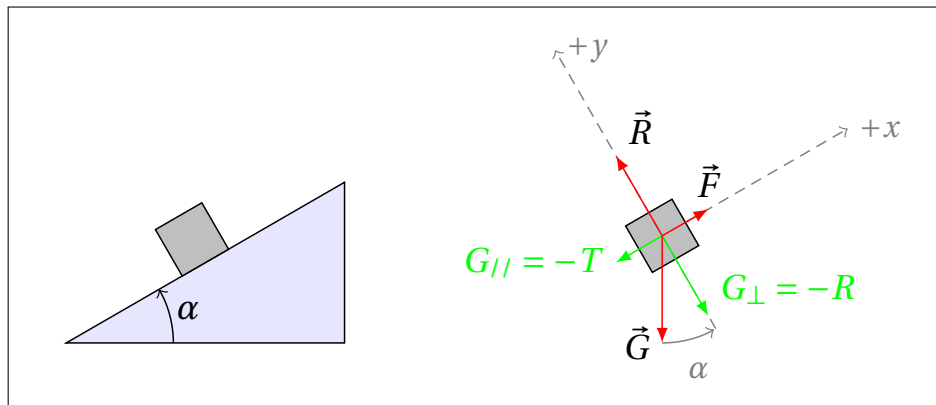


FIGURE 16.5 – Le plan incliné et les forces en présence.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 16.5 (p. 150), la force poids peut être décomposée en une force $G_{//}$ parallèle au plan incliné qui est égale à $-F$ et une force G_{\perp} perpendiculaire au plan incliné qui est égale à $-R$.

E Marche à suivre

La marche à suivre pour résoudre des problèmes d'équilibre statique peut donc se résumer ainsi :

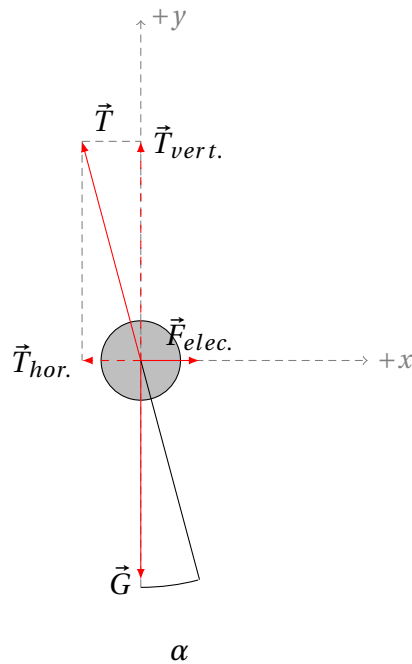
1. Faire un schéma complet (avec les surfaces, les angles, les forces ...) de la situation ;
2. représenter les forces sur le schéma en étant attentif aux angles ;
3. représenter les forces seules avec les mêmes orientations que sur le schéma global ;
4. chercher à transposer le schéma dans un triangle rectangle (ce n'est pas toujours possible) avec des forces orientées
 - une à la verticale,
 - l'autre à l'horizontale
 - et une troisième selon l'hypoténuse,*bien* identifier les angles (éventuellement les complémentaires de ceux donnés) ;
5. à partir du dernier schéma déduire des relations trigonométriques.

5 Exercices

Pour tous les exercices d'équilibre de forces du type "équilibre de translation", il faut toujours établir des correspondances entre triangles semblables. Un premier triangle correspondant à la géométrie du problème va permettre de construire un deuxième triangle qui sera le triangle des forces.

1. Un morceau de bouchon en liège de 0,1 g est suspendu à un fin fil . Un tube en PVC frotté à un pull exerce une force électrique sur le morceau de bouchon. Et à l'équilibre , lorsque le tube est à la même hauteur que le morceau de bouchon, le fil forme un angle de 15° avec la verticale . Déterminez l'intensité de la force électrique .

Solution :



— Données :

— $m = 0,1 = 0,0001 \text{ kg} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$

— $\alpha = 15^\circ$

— Inconnue :

— $F_{elec.} = ?$

— Formules :

— $\vec{T} + \vec{G} + \vec{F}_{elec.} = \vec{0}$

— $G = m \cdot g$ ($g \approx 10 \text{ m/s}^2$)

— Résolution :

— $T_h = -F_{elec.}$ et $T_v = -G$

— $T_h = T \cdot \sin \alpha$ et $T_v = T \cdot \cos \alpha$

— $\Rightarrow \tan \alpha = \frac{F_{elec.}}{G}$

— $F_{elec.} = \tan \alpha \cdot G$

— $F_{elec.} \approx 0,27 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ N}$

2. Des militaires doivent traverser un ravin de 60 m de large. Ils tendent un câble d'un bord à l'autre. Lorsqu'un soldat de 75 kg est au milieu, le câble est détendu et s'abaisse de 2 m sous l'horizontale.
 - (a) Quelle est la tension dans le câble ?
 - (b) Quel est le coefficient de raideur du câble ?

Chapitre 17

Équilibres de rotation et moments de force

Sommaire

1	Un peu d'histoire : Simon Stevin	154
2	Équilibre de rotation et leviers	155
	A Observations	155
	B Déduction	156
	C Loi des leviers	156
	D Types de leviers	157
3	Moments de force	158
	A Définition	158
	B Reformulation de la loi des leviers	159
	C Somme des moments de force	159
	D Signes des moments de force	160
	E Condition d'équilibre de rotation	161
	F Définition	161
4	Poutres et autres	161
	A Analyse de la situation	162
	B Équivalence poutre et leviers	164
5	Autres machines simples qui peuvent être comparées aux leviers	165
	A Le treuil	165
	B Le pédalier de vélo	165
6	Le produit vectoriel	166
	A Le produit vectoriel	166
	B Application aux moments de force	167
	C la force et le bras de levier ne sont pas perpendiculaires	167

Introduction

Nous connaissons les conditions d'équilibre statique. Celles-ci sont applicables quand les forces sont concourantes. Mais qu'en est-il si les forces ne s'appliquent pas toutes au même endroit ?

La somme des forces peut donner l'impression d'être nulle. Mais, si les forces ne mettent pas l'objet en translation, elles peuvent le mettre en rotation.

1 Un peu d'histoire : Simon Stevin

La Belgique a joué un rôle dans les découvertes des sujets que nous allons traiter ici.



FIGURE 17.1 – Timbre de 1948 consacré à Simon Stevin à l'occasion des 400 ans de sa naissance.

Simon Stevin (1548-1620) est né à Bruges. On le décrit souvent comme un ingénieur. Ses travaux sur la mécanique ont amené des progrès en terme de machines simples. Il a étudié les leviers, les poutres, les plans inclinés, les machines hydrauliques ... Il fut précepteur du Prince héritier des Pays-Bas. On lui prête aussi la réalisation d'un char à voile !



FIGURE 17.2 – Un char à voile.

Nous utiliserons abondamment ses croquis pour illustrer ce chapitre.

2 Équilibre de rotation et leviers

A Observations

Si nous tenons une latte à une fraction de sa longueur et que, à ses extrémités, soit nous fixons des poids, soit nous exerçons des forces, nous observons que la latte pivote sauf si certaines conditions sont remplies.

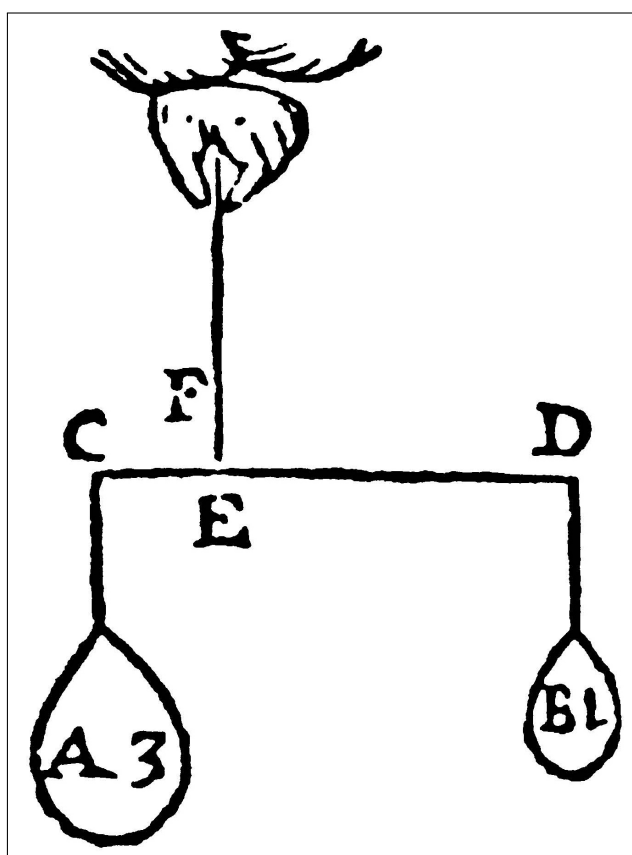


FIGURE 17.3 – Un premier équilibre selon Simon Stevin.

Pour fixer les idées, fixons une masse qui exercera par son poids une force résistance F_r et exerçons une force que nous appellerons la force motrice F_m . Le point autour duquel la latte peut pivoter sera nommé l'axe O .

La distance entre l'axe O le point où s'exerce la force motrice sera nommée la distance d_m . De même, la distance entre l'axe O le point où s'exerce la force résistante sera nommée la distance d_r .

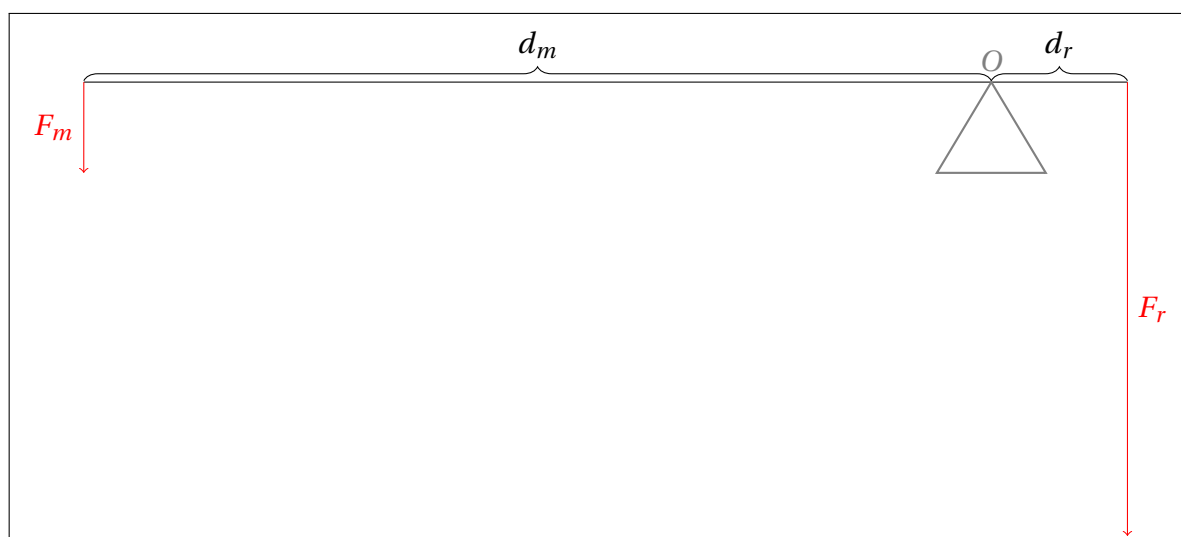


FIGURE 17.4 – Les forces et les distances dans la latte en équilibre.

Nous observons directement que la force du côté "court" doit toujours être plus grande que du côté "long".

Faisons varier les forces et les longueurs.

Essayons d'organiser nos observations sous forme d'un tableau. Indiquons-y les forces, leur rapport, les longueurs et les rapports entre les longueurs.

	F_m	F_r	F_m/F_r	d_m	d_r	d_m/d_r
	1	5	1/5	10	2	5

TABLE 17.1 – Comparaison des forces et des longueurs dans un levier.

B Déduction

Les rapports F_m/F_r et d_m/d_r sont inverses l'un de l'autre!

C Loi des leviers

Écrivons la relation découlant du point précédent.

$$\frac{F_m}{F_r} = \frac{d_r}{d_m} \quad (17.1)$$

Si nous transformons la relation précédente sous forme de produits (le produit des extrêmes est égal au produit des moyens), nous trouvons une relation connue sous le nom de loi des leviers.

Loi 3 (Loi des leviers).

$$d_m \cdot F_m = d_r \cdot F_r \quad (17.2)$$

où :

- F_m est la force considérée comme motrice (N) ;
- F_r est la force considérée comme résistante (N) ;
- d_m est la distance entre l'axe de rotation et le point d'application de F_m (m) ;
- d_r est la distance entre l'axe de rotation et le point d'application de F_r (m).

Attention : $F \perp d$.

a) Vocabulaire

Les distances d_m et d_r sont souvent appelées les *bras de levier*. Nous utiliserons désormais nous aussi ce terme.

b) F et d orthogonaux

Attention, dans les cas considérés jusque ici les forces et les leviers sont perpendiculaires. Lorsque ce ne sera plus le cas, nous insisterons sur le fait.

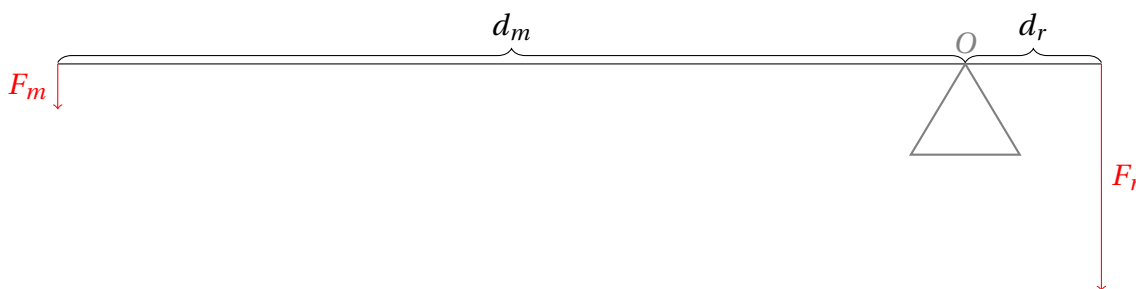
D Types de leviers

Il existe trois grands types de leviers. Nous allons ici les passer en revue. Pour chacun,

1. nous ferons un schéma général avec
 - une force motrice,
 - une force résistante,
 - un point d'appui,
 - les distances caractéristiques ;
2. nous verrons éventuellement la particularité de ce type de levier ;
3. nous donnerons quelques exemples.

a) Inter appui

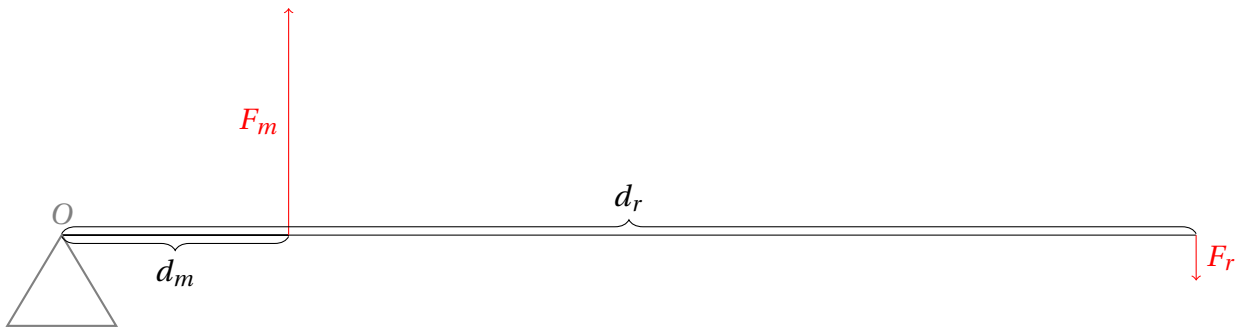
1. schéma :



2. relation : $d_m \cdot F_m = d_r \cdot F_r$
3. particularité : selon rapport d_m / d_r
4. ex : ciseaux, pied de biche, tenaille, pinces ...

b) Inter moteur :

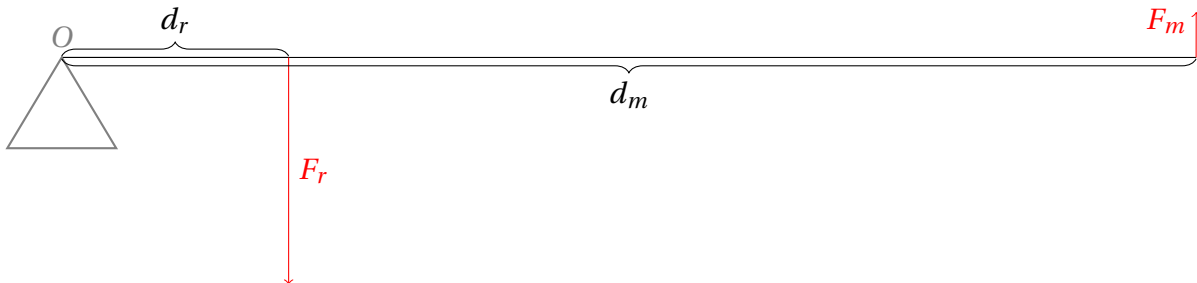
1. schéma :

2. relation : $d_m \cdot F_m = d_r \cdot F_r$ 3. particularité : d_r fait toute la longueur du levier et le rapport $d_m < d_r$ implique $F_m > F_r$. Donc on a une amplification de l'amplitude du mouvement au prix d'une force motrice qui doit être grande.

4. ex : essuie-glaces, balais, muscles ...

c) Inter résistant :

1. schéma :

2. relation : $d_m \cdot F_m = d_r \cdot F_r$ 3. particularité : d_m fait toute la longueur du levier et le rapport $d_m > d_r$ implique $F_m < F_r$. donc, on a une amplification de la force motrice au prix de l'amplitude du mouvement moteur qui doit être grand.

4. ex : casse-noisette, brouette ...

3 Moments de force

Les notions abordées avec les leviers peuvent être généralisées.

A Définition

Le produit de la valeur de la force et de la longueur du bras de levier est appelé la valeur du moment de force.

Définition 41 (Moment de force : valeur (absolue)).

$$M' = d \cdot F \quad (17.3)$$

où :

- M' = est la valeur (absolue) du moment de la force F par rapport au point d'appui (ou à l'axe de rotation) (Nm) ou ($\text{kgm}^3 \text{s}^{-2}$),
- F = la force considérée (N) ou ($\text{kgm}^2 \text{s}^{-2}$),
- d = la distance entre le point d'application de la force et l'axe de rotation (ou encore la longueur du bras de levier) (m)

Remarque 8 (sur l'usage des moments de force).

Deux remarques importantes :

- Il faut toujours préciser par rapport à quel axe de rotation, on détermine le moment de force.
- Avec cette définition, la force et le bras de levier sont orthogonaux. (C'est ce que nous avons fait jusqu'ici sans le dire. Ce ne sera bientôt plus nécessairement le cas.)

B Reformulation de la loi des leviers

Nous pouvons dès lors reformuler la loi des leviers en terme des moments de forces.

Loi 4 (Loi des leviers en terme de moments de force).

$$M'_m = M'_r \quad (17.4)$$

Les moments de force doivent être égaux.

C Somme des moments de force

Mais que se passe t'il s'il y a plus que deux forces? Et si elles ne s'appliquent pas au même endroit?

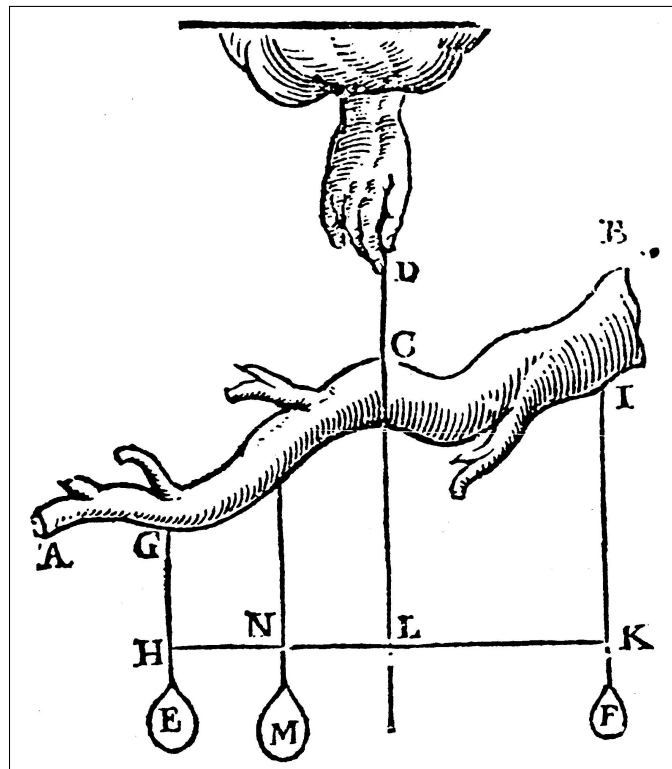


FIGURE 17.5 – Trois forces sur un levier selon Simon Stevin.

Il "suffit" d'additionner les moments du "bon côté" du signe d'égalité.

Imaginons avoir cinq forces toutes dirigées vers le bas, deux à gauche et trois à droite.

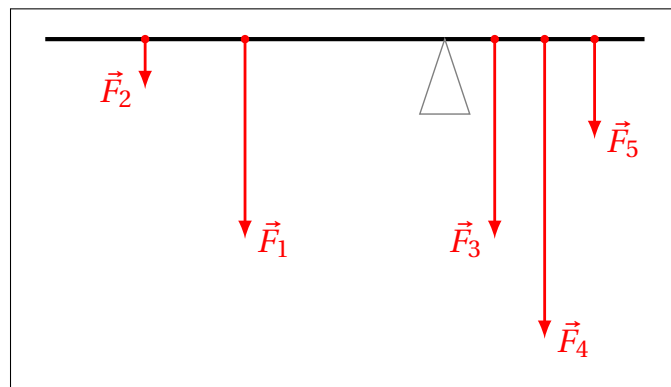


FIGURE 17.6 – Levier avec cinq forces : deux à gauche et trois à droite du point d'appui.

$$M'_1 + M'_2 = M'_3 + M'_4 + M'_5 \quad (17.5)$$

D Signes des moments de force

La relation précédente pourrait se réécrire :

$$M'_1 + M'_2 - M'_3 - M'_4 - M'_5 = 0 \quad (17.6)$$

Il nous a suffit d'additionner les forces à gauche et de soustraire les forces à droite.

a) Sens de rotation et signe des moments de force

Comment déterminer une condition d'équilibre de façon plus générale ?

Souvenons-nous de la convention de signe des angles en trigonométrie : Le sens anti-horlogique est compté positif ; le sens horlogique est compté négatif.

Adoptons la même convention :

Loi 5 (Signe des moments de force). *Si par rapport à un axe de rotation donné, une force contribue à un mouvement de sens anti-horlogique, son moment de force est compté positif.*

Si par rapport à un axe de rotation donné, une force contribue à un mouvement de sens horlogique, son moment de force est compté négatif.

E Condition d'équilibre de rotation

Dès lors, nous pouvons écrire des conditions d'équilibre de rotation.

Soit en égalant la somme des valeurs (absolues) des moments "tournant" en sens anti-horlogique à la somme des valeurs (absolues) des moments "tournant" en sens horlogique.

Loi 6 (Équilibre de rotation : $\odot = \ominus$).

$$\sum M'_{\odot} = \sum M'_{\ominus} \quad (17.7)$$

Soit en additionnant la somme des valeurs des moments "tournant" en sens anti-horlogique et en y soustrayant la somme des valeurs (absolues) des moments "tournant" en sens horlogique. Le résultat de l'opération devant être nul.

Loi 7 (Équilibre de rotation : $\odot - \ominus = 0$).

$$\sum M'_{\odot} - \sum M'_{\ominus} = 0 \quad (17.8)$$

F Définition

Définition 42 (Moment de force). Si la force est perpendiculaire au bras de levier, alors

$$M = F \cdot d \quad (17.9)$$

où :

- M = est la valeur du moment de la force F par rapport au point d'appui (ou à l'axe de rotation) (Nm) ou ($\text{kgm}^3 \text{s}^{-2}$),
- F = la force considérée (N) ou ($\text{kgm}^2 \text{s}^{-2}$),
- d = la distance entre le point d'application de la force et l'axe de rotation (ou encore la longueur du bras de levier) (m)

Si par rapport à un axe de rotation donné, une force contribue à un mouvement de sens anti-horlogique, son moment de force est compté positif.

Si par rapport à un axe de rotation donné, une force contribue à un mouvement de sens horlogique, son moment de force est compté négatif.

4 Poutres et autres

L'équilibre d'une poutre avec des points d'appui multiples peut être traitée avec les moments de force.

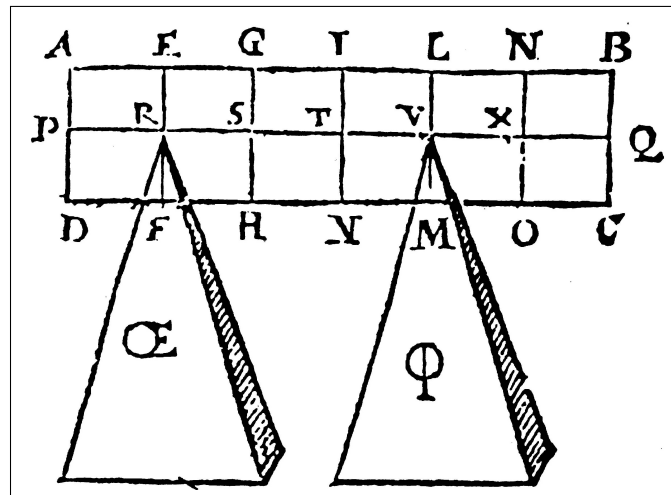


FIGURE 17.7 – Un poutre avec deux points d'appui selon Simon Stevin.

A Analyse de la situation

a) Les forces

Quelle sont les forces qui agissent sur la poutre ?

Il y a :

- le poids de la poutre (au centre de masse de la poutre, verticale et dirigée vers le bas),
- la force de résistance exercée par l'appui de gauche (au point d'appui de gauche, verticale et dirigée vers le haut),
- la force de résistance exercée par l'appui de droite (au point d'appui de droite, verticale et dirigée vers le haut).

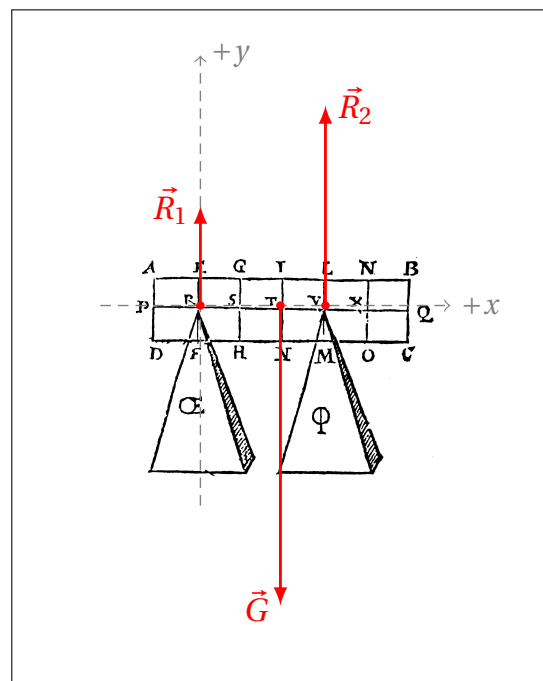


FIGURE 17.8 – Les forces sur la poutre avec deux points d'appui.

Remarque 9. La loi des équilibres de translation doit toujours s'appliquer et donc la somme des forces doit être nulle.

$$\vec{R}_1 + \vec{R}_2 = -\vec{G} \quad (17.10)$$

b) Les moments de force

Il faut déterminer les moments de force par rapport à chaque point d'appui successivement.

(i) Point d'appui de gauche

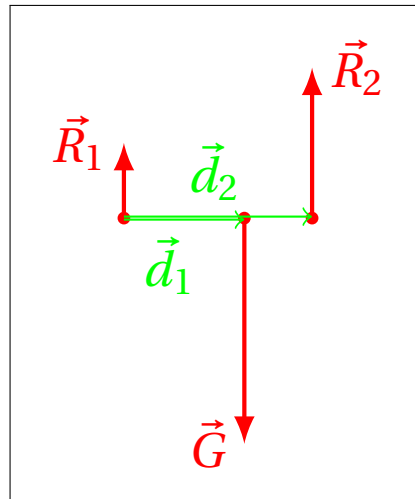


FIGURE 17.9 – Point d'appui de gauche.

Le moment de \vec{R}_1 est nul puisque la distance entre le point d'appui choisi et \vec{R}_1 est nulle. Le moment de \vec{G} vaut $d_1 G$ et engendre une rotation anti-horlogique. Le moment de \vec{R}_2 vaut $d_2 R_2$ et engendre une rotation horlogique.

$$0R_1 - d_1 G + d_2 R_2 = 0 \quad (17.11)$$

(ii) Point d'appui de droite

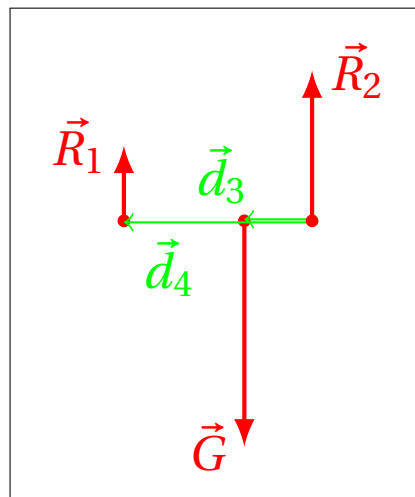


FIGURE 17.10 – Point d'appui de droite.

Le moment de \vec{R}_2 est nul puisque la distance entre le point d'appui choisi et \vec{R}_2 est nulle.

Le moment de \vec{G} vaut d_3G et engendre une rotation anti-horlogique.

Le moment de \vec{R}_1 vaut d_4R_2 et engendre une rotation anti-horlogique.

Remarquons que si nous prenons les longueurs des bras de leviers en valeur absolue, alors :

$$- d_4 = d_2$$

$$- d_3 = d_2 - d_1$$

$$0R_2 - (d_2 - d_1)G + d_2R_1 = 0 \quad (17.12)$$

(iii) Système d'équation

Pour déterminer R_1 et R_2 , il faut donc résoudre un système de deux équations à deux inconnues.

$$\begin{cases} 0 = 0R_1 - d_1G + d_2R_2 \\ 0 = 0R_2 - (d_2 - d_1)G + d_2R_1 \end{cases} \quad (17.13)$$

B Équivalence poutre et leviers

Comme Stevin l'avait compris le traitement de la poutre peut être comparé à celui d'un levier !

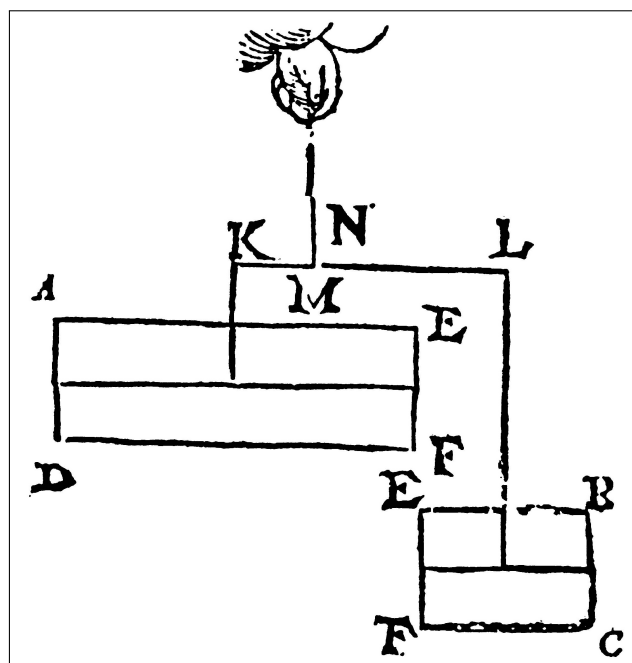


FIGURE 17.11 – Un poutre avec deux points d'appui = un levier selon Simon Stevin.

5 Autres machines simples qui peuvent être comparées aux leviers

A Le treuil

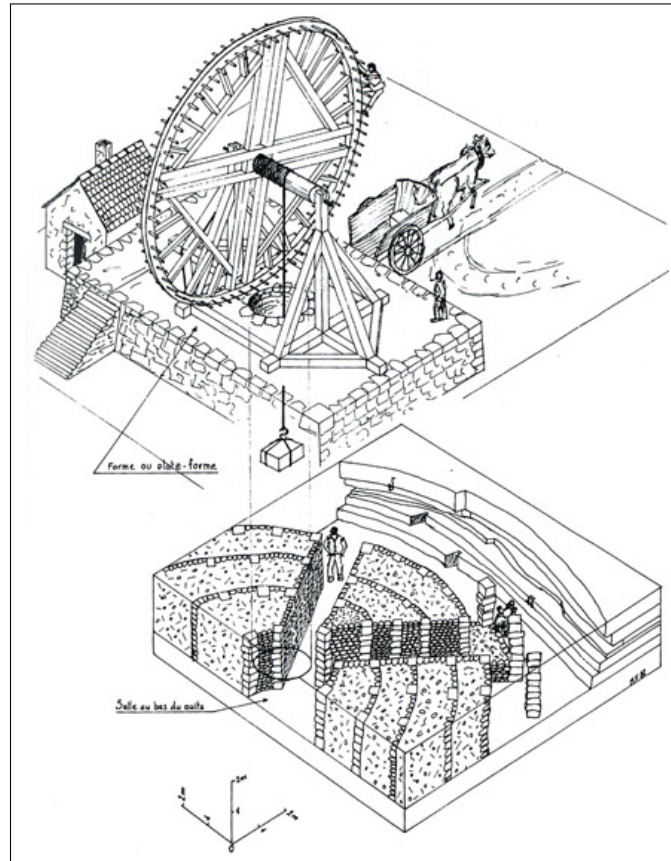


FIGURE 17.12 – Le treuil.

B Le pédalier de vélo

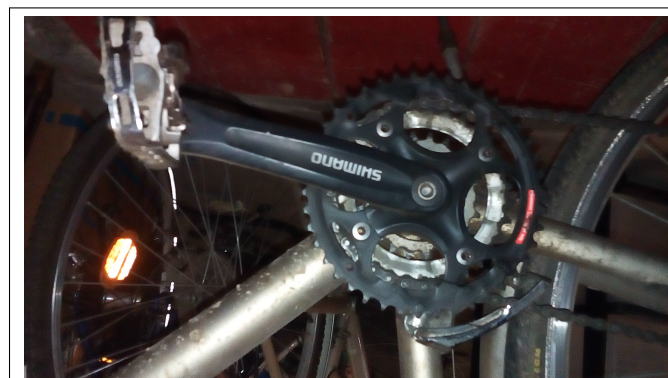


FIGURE 17.13 – Le pédalier de vélo.

6 Le produit vectoriel

Introduction

Dans ce qui suit nous allons établir le lien entre les moments de force et le produit vectoriel. Nous allons essentiellement travailler dans le plan mais envisagerons les vecteurs forces et "bras de force" comme ayant une valeur nulle pour leur troisième coordonnée (pour la troisième dimension d'espace).

A Le produit vectoriel

Pour aborder ce point, il est nécessaire de connaître la définition et les règles du produit vectoriel, ainsi que quelques concepts associés aux vecteurs dans l'espace.

a) Repère direct et indirect

Pour travailler dans l'espace, il faut utiliser une base et un repère. Choisissons les orthonormés. Commençons par définir une repère direct.

Imaginons que notre base est représentée par un bonhomme!

La colonne vertébrale représente l'axe vertical (axe z ou \vec{k}). Le sens positif de cet axe est orienté depuis les pieds vers la tête. Les deux autres axes sont représentés par les bras du bonhomme. Si le bras droit est l'axe x (ou \vec{i}) et le bras gauche l'axe y (ou \vec{j}), alors la base est dite "directe".

Si le bras droit est l'axe y (ou \vec{j}) et le bras gauche l'axe x (ou \vec{i}), alors la base est dite indirecte.

Définition 43. Strictement, une base $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ est une base directe si $\vec{i} \wedge \vec{j} = \vec{k}$.

Remarque 10. Les permutations cycliques sont vérifiées : $\vec{k} \wedge \vec{i} = \vec{j}$ et $\vec{j} \wedge \vec{k} = \vec{i}$

b) Définition du produit vectoriel

Le produit vectoriel des vecteurs \vec{a} et \vec{b} est un vecteur et se note $\vec{a} \wedge \vec{b}$ et est :

- égal à $\vec{0}$ si $\vec{a} \parallel \vec{b}$;
- si $\vec{a} \not\parallel \vec{b}$ alors $\vec{a} \wedge \vec{b}$ est
 - orthogonal aux vecteurs \vec{a} et \vec{b} ,
 - tel que $(\vec{a}, \vec{b}, \vec{a} \wedge \vec{b})$ est une base directe de l'espace
 - et de norme $\|\vec{a} \wedge \vec{b}\| = \|\vec{a}\| \cdot \|\vec{b}\| \cdot |\sin(\vec{a}, \vec{b})|$.

c) Technique de calcul du produit vectoriel avec les coordonnées des vecteurs

Dans un repère orthonormé direct, si les deux vecteurs \vec{a} et \vec{b} sont : $\vec{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}$ et $\vec{b} = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}$

alors le produit vectoriel $\vec{a} \wedge \vec{b}$ est égal à

$$\vec{a} \wedge \vec{b} = \begin{pmatrix} a_y b_z - b_y a_z \\ a_z b_x - b_z a_x \\ a_x b_y - b_x a_y \end{pmatrix}$$

Pour rappel, le produit vectoriel $\vec{a} \wedge \vec{b}$ peut se calculer comme le pseudo-déterminant suivant

$$\vec{a} \wedge \vec{b} = \begin{vmatrix} \vec{i}_x & \vec{i}_y & \vec{i}_z \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = (a_y b_z - b_y a_z) \vec{i}_x + (a_z b_x - b_z a_x) \vec{i}_y + (a_x b_y - b_x a_y) \vec{i}_z$$

d) Cas particulier où les deux vecteurs sont dans le plan "xy"

Dans ce cas les composantes "z" des vecteurs sont nulles et les composantes "x" et "y" du produit vectoriel sont égales à zéro. Le produit vectoriel revient à calculer $a_x b_y - b_x a_y$.

$$\vec{a} \wedge \vec{b} = (a_x b_y - b_x a_y) \vec{i}_z \quad (17.14)$$

B Application aux moments de force

a) La force et le bras de levier sont perpendiculaires

Si la force et le bras de levier sont orthogonaux, alors le moment est maximum.

b) Sens de la rotation

Le moment de force est un vecteur qui est perpendiculaire au plan de la rotation. Il indique le sens de la rotation selon qu'il pointe au-dessus ou au-dessous du plan de rotation.

C la force et le bras de levier ne sont pas perpendiculaires

a) Différentes situations

(i) Force et le bras de levier perpendiculaires

Alors le moment de force est maximum. (C'est ce que nous avons fait jusqu'à présent.)

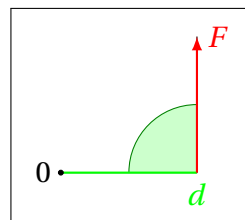


FIGURE 17.14 – Bras de levier avec angle droit.

(ii) Force et bras de levier parallèles

Dans ce cas, il n'y a pas de rotation ! Le moment de force est nul !

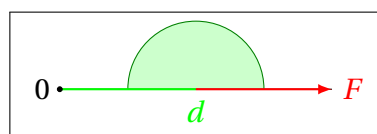


FIGURE 17.15 – Bras de levier avec angle plat.

(iii) Force et bras de levier faiblement inclinés l'un par rapport à l'autre

(Pour fixer les idées, disons 170° .) Le moment de force est faible.

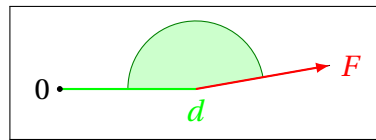


FIGURE 17.16 – Bras de levier avec angle faible.

- (iv) **Force et bras de levier fortement inclinés l'un par rapport à l'autre**
(Pour fixer les idées, disons 110° .) Le moment de force est plus important.

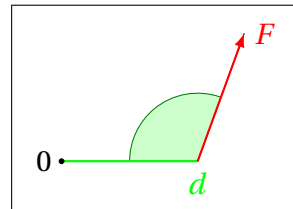


FIGURE 17.17 – Bras de levier avec angle important.

b) Analyse

Nous savions que les moments de force étaient fonction de la grandeur de la force et de la longueur du bras de levier :

$$\vec{d} \perp \vec{F} \Rightarrow M = dF$$

Les points précédents indiquent que les moments de force dépendent aussi de l'angle α entre \vec{d} et \vec{F} .

La fonction de l'angle α qui est nulle si $\vec{d} \parallel \vec{F}$ et est croissante entre 0° et 90° pour atteindre alors un maximum (quand $\vec{d} \perp \vec{F}$) est la fonction sinus.

Nous pouvons dès lors écrire :

$$M = dF \sin \alpha \quad (17.15)$$

c) Synthèse

Ce qui précède suggère que le moment de force soit un vecteur. C'est bien le cas.

La définition du moment de force à trois dimensions est :

$$\vec{M} = \vec{d} \wedge \vec{F} \quad (17.16)$$

Cinquième partie

Dynamique

Chapitre 18

Les lois de Newton

Sommaire

1	Le principe d'inertie	172
	A Principe	172
	B Importance du système de référence	173
2	Le principe fondamental de la dynamique	174
	A Introduction	174
	B Recherche de la relation qui lie F , m et a	174
	C Le principe fondamental de la dynamique (finalement)	176
3	Le principe d'action réciproque (action et réaction)	177
	A Exemples	177
	B Principe	177
4	Exercices	177

Introduction

Les lois fondamentales de la dynamique sont aussi appelées les 3 lois de Newton :

1. Le principe d'inertie
2. La relation $F = ma$
3. Le principe d'action réciproque (action et réaction)

1 Le principe d'inertie

Quelle est la cause du mouvement ?

Q. : Quelle est la cause du mouvement ?

rmq. : Les réponses des élèves sont souvent "aristotéliennes" : Le mouvement est dû à une qualité transmise à l'objet en mouvement

R. :

A Principe

a) Exemple

Je roule à vélo sur une route plate. J'arrête de pédaler. Que se passe t'il ? Mon vélo poursuit son mouvement. Pourquoi ?

b) L'inertie

Tous les corps matériels ont de l'inertie, c'est à dire qu'ils sont **incapables de modifier par eux-mêmes leur trajectoire ou leur vitesse** :

- * Si le corps est au repos, **il ne peut se mettre en mouvement seul**.
- * S'il se déplace en ligne droite, **il continue en ligne droite**.
- * S'il se déplace à vitesse constante, **il continue à vitesse constante** (*s'il n'y pas de frottement*).

c) Première loi de Newton

Lancé sur un plan horizontal infini, en l'absence d'obstacle, un mobile continue indéfiniment son MRU. Tout corps conserve son état soit de repos, soit de MRU, si aucune force n'agit sur lui.

La formulation mathématique est la suivante :

Principe 1 (Principe d'inertie).

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{0} \equiv \vec{v} = cst. \quad (18.1)$$

Donc, si la résultante de toutes les forces s'exerçant sur un corps est nulle, alors la vitesse de ce corps est constante et réciproquement.

d) Cas particulier

Si la vitesse est nulle, elle est constante. Nous connaissons la règle d'équilibre de translation qui dit qu'un objet est immobile si la somme des forces qui s'y appliquent est nulle.

Il s'agit donc d'un cas particulier du principe d'inertie.

e) Exemple (suite)

Pour que mon vélo arrête son MRU, je dois freiner. Je dois pédaler pour accélérer. Dans les deux cas, je dois appliquer une force.

Et si, en pratique, mon vélo s'arrête seul après un certain temps, c'est à cause des forces de frottement.

B Importance du système de référence

Le système de référence, c'est le repère en math. C'est à dire le système d'axes (l'origine, les axes et les unités).

Notons qu'il y a d'autres manières de construire un système de références mais nous n'en parlerons pas ici.

Cette première loi de Newton n'est valable que si le système de référence n'est soumis à aucune accélération.

a) Exemple

- Un wagon sur une voie
- Une balle sur une table dans le wagon.
- 2 observateurs A et B : A dans le wagon, B sur le quai

1. Le wagon est en MRU par rapport a quai.

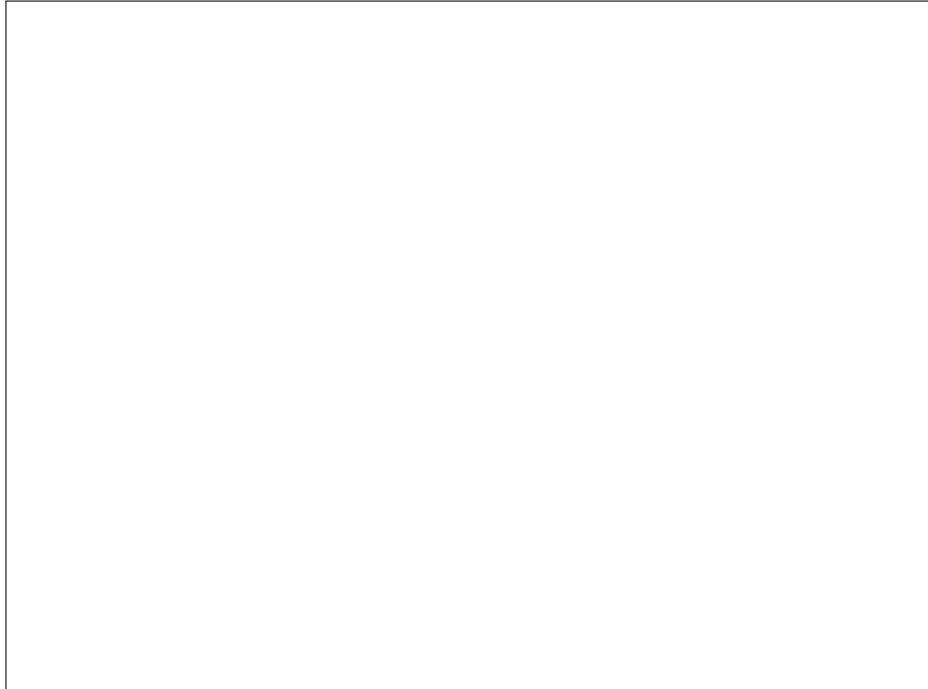


FIGURE 18.1 – Wagon en MRU.

- Pour B : la balle suit un MRU
- Pour A : La balle est immobile
- Pour A et B, la somme des forces sur la balle = 0

2. Le wagon est soumis à une accélération

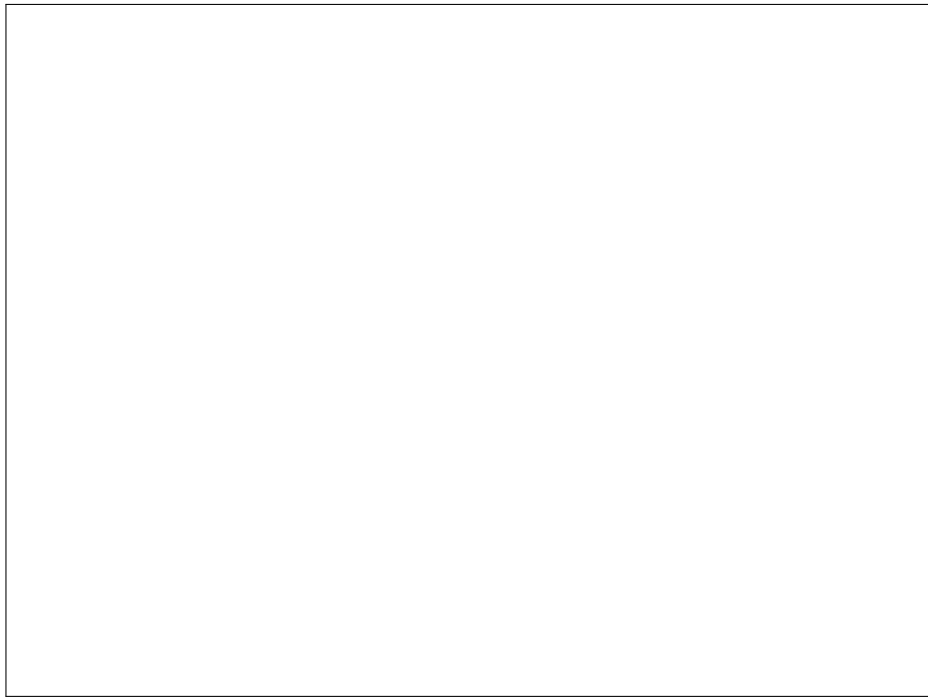


FIGURE 18.2 – Wagon soumis à une accélération.

- Pour B : la balle est immobile par rapport au quai.
- Pour A : La balle semble subir une accélération “-a”.
- La balle n’est soumise à aucune force : Le principe d’inertie n’est pas respecté.

Conclusion : Le principe d’inertie n’est pas valable pour tous les systèmes de référence. Dans la plupart des cas, la Terre peut être considérée comme un système inertiel. Mais certaines expériences fines prouvent que ceci n’est qu’une approximation.

2 Le principe fondamental de la dynamique

Cette deuxième loi est tellement importante que nous la baptiserons principe fondamental.

A Introduction

Si nous appliquons une force à un corps au repos, il se met en mouvement et acquiert une vitesse v . Si nous appliquons la force en continu, la vitesse va augmenter régulièrement et le mobile sera animé d’un MRUA.

Quelle est la relation liant la force, le corps et l’accélération ?

B Recherche de la relation qui lie F , m et a

a) Dispositif expérimental

Attachons une bouteille d’air comprimé au chariot du rail à coussin d’air. Selon que nous ouvrons plus ou moins fort le robinet, la force fournie par l’air qui s’échappe sera plus ou moins grande. nous pourrons avoir une mesure de cette force grâce à l’instrument de mesure de la force le dynamomètre.

Rajoutons des masses sur le chariot.

Mesurons comme précédemment l’accélération du chariot.

b) Trois grandeurs entrent en jeu.

1. La force,
2. la masse **totale** (masses + chariot + bouteille +air) du chariot,
3. l'accélération du chariot.

c) Démarche théorético expérimentale

Nous pouvons faire varier la force et la masse assez facilement et nous pourrions mesurer leur effet sur l'accélération. Nous allons donc dans un premier temps faire varier la masse, obtenant ainsi un premier lien entre masse et accélération et dans un deuxième temps faire varier la force, obtenant ainsi un deuxième lien, entre force et accélération cette fois.

Nous établirons alors un lien entre les 3 grandeurs.

Pour estimer l'accélération moyenne, nous allons utiliser la relation :

$$\Delta r = \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad (18.2)$$

qui deviendra

$$a = \frac{2 \cdot \Delta r}{t^2} \quad (18.3)$$

d) Expérience établissant le lien entre masse et accélération

La force reste identique mais ajoutons des masses sur le chariot. Attention, il faut tenir compte de la masse **totale** (masses + chariot + bouteille +air) du chariot.

Quel est l'effet de la masse sur l'accélération ?

Pour y voir plus clair, organisons l'information dans un tableau :

F (N)	m (kg) (à vide)	m (kg) additionnelle	m (kg) totale	t(s)	a (m/s^2)	$\frac{1}{a}$ (s^2/m)	$k = a \cdot m$ ($\frac{m}{kg \cdot s^2}$)

Nous remarquons que l'accélération diminue en proportion inverse de la masse.

L'accélération est inversement proportionnelle à la masse.

$$a = k \cdot \frac{1}{m} \quad (18.4)$$

où

- a est l'accélération (m/s^2),
- m est la masse (kg),
- k est une constante particulier à l'expérience ($\frac{m}{kg \cdot s^2}$)

Nous discuterons la nature de la constante k plus loin.

e) Expérience établissant le lien force et accélération

Faisons varier la force avec une masse totale qui elle reste constante. Nous remarquons que l'accélération augmente.

Quel est l'effet de la force sur l'accélération ?

Pour y voir plus clair, organisons l'information dans un tableau :

F (N)	m (kg) (à vide)	m (kg) additionnelle	m (kg) totale	t (s)	a (m/s^2)	$K = \frac{a}{F}$ ($\frac{m}{N s^2}$)

Nous remarquons que l'accélération augmente en proportion directe de la force. L'accélération est directement proportionnelle à la force.

$$a = k'.F \quad (18.5)$$

où

- a est l'accélération (m/s^2),
- F est la force (N),
- k' est une constante particulier à l'expérience ($\frac{m}{N s^2}$)

C Le principe fondamental de la dynamique (finalement)

Dans la série d'expériences précédentes, nous avons obtenu deux relations importantes : $a = k.\frac{1}{m}$ et $a = k'.F$

Réunissons ces deux relations en une seule et nous obtenons le principe fondamental de la dynamique.

L'accélération d'un mobile est directement proportionnelle à la force qui lui appliquée et inversement proportionnelle à sa masse.

a) Expression mathématique du principe fondamental de la dynamique

Combinons les expressions

$$a = k.\frac{1}{m} \quad (18.6)$$

et

$$a = k'.F \quad (18.7)$$

Nous obtenons

$$a = K.\frac{F}{m} \quad (18.8)$$

et si nous prenons $K = 1$ ¹, la relation devient

$$a = \frac{F}{m} \quad (18.9)$$

et donc finalement

1. Ce qui revient à définir la force.

Principe 2 (Principe fondamental de la dynamique).

$$F = m.a \quad (18.10)$$

où

- F est la force (N),
- m est la masse (kg),
- a est l'accélération (m/s^2),

3 Le principe d'action réciproque (action et réaction)

A Exemples

- ❖ Un patineur cogne un mur avec les mains, il recule.
- ❖ Deux dynamomètres attachés ensemble.
- ❖ Une barque sur l'eau avance et fait avancer l'eau.
- ❖ Une balle rebondit.

B Principe

Dès qu'un corps est soumis à l'action d'un autre corps, il exerce à son tour une action réciproque sur celui-ci.

Toute action est accompagnée d'une action réciproque.

En réalité, il s'agit d'une interaction entre les 2 corps : les forces si elles sont appliquées au même point s'équilibrent mutuellement.

Troisième loi de Newton :

L'action et l'action réciproque sont toujours égales. Les actions d'un corps sur l'autre sont toujours égales et de sens opposés.

Principe 3 (Principe d'action réciproque).

$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A} \quad (18.11)$$

La force que A exerce sur B est égale en module à la force que B exerce sur A. Ces deux forces sont de même direction mais de sens opposé.

4 Exercices

Chapitre 19

Les forces de frottements

Sommaire

1	Mise en situation	180
2	Nature des frottements	180
3	Différents types de frottements	180
	A Frottements entre 2 surfaces solides	180
	B Frottements Solide-Fluide	181
4	Exercices	182

Introduction

Nous connaissons tous les frottements. Dans un bon vélo, dans une voiture et dans tous les moteurs en général, on cherche à les éliminer.

1 Mise en situation

Ce que l'on sait moins des forces de frottements, c'est qu'elles sont nécessaires pour se déplacer.



FIGURE 19.1 – La cire qui brille sans glisser!

2 Nature des frottements

Lorsque nous marchons, nos chaussures se soudent littéralement au sol.

Des liens chimiques se forment entre le plancher et nos semelles. Leur usure vient du fait qu'à chaque pas que nous faisons nous devons casser ces liaisons. De petits morceaux de semelles restent collés au sol.

C'est pour ces mêmes raisons que nous devons nous laver les mains. Chaque fois que nous tenons un objet, nos mains et l'objet se soudent. Lorsque nous lâchons l'objet, un peu de notre peau s'en va et de minuscules morceaux de l'objet restent soudés à nos mains.

3 Différents types de frottements

Distinguons tout d'abord les frottements entre deux surfaces solides (frottements secs) et les frottements entre un solide et un fluide (frottements visqueux) .

A Frottements entre 2 surfaces solides

Il existe deux types de forces de frottements solide-solide : les forces de frottements statiques et les forces de frottements dynamiques.

a) Règles générales pour les forces de frottements solide-solide

Les forces de frottements sont :

- parallèles à la surface sur la quelle le corps repose ou à la direction du mouvement,
- opposées au déplacement éventuel,
- proportionnelles à la résistance R de la surface.

b) Les forces de frottements statiques

Si deux surfaces solides sont en contact sans mouvement relatif, il existe une force qui s'oppose à la mise en mouvement d'une surface par rapport à l'autre dans une direction parallèle au plan de contact des surfaces.

Loi 8 (Force de frottement statique).

$$F_f(\text{max}) = \mu_s R \quad (19.1)$$

où :

- $F_f(\text{max})$ = la force de frottement statique maximale (N),
- R = la force normale à la surface de résistance du matériau (N),
- μ_s = le coefficient de frottement statique propre au deux matériaux en contact.

c) Les forces de frottements dynamiques

Si deux surfaces solides sont en contact et en mouvement dans une direction parallèle au plan de contact des surfaces, il existe une force qui s'oppose à la mise en mouvement d'une surface par rapport à l'autre dans une direction parallèle au plan de contact des surfaces.

Loi 9 (Force de frottement dynamique).

$$F_d = \mu_d R \quad (19.2)$$

où :

- F_d = la force de frottement dynamique (N),
- R = la force normale à la surface de résistance du matériau (N),
- μ_d = le coefficient de frottement dynamique propre au deux matériaux en contact.

Pour deux surfaces données, les forces de frottements statiques sont plus grandes que les forces de frottements dynamiques.

B Frottements Solide-Fluide

Les frottements solide-fluide obéissent à d'autres lois que les forces de frottements entre deux surfaces solides.

Les fluides peuvent être des gaz ou des liquides.

a) Lois des frottements fluide-solide

Les forces de frottements entre un solide et un fluide vont

- être proportionnelles à la vitesse relative de l'objet et du fluide,
- dépendre de la géométrie de l'objet solide,
- dépendre de la densité de l'objet,
- dépendre de la nature du fluide.

Loi 10 (Frottements fluide-solide).

$$\vec{F}_f = -m(bv + cv^2)\vec{1}_v \quad (19.3)$$

où :

- \vec{F}_f = le vecteur force de frottement (N),
- m = la masse de l'objet solide (kg),
- v = le module de la vitesse relative entre le fluide et l'objet solide (ms^{-1}),
- $\vec{1}_v$ = un vecteur unité dans la direction et le sens de la vitesse,
- b = un coefficient dépendant des matières du fluide et du solide ainsi que de la densité et de la géométrie de l'objet solide,
- c = un coefficient dépendant des matières du fluide et du solide ainsi que de la densité et de la géométrie de l'objet solide.

On considère que le coefficient "b" est applicable aux petites vitesses alors que le coefficient "c" lui s'applique aux grandes vitesses.

4 Exercices

Chapitre 20

Chute libre

Chapitre 21

La force centripète

Sommaire

1	Force centripète	186
	A Introduction	186
	B Rappel des définitions : période, vitesse d'un mouvement circulaire uniforme,	186
	C La force centripète	187
	D L'accélération centripète	187
	E Grandeur de la force et de l'accélération centripète	188
2	Applications	189
	A Pourquoi les pneus lisses sont-ils dangereux?	189
	B Les balançoires du carrousel	189
	C Les vélos de vitesse pure	190
	D Les satellites	190
3	Force de Coriolis	191
4	Exercices	191

Introduction

Nous avons étudié le MCU dans le cadre de la cinématique. Ici, nous allons parler des forces en jeu.

1 Force centripète

A Introduction

a) Rappel : le principe d'inertie

$$MRU \Leftrightarrow \Sigma \vec{F} = \vec{0}$$

$$\text{Mouvement varie} \Leftrightarrow \Sigma \vec{F} \neq \vec{0}$$

b) mouvement circulaire uniforme

B Rappel des définitions : période, vitesse d'un mouvement circulaire uniforme, ...

- * Un objet de masse m
- * en mouvement circulaire uniforme
 - * de rayon R (m)
 - * et de centre C
 - * décrit des arcs Δs (m)
 - * en des durées égales Δt . (s)
- * La durée d'une révolution complète est la période T (s)
 - * Ex : L'aiguille des secondes d'un horloge est en *MCU* et a une période T de 60s.
 - * Ex : L'aiguille des minutes d'un horloge a une période T de
 - * Ex : L'aiguille des heures d'un horloge a une période T de

En *MCU*, la vitesse v est égale à la longueur d'arc de cercle parcourue par unité de temps. Càd.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

où

- Δt est la durée nécessaire (s)
- pour parcourir
- Δs la longueur d'arc (m).

Attention : Rappel le sens positif est le sens contraire des aiguilles d'une montre.

Pour un tour (une circonférence) : $\Delta s = 2\pi R$ et $\Delta t = T$

Et donc :

$$v = \frac{2\pi R}{T}$$

a) Caractéristiques du vecteur vitesse

Les caractéristiques du vecteur \vec{v} sont :

- * Sa direction : $\vec{v} \perp R$
- * son sens : le sens du mouvement
- * sa grandeur : $v = \frac{2\pi R}{T}$
- * son point d'application : le centre de masse du mobile désigné par P .

b) Vitesse angulaire

La vitesse angulaire est liée à la période et aux "nombre de tours" par seconde. Elle est une mesure de l'angle fait par unité de temps. Plutôt que de mesurer en l'angle en degré, par convention, elle est donnée en "radians par seconde" :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{\Delta s}{R\Delta t}$$

(rad/s)

C La force centripète

Si nous faisons tourner un objet au bout d'une corde, nous devons tirer sur la corde. Il faut donc exercer une force vers le centre de rotation. Cette force courbe sans cesse la trajectoire.

Cette force est la force centripète.

Si nous cessons d'exercer cette force, si nous lâchons la corde par exemple, alors il n'y a plus de force exercée sur l'objet et conformément au principe d'inertie, il part en ligne droite. (si nous négligeons les frottements, la gravité, ...) C'est le principe d'une fronde.

Remarquons que nous n'avons pas besoin de force centrifuge! Cette force existe dans le langage de tous les jours mais n'existe pas en tant que telle. Les physiciens parlent de "pseudo-force".

D L'accélération centripète**a) Rappel : principe fondamental de la dynamique**

$$F = m.a$$

Rappelons que l'accélération est aussi une grandeur vectorielle. Dès lors $F = m.a$ devient, sous forme vectorielle,

$$\vec{F} = m.\vec{a}$$

Ce que cette relation indique c'est que la force \vec{F} est proportionnelle à l'accélération \vec{a} . Comme la masse m ne peut pas être négative, les vecteurs \vec{F} et \vec{a} sont de même direction et de même sens.

b) Application de principe fondamental de la dynamique en MCU

L'accélération \vec{a} est donc aussi dirigée vers le centre.

Le principe fondamental de la dynamique et la définition de \vec{a} comme différence de vitesses sont concordantes.

E Grandeur de la force et de l'accélération centripète

a) introduction

Nous connaissons maintenant

- * le point d'application (le point P : centre de masse de l'objet de masse m)
- * la direction (selon une droite reliant le centre C et le point P) et
- * le sens (pointant vers le centre C)

de la force centripète. Ceci est aussi valable pour l'accélération centripète.

Mais nous ne connaissons pas encore sa grandeur (ou intensité). Étudions ici cette question.

b) Considérations expérimentales

Si nous faisons tourner une masse autour de nous (au lancer de marteau, en faisant tourner une fronde, ...), nous pouvons constater rapidement une série de choses :

La force (centripète) que nous devons exercer pour retenir l'objet en rotation est d'autant plus grande que :

- * la masse m de l'objet est grande,
- * la grandeur v de la vitesse est grande,
- * le rayon R est petit.

Cette dernière considération est un peu contraire au sens commun.

c) Conclusion

Des mesures précises nous permettent de déduire la relation suivante :

$$F = m \frac{v^2}{R}$$

Comme $F = m \cdot a$ peut s'écrire $a = \frac{F}{m}$, nous déduisons que, pour un mobile en MCU, l'intensité de l'accélération centripète vaut :

$$a = \frac{F}{m} = \frac{v^2}{R}$$

2 Applications

A Pourquoi les pneus lisses sont-ils dangereux ?



FIGURE 21.1 – Pneus lisses dans un virage.

B Les balançoires du carrousel



FIGURE 21.2 – les balançoires du carrousel.

C Les vélos de vitesse pure



FIGURE 21.3 – Vélos de vitesse pure.

D Les satellites

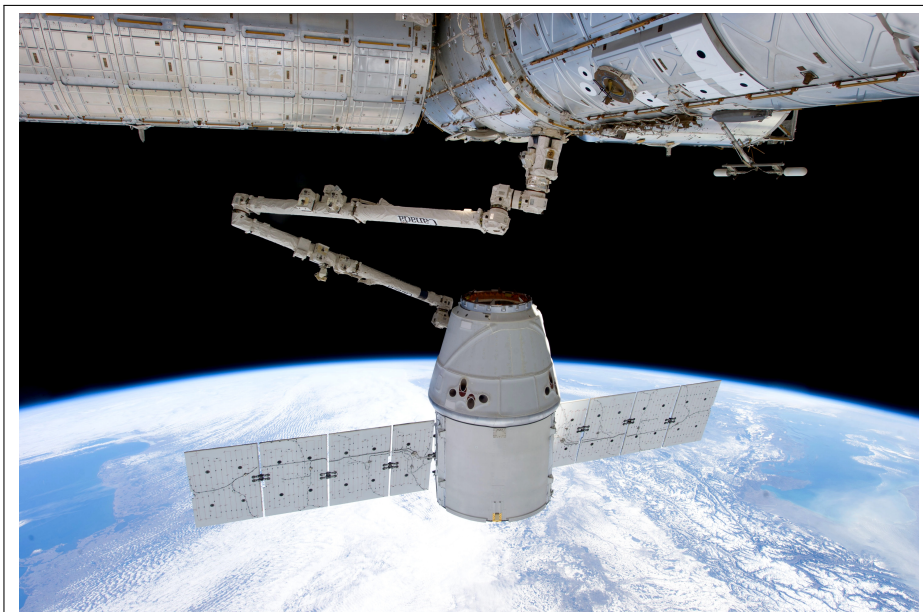


FIGURE 21.4 – Satellite.

3 Force de Coriolis

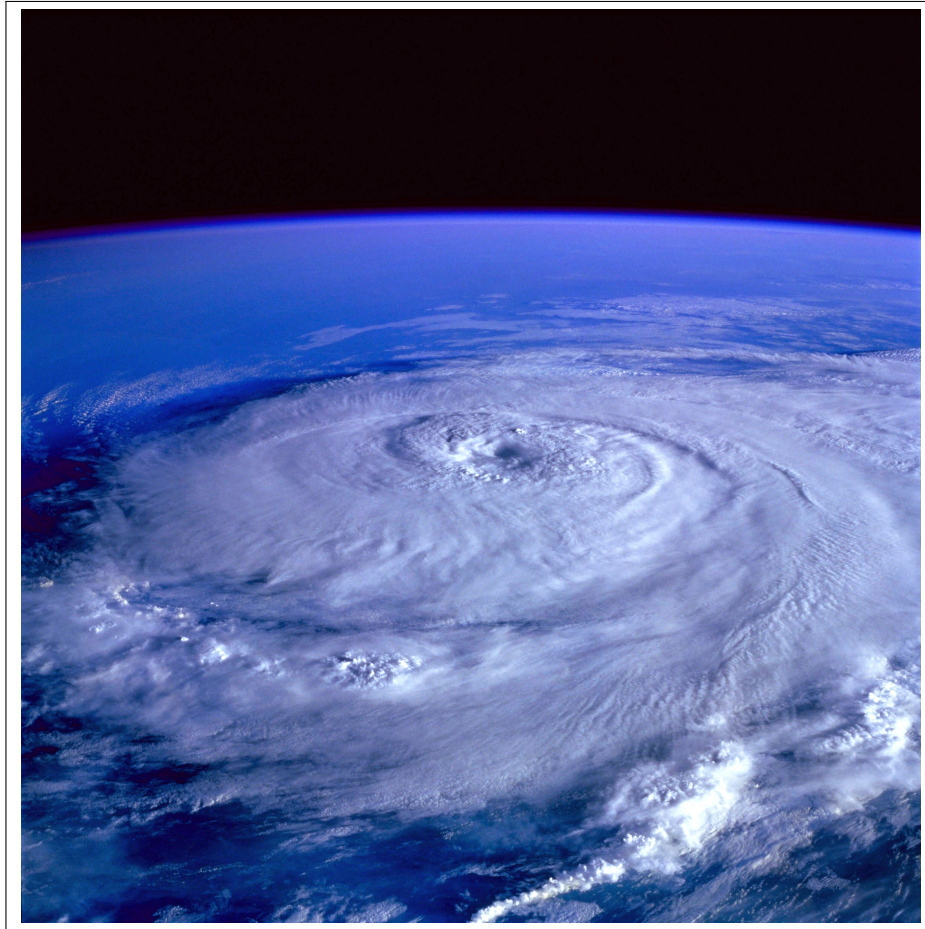


FIGURE 21.5 – Force de Coriolis.

4 Exercices

Sixième partie
Les lois de conservation

Chapitre 22

Travail

Sommaire

1	Rappel sur les leviers	196
2	Définitions, formules	196
	A Une première définition	196
	B Une deuxième définition	196
	C Une troisième définition	197
3	Travail moteur ou résistant	198
	A Définition qualitative	198
	B Définition quantitative	198
4	Exercices	199

Introduction

Nous étudierons ici le concept de travail mécanique.

Si certaines transformations peuvent avoir lieu sans qu'aucune force visible n'en soit la cause (Ex. : une réaction chimique qui dégage de la chaleur), dans d'autres cas, la transformation de l'énergie est visiblement réalisée grâce à l'action d'une force.

1 Rappel sur les leviers

Nous avons étudié les leviers. considérons le cas d'un levier inter-appui.

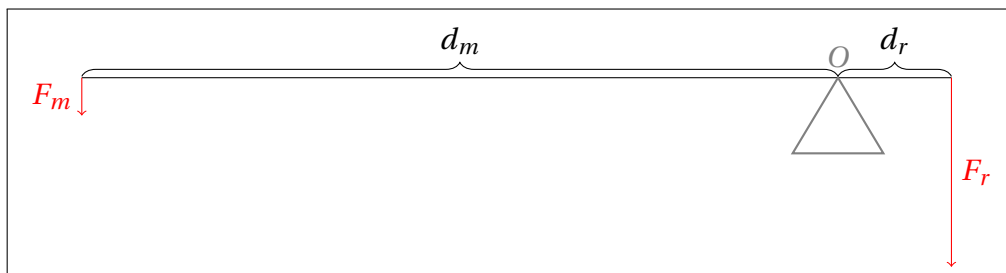


FIGURE 22.1 – Rappel : les forces et les distances dans la latte en équilibre

La loi des leviers nous dit :

$$d_m \cdot F_m = d_r \cdot F_r \quad (22.1)$$

Considérons maintenant un mouvement de faible amplitude réalisé en utilisant ce levier, nous réalisons un "effort" pour déplacer un objet avec le levier.

"Quelque chose" est transmis par l' "acteur" qui fait l'effort à l'objet qui "subit" l'effort.

Une de ces "choses" est de l'énergie !

Nous désirons évidemment mesurer les quantités d'énergie échangées.

2 Définitions, formules

C'est le travail qui permet de mesurer cet échange d'énergie.

A Une première définition

Définition 44. Le travail est la mesure de l'échange d'énergie dans les processus mécaniques.

ou encore

Définition 45. On appelle *travail* d'une force agissant sur un corps, au cours d'un déplacement, la variation d'énergie que cette force tend à produire.

B Une deuxième définition

Il nous faut évidemment arriver à une définition plus précise.

a) Découverte

Revenons à notre levier.

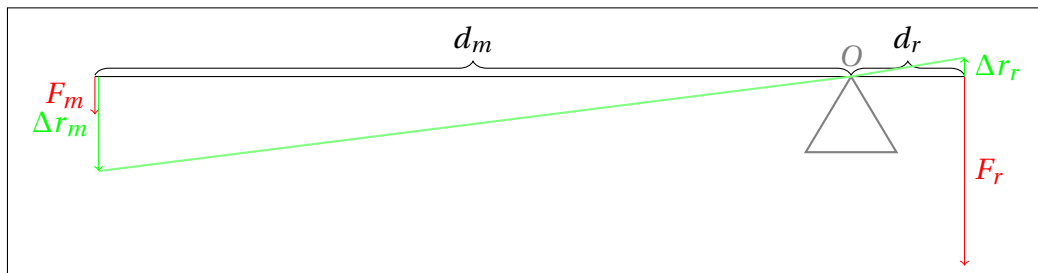


FIGURE 22.2 – Rappel : les forces et les distances dans la latte en équilibre

Si nous considérons maintenant un mouvement de faible amplitude réalisé en utilisant ce levier, nous voyons apparaître deux triangles.

Ces deux triangles sont semblables.

Les longueurs des côtés latéraux de ces triangles sont donc dans des rapports semblables aux rapports entre les bras de leviers.

Comme le mouvement est de faible amplitude on peut évaluer les longueurs des déplacements des extrémités du levier (qui en réalité se font sur un arc de cercle) aux longueurs des côtés extérieurs de ces triangles.

Les produits des longueurs des déplacements et des forces sont égaux pour chaque côté du levier.

Ces produits sont égaux à l'énergie fournie et à l'énergie consommée. Ce sont les travaux des forces!

b) Définition en terme de force et de déplacement

Définition 46 (Travail d'une force et d'un déplacement parallèles). Le travail d'une force F sur un déplacement (ici rectiligne et parallèle à la force) Δr est le produit de la grandeur de la force et de la longueur du déplacement :

$$W = F \cdot \Delta r \quad (22.2)$$

c) Définition de l'énergie

Ce faisant nous avons défini l'unité d'énergie!

Définition 47 (Le joule). Un joule est la quantité d'énergie produite ou consommée par une force de 1 newton dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force.

$$1J = 1N \cdot 1m \quad (22.3)$$

Les moments de force des leviers avaient ces mêmes unités! Ce n'est pas un hasard et nous y reviendrons plus tard.

C Une troisième définition

Pourtant toutes les forces n'aboutissent pas à un même transfert d'énergie.

a) Mise en situation

Si j'applique une force à un objet qui ne peut se déplacer dans la direction de la force (en poussant un wagonnet perpendiculairement à ses rails par exemple), je vais dépenser de l'énergie mais pas en transmettre au wagonnet!

En faisant varier les angles entre la direction de la force et la direction du déplacement éventuel, je constate que le travail est nul pour un angle nul ou plat et maximum pour un angle droit.

La grandeur trigonométrique qui obéit à une telle relation est le cosinus.

b) Définition en terme d'angle

En conséquence nous arrivons à une troisième définition.

Définition 48 (Travail d'une force non parallèle au déplacement).

$$W = F \cdot \Delta r \cdot \cos \alpha \quad (22.4)$$

c) Définition en terme vectoriel

Nous pouvons de suite écrire :

Définition 49 (Travail comme produit scalaire).

$$W = \vec{F} \cdot \vec{\Delta r} \quad (22.5)$$

3 Travail moteur ou résistant

Clairement un objet transmet de l'énergie à un autre : il y a un donneur et un récepteur.

A Définition qualitative

On associe un qualificatif au travail selon qu'il s'agit du travail du donneur ou du travail du récepteur.

Définition 50 (Travail moteur et travail résistant).

- Le travail du donneur d'énergie est considéré comme positif et est appelé le travail *moteur*.
- Le travail du récepteur est considéré comme négatif et est appelé le travail *résistant*.

Considérons dans un premier temps des forces et des déplacements parallèles.

Remarquons de suite que le travail est moteur lorsque la force et le déplacement sont de même sens.

Par contre, le travail est résistant si la force et le déplacement sont de sens opposés.

B Définition quantitative

Si la force et le déplacement ne sont pas parallèles, c'est le signe du cosinus de l'angle qu'ils forment qui nous dira si le travail est moteur ou résistant.

Définition 51 (Travail moteur ou résistant en terme de cosinus).

$$\begin{aligned} W > 0 &\Leftrightarrow \cos(\widehat{F\Delta r}) > 0 \\ W < 0 &\Leftrightarrow \cos(\widehat{F\Delta r}) < 0 \end{aligned} \quad (22.6)$$

4 Exercices

Chapitre 23

Énergie

Sommaire

1	Travail	202
	A Énergie et chute	202
	B Travaux moteurs et résistants	203
2	Travail et énergie	203
	A Définition du travail le long d'un chemin	203
	B Théorème de l'énergie cinétique	204
	C À trois dimensions	206
	D Forces conservatives et non conservatives	206
3	Énergies potentielle et cinétique	207
	A Énergies potentielles	208
	B Énergie cinétique	209
	C Application à la conservation de l'énergie	210
4	Exercices	210

Introduction

Nous étudierons ici l'énergie dans le cadre de la mécanique, c'est-à-dire l'énergie mécanique !

Si certaines transformations peuvent avoir lieu sans qu'aucune force visible n'en soit la cause (Ex. : une réaction chimique qui dégage de la chaleur), dans d'autres cas, la transformation de l'énergie est réalisée grâce à l'action d'une force macroscopique.

1 Travail

A Énergie et chute

a) Expérience : trous dans le sable

La profondeur de l'impact est proportionnelle à la hauteur de la chute.

$$Pr. \simeq \Delta h \quad (23.1)$$

La profondeur de l'impact est proportionnelle à la masse du corps qui tombe.

$$Pr. \simeq m \quad (23.2)$$

b) Impact et énergie

La profondeur de l'impact est proportionnelle à l'énergie du corps en fin de la chute.

$$Pr. \simeq E_n \quad (23.3)$$

c) Énergie et hauteur : travail de la gravité

$$\Delta h \simeq E_n \quad (23.4)$$

et

$$m \simeq E_n \quad (23.5)$$

(i) **Énergie et force** Nous savons qu'énergie et force sont liées. La force qui agit ici, c'est la gravité.

$$F_{gr.} \simeq E_n \quad (23.6)$$

Or

$$F = m.a \quad (23.7)$$

ici

$$F = m.g \quad (23.8)$$

et donc,

$$E_n = F.\Delta h = mg\Delta h \quad (23.9)$$

En pratique nous écrirons :

$$E_{gr.} = mgh \quad (23.10)$$

Gardons à l'esprit que c'est la différence de hauteur qui importe :

$$E_{gr.} = mg\Delta h \quad (23.11)$$

B Travaux moteurs et résistants

a) Découverte

(i) **Exemples :** chutes, freinages, arcs, monter un seau d'un puits ...

(ii) conditions

- transformation d'énergie,
- opérée grâce à une force,
- au cours d'un déplacement.

b) Formule

Nous venons de voir un cas particulier, celui du travail de la force de gravité.

Et en général :

$$W = \vec{F} \odot \overrightarrow{\Delta r} \quad (23.12)$$

2 Travail et énergie

Pour établir formellement le lien entre énergie et travail, il nous faut tout d'abord affiner la définition de travail.

A Définition du travail le long d'un chemin

Nous connaissons la définition du travail si la force est constante et le déplacement rectiligne. Mais comment calculer le travail d'une force en toute généralité ?

a) À une dimension

Pour aborder la question, envisageons tout d'abord une situation à une dimension.

Soit une force F (pas nécessairement constante), qui s'accompagne d'un déplacement entre un point A et un point B. La force F est dans la direction de la droite AB.

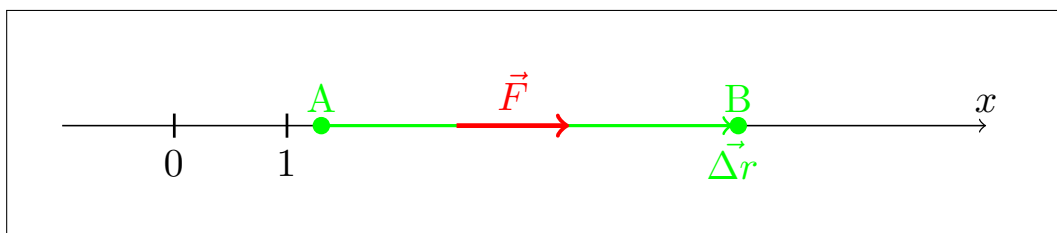


FIGURE 23.1 – Travail à une dimension : force et déplacement entre A et B

Dotons la droite d'un repère et donc d'un axe, soit l'axe "x" cet axe en question.

Alors

Définition 52 (Travail d'une force le long d'un chemin à une dimension).

$$W_{AB} = \int_A^B F dx \quad (23.13)$$

Ce travail peut être positif, négatif ou nul.

B Théorème de l'énergie cinétique

Continuons à traiter le problème à une dimension. Nous verrons par après que tout ceci est généralisable à trois dimensions.

À une dimension, le principe fondamental de la dynamique s'écrit :

$$F = ma \quad (23.14)$$

La définition cinématique de l'accélération nous permet d'écrire :

$$F = m \frac{dv}{dt} \quad (23.15)$$

Comme nous sommes à une dimension, nous pouvons écrire que $\Delta r = \Delta x$. Et si nous nous souvenons de la définition de la vitesse :

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (23.16)$$

Transformons cette relation :

$$dx = v dt \quad (23.17)$$

En combinant les équations (23.13, 23.15 et 23.17), nous obtenons :

$$W_{AB} = \int_A^B m \frac{dv}{dt} v dt \quad (23.18)$$

En simplifiant les dt , l'équation devient

$$W_{AB} = \int_{v_A}^{v_B} m v dv \quad (23.19)$$

qui est indépendante du temps mais où les bornes d'intégration sont les vitesses en A et B et non plus les positions A et B.

Cette intégrale est basique et donne

$$W_{AB} = \left[\frac{1}{2} m v^2 \right]_{v_A}^{v_B} \quad (23.20)$$

Ou encore :

$$W_{AB} = \frac{1}{2} m v_B^2 - \frac{1}{2} m v_A^2 \quad (23.21)$$

On définit ainsi l'énergie cinétique.

Définition 53 (Énergie cinétique).

$$E_{cin.} = \frac{1}{2} m v^2 \quad (23.22)$$

En combinant les équations (23.21 et 23.22) on obtient le

Théorème 1 (Théorème de l'énergie cinétique).

$$W_{AB} = E_{cin.B} - E_{cin.A} \quad (23.23)$$

a) Exemple : la gravité

Imaginons lancer un corps vers le haut depuis le sol. Nous donnons une vitesse initiale v_0 à l'objet de masse m .

La gravité est supposée constante. Ce qui est une approximation raisonnable à proximité de la surface de la Terre.

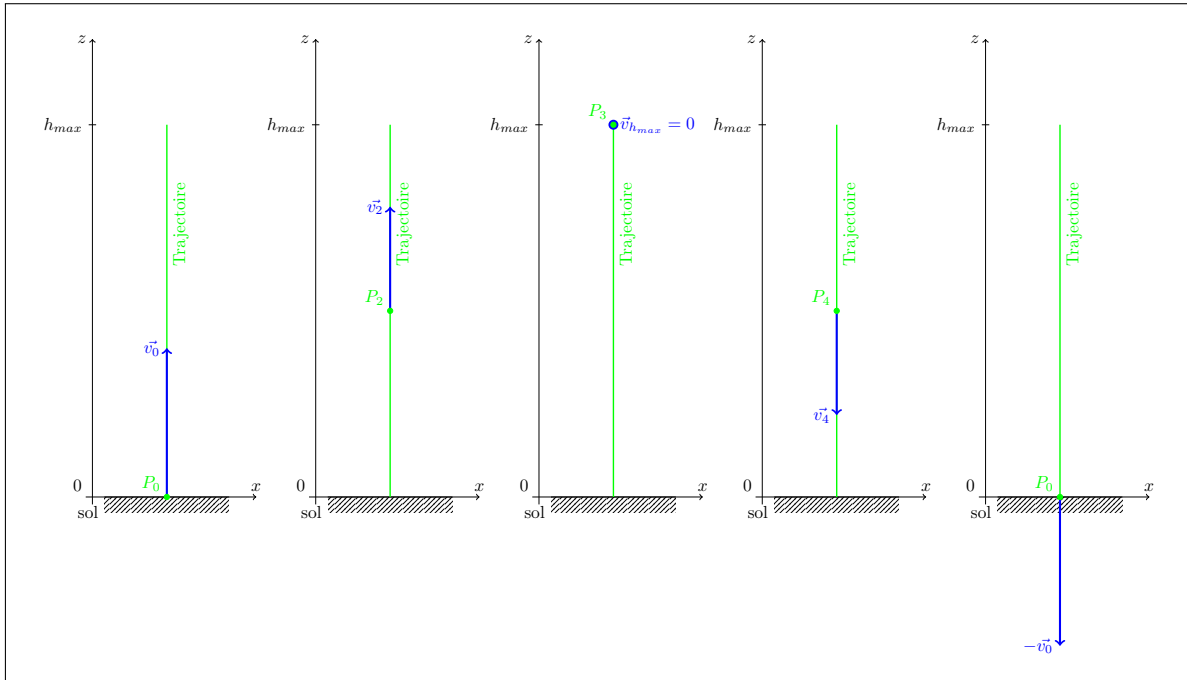


FIGURE 23.2 – Lancer d'une masse m à la verticale avec une vitesse v_0 depuis le sol.

La seule force en jeu est le poids.

La question que nous nous posons est "jusqu'à quelle hauteur h l'objet va-t'il monter?" Utilisons le théorème de l'énergie cinétique¹.

$$W_{AB} = -mgh \quad (23.24)$$

Le travail est négatif car la force pointe vers le bas tandis que le déplacement se fait vers le haut. Ce travail est donc résistant.

Par ailleurs, le théorème de l'énergie cinétique nous dit que

$$W_{AB} = 0 - \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (23.25)$$

En effet, la vitesse finale en B est nulle et donc l'énergie cinétique en B vaut 0. Et la vitesse en A est la vitesse initiale v_0 .

Nous pouvons dès lors écrire :

$$mgh = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (23.26)$$

Il est facile d'en déduire la hauteur "h" jusque laquelle la masse va monter.

$$h = \frac{v_0^2}{2g} \quad (23.27)$$

1. Certes, nous pourrions résoudre la question avec des méthodes vues précédemment. Nous faisons le choix d'essayer une nouvelle méthode. Nous laissons la vérification du résultat avec une autre méthode comme exercice.

Ce résultat est indépendant de la masse m du corps lancé vers le haut !
Il est aussi cohérent avec les calculs réalisés en cinématique.

b) Principe d'inertie et théorème de l'énergie cinétique

Si la somme des forces s'exerçant sur un corps est nulle, alors, nécessairement, le travail total de ces forces est nul. Dans ce cas la variation d'énergie cinétique doit aussi être nulle.

Ce qui revient à dire que la vitesse du corps doit être constante.

Nous retrouvons ainsi le principe d'inertie : "Si la résultante des forces s'exerçant sur un corps est nulle, ce corps est en MRU."

C À trois dimensions

Les résultats précédent se démontrent facilement à trois dimensions. La définition 23.13 à une dimension devient

Définition 54 (Travail d'une force le long d'un chemin à trois dimensions).

$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \odot \vec{dr} \quad (23.28)$$

Si on écrit les composantes de \vec{F} et de \vec{dr} dans une base cartésienne, on obtient :

$$W_{AB} = \int_A^B F_x \cdot dr_x + F_y \cdot dr_y + F_z \cdot dr_z \quad (23.29)$$

L'intégrale peut être transformée en plusieurs intégrales à une dimension :

$$W_{AB} = \int_{A_x}^{B_x} F_x \cdot dr_x + \int_{A_y}^{B_y} F_y \cdot dr_y + \int_{A_z}^{B_z} F_z \cdot dr_z \quad (23.30)$$

Ces intégrales peuvent être traitées selon le théorème de l'énergie cinétique

$$W_{AB} = \frac{1}{2}m(v_{B_x}^2 - v_{A_x}^2) + \frac{1}{2}m(v_{B_y}^2 - v_{A_y}^2) + \frac{1}{2}m(v_{B_z}^2 - v_{A_z}^2) \quad (23.31)$$

Souvenons-nous que

$$v_B^2 = v_{B_x}^2 + v_{B_y}^2 + v_{B_z}^2 \quad (23.32)$$

Nous pouvons écrire

$$W_{AB} = \frac{1}{2}mv_B^2 - \frac{1}{2}mv_A^2 \quad (23.33)$$

Ce résultat est identique à celui de l'équation 23.21 (p. 204).

Le théorème de l'énergie cinétique est généralisable à trois dimensions.

D Forces conservatives et non conservatives

Imaginons nous aux montagnes russes.

Deux chariots démarrent de la même hauteur avec une même vitesse initiale et vont arriver ensuite à une même hauteur qui sera inférieure à celle de départ.

Supposons dans un premier temps que les frottements sont négligeables. Seule la gravité agit sur les chariots.

Le premier descend directement. Le deuxième doit d'abord, *uniquement* grâce à sa vitesse initiale, passer une "bosse".

Alors, dans ces conditions, les deux chariots auront la même vitesse finale à la fin de leur trajectoire.

On dit que la gravité est une force conservative.

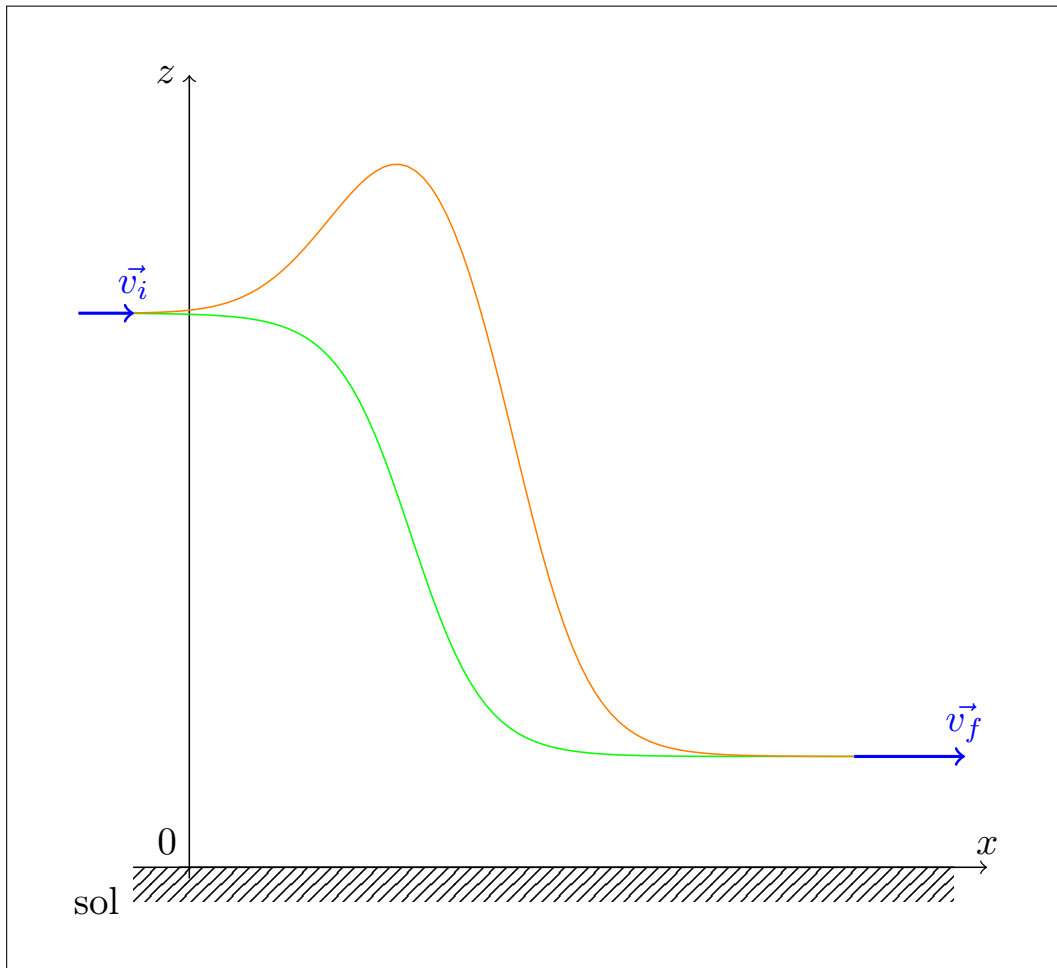


FIGURE 23.3 – Deux trajectoires aux montagnes russes : la gravité est une force conservative.

Si, par contre, les frottements entrent en jeu, le résultat sera différent.

Pour simplifier les choses supposons que les frottements sont uniformes quelle que soit la vitesse et que le "ralentissement" ne dépend que de la longueur du trajet parcouru.

Alors clairement la trajectoire orange sera plus freinée que la verte. Le chariot orange arrivera en bas avec une vitesse inférieure à celle du chariot vert.

Les forces de frottements ne sont *pas* des forces conservatives.

Définition 55 (Force conservative).

Une force conservative est une force telle que la variation d'énergie mécanique d'un objet sur laquelle elle s'exerce ne va dépendre que de ses positions initiale et finale.

La variation d'énergie mécanique sera indépendante du chemin parcouru.

3 Énergies potentielle et cinétique

L'énergie mécanique existe sous deux formes : potentielle et cinétique.

A Énergies potentielles

Nous en connaissons déjà une :

$$E_{\text{Potentielle de gravitation}} = mgh \quad (23.34)$$

En montant la pierre, nous accumulons de l'énergie.

De même, en tendant un arc ou en comprimant un ressort (ou en tirant dessus). Il existe un énergie potentielle élastique :

$$E_{\text{Potentielle}} = F\Delta r \quad (23.35)$$

Et si la force nécessaire pour tendre le ressort est constante :

$$E_{\text{Potentielle}} = \text{cste} \cdot \Delta r \quad (23.36)$$

Si on est dans le domaine "linéaire" du ressort, la loi de Hooke est applicable :

$$F = k\Delta r \quad (23.37)$$

Alors

$$E_{\text{Potentielle élastique}} = \frac{1}{2}k(\Delta r)^2 \quad (23.38)$$

a) Énergie potentielle et travail

Une énergie Potentielle se note " U ".

Toutes les forces ne sont pas associées à une énergie potentielle : par exemple les forces de frottements.

On dit d'une force qui est associée à une énergie potentielle qu'elle *dérive* d'un potentiel.

Si une force dérive d'un potentiel, on peut écrire la relation suivante :

Théorème 2 (Énergie potentielle et travail).

$$W = -U \quad (23.39)$$

où :

- $U = \text{l'énergie potentielle}$
- $W = \text{le travail de la force}$

Pour nous convaincre de la nécessité de ce signe "moins", considérons la montée d'un objet depuis le sol jusqu'à une hauteur " h ".

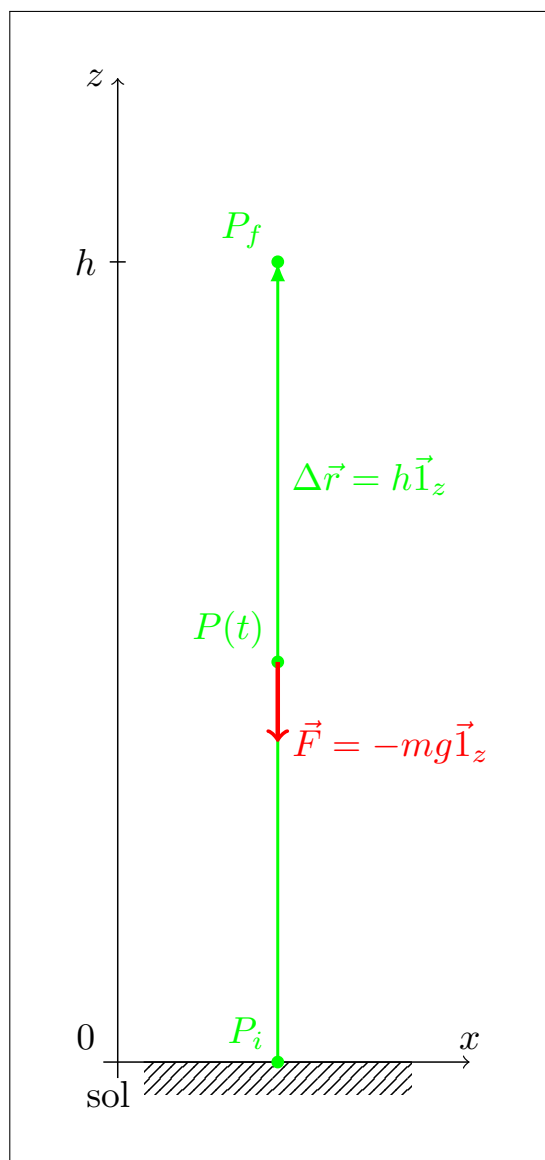


FIGURE 23.4 – Énergie potentielle et travail

Le déplacement est :

$$\Delta\vec{r} = h\vec{1}_z \quad (23.40)$$

La force est le poids :

$$\vec{F} = -mg\vec{1}_z \quad (23.41)$$

Le travail est donc :

$$W = \vec{F} \cdot \Delta\vec{r} = -mgh \quad (23.42)$$

La variation d'énergie potentielle est par contre un gain :

$$U = mgh \quad (23.43)$$

On retrouve bien la relation : $W = -U$.

B Énergie cinétique

L'énergie de vitesse est nommée énergie cinétique.

Les statistiques d'accidents montrent que la mortalité croît avec le carré de la vitesse des véhicules impliqués !

a) Calcul

(i) **Rappel MRUA** Nous pouvons calculer la vitesse du mobile au moment de l'impact.

$$\Delta r = 1/2at^2, v = a.t \text{ et donc } t = v/a$$

Et donc

$$\Delta r = 1/2v^2$$

Si nous remplaçons Δr par Δh dans la formule de l'énergie potentielle de gravitation, nous obtenons :

$$E_{cin.} = mg\Delta h = 1/2m.v^2 \quad (23.44)$$

C Application à la conservation de l'énergie

Nous savons que les énergies se transforment d'une forme dans une autre.

L'énergie potentielle s'est donc transformée en énergie cinétique.

$$E_{Tot.} = mg\Delta h(\text{enhaut}) = 1/2m.v^2(\text{enbas}) \quad (23.45)$$

En fait, l'énergie totale est restée constante à tout instant.

$$E_{Tot.} = mg\Delta h + 1/2m.v^2 \quad (23.46)$$

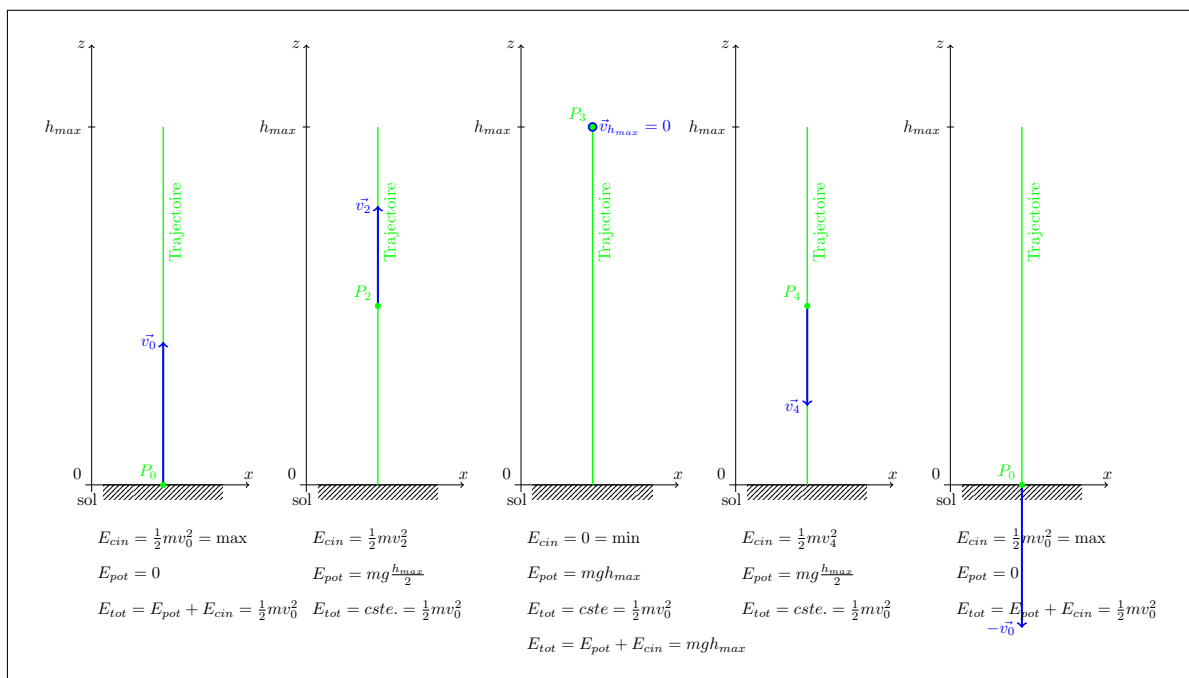


FIGURE 23.5 – Lancer d'une masse depuis le sol : bilan en énergie.

4 Exercices

Chapitre 24

Puissance

Sommaire

1	Illustration	212
2	Définition	212
3	Exemple	212
4	Autres unités	212
	A Chevaux	212
5	Exercices	213

Introduction

Au quotidien , nous disons d'un sportif qu'il est puissant, nous parlons d'une voiture puissante

Le concept de puissance permet de qualifier la production ou la consommation d'énergie de personnes ou de machines.

1 Illustration

Un haltérophile va soulever une masse de 100 kg à une hauteur de deux mètres en deux secondes.

Si un enfant doit effectuer la même tâche, il pourra le faire à condition de fractionner la masse à soulever (en "paquets" de 5 kg par exemple) et la même tâche lui prendra donc peut-être trois à quatre minutes (disons 200 s por fixer les idées) .

Le sportif comme l'enfant auront effectué le même travail mais en des temps différents.

On dira que le sportif est puissant.

2 Définition

L'exemple précédent permet de définir la puissance comme une énergie (ou un travail) sur la durée nécessaire pour produire ou consommer cette énergie.

La puissance se mesure en watt (W).

Définition 56 (Puissance). Une puissance est le rapport entre une énergie et la durée nécessaire pour produire ou consommer cette énergie.

$$P = \frac{E}{t} \quad (24.1)$$

où

- P = la puissance (W)
- E = l'énergie (J)
- t = la durée (s)

3 Exemple

Un moteur de grue permet de soulever du sol une masse de 300 kg jusqu'à une hauteur de 20 m en deux minutes.

Si on prend un "g" de $9,81 \text{ ms}^{-2}$, le travail effectué est de 58860 J.

La puissance du moteur sera de 490,5 W.

4 Autres unités

A Chevaux

Omniprésente au 19ème siècle, la traction animale a amené l'utilisation d'unités qui ne sont pas partie du système SI.

a) Cheval vapeur français

Typiquement, un cheval va soulever une masse de 75 kg d'une hauteur d'un mètre en une seconde. Si on prend un "g" de $9,80665 \text{ m s}^{-2}$ (3ème Conférence générale des poids et mesures (CGPM) de 1901), le travail effectué est de 735,498 75 J.

Définition 57 (Cheval vapeur français). Un cheval vapeur français vaut 735,5 W.

b) Cheval vapeur anglais (hp)

Dans le système impérial britannique, un cheval va soulever une masse de 180 livres (une livre = 0,453 592 37 kg) à une vitesse de 3,0555 pieds par seconde (un pied = 0,3048 m). On prend aussi un "g" de $9,80665 \text{ m s}^{-2}$.

On parle de "horse power" (hp).

Définition 58 (Cheval vapeur impérial (hp)). Un cheval vapeur impérial (hp) vaut 746 W.

c) Cheval vapeur de chaudière

Aux États-Unis, les américains utilisent le cheval vapeur de chaudière.

Définition 59 (Cheval vapeur de chaudière). Un cheval vapeur de chaudière vaut 9810 W.

5 Exercices

Chapitre 25

Quantité de mouvement

Sommaire

1	Définition et propriété	216
	A Définition	216
	B Conséquence	216
2	Forces internes, forces externes et quantité de mouvement	217
	A Contexte : systèmes de particules	217
	B Uniquement des forces internes	217
3	Chocs élastiques et chocs inélastiques	218
	A Chocs inélastiques	219
	B Chocs élastiques	219
	C Chocs et conservation de la quantité de mouvement	219
4	Exercices	219

Introduction

Les lois de conservation sont des lois très importantes en physique. Nous connaissons déjà quelques lois de conservation.

Ainsi, nous savons que sont conservées :

- la masse,
- la charge électrique,
- l'énergie.

Ici, nous allons découvrir une nouvelle grandeur associée à une loi de conservation : l'impulsion ou quantité de mouvement.

1 Définition et propriété

A Définition

Définition 60 (Quantité de mouvement (ou impulsion)). La quantité de mouvement ou impulsion est la grandeur vectorielle \vec{p} égale au produit de la masse et de la vitesse d'un corps.

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (25.1)$$

où :

- \vec{p} est la quantité de mouvement (kg m s^{-1}),
- m est la masse (kg)
- et \vec{v} est la vitesse (m s^{-1}).

B Conséquence

Réécrivons le principe fondamental de la dynamique sous sa forme vectorielle :

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (25.2)$$

La définition cinématique de l'accélération nous permet d'écrire :

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (25.3)$$

Et donc

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (25.4)$$

Propriété 5.

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (25.5)$$

Une force (totale non nulle) va donc être associée à une variation de la quantité de mouvement dans le temps.

Des changements rapides de vitesse, comme lorsqu'un ballon rebondit sur un mur, vont donc être associés à des forces importantes.

À contrario, si la force nette s'exerçant sur un corps est nulle, la quantité de mouvement sera constante :

$$\vec{F} = \vec{0} \Leftrightarrow \frac{d\vec{p}}{dt} = 0 \quad (25.6)$$

Dans ce cas on dit que la quantité de mouvement est conservée.

Propriété 6 (Conservation de la quantité de mouvement 1).

Si la force nette s'exerçant sur un corps est nulle, alors la quantité de mouvement de ce corps est constante.

$$\vec{F} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{p} = cste. \quad (25.7)$$

2 Forces internes, forces externes et quantité de mouvement

Si un seul corps est considéré, la notion d'impulsion ne nous apprend pas grand chose. Son grand intérêt se trouve dans l'étude de système de corps.

A Contexte : systèmes de particules

L'étude de "systèmes de particules" donne tout son sens à la notion de quantité de mouvement.

Définition 61 (Systèmes de particules).

Nous entendrons désormais par "système de particules" un ensemble de corps dont l'étude peut se ramener à l'étude d'un ensemble de "points matériels".

Un ensemble de "masses ponctuelles" sera donc un système de particules.

Voici quelques exemples d'objets (au sens large) qui peuvent être traités comme des "systèmes de particules" :

- Les étoiles d'une galaxie isolée,
- les étoiles d'un amas globulaire,
- l'étoile, les planètes et les lunes d'un système planétaire,
- des atomes et molécules dans un gaz,
- des poussières dans une ampoule fermée,
- des billes sur un billard (on est alors à deux dimensions).

B Uniquement des forces internes

Considérons maintenant le cas où il n'y a pas de force extérieure sur le système de particule.

C'est une approximation qui est assez souvent réalisée.

Les particules ne subissent donc des forces ne résultant que de la présence des autres particules.

Alors, la particule " p_1 " subit uniquement des forces des particules " p_2 ", " p_3 ", ..., " p_n ".

La particule " p_2 ", à son tour, subit uniquement des forces des particules " p_1 ", " p_3 ", ..., " p_n ".

a) Action réciproque

La particule " p_1 " exerce sur " p_2 " une force " $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ ".

La particule " p_2 " exerce sur " p_1 " une force " $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ ".

Mais le principe d'action réciproque nous apprend que :

$$\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2} \quad (25.8)$$

Ce raisonnement peut être étendu à *toutes* les paires de particules.

Mais alors pour *toutes* les forces internes, à chaque force d'une particule sur une autre va correspondre une force égale, de même direction et de sens opposé correspondant à la force de la deuxième particule sur la première.

C'est-à-dire :

$$\forall i, j : F_{ij} = -F_{ji} \quad (25.9)$$

b) Somme de forces internes

Faisons la somme de toutes les forces internes. La particule "i" agit sur "n - 1" particules. Mais la force de "i" sur "i" est égale à zéro :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n F_{ij} \quad (25.10)$$

Cette somme, à cause de la relation 25.9 p. 218, sera nécessairement égale à zéro !

$$\sum_i \sum_j F_{ij} = 0 \quad (25.11)$$

Pour s'en convaincre, on peut écrire toutes ces forces dans un tableau et appliquer la relation 25.9 p. 218.

Donc, si les seules forces considérées sont des forces internes, la somme des forces vaut zéro.

$$\sum F = 0 \quad (25.12)$$

c) Principe d'inertie

Si la somme des forces s'appliquant sur un système est nulle, le principe d'inertie est d'application.

$$\sum F = 0 \Leftrightarrow \vec{v} = cste. \quad (25.13)$$

Cependant, le principe d'inertie s'applique à l'ensemble du système. C'est-à-dire à son centre de masse.

Les particules individuelles auront peut-être des comportements complexes. Mais l'ensemble du système aura, lui, un comportement très simple : il sera en MRU.

d) Variation de vitesse

Si le centre de masse du système est en MRU, la variation de vitesse du centre de masse est nulle.

$$MRU \Leftrightarrow \Delta v = 0 \quad (25.14)$$

Si la variation de vitesse du centre de masse est nulle, la variation de l'impulsion l'est aussi.

Ceci est cohérent avec l'équation 25.7 p. 217.

Loi 11 (Conservation de l'impulsion et forces internes).

Si les seules forces s'appliquant à un système sont des forces internes, la quantité de mouvement du système est constante.

3 Chocs élastiques et chocs inélastiques

Lorsque deux solides entrent en contact, deux situations sont possibles.

Leur choc sera

- élastique
- ou inélastique.

A Chocs inélastiques

Imaginons que les deux objets soient des billes d'acier infiniment dures.

Les deux objets vont s'entrechoquer, échanger de l'énergie mécanique, puis continuer leur trajectoire.

Cependant, l'énergie mécanique totale ne sera pas modifiée.

Ce type de choc est appelé "*choc inélastique*".

B Chocs élastiques

Imaginons maintenant le choc entre deux boules de plasticines.

Les deux objets vont s'entrechoquer, échanger de l'énergie mécanique, *se déformer*, puis continuer (peut-être) leur trajectoire.

Chaque boule va exercer des forces qui vont déformer l'autre boule.

L'énergie mécanique totale sera modifiée. Une partie de cette énergie mécanique va être transformée en énergie interne dans la déformation. Les deux "boules" seront plus chaudes après la rencontre.

L'énergie *totale* du système sera constante mais pas l'énergie mécanique totale.

Ce type de choc est appelé "*choc élastique*".

a) Quantité de mouvement et chocs élastiques

Si l'énergie mécanique n'est pas conservée. Par contre, dans ce système de deux particules, la quantité de mouvement va être conservée puisque les seules forces en jeu sont des forces entre les parties du système.

Des calculs impliquant $m\vec{v}$ seront possibles.

C Chocs et conservation de la quantité de mouvement

Dans les deux types de chocs, la quantité de mouvement sera conservée.

Loi 12 (Choc et conservation de la quantité de mouvement). *Dans un choc impliquant "n" objets, la quantité de mouvement totale avant et après le choc sera constante.*

$$m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} + \dots + m_n v_{ni} = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f} + \dots + m_n v_{nf} \quad (25.15)$$

où :

- les m sont les masses des objets (kg),
- les v_i sont les vitesses initiales avant le choc (m s^{-1}),
- les v_f sont les vitesses finales après le choc (m s^{-1}).

Cette loi est valable pour toute interaction, pas uniquement pour les chocs.

4 Exercices

Chapitre 26

Moment angulaire

Sommaire

1	Définition	222
2	Exemples	222
3	exercices	222

Introduction

1 Définition

2 Exemples

Unités :

Application :

3 exercices

Septième partie

Modèles de l'univers et gravitation universelle

Chapitre 27

Tailles de l'univers

Sommaire

1	Dimensions de l'univers	226
2	Caractéristiques des planètes	226

Introduction

Nous recommandons ici la lecture du texte extrait de “patience dans l’azur”.

Réponses aux questions

- diamètre du Soleil : $1,4 \cdot 10^6 \text{ km}$,
- diamètre de la terre : $1,2 \cdot 10^4 \text{ km}$,
- distance terre-Soleil : $1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$,
- à l’ échelle : si le Soleil fait 1m, diviser par $1,4 \cdot 10^9$: 107m
- distance de l’ étoile la plus proche : $4 \cdot 10^{13} \text{ km}$,
- à l’ échelle : si le Soleil fait 1m, diviser par $1,4 \cdot 10^9$: $2,5 \cdot 10^4 \text{ km}$

1 Dimensions de l’univers

Le diamètre du Soleil est d’approximativement 1 392 000 km. Le diamètre de la Terre est proche de 12 740 km. Nous savons que la lumière du Soleil met approximativement 8 minutes pour nous atteindre.

Q. : Si le Soleil était un ballon de 1 m de diamètre, la Terre serait une bille d’un diamètre de 9 mm. Quelle serait la distance entre les 2 astres ?

R. : 100 m

Q. : A quelle distance serait alors l’étoile la plus proche ?

R. : 25 000 km

Tailles : Tableau

Biosphère :	10 km	
Météores :	50 km	
Lune :	380 000 km	($3,8 \cdot 10^5$)
Mars :	$77 \cdot 10^6 \text{ km}$	
Pluton :	6 milliards de km	
Etoile la plus proche :	4,5 années lumières (a-l)	
Centre de la voie lactée :	30 000 a-l	
Diamètre de la voie lactée :	100 000 a-l	
La galaxie d’Andromède :	2 millions d’a-l	
La galaxie la plus lointaine connue :	10-15 milliards d’a-l	
nombre d’étoiles visibles à l’œil nu :		$5 \cdot 10^3$
nombre de grains de sable dans un 1 cm^3 :		$5 \cdot 10^3$
nombre d’étoiles dans la voie lactée :		$4 \cdot 10^{11}$
nombre de galaxies dans l’univers :		$1,3 \cdot 10^{11}$
nombre d’étoiles dans l’univers :		$5 \cdot 10^{22}$
nombre de grains de sable sur toutes les plages de la Terre :		$5 \cdot 10^{21}$

2 Caractéristiques des planètes

Voir dossier.

Chapitre 28

Géocentrisme et héliocentrisme

Sommaire

1	Le modèle géocentrique	228
A	Thalès de Milet (600 avant J.-C.)	228
B	Anaximandre (550 avant J.-C.)	228
C	Pythagore (530 avant J.-C.)	228
D	Anaxagore (450 avant J.-C.)	229
E	Hipparque (150 avant J.-C.)	230
F	Ptolémée (120 après J.-C.)	230
G	Conclusions	231
2	Le modèle héliocentrique	231
A	Aristarque de Samos (IIIe siècle avant J.C.)	231
B	Nicolas Copernic (Début XVIe siècle)	231
C	Tycho-Brahé (Fin XVIe siècle)	232
D	Kepler (1571-1630)	232
E	Galilée (1564-1642)	234

Introduction

Vous trouverez ici un court historique de la cosmologie occidentale : Comment "s'organisait" l'Univers selon les Anciens.

Les deux modèles principaux qui se sont "affrontés" au cours de l'histoire sont le géocentrisme et l'héliocentrisme.

Nous évoquons les principaux acteurs dans cet affrontement pour montrer une progression dans les points de vue.

1 Le modèle géocentrique

La Terre est fixe et constitue le centre du monde, les autres planètes tournent autour d'elle.

A Thalès de Milet (600 avant J.-C.)

Ce philosophe d'Asie Mineure voit la Terre comme une plate-forme reposant sur les océans qui, eux-mêmes, s'étendraient jusqu'à la voûte céleste.

B Anaximandre (550 avant J.-C.)



FIGURE 28.1 – La Terre est un cylindre chez Anaximandre.

Cet élève de Thalès de Milet constate que, si on se déplace à la surface de la terre ferme du nord vers le sud, la Terre est toujours courbée dans le même sens. Il en conclut que la Terre flotte librement dans l'espace sans aucun support. Il suppose que la Terre ressemble à un cylindre de hauteur finie et dont l'axe serait orienté suivant la direction est-ouest (Fig. 28.1 p. 228).

C Pythagore (530 avant J.-C.)

Ce mathématicien vivant au sud de l'Italie observe que les navires sur la mer n'émergent que progressivement à l'horizon, au fur et à mesure qu'ils se rapprochent de la terre ferme et cela, quelle que soit la direction d'où ils viennent. La surface des mers serait sphérique et la Terre, dans l'espace, serait une grosse sphère (globe). Il fut le premier à attirer l'attention sur le fait qu'en dehors de la Lune et du Soleil, il existe 5 autres planètes de même forme que la Terre : Mercure (mercredi), Vénus (vendredi), Mars (mardi), Jupiter (jeudi) et Saturne (samedi). Partant de ces observations, il suppose que le monde serait formé d'un ensemble de sphères concentriques imbriquées les unes dans les autres et centrées sur la Terre immobile, chaque sphère étant animée d'un mouvement perpétuel, la dernière sphère étant celle des étoiles (théorie des sphères pythagoriciennes). L'ordre par rapport à la Terre serait Lune, Mars, Vénus, Soleil, Mercure, Jupiter, Saturne, Etoiles.

D Anaxagore (450 avant J.-C.)

Il confirme la théorie des sphères pythagoriciennes en observant la Lune. Cette dernière est un corps sphérique non lumineux qui tourne autour de la Terre et est éclairée par le Soleil. Le Soleil tourne également autour de la Terre mais à une plus grande distance (Fig. 28.2 p. 229)

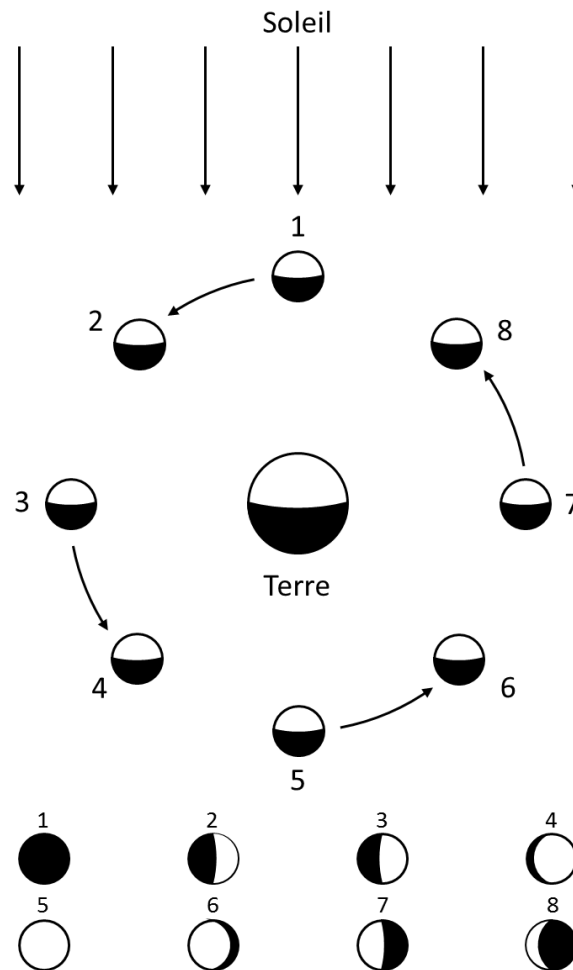


FIGURE 28.2 – Les phases de la Lune selon Anaxagore.

Lors de la nouvelle lune (1), la Lune se trouve entre la Terre et le Soleil.

Au début de la lunaison (2), on observe le 1er quartier.

Lors de la pleine lune (5), la Terre se trouve entre la Lune et le Soleil.

A la fin de la lunaison (8), on observe le dernier quartier.

Un cycle complet dure 29 jours et 1/2. C'est sur cette base qu'est né le premier calendrier avec 1 mois = 30 jours (± 1 jour).

E Hipparque (150 avant J.-C.)

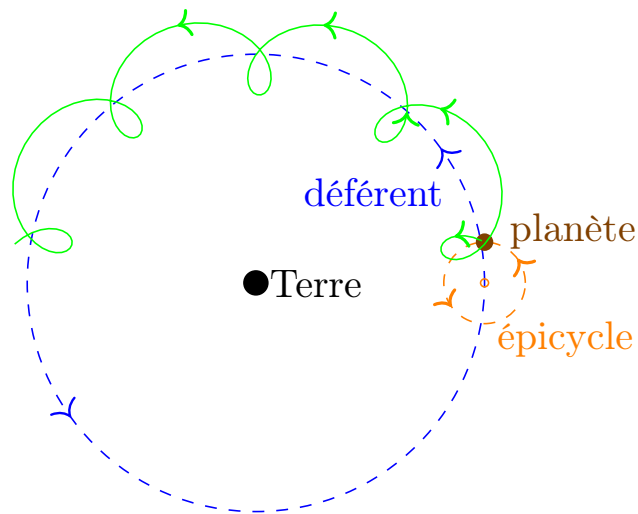


FIGURE 28.3 – Les épicycles selon Hipparque.

Il constate que le Soleil, en tournant autour de la Terre, se déplace sur une trajectoire circulaire excentrique par rapport à la Terre (Fig. 28.4 p. 230) .

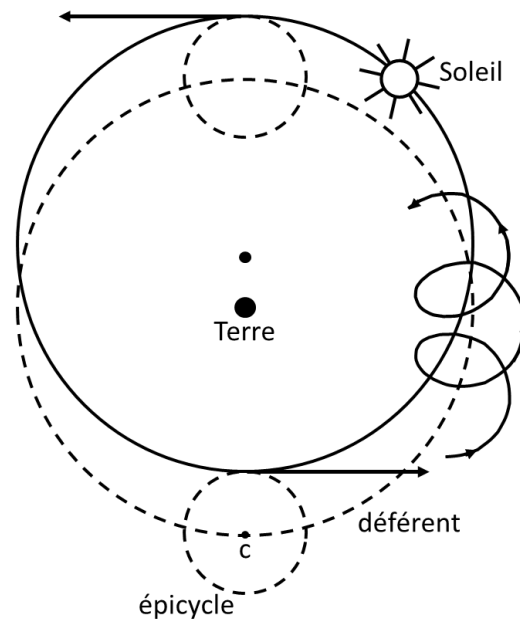


FIGURE 28.4 – Le Soleil selon Hipparque.

De plus, les planètes, sur leur trajectoire, décrivent des cercles. C'est le modèle des épicycles (Fig. 28.3 p. 230) .

F Ptolémée (120 après J.-C.)

Il confirme la thèse d'Hipparque et introduit une précision supplémentaire. Mercure et Venus, qui restent toujours au voisinage du Soleil, suivent leur trajectoire selon un épicycle dont le centre se situe sur une droite reliant la Terre au Soleil (Fig. 28.5 p. 231) .

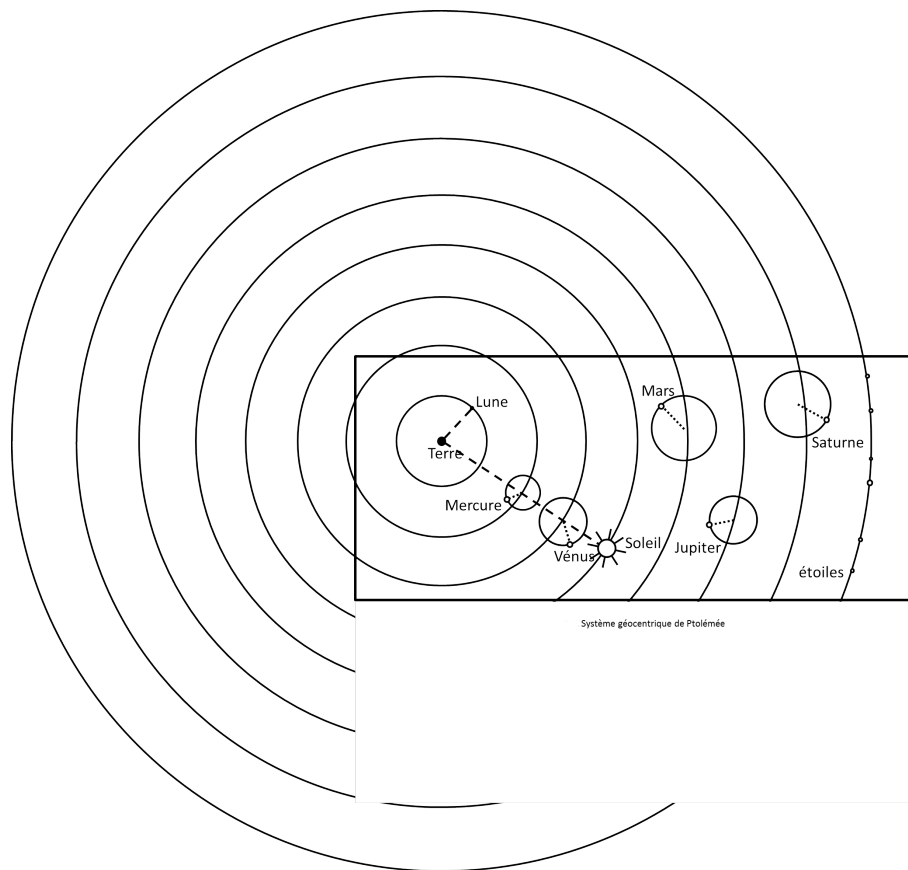


FIGURE 28.5 – Les épicycles selon Ptolémée.

G Conclusions

Le géocentrisme se base sur 3 postulats :

- la Terre est immobile et elle est le centre du monde ;
- les astres se déplacent sur des épicycles par rapport à la Terre ;
- il existe 2 mondes différents dans l'Univers : les corps terrestres et les corps célestes.

2 Le modèle héliocentrique

Le Soleil est le centre de l'Univers et les autres planètes tournent autour de lui.

A Aristarque de Samos (III^e siècle avant J.C.)

Il disait que :

- la Terre tourne autour d'un axe nord-sud en 23h56' (en réalité 23 h 56' 04,09", c'est un jour sidéral) ;
- la Terre tourne autour du Soleil ;
- l'axe de rotation de la Terre est incliné par rapport à l'orbite terrestre de 23°.

Mais il ne fut pas écouté car le modèle géocentrique était trop bien implanté.

B Nicolas Copernic (Début XVI^e siècle)

Il reprend l'idée des sphères concentriques de Pythagore en plaçant le Soleil au centre du système.

Il disait que :

- le Soleil est immobile et au centre de l'Univers ;
- les planètes (Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter et Saturne) tournent autour du Soleil suivant des trajectoires propres ;
- la sphère des étoiles est fixe ; leur mouvement proviendrait de la rotation de la Terre sur elle-même.

Ce mathématicien et astronome polonais utilise le terme "orbite" pour définir la forme des trajectoires parcourues par les planètes. Ces trajectoires sont circulaires et uniformes.

C Tycho-Brahé (Fin XVI^e siècle)

Ce Danois décida de faire un relevé précis des positions successives de toutes les planètes afin d'établir de nouvelles tables astronomiques. Il détermina ainsi la longueur de l'année à une fraction de seconde près et contribua à la réforme du calendrier.

Il est partisan d'un modèle géo-héliocentrique : les planètes tournent autour du Soleil qui lui-même tourne autour de la Terre qui est immobile. La Terre reste pour lui le centre de l'Univers. Ses arguments sont basés sur l'observation : Il n'observe pas de parallaxe des étoiles à six mois d'écart.

D Kepler (1571-1630)

Ce mathématicien, élève de Tycho-Brahé, remplaça les anciennes trajectoires circulaires de Pythagore par des trajectoires elliptiques. Il en tira trois lois :

a) Loi n° 1

Chaque planète se déplace sur une orbite elliptique dont le Soleil occupe un des foyers (Fig. 28.6 p. 232).

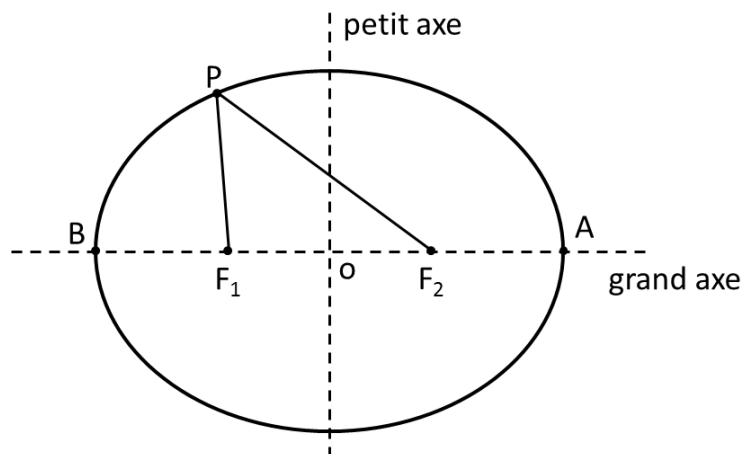


FIGURE 28.6 – Une ellipse : les distances depuis ses foyers jusqu'à un point de sa périphérie.

N.B. Une ellipse est constituée par un ensemble de points P tels que la somme des distances par rapport aux foyers ($PF_1 + PF_2 = AB$).

o est le centre de l'ellipse.

F_1 et F_2 sont les foyers de l'ellipse.

Si le Soleil est en F_1 , P est le périhélie ou périhélie (point le plus proche du Soleil) et A est l'apogée ou aphélie (point le plus éloigné du Soleil).

b) Loi n° 2

Une ligne reliant le Soleil à la planète balaie des aires égales en des laps de temps égaux (Fig. 28.7 p. 233)

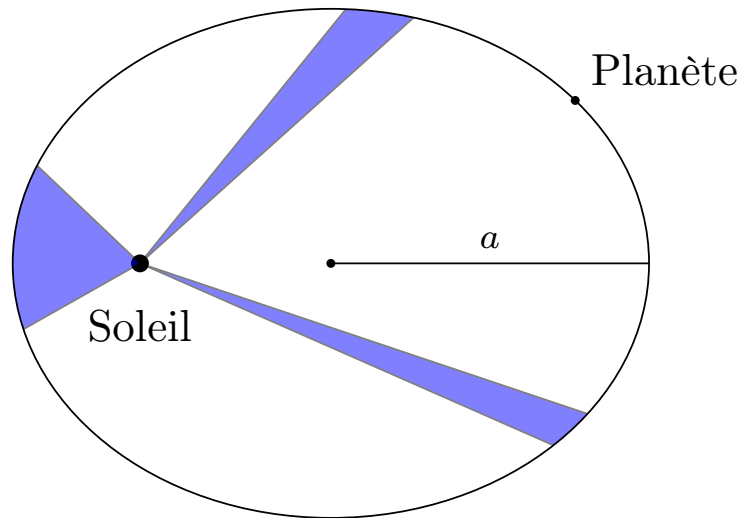


FIGURE 28.7 – Une planète balaie des aires égales en des temps égaux.

Lorsqu'une planète est proche du Soleil, sa vitesse est plus grande que lorsqu'elle en est éloignée.

c) Loi n° 3

Le carré de la période de révolution T est proportionnel au cube du rayon moyen R :

$$\frac{T^2}{R^3} = \text{constante pour toutes les planètes tournant autour du Soleil}$$

avec

$$R = \frac{r_{\min} + r_{\max}}{2}$$

Prenons un exemple : Jupiter est à une distance moyenne du Soleil qui est approximativement cinq fois celle de la Terre. La distance moyenne Terre-Soleil est appelée une unité astronomique : 1 ua.

Et donc :

$$\frac{T_{\text{Terre}}^2}{R_{\text{Terre}}^3} = \frac{T_{\text{Jupiter}}^2}{R_{\text{Jupiter}}^3}$$

$$\frac{(1\text{an})^2}{(1\text{ua})^3} = \frac{T_{\text{Jupiter}}^2}{(5\text{ua})^3}$$

$$T_{\text{Jupiter}}^2 = 5^3$$

$$T_{\text{Jupiter}} = \sqrt{125} \approx 11\text{ans}$$

Ce qui correspond bien au temps mis par Jupiter pour effectuer une révolution autour du Soleil.

Ce qui est remarquable, c'est que cette loi peut s'appliquer dès qu'un objet est suffisamment massif pour que d'autres soient en orbite autour de lui (comme Jupiter et ses lunes, ou encore comme la Terre, la Lune et les satellites artificiels). La constante va cependant être différente selon le corps central. Mais ceci, comme les lunes de Jupiter n'avaient pas encore été observées, et qu'il faudra attendre le vingtième siècle pour que la Terre ait des satellites artificiels, Kepler ne le savait pas!

d) En résumé

Ces 3 lois qui s'appliquent aux planètes et à leurs satellites restent empiriques. Elles disent comment les planètes tournent autour du Soleil mais sans en donner les causes. Elles laissent cependant entendre qu'un principe commun est à l'œuvre pour toutes les planètes du Système solaire.

E Galilée (1564-1642)

Ce philosophe et astronome italien insistait surtout sur l'importance de partir de l'expérience pour extraire des hypothèses et non pas de se baser sur des idées préconçues.

Son conflit avec l'Église dura plus de 20 ans. Après son procès, il resta en résidence surveillée pendant les douze dernières années de sa vie.

Il construisit une lunette astronomique et observa notamment la surface irrégulière de la Lune et les taches sur le Soleil, ce qui remit en cause la perfection des astres supposée par certains.

Il fut un des premiers à observer les quatre plus grosses lunes de Jupiter et leurs mouvements autour de la planète géante. Ce qui suggérait, entre autres, que la Lune tournait autour de la Terre. Ces quatre lunes (Io, Europe, Ganymède et Callisto) sont d'ailleurs appelées les lunes galiléennes de Jupiter.

Chapitre 29

La gravitation universelle

Sommaire

1	Découverte de la loi de Newton (17ème siècle)	236
	A Question	236
	B Observations	236
	C Hypothèse : Fin de la dualité Terre-Ciel	236
	D Conséquences	238
2	Loi de la gravitation universelle	239
	A Formulation	239
	B Conséquences	239
	C Applications	239
3	Applications	240
	A La masse de la Terre	240
	B La masse du Soleil	241
	C Autres calculs possibles	242

Introduction

Ici, nous développons la formulation de la loi de gravitation universelle.

Après avoir nous être "mis dans les bottes de Newton" et avoir suivi le cheminement de son raisonnement pour découvrir la loi, nous allons énoncer sa loi et en voir quelques conséquences.

Nous allons ainsi "peser" la Terre, le Soleil ...

1 Découverte de la loi de Newton (17ème siècle)

A Question

La question que Newton se pose est la suivante : "Comment se fait-il que la Terre entraîne la Lune avec elle dans son mouvement annuel autour du Soleil ?"

B Observations

Newton raisonne ensuite sur des observations (la fameuse pomme) :

"Les corps lâchés à proximité de la surface de la Terre tombent. En l'absence de frottements, le mouvement est un MRUA dont la trajectoire est verticale et caractérisé par une accélération "g" identique pour tous les objets."

La valeur de g varie avec l'altitude et la latitude.

Newton considère que la Terre exerce une force d'attraction (pesanteur) sur les objets situés à proximité de sa surface; cette force est dirigée vers le centre de la Terre et vaut $P = m \cdot g$. Son intensité est proportionnelle à la masse des objets attirés.

C Hypothèse : Fin de la dualité Terre-Ciel

La Terre attire la Lune comme elle attire tous les corps matériels situés à sa surface. Les corps terrestres et les corps célestes obéissent aux mêmes lois.

La Lune est sans doute un corps matériel de même type que les corps terrestres.

Pour tester cette hypothèse, basons-nous sur deux exemples :

a) Trajectoire d'un objet lancé obliquement à la surface de la Terre.

Lorsqu'on lance obliquement un projectile à la surface de la Terre (Fig. 29.1 p. 237), on observe la trajectoire 1. En l'absence de pesanteur, le mouvement serait de type **MRU** comme sur la trajectoire 2.

Si on admet que la Lune se meut dans le vide, et si la Lune n'était pas attirée par la Terre, elle devrait être animée d'un MRU et s'éloignerait continuellement de la Terre, ce qui n'est pas le cas. La pesanteur doit donc entraver son MRU.

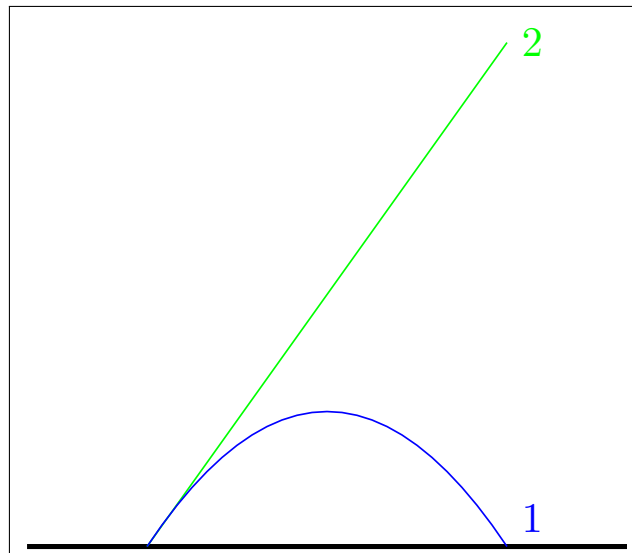


FIGURE 29.1 – Trajectoires avec et sans gravité lors d'un lancer depuis le sol.

b) Trajectoire d'un corps lancé horizontalement à partir d'une grande hauteur au-dessus de la surface de la Terre avec des vitesses différentes

Newton fait ensuite "l'expérience de pensée" suivante : Il imagine de lancer des objets depuis une très haute montagne en leur donnant une vitesse horizontale d'abord nulle puis de plus en plus grande.

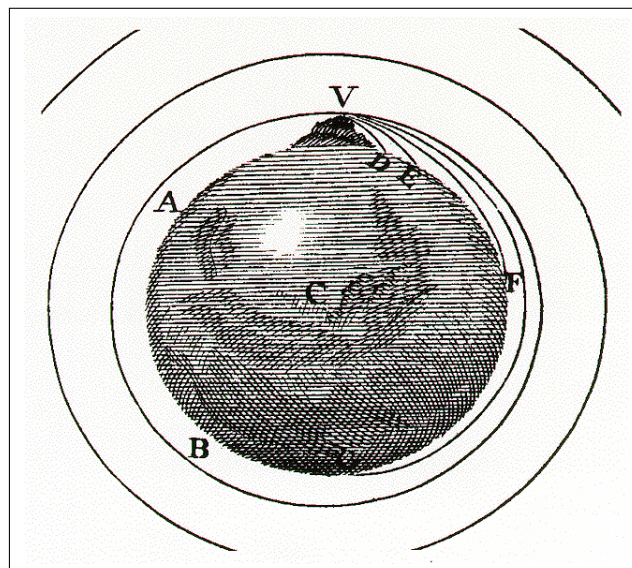


FIGURE 29.2 – Trajectoires d'un objet lancé d'une grande hauteur selon Newton.

Soit un corps lancé à une distance très grande de la surface de la Terre, \perp à la verticale avec des vitesses \pm grandes (Fig. 29.2 p. 237).

Si la vitesse initiale était nulle ou trop petite, le corps tomberait suivant la verticale. C'est ce qu'on appelle une "chute libre".

Plus la vitesse initiale est grande (D et E sur la figure 29.2), plus la trajectoire du corps sera allongée. On est alors dans le cas du "tir horizontal".

Si la vitesse initiale grandit encore, l'objet commence à tomber "sur le côté" de la Terre (F sur la figure 29.2) .

Pour des vitesses initiales très grandes, la trajectoire du corps devient presque circulaire (en fait elliptique).

Or la lune ne tombe jamais sur la Terre, elle la suit dans son déplacement.

c) Conclusions

La trajectoire de la Lune est une trajectoire elliptique dont l'équilibre dépend de 2 causes :

- la tendance naturelle à perpétuer un mouvement initial : si cette seule cause était déterminante, la Lune s'éloignerait continuellement de la Terre.
- la tendance à se rapprocher de la surface de la Terre sous l'effet de la pesanteur : la Lune aurait tendance à s'écraser sur la Terre si seule la force de gravité était en jeu.

D Conséquences

a) La Terre attire la Lune

Considérant que la Lune reste "attachée" à la Terre en décrivant autour d'elle une trajectoire quasi circulaire, Newton conclut qu'une force attractive devrait lui être appliquée pas trop grande pour ne pas l'entraîner de son orbite vers la Terre ni trop petite car elle ne ferait pas dévier suffisamment la Lune d'un trajet en ligne droite.

La Terre exerce sur la Lune une force F_{T-L} d'attraction gravifique, analogue à la force de pesanteur que subit un corps quelconque près de la surface de la Terre, et qui est orientée vers le centre de la Terre. Sa grandeur est proportionnelle à la masse m_L de la Lune et est inversement proportionnelle au carré de la distance r_{T-L} qui sépare la Lune du centre de la Terre. La grandeur de cette force est donc donnée par la relation

$$F_{T-L} = k \frac{m_L}{r_{T-L}^2} \text{ où } k = \text{ une constante}$$

b) Le Soleil attire les planètes

Puisque le mouvement des planètes autour du Soleil est analogue au mouvement de la Lune autour de la Terre, nous admettons que le Soleil exerce sur chacune des planètes une force F_{S-P} d'attraction gravifique qui est orientée vers le Soleil. Sa grandeur est proportionnelle à la masse M_P de la planète considérée et inversement proportionnelle au carré de la distance R_{S-P} qui la sépare du Soleil :

$$F_{S-P} = K \frac{M_P}{R_{S-P}^2} \text{ où } K = \text{ une autre constante}$$

c) Lien avec les lois de Kepler : pourquoi une loi en $1/d^2$

Comme la force de gravité décroît avec la distance séparant les deux objets étudiés, l'expression donnant la grandeur de cette force doit être inversement proportionnelle à cette distance. Kepler avait imaginé une force en " $1/d$ ".

Mais Newton connaît la première loi de Kepler.

Rappelons la première loi de Kepler :

Chaque planète se déplace sur une orbite elliptique dont le Soleil occupe un des foyers (Fig. 29.3 p. 239)

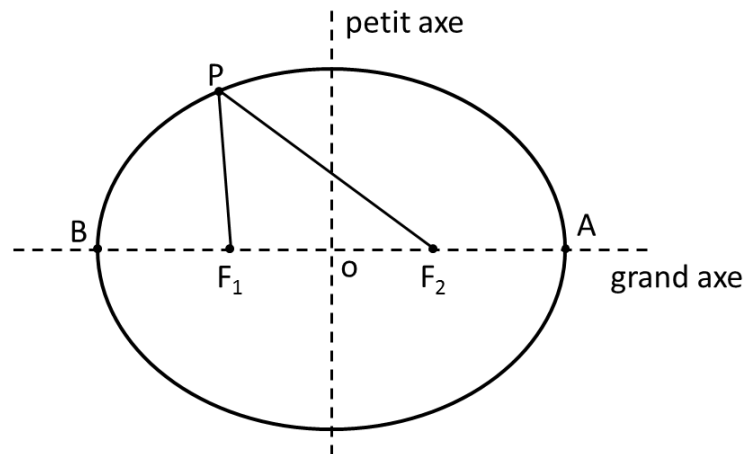


FIGURE 29.3 – Une orbite elliptique : le soleil occupe un des foyers (F_1 ou F_2) et pas le centre O .

Soit d la distance séparant deux corps dont l'un est beaucoup plus massif que l'autre, si la loi d'attraction était en $1/d$, l'objet le plus massif devrait se trouver au centre de l'ellipse. Si, par contre, la force est en $1/d^2$, l'objet le plus massif est à un des foyers. Comme le Soleil est à un des foyers, Newton a déterminé que la loi d'attraction devait être en $1/d^2$!

2 Loi de la gravitation universelle

A Formulation

Deux corps matériels ponctuels de masse m et m' s'attirent mutuellement avec une force dont l'intensité est proportionnelle à chacune de ces masses et inversement proportionnelle au carré de la distance r qui les sépare.

Cette force vaut :

$$F = G \frac{m \cdot m'}{r^2} \text{ où } G \text{ est une C}^{\text{ste}} \text{ universelle valant } 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2 \quad (29.1)$$

avec F en N, m et m' en kg et r en m².

B Conséquences

- Tous les corps matériels exercent les uns sur les autres une force gravifique.
- La loi de l'attraction universelle est une loi d'attraction à distance qui s'exerce même à travers le vide.
- Cette loi est valable où que se trouve les corps considérés dans l'Univers.
- La force d'attraction gravitationnelle n'a pas de limite mais elle décroît rapidement lorsque la distance entre les corps augmente (loi en $1/d^2$).
- La gravité n'est observable que si un des corps est très massif.

C Applications

a) La vitesse orbitale des satellites

Les satellites tournent autour de la Terre conformément aux lois de Kepler. Si l'on pense au fait que la Lune a une période de révolution de 27,3 jours, on peut s'étonner que Spoutnik I, 1er

satellite artificiel mis en orbite en 1957 par les Soviétiques, avait une période de révolution de 96 minutes.

Cela provient du fait que ce satellite artificiel était beaucoup plus près de la Terre que notre satellite naturel. Le "pouvoir attractif" de la Terre y est donc beaucoup plus grand et pour que Spoutnik puisse rester en orbite, il fallait qu'il se déplace à une vitesse très grande. Il suivait une trajectoire elliptique très allongée, descendant jusqu'à environ 230 km et montant jusqu'à environ 900 km au-dessus de la surface de la Terre.

b) Les satellites géostationnaires et géosynchrones

Un satellite géostationnaire tourne autour de la Terre en gardant une position (pratiquement) constante par rapport à celle-ci. Il est donc particulièrement adapté pour relayer les télécommunications et les émissions de télévision sans variations de puissance.

Le premier satellite géostationnaire commercial était "Early Bird" (USA, 1965). Son altitude était de 35600 km.

Pour rendre un satellite géostationnaire, on doit le placer sur une orbite équatoriale circulaire, à une altitude assez grande pour que sa période de révolution T soit égale à un jour sidéral. Il tourne alors à la même vitesse angulaire que la Terre et reste donc au-dessus d'un lieu donné sur la surface de la Terre .

Les lancements principaux ont été effectués par la NASA (USA) de Cap Canaveral (Floride) et par l'Agence spatiale Européenne de Kourou (Guyane française).

Un satellite géosynchrone a également une période de rotation égale à un jour sidéral, mais son orbite est inclinée par rapport à l'Équateur et elle est généralement elliptique . Il se présente donc chaque jour à la même heure au-dessus du même endroit, mais n'y reste pas continuellement.

3 Applications

Un des "drames" de la vie de Newton fût que sa constante de gravitation universelle "G" ne fût déterminée qu'après sa mort par Cavendish. Certes il estima assez bien la valeur de "G" mais la technologie qui permit de mesurer cette valeur n'était pas assez précise de son vivant.

A La masse de la Terre

Le calcul qui suit a, en son temps, fait la "une" du "Times" de Londres : "On a pesé la Terre".

Ce calcul repose sur un raisonnement très simple : Le poids d' un objet à la surface de la Terre est causé par l' interaction de gravité entre cet objet et la Terre. La force "poids" de ce corps et la force de gravité entre le corps et la Terre sont égales.

— Données :

— La masse de l'objet m

— la distance entre l'objet et le centre de la Terre est déterminé via la circonférence : $Circ \approx 40\,000 \text{ (km)} = 4 \cdot 10^7 \text{ (m)}$

— $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

— Inconnues : La masse de la Terre = M_T

— Formules :

— $P = m \cdot g$ et $P = G \cdot \frac{m \cdot M_T}{d^2}$

— $R = \frac{Circ}{2\pi}$

— Solution :

— $d = R = \frac{Circ}{2\pi} = \frac{4 \cdot 10^7}{2\pi} \approx 6,366 \cdot 10^6 \text{ m}$

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

- $g = G \cdot \frac{M_T}{d^2}$
- $M_T = g \cdot \frac{d^2}{G}$
- $M_T = 9,81 \cdot \frac{(6,366 \cdot 10^6)^2}{6,67 \cdot 10^{-11}} \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

B La masse du Soleil

La force centripète F_C qui maintient la Terre sur son orbite autour du Soleil est la force de gravité F_G . Il faut donc évaluer ces deux forces comme on l'avait fait pour calculer la masse de la Terre.

- Données :
 - La masse de la Terre m_T
 - La masse du Soleil M_S
 - la distance entre le Soleil et la Terre est approximativement : $R \approx 150\,000\,000 \text{ (km)} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ (m)}$
 - La période de révolution de la Terre autour du Soleil = 1 an = $365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s} = 3,1536 \cdot 10^7 \text{ s}$
- Inconnues : M_S
- Formules :
 - $F_G = G \cdot \frac{m_T \cdot M_S}{R^2}$
 - $F_C = m_T \omega^2 R$
 - $\omega = \frac{2\pi}{T}$ (la vitesse angulaire)
- Solution :
 - $F_C = m_T R 4\pi^2 \frac{1}{T^2}$
 - $F_C = F_G$
 - $m_T R 4\pi^2 \frac{1}{T^2} = G \cdot \frac{m_T \cdot M_S}{R^2}$
 - $R 4\pi^2 \frac{1}{T^2} = G \cdot \frac{M_S}{R^2}$
 - $M_S = 4\pi^2 \frac{1}{G} \frac{R^3}{T^2}$

Remarquons ici que la masse du Soleil est inversement proportionnelle à la constante de Kepler ($\frac{T^2}{R^3}$)! (voir le point **a**) p. 241)

 - $M_S = 4\pi^2 \frac{1}{G} \frac{1}{K_{\text{Kepler}}}$
 - $M_S = 4 \cdot 9,87 \frac{1}{6,67 \cdot 10^{-11}} \frac{(1,5 \cdot 10^{11})^3}{(3,1536 \cdot 10^7)^2}$
 - $M_S = 4 \cdot 9,87 \frac{1}{6,67 \cdot 10^{-11}} \frac{(1,5)^3 \cdot 10^{33}}{(3,1536)^2 \cdot 10^{14}}$
 - $M_S = 4 \cdot 9,87 \frac{1}{6,67 \cdot 10^{-11}} \frac{(1,5)^3 \cdot 10^{33}}{(3,1536)^2 \cdot 10^{14}}$
 - $M_S = 4 \cdot 9,87 \frac{1}{6,67 \cdot (3,1536)^2} \cdot (1,5)^3 \cdot 10^{+11} \cdot 10^{33} \cdot 10^{-14}$
 - $M_S = 4 \cdot 9,87 \frac{1}{6,67 \cdot (3,1536)^2} \cdot (1,5)^3 \cdot 10^{+11} \cdot 10^{33} \cdot 10^{-14}$
 - $M_S \approx 3 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

a) La constante de Kepler

C'est la masse de l'objet "dominant" qui détermine la constante de Kepler dans sa troisième loi. Des relations en " T^2/R^3 " existent dès qu'un objet est en orbite autour d'un autre. Ainsi, il est possible de déterminer la masse de Jupiter en connaissant la période et le rayon de révolution d'une de ses lunes. Une "troisième" loi de Kepler sera d'application mais avec une constante qui sera liée à la masse de Jupiter!

C Autres calculs possibles

La même démarche que celle utilisée pour le Soleil peut être utilisée pour déterminer les masses des planètes possédant une lune, des étoiles doubles ou du trou noir au centre de notre galaxie.

Huitième partie
Optique géométrique

Introduction

La lumière est un phénomène clé dans la physique moderne.

Longtemps deux points de vue se sont affrontés :

- Certains défendaient que la lumière était une onde ;
- d'autres affirmaient que la lumière était composée de corpuscules.

Nous savons maintenant que les photons sont des objets de la mécanique quantique : à la fois ondes et particules.

Néanmoins, selon le contexte, considérer la lumière comme constituée de "petits grains" se déplaçant comme des projectiles permet de calculer et de prévoir nombres de phénomènes.

Lorsqu'on ne s'intéresse qu'aux trajets suivis par la lumière, sans que les effets particuliers aux ondes (comme ceux de la diffraction) ne soient impliqués, on fait de l'optique géométrique.

C'est cette perspective que nous allons aborder ici.

Nous allons considérer ici la lumière comme des faisceaux de lumière se déplaçant en ligne droite.

Ceci nous permettra de parler d'ombres, de miroirs, des couleurs, des prismes ou encore des lentilles et de télescopes.

Lorsque nous parlerons d'ondes, nous ferons de l'optique ondulatoire.

Remerciements

Je tiens tout particulièrement à remercier Vincent Guyot. Vincent est professeur en Suisse dans une classe préparatoire pour les grandes écoles. Il met ses cours en ligne et a été assez gentil pour mettre à ma disposition les sources de ses cours.

Certains paragraphes de ce cours d'optique sont issus de son travail. En retour, j'ai rédigé d'autres parties et ai réalisé certaines illustrations.

Vincent et moi-même sommes partisans des logiciels libres.

Chapitre 30

L'oeil

Sommaire

1	Anatomie de l'œil	248
	A Cornée	248
	B Iris et pupille	248
	C Cristallin	248
	D Liquides	249
	E Rétine	249
	F Nerf optique	251
	G Cerveau	251
2	Illusions	251
	A Renforcement des contrastes	251
	B Le cerveau	252

Introduction

Nous percevons la lumière et les phénomènes lumineux essentiellement avec nos yeux.

Connaître la structure de l'œil et son fonctionnement va nous permettre de comprendre nos perceptions et notamment ce qu'on appelle les "illusions d'optique".

Nous ne parlerons ici que de l'œil humain. Même chez les mammifères, la structure peut différer : observez l'œil d'un chat !

1 Anatomie de l'œil

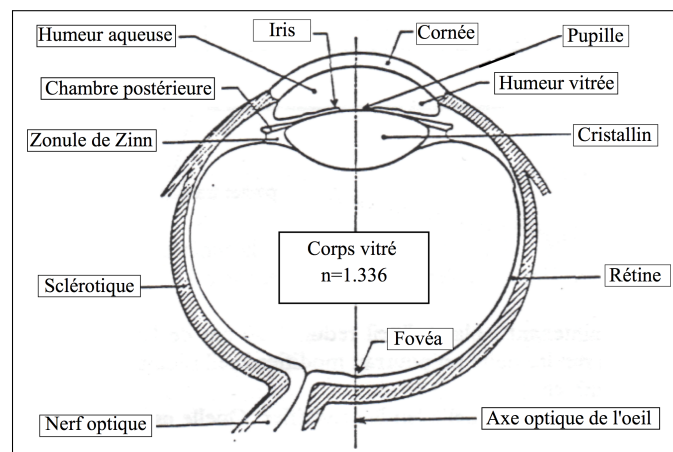


FIGURE 30.1 – Schéma de l'œil.

A Cornée

La cornée est la zone transparente entre l'intérieur de l'œil et l'extérieur. Elle a une grande importance dans la déviation des rayons lumineux, mais sa courbure ne peut être modifiée que chirurgicalement.

La cataracte est une maladie de la cornée. La cornée cesse d'être transparente pour devenir translucide.

B Iris et pupille

L'iris contrôle la "quantité" de lumière qui va entrer dans l'œil via la pupille. Il s'agit d'un organe opaque doté d'une ouverture centrale. Cette ouverture varie selon la quantité de lumière.

Des muscles, via des mouvements réflexes, vont faire s'ouvrir l'iris s'il y a peu de lumière. Au contraire, l'iris se refermera s'il y a beaucoup de lumière.

C Cristallin

Le cristallin est une petite lentille dont la forme est contrôlée, elle aussi, par des mouvements réflexes de muscles. Sa fonction est d'ajuster la vision entre la vision d'objets proches ou lointains.

ATTENTION : Dans de très nombreux schémas d'optique, le cristallin est montré comme l'unique responsable de la focalisation de la lumière dans l'œil. Ceci est faux. la focalisation se fait grâce au liquide présent dans l'œil dans le corps vitré ainsi que dans la cornée. Le cristallin apporte la faculté de modifier cette focalisation pour l'ajuster "finement".

D Liquides

Le liquide du corps vitré est un des responsables du rôle de lentille dans l'œil. Son indice de réfraction est $n = 1.336$.

E Rétine

La rétine est le fond de l'œil.

a) Fovéa

Presque au centre de la rétine, un léger creux est appelé la fovéa. La fovéa est dans l'axe optique de l'œil.

b) Photorécepteurs

Les photorécepteurs sont des cellules spécialisées. Un photon interagissant avec des molécules photosensibles spécifiques à ces cellules va déclencher une impulsion nerveuse dans les neurones se trouvant derrière les récepteurs. Il y a deux types de récepteurs.

(i) Cônes

Les cônes sont les récepteurs sensibles aux couleurs.

Chez l'humain, leur nombre varie entre 3 et 4 millions. Approximativement, ils ne constituent que 5 % des photorécepteurs de l'œil humain.

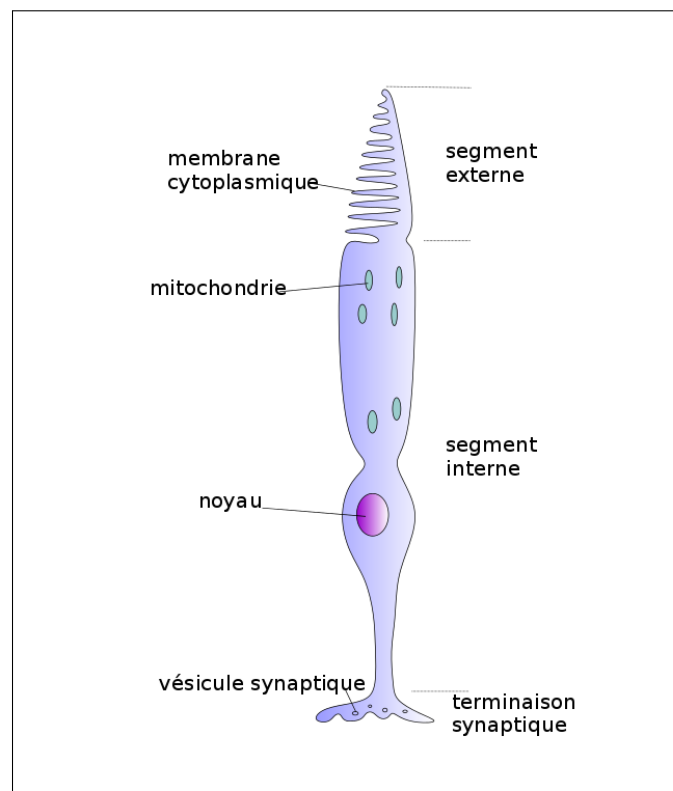


FIGURE 30.2 – Un cône.

Ils sont situés dans la fovéa. Le centre de la fovéa, la fovéola qui fait 0,6 mm de diamètre, ne contient que des cônes. À ce niveau, chaque cône est essentiellement connecté à un seul neurone.

La densité en cônes décroît rapidement dès qu'on s'écarte de cette zone. L'acuité visuelle diminue de même. De ce fait, pour avoir une vision précise sur une surface la plus large possible, notre œil est en permanence en mouvement pour couvrir toute cette surface.

Il y a trois types de cônes. Bien que nous percevions énormément de nuances de couleurs, notre perception des couleurs se fait au travers trois types de cônes qui sont sensibles à trois couleurs de base : rouge, vert et bleu. En fait chaque type perçoit une couleur principale et est plus ou moins sensible aux autres couleurs.

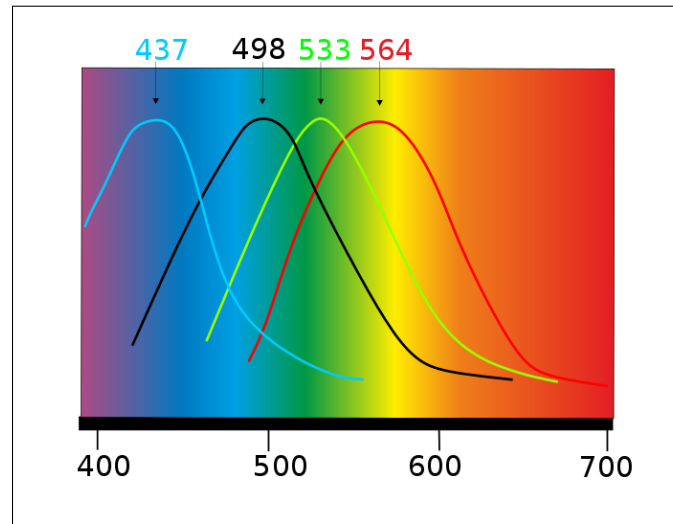


FIGURE 30.3 – Absorption des couleurs selon le type de récepteur. (échelle de longueur d'onde en nm)

Les cônes sensibles au bleu sont les moins nombreux : $\approx 5\%$. Viennent ensuite les cônes verts puis les rouges.

On estime actuellement que chez 10 % des hommes et 50 % des femmes, il existe un quatrième type de cône sensible à l'orange.

Chez les daltoniens, au moins un des types de cônes est absent ou déficient.

(ii) Bâtonnets

Les bâtonnets sont des photorécepteurs qui sont sensibles à toutes les couleurs sans distinction. Leur sensibilité aux différentes couleurs correspond à la courbe noire de la figure 30.3 (page 250).

Les bâtonnets se répartissent sur la rétine. Ils sont les plus nombreux en périphérie de celle-ci et leur nombre va en décroissant vers le centre jusqu'à être nul sur la fovéa.

Ils permettent une vision en nuances de gris mais aussi d'avoir une vision nocturne. Les bâtonnets sont approximativement 100 fois plus sensibles à un photon individuel que les cônes. Après une période suffisamment longue (50 minutes) dans une obscurité presque absolue, un œil est capable de percevoir, en vision périphérique, des photons individuels. Ceci correspond à la lumière d'un bougie distante de 15 km.

Ce sont aussi ces photorécepteurs qui permettent la détection de mouvement.

(iii) Désensibilisation

Les molécules photosensibles basculent d'une forme à une autre selon la présence ou l'absence d'énergie lumineuse. La transition d'un état à l'autre obéit aux principes des cinétiques chimiques.

Différents mécanismes font que les photorécepteurs deviennent moins sensibles à la lumière si l'intensité de la lumière devient plus importante.

Globalement, le retour d'un état activé vers un état sensible suit la courbe d'une exponentielle décroissante en le temps.

c) Le point aveugle

Le point aveugle est une zone de la rétine qui est démunie de récepteurs car elle donne naissance au nerf optique. Cette zone est aveugle. Elle est fortement irriguée.

F Nerf optique

Des neurones sont connectés aux cônes et aux bâtonnets. Ces neurones et leurs synapses forment le nerf optique qui part de l'œil pour amener l'information visuelle vers le cerveau. Certains traitements du signal sont déjà réalisés au niveau de ces neurones.

G Cerveau

Le cerveau ne fait pas partie de l'œil mais nous croyons voir certaines choses alors que c'est notre cerveau qui reconstruit de l'information.

2 Illusions

À chaque étape du processus de la vision, des traitements sont réalisés qui transforment ce qui est "vraiment" vu. En exagérant un peu, si notre œil était capable de "vraiment" voir ce que nous voyons, notre œil devrait avoir la taille d'un ballon de volley-ball et notre tête devrait avoir la taille d'une citrouille pour traiter l'information correspondante.

L'évolution a fait qu'une série de compromis efficaces soient réalisés tout au long de la chaîne de la vision.

Ces compromis expliquent les illusions d'optiques.

Remarque 11. Il est intéressant de savoir que les mêmes types de traitement de l'information sont réalisés dans les appareils photos numériques et dans les formats d'images comme le "jpeg".

Les mêmes illusions que celles décrites ici apparaissent donc dans les photos numériques.

A Renforcement des contrastes

Plusieurs mécanismes de renforcement des contrastes ont lieu aux niveau des photorécepteurs et du nerf optique.

a) Niveaux de gris

Naturellement, nos yeux renforcent les contrastes existants entre différents niveaux de gris.

Ceci explique des illusions où deux surfaces de même niveau de gris sont perçues, l'une comme claire, l'autre comme foncée.

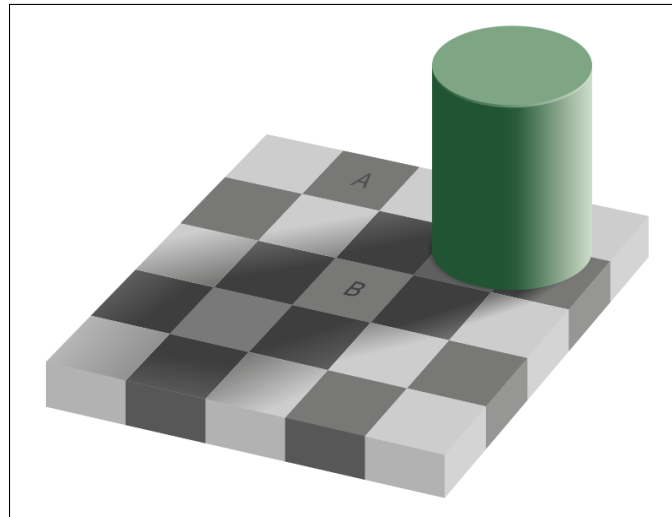


FIGURE 30.4 – Les deux carrés "A" et "B" sont identiques mais non perçus comme tels.

b) **Contraste de couleurs**

Les temps de relaxation des molécules photosensibles expliquent certaines illusions de couleur.

Si, devant un écran blanc, nous fixons une feuille A4 colorée et fortement éclairée, lorsque la feuille est retirée nous allons voir apparaître un rectangle dont la couleur sera la complémentaire de la feuille.

B Le cerveau

Comme annoncé au point [G](#) (p. 251), notre cerveau essaye de prévoir ce qu'une image va être. En effet, il faut approximativement un dixième de seconde pour que l'image formée au niveau de la rétine arrive à notre cerveau.

Mais le cerveau ne va pas toujours "deviner" correctement.

Chapitre 31

Faisceaux de lumière

Sommaire

1	Historique	254
2	Faisceaux de lumière	254
3	Les faisceaux de lumière ne sont pas lumineux	254
4	Trajets des faisceaux de lumière	254
5	Exercices	254

Introduction

L'optique géométrique est la partie de l'optique qui fut historiquement la première à être développée. En effet, la notion de rayon y est centrale. Et celle-ci est, en raison de son caractère géométrique, facilement compréhensible. Par contre, l'optique ondulatoire est elle mal aisée à comprendre par le simple fait qu'elle explique difficilement cette même notion de rayon. C'est la raison pour laquelle, nous aborderons l'optique géométrique en premier.

1 Historique

La notion de rayon a une longue histoire qui ne concerne pas le propos de ce cours. Cependant, il faut dire que celle-ci fut principalement développée au cours du moyen-âge arabe par Ibn-al-Haytam, autrement nommé Alhazen. Il fut le premier à discerner le caractère physique (la lumière physique elle-même) et le caractère géométrique de la notion de rayon. C'est à partir de cette distinction que l'optique géométrique va pouvoir se construire. C'est, par exemple, grâce à celle-ci que l'explication de la formation des images par les miroirs fut découverte.

2 Faisceaux de lumière

Plutôt que d'utiliser le mot "rayon" de lumière nous allons utiliser le mot faisceau de lumière.

3 Les faisceaux de lumière ne sont pas lumineux

Au risque de décevoir les fans de sabres-laser, nous devons annoncer que la lumière n'est pas visible en soi.

Si nous voyons un "faisceau de rayons de lumière", c'est parce que celui-ci intercepte des particules (poussières, humidité ...) qui dévient la lumière vers nos yeux.

4 Trajets des faisceaux de lumière

L'alignement des faisceaux peut être assimilé à des "lignes" : d'où le vocable usuel de "rayons".

5 Exercices

1. Quelle est la longueur de l'ombre d'un bâton de 1,2 m, planté perpendiculairement au sol, lorsque les rayons du soleil font un angle de 30^0 avec l'horizontale ?
2,08m

Chapitre 32

Couleurs

Sommaire

1	Lumière blanche et couleurs	256
	A Couleur = longueur d'onde	256
2	Addition et soustraction de couleurs	257
	A Addition de couleurs	257
	B Soustraction de couleurs	260

Introduction

Nous percevons le monde en couleurs. Mais qu'est ce que la couleur? Et que percevons nous vraiment?

1 Lumière blanche et couleurs

La lumière d'une lampe ou du Soleil est perçue comme "blanche". Si un faisceau de cette lumière frappe la face d'un prisme, le faisceau sera "décomposé" en un arc-en-ciel. Nous savons que la lumière blanche est le résultat d'un "mélange" de couleurs.

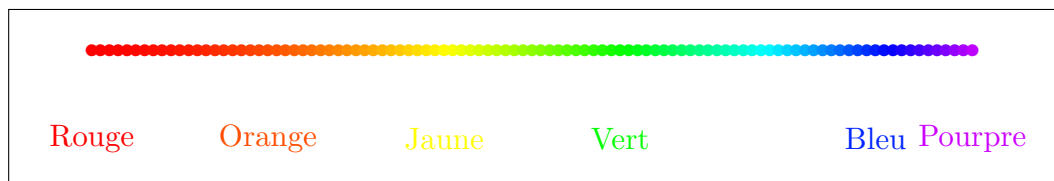


FIGURE 32.1 – Du rouge au pourpre.

Historiquement, Newton a jugé qu'il y avait sept couleurs de base : le rouge, l'orange, le jaune, le vert, le ciel, l'indigo et le violet. Il a disposé ces couleurs sur un disque.

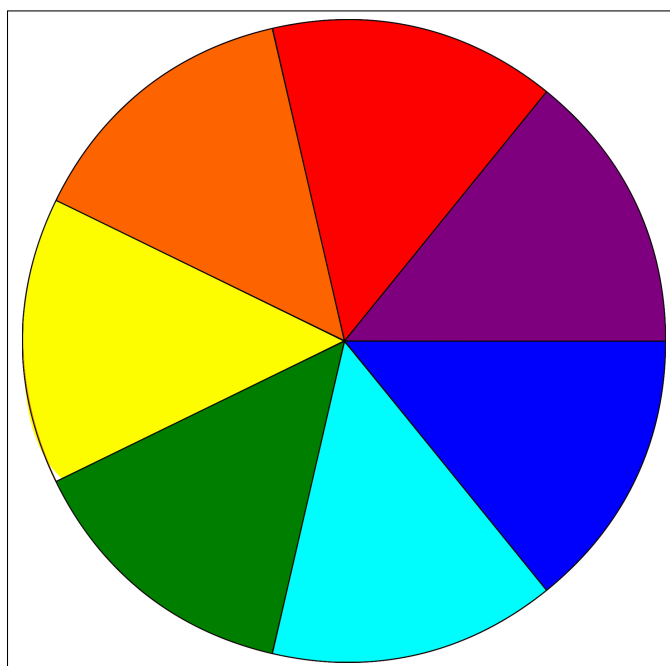


FIGURE 32.2 – Le disque de Newton.

En faisant tourner rapidement ce disque, il semble devenir blanc-gris. Newton a utilisé ce fait pour démontrer que notre perception de la lumière blanche est le résultat d'un mélange de couleurs.

A Couleur = longueur d'onde

Nous avons vu que notre œil dispose de trois (ou quatre) types de cônes différemment sensibles aux couleurs.

Une couleur correspond à l'énergie des photons individuels de la lumière qui la compose.

L'onde lumineuse vibre à une fréquence correspondant à l'énergie des photons. L'onde a aussi une longueur d'onde unique.

Ces trois propriétés (énergie, fréquence, longueur d'onde) peuvent être substituées l'une à l'autre selon le contexte et fixent trois échelles équivalentes¹. À chaque point de cette échelle correspond une couleur.

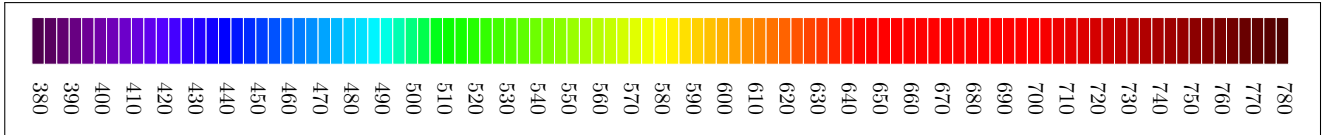


FIGURE 32.3 – Une échelle de couleurs : la longueur d'onde est indiquée en nm sous la couleur correspondante.

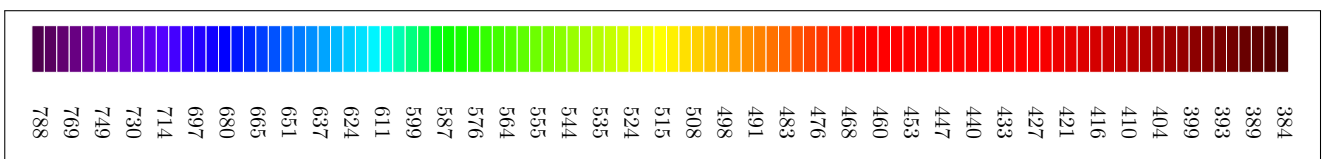


FIGURE 32.4 – Une échelle de couleurs : la fréquence approximative est indiquée en THz sous la couleur correspondante.

Comme la partie de notre œil qui perçoit les couleurs est composé de trois types de cônes, nous allons percevoir comme ayant une seule couleur une lumière constituée d'un mélange de couleurs. C'est notre cerveau qui fait la synthèse des perceptions sur les trois types de cônes pour nous faire percevoir une couleur.

a) Espace de couleurs

La correspondance entre le mélange de couleurs et la couleur perçue donne lieu à différentes analyses de la couleur.

Les spécialistes de la couleur (Technicien TV ou cinéma, physiciens, ingénieurs en optique, ...) parlent d' "*espaces de couleurs*" pour analyser les mélanges de couleurs et leurs perceptions.

2 Addition et soustraction de couleurs

L'analyse de la couleur par addition et soustraction de couleurs est liée à l'utilisation des appareils photos, des écrans ou encore des imprimantes.

L'addition et la soustraction de couleurs définissent ainsi deux normes dans les technologies de l'image : "RGB" et "YMC"

Dans les deux cas, on considère qu'il y a trois couleurs de base et trois couleurs secondaires.

A Addition de couleurs

Commençons par l'addition de couleurs.

Si on projette de la lumière depuis des spots colorés, on obtient des mélanges de couleurs.

Les couleurs s'additionnent.

1. Presque équivalentes : les spectroscopistes préfèrent l'échelle de longueur d'onde ; les physiciens des particules vont préférer l'énergie ou la fréquence.

a) RGB

Une des normes graphiques pour les couleurs est la norme "RGB" pour "Red, Green, Blue".

Dans ce cas, les trois couleurs de base sont le rouge, le vert et le bleu.

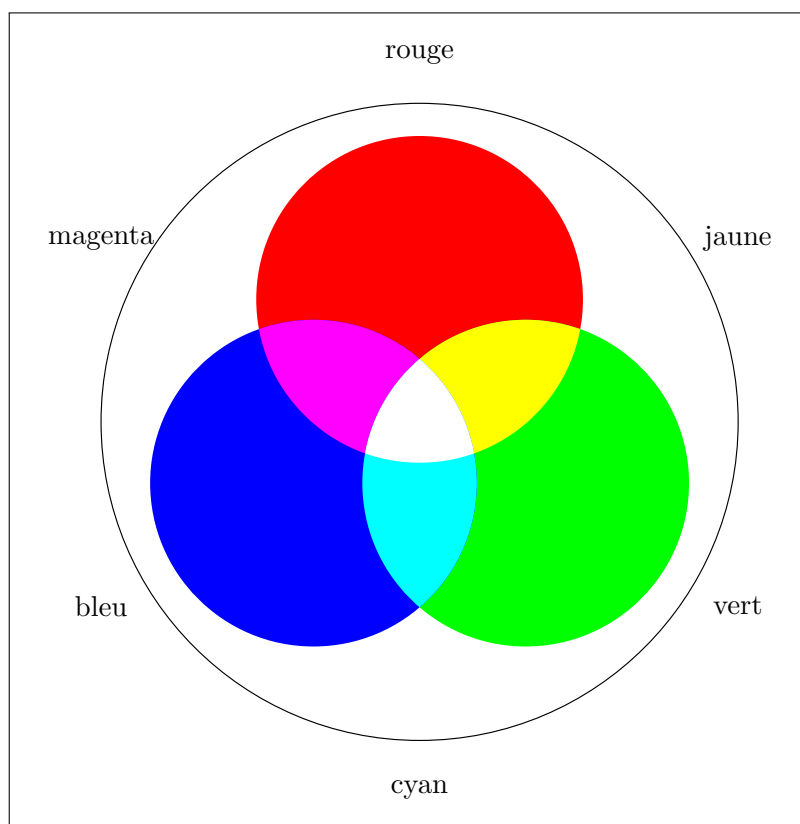


FIGURE 32.5 – Trois couleurs de base : rouge, vert et bleu.

Si ces trois couleurs sont mélangées en proportions égales on obtient du blanc. Deux à deux, elles permettent d'obtenir du cyan, du jaune et du magenta.

Le mélange de ces trois couleurs en proportions diverses permet d'obtenir toutes les couleurs possibles.

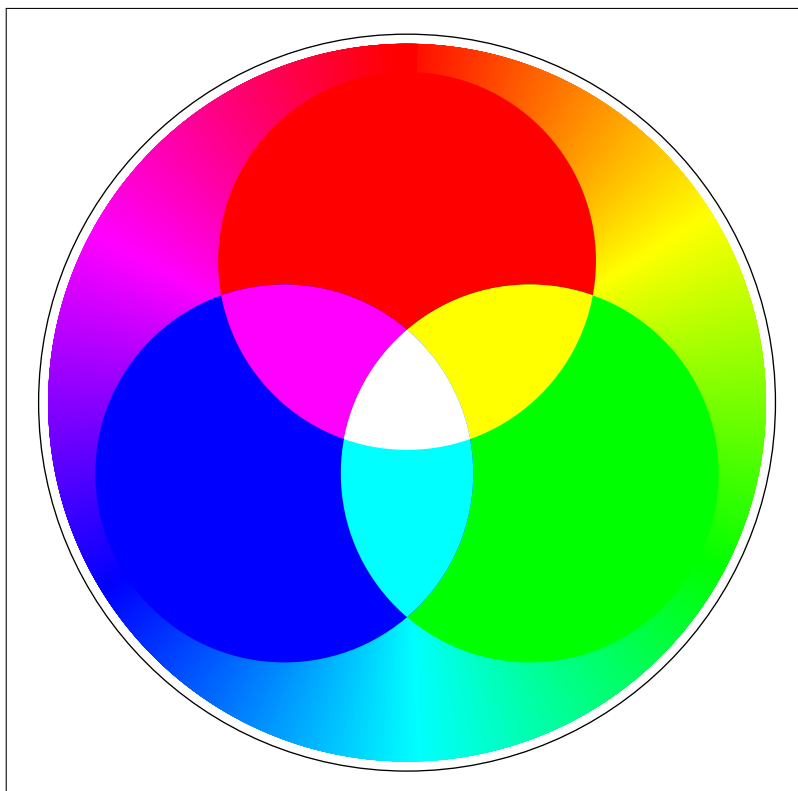


FIGURE 32.6 – Mélange des couleurs de base dans le modèle RGB.

On trace souvent un triangle comme palette de couleurs. À la position dans le triangle correspond la proportion des couleurs de base.

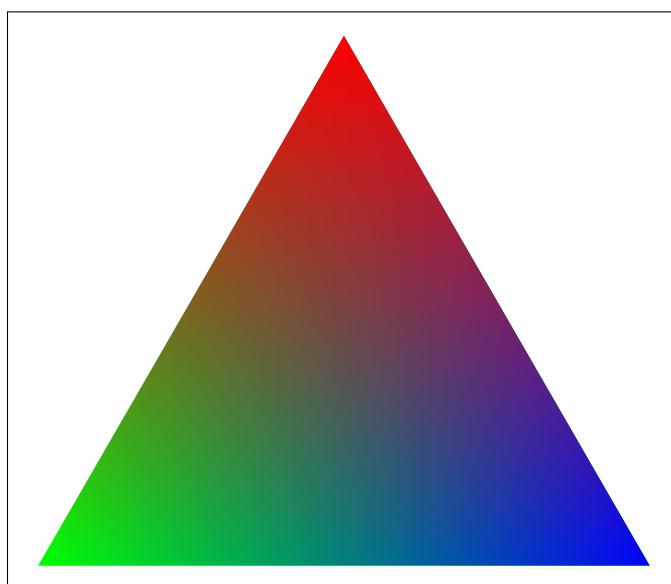


FIGURE 32.7 – Triangle comme palette dans le modèle RGB.

b) Couleurs complémentaires

Sur base du modèle RGB, on définit le concept de couleurs complémentaires. Deux couleurs sont complémentaires si leur mélange en proportions égales donne du blanc.

Par exemple sur la figure 32.5 p. 258, le mélange du bleu et du jaune, celui du vert et du magenta et finalement celui du rouge et du cyan.

B Soustraction de couleurs

Ces modèles de couleurs sont utilisés dans l'imprimerie. Ici les couleurs sont réfléchies.

Imaginez éclairer une surface avec une lumière blanche. Si vous peignez cette surface, la peinture absorbe des couleurs.

Donc, un pigment qui absorbe du bleu va refléter une lumière complémentaire au bleu c'est-à-dire du jaune.

Un pigment qui reflète du magenta absorbe donc son complémentaire : le vert.

Si on mélange un pigment qui reflète du magenta et un autre qui reflète du jaune, les couleurs complémentaires, le bleu et le vert, seront donc absorbés et seul le rouge sera reflété.

a) KYMC

L' "espace de couleurs" YMC pour "yellow", "magenta", "cyan" est le plus utilisé. Nous venons de décrire l'essentiel de son principe au point précédent.

Les couleurs de base sont donc le jaune, le magenta et le cyan.

La lettre "K" signifie "key" et correspond à un pigment noir qui va absorber toutes les couleurs.

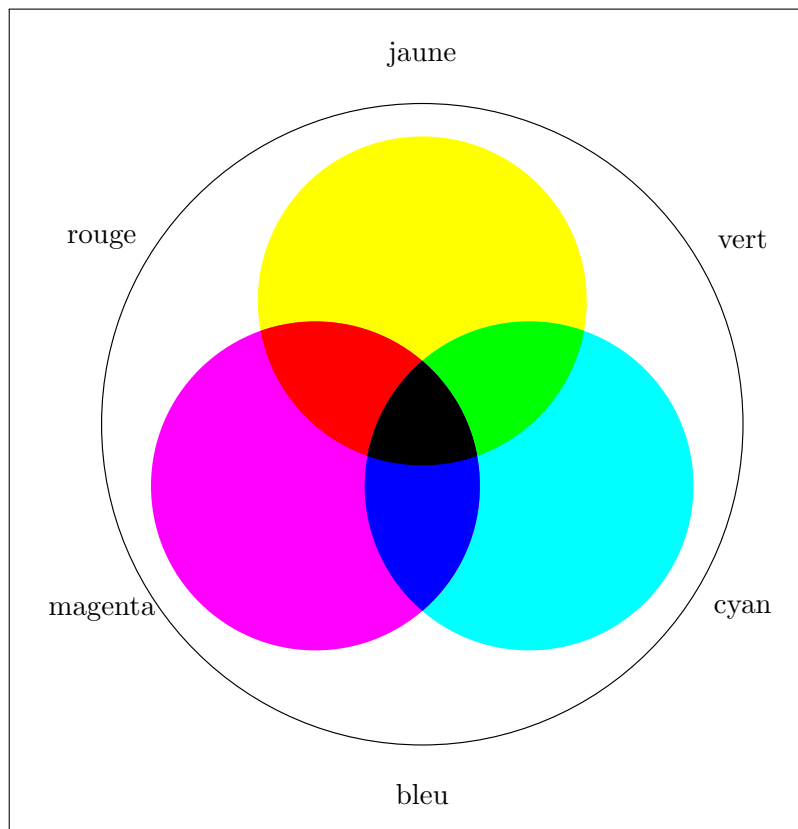


FIGURE 32.8 – Trois couleurs de base de KYMC : Jaune, magenta et cyan.

Ici aussi, les proportions des mélanges permettent d'obtenir toutes les couleurs.

Chapitre 33

Images

Sommaire

1	Image = intersections de faisceaux	262
2	Deux types d'images	262
	A Image réelle	262
	B Image virtuelle	262
3	Conclusion	263

Introduction

Nous allons ici aborder la notion d'image en optique géométrique.

1 Image = intersections de faisceaux

Un dispositif optique a souvent pour but de former des images. C'est en tous cas le résultat de la modification de trajet que le dispositif impose aux faisceaux de lumière.

Dans le paradigme des faisceaux de lumière, une image se constituera lorsque des faisceaux se croiseront.

Nous détaillerons cette idée lors de l'étude de cas plus concrets, à savoir lors de l'étude des miroirs et des lentilles minces.

2 Deux types d'images

On considère habituellement qu'il y a deux types d'images :

- les images réelles,
- les images virtuelles.

Si le dispositif est du type "lentille" on peut résumer la situation comme dans la figure 33.1.

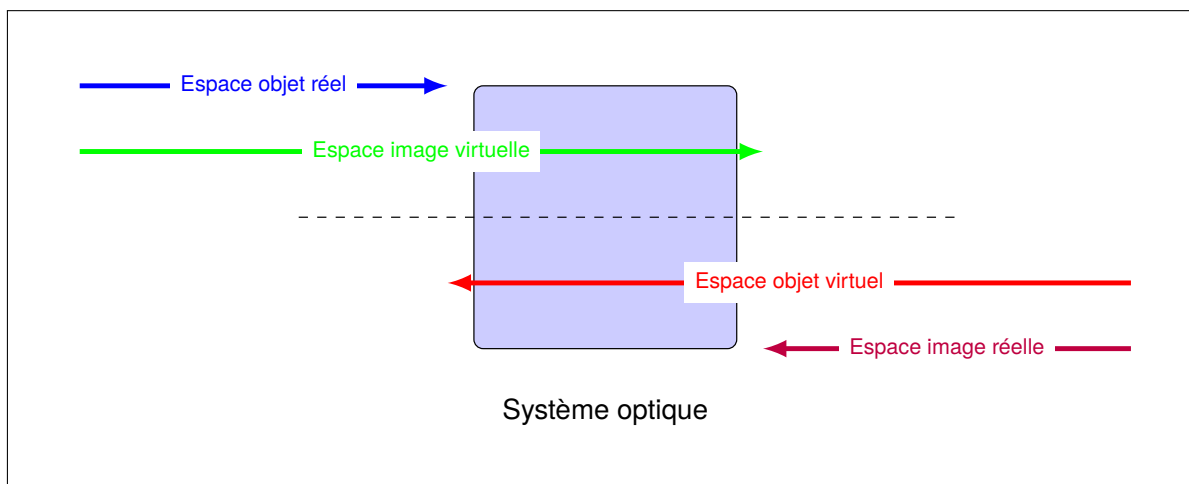


FIGURE 33.1 – Images réelle et virtuelle par rapport à un système optique.

A Image réelle

Une image réelle est une image que l'on peut projeter sur un écran.

Elle va se former "après" le système optique sur le trajet des faisceaux de lumière dans une zone où l'observateur a en principe physiquement accès.

L'image réelle va résulter de l'intersection "physique" de faisceaux "physiques".

B Image virtuelle

Une image virtuelle est une image que l'on ne sait *pas* projeter sur un écran. Elle va se former "en avant" sur le trajet des faisceaux de lumière dans une zone où l'observateur n'a pas nécessairement physiquement accès.

L'image virtuelle va résulter de l'intersection "géométrique" de la prolongation de faisceaux. Nous parlerons de faisceaux "géométriques" ou virtuels.

3 Conclusion

C'est dans l'étude de cas concrets que ces concepts vont s'éclaircir, ainsi, dans l'étude des images formées via les miroirs plans.

Chapitre 34

Miroirs

Sommaire

1	La réflexion	266
2	Miroirs plans	266
	A Loi des miroirs plans	266
	B Images dans un miroir	267
	C Inversion gauche-droite	268
	D Systèmes optiques utilisant la loi des miroirs.	270
3	Miroirs courbes	270
	A Miroirs concaves	270
	B Miroirs convexes	274
4	Exercices	274
	A Miroirs plans	274
	B Miroirs sphériques	275

Introduction

Le phénomène de la réflexion du faisceau de lumière sur une surface est à l'origine de l'utilisation des miroirs.

Après avoir abordé rapidement deux types de réflexion, nous étudierons les différents miroirs.

La loi de la réflexion pour le miroir plan nous permettra de comprendre les principes applicables aux miroirs courbes.

En étudiant les miroirs concaves, nous passerons du miroir sphérique aux miroirs paraboliques.

Finalement, nous discuterons les miroirs convexes.

Nous aborderons dans tous ces cas la formation d'images.

1 La réflexion

Le phénomène de réflexion traduit le renvoi de la lumière par un miroir. Évidemment, ce renvoi existe aussi sur d'autres surfaces que celles des miroirs. Sur celles-ci, la réflexion existe aussi et la loi de la réflexion est valable, mais en première approximation on peut les dire assez chaotiques pour que l'ensemble des rayons réfléchis ne le soient pas dans une direction privilégiée, contrairement au cas de la surface d'un miroir. C'est pourquoi, la loi de la réflexion s'exprime surtout dans le cas de surfaces dites réfléchissantes comme celles des miroirs.

Dans le cas des miroirs, on parle de réflexion *spéculaire*, autrement de réflexion *diffuse*. Dans ce dernier cas, habituellement, on dit que la surface est non réfléchissante.

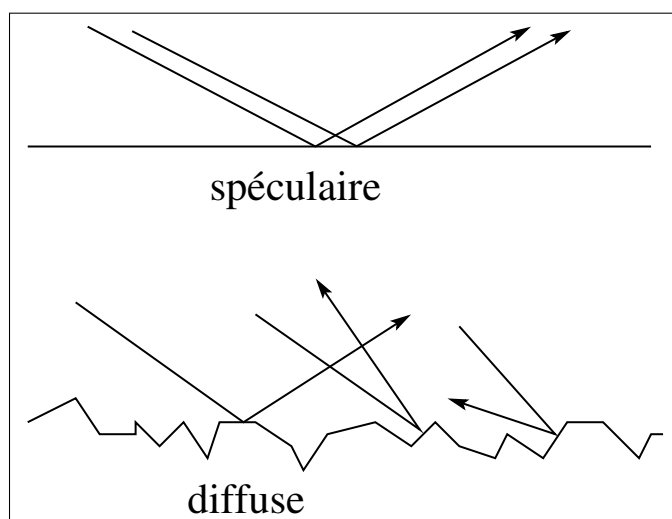


FIGURE 34.1 – Réflexion spéculaire et réflexion diffuse.

2 Miroirs plans

A Loi des miroirs plans

La loi de la réflexion fut exprimée par Ibn-al-Haytam (965-1039) dans son “Discours de la lumière” :

« le mouvement incident est composé du mouvement dans la direction de la normale à l'intérieur de l'obstacle et du mouvement dans la direction de la normale à la première qui est elle-même prolongée dans le plan où se trouve le mouvement incident »

Le faisceau incident a deux mouvements : l'un perpendiculairement à la surface réfléchissante et l'autre parallèlement. Ce dernier est simplement prolongé, alors que le premier s'inverse.

Elle peut aussi être formulée sous forme mathématique :

Loi 13 (Loi des miroirs plans). *Le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale au miroir au point de contact des deux rayons avec le miroir sont tous trois dans le même plan.*

Soit α l'angle entre le rayon incident et la normale à la surface et soit β celui entre le rayon réfléchi et cette même normale, alors

$$\alpha = \beta \quad (34.1)$$

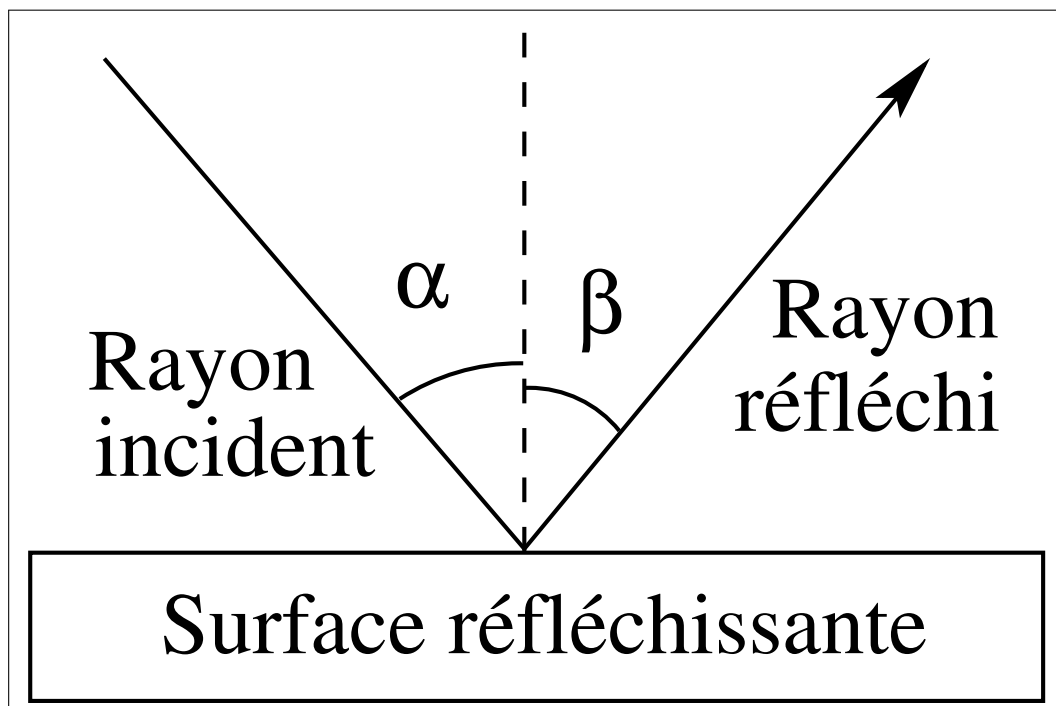


FIGURE 34.2 – loi de la réflexion sur un miroir plan.

B Images dans un miroir

Le problème du miroir plat est celui de la compréhension de la formation de l'image. Celle-ci repose sur la distinction faite par Alhazen précédemment mentionnée entre rayon physique et rayon géométrique. Avec un tel miroir on peut utiliser la loi de la réflexion. L'objet émet une multitude de rayons lumineux dans toutes les directions, notamment en direction du miroir. Parmi ces rayons, seuls certains parviennent à l'œil qui regarde le miroir. La situation est celle présentée sur la figure 34.3 p. 268.

Alors que le rayon physique qui vient de l'objet est cassé par la réflexion sur le miroir, le rayon géométrique, qui sous-tend la partie du rayon physique qui parvient à l'œil, se prolonge quant à lui au-delà du miroir selon une ligne droite. Chaque rayon physique parvenant à l'œil peut ainsi être prolongé en un rayon virtuel dont la composition géométrique restitue une image de l'objet qui semble située à l'arrière du miroir, comme on le voit sur la figure 34.3 p. 268. Elle constitue ce qu'on appelle une image virtuelle, c'est-à-dire une image qui n'est constituée d'aucun rayon physique.

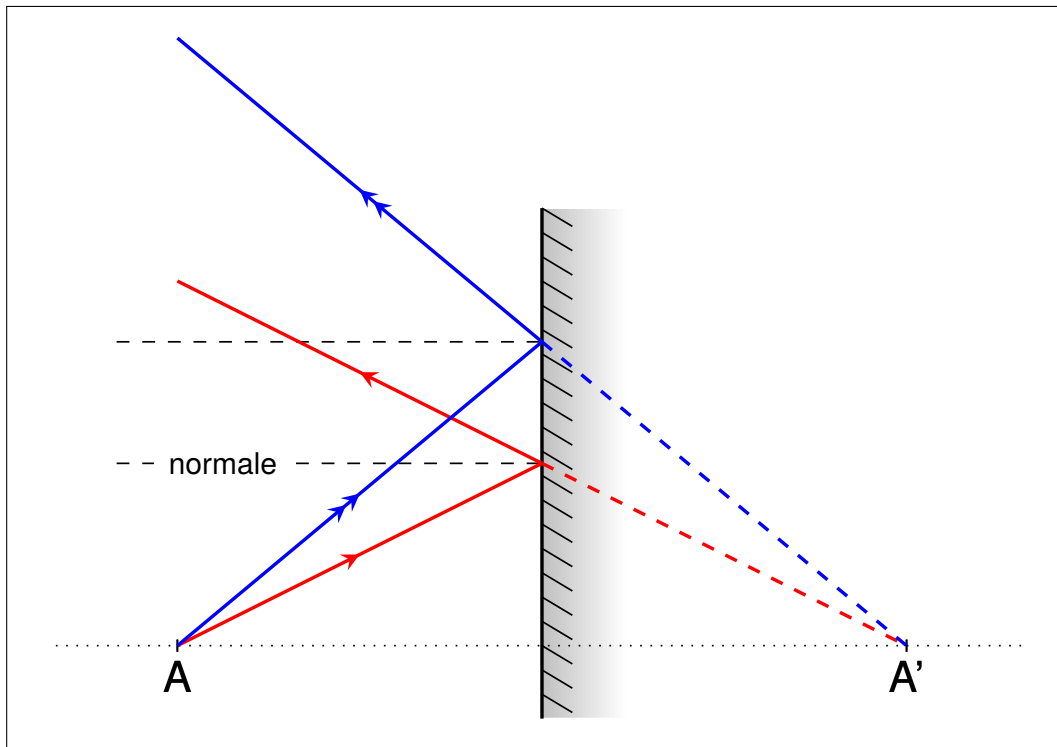


FIGURE 34.3 – L'objet A' est une image virtuelle de l'objet réel A .

C Inversion gauche-droite

On dit souvent que dans un miroir les côtés gauches et droits des images sont inversés par rapport aux objets de départ. La question qui vient alors est "Pourquoi n'y a-t-il pas d'inversion entre haut et bas?"

En fait, la question est mal posée! L'inversion qui a lieu est une inversion *avant-arrière*.

a) Un peu de géométrie

Il faut reprendre la loi de réflexion des miroirs plans et faire un peu de géométrie pour comprendre le point précédent.

Traisons le faisceau de lumière comme un vecteur et considérons son mouvement dans un plan "OXY" à deux dimensions.

Le point où le faisceau "rencontre" le miroir est l'origine "O".

La perpendiculaire au miroir en "O" est l'axe "OY".

Le vecteur "faisceau incident" a pour composantes :

$$\begin{pmatrix} R_x \\ R_y \end{pmatrix} \quad (34.2)$$

Après la réflexion, le vecteur "faisceau réfléchi" aura pour composantes :

$$\begin{pmatrix} R_x \\ -R_y \end{pmatrix} \quad (34.3)$$

Si le mouvement était dans l'espace à trois dimensions et que le plan "OXZ" était le plan du miroir, nous aurions :

Pour le vecteur "faisceau incident" :

$$\begin{pmatrix} R_x \\ R_Y \\ R_Z \end{pmatrix} \quad (34.4)$$

Pour le vecteur "faisceau réfléchi" :

$$\begin{pmatrix} R_x \\ -R_Y \\ R_Z \end{pmatrix} \quad (34.5)$$

C'est uniquement la notion de "profondeur qui s'est inversée pas la "gauche-droite", ni le "haut-bas".

(i) Catadioptr

Les catadioptr des vélos (et des voitures) sont constitués de blocs de trois miroirs perpendiculaires entre eux.

Si on ne considère qu'un seul de ces blocs et que les intersections des miroirs constituent le repère "OXYZ", il est immédiat que le faisceau "sortant" du catadioptr aura pour composantes :

$$\begin{pmatrix} -R_x \\ -R_Y \\ -R_Z \end{pmatrix} \quad (34.6)$$

Le faisceau réfléchi par les trois miroirs va repartir exactement dans la même direction que le faisceau incident originel mais en sens *exactement inverse*.

La fonction des catadioptr est de renvoyer la lumière des phares d'une voiture vers le conducteur de celle-ci.

Des catadioptr ont été laissés à la surface de la Lune par les mission Apollo 11, 14 et 15. Des lasers sont régulièrement braqués vers ces catadioptr. Le temps mesuré pour que la lumière de ces lasers fasse un aller-retour sert à mesurer avec précision la distance Terre-Lune. Les miroirs de ces catadioptr ne sont pas exactement perpendiculaires les uns aux autres. Si les miroirs avaient été perpendiculaires, la lumière serait revenue à son point de départ mais la Terre se serait déplacée. On a tenu compte des mouvements relatifs de la Terre et de la Lune, ainsi que du temps de trajet de la lumière.

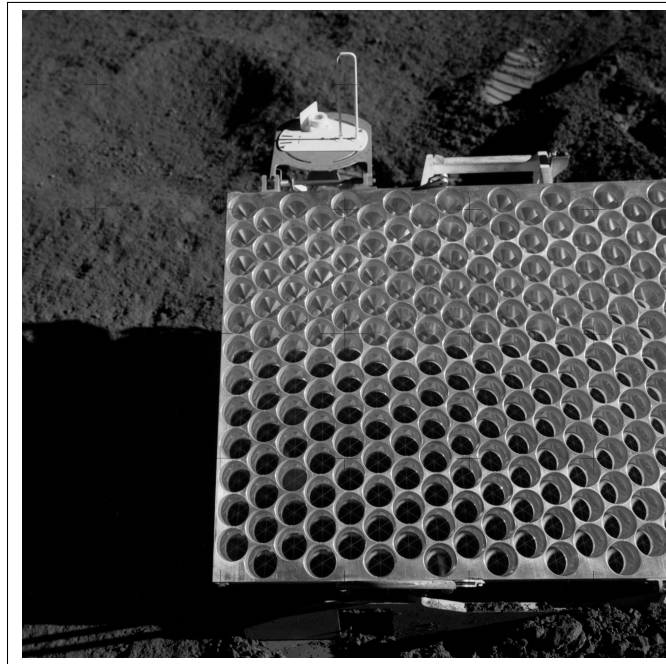


FIGURE 34.4 – Les catadioptriques de la mission Apollo 15.

D Systèmes optiques utilisant la loi des miroirs.

Des systèmes existent qui permettent, par exemple, de mesurer une distance et qui vont utiliser la loi des miroirs.

Ainsi, on utilise un système comprenant un miroir semi-transparent fixe m_1 et un miroir normal m_2 monté sur un axe. Au départ, les deux miroirs sont parallèles et à 45° du trajet du faisceau.

Si on vise à l'infini, deux faisceaux " I_1 " et " I_2 " de lumière venant de l'infini vont traverser le miroir semi-transparent pour le faisceau " I_1 " et, pour le faisceau " I_2 " se réfléchir d'abord sur le miroir m_2 puis sur le miroir m_1 . Les deux faisceaux résultants vont se confondre et l'observateur ne verra qu'une image.

Si l'objet visé n'est pas à l'infini et que les deux miroirs sont parallèles alors l'observateur verra deux images.

La rotation du miroir mobile a faire apparaître un angle β entre les plans des deux miroirs.

Si d est la distance entre les deux miroirs, on peut calculer la distance D entre l'observateur et la cible.

$$D = d \cdot \cotan(2\beta) \quad (34.7)$$

3 Miroirs courbes

Nous allons considérer des miroirs courbes résultant d'une symétrie de rotation autour d'un axe. Cet axe sera appelé l'axe optique.

Chaque point du miroir peut être considéré comme un minuscule miroir plan. La loi des miroirs plans pourra donc y être appliquée. Mais la normale va changer dès que l'on considère un autre point.

A Miroirs concaves

Naturellement, depuis fort longtemps, l'idée de concentrer les rayons lumineux pour augmenter leur "pouvoir" est venue aux hommes. Le modèle géométrique de la réflexion a tout d'abord

permis de comprendre qu'il fallait courber la surface réfléchissante.

a) Miroirs sphériques

Comme la courbe qui vient le plus simplement à l'esprit est le cercle, les premiers miroirs concentrateurs ont été sphériques. Cependant de tels miroirs ne concentrent pas parfaitement la lumière.

En effet, la convergence des rayons sur un miroir sphérique n'est que partielle : les rayons parallèles à l'axe optique parvenant aux bords du miroir sont réfléchis sur l'axe optique plus près du miroir que ceux parvenant plus au centre du miroir (voir figure 34.5). Il n'y a donc pas de point que l'on peut considérer comme un foyer.

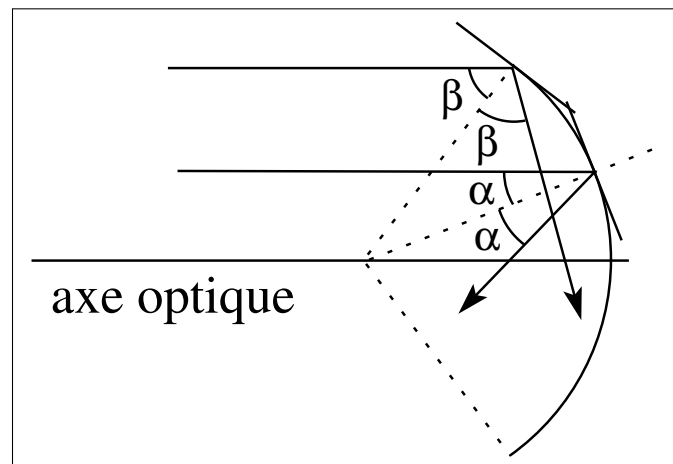


FIGURE 34.5 – Aberration dans un miroir sphérique : il n'y a pas de foyer.

b) Miroirs paraboliques

Rapidement une autre courbe fut mise en évidence : la parabole.

Avec un miroir parabolique, les bords du miroir étant plus aplatis (voir figure 34.6) que pour un miroir sphérique, ils permettent aux rayons parallèles à l'axe optique qui les frappent de converger vers un même point que ceux du centre. Ce point est désigné par le terme de foyer du miroir. Ainsi, un miroir parabolique possède un foyer, au contraire d'un miroir sphérique.

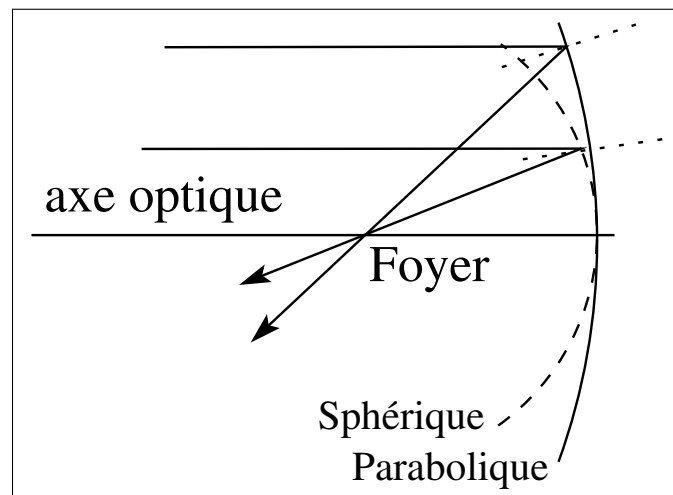


FIGURE 34.6 – Le miroir parabolique a un foyer.

(i) Applications

Il existe beaucoup d'applications aux miroirs paraboliques. Elles seront abordées plus loin.

Citons rapidement :

- le four solaire,
- les phares de voiture,
- la lampe de poche,
- l'antenne "satellite",
- les miroirs de télescopes.

c) Miroirs peu profonds

Remarquons que les miroirs paraboliques ne sont pas facile à construire. Mais, en bonne approximation, le centre d'un miroir sphérique est parabolique. Il s'agit donc de construire des miroirs très plats. Le centre et le foyer du miroir seront donc relativement loin de sa surface.

d) Images dans un miroir concave

Dans cette approximation, nous désignerons par "C" le centre de la sphère. Le foyer "f" se trouvera alors à mi-chemin entre le centre "C" et la surface du miroir sur l'axe optique.

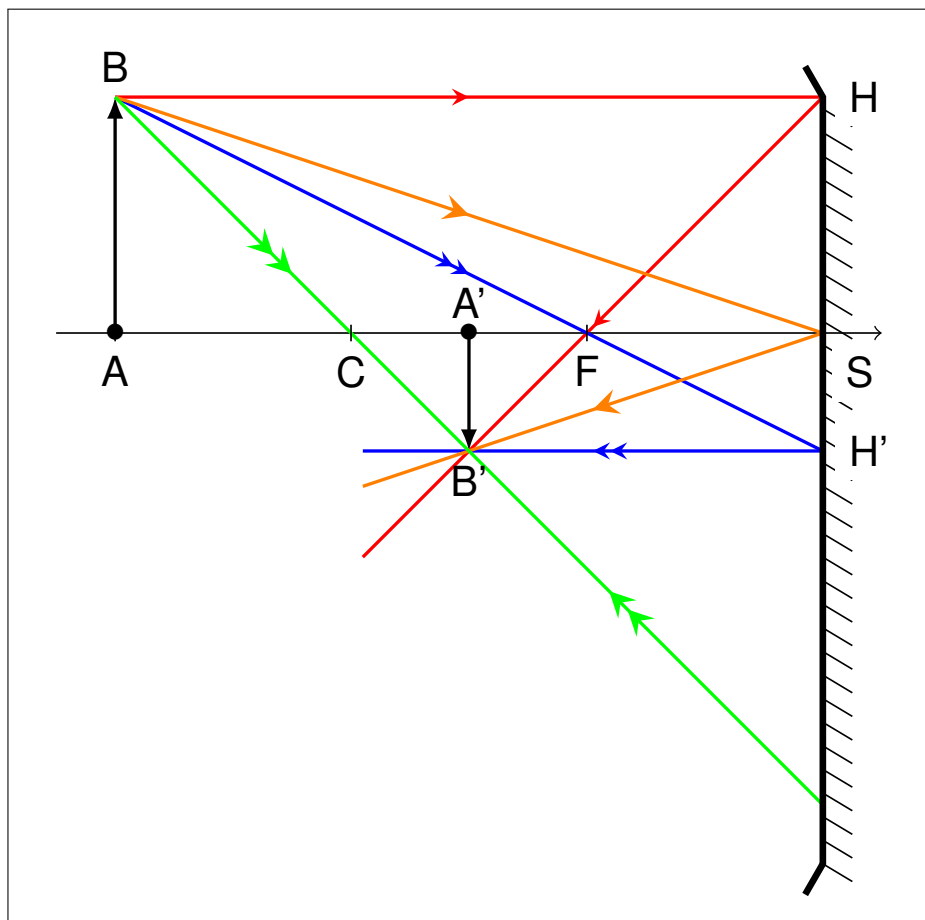
(i) Objet se trouvant au delà du centre "C" : image réelle

FIGURE 34.7 – Image réelle inversée avec un miroir peu profond. L'image $A'B'$ est réelle, inversée et plus petite que l'objet AB

(ii) Techniques pour la construction d'images

Méthode 1 (Construction d'images et miroirs courbes). Pour construire l'image " $A'B'$ " de l'objet " AB " par le miroir, il faut suivre une série de règles.

1. On prend un point de l'objet ne se trouvant pas sur l'axe optique : ici " B ".
2. Les faisceaux incidents parallèles à l'axe optique (ici \overrightarrow{BH}) se réfléchissent sur le miroir et les faisceaux réfléchis (ici $\overrightarrow{HB'}$) passent par le foyer " F ".
3. Les faisceaux incidents passant par le foyer " F " (ici $\overrightarrow{BH'}$) se réfléchissent sur le miroir et les faisceaux réfléchis (ici $\overrightarrow{H'B'}$) sont parallèles l'axe optique (ici la droite CF).
4. Les faisceaux incidents passant par le centre " C " (ici \overrightarrow{BC}) se réfléchissent sur le miroir et les faisceaux réfléchis (ici $\overrightarrow{B'C}$) sont de même direction mais en sens inverse des incidents.
5. Les faisceaux incidents passant par le point de contact de l'axe optique avec le miroir se réfléchissent sur le miroir selon la règle des miroirs plans. L'axe optique étant la normale par rapport à laquelle il faut comparer les angles des faisceaux incidents et réfléchis. Les faisceaux réfléchis font un même angle par rapport à cette normale mais de signe inverse par rapport aux incidents.
6. L'intersection des faisceaux réfléchis précédents est l'emplacement de la formation de l'image " B' ".
7. Tout autre faisceau incident issu de " B " se réfléchira sur la surface " S " du miroir et le faisceau réfléchi passera par " B' ".

Cette procédure est applicable pour tout système optique possédant un foyer. Il faut éventuellement prolonger les faisceaux physiques en faisceaux géométriques. Si l'intersection des faisceaux réfléchis ne se fait pas avec les faisceaux physique mais avec les faisceaux géométriques, l'image résultante est virtuelle.

(iii) Objet se trouvant entre le centre " C " et le foyer " F "**(iv) Objet se trouvant entre le foyer " F " et la surface du miroir**

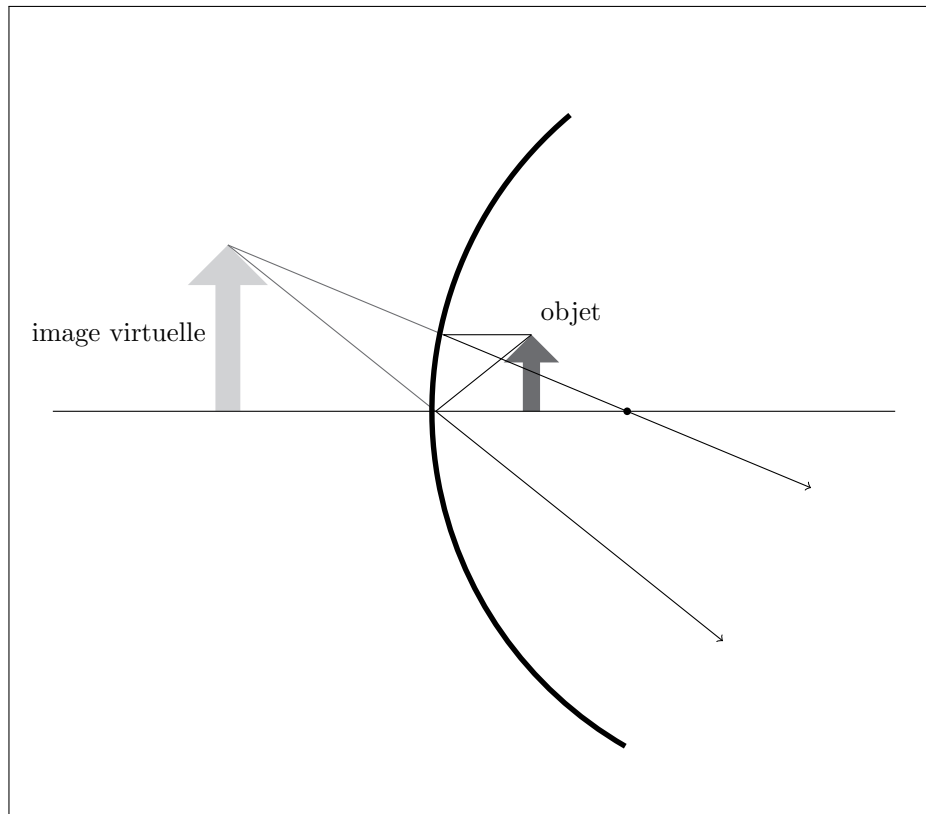


FIGURE 34.8 – Image virtuelle droite avec un miroir peu profond. L'image est droite et plus grande que l'objet.

B Miroirs convexes

Nous allons aussi considérer des miroirs sphériques convexes "peu" courbés. Ici aussi le foyer sera à mi-chemin entre le centre de la sphère et la surface du miroir. Mais le centre et le foyer seront derrière la surface réfléchissante.

a) Images dans un miroir convexe

Les mêmes règles de construction d'images restent applicables mais ne permettent que la construction d'images virtuelles.

4 Exercices

A Miroirs plans

- Montrez que la lumière suit le trajet le plus court entre deux points.
Principe de moindre action
- Deux miroirs plans sont disposés à 60° . Construire les images d'un objet placé sur la bissectrice de l'angle formé par les miroirs.
- Un rayon tombe sur un miroir plan, selon un angle d'incidence i_1 . Exprimez l'angle entre le rayon réfléchi et le rayon incident, en fonction de i_1 . Le miroir tourne d'un angle α autour d'un axe perpendiculaire au rayon incident, et passant par le point d'incidence. Exprimez l'angle entre le rayon réfléchi et le rayon incident, en fonction de i_1 et de α .
 $2 i_1 ; 2(i_1 + \alpha)$

4. Quelle doit être la hauteur minimale d'un miroir plan, ainsi que la distance entre son bord inférieur et le sol, pour qu'une personne de 1,7 m, dont les yeux sont situés à 1,6 m du sol, puisse s'y apercevoir en entier ? Justifiez votre réponse par construction.

85cm ;80cm

5. Pour assurer une mise au point correcte d'un appareil photographique, on utilise un télé-mètre optique.

M est un miroir plan, N un miroir semi-transparent, qui laisse passer une partie du faisceau 1, et réfléchit une partie du faisceau 2 vers l'observateur O.

- (a) Montrez que, M et N étant parallèles, l'observateur voit deux images de tout objet non situé à l'infini.
 (b) Pour mesurer la distance D à objet situé sur l'axe OJ, on fait tourner M d'un angle β autour de I. Etablir la relation donnant D en fonction de β et de IJ.
 (c) Contrôlez cette relation pour une distance nulle et une distance infinie.

$$D=d.\cotg 2 \beta$$

6. Un faisceau lumineux parallèle tombe sur l'arête d'un prisme d'angle α et est divisé en deux par réflexion. Trouver la relation entre α et β , l'angle des rayons réfléchis.

$$\beta =2 \alpha$$

7. Trois miroirs sont disposés comme suit. Quel sera l'angle entre le rayon réfléchi final et le rayon incident si celui-ci tombe sur le premier miroir sous un angle de 72^0 ?

$$176^0$$

B Miroirs sphériques

1. Un objet est situé à 45 cm d'un miroir sphérique concave de 30 cm de distance focale. Déterminez la position et la nature de l'image obtenue.

90cm, réelle, renversée

2. A quelle distance d'un miroir convexe doit-on placer un objet pour que son image virtuelle soit réduite de moitié ?

à R/2

3. Un miroir plan se trouve à 1 mètre d'un miroir concave de 75 cm de rayon de courbure. On place un objet de 12 cm de hauteur entre les deux miroirs, à 50 cm du miroir concave. Les rayons réfléchis par ce miroir concave tombent sur le miroir plan. Déterminez les caractéristiques de l'image formée dans ce miroir plan.

50 cm derrière le miroir plan, 36 cm de hauteur, réelle

4. Un objet lumineux de 3 cm de hauteur est situé à une distance de 75 cm d'un miroir concave M1 de 30 cm de distance focale. Après réflexion, les rayons rencontrent un second miroir concave M2 de 50 cm de distance focale, de même axe principal que M1, distant de 2mètres. Déterminez les caractéristiques de l'image finale.

à 75 cm du second miroir, de 1 cm de hauteur.

5. Etudiez le grandissement d'un objet lumineux dans un miroir sphérique de distance focale égale à 50 cm, en fonction de la position de cet objet. Déterminez graphiquement la position de cet objet pour laquelle son image a même grandeur.

6. Etudiez les caractéristiques des images obtenues dans les miroirs sphériques dans le cas d'un objet virtuel.

7. Un miroir sphérique doit donner, d'un objet situé à 15 mm, une image droite deux fois plus grande que l'objet. Quel type de miroir choisir, et quelle est son rayon de courbure ?
 concave, 60 mm

8. Le rétroviseur extérieur de votre voiture est un miroir convexe de 20 cm de rayon de courbure, celui de l'intérieur, un miroir plan. Votre œil est à 0,5 m du miroir plan, et à 1 m du miroir sphérique. Vous observez un motard de 1,5 m de hauteur, situé 13 m derrière vous. Déterminez l'angle sous lequel vous observez l'image du motard dans chacun des miroirs.
- $6,34^\circ$ et $0,6^\circ$

Chapitre 35

Réfraction

Sommaire

1	Déviation du faisceau de lumière : la réfraction	278
2	Indice de réfraction	278
3	Loi de Snell-Descartes	279
4	Angle limite : la réflexion totale	279
	A Fibres optiques	280
	B Les mirages	280
5	Pouvoir réflecteur	281
6	Exercices	281

Introduction

Observons un objet au fond d'un seau d'eau. L'objet ne semble pas se trouver où nous savons qu'il se trouve vraiment. Ceci est dû à la réfraction.

1 Déviation du faisceau de lumière : la réfraction

Un rayon de lumière parvenant à la surface d'un milieu transparent ne va pas seulement être réfléchi. Une partie de celui-ci va passer dans le milieu transparent. A cette occasion, il va être dévié. On appelle ce phénomène : réfraction. Le rayon parvenant sur la surface est dit incident. Après réfraction, le rayon est dit réfracté. On peut avoir le cas d'un rayon incident dans un milieu peu dense (comme l'air) et d'un rayon réfracté dans un milieu plus dense (comme du verre). A l'inverse, le milieu incident peut être plus dense que le milieu dans lequel le rayon est réfracté. Les deux cas sont illustrés sur la figure 35.1.

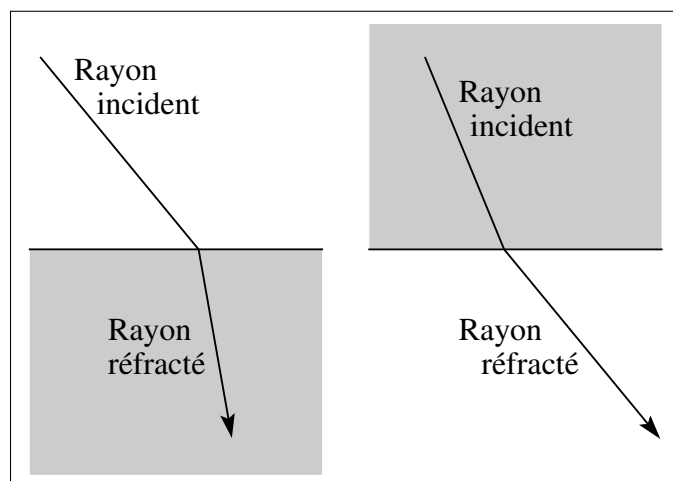


FIGURE 35.1 – Réfractions.

2 Indice de réfraction

L'indice de réfraction de l'air vaut "1".

Les indices de réfractons " n " sont inversement proportionnels à la vitesse v de la lumière dans le milieu.

Définition 62 (Indice de réfraction).

$$c = nv \tag{35.1}$$

où

- c = la vitesse de la lumière dans le vide,
- n = l'indice de réfraction du milieu (sans unité) ,
- v = la vitesse de la lumière dans le milieu.

Les vitesses doivent être dans les mêmes unités.

La vitesse de la lumière dans l'air est pratiquement égale à la vitesse de la lumière dans le vide : " $c \approx 300\,000\text{ km s}^{-1}$ ".

Si un milieu a un indice de réfraction de "1,3", alors la vitesse de la lumière dans ce milieu vaudra $\frac{c}{1,3} \approx \frac{300\,000}{1,3} \approx 230\,769\text{ km s}^{-1}$.

3 Loi de Snell-Descartes

Cette loi a, elle aussi, d'abord été formulée aux alentours de l'an 1000 par un savant arabe résidant à Bagdad.

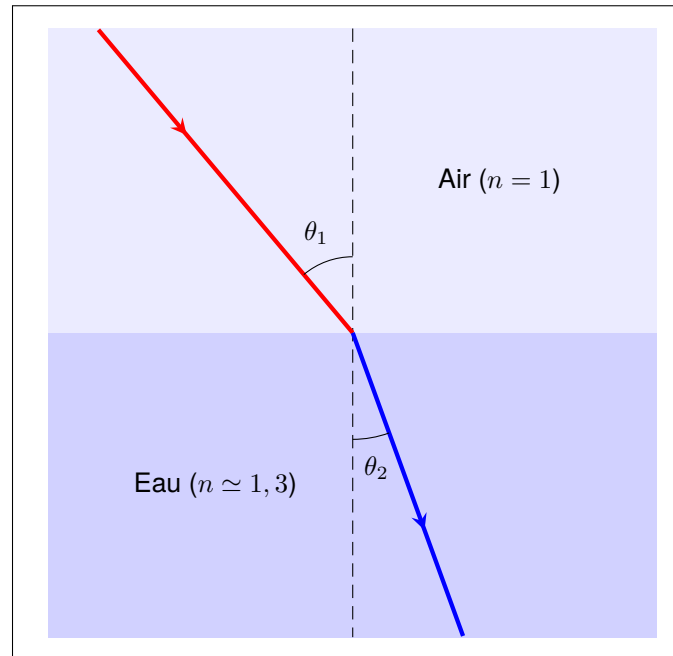


FIGURE 35.2 – Loi de Snell-Descartes.

Loi 14 (Snell-Descartes).

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (35.2)$$

où

- n_1 = l'indice de réfraction du milieu du rayon incident,
- n_2 = l'indice de réfraction du milieu du rayon réfracté,
- θ_1 = l'angle du rayon incident avec la normale à la surface entre les deux milieux,
- θ_2 = l'angle du rayon réfracté avec la normale à la surface entre les deux milieux.

4 Angle limite : la réflexion totale

Une autre application intéressante de la loi de la réfraction part du constat que lorsqu'un rayon dans un milieu dense traverse une surface pour entrer dans un milieu moins dense, sa direction s'éloigne de la normale à la surface, contrairement au cas où le rayon passe d'un milieu peu dense à un milieu plus dense. Comme le rayon réfracté sortant du milieu dense se trouve situé entre sa direction d'incidence et la surface, si la première se rapproche de la surface, il arrive un moment où le rayon réfracté devient tangent à la surface et disparaît. Alors toute la lumière reste dans le milieu dense. Il n'y a plus que de la réflexion. On parle de réflexion totale (voir figure 35.3).

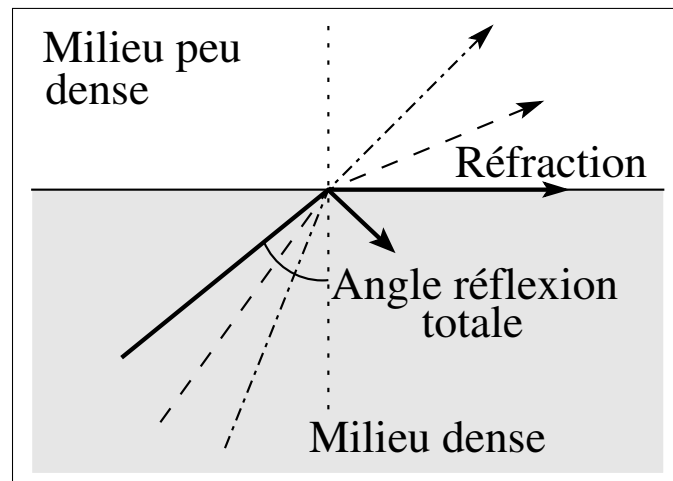


FIGURE 35.3 – La réflexion totale.

L'angle pour lequel apparaît la réflexion totale est aussi appelé "*angle limite*".

Mathématiquement, cet angle est celui pour lequel le sinus de l'angle du faisceau *réfracté* devrait être *supérieur à un*. Ce qui est impossible.

Propriété 7 (Angle limite). *L'angle θ_1 pour lequel la réflexion totale apparaît est donné par la relation :*

$$\sin \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \quad (35.3)$$

où

- n_1 = l'indice de réfraction du milieu du rayon incident,
- n_2 = l'indice de réfraction du milieu du rayon potentiellement réfracté,
- θ_1 = l'angle limite du rayon incident avec la normale à la surface entre les deux milieux.

A Fibres optiques

La fibre optique constitue une application du phénomène de réflexion totale. Une fibre optique est un cylindre légèrement flexible dans sa longueur dans lequel on envoie de la lumière par la base. Les rayons se propageant le long de l'axe sont ainsi guidés dans la fibre même s'ils s'écartent quelque peu de l'axe puisque ils arrivent à la surface de la fibre avec un angle (par rapport à la normale) supérieur à l'angle de réflexion totale (voir figure 35.4).

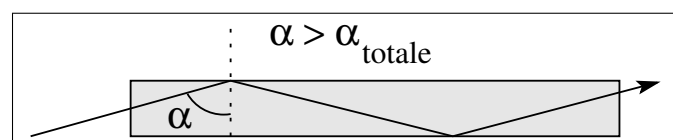


FIGURE 35.4 – Réflexion totale dans une fibre optique.

B Les mirages

Les mirages sont aussi le résultat de la traversée par la lumière de couches d'air de densités et donc d'indices de réfractifs différents.

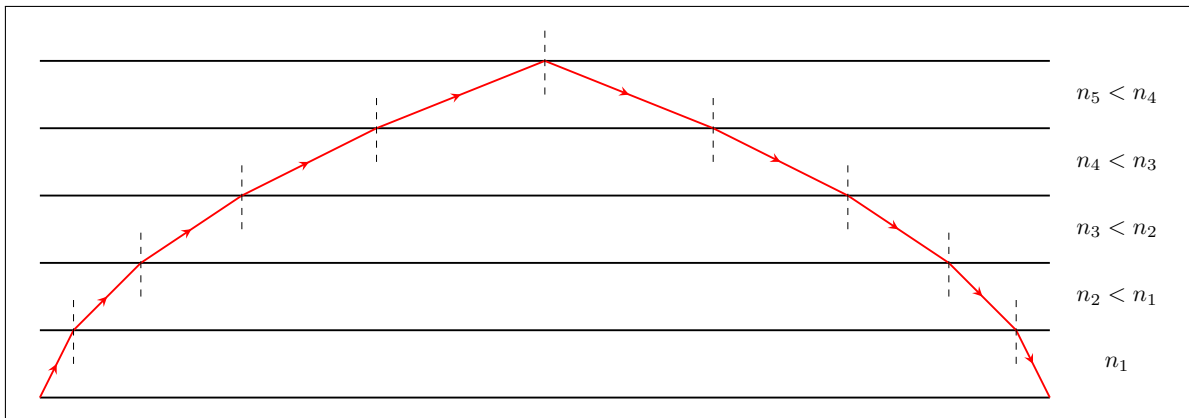


FIGURE 35.5 – Mirages et déviation du faisceau de lumière dans un milieu stratifié.

a) Mirage inférieur

Si l'air est chaud au sol et froid en altitude, on a un mirage "*inférieur*". Un objet en altitude est perçu comme situé en contrebas.

C'est le mirage "classique" la journée dans le désert.

b) Mirage supérieur

Si au contraire, l'air est chaud en altitude et froid au niveau du sol, on a un mirage "*supérieur*". Un objet donnera l'impression de flotter en l'air.

5 Pouvoir réflecteur

La lumière incidente n'est pas intégralement réfractée. Une partie de la lumière incidente va être réfléchi. La fraction de l'énergie réfléchi par rapport à l'énergie totale est définie comme le *pouvoir réflecteur* de l'interface entre les deux milieux.

Définition 63 (Pouvoir réflecteur). En incidence normale ($\theta_1 = \theta_2 = 0$), le pouvoir réflecteur est donné par la relation suivante :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (35.4)$$

où

- R = le pouvoir réflecteur de l'interface,
- n_1 = l'indice de réfraction du milieu du rayon incident,
- n_2 = l'indice de réfraction du milieu du rayon réfracté.

6 Exercices

1. Énoncez les lois de la réfraction, et illustrez-les par un schéma.
2. L'indice de réfraction du diamant, relatif à l'air est de 2,42. Quelle est la vitesse de propagation de la lumière dans le diamant ?
1,24.108 m/s
3. Un cours d'eau limpide, observé sous une grande incidence, paraît moins profond. Pourquoi ?
4. Un poisson apparaît en double, lorsqu'il se trouve dans un coin de l'aquarium. Pourquoi ?

5. La réfraction atmosphérique nous permet d'apercevoir le soleil, alors qu'il est toujours sous l'horizon. Expliquez.
6. Un sol froid peut-il, en refroidissant les couches d'air supérieures, produire un effet de mirage ?
7. Les rayons lumineux, réfléchis par un objet, traversent une vitre de 5 mm d'épaisseur, d'indice de réfraction 1,5, sous une incidence de 45^0 .
 - (a) Montrer que la vitre ne modifie pas leur direction de propagation.
 - (b) Calculer le déplacement latéral des rayons.

1,65 mm

8. Le fond d'un récipient cubique n'est pas visible lorsqu'on l'observe sous une incidence supérieure à 45^0 , perpendiculairement à l'une de ses faces. On le remplit d'eau $n=1,33$. Quel pourcentage de la surface du fond aperçoit-on alors, dans les mêmes conditions ?
37%
9. Sous quelle(s) condition(s) un rayon lumineux peut-il pénétrer dans un récipient en verre contenant de l'eau ? $n(\text{verre}/\text{air}) = 1,5$ $n(\text{eau}/\text{air}) = 1,33$
10. Quelle est la vitesse de propagation de la lumière dans le diamant, d'indice 2,42 ?
1,24.108 m/s
11. Cinq lames à faces parallèles sont empilées. Les indices de réfraction par rapport à l'air sont respectivement de 1,6 - 1,5 - 1,4 - 1,3 - 1,2. Un rayon lumineux atteint la première face, d'indice 1,6, sous un angle d'incidence de 60^0 . Sous quel angle ressort-il de la pile ?
 60^0
12. Cinq lames à faces parallèles sont empilées par ordre décroissant d'indice de réfraction. Démontrez, sans utiliser de valeurs numériques, qu'un rayon lumineux qui atteint la première face, d'indice le plus élevé, ressort de la dernière, sous le même angle.
13. Une mouette se repose à la surface de la mer par temps calme. Un requin nage vers elle à une profondeur de 4 m. L'indice de réfraction de l'eau de mer vaut environ $4/3$. Quelle distance sépare la mouette du requin lorsque celle-ci est susceptible de voir le prédateur ?
Si l'angle entre la normale à la surface passant par la mouette et le segment reliant la mouette et le requin est plus grand que l'angle limite, le requin est invisible pour la mouette.

$$\sin \theta_l = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\theta_l = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

$$\theta_l = \arcsin \frac{1}{4/3}$$

$$\theta_l = \arcsin \frac{3}{4} \simeq 48,6^\circ$$
 Distance / Profondeur = $\tan \theta_l$
 Distance = Profondeur $\cdot \tan \theta_l$
 Distance = $4 \cdot \tan 48,6$
 4,5 m
14. Un film d'huile, d'indice de réfraction $n(\text{huile})$, flotte à la surface d'un étang. Un rayon lumineux provenant du fond de l'étang atteint la couche d'huile, la traverse pour atteindre ensuite l'air. Quelle est la valeur maximale de l'angle d'incidence du rayon lumineux à la surface eau-huile telle que le rayon puisse sortir de l'huile et passer dans l'air (expression littérale où ne peuvent se trouver que des données telles que : $n(\text{huile})$, $n(\text{eau})$ et $n(\text{air})$) ?
 $\arcsin (n_{\text{air}}/n_{\text{eau}})$

Chapitre 36

Prismes

Sommaire

1	Le prisme	284
	A Description	284
	B Double réfraction	284
	C Angle de déviation	284
	D Déviation minimale	286
2	Décomposition de la lumière blanche	288
	A La dispersion	288
	B L'arc-en-ciel	288
3	Exercices	289

Introduction

Avec les prismes, on exploite la réfraction.

1 Le prisme

A Description

Chacun a déjà vu la décomposition des couleurs à travers un prisme. . Il s'agit simplement d'un polyèdre droit en verre (ou en plastique) à base triangulaire à travers lequel on fait passer de la lumière blanche. Celle-ci, par dispersion, se décompose en une multitude de couleurs à l'entrée dans le prisme et voit ces couleurs se disperser encore plus en sortant de celui-ci en raison de l'angle entre la face de sortie et celle d'entrée.

B Double réfraction

Il y a deux réfractions lorsque le faisceau de lumière traverse le prisme :

- une en entrée
- et une en sortie.

À chaque fois, il faut appliquer la loi de Snell-Descartes.

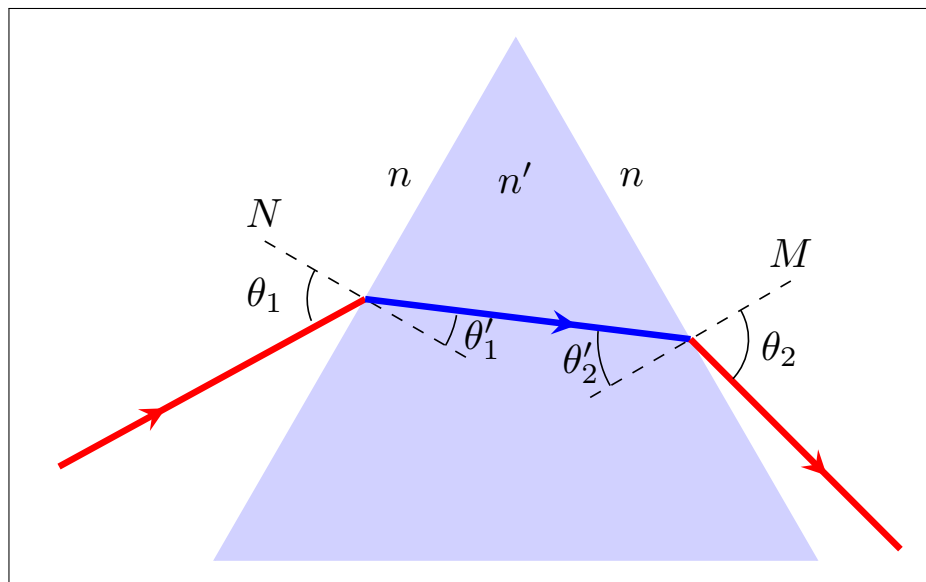
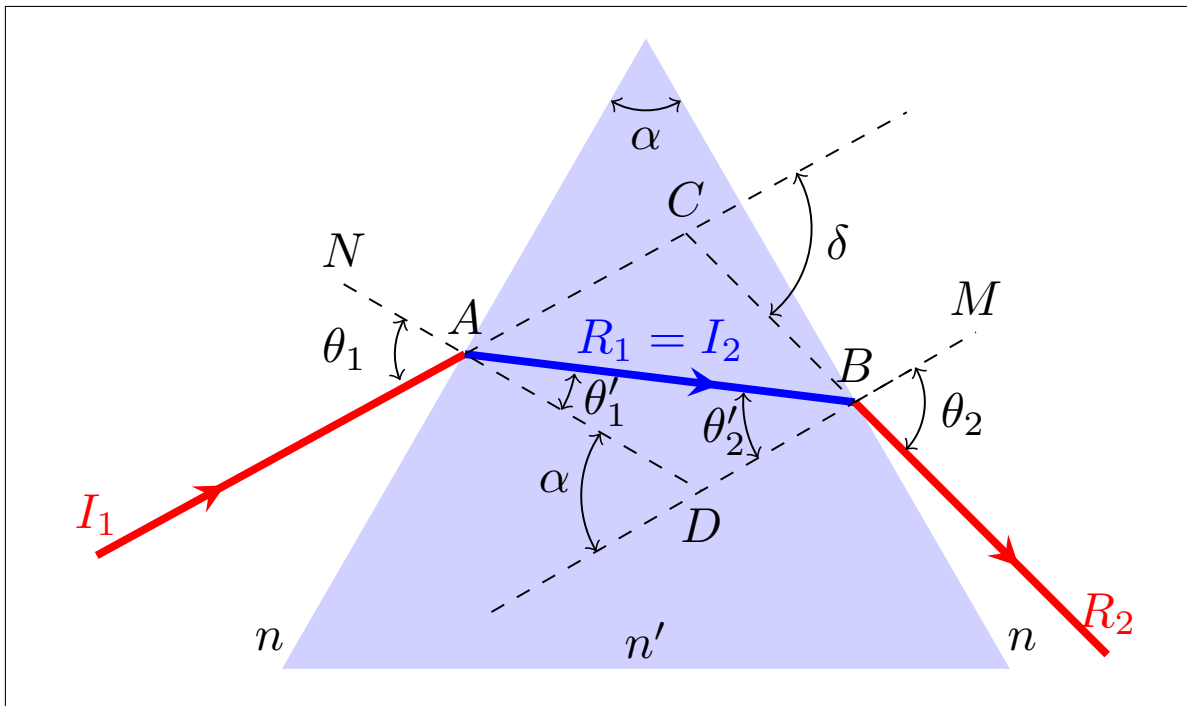


FIGURE 36.1 – Double réfraction dans un prisme.

C Angle de déviation

Si α est l'angle que font les faces du prisme entre elles, l'angle δ est l'angle que les faisceaux incidents I_1 et R_2 font entre eux.

Cet angle δ est appelé la *dévi*ation du faisceau par le prisme.

FIGURE 36.2 – Déviation δ par un prisme.

Pour fixer les idées, supposons que notre prisme est en verre et a un indice de réfraction n' . Également pour fixer les idées, supposons que le milieu extérieur est de l'air avec indice de réfraction n .

Le faisceau incident I_1 passe de l'air au point A , est réfracté et devient le faisceau réfracté R_1 . Le faisceau I_1 fait un angle θ_1 avec la droite N normale à la surface du prisme en A . Le faisceau R_1 fait un angle θ'_1 avec la normale N .

Ce faisceau R_1 arrive en B et passe du verre à l'air. Il est donc alors un faisceau incident. Appelons le I_2 mais il est clair que $I_2 = R_1$.

Le faisceau I_2 est réfracté en B et devient le faisceau R_2 . Le faisceau I_2 fait un angle θ_2 avec la droite M normale à la surface du prisme en B . Le faisceau R_2 fait un angle θ'_2 avec la normale M .

À chaque fois, la loi de Snell-Descartes est applicable.

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta'_1} = \frac{n'}{n} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta'_2} \quad (36.1)$$

Établissons la relation entre la déviation δ , l'ouverture du prisme α et les angles θ_1 et θ_2 . L'observation de la figure 36.2 p. 285 permet de déduire une première valeur.

$$\delta = \theta_1 + \theta_2 + \theta'_1 + \theta'_2 \quad (36.2)$$

Il est évident que :

$$\theta'_1 + \theta'_2 = \alpha \quad (36.3)$$

Donc :

$$\delta = \theta_1 + \theta_2 - \alpha \quad (36.4)$$

D Déviation minimale

On peut faire l'étude de la fonction $\delta(\theta_1)$. C'est la fonction "déviation" en fonction de l'angle d'entrée. Cette fonction a une concavité tournée vers le haut. Il existe donc une déviation minimale δ_m .

δ sera minimale si sa dérivée vaut zéro.

$$\frac{d\delta}{d\theta_1} = 0 \quad (36.5)$$

En substituant l'équation 36.4 dans l'expression précédente, on trouve :

$$\frac{d\theta_2}{d\theta_1} = -1 \quad (36.6)$$

C'est-à-dire :

$$d\theta_2 = -d\theta_1 \quad (36.7)$$

Les relations 36.1 peuvent se réécrire :

$$\sin\theta_1 = \frac{n'}{n} \sin\theta'_1 \quad (36.8)$$

et

$$\sin\theta_2 = \frac{n'}{n} \sin\theta'_2 \quad (36.9)$$

En différentiant ces deux dernières équations, elles donnent :

$$\cos\theta_1 d\theta_1 = \frac{n'}{n} \cos\theta'_1 d\theta'_1 \quad (36.10)$$

et

$$\cos\theta_2 d\theta_2 = \frac{n'}{n} \cos\theta'_2 d\theta'_2 \quad (36.11)$$

Si on divise membre à membre ces deux relations, on obtient :

$$\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} \frac{d\theta_1}{d\theta_2} = \frac{\cos\theta'_1}{\cos\theta'_2} \frac{d\theta'_1}{d\theta'_2} \quad (36.12)$$

Mais par l'équation 36.7 et en dérivant de la même manière l'équation 36.3 p;285, on peut écrire :

$$d\theta'_2 = -d\theta'_1 \quad (36.13)$$

Si on substitue cette dernière expression dans la relation 36.12, on peut écrire :

$$\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} = \frac{\cos\theta'_1}{\cos\theta'_2} \quad (36.14)$$

En élevant au carré et en utilisant la relation fondamentale de la trigonométrie, on voit aisément que :

$$\frac{1 - \sin^2\theta_1}{1 - \sin^2\theta_2} = \frac{1 - \sin^2\theta'_1}{1 - \sin^2\theta'_2} \quad (36.15)$$

À partir d'ici, fixons $n = 1$ pour alléger l'écriture.

Par la loi de Snell-Descartes, ceci devient :

$$\frac{1 - \sin^2 \theta_1}{1 - \sin^2 \theta_2} = \frac{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{n'^2}}{1 - \frac{\sin^2 \theta_2}{n'^2}} \quad (36.16)$$

ou encore

$$\frac{1 - \sin^2 \theta_1}{n'^2 - \sin^2 \theta_1} = \frac{1 - \sin^2 \theta_2}{n'^2 - \sin^2 \theta_2} \quad (36.17)$$

Il faut donc résoudre l'équation précédente.

Pour résoudre l'équation 36.17, il faut faire l'étude la fonction :

$$f(x) = \frac{1 - x}{n'^2 - x} \quad (36.18)$$

pour $x > 0$

La dérivée de $f(x)$ est :

$$f'(x) = \frac{-1}{n'^2 - x} + \frac{1 - x}{(n'^2 - x)^2} = \frac{1 - n'^2}{(n'^2 - x)^2} \quad (36.19)$$

Comme $n' > 1$, on a $f'(x) < 0$.

La fonction $f(x)$ est donc strictement décroissante.

Ceci implique que l'équation 36.17 a une solution unique :

$$\theta_1 = \theta_2 \quad (36.20)$$

De même, il est dès lors immédiat que

$$\theta'_1 = \theta'_2 \quad (36.21)$$

La déviation minimale correspond donc à un cas où :

$$\delta_m = 2\theta_1 - \alpha \quad (36.22)$$

En remplaçant θ_1 par la relation de Snell-Descartes et se souvenant que $\theta'_1 + \theta_2 = \alpha$, on peut écrire

$$\delta_m = 2 \arcsin \left(n' \sin \frac{\alpha}{2} \right) - \alpha \quad (36.23)$$

Qui devient

$$\frac{\delta_m + \alpha}{2} = \arcsin \left(n' \sin \frac{\alpha}{2} \right) \quad (36.24)$$

Si on se souvient que n n'est nécessairement égal à 1, on établit ainsi la relation ci-dessous.

Propriété 8 (Déviation minimale par un prisme).

$$\frac{n'}{n} = \frac{\sin \frac{1}{2}(\alpha + \delta_m)}{\sin \frac{1}{2}\alpha} \quad (36.25)$$

Rappelons que ceci correspond au cas où $\theta_1 = \theta_2 = \frac{\delta_m + \alpha}{2}$ et $\theta'_1 = \theta'_2 = \frac{\alpha}{2}$.

2 Décomposition de la lumière blanche

Nous savons que la lumière blanche est décomposée en différentes couleurs lorsque qu'elle traverse un prisme. Ceci a pour origine un phénomène physique que l'on appelle *dispersion*.

A La dispersion

La dispersion est le fait que l'angle de réfraction est fonction de la couleur du rayon réfracté. Plus précisément, l'indice de réfraction est fonction de la couleur. Par exemple, pour l'eau, on a :

Indice de réfraction en fonction de la couleur pour de l'eau à 20°C	
couleur	indice
rouge	1,3289
rouge-orange	1,3317
jaune	1,3330
vert-bleu	1,3371
bleu-violet	1,3403

Ainsi, comme la loi de la réfraction est fonction de l'indice de réfraction du milieu traversé :

$$\alpha_{réfracté} = \arcsin\left(\frac{n_{incident}}{n_{réfracté}} \cdot \sin(\alpha_{incident})\right)$$

l'angle de réfraction va changer avec la couleur. Par exemple, avec de l'air pour milieu d'incidence ($n_{incident} = 1$) et de l'eau pour milieu de réfraction, on a une valeur de l'angle de réfraction plus grande pour le rouge que pour le bleu, c'est-à-dire que le bleu est plus dévié que le rouge par la surface.

Dans un prisme, la dispersion a lieu deux fois puisqu'il y a deux réfractions.

B L'arc-en-ciel

Ce phénomène naturel étonnant est en réalité assez facilement expliqué grâce à la loi de la réfraction et à celle de la dispersion. On sait que la pluie et le soleil sont impliqués, puisqu'il a généralement lieu juste après la pluie et quand le soleil revient. De plus, on sait aussi que le soleil est alors relativement bas et toujours dans le dos de l'observateur.

Ce phénomène possède une composante géométrique et une autre ondulatoire. Nous n'aborderons ici que sa partie géométrique. Elle implique des gouttes d'eau en suspension dans l'air. Celles-ci sont sphériques et sont traversées de rayons lumineux .

On constate que la goutte est traversée par le rayon lumineux qui subit à l'entrée dans celle-ci une réfraction, puis se réfléchit sur la sa surface intérieure et enfin ressort en se réfractant une seconde fois. A l'origine du phénomène se trouvent donc deux réfractions et une réflexion. L'angle entre le rayon qui frappe la goutte et celui qui en ressort vaut 42° pour un angle d'incidence sur la goutte de $59,6^\circ$. C'est précisément l'angle observé entre la partie haute de l'arc-en-ciel (le rouge) et la direction des rayons provenant du soleil.

Cela dit, pourquoi ne considérer que les rayons lumineux entrant dans la goutte sous l'angle de $59,6^\circ$? En réalité, beaucoup d'autres rayons entrent dans celle-ci. Ils sont tous parallèles car le soleil est situé très loin et ses rayons nous parviennent ainsi. Mais, si chacun de ces rayons entrent dans la goutte sous un angle différent, ils ressortent *condensés* autour du rayon issu d'un angle

d'incidence sur la goutte de $59,6^\circ$. On appelle cela une caustique. Ainsi, l'intensité lumineuse qui ressort de la goutte sous cet angle est maximale et se manifeste par l'arc-en-ciel.

Le problème des couleurs vient lui du phénomène physique de *dispersion*.

Le phénomène se produit évidemment dans la goutte comme dans un prisme. Le résultat des deux réfractions et de la réflexion est que le bleu est plus dévié que le rouge. L'angle par rapport au sol sous lequel on voit le bleu est donc plus faible que pour le rouge et ainsi on voit le rouge à l'extérieur de l'arc-en-ciel c'est-à-dire au sommet de celui-ci.

Finalement, il faut encore dire quelques mots à propos du second arc-en-ciel. En effet, on peut à l'occasion voir un second arc-en-ciel au-dessus du premier. Il est moins intense et ses couleurs sont inversées. A quoi est-il dû ?

Simplement au fait que les rayons dans la goutte peuvent faire deux réflexions au lieu d'une seule.

Évidemment, les pertes par réfraction au moment des deux réflexions sont plus importantes que pour une seule réflexion et donc l'arc-en-ciel est d'une intensité plus faible.

Finalement, nous laissons au lecteur le soin de comprendre pourquoi le second arc-en-ciel est retourné, c'est-à-dire le rouge en bas et le bleu en haut.

a) Le bleu du ciel

Les molécules d'air absorbent une partie de la lumière solaire, pour la diffuser ensuite, et ce, de manière plus importante pour les lumières bleues que pour les rouges. Cette diffusion entraîne une perte d'énergie des rayons solaires traversant l'atmosphère, et ce, de façon plus importante pour les lumières bleues. Ceci permet d'expliquer la coloration rouge du ciel, le soir et le matin, étant donné l'épaisseur importante de la couche d'air traversée.

Ce phénomène s'appelle la diffusion. Il est dû à la nature ondulatoire de la lumière et ne s'explique pas en optique géométrique.

3 Exercices

- La déviation d'un rayon lumineux, par un système optique, est l'angle formé par le prolongement du rayon incident, et le rayon réfracté ou réfléchi qui en sort. Calculer cette déviation dans les cas suivants :
 - un miroir plan et un rayon incident à 45°
 - un dioptre air-eau, et un rayon incident à 45°
 - un prisme ($n=1,5$ et $\alpha=60^\circ$), et un rayon incident à 45°

$90^\circ ; 12,88^\circ ; 37,4^\circ$
- La déviation minimale d'un prisme d'angle égal à 40° , est atteinte pour un angle d'incidence de 32° . Quel est l'indice du prisme ?
1,55
- La déviation minimale d'un prisme d'angle égal à 50° , est atteinte pour un angle d'incidence de 30° . Quel est l'indice du prisme ?
1,18
- Un périscope comporte deux prismes à réflexion totale. Construire l'image d'un objet, vu au travers de ce périscope, et préciser ses caractéristiques. Comparer la distance apparente de la source à l'observateur, lors d'une observation avec, puis sans périscope.

5. Un prisme droit, d'indice de réfraction 1,5 et un miroir sont disposés comme suit, à la surface de l'eau ($n=1,33$).

FIGURE

Construire la marche d'un rayon lumineux, tombant sur le miroir selon un angle de 30°

6. Pour quelle(s) valeur(s) de l'angle d'incidence un rayon lumineux tombant sur un prisme d'indice relatif 1,7, et d'angle au sommet égal à 45° , subira-t-il une réflexion totale dans le prisme ?

De -90° à $15,36^\circ$

7. Un périscope comporte deux prismes à réflexion totale comme décrit ci-contre, Il a pris l'eau et le prisme du bas est noyé sous l'eau. En quoi cela peut-il affecter la vision ? ($n_{\text{eau}} = 1,33$; $n_{\text{prisme}} = 1,5$)

8. Une fibre optique de verre fonctionnant dans l'air permettra des réflexions totales si l'angle d'incidence est supérieur à 39° . Quel sera l'angle d'incidence minimal pour une réflexion totale si la fibre est plongée dans de l'eau ($n_{\text{air}} = 1$, $n_{\text{eau}} = 4/3$) ?

$56,8^\circ$

9. L'existence d'un arc-en-ciel peut être expliquée par l'étude de la marche des rayons lumineux dans une goutte d'eau. Plusieurs types de marche sont possibles. L'arc-en-ciel principal doit son existence aux rayons qui quittent les gouttes après une seule réflexion interne (rayons CLASS 3). La marche des rayons CLASS.3 n'est, pour une direction donnée des rayons incidents, fonction que d'un seul paramètre : le paramètre d'impact x . Il est mesuré à partir du point 0, selon un axe perpendiculaire aux rayons incidents. L'arc-en-ciel est formé, lorsque tous les rayons incidents pour lesquels le paramètre d'impact est situé dans un intervalle infiniment petit dx , subissent la même déviation D . Tous les rayons qui quittent les gouttes sont alors, pour une lumière monochromatique donnée, concentrés dans une direction bien définie. Pour une lumière blanche incidente, on obtient un éventail de couleurs, l'arc-en-ciel. On demande :

- Donnez le rapport entre l'angle d'incidence θ , le paramètre d'impact x et le rayon de courbure R des gouttes d'eau.
- Démontrez que l'angle de déviation D est donné par où θ et θ' sont les angles d'incidence et de réfraction à la première surface de séparation.
- Démontrez que la valeur θR de θ qui donne lieu à l'arc-en-ciel est donnée par $\cos^2 \theta R = (n_2 - 1)/3$
- Sous quel angle par rapport à l'horizontale un observateur voit-il l'anneau rouge de l'arc-en-ciel ? Supposez la lumière incidente horizontale.
- Quel anneau l'observateur voit-il dans la partie supérieure de l'arc-en-ciel ? Le rouge ou le violet ? Expliquez et ajoutez une figure illustrant votre réponse.

Remarques :

- Les gouttes d'eau sont sphériques.
- Indices de réfraction : 1,330 pour la lumière rouge et 1,342 pour la lumière violette.

Chapitre 37

Lentilles minces

Sommaire

1	Combinaison de prismes	292
2	Lentilles	292
3	Lentilles minces	292
4	Types de lentilles	292
	A Lentilles convergentes	292
	B Lentilles divergentes	293
5	Point focal	293
	A Distance focale	294
6	Rayons principaux	294
7	Formation d'images	294
8	Lois des lentilles	295
	A Grandissement	296
	B Grossissement	296
	C La puissance d'une lentille	297
	D Lentille convergente, divergente et loi des lentilles minces	297
9	Exercices	298

Introduction

La réfraction de la lumière a lieu même si les surfaces entre les deux milieux ne sont pas plates. Un cas particulier est celui des lentilles.

Nous nous limiterons ici à l'étude des lentilles minces.

1 Combinaison de prismes

Une lentille peut être considérée comme une combinaison de prismes. Les lentilles de Fresnel sont d'ailleurs, sur ce principe, constituées de cercles concentriques de lentilles différentes.

Les lentilles de Fresnel sont utilisées dans les phares de marine. Le diamètre de ces lentilles étant de l'ordre du mètre, elles seraient beaucoup plus massives si elles n'étaient pas ainsi construites.

2 Lentilles

Les lentilles seront des pièces de matériau transparent (souvent du verre ou des matières plastiques). Elles auront une symétrie de révolution autour de leur axe optique. C'est pourquoi nous ne les représenterons que par la tranche. Les courbes les limitant des deux côtés de l'axe optique seront des arcs de cercle.

3 Lentilles minces

Comme pour les miroirs courbes, sauf via des constructions compliquées, des lentilles "épaisses" n'ont pas de foyer. Comme pour les miroirs courbes, une faible épaisseur de lentille permettra d'avoir des lentilles possédant des foyers.

Les lentilles de "faible épaisseur" sont appelées des lentilles minces.

4 Types de lentilles

Nous allons quelque peu simplifier la diversité des situations possibles et nous limiter à deux cas.

Les centres des arcs de cercles limitant les lentilles peuvent se trouver du même côté de la lentille que l'arc de cercle ou de l'autre côté.

On ne va considérer ici que l'hypothèse de lentilles minces de faces symétriques identiques. La lumière qui passe à travers est réfractée en se rapprochant de la normale à l'entrée dans le verre et en s'éloignant de la normale quand elle en ressort. Pour des rayons incidents sur la lentille parallèles à son axe optique, il s'en suit deux comportements différents selon la courbure de celle-ci.

A Lentilles convergentes

Si les centres sont du l'autre côté que l'arc de cercle, on a une lentille convergente.

Si la lentille est convergente et que les faisceaux de lumière sont parallèles à l'axe optique, les rayons qui en ressortent vont tous converger vers un point nommé foyer, situé à une distance appelée distance focale (ou focale) de la lentille. (voir figure [37.1](#))

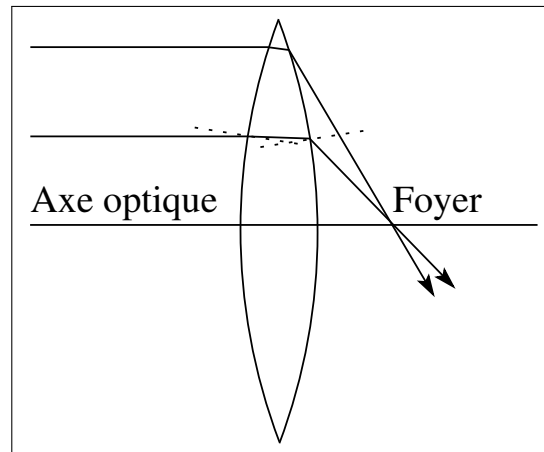


FIGURE 37.1 – Lentille convergente.

On les représente par un segment centré sur l'axe optique et perpendiculaire à celui-ci. Le segment est limité par deux pointes de flèche pointant vers l'extérieur. Ce segment correspond à la surface centrale de la lentille. (voir figure 37.3 p. 294)

B Lentilles divergentes

Si les centres sont du même côté que l'arc de cercle, on a une lentille divergente.

Si la lentille est divergente, les faisceaux de lumière vont diverger à partir d'un autre point symétrique du foyer (à la même distance focale) et aussi nommé foyer (voir figure 37.2).

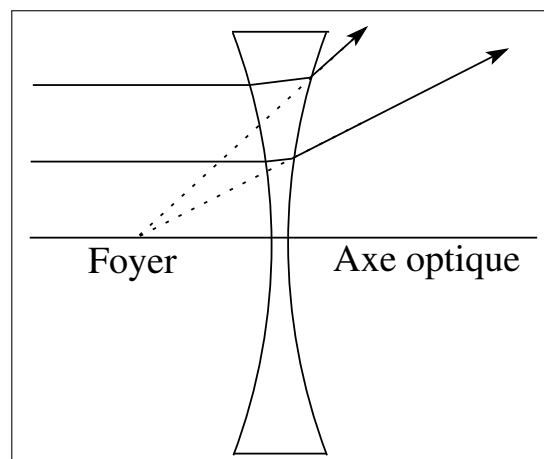


FIGURE 37.2 – Lentille divergente.

On les représente par un segment centré sur l'axe optique et perpendiculaire à celui-ci. Le segment est limité par deux pointes de flèche pointant vers l'intérieur.

5 Point focal

Les faisceaux de lumière passant par une lentille peuvent se concentrer en deux points particuliers : les foyers de la lentille.

Ces foyers sont sur l'axe optique, de chaque côté de la lentille et à une même distance du centre de la lentille.

A Distance focale

La déviation des faisceaux de lumière dépendant non seulement de la géométrie de la lentille mais aussi de l'indice de réfraction du matériau la constituant, la localisation des foyers n'obéit pas à des règles aussi faciles que pour les miroirs courbes.

La distance entre le centre de la lentille et les foyers est appelée la distance focale.

6 Rayons principaux

On peut tirer trois comportements simples des rayons qui traversent une lentille mince. Ces trois comportements fournissent une technique pour la construction d'image.

Principe 4 (Les rayons principaux).

1. *Tout rayon passant par le centre de la lentille n'est pas dévié,*
2. *Tout rayon entrant dans la lentille parallèlement à son axe optique en ressort selon une droite qui passe par son foyer et*
3. *Tout rayon entrant dans la lentille selon une droite qui passe par son foyer en ressort parallèlement à son axe optique.*

Ces trois rayons sont appelés les rayons "*principaux*".

On schématise ces comportements comme présentés sur la figure 37.3.

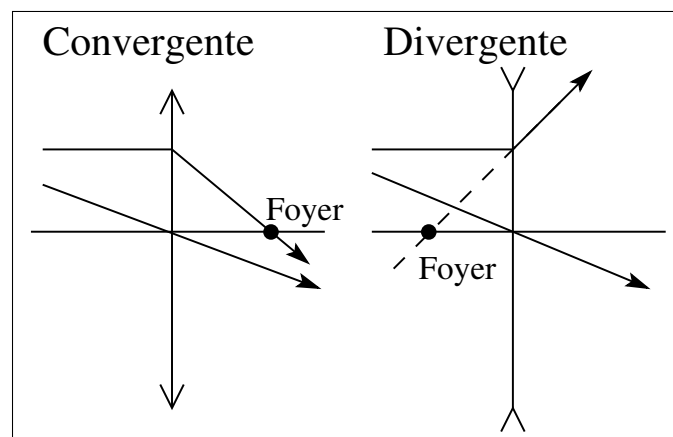


FIGURE 37.3 – Rayons principaux dans les lentilles minces.

7 Formation d'images

La formation d'images se fait en appliquant les règles précédentes.

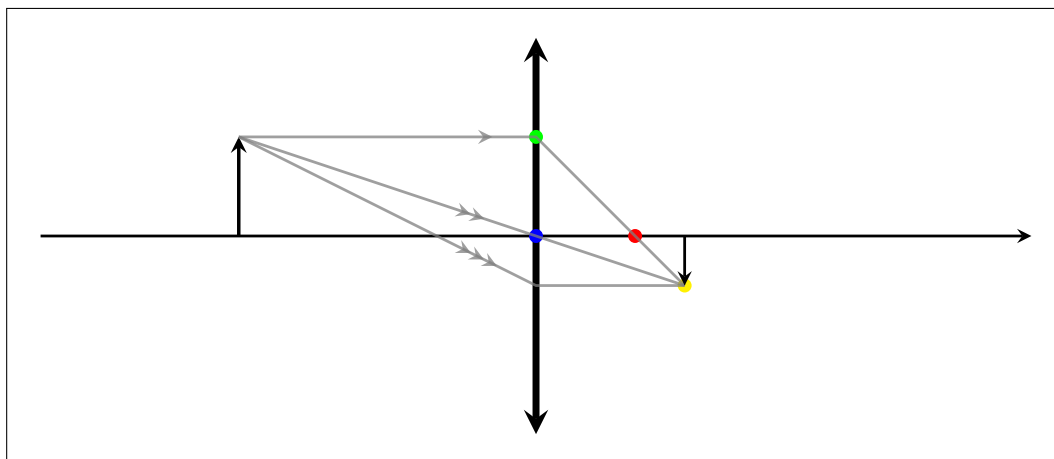


FIGURE 37.4 – Formation d'image dans une lentille convexe.

Ici, comme pour les miroirs concaves, la formation d'image réelle ou virtuelle va dépendre de la position de l'objet par rapport au foyer et à la lentille.

8 Lois des lentilles

Dans le cas de lentilles minces, il existe une relation entre la distance focale, la position de l'objet et celle de l'image formée par la lentille (voir figure 37.5).

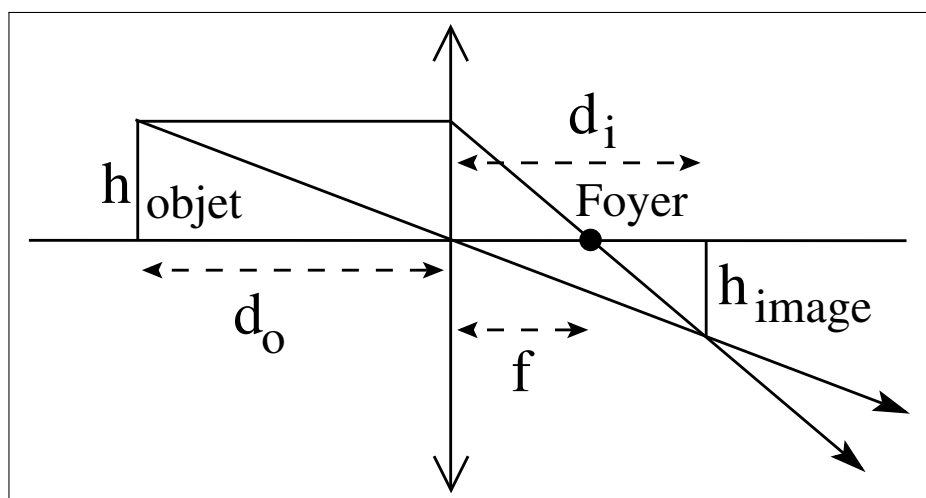


FIGURE 37.5 – Rayons principaux dans les lentilles minces.

Cette relation s'écrit :

Loi 15 (Loi des lentilles).

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} \quad (37.1)$$

Où

- h_o est la hauteur de l'objet,
- h_i celle de l'image et
- f la distance focale.

On la démontre par des relations entre triangles semblables (voir figure 37.6).

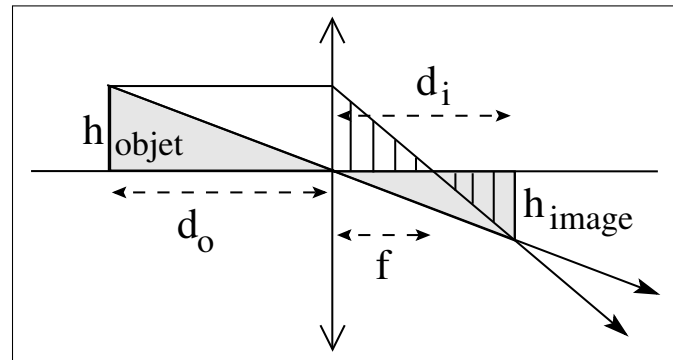


FIGURE 37.6 – Triangles semblables et loi des lentilles.

A Grandissement

On a vu que du triangle grisé de la figure 37.6, on tire :

$$\frac{h_{\text{objet}}}{h_{\text{image}}} = \frac{d_o}{d_i} \quad (37.2)$$

Cependant, pour utiliser de manière générale la loi des lentilles minces, nous verrons au paragraphe D qu'il est nécessaire de considérer comme négatifs les objets ou images qui se trouvent sous l'axe optique. Ainsi, comme $h_{\text{image}} < 0$, le rapport $h_{\text{objet}}/h_{\text{image}} < 0$. Or, le rapport d_o/d_i ne l'est pas. Il est donc nécessaire de mettre un signe moins devant celui-ci.

Ainsi, on peut définir le grandissement (et non le grossissement) de l'image m par :

Définition 64 (Grandissement).

$$m = \frac{h_{\text{image}}}{h_{\text{objet}}} = -\frac{d_i}{d_o} \quad (37.3)$$

B Grossissement

Le grandissement est donc le rapport de la hauteur de l'image par la hauteur de l'objet. Or, pour observer les taches solaires (des zones sombres à la surface du soleil), on projette généralement son image à travers une lentille sur une feuille de papier. Elle peut alors avoir quelques dizaines de centimètre de diamètre et l'observation des taches se fait dans de bonnes conditions. Le grandissement est alors quasi nul, puisque la taille de l'image est ridicule par rapport au diamètre du soleil. Pourtant, il est bien plus difficile d'observer les taches solaires directement (à travers un filtre de protection pour les yeux), simplement parce qu'on voit alors au loin le soleil lui-même et qu'il nous paraît plus petit que son image sur le papier. On va donc définir une nouvelle grandeur traduisant mieux cette impression visuelle : le grossissement.

Pour définir le grossissement d'un objet, il faut le rapporter aux angles qui sous-tendent l'objet et l'image. Car, ce sont ceux-ci qui vont rendre compte de notre perception du grossissement. Ainsi, on définit le grossissement par :

Définition 65 (Grossissement).

$$G = \frac{\beta}{\alpha} \quad (37.4)$$

où l'angle α est celui sous lequel on voit l'objet et l'angle β celui sous lequel on voit l'image. Chacun de ces angles peuvent facilement être calculés à l'aide des relations trigonométriques suivantes :

$$\tan(\alpha) = \frac{h_{\text{objet}}}{d_o} \quad \text{et} \quad \tan(\beta) = \frac{h_{\text{image}}}{d_i} \quad (37.5)$$

où d_o est la distance de l'œil à l'objet quand on le voit sans lentille. Pour un objet observé au microscope, par exemple, l'angle α est déterminé en utilisant pour distance objet d_o la distance au point proche de 25 cm , car c'est le point le plus proche auquel on peut voir l'objet net.

Dans le cas de petits angles (en radians), les relations ci-dessus peuvent s'écrire :

$$\alpha = \frac{h_{\text{objet}}}{d_o} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{h_{\text{image}}}{d_i} \quad (37.6)$$

C La puissance d'une lentille

Parfois au lieu d'utiliser la distance focale d'une lentille pour la caractériser, on utilise sa puissance P :

Définition 66 (Puissance d'une lentille).

$$P = \frac{1}{f} \quad (37.7)$$

Il s'agit de l'inverse de la distance focale. Son unité est donc m^{-1} qui est définie comme la *dioptrie* et notée D .

Ainsi, la puissance d'une lentille d'une distance focale de 20 cm , par exemple, vaut 5 dioptries :

$$P = \frac{1}{0,2} = 5 D \quad (37.8)$$

Notez que la distance focale doit être dans les unités du système international, c'est-à-dire en mètre, pour que la puissance soit en dioptries.

La puissance est une grandeur très utilisée par les oculistes, ophtalmologistes et opticiens pour caractériser les défauts de l'œil et les dispositifs de correction.

D Lentille convergente, divergente et loi des lentilles minces

La loi des lentilles minces est valable pour des lentilles convergentes comme divergentes, mais il faut respecter un certain nombre de règles sur les signes des grandeurs :

Loi 16 (loi des lentilles minces).

1. Pour des lentilles minces divergentes, la distance focale doit être prise négative, alors que pour des lentilles convergentes elle doit être positive.
2. La distance objet est prise positive si l'objet est situé du côté de la lentille d'où la lumière vient. Négative autrement.
3. La distance image est prise positive si l'image est située du côté de la lentille d'où la lumière ne vient pas. Négative autrement. La distance image d'une image réelle est ainsi positive et négative pour une image virtuelle.
4. Les hauteurs objet ou image sont positives si elles sont au-dessus de l'axe optique et négative si elles sont au-dessous.

Dans ces conditions, on peut montrer que la loi des lentilles minces est valable aussi pour des lentilles divergentes.

9 Exercices

1. Une lentille donne d'un objet lumineux, une image réelle, renversée, sur un écran situé de l'autre côté de la lentille. On dispose, contre cette lentille, un disque opaque, d'un rayon égal à la moitié de celui de la lentille. Qu'observera-t-on sur l'écran ?
2. Identifiez tous les types de lentille et précisez les conditions donnant :
 - (a) une image réelle,
 - (b) une image droite par rapport à l'objet
 - (c) une image plus grande que l'objet.
3. A l'aide d'une loupe de 5 cm de distance focale, on observe un objet de 1 cm de hauteur, situé à 3 cm de la lentille, perpendiculaire à son axe. Déterminer graphiquement et par calcul, les caractéristiques de l' image obtenue, ainsi que le grossissement commercial de la loupe.
à 7,5 cm, virtuelle, droite ; 5
4. Un appareil photographique, dont l'objectif est assimilable à une lentille à bords , minces de 50 mm de distance focale, est mis au point sur l'infini, puis sur un objet situé à 6 m. Déterminer la grandeur et le sens du déplacement de l'objectif.
s' éloigne du film de 0,42 mm
5. Comment varie la distance focale d'une lentille en verre plongée dans l'eau ? Que vaut-elle dans l'eau, si sa valeur, dans l'air, est 20 cm ?
78 cm
6. L'objectif d'un agrandisseur de photographie est une lentille mince biconvexe d'indice 1,5 et dont les faces ont des rayons de courbure de 10 et 15 cm. On veut agrandir un cliché sur lequel un objet a 5 cm de hauteur. Le cliché se trouve à 16 cm du centre optique de la lentille. Quelle est la distance focale de cette lentille, et quelles sont les caractéristiques de l'image ?
12 cm ;réelle, renversée, de 15 cm de hauteur
7. On désire obtenir, sur un écran une image agrandie 5 fois, à l'aide d'une lentille à bords minces, de 20 cm de distance focale. Déterminer où placer l'objet et l'écran.
à 1,2m ; $p'=1,2m$ et $p=-0,24m$
8. On désire photographier un objet situé à 15 m, se déplaçant à la vitesse de 36 km h^{-1} , à l'aide d'un appareil de 10 cm de distance focale, en acceptant tout au plus un flou dû au bougé de 0,1 mm. Quelle doit être la durée de l'exposition ?
1,5 ms
9. La rétine d'un œil normal est à 15 mm de son centre optique. Quelle est sa convergence, au repos, et lorsqu'il accommode sur un objet situé à 15 cm ?
66,6D ; 73,3D
10. On désire obtenir, à l'aide d'un projecteur de diapositives constitué d'une lentille à bords minces de 50 mm de distance focale, une image sur un écran situé à 4 m de la lentille. Sachant que la diapositive mesure 24 x 36 mm, déterminez, graphiquement et par calcul, où la placer, ainsi que les caractéristiques (type, dimensions, sens) de l'image obtenue.
à 5,06 cm ; 1,897x2,845 m
11. Un objet de 25 mm de hauteur, placé à 20 cm d'une lentille, donne une image de 10 mm de hauteur, du même côté de la lentille que l'objet. Précisez les caractéristiques de cette image et déterminez, graphiquement et par calcul, la distance focale de cet te lentille.
13,3cm
12. On désire projeter des diapositives de 35 mm sur un écran de 1,4 m situé à 5 m du projecteur, dont l'objectif a une focale variable de 50 à 135 mm. Quelle focale choisir pour remplir au mieux l'écran.
122 mm

13. Pour observer une plante aquatique, on plonge une loupe de 5 dioptries dans un aquarium. Que devient sa puissance ?
1,3D
14. Un étudiant observe que les rayons qui proviennent du soleil convergent à 15 cm d'une lentille mince. A quelle distance de cette lentille doit-il placer un objet pour en obtenir sur un écran une image trois fois plus grande ?
20 cm
15. Un objectif de projecteur de diapositives est placé à 3 m d'un écran et présente une distance focale de 8 cm.
- (a) A quelle distance de l'objectif, la diapositive se trouve-t-elle lorsque l'image est nette à l'écran ?
 - (b) A l'écran, un détail de l'image fait 10 cm. Quelle est sa taille sur la diapositive ?
 - (c) On désire doubler la taille de l'image à l'écran sans modifier les réglages du projecteur. Où doit-on placer le projecteur par rapport à l'écran ? L'image est-elle encore nette à l'écran ?
 - (d) On désire doubler la taille de l'image à l'écran sans déplacer le projecteur. Quelle distance focale faudrait-il pour l'objectif ?

0,082m 0,0027m 6m 0,041m

Chapitre 38

Combinaisons de lentilles

Sommaire

1	Constructions géométriques	302
2	Loi	302
3	Exercices	303

Introduction

Nous avons découvert les lois des lentilles et comment une lentille permettait parfois de former une image agrandie. Les combinaisons de lentilles amplifient cet effet. Les combinaisons de lentilles sont à la base de nombre de dispositifs optiques comme les jumelles, les microscopes et les télescopes. Les lunettes que nous utilisons pour corriger notre vue reposent elles aussi sur ce principe.

Nous bâtirons nos raisonnements sur des lentilles minces.

1 Constructions géométriques

En alignant deux lentilles sur un même axe optique, on peut trouver l'image d'un objet par le système des deux lentilles en faisant deux fois la construction faite pour chaque lentille.

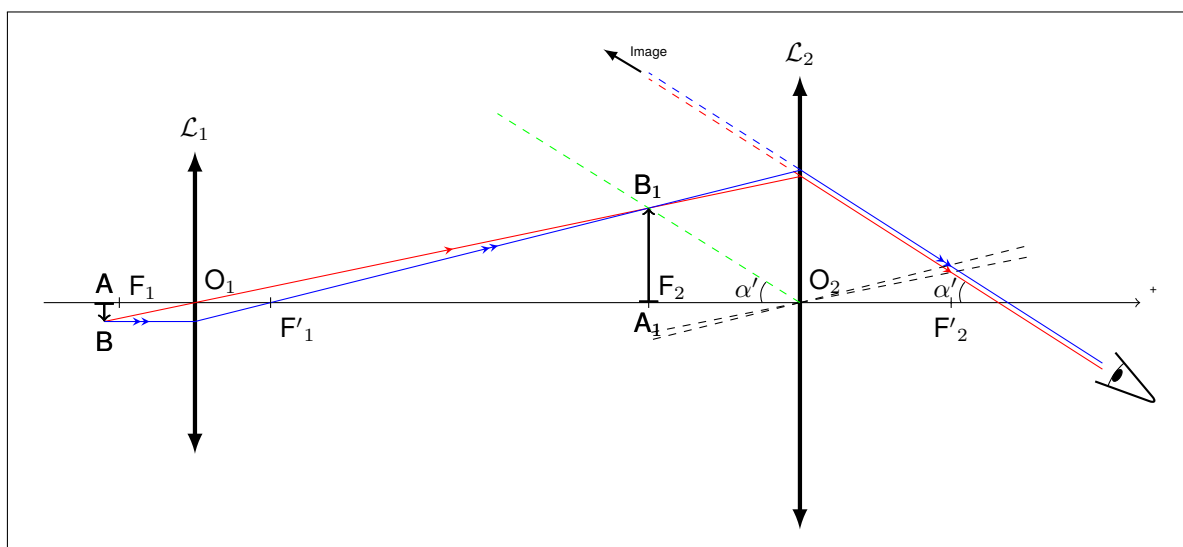


FIGURE 38.1 – Construction d'image pour la combinaison de deux lentilles convergentes.

2 Loi

On peut déterminer une relation permettant de prévoir où se formera l'image finale d'une combinaison de deux lentilles.

Loi 17 (Position de l'image finale avec deux lentilles).

$$s_{o2} = \frac{f_2 \left(d - \frac{f_1 s_{o1}}{s_{o1} - f_1} \right)}{d - f_2 - \frac{f_1 s_{o1}}{s_{o1} - f_1}} \quad (38.1)$$

où :

- s_{o1} = la distance entre l'objet d'origine et le centre optique de la première lentille,
- s_{i1} = la distance entre l'image de l'objet d'origine et le centre optique de la première lentille,
- s_{o2} = la distance entre l'image formée par la première lentille et le centre optique de la deuxième lentille,
- s_{i2} = la distance entre l'image formée par la deuxième lentille et le centre optique de la deuxième lentille,
- f_1 = la distance focale de la première lentille,
- f_2 = la distance focale de la deuxième lentille,
- d = la distance entre les deux lentilles.
- (Toutes les distances sont en m.)

3 Exercices

1. Dans un Fouga Magister, le copilote dispose d'une lunette lui permettant de voir par-dessus le pilote. Le système est composé de deux lentilles et de deux miroirs plans. Vous supposerez travailler dans l'approximation du stigmatisme approché.
 - (a) Déterminez la valeur de x pour que l'image d'un objet situé à l'infini, se forme à l'infini.
 - (b) Les deux lentilles ont un indice de réfraction de 1,5 et un des deux rayons de courbure égal à 20 cm. Calculez l'autre rayon de courbure.
 - (c) On déplace l'objet de l'infini à 100 m. Calculez x pour que l'image se forme toujours à l'infini.

10cm ; 100 et 20 cm ou 11,1 et 6,7 cm ; 0,25 cm

2. Une lentille mince, équiconvexe, donne, d'un objet situé à 1 m, une image située sur un écran à 111,1 mm de la lentille mince équiconvexe. Lorsqu'on lui accole une lentille mince équiconcave, de mêmes rayons de courbure et d'indice 1,6 par rapport à l'air, on doit reculer l'écran de 555,6 mm pour retrouver une image nette. En vous plaçant dans les conditions de Gauss, déterminez l'indice de réfraction de la lentille mince équiconvexe par rapport à l'air. 1,8
3. Un périscope comporte les éléments suivants :
 - (a) Un prisme rectangulaire P2 dont l'une des faces est sphérique, avec un rayon de courbure de 420 mm
 - (b) Un prisme rectangulaire P1, d'indice relatif à l'air égal à 1,6, identique à celui de P2
 - (c) Une lentille biconvexe, de 50 mm de distance focale.

Pour un objet situé à l'infini, L1 se trouve à 5 cm de P1. L'image finale se forme à l'infini. On demande de calculer la distance d :

- (a) en considérant P2 et P1 comme une lentille mince associée à deux miroirs plans et à une lentille mince L1.
- (b) en traitant chaque dioptré séparément.

54 cm ; 59,5 cm

4. Deux lentilles sphériques minces, l'une convergente et l'autre divergente, ont chacune une distance focale de 30 cm en valeur absolue. Elles sont séparées de 10 cm l'une de l'autre. Un insecte se trouve à 20 cm de la lentille convergente.
- (a) A quelle distance de la lentille convergente se trouve l'image de l'insecte formée par cette lentille uniquement ? Est-elle réelle ou virtuelle ?
 - (b) A quelle distance de la lentille divergente, se trouve l'image de l'insecte formée par l'ensemble des deux lentilles ? Se situe-t-elle à gauche ou à droite de la lentille divergente ?

60 cm, virtuelle 21cm, à gauche

Chapitre 39

Les défauts de l'oeil

Sommaire

1	Fonctionnement	306
2	Principaux défauts	307
	A Myopie	308
	B Hypermétropie	308
	C Presbytie	309
	D Astigmatisme	309
3	Les corrections	309
	A Myopie	310
	B Hypermétropie	311
	C Presbytie	312
	D Astigmatisme	312
4	Exercices	312

Introduction

Nous étudierons ici les défauts de la vision les plus classiques. Ceux qui se corrigent avec une paire de lunettes.

1 Fonctionnement

Commençons par décrire le fonctionnement normal.

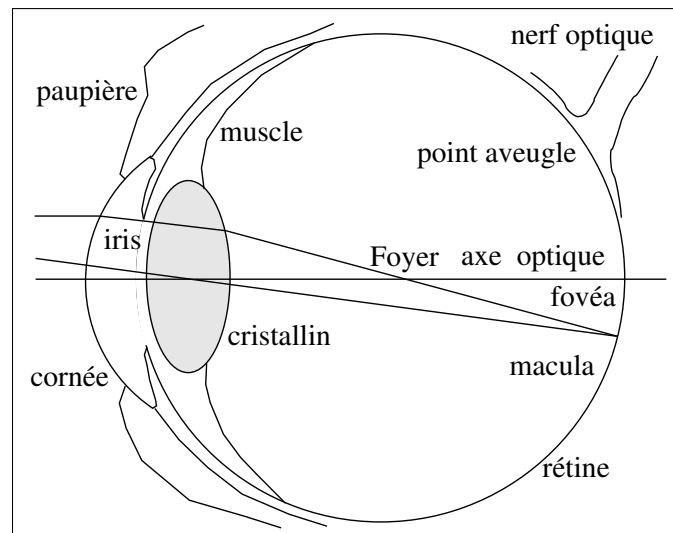


FIGURE 39.1 – Fonctionnement de l'œil.

En principe, le fonctionnement de l'œil est très simple. Nous traiterons le cristallin comme une lentille convergente¹ qui crée une image sur la rétine qui la convertit en impulsions électriques que le nerf optique achemine au cerveau. La focalisation des rayons sur la rétine est assurée par la variation de la courbure du cristallin. Celle-ci se fait par l'intermédiaire de muscles en périphérie du cristallin. S'il n'y a pas que celui-ci qui crée la déviation des rayons lumineux, puisque la cornée joue aussi un rôle important dans cette celle-ci (l'importance de la contribution de la cornée dans la déviation des rayons lumineux est le double de celle du cristallin), seul le cristallin voit sa courbure changer.

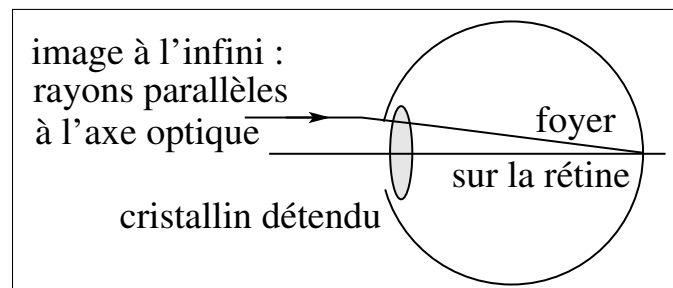


FIGURE 39.2 – La vision lointaine.

En vision lointaine (à l'infini ; voir fig. 39.2), le cristallin est détendu. Sa courbure est minimale et son foyer se situe alors sur la rétine. La distance focale est alors égale au diamètre de l'œil. En

1. Comme nous l'avons signalé ailleurs, c'est la combinaison du cristallin et du liquide du corps vitré qui joue le rôle de lentille.

vision rapprochée (voir fig. 39.3), les muscles courbent le cristallin ce qui fait avancer le foyer et permet une focalisation des rayons sur la rétine.

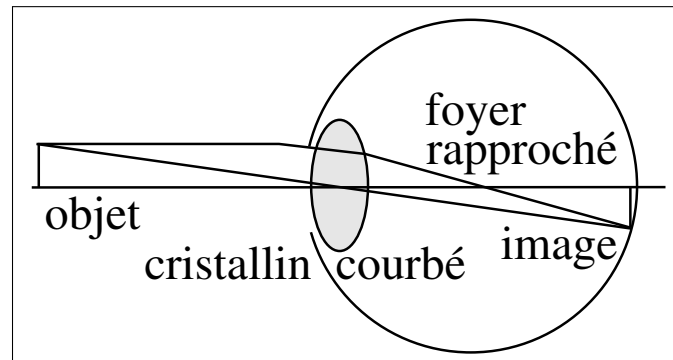


FIGURE 39.3 – La vision rapprochée.

La variation de la courbure du cristallin implique un changement de la distance focale. Ainsi, l'œil est capable de mettre au net une image de l'objet qu'il regarde. Mettre au net signifie que des rayons issus d'un unique point de l'objet se retrouvent en un seul point de l'image formée sur la rétine (voir fig. 39.4).

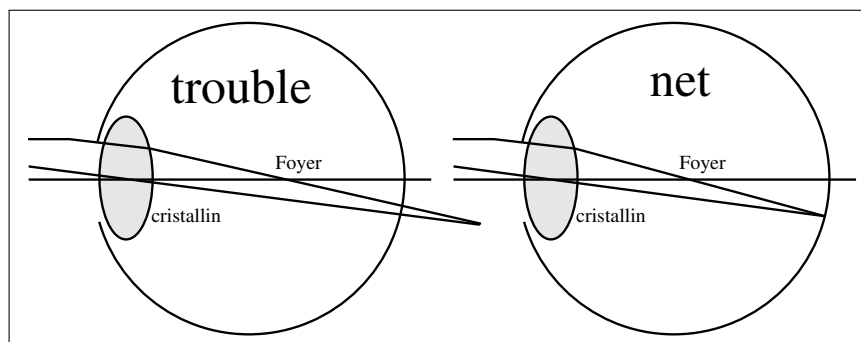


FIGURE 39.4 – Image floue - nette.

La rétine est essentiellement constituée de trois zones (voir fig. 39.1) : la macula, la fovéa et le point aveugle. La macula est la zone qui se trouve dans l'axe optique et permet l'essentiel de la vision directe. Au centre de celle-ci se trouve une zone permettant une vision d'une très grande netteté : la fovéa. Finalement, hors de l'axe optique se trouve une dernière zone dépourvue de récepteurs et d'où part le nerf optique : le point aveugle.

2 Principaux défauts

Les principales sont au nombre de quatre :

1. la myopie,
2. l'hypermétropie,
3. la presbytie et
4. l'astigmatisme.

Ces affections touchent le cristallin. On peut les corriger simplement avec des lunettes. Bien entendu, il en existe aussi qui peuvent toucher d'autres parties de l'œil, comme la rétine. Nous ne nous occuperons pas de celles-ci car elles ne touchent pas aux propriétés optiques simples de l'œil.

A Myopie

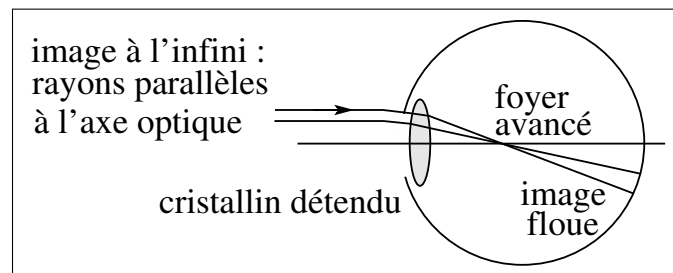


FIGURE 39.5 – L'œil myope.

Elle est due à un œil trop grand. Pour un œil normal, en vision lointaine (à l'infini), les muscles du cristallin se détendent pour amener le foyer sur la rétine. En vision à l'infini, ils sont alors totalement détendus et le cristallin a sa courbure minimale. Chez un myope, comme l'œil est trop grand, quand les muscles sont totalement détendus et que le cristallin a sa courbure minimale, le foyer se trouve à l'intérieur de l'œil et non sur la rétine. Ainsi, l'image d'un point à l'infini est dédoublée sur la rétine (voir fig. 39.5). Il apparaît ainsi trouble.

Le problème de vision des myopes est donc qu'ils ne voient pas net les objets éloignés.

Si on éloigne un objet de l'œil sans modifier la courbure de son cristallin, l'image se rapproche de ce dernier. Ainsi, pour la maintenir sur la rétine, il faut éloigner le foyer, c'est-à-dire diminuer la courbure du cristallin. Tant qu'il peut se détendre pour amener l'image sur la rétine, l'objet sera vu net. Au moment où la courbure est à son minimum, l'objet se trouve en un point appelé *point éloigné* ou *punctum remotum*. Alors, il est encore net. Mais, plus loin, il devient trouble, car son image se rapproche du cristallin sans que celui-ci ne puisse diminuer encore sa courbure pour la replacer sur la rétine.

Ainsi, à partir d'un certain point, le *point éloigné*, et jusqu'à l'infini, les myopes voient trouble.

Pendant l'adolescence, alors que la personne, comme son œil, grandit, la myopie peut s'aggraver. Alors que plus tard il y a peu de modifications.

B Hypermétropie

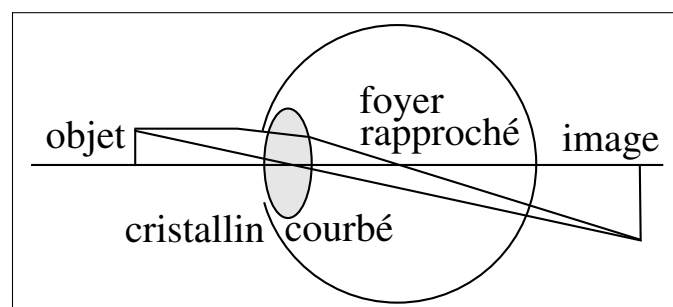


FIGURE 39.6 – L'œil hypermétrope.

Au contraire de la myopie, elle est due à un œil trop petit. Pour un œil normal, en vision rapprochée, les muscles du cristallin se tendent pour amener le foyer en un point tel que l'image formée soit sur la rétine. Chez un hypermétrope, comme l'œil est trop petit, quand les muscles sont totalement contractés et que la courbure du cristallin est à son maximum, le foyer est encore trop loin pour que l'image soit sur la rétine. En réalité, elle se trouve à l'extérieur de l'œil, derrière la rétine.

Ainsi, un unique point de l'objet se trouve dédoublé sur la rétine (voir fig. 39.6). Il apparaît ainsi trouble.

Le problème de vision des hypermétropes est donc qu'ils ne voient pas net les objets proches.

Si on rapproche un objet de l'œil sans modifier la courbure de son cristallin, l'image s'éloigne de ce dernier. Ainsi, pour la maintenir sur la rétine, il faut rapprocher le foyer, c'est-à-dire augmenter la courbure du cristallin. Tant qu'il peut se courber pour ramener l'image sur la rétine, l'objet sera vu net. Au moment où la courbure est à son maximum, l'objet se trouve en un point appelé *point proche* ou *ponctum proximum*. Alors, il est encore au net. Mais, plus près, il devient trouble, car son image s'éloigne du cristallin sans que celui-ci ne puisse augmenter encore sa courbure pour la replacer sur la rétine.

Ainsi, à partir d'un certain point, le *point proche*, et jusqu'à l'œil, les hypermétropes voient trouble.

Il est à noter que même pour un œil normal, un point proche existe. Évidemment le cristallin d'un œil normal a aussi une courbure maximale qui est la même que pour un hypermétrope. Mais comme la taille de l'œil normal est plus grande, la position de l'objet, au moment où le cristallin est totalement courbé, est plus proche que pour un hypermétrope. Bien entendu, passé cette limite, il devient aussi trouble pour l'œil normal. Cette limite se situe pour un œil normal à 25 cm environ. Ainsi, on pourra considérer comme étant hypermétrope une personne qui ne verra pas net les objets à des distance de moins de 25 cm. Typiquement, celles-ci doivent tendre les bras plus que de raison pour lire leur journal.

Les bébés et les petits enfants sont souvent légèrement hypermétropes en raison d'un œil trop petit. Puis au fur et à mesure de leur croissance et de celle de leurs yeux, cela diminue.

C Presbytie

Elle est dans ses effets analogue à l'hypermétropie. Cependant ses causes sont différentes. Ici, la taille de l'œil est normale, c'est la possibilité de courber le cristallin qui diminue. La raison en est qu'avec l'âge, il durcit.

D Astigmatisme

C'est un défaut plus complexe. Dans tout ce qui précède, on a considéré que la cornée avait une symétrie circulaire autour de l'axe optique. Normalement, on peut la considérer comme une petite partie d'un ballon de foot parfaitement sphérique. En réalité, la courbure de la cornée peut être plus proche d'une partie d'un ballon de rugby que de celle d'un ballon de foot. Cela implique une courbure qui n'est plus circulaire, mais plutôt cylindrique. Or, l'image d'un point à travers une lentille cylindrique est une droite parallèle à l'axe du cylindre. Ainsi, un œil astigmatique focalise les rayons dans un plan parallèle à l'axe du cylindre à une distance différente que ceux dans le plan perpendiculaire à cet axe. L'astigmatique aura donc tendance à voir net les lignes verticales et floues celles qui sont horizontales, par exemple.

3 Les corrections

Les corrections peuvent être de trois types : les lunettes, les verres de contact et la chirurgie. Dans ce cours, seuls les deux premiers types seront présentés. Et encore, les verres de contact ne seront présentés qu'à titre d'exercices étant donné leur similitude avec les lunettes (seule change leur distance à l'œil, qui est nulle pour les verres de contact et vaut environ 2 cm pour les lunettes). Signalons aussi que dans ce qui suit les termes de lunette et de lentille sont équivalents, les lunettes étant constitués de lentilles minces. Le terme de lentille ne fait donc pas référence ici aux lentilles

de contact. Si tel devait être cependant le cas, il serait alors bien précisé *lentille de contact* et non simplement *lentille*.

A Myopie

Comme les myopes ne voient pas net les objets lointains, l'idée est de les rapprocher. Pour cela on utilise une lentille divergente qui va créer une image virtuelle proche de l'œil de ces objets lointains. Plus précisément, à l'aide de la lentille divergente, on va créer une image des objets qui sont à l'infini au point net le plus éloigné du myope, c'est-à-dire à son point éloigné. Ainsi en portant comme lunette cette lentille, on va rapprocher tout les objets qui sont dans la zone trouble du myope dans sa zone de vision nette.

Pour savoir quelle lentille il va falloir utiliser, considérons l'exemple suivant : un myope voit bien les objets situés devant lui de 25 cm à 7 m ; quelle lentille doit-on lui prescrire pour qu'il puisse voir nettement aussi les objets situés à des distances supérieures à 7 m ?

Réponse : la lentille doit faire une image d'un objet situé à l'infini au point éloigné du myope. Ainsi il verra nettement les objets éloignés. On a donc la situation suivante : $d_o = \infty$ et $d_i = -(7\text{ m} - 2\text{ cm}) = -6,98\text{ m}$. On doit en effet soustraire à la distance du point éloigné celle des lunettes par rapport à l'œil. En général la lentille se trouve à 2 cm de l'œil. Donc le point éloigné se trouve à $6,98\text{ m}$ de la lentille. Le signe négatif de la distance image quant à lui est du au fait que c'est une image virtuelle, c'est-à-dire qu'elle se trouve du même côté que l'objet. La loi des lentilles minces donne alors :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-6,98} \Rightarrow f = -6,98\text{ m} \quad (39.1)$$

car l'inverse de l' ∞ vaut zéro.

Ainsi la lentille nécessaire doit avoir une distance focale de $-6,98\text{ m}$. Comme celle-ci est négative, on a bien une lentille divergente. Le résultat peut aussi être donné par la puissance de la lentille :

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{-6,98} = 0,14\text{ D} \quad (39.2)$$

On peut aussi vérifier qu'un objet un peu moins éloigné que l'infini, mais dans la zone trouble du myope aura une image dans sa zone nette : prenons par exemple $d_o = 20\text{ m}$. La loi des lentilles minces donne alors :

$$\frac{1}{-6,98} = \frac{1}{20} + \frac{1}{d_i} \Rightarrow \quad (39.3)$$

$$d_i = \left(\frac{1}{-6,98} - \frac{1}{20} \right)^{-1} = -5,17\text{ m} \quad (39.4)$$

$5,17\text{ m}$ de la lentille, c'est-à-dire $5,19\text{ m}$ de l'œil, distance inférieure à celle du point éloigné.

Par ailleurs, on peut se demander où va se trouver l'image d'un objet qui se trouve déjà dans la zone nette du myope. Par exemple : $d_o = 5\text{ m}$. On a alors :

$$\frac{1}{-6,98} = \frac{1}{5} + \frac{1}{d_i} \Rightarrow \quad (39.5)$$

$$d_i = \left(\frac{1}{-6,98} - \frac{1}{5} \right)^{-1} = -2,91\text{ m} \quad (39.6)$$

Ce qui compte tenu de la position des lunettes donne $2,93\text{ m}$ de l'œil et est encore dans la zone nette du myope.

Par contre, un objet au point proche (normal) situé à une distance $d_o = 25\text{ cm}$ de l'œil a une image à une distance :

$$\frac{1}{-6,98} = \frac{1}{0,25 - 0,02} + \frac{1}{d_i} \Rightarrow \quad (39.7)$$

$$d_i = \left(\frac{1}{-6,98} - \frac{1}{0,25 - 0,02} \right)^{-1} = -0,22 \text{ m} \quad (39.8)$$

soit à 22 cm des lunettes et à 24 cm de l'œil, ce qui n'est plus dans la zone de netteté de l'œil.

On comprends bien que si, grâce aux lunettes, la zone de netteté du myope s'est déplacée vers l' ∞ , elle s'est aussi déplacée en vision rapprochée. On peut alors calculer la position d'un objet donnant une image à travers les lunettes qui soit au point proche de 25 cm. On a donc : $d_i = -(25 - 2) = -23 \text{ cm}$ et la loi des lentilles minces donne :

$$\frac{1}{-6,98} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{-0,23} \Rightarrow \quad (39.9)$$

$$d_o = \left(\frac{1}{-6,98} - \frac{1}{-0,23} \right)^{-1} = 0,238 \text{ m} \quad (39.10)$$

de la lentille, c'est-à-dire 25,8 cm de l'œil.

Ainsi, la vision nette du myope s'étend à travers ses lunettes entre l' ∞ et 25,8 cm. Il a beaucoup gagné en netteté pour les objets éloignés, mais il a aussi un tout petit peu peu éloigné son point proche. Pour un myope jeune, c'est-à-dire pas presbyte, cela me pose pas de problème. Par contre pour un myope âgé, devenu presbyte, cela peut poser quelques problèmes. On verra comment les résoudre par l'utilisation de lunettes à doubles foyers.

B Hypermétropie

Comme les hypermétropes ne voient pas net les objets rapprochés, l'idée est de les éloigner. Pour cela on utilise une lentille convergente qui va créer une image virtuelle plus éloignée de l'œil des objets qui sont trop proches. Plus précisément, à l'aide de la lentille convergente, on va créer une image des objets qui sont à 25 cm de l'œil au point net le plus proche de l'hypermétrope, c'est-à-dire à son point proche. Ainsi en portant comme lunette cette lentille, on va éloigner tout les objets qui sont dans la zone trouble de l'hypermétrope dans sa sa zone de vision nette.

Pour savoir quelle lentille il va falloir utiliser, considérons l'exemple suivant : un hypermétrope voit bien les objets situés devant lui de 1 m à l' ∞ ; quelle lentille doit-on lui prescrire pour qu'il puisse voir nettement aussi les objets situés à des distances entre 1 m et 25 cm ?

Réponse : la lentille doit faire une image d'un objet situé à 25 cm au point proche de l'hypermétrope. Ainsi il verra nettement les objets proches. On a donc la situation suivante : $d_o = 25 - 2 = 23 \text{ cm}$ et $d_i = -(1 \text{ m} - 2 \text{ cm}) = -0,98 \text{ m}$. On doit comme précédemment soustraire à chaque distance celle des lunettes par rapport à l'œil, soit 2 cm. Le signe négatif de la distance image quant à lui est dû au fait que c'est une image virtuelle, c'est-à-dire qu'elle se trouve du même côté que l'objet. La loi des lentilles minces donne alors :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{0,23} + \frac{1}{-0,98} \Rightarrow f = 0,30 \text{ m} \quad (39.11)$$

Ainsi la lentille nécessaire doit avoir une distance focale de 0,30 m. Comme celle-ci est positive, on a bien une lentille convergente. Le résultat peut aussi être donné par la puissance de la lentille :

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,30} = 3,33 \text{ D} \quad (39.12)$$

C Presbytie

Le problème de la simple presbytie est corrigé de la même manière que l'hypermétropie. Par contre un cas intéressant est celui d'un myope qui voit son cristallin durcir avec l'âge et qui devient presbyte. Le problème est alors double. Il faut corriger la vision lointaine et simultanément la vision proche. On a recours pour cela à des lunettes à double foyer. Il s'agit de lunettes convergentes dans leur moitié inférieure, pour corriger la vision proche en position de lecture vers le bas, et de lunettes divergentes dans leur moitié supérieure, pour corriger la vision lointaine en position de vision éloignée vers le haut.

D Astigmatisme

On corrige l'astigmatisme par des lentilles cylindriques appropriées. Celles-ci viennent se superposer aux lentilles sphériques qui corrigent les autres défauts de l'œil. La forme finale de la lentille est donc assez complexe. Nous n'entrerons pas dans le détail de leur construction.

4 Exercices

1. Un myope n'accomode pas au-delà de 2 m. Quelle lentille doit-il utiliser pour voir correctement les objets éloignés ?
divergente, de 2m de focale
2. La rétine d'un œil normal est à 15 mm de son centre optique. Quelle est sa convergence, au repos, et lorsqu'il accomode sur un objet situé à 15 cm ?
66,6D ; 73,3D
3. Précisez le type et la convergence des lentilles de correction à donner à un hypermétrope ne distinguant les objets nettement qu'à partir de 2 mètres, pour qu'il puisse voir correctement dès 25 cm.
3,5 D

Chapitre 40

Télescopes et microscopes

Sommaire

1	Combinaisons de lentilles	314
	A La loupe	314
	B La lunette astronomique	315
	C Le microscope	315
2	Exercices	316

Introduction

Nous allons tout d'abord passer en revue quelques combinaisons de lentilles. Ensuite nous passerons en revue quelques modèles de télescopes.

1 Combinaisons de lentilles

Les quelques applications présentées ci-dessous sont données pour autant d'exemples d'applications de la loi des lentilles minces. Elle permettent de se familiariser avec son utilisation dans des cas un peu plus complexes qu'avec une simple lentille produisant une image réelle.

A La loupe

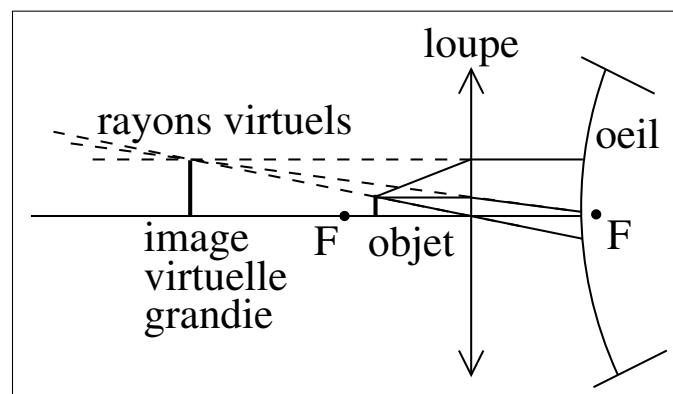


FIGURE 40.1 – Fonctionnement de l'œil.

La figure 40.1 montre le principe de fonctionnement d'une loupe. Il s'agit d'une lentille convergente. On place un objet entre la lentille et son foyer. Les rayons partant de cet objet sont alors déviés par la lentille pour rentrer dans l'œil. Cette déviation n'est pas vue par l'œil qui reconstruit l'objet en une image virtuelle plus grande comme le montre la figure.

D'un point de vue mathématique, la distance focale est positive, la distance objet aussi, mais la première est plus grande que la seconde. La loi des lentilles minces implique alors une distance image négative, c'est à dire une image virtuelle située du côté d'où la lumière vient, du même côté que l'objet.

Pour évaluer le grossissement d'une loupe, il faut déterminer les angles α et β . Pour cela, on va comparer l'angle sous lequel on peut voir un objet le plus fortement grossi et l'angle sous lequel on voit son image à travers la loupe.

Pour le premier, il faut mettre l'objet le plus près possible de l'œil. Or, il existe une distance à partir de laquelle l'œil ne peut plus voir les objets nets (voir paragraphe B). Ce point se situe pour un œil normal à environ 25 cm. C'est donc à cette distance qu'il faut placer l'objet pour le voir grossi au maximum. Ainsi, dans l'approximation des petits angles, on a :

$$\alpha = \frac{h_{\text{objet}}}{0,25}$$

car les distances sont en mètres.

Pour le second, il faut tout d'abord savoir qu'un œil est totalement détendu quand il regarde à l'infini (voir paragraphe 1). Ainsi, pour que l'œil soit détendu en regardant à travers une loupe, il faut que l'objet soit placé au foyer de la lentille. Car c'est seulement ainsi que les rayons qui parviennent à l'œil sont parallèles et produisent une image à l'infini (considérez la figure 40.1,

placez l'objet sur le foyer et retracez les rayons principaux). Il faut aussi faire l'hypothèse que l'œil est collé sur la lentille. Alors, comme le rayon qui passe par le centre de la lentille passe par les sommets de l'objet et de l'image, l'angle soutendu par l'image vaut :

$$\beta = \frac{h_{image}}{d_i} = \frac{h_{objet}}{f}$$

où f est la focale de la loupe. Ainsi, le grossissement devient :

$$G = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{h_{objet}}{f} / \frac{h_{objet}}{0,25} = \frac{0,25}{f}$$

Ce qui montre que plus la focale de la loupe est petite, plus son grossissement est grand.

B La lunette astronomique

C'est un instrument d'une complexité optique bien plus importante que la loupe. Une telle lunette peut même être composée de plus de deux lentilles. Ici, nous ne considérerons que le cas de deux lentilles : l'objectif et l'oculaire. La figure 40.2 présente le fonctionnement d'une lunette astronomique.

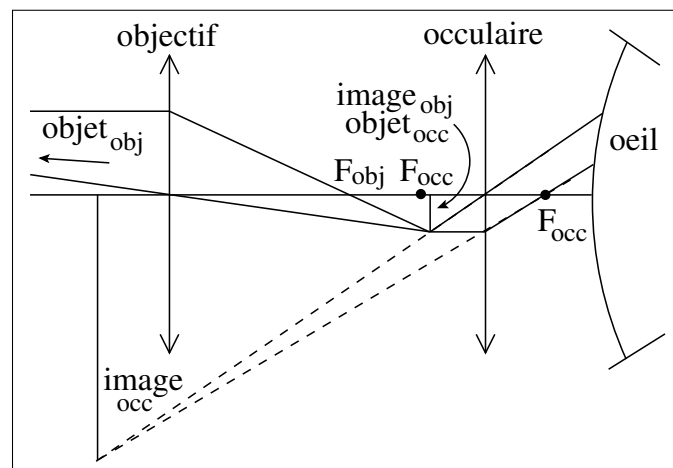


FIGURE 40.2 – La lunette astronomique.

La fonction de l'objectif est de créer une image. Alors que celle de l'oculaire est de la grossir. La position de l'image créée par l'objectif est importante. Comme elle est de très petite taille, il faut la grossir. On la place donc entre le foyer et l'oculaire. Ainsi, celui-ci fait office de loupe.

C Le microscope

C'est un autre instrument intéressant, mais pour découvrir des bactéries plutôt que des galaxies. Encore une fois, on va se limiter à la description d'un microscope simple pour mieux faire comprendre le principe de son fonctionnement. Celui-ci ne diffère que peu de celui d'une lunette astronomique puisqu'il comporte aussi un objectif et un oculaire qui sert de loupe pour agrandir l'image formée par l'objectif. Mais, comme le montre la figure 40.3, contrairement à la lunette où l'objet est très petit et très éloigné, celui du microscope est très petit, mais très proche. L'objectif ne sert pas pour autant directement de loupe puisque son foyer est plus proche de la lentille que l'objet. Mais pour le grandir une première fois au maximum, on le place proche du foyer rendant ainsi son image la plus grande possible. Puis on l'agrandit encore à l'aide de l'oculaire qui, comme

pour la lunette, fait office de loupe. On peut dire enfin que l'ouverture, c'est-à-dire la taille, de l'objectif change entre une lunette et un microscope. En effet, dans le premier cas, on veut recueillir le plus possible de lumière et on cherche donc à avoir une plus grande ouverture possible, donc un grand objectif. Alors que dans le second, par éclairage indirect on dispose de toute la lumière nécessaire, et ainsi on peut utiliser un objectif plus petit et donc d'une focale plus petite. Cela permet d'agrandir au maximum l'image de l'objectif.

La différence entre la lunette et le microscope tient donc en substance dans la nécessité pour la lunette de pouvoir observer des objets faiblement éclairés, ce qui implique un objectif de grand diamètre, contrairement au microscope qui n'est pas tenu de remplir une telle condition.

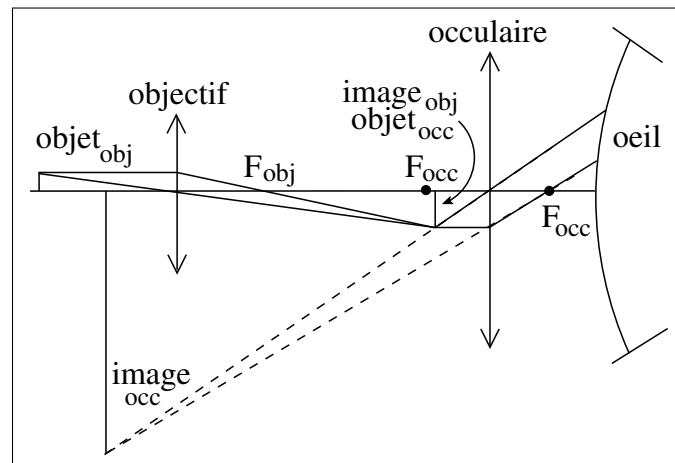


FIGURE 40.3 – Le microscope.

2 Exercices

1. Une lunette astronomique comporte deux lentilles convergentes, de 50 cm et de 1,6 cm de distance focale. Elles sont distantes de 51,5 cm. A l'œil nu, la lune est visible sous un angle de 32'. Quelles sont les caractéristiques de l'image de la lune, observée au travers de cette lunette, et quel est son grossissement ?
virtuelle, renversée, de 7,44 cm ; 31
2. Un microscope comporte un objectif formé de deux lentilles accolées, L1 et L2, et un oculaire comportant également deux lentilles accolées, L3 et L4. Ces lentilles, assimilées à des lentilles minces, ont des rayons de courbure (en mm) et un indice de réfraction, relatif à l'air, précisés sur le schéma. Déterminez le grossissement commercial de ce microscope.
14,12
3. Un microscope est muni d'un objectif de 4 mm de distance focale et d'un oculaire de 30 mm de distance focale. Les deux lentilles sont séparées par 16 cm et l'image finale se forme à 25 cm de l'oculaire.
 - (a) Où se forme l'image créée par l'objectif ? :
 - (b) Où se trouve l'objet par rapport à l'objectif ? :
 - (c) Quel est le grossissement transversal du microscope ?

133,2 mm 4,12 mm 300

Neuvième partie

Électricité

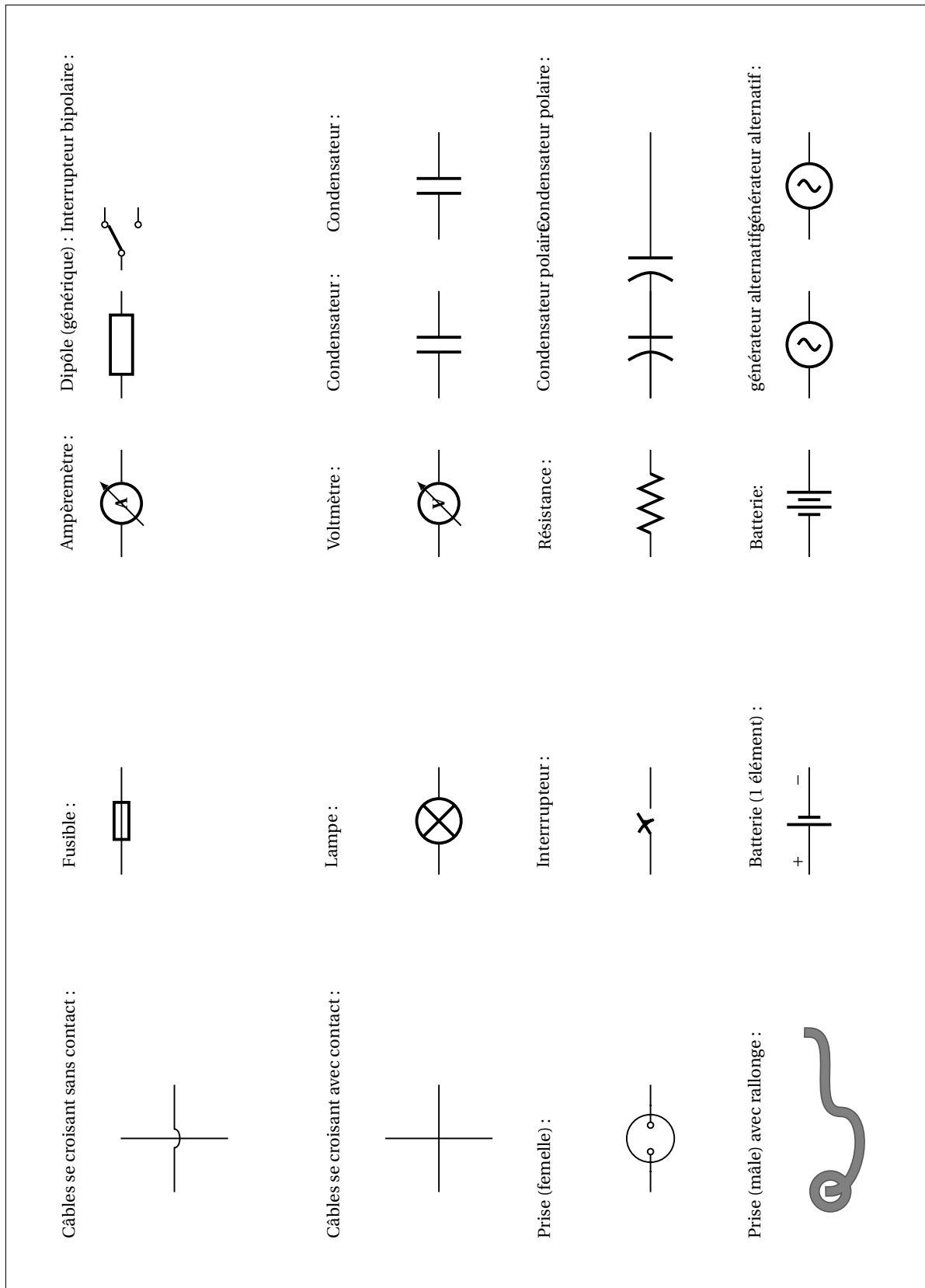


FIGURE 40.4 – Symboles utilisés dans les schémas électriques.

Chapitre 41

Électrostatique

Sommaire

1	Historique	322
2	Observation	322
3	Théorie	322
4	Exercices	322

Introduction

L'électrostatique est l'étude des charges électriques et de leurs effets sans que ces charges soient en mouvement.

1 Historique

Les grecs signalaient déjà l'existence de forces électrostatiques sans les comprendre.

elektron = ambre

2 Observation

Si on fait quelques expériences rapides en frottant verre, ambre et plastique avec des fibres diverses (soie, laine, peau de chat ...).

Nous pouvons alors attirer des petits morceaux de papier, faire dévier un filet d'eau, ...

Nous voyons que dans certains cas, il y a attraction, dans d'autre répulsion.

3 Théorie

- Les charges électriques sont de 2 espèces :
 - * soit positives : verre frotté avec un drap,
 - * soit négatives : plastique ou ambre frotté avec une peau ou de la laine.
- Les charges électriques exercent des forces entre elles :
 - * Si les charges sont de même signe, elles se repoussent.
 - * Si les charges sont de signes opposés, elles s'attirent.
- Un corps initialement neutre, amené au contact d'un corps électrisé prend une charge de même signe que celle de ce corps.
- Les charges portées par les corps électrisés ont leur origine dans les atomes : un atome peut céder ou recevoir des électrons.
 - * S'il en cède, il se charge positivement.
 - * S'il en acquiert, il se charge négativement.
- Dans un isolant, les électrons circulent difficilement. Dans un conducteur au contraire, ils circulent facilement.
- Un isolant comme l'ébonite, le plastique, le verre ou l'ambre, s'il est frotté, s'électrise. C'est-à-dire que l'on fait apparaître des charges électriques sur les parties frottées.
- Un conducteur ne peut être électrisé que s'il est tenu par un isolant.

4 Exercices

Chapitre 42

Courants, circuits

Sommaire

1	Schémas électriques	324
	A Dipôles	324
	B Conventions d'écriture d'un schéma électrique	324
	C Plan du circuit électrique d'une maison	325
2	Montages en série et en parallèle	327
	A Montages en série	327
	B Utilisation	327
	C Montages en parallèle	328
	D Logique de blocs	328
3	Intensité de courant	328
	A Définition	329
	B Mesure de I	330
	C Lois des intensités de courant dans des montages de plusieurs dipôles	331
4	Exercices	332

Introduction

Une des difficultés majeures dans l'étude de l'électricité, que nous appellerons l'électrocinétique, est que cette étude repose sur nombres d'implicites et de conventions.

Nous étudierons ces conventions et ces implicites dans ce chapitre.

Pour ce faire nous aborderons quelques situations simples et pratiques.

La discussion de ces différentes situations nous permettra d'éclaircir des concepts comme ceux de circuits parallèles et séries.

Nous définirons aussi le "courant électrique".

1 Schémas électriques

L'étude des circuits électriques de base repose beaucoup sur l'utilisation de schémas de circuits. Nous allons apprendre ici à lire ces schémas électriques.

A Dipôles

Par convention, les "fils" électriques transportent l'électricité sans la modifier.

Les "fils" électriques entrant ou sortant d'un "appareil" électrique sont appelés les bornes de cet appareil.

Tous les dispositifs étudiés ici auront deux bornes. Nous parlerons de *dipôles*. (On dit aussi bipôles.)

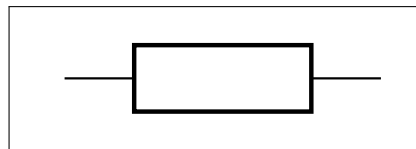


FIGURE 42.1 – Un dipôle.

Nous abordons ici l'électricité, pas l'électronique ! En électronique, on rencontre des dispositifs comme les transistors ayant trois bornes.

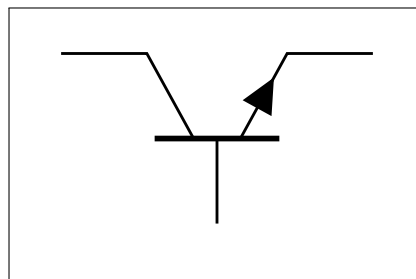


FIGURE 42.2 – Un transistor a trois bornes.

B Conventions d'écriture d'un schéma électrique

Pour comprendre ces schémas, il faut connaître leurs conventions.

Voici quelques éléments "standards" dans un circuit électrique de base.

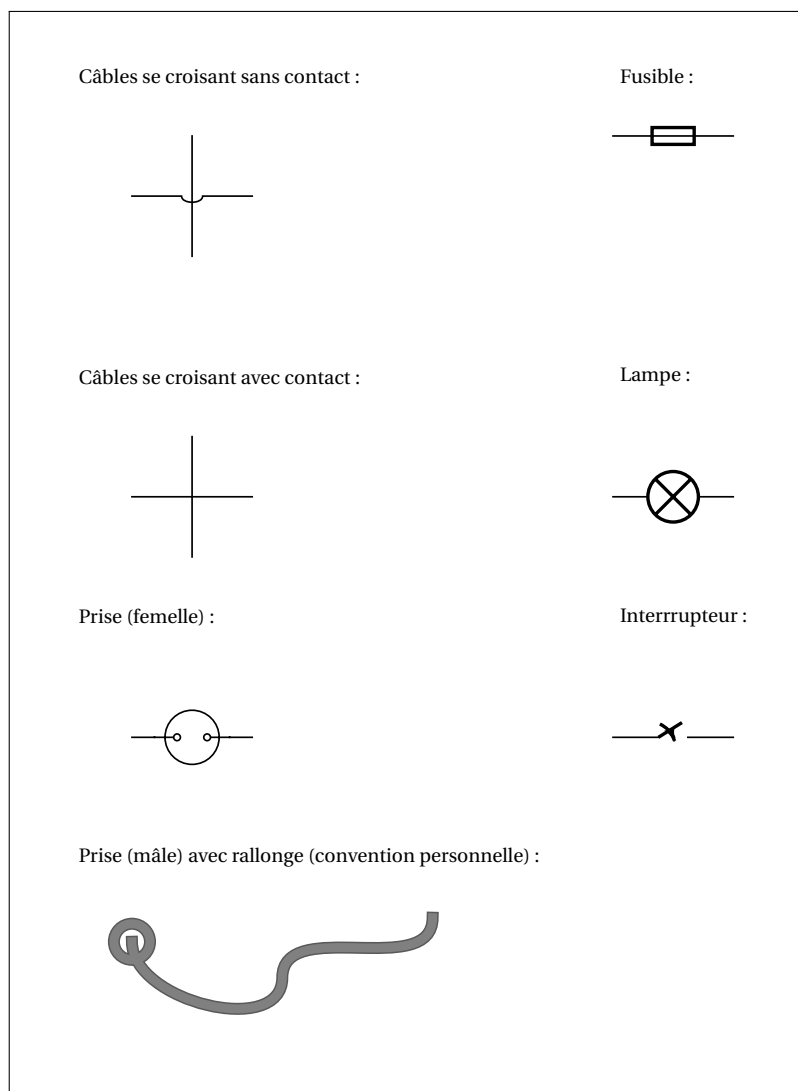


FIGURE 42.3 – Quelques éléments "standards" d'un circuit électrique.

Autant que possible les "fils électriques" et tous les appareils sont alignés soit sur des horizontales soit sur des verticales.

C Plan du circuit électrique d'une maison

Voici le plan (simplifié) du circuit électrique d'un logement.

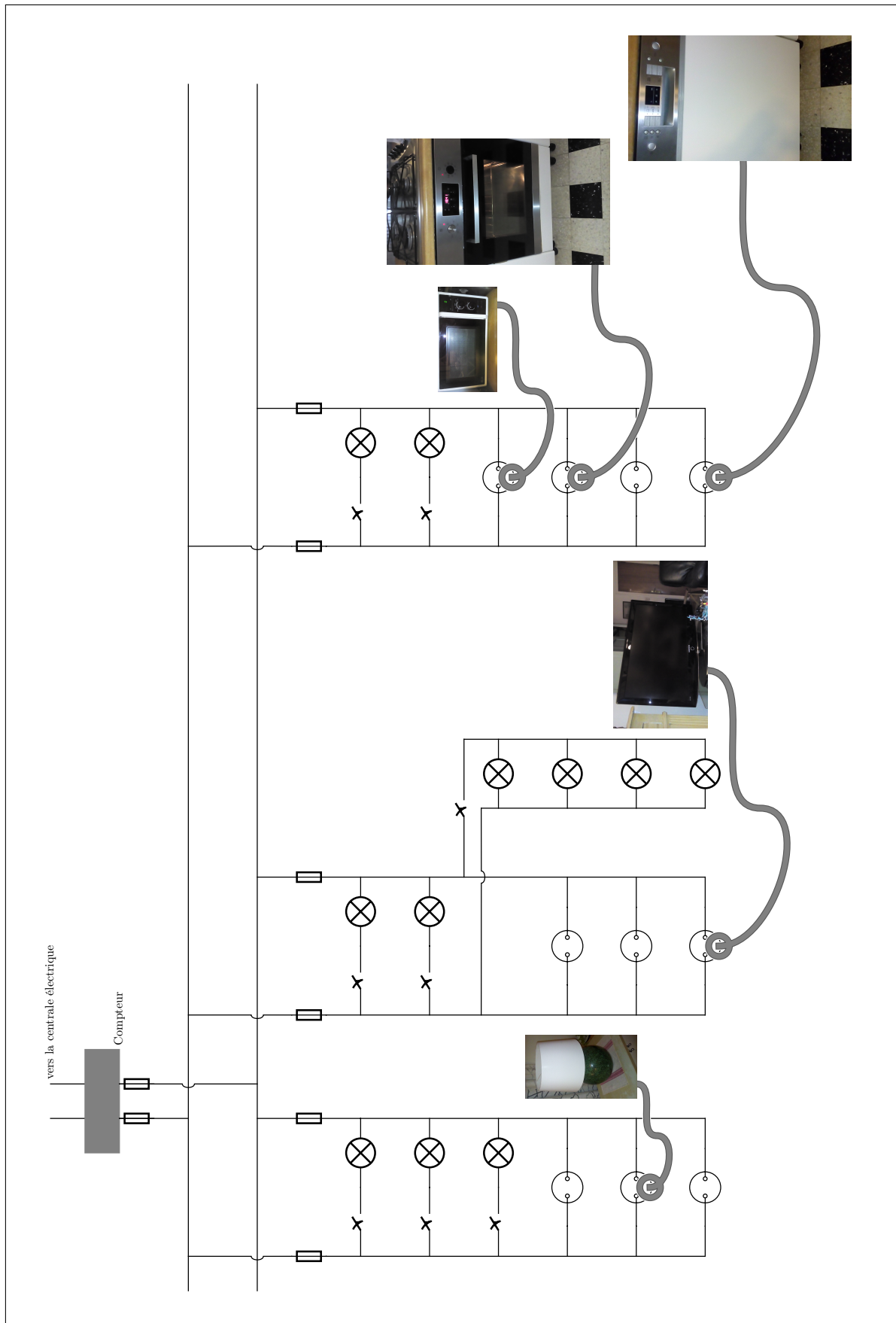


FIGURE 42.4 – Plan du circuit électrique d’une maison.

Indiquer par une couleur le trajet de l’électricité dans différents appareils.

☞ Une ampoule du lustre,

- ☞ une autre ampoule du lustre,
- ☞ une ampoule de la cuisine,
- ☞ la télévision,
- ☞ le four,
- ☞ la lessiveuse.

Comparons ce qui se passe si, dans le séjour, une ampoule du lustre s'éteint (alors que les autres ampoules restent allumées) et s'il y a trop d'appareils électriques fonctionnant en même temps dans une cuisine (le four, le micro onde, la machine à faire la vaisselle, le toaster...) (toute la pièce est plongée dans l'obscurité, mais pas les autres pièces de la maison).

Expliquez ce qui se passe si une ampoule se rompt dans le lustre, à la cuisine, si il y a trop d'appareils à la cuisine ...

2 Montages en série et en parallèle

Nous classerons les connexions électrique de deux manières.

(Il y en a d'autres mais nous ne les étudierons pas ici.)

Les appareils électriques "courants" (ex. : télévision, chauffage électrique, lampe, moteur électrique) seront qualifiés de "récepteurs".

Les appareils électriques qui "produisent" de l'électricité (nous devons éclaircir ce concept) seront appelés des générateurs.

A Montages en série

Définition 67 (Montage en série). Si des récepteurs sont connectés de manière à ce que la borne de sortie d'un premier soit connectée *directement* à la borne d'un second, nous dirons désormais qu'ils sont **montés en série**.

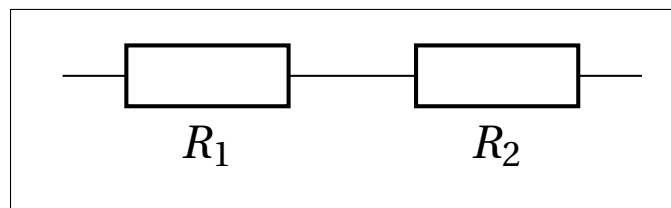


FIGURE 42.5 – Montage en série.

a) Conséquence

Si un des récepteurs ne laisse plus passer le courant (Nous allons de suite éclaircir ce concept) dans un montage en série, le passage du courant est interrompu dans tout le montage.

B Utilisation

Les fusibles et les interrupteurs sont montés en série avec les éléments qu'ils doivent contrôler.

C Montages en parallèle

Définition 68 (Montage en parallèle). Si des récepteurs ont leurs bornes d'entrées reliées directement ensemble et qu'il en est de même pour leur borne de sortie, nous dirons désormais qu'ils ont **montés en parallèle**. (On dit aussi en dérivation.)

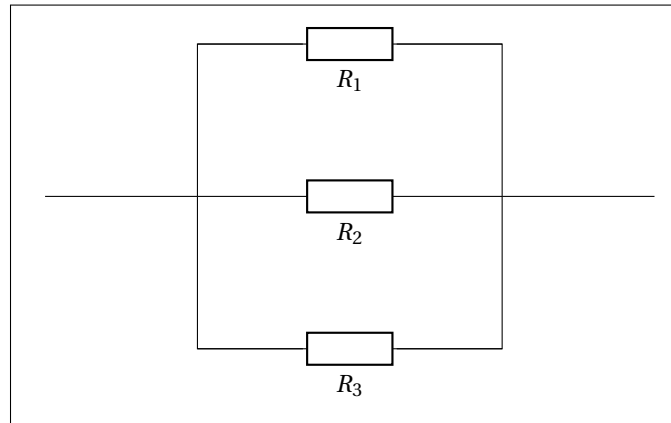


FIGURE 42.6 – Montage en parallèle.

a) Conséquence

Si le passage du courant électrique est interrompu dans un des dipôles, le passage du courant n'est *pas* interrompu dans les autres dipôles.

b) Utilisation

Les lampes d'un lustre sont montées en parallèle. De même les différentes pièces de la maison sont montées en parallèle les unes par rapport aux autres.

D Logique de blocs

Des ensembles de dipôles peuvent être considérés comme constituant un "bloc" qui serait lui-même un dipôle.

À titre d'exercice, nous conseillons d'identifier les blocs qui sont montés en parallèle et ceux qui sont montés en série sur le plan de la maison.

3 Intensité de courant

Commençons par identifier un générateur sur nos schémas. Essentiellement, nous travaillerons avec des générateurs du type "batterie".

Le symbole suivant représente le générateur. La grande barre mince est la borne + et la petite barre épaisse la borne -.

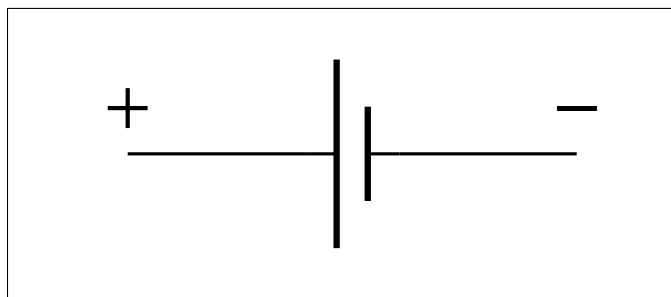


FIGURE 42.7 – Un générateur (type batterie).

A Définition

Le courant électrique est un déplacement de charges électriques. Nous nous limiterons au cas de déplacement d'électrons se déplaçant à l'extérieur du générateur de la borne - vers la borne + du générateur.

ATTENTION : Le **sens conventionnel du courant** est du + vers le - dans le circuit.

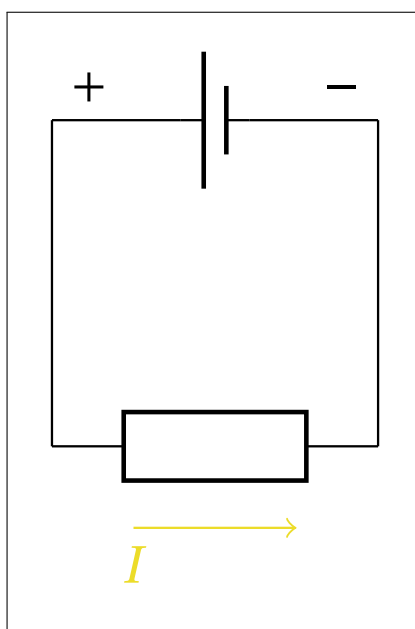


FIGURE 42.8 – Circuit avec un générateur et un récepteur.

Selon qu'il y ait beaucoup ou peu de charges traversant le fil en un temps donné, on dira que le courant est plus ou moins **intense**.

Définition 69 (Intensité du courant électrique). L'intensité du courant électrique en un point donné d'un conducteur est la quantité de charge électrique totale qui traverse par seconde la section du conducteur en ce point.

$$I = \frac{q}{t} \quad (42.1)$$

où

- ✪ **I** : intensité du courant électrique (Ampère : A)
- ✪ **q** : charge électrique traversant la section du conducteur (coulomb : C)
- ✪ **t** : la durée pendant laquelle la charge traverse le conducteur (s) .

a) remarque

La charge d'un électron est approximativement de $1,6 \cdot 10^{-19} C$. Ce qui signifie que si un courant d'intensité égale à un ampère traverse un conducteur, alors en une seconde c'est approximativement **6 milliards de milliards d'électrons** qui sont passés en une seconde.

b) Analogie avec un débit

Une analogie souvent utilisée pour expliquer l'intensité de courant est celle d'un débit.

B Mesure de I

Pour mesurer l'intensité de courant, l'appareil utilisé s'appelle un ampèremètre. Il faut l'insérer dans le circuit, c'est-à-dire le monter en série avec l'élément du circuit pour lequel on veut connaître l'intensité de courant.

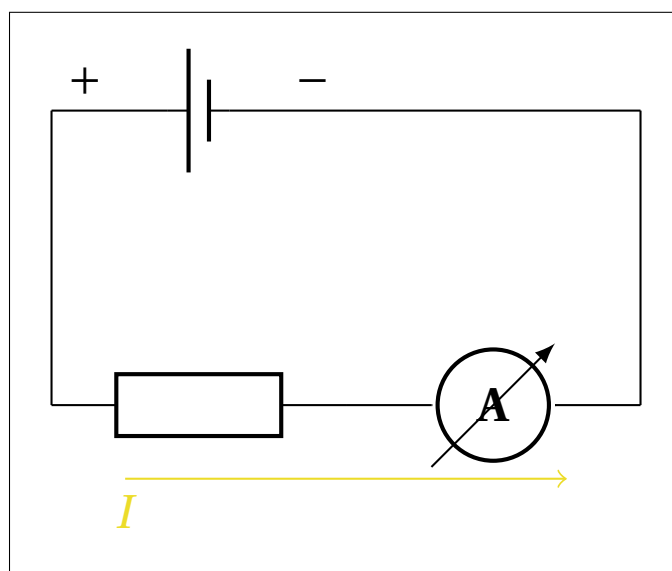


FIGURE 42.9 – Mesure avec l'ampèremètre.

Remarque 12. Un ampèremètre a une résistance ^a (presque) nulle. Il "laisse" circuler le courant sans le modifier.

^a. Nous expliciterons ce concept plus loin.

C Lois des intensités de courant dans des montages de plusieurs dipôles

a) Montages en série

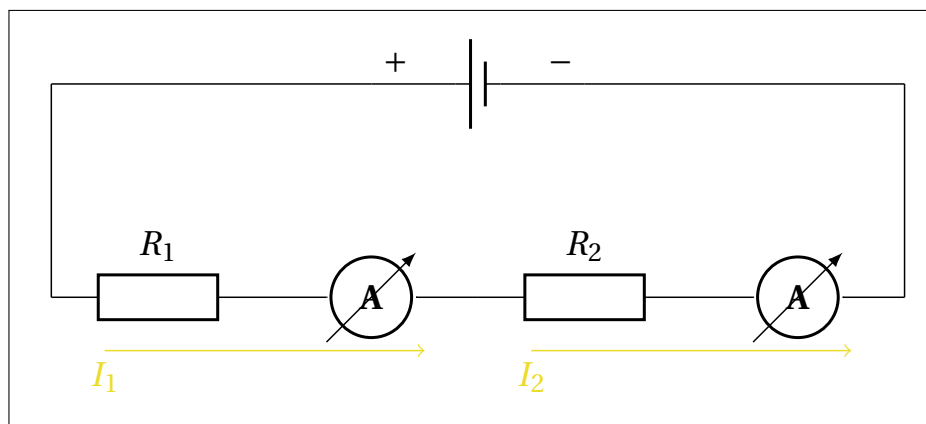


FIGURE 42.10 – Intensités de courants dans un circuit en série.

Loi 18 (Intensités de courant dans un montage en série). *L'intensité de courant est identique en tout point d'un circuit de un ou plusieurs récepteurs montés en Σ .*

$$I_1 = I_2 = I_3 = \dots \quad (42.2)$$

b) Montages en parallèle

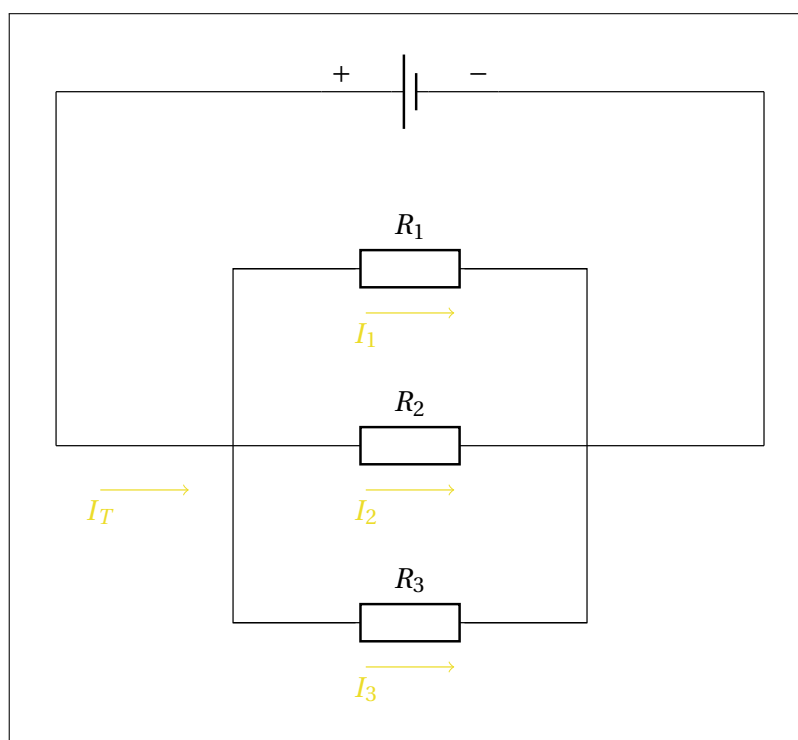


FIGURE 42.11 – Intensités de courants dans un circuit en parallèle.

Loi 19 (Intensités de courant dans un montage en parallèle). *L'intensité de courant totale d'un circuit constitué d'éléments montés en parallèle est égale à la somme des intensités des courants traversant chaque dipôle.*

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \quad (42.3)$$

4 Exercices

Chapitre 43

Énergie électrique : le "kWh"

Sommaire

1	Énergie et électricité	334
	A Energie, puissance	334
	B Watt et kilowattheure	334
	C La facture d'électricité	335
2	Exercices	335

Introduction

Les mêmes électrons qui entrent dans le circuit électrique de la maison en sortent. Contrairement au gaz, au mazout ou à l'eau, ils ne sont pas consommés.

Pourquoi devons nous payer une facture d'électricité ?

Nous allons ici discuter de l'énergie électrique.

1 Énergie et électricité

Nous avons vu que l'énergie existe sous différentes formes qui peuvent se transformer l'une en l'autre. L'unité d'énergie est le **joule (J)**.

L'énergie électrique s'exprimera, comme les autres formes d'énergies, en joule.

Le joule est aussi l'unité du **travail**.

rappel : Le travail = force . déplacement

Le travail est désigné par le symbole **W**.

A Energie, puissance

Rappel : Si un travail est effectué pendant un certain temps, nous parlons de **puissance**.

$$P = \frac{W}{t} \quad (43.1)$$

La puissance est le travail effectué par unité de temps.

où

- P = la puissance (W),
- W = le travail (J) ,
- t = la durée (s).

Qu'il s'agisse de produire ou de consommer de l'énergie et donc du travail pendant un certain temps, nous parlerons de puissance produite ou consommée.

La puissance est l'énergie produite ou consommée par unité de temps.

B Watt et kilowattheure

Rappelons que l'unité de puissance est le watt (W).

ATTENTION : ne pas confondre travail W et unité de puissance W

$$1W = \frac{1J}{s} \quad (43.2)$$

1 watt = 1 joule par seconde.

Ex. : Un chauffage électrique de 500 W utilisera en 1 minute 30 000 J d'énergie électrique et transformera ces 30 000 J en chaleur.

Les électriciens utilisent une unité qui leur est particulière car pratique à l'usage : le **kilowatt-heure (kWh)** :

kilowattheure (kWh) = énergie (produite ou consommée) par une machine de 1 kW de puissance en 1h (càd. 3600s)

$$1 kWh = 1000 W \cdot 3600 s = 3,6 \cdot 10^6 J \quad (43.3)$$

C La facture d'électricité

La facture d'électricité est calculée en kilowattheure. Le prix du kilowattheure était de 0,16 € / kWh en 2002.

Ex. : Un lustre compte 6 lampes de 25 W et une ampoule de 100W. Calculez l'énergie consommée pendant 10 h. Quel est le coût ?

Sol. :

$$P = 6 \cdot 25 + 100 = 250W = 0,25kW$$

$$E = W = P \cdot t = 0,25kW \cdot 10h = 2,5kWh$$

$$Prix = 2,5kWh \cdot 0,16e/kWh = 0,40e$$

2 Exercices

Chapitre 44

Différence de potentiel

Sommaire

1	Expérience	338
	A exemples	339
2	Définition	339
	A unité	339
	B Analogie	339
3	Mesure	339
4	Application	340
5	Exercices	340

Introduction

Nous savons que les disjoncteurs (les fusibles) sont là pour empêcher qu'une intensité de courant trop importante ne traverse les fils.

Par exemple si nous connectons trop d'appareils dans la cuisine.

Nous savons que si les appareils sont connectés en parallèle, il nous faudra additionner les intensités passant dans chaque appareil.

Mais comment prévoir et calculer l'intensité de courant passant dans chaque appareil ?

Nous pourrions certes connecter un ampèremètre à chaque appareil mais ce n'est clairement pas le cas dans notre cuisine !

1 Expérience

Connectons à un même générateur (le secteur 230 V) des ampoules différentes à l'aide d'un interrupteur qui nous permet de connecter une ampoule à la fois. Mesurons alors l'intensité de courant passant dans chaque ampoule.

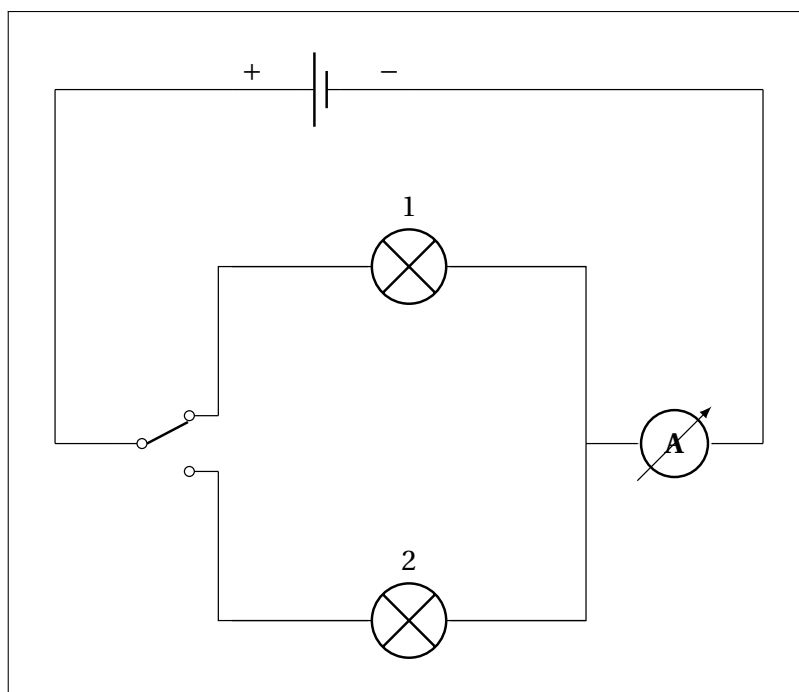


FIGURE 44.1 – Mesure de I dans deux lampes.

Sur chaque ampoule est inscrite la puissance de celle-ci (en Watt).

Faisons un tableau reliant la puissance P (W), l'intensité I (A) et leur rapport P/I .

	P (W)	I (V)	P/I
1	5	0,022	227,3
2	25	0,109	229,3

TABLE 44.1 – Puissance et intensité de courant dans différentes lampes.

Nous remarquons que le rapport P/I est quasiment le même pour toutes les ampoules.

Il en serait de même pour tous les appareils électriques. (four, grille-pain,...)

Ce rapport est appelé la tension (aux bornes, soit du générateur, soit du récepteur).

La valeur de la tension aux bornes du générateur est identique à celle aux bornes d'un seul appareil connecté à ce générateur ou aux bornes de plusieurs appareils connectés en //.

A exemples

Piles 4,5V

2 Définition

Définition 70 (Tension électrique). La tension aux bornes d'un récepteur (=différence de potentiel aux bornes de ce récepteur) est la puissance consommée par cette appareil par unité d'intensité de courant parcourant l'appareil.

$$U = \frac{P}{I} \quad (44.1)$$

où

- U = la tension électrique (V),
- P = la puissance (W),
- I = l'intensité de courant électrique (A).

Remarque 13. "Tension" et "différence de potentiel" sont deux synonymes.

Dans le langage usuel, on emploie aussi souvent le mot "*voltage*" pour désigner la tension.

A unité

Le volt (V)

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{ W}}{1 \text{ A}}$$

B Analogie

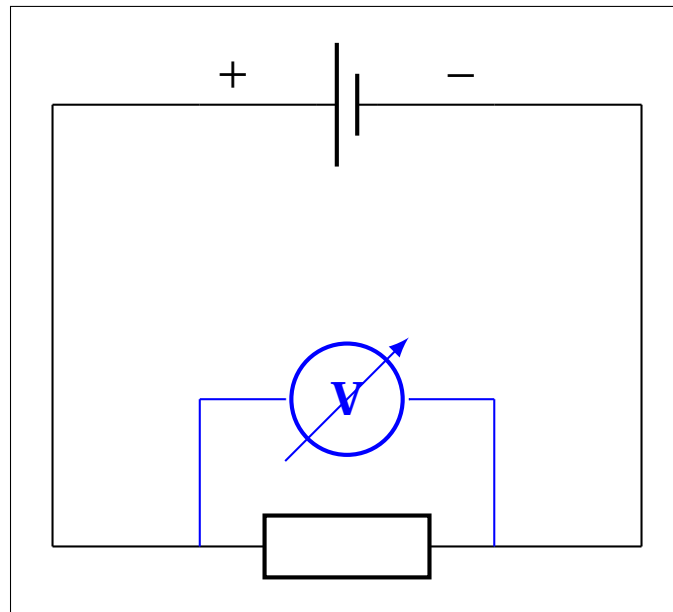
La tension reflète la quantité d'énergie "ajoutée" ou "soustraite" aux charges électriques lors du passage dans un dipôle.

Si l'intensité de courant pouvait être comparée à un débit d'eau, la tension peut être comparée à la pente entre l'entrée et la sortie d'une canalisation. Il faut une pompe (un générateur) pour faire monter l'eau. Une descente va permettre de faire tourner un moulin (un récepteur).

3 Mesure

L'appareil utilisé pour la mesure de la tension s'appelle le "*voltmètre*".

La mesure de la tension se fait toujours en parallèle.

FIGURE 44.2 – Mesure de U entre les deux bornes d'un dipôle.

Si nous reprenons l'analogie "hydraulique", cette mesure correspond à mesurer une "différence de hauteurs" : une hauteur en entrée, une hauteur en sortie.

Cette image nous aide à comprendre le terme "différence de potentiel" si nous pensons à l'"énergie potentielle (de gravité)".

Le gain ou la perte de tension se mesure à priori dans le sens du courant.

La fourniture d'énergie (par un générateur) contribuera à une différence de potentiel positive. La consommation d'énergie électrique à une différence de potentiel négative.

4 Application

$$230V = \frac{1100W}{X A}$$

$$X = \frac{P}{U} = \frac{1100W}{230V} = 4,8A$$

5 Exercices

Chapitre 45

Association de générateurs

Sommaire

1	Montages en série et en parallèle	342
	A Montages en série	342
	B Montages en parallèle	343
2	Applications	344
3	Exercices	344

Introduction

Lorsque nous ouvrons une lampe de poche, un appareil photo numérique, une radio, un lecteur de mp3, ... plusieurs piles sont souvent dans le boîtier. Pourquoi sont-elles connectées comme elles le sont ?

1 Montages en série et en parallèle

A Montages en série

Si nous montons en série des piles, plus nous rajoutons des piles plus la lampe qui y sera connectée brillera.

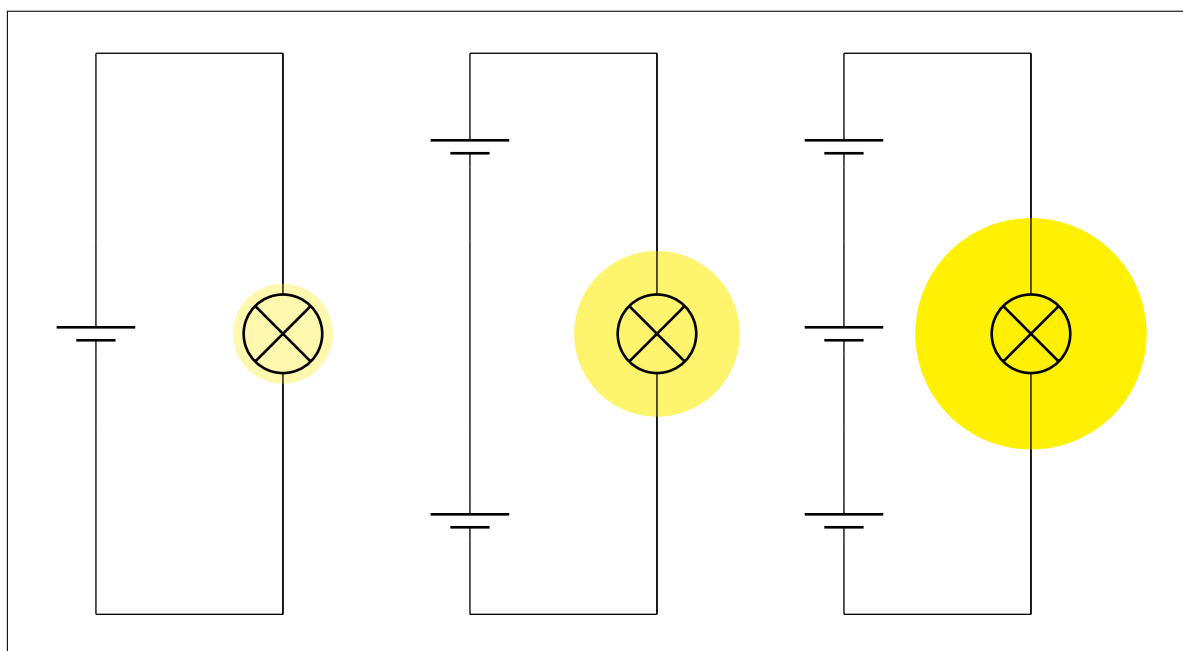


FIGURE 45.1 – L'ajout de batteries augmente la puissance dissipée par la lampe.

C'est à dire que la lampe dissipera de plus en plus d'énergie lumineuse.

Si la luminosité de l'ampoule augmente, c'est que la puissance dissipée par l'ampoule augmente.

Rappelons que la tension est égale à la puissance divisée par le courant.

$$U = \frac{P}{I} \quad \Leftrightarrow P = U.I \quad (45.1)$$

$$P_1 = U_1.I_1 \quad (45.2)$$

$$P_2 = U_2.I_2 \quad (45.3)$$

$$P_3 = U_3.I_3 \quad (45.4)$$

$$P_T = U_T.I_T \quad (45.5)$$

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 \quad (45.6)$$

$$U_T.I_T = U_1.I_1 + U_2.I_2 + U_3.I_3 \quad (45.7)$$

Dans le cas d'un circuit en série, on peut écrire :

$$I_T = I_1 = I_2 = I_3$$

Et donc :

$$U_T \cdot I_T = (U_1 + U_2 + U_3) \cdot I_T \quad (45.8)$$

$$U_T = U_1 + U_2 + U_3 \quad (45.9)$$

Si la luminosité de l'ampoule augmente, c'est que la puissance dissipée par l'ampoule augmente et donc que la tension à ses bornes augmente.

$$P = U \cdot I \quad (45.10)$$

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 \quad (45.11)$$

$$P_T = U_1 I_1 + U_2 I_2 + U_3 I_3 \quad (45.12)$$

En parallèle, les tensions sont toutes égales.

$$U_T = U_1 = U_2 = U_3 \quad (45.13)$$

Donc :

$$P_T = U_T (I_1 + I_2 + I_3) \quad (45.14)$$

$$U_T I_T = U_T (I_1 + I_2 + I_3) \quad (45.15)$$

En conséquence :

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 \quad (45.16)$$

Montées en série des piles donnent une tension de plus en plus élevées.

La tension générée par des piles montées en série est égale à la somme des tensions individuelles de chaque pile.

$$U_T = U_1 + U_2 + U_3 + \dots \quad (45.17)$$

B Montages en parallèle

Si nous montons en parallèle des piles et que nous mesurons l'intensité de courant, celle-ci augmente clairement avec le nombre de piles.

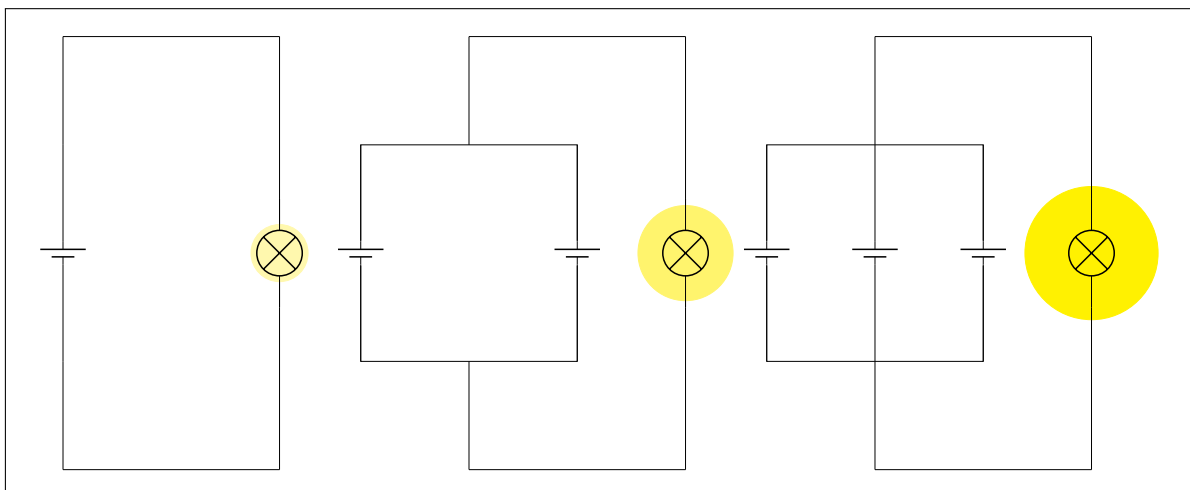


FIGURE 45.2 – L'ajout de batteries en parallèle augmente la puissance dissipée par la lampe.

L'intensité de courant par des piles montées en parallèles est égale à la somme des intensités de courant générée individuellement par chaque pile.

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \quad (45.18)$$

2 Applications

L'ajout de batterie dans n'importe quel appareil portable nous permet de voir que ces stratégies sont utilisées partout.

Dans des lampes torches, les batteries sont souvent montées en série pour augmenter le voltage.

Dans d'autres appareils (télécommandes, ...) les montages série et parallèle sont souvent combinés.

3 Exercices



Chapitre 46

La loi d'Ohm

Sommaire

1	La loi d'Ohm	346
2	Application	347
	A Exemples	348
	B Résistance électrique et électrocution	348
3	Résistances en parallèle et en série	349
	A Résistances en série	349
	B Montages en parallèle	350
4	Exercices	351

Introduction

Pourquoi les appareils électriques sont-ils munis d'une prise de terre? Pourquoi nous est-il recommandé de ne pas toucher de prises, d'interrupteur ou tout appareil électrique lorsque nous sommes mouillé?

Tout cela, c'est "la faute à" la loi d'Ohm!

1 La loi d'Ohm

Ici, nous nous concentrerons sur une propriété des récepteurs appelée la résistance. Un récepteur qui n'a "que" cette propriété est alors appelé une *résistance*.

Les résistances ont un symbole qui leur est propre.

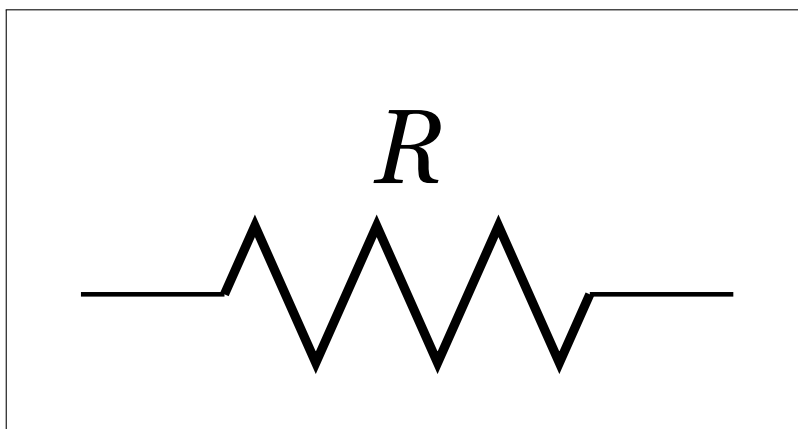


FIGURE 46.1 – Symbole de la résistance R .

Mesurons simultanément la tension et l'intensité de courant pour un récepteur donné et faisons varier la tension U .

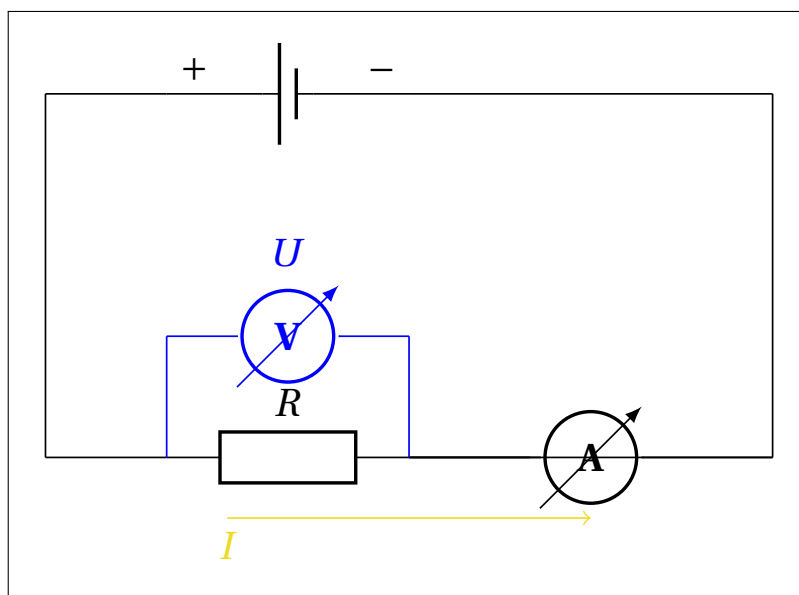


FIGURE 46.2 – Mesure simultanée de U et de I dans le récepteur R .

Nous nous rendons compte que le rapport $\frac{U}{I}$ est constant.

Définition 71 (Résistance électrique). Le rapport $\frac{U}{I}$ est appelé la résistance du dipôle. Elle est représentée par la lettre R et son unité est l'ohm (Ω).

$$R = \frac{U}{I} \quad (46.1)$$

où

- R = la résistance électrique (Ω),
- U = la tension aux bornes du dipôle (V),
- I = l'intensité de courant dans le dipôle (A).

La résistance est une mesure de l'opposition du récepteur au passage du courant.

a) Le triangle magique

Pour utiliser la loi d'Ohm, on a souvent recour au "triangle magique".

Cette astuce mnémotechnique permet de calculer une des trois valeurs (U, I ou R) si on connaît les deux autres.

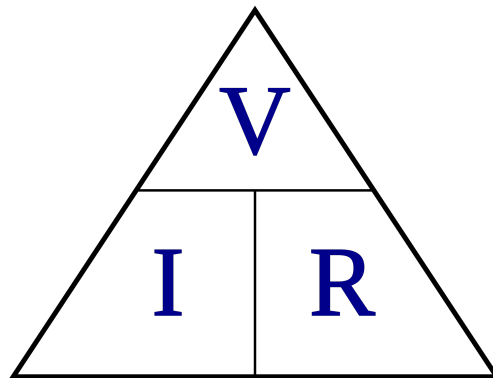


FIGURE 46.3 – Le triangle magique de la loi d'Ohm

Il suffit de cacher la valeur inconnue pour avoir la formule nécessaire à calculer celle-ci.

Par exemple, si je cherche I, je cache I avec mon doigt et je vois de suite que $I = \frac{U}{R}$.

2 Application

Tous les matériaux ont une résistance propre. Selon leur géométrie et les matériaux dont ils sont constitués, les récepteurs ont une résistance qui peut être calculée.

A Exemples

a) Résistances typiques d'appareils électriques

Appareils	Résistance
Cordelière en fils de cuivre (section $1,5 \text{ mm}^2$, longueur 5 m)	$0,057 \Omega$
Cordelière (un fil de cuivre) (section $2,5 \text{ mm}^2$, longueur 100 m)	$0,068 \Omega$
Pièce chauffante d'un réchaud de 2000 W	24Ω
filament d'une ampoule de 40 W	1200Ω

b) Résistance du corps humain

corps humain	Résistance
totalité (des pieds à la tete)	500Ω
bout du doigt, sec	$50\,000 \Omega$
main (sèche)	500Ω
main (mouillée)	100Ω
chaussure (sèche)	$100\,000 \Omega$
chaussure (mouillée)	$\approx 0 \Omega$

B Résistance électrique et électrocution

Si, maintenant, nous imaginons toucher accidentellement un fil électrique dénudé ou un appareil électrique défectueux, nous pouvons estimer l'intensité de courant qui va parcourir notre corps.

a) Sec

La résistance totale sera la somme des résistance individuelle : main + corps + soulier

$$500\Omega + 500\Omega + 100000\Omega = 101000\Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{230V}{101000\Omega} = 0,0023 A$$

Nous ressentirons quelques picotements désagréables sans plus.

b) Mouillé

$$500\Omega + 500\Omega + 0\Omega = 1000\Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{230V}{1000\Omega} = 0,23 A$$

Nous serons électrocutés et risquons la mort !

c) Loi de Pouillet

Si un volume de matériau a le volume d'un prisme droit (cylindre, parallélépipède, rectangle, ...), la résistance de l'objet est fournie par la loi de Pouillet :

Loi 20 (de Pouillet).

$$R = l \frac{\rho}{s} \quad (46.2)$$

où

- R = la résistance de l'objet (Ω),
- l = la longueur de l'objet (m),
- s = la surface de la section^a (m^2),
- ρ = la résistivité spécifique du matériau (Ωm).

a. La section correspond aux bornes d'entrée et de sortie du volume.

3 Résistances en parallèle et en série

Nous allons étudier ici les assemblages de résistances selon les deux types de montages que nous connaissons.

Comment estimer l'effet global de deux, trois (ou plus) résistances montées en série ou en parallèle ? Qu'elle sera la valeur de la résistance équivalente ?

A Résistances en série

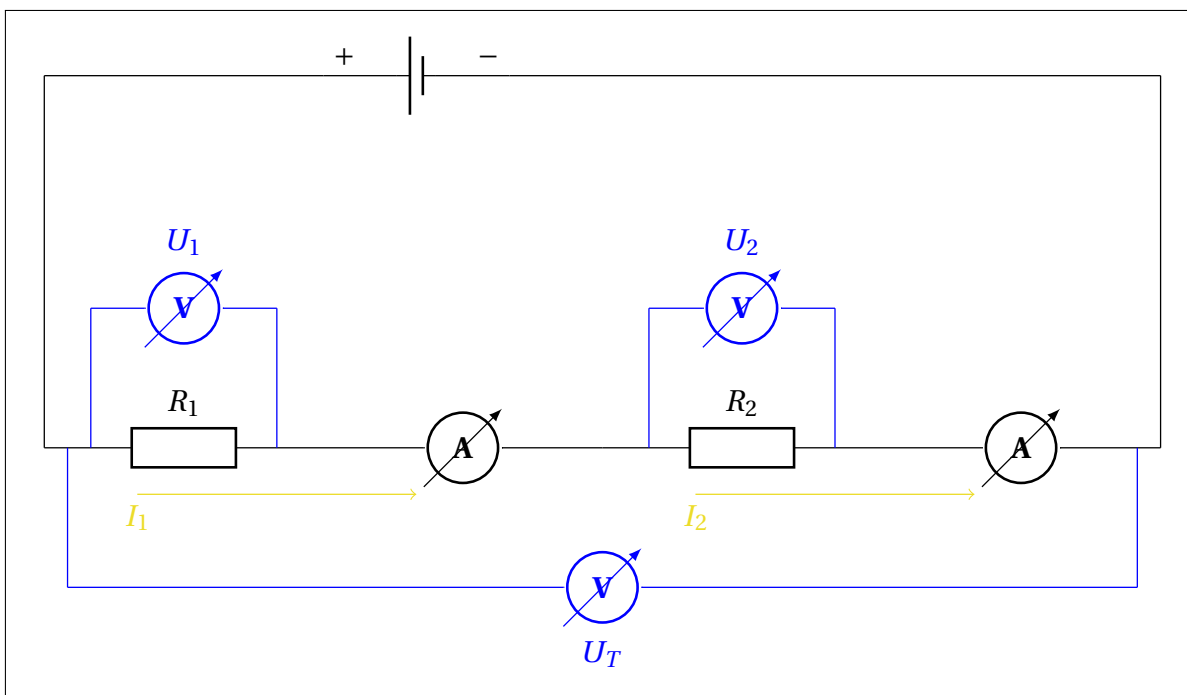


FIGURE 46.4 – Mesure des U et des I dans un montage en série .

Dans des montages en série, il faut additionner les tensions des composants pour trouver la tension totale :

$$U_T = U_1 + U_2 + \dots \quad (46.3)$$

Partons de la loi d'Ohm :

$$U = R \cdot I \quad (46.4)$$

En utilisant la relation 46.3, 46.4 devient

$$R_T \cdot I_T = R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 + \dots \quad (46.5)$$

Souvenons nous que dans les circuits en série, les intensités de courant sont constantes :

$$I_T = I_1 = I_2 = \dots \quad (46.6)$$

La relation 46.5 peut alors s'écrire :

$$R_T \cdot I_T = R_1 \cdot I_T + R_2 \cdot I_T + \dots \quad (46.7)$$

En simplifiant par I_T , nous arrivons alors à ceci :

$$R_T = R_1 + R_2 + \dots \quad (46.8)$$

Dans un montage en série, la résistance totale est égale à la somme des résistances.

B Montages en parallèle

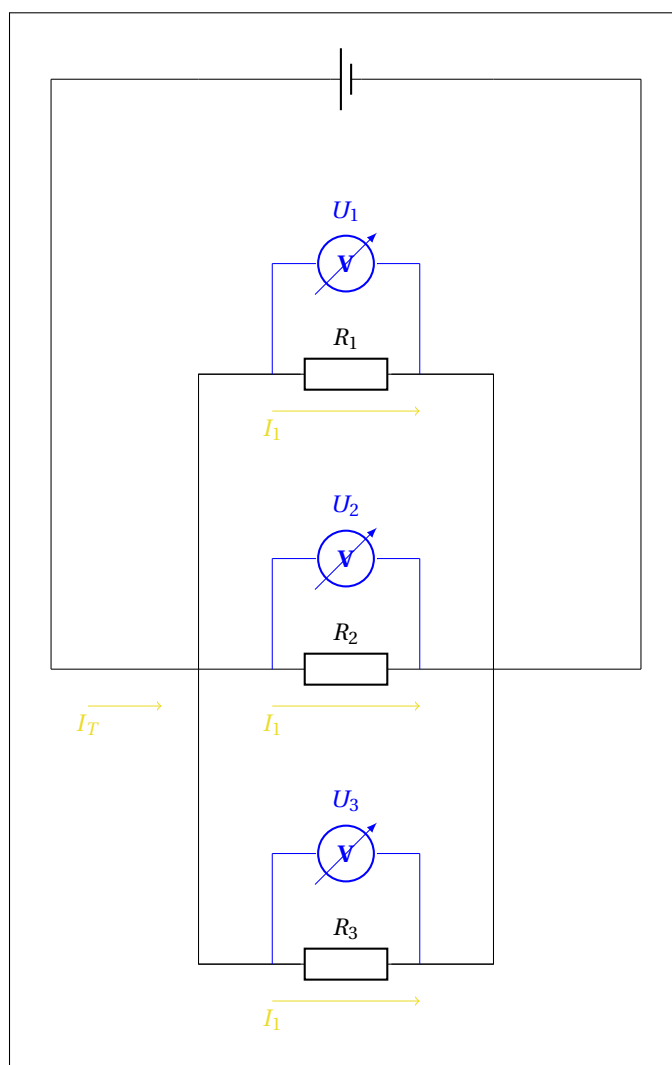


FIGURE 46.5 – Mesure des U et des I dans un montage en parallèle .

Dans des montages en parallèle , il faut additionner les intensités de courant des composants pour trouver l'intensité de courant totale :

$$I_T = I_1 + I_2 + \dots \quad (46.9)$$

Transformons la loi d'Ohm 46.4 :

$$I = \frac{U}{R} \quad (46.10)$$

En utilisant la relation 46.10, 46.9 devient

$$\frac{U_T}{R_T} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots \quad (46.11)$$

Souvenons-nous que dans les circuits en parallèle, les tensions sont constantes :

$$U_T = U_1 = U_2 = \dots \quad (46.12)$$

La relation 46.11 peut alors s'écrire :

$$\frac{U_T}{R_T} = \frac{U_T}{R_1} + \frac{U_T}{R_2} + \dots \quad (46.13)$$

En simplifiant par U_T , nous arrivons alors à ceci :

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \quad (46.14)$$

Dans un montage en parallèle, l'inverse de la résistance totale est égale à la somme des inverses des résistances.

4 Exercices



Chapitre 47

Force électromotrice

Sommaire

1	La force électromotrice	354
	A Définition	354
	B Tension aux bornes	354

Introduction

Nous avons traité la tension d'un générateur comme étant constante. En réalité, les générateurs ont une résistance interne dont il faut tenir compte et qui fait que la tension à ses bornes n'est *pas* constante en toutes circonstances.

La force électromotrice est la grandeur qui rend compte de cela.

1 La force électromotrice

A Définition

Définition 72 (Force électromotrice).

La force électromotrice ε (aussi notée *f.e.m.*) d'un générateur est le *rapport* entre la *puissance dissipée* par le générateur et l'*intensité de courant* électrique traversant ce générateur.

$$\varepsilon = \frac{P_d}{I} \quad (47.1)$$

Où :

- ε = la force électromotrice (S.I : V),
- P_d = la puissance dissipée par le générateur (S.I : W),
- I = l'intensité de courant électrique traversant le générateur (S.I : A).

Pour les générateurs électrochimiques¹, la force électromotrice est aussi appelée *tension à vide*.

La notion est étendue aux générateurs électromagnétiques et autres mais ne sera pas traitée ici.

B Tension aux bornes

S'il y a une tension "à vide", on devine qu'il existe une "autre" tension, la *tension aux bornes*.

Définition 73 (Tension aux bornes).

$$V_B = \varepsilon - r_i I \quad (47.2)$$

Où :

- V_B = la tension aux bornes générateur (S.I : V),
- ε = la force électromotrice (S.I : V),
- r_i = la résistance interne du générateur, (S.I : Ω),
- I = l'intensité de courant électrique traversant le générateur (S.I : A).

Comme cette relation le laisse voir, si le générateur n'est connecté à rien et que nous mesurons la tension à ses bornes, alors la tension aux bornes égale la force électromotrice :

$$I = 0 \implies V_B = \varepsilon \quad (47.3)$$

1. C.à.d. les piles et batteries.

Dixième partie
Electromagnétisme

Chapitre 48

Le magnétisme

Sommaire

1	Historique	358
	A Les origines	358
	B Les chinois	358
	C En occident	358
	D Les lumières	358
2	Les aimants	358
	A La force magnétique	358
	B Les pôles d'un aimant	358
3	Effet sur les matériaux	360
4	L'analyse du magnétisme	360
	A Champ magnétique	360

Introduction

1 Historique

A Les origines

Dès le VI^{ème} siècle av. J.-C., les philosophes grecs décrivaient — et tentaient d'expliquer — l'effet de minerais riches en magnétite. Ces roches étaient issues entre autres de la cité de Magnésie : elle donna son nom au phénomène.

B Les chinois

L'aiguille « Montre-sud » est mentionnée pour la première fois au XI^{ème} siècle par Chen Koua et, même s'il y a des attestations de la connaissance de l'aimant en Chine[2] dès le III^{ème} siècle av. J.-C., le problème du magnétisme terrestre apparaît beaucoup plus tard.

L'utilisation de la boussole dans les techniques de navigation daterait du XII^{ème} siècle et son usage exact reste à préciser du fait d'une navigation essentiellement côtière à cette époque. Les boussoles faisaient usage du champ magnétique terrestre, qui se trouve être aujourd'hui à peu près aligné avec l'axe de rotation terrestre, raison pour laquelle une boussole, en indiquant le pôle magnétique, indique aussi (quoique approximativement) la direction du pôle géographique terrestre.

C En occident

En Occident, Pierre de Maricourt fut l'un des premiers à travailler sur le magnétisme et publia son *Epistola de magnete* à peu près à la même époque que les savants chinois. Au-delà du simple problème des priorités, il serait intéressant de savoir comment certaines techniques ont pu voyager et s'il n'est pas possible que des développements parallèles, et chronologiquement presque concomitants, se soient produits.

D Les lumières

Pour les encyclopédistes des Lumières, « le magnétisme est le nom général qui est donné aux différentes propriétés de l'aimant ». Ils attribuent ses effets à une « matière subtile, différente de l'air » (parce que ces phénomènes ont également lieu dans le vide) qu'ils appellent magnétique. Plus loin ils affirment que « c'est encore une question non moins difficile que de savoir s'il y a quelque rapport entre la cause du magnétisme et celle de l'électricité, car on ne connaît guère mieux l'une que l'autre. »

2 Les aimants

A La force magnétique

Les aimants exercent une force attractive à distance sur les matériaux magnétiques : la force magnétique.

B Les pôles d'un aimant

L'attraction se fait principalement sentir auprès des 2 extrémités. Ce sont les *pôles*.

a) Types de pôles

Le pôle correspondant à la pointe de l'aiguille de la boussole pointant vers le nord est appelé le *pôle nord*, son complément le *pôle sud*.



FIGURE 48.1 – Un aimant droit

b) Interaction entre pôles

Deux pôles de même nom se repoussent ; deux pôles de noms contraires s'attirent. Une boussole est un aimant mobile dont le centre de gravité est posé sur un axe.

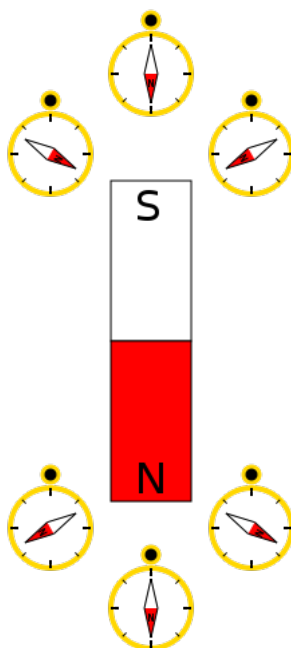


FIGURE 48.2 – Attraction entre aimant et boussoles

c) Pas de monopôle magnétique

Contrairement aux charges électriques, il est impossible d'isoler un pôle d'un aimant. Si on brise un aimant en deux, on obtient deux aimants qui auront l'un comme l'autre un pôle nord et un pôle sud. Il est impossible d'obtenir un aimant avec un seul pôle ! Les physiciens disent qu'il n'existe pas de monopôle magnétique.

3 Effet sur les matériaux

Remarquons finalement que les aimants attirent certains métaux (Fer, acier, alliage de Fer nickel) et pas d'autres (Cu-Zn-Al). Ils n'exercent aucune force sur les matières non métalliques.

4 L'analyse du magnétisme

A Champ magnétique

Un champ, en physique, c'est une manière de décrire l'influence d'un objet ou l'action d'un phénomène dans tout l'espace.

a) Lignes de champs magnétique

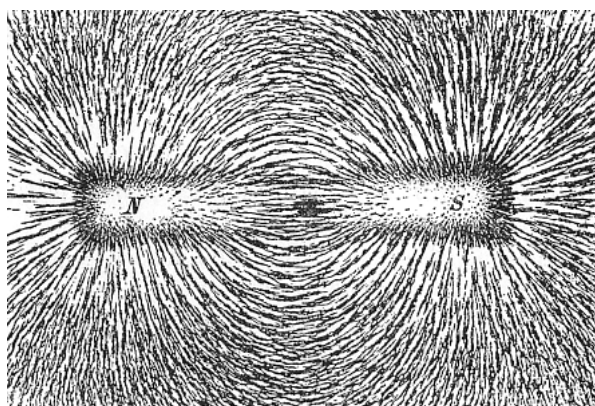


FIGURE 48.3 – La limaille de fer s'aligne selon le champ magnétique d'un aimant

Si nous plaçons une feuille de papier sur un aimant et que nous saupoudrons de la limaille de fer sur cette feuille, nous voyons la limaille se disposer selon des courbes reliant les deux pôles.

La limaille s'est alignée sur le *champ magnétique* de l'aimant.

Nous dirons que les courbes formées par la limaille sont les lignes de champ magnétique.

Si, en lieu et place de la limaille de fer, nous disposons des boussoles, nous les verrons s'aligner selon les lignes de champs.

Ces lignes relient les pôles magnétiques, et par convention on les oriente de sorte que les lignes de champ d'un aimant entrent par le sud et ressortent par le nord.

Nous savons que la terre se comporte comme un aimant. Ainsi, si le pôle nord de nos boussoles pointe approximativement vers le nord géographique, c'est parce que c'est le pôle sud de l'aimant terrestre qui se situe au le nord géographique !

b) Vecteur champ magnétique

Le champ magnétique est représenté, en chaque point de l'espace par un vecteur, le vecteur champ magnétique¹.

Celui-ci s'écrit \vec{B}

1. Le lecteur physicien va ici, peut-être, hurler. Nous faisons un abus de notation entre \vec{B} et \vec{H} . L'auteur connaît la différence entre le champs et l'induction magnétique mais cet abus est commun dans les manuels destinés au secondaire et nous assumons cette "faute". Il s'agit ici d'une première introduction aux concepts du magnétisme pas d'un cours universitaire.

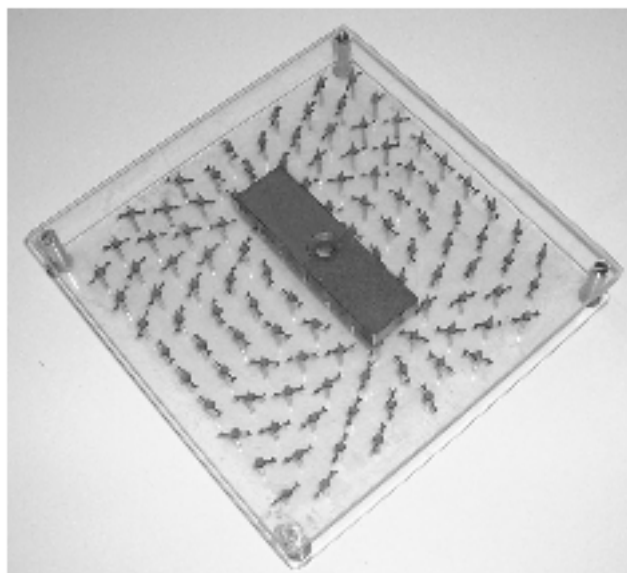


FIGURE 48.4 – Le champ magnétique d'un aimant droit

- Direction : tangente aux lignes du champ magnétique,
- sens : du nord au sud d'un aimant,
- grandeur : dépend de l'aimant. unité SI le tesla (T)

Par définition, les lignes de champ du champ magnétique sont l'ensemble des courbes « en tout point » tangentes à \vec{B} .

D'autres unités sont aussi utilisées : le gauss par exemple pour des champs plus faibles (1 gauss = 10^{-4} tesla).

(i) Ordres de grandeur de champs magnétiques Un aimant NdFeB (néodyme-fer-bore) de la taille d'une pièce de monnaie (créant un champ de l'ordre de 1,25 T) peut soulever un objet de 9 kg et effacer les informations stockées sur une carte de crédit ou une disquette. Les utilisations médicales, comme l'IRM², impliquent des champs d'intensité allant jusqu'à 6 T. Les spectromètres RMN peuvent atteindre jusqu'à 23,5 T.

La Terre, comme la plupart des planètes du système solaire, possède un champ magnétique. Ce champ magnétique terrestre — qui protège la Terre en déviant les particules chargées issues du Soleil dans une région appelée magnétosphère — est principalement d'origine interne. On suppose qu'il est issu d'effets de convection de la matière située dans le noyau interne de la Terre, principalement composé de fer et de nickel liquide. En particulier, des courants (bien que très faibles), parcourant le noyau induiraient ce champ magnétique, par un processus appelé "effet dynamo".

La valeur moyenne du champ magnétique terrestre est d'environ $5 \cdot 10^{-5} T$ (soit 0,5 gauss). Le champ magnétique terrestre fluctue au cours du temps : sa direction et son intensité ne sont pas constantes. De plus, il n'est pas homogène en tout point du globe.

Au niveau des pôles magnétiques de ces planètes, le champ a tendance à guider les particules chargées, issues par exemple du vent solaire. Celles-ci, très énergétiques, interagissent parfois avec l'atmosphère de la planète : c'est ce que l'on peut observer sous la forme des aurores polaires.

La magnétosphère est la région entourant un objet céleste dans laquelle les phénomènes physiques sont dominés ou organisés par son champ magnétique.

Toute planète dotée d'un champ magnétique (la Terre, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) possède sa propre magnétosphère. Mercure et Ganymède, une lune de Jupiter, en possèdent éga-

2. Imagerie par Résonance Magnétique

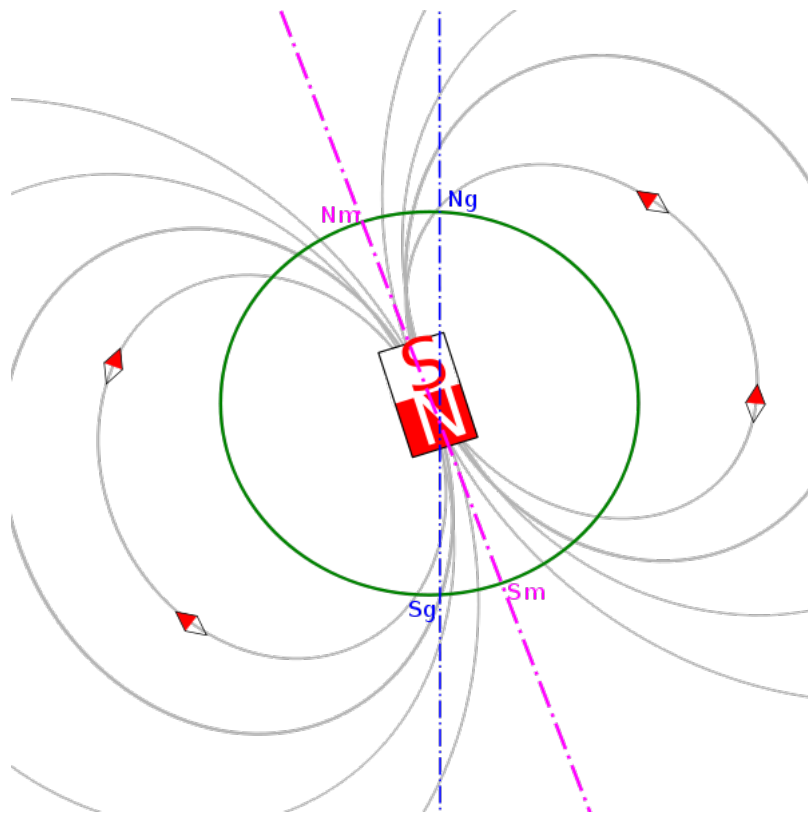


FIGURE 48.5 – Le champ magnétique terrestre

lement une, mais ces magnétosphères sont trop faibles pour capturer le vent solaire ionisé. Sur Mars, on a observé des anomalies magnétiques locales dans l'écorce planétaire, restes présumés d'un champ magnétique ancestral de nos jours disparu. Le terme « magnétosphère » est aussi utilisé pour décrire une région dominée par des champs magnétiques de plusieurs objets célestes.

La magnétosphère terrestre est située au-delà de l'ionosphère, c'est-à-dire au-dessus de 800 à 1 000 km d'altitude. S'il n'y avait pas de vent solaire, le spectre magnétique de la Terre serait semblable à celui d'un aimant droit isolé. En réalité, la magnétosphère agit comme un écran et protège la surface terrestre des excès du vent solaire, nocif pour la vie. Elle s'oppose au vent solaire comme une culée de pont dévie le courant d'une rivière. En contrepartie le vent solaire déforme le spectre magnétique de la Terre en lui donnant une forme de comète, comme le montre schématiquement la figure ci-dessous.

En particulier, les champs magnétiques des planètes Jupiter et Saturne, les plus intenses après celui du Soleil sont actuellement beaucoup étudiés afin notamment de comprendre le décalage entre l'orientation du champ magnétique et l'axe de rotation de la planète, ainsi que ses variations.

Dans l'espace interplanétaire, le champ magnétique est compris entre 10^{-10} et 10^{-8} T.

Les étoiles, à l'instar des planètes, possèdent aussi un champ magnétique, qui peut être mis en évidence par spectroscopie (effet Zeeman).



FIGURE 48.6 – Une vue du crâne en IRM



FIGURE 48.7 – Une aurore boréale

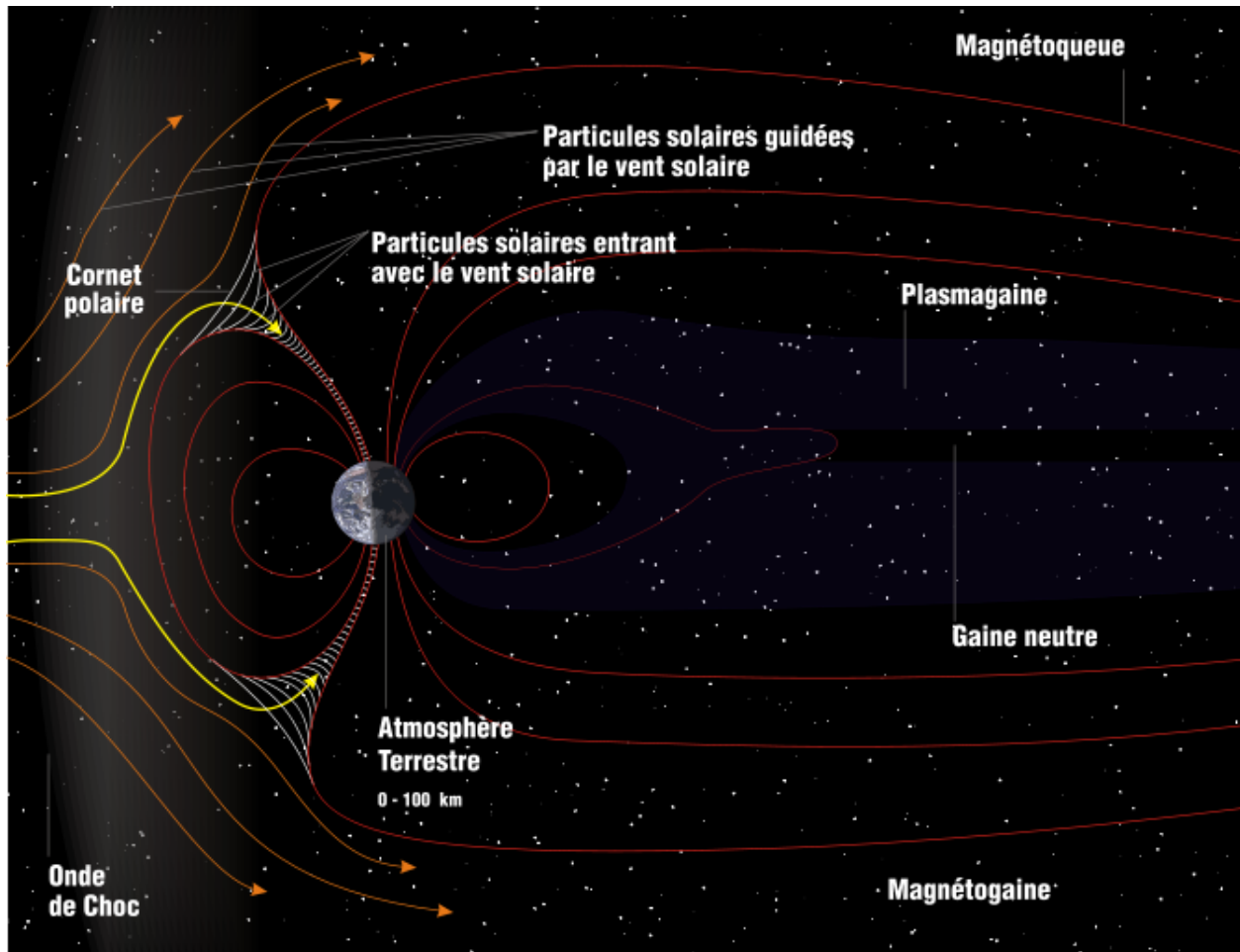


FIGURE 48.8 – La magnétosphère protège la Terre

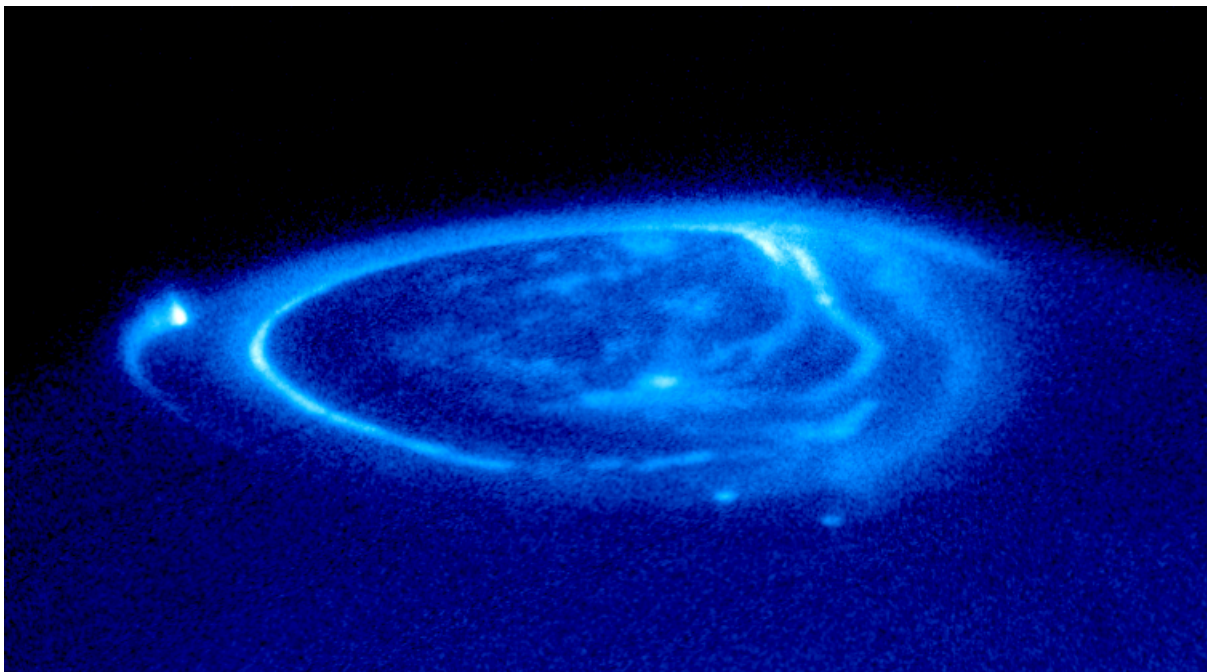


FIGURE 48.9 – Une aurore polaire sur Jupiter

Chapitre 49

Les champs magnétiques induits

Sommaire

1	Historique	366
	A Électricité et magnétisme	366
2	Champ magnétique créé par un courant	366
	A Courant dans un fil droit	366
	B Courant dans une spire	367
	C Courant dans une bobine	369

Introduction

1 Historique

A Électricité et magnétisme

a) Ørsted et Faraday

Jusqu'au début des années 1820, on ne connaissait que le magnétisme des aimants naturels à base de magnétite. Hans Christian Ørsted montra en 1821 qu'un courant électrique parcourant un fil influence l'aiguille d'une boussole située à proximité. Il fut cependant incapable d'expliquer ce phénomène à la lumière des connaissances de l'époque. La même année, Michael Faraday énonce la loi de Faraday, qui trace un premier lien entre électricité et magnétisme.

b) Les premiers moteurs électriques

En 1822, le premier moteur électrique est inventé : la roue de Barlow.

André-Marie Ampère proposa peu après une loi phénoménologique, aujourd'hui démontrée dans le cadre général de l'électromagnétisme, appelé théorème d'Ampère, qui relie le champ magnétique aux courants. Peu après, en 1825, l'électricien William Sturgeon crée le premier électroaimant.

En 1873, l'ingénieur belge Zénobe Gramme découvre le premier moteur électrique à courant continu, utilisable à grande échelle.

c) Maxwell

En 1873, James Clerk Maxwell unifie le champ magnétique et le champ électrique, au sein de la théorie de l'électromagnétisme.

En 1944, Lars Onsager propose le premier modèle (dit modèle d'Ising) décrivant le phénomène de ferromagnétisme.

En 1968 sont découverts les pulsars, cadavres d'étoiles extraordinairement denses, siège des champs magnétiques les plus intenses existant aujourd'hui dans la nature ($4 \cdot 10^8$ teslas pour le pulsar du Crabe, par exemple).

En 1983, une équipe internationale crée des aimants néodyme-fer-bore, les plus puissants aimants permanents connus à ce jour (environ 1,25 tesla).

En 1998, une équipe russe crée un champ magnétique pulsé par une explosion qui atteint 2 800 T.

Le 12 décembre 1999, une équipe américaine crée un champ magnétique continu d'une intensité de 45 T.

En 2006, des champs magnétiques pulsés ont atteint 100 T sans destruction.

2 Champ magnétique créé par un courant

A Courant dans un fil droit

Si un courant circule dans un conducteur droit, une boussole située à proximité va être déviée. En effet, un champ magnétique apparaît qui entoure le conducteur.

Ceci peut se déduire par la *règle du pouce droit*. Si le pouce droit pointe dans le sens du courant, le vecteur champ magnétique est orienté selon les sens des autres doigts de la main.

Le champ magnétique sera d'autant plus fort que l'on est proche du conducteur et que l'intensité du courant est élevée. Ceci s'exprime par la relation suivante :

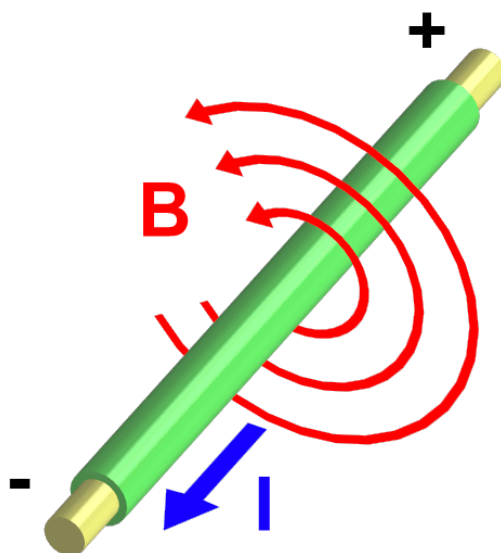


FIGURE 49.1 – Le champ magnétique créé par un courant dans un fil droit



FIGURE 49.2 – La règle du pouce droit pour un courant dans un conducteur droit

$$\vec{B} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{I}{d} \quad (49.1)$$

B Courant dans une spire

Un conducteur enroulé en anneau s'appelle une spire.

Un courant circulant dans une spire va provoquer l'apparition d'un champ magnétique.

Le sens du champ magnétique peut se déduire par la *règle du pouce droit*. Si les doigts de la main pointent dans le sens du courant, le vecteur champ magnétique est orienté selon le sens du pouce droit.

$$\vec{B} = 2\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{I}{r} \quad (49.2)$$

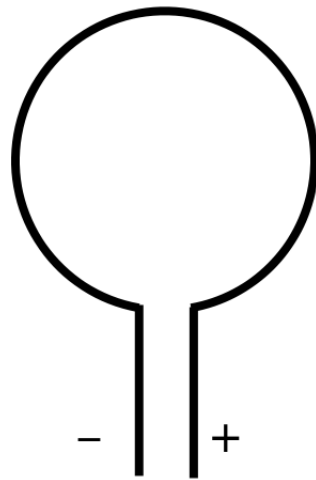


FIGURE 49.3 – Une spire

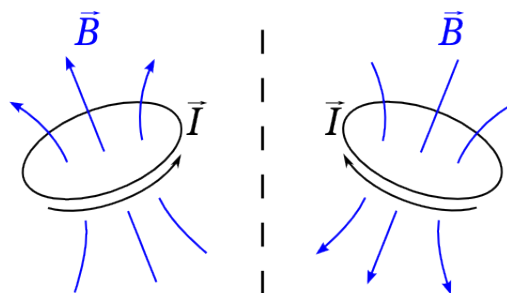


FIGURE 49.4 – Le champ magnétique dû au courant dans une spire

C Courant dans une bobine

Un conducteur enroulé en cylindre s'appelle un solénoïde. On dira aussi bobine ou bobinage.

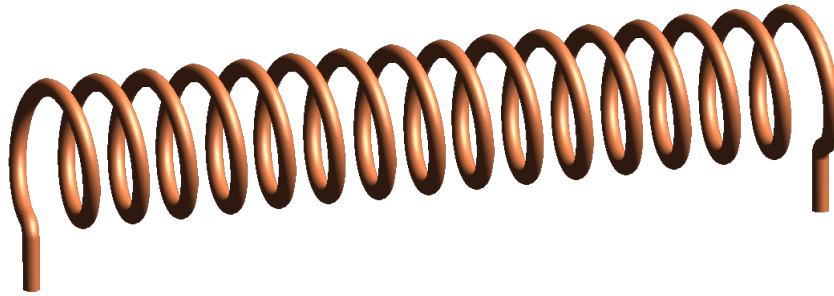


FIGURE 49.5 – Un solénoïde

Un courant circulant dans un solénoïde va provoquer l'apparition d'un champ magnétique.

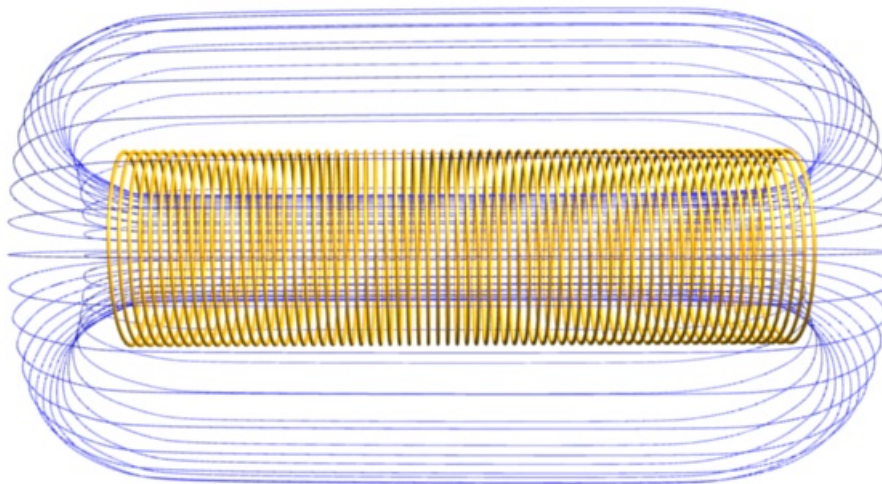


FIGURE 49.6 – Le champ magnétique dû au courant dans un solénoïde

Le champ magnétique B à l'intérieur du solénoïde est d'autant plus fort que le courant électrique I est intense et que le nombre de tour N est important. Le champ magnétique B sera d'autant plus faible que le solénoïde est long.

Ceci s'exprime via la relation suivante :

$$\vec{B} = \mu \cdot I \cdot \frac{N}{l} \quad (49.3)$$

μ est la perméabilité magnétique du milieu.

Si le solénoïde est dans le vide (ou dans l'air), alors μ vaut approximativement $1,25 \cdot 10^{-6}$.

a) Les électroaimants

Mais, si dans le solénoïde, on place un métal bien choisi, le champs magnétique peut devenir beaucoup plus fort.

μ peut valoir jusqu'à approximativement $5,0 \cdot 10^{-3}$ pour certains aciers.

Ce renforcement du champ magnétique induit par le courant dans le solénoïde est exploité dans la technologie des électroaimants.

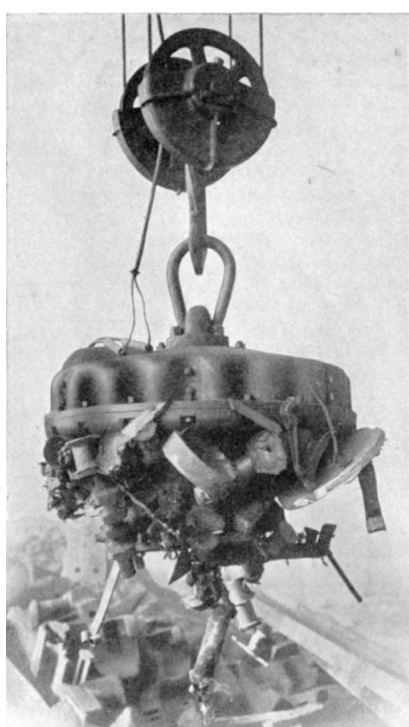


FIGURE 49.7 – Un électroaimant industriel

Chapitre 50

Les courants induits

Sommaire

1	Historique	372
	A	Electricité et magnétisme 372
2	Courants engendré par le magnétisme	372
	A	Expérience 372
	B	Loi 372

Introduction

1 Historique

A Electricité et magnétisme

2 Courants engendré par le magnétisme

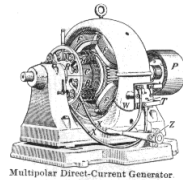


FIGURE 50.1 – Un générateur de courant continu

A Expérience

B Loi

Le courant est lié à la variation au cours du temps du champ magnétique. C'est la dérivée du champ magnétique B par rapport au temps qui est liée à l'intensité de courant induit.

Chapitre 51

Force électromagnétique

Sommaire

1	Historique	374
2	Force, courants et magnétisme	374
	A Expérience	374
	B Loi	374
3	La force électromagnétique	374

Introduction

1 Historique

2 Force, courants et magnétisme

A Expérience

B Loi

3 La force électromagnétique

Onzième partie

Les ondes

Chapitre 52

Les ondes : généralités

Sommaire

1	Introduction	378
	A Travail : analyse de texte	378
2	Onde : définition	378
3	Autres définitions	379
	A Elongation et amplitude	379
	B Vitesse de propagation	379
	C Ondes transversales et longitudinales	379
	D Ondes sinusoïdales	379
	E Progression d'une onde transversale	380
	F La longueur d'onde	380
4	Exercices	381

1 Introduction

A Travail : analyse de texte

consignes :

- Répondre aux questions
- Faire le problème à la fin
- Étudier les encadrés.

2 Onde : définition

Une **onde** est un **transfert d'énergie sans transfert de matière**.
 Une **onde** est la propagation d'un signal (à travers un milieu).
 Il y a modification d'une (ou de plusieurs) grandeur(s) physique(s) dans le milieu de propagation. (ex. : pression, position, vitesse, ...)

Exemples :

- Une goutte d'eau tombant dans un étang ou un évier. Des rides circulaires et concentriques se propagent à la surface de l'étang.
- Une locomotive heurte un autre train. Tous les wagons du train vont ressentir le choc et sortir des rails. Pourtant la locomotive n'a heurté qu'une extrémité du train. (onde de choc)
- Deux plaques tectoniques qui glissent l'une sur l'autre et une onde sismique se propage dans la croûte terrestre. C'est un tremblement de terre.
- Un bruit, une explosion causent de minuscules déplacements de molécules d'air et de faibles variations de pression. (Onde sonore)

Des **oscillations** (ou des vibrations) sont des mouvements de va-et-vient périodiques effectués par un objet de part et d'autre d'une position d'équilibre.

Exemples de mouvement :

- Le piston d'un moteur (rpm).
- une corde de guitare ou d'un autre instrument de musique qui est frappée ou pincée.
- une lame en acier fixée à une extrémité et frappée latéralement à l'autre extrémité.
- Un corps suspendu à un ressort.

La **période** est la durée d'une oscillation complète.
 Symbole : **T**
 Unité : **s**

La **fréquence** est le nombre d'oscillations complètes par seconde.
 Symbole : **f** ou ν
 Unité : le hertz **Hz** ou s^{-1}

$$f = \frac{1}{T} \Leftrightarrow T = \frac{1}{f}$$

Exemples :

- Si $T = 0,5s$ Alors $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,5s} = 2Hz$
-

3 Autres définitions

A Elongation et amplitude

L'**élongation** y d'un point P est la valeur de l'écart de P par rapport à la position d'équilibre 0.

$$y(t) = OP$$

L'**amplitude** A est la valeur maximale de l'élongation. C'est l'écart maximal par rapport à la position d'équilibre.

L'élongation est toujours comprise entre A et $-A$. L'unité de A et de y est **m**.

B Vitesse de propagation

La vitesse de propagation dépend de plusieurs variables :

- Le milieu de propagation et ses caractéristiques.
 - $v = 331$ m/s ds. l'air à $0^{\circ}C$
 - $v = 340$ m/s ds. l'air à $0^{\circ}C$
 - $v = 1500$ m/s ds. l'eau à $15^{\circ}C$
 - $v = 3570$ m/s ds. la fonte à $20^{\circ}C$
- La nature du signal :
 - Pour un même milieu, (ex. : l'air), la vitesse des ondes sonores est très différentes des ondes radios ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s)

Rmq. : La vitesse de propagation ne dépend pas de l'amplitude.

C Ondes transversales et longitudinales

Nous allons classer les ondes selon la direction de la perturbation.

a) Ondes transversales

Le mouvement d'un bouchon sur une vague se fait dans la direction perpendiculaire au déplacement de la vague. On parle d'*onde transversale* dans le cas où l'oscillation est perpendiculaire au déplacement de l'onde. Comme autre exemple, on peut s'imaginer l'onde produite sur une corde en lui imprimant un mouvement perpendiculaire.

b) Ondes longitudinales

Par contre, quand l'oscillation est parallèle au déplacement on parle d'*onde longitudinale*. C'est, par exemple, le cas des ondes sonores. En effet, dans ce cas, l'oscillation est produite par la variation de la densité des molécules d'air. Celles-ci se déplacent alors dans la même direction que l'onde. Comme autre exemple, on peut s'imaginer l'onde produite dans un ressort en lui imprimant un mouvement de détente-compression.

D Ondes sinusoïdales

L'onde peut-être du type "onde de choc" avec une seule perturbation.

Si ce qui cause l'onde, la perturbation, se répète périodiquement (au sens de période), on a alors une onde entretenue. Un cas particulier est l'**onde sinusoïdale entretenue**.

Faisons osciller un poids suspendu à un ressort. Au repos le centre de masse du ressort se situe en P, la position d'équilibre. Je tire ou je compresse le ressort, soit jusqu'à la position A soit jusqu'à la position -A.

Dessin

Si j'attache une corde au ressort, je peux alors imaginer prendre des photos de la corde tous les quarts de période ($t_0 = 0$; $t_1 = \frac{T}{4}$; $t_2 = \frac{T}{2}$; $t_3 = \frac{3T}{4}$; ...).

Analysons le mouvement de la corde à ($t_0 = 0$; $t_1 = \frac{T}{4}$; $t_2 = \frac{T}{2}$; $t_3 = \frac{3T}{4}$; ...)

Dessin

Le point P est source d'une onde sinusoïdale.

Les briques élémentaires de l'étude des ondes sont donc les ondes sinusoïdales. L'exemple caractéristique est à nouveau la vague sur l'eau, pour autant qu'elle ne déferle pas. Une telle onde prend une allure de sinus si on considère la surface de l'eau en coupe dans son extension spatiale, comme le montre la figure 52.1.

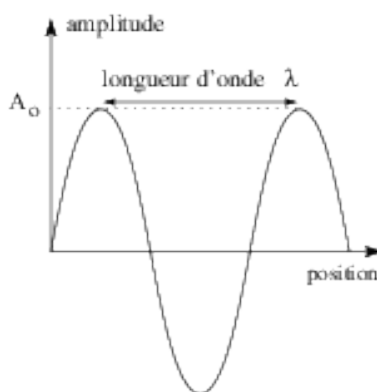


FIGURE 52.1 – L'onde sinusoïdale
Extension spatiale

E Progression d'une onde transversale

Dessin

F La longueur d'onde

La **longueur d'onde** λ est la distance parcourue par l'onde pendant une période.

La **longueur d'onde** λ correspond à la distance entre deux crêtes de la vague comme on peut le voir sur la figure 52.1. Cela peut être la distance entre deux maxima ou deux minima.

$$\lambda = v.T = \frac{v}{f}$$

où

- λ est la longueur d'onde (m),
- T est la période (s),
- f est la fréquence (Hz),
- v est la vitesse de propagation de l'onde.

La longueur d'onde dépendant de la fréquence f (ou de la période) d'oscillation de la source et de la vitesse de propagation dans le milieu, λ dépend donc de la source et du milieu.

4 Exercices

1. On joue un La à 440 Hz sur une guitare. Quelle est la longueur d'onde correspondante ($v_{\text{son}} = 343 \text{ m/s}$ à 20°) ?

On a que $v = \lambda \cdot \nu$. Ainsi :

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{343}{440} = 78 \text{ cm}$$

2. Une lampe émet de la lumière rouge d'une longueur d'onde de $759,4 \text{ nm}$. Quelle est sa fréquence et sa pulsation ?

On a que $v = \lambda \cdot \nu$. Ainsi, dans l'air où la vitesse de la lumière vaut $c = 300'000 \text{ km/s}$:

$$\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{759,4 \cdot 10^{-9}} = 3,95 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Sa pulsation est donné alors par :

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu = 2 \cdot \pi \cdot 3,95 \cdot 10^{14} = 2,48 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

Chapitre 53

La réflexion des ondes

Sommaire

1	La cuve à ondes	384
	A Ondes circulaires	384
	B Ondes planes	384
	C Conclusion	384
2	La réflexion des ondes	384
	A Ondes circulaires	385
3	Exercices	385

Matériel : Cuve à ondes

Nous savons que les chauves-souris se repèrent grâce aux échos des ultrasons qu'elles ont émis. Les sonars naturels des dauphins comme celui des bateaux fonctionnent sur le même principe.

1 La cuve à ondes

La cuve à ondes est un large récipient dont le fond plat est aussi transparent et que nous remplissons d'une fine épaisseur d'eau. Ce récipient est posé sur un rétroprojecteur.

Un vibreur relié à un pointe (ou d'autres accessoires) touche la surface de l'eau et y provoque des déformations.

La vitesse des ondes y sera de quelques décimètres par seconde. Les vagues observées à la surface sont des ondes transversales.

A Ondes circulaires

Une goutte d'eau tombant à la surface de la cuve provoque des plissements à la surface de l'eau.

Nous utiliserons plutôt une pointe reliée au vibreur pour provoquer des ondes circulaires entretenues.

Ces plissements circulaires s'éloignent du point de chute. Ceci est dû au fait que la vitesse de propagation est la même dans toutes les directions.

En tout point la direction de propagation des ondes circulaires est radiale. (càd. dirigée selon les rayons du cercle dont le point de chute est le centre.)

SCHEMAS

Les traits pleins correspondent aux crêtes des ondes, les traits pointillés aux creux.

La distance entre deux crêtes consécutives est égale à la longueur d'onde λ .

Tous les points d'une même circonférence sont à une même distance de la source et sont simultanément par la vibration. On dit qu'ils sont dans un même état de vibration.

RMQ : R est \perp à la circonférence. \Leftrightarrow La direction de propagation est \perp aux crêtes.

B Ondes planes

Si nous substituons à la pointe une tige horizontale, le vibreur produit maintenant des ondes **planes**. En effet crêtes et creux sont clairement rectilignes.

Ici aussi, la distance entre deux crêtes consécutives est égale à la longueur d'onde λ et la direction de propagation est \perp aux crêtes.

C Conclusion

Dans les deux cas, **les ondes se propagent en ligne droite**, car les perpendiculaires aux crêtes sont des droites.

2 La réflexion des ondes

Etudions maintenant la réflexion des ondes sur des obstacles rectilignes.

A Ondes circulaires

3 Exercices

Chapitre 54

Les ondes sonores

Sommaire

1	Introduction	388
2	Création d'une onde sonore	388
3	Propagation du son	388
4	Visualisation du son avec l'oscilloscope	388
	A Matériel et méthode	388
	B Types de son	389
5	Hauteur du son	389
	A Expériences	389
	B Conclusion	389
6	Intensité du son	389
	A Expérience	389
7	Définition d'intensité de l'onde sonore	389
	A rappel	389
8	L'échelle décibel	390
9	Le timbre en musique	391
	A Oscillogramme	391
	B Conclusion	391
10	Exercices	392

Matériel : Réveil, diapason, oscilloscope, micro, générateur de signal, haut-parleur, sifflet ultrason...

1 Introduction

Déjà dans l'utérus, le bébé perçoit des sons. Le son est un phénomène si familier que nous n'y pensons plus. Redécouvrons le ici sous l'éclairage des ondes et voyons comment toutes les caractéristiques vues en général s'applique à ce type d'onde.

2 Création d'une onde sonore

Faisons vibrer

- un diapason,
- un couteau coincé sur un bord de table,
- une corde de guitare, ...

Chaque fois, un son est mis. Il faut faire vibrer un objet pour produire un son.

Comme annoncé précédemment, le son est perçu en fonction du milieu et de ses caractéristiques.

- La présence d'un milieu matériel est nécessaire à la transmission de cette vibration. Placé sous vide, le réveil n'est plus entendu.
- Si l'on parle après avoir respiré de l'hélium, les sons émis sont plus aigus.
- Une règle en bois ou en métal, un tuyau mis en contact avec une montre mécanique d'un côté et notre oreille de l'autre nous font percevoir le son de la montre avec une plus grande clarté.

3 Propagation du son

Dessin

4 Visualisation du son avec l'oscilloscope

A Matériel et méthode

Pour visualiser et étudier l'onde sonore, nous aurons recours au couple microphone-oscilloscope.

Le **microphone** transforme les variations de pression sur une membrane en variation de différence de potentiel à ses bornes.

Dessin

L'oscilloscope visualise le signal électrique en fonction du temps.

Nous étudierons les sons grâce à la combinaison du microphone et de l'oscilloscope.

- Le micro sera connecté à l'oscilloscope.
- La source sonore sera placée à proximité du micro.
- La courbe observée à l'oscilloscope s'appelle l'**oscillogramme**.
- L'axe y de l'**oscillogramme** est l'axe de l'élongation.
- L'axe x de l'**oscillogramme** est celui du temps.
- Nous pourrons observer sur l'**oscillogramme**, l'élongation, l'amplitude, la période, la fréquence, ...

B Types de son

- L'oscillogramme du son émis par un diapason est sinusoïdal. Ce type de son est nommé par convention : **son sinusoïdal**.
- L'oscillogramme du son émis par un instrument de musique est périodique mais non sinusoïdal. Ce type de son est nommé par convention : **son musical**.
- L'oscillogramme du son émis par un claquement de main, un objet qui tombe, ... n'est ni sinusoïdal ni périodique. Ce type de son est nommé par convention : **bruit**.

5 Hauteur du son

A Expériences

Cavalier sur diapason

- son + grave
- oscillogramme : distance entre maxima + grande
- longueur d'onde + grande
- Or $v_{son} = cste.$, période T + grand
- Fréquence f + grande

B Conclusion

La hauteur du son est la sensation d'aigu ou de grave. Elle est liée à la fréquence de l'onde sonore.

- Son grave = fréquence basse
- son aigu = fréquence haute

6 Intensité du son

A Expérience

Diapason

- Son de + en + faible
- Evolution de l'oscillogramme après quelques secondes : atténuation.
- Càd. **amplitude** qui décroît!

L'intensité du son est petite lorsque l'amplitude de l'onde sonore est petite.(et inversement)

L'intensité du son peut dépendre de

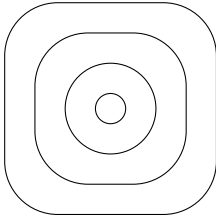
- la distance entre la source et notre oreille,
- du type de source (un moteur d'avion fait plus de "bruit" qu'une guitare qui en fait plus qu'un moustique!).

7 Définition d'intensité de l'onde sonore

A rappel

Une onde est un transfert d'énergie (sans transfert de matière). L'onde sonore transporte donc de l'énergie dans l'espace.

Si la source est ponctuelle, l'onde se propage dans toutes les directions. L'énergie issue de la source est répartie uniformément lors de la propagation de l'onde. A la surface de toute sphère centrée sur la source, pour une même surface la quantité d'énergie est la même.



Plus nous nous éloignons de la source, plus la quantité d'énergie doit se répartir sur une surface plus grande. Ce qui explique que le son perçu soit plus faible.

L'intensité I de l'onde sonore est définie comme l'**énergie par unité de temps et par unité de surface** traversant cette surface.
Unité S.I. : watt par m^2 (W/m^2)

Par convention, on mesure à 1000 Hz l'intensité sonore minimale que peut percevoir une oreille humaine "moyenne".

Cette intensité sonore minimale (appelée par ailleurs le seuil d'audition) à 1000 Hz vaut $10^{-12} w/m^2$.

Faisons un tableau pour représenter quelques intensités sonores typiques, les pressions leur correspondant, l'amplitude du mouvement des molécules d'air et une autre information que nous précisons de suite.

Type de son	intensité (w/m^2)	pression (Pa)	amplitude (m)	dB
Seuil d'audition	10^{-12}	3.10^{-5}	10^{-11}	0
Conversation normale	3.10^{-6}	0,05	2.10^{-8}	65
Douleur	0,1	10	$3,5.10^{-6}$	110

8 L'échelle décibel

Comme vu au point précédent, les intensités sonores s'étalent sur une plage très large ($10^{-12} w/m^2$, $3.10^{-6} w/m^2$, $0,1 w/m^2$).

De ce fait, les professionnels du son (ingénieurs du son, médecins ORL, musiciens, spécialistes de nuisances sonores, logopèdes,...) utilisent une échelle logarithmique, l'échelle décibel.

Le décibel est l'unité de niveau d'intensité sonore.
Le niveau d'intensité sonore (β) et l'intensité sonore sont liés par la relation suivante :

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad (54.1)$$

Où

- I = l'intensité sonore
- I_0 = L'intensité de référence $10^{-12} w/m^2$ (Seuil d'audition à 1000 Hz)
- Unité S.I. : Le décibel (dB) Attention, c'est un nombre pur (sans unité).

Graham Bell l'inventeur du téléphone est celui qui a donné son nom au décibel!
Rappel sur les logarithmes :

Nombre	0,001	0,01	1	2	3,16	10	100	200	316
Nombre (10^n)	10^{-3}	10^{-2}	10^0	$10^{0,3}$	$10^{0,5}$	10^{-1}	10^2	$10^{2,3}$	$10^{2,5}$
Logarithme	-3	-2	0	0,3	0,5	1	2	2,3	2,5

La fonction logarithme est définie comm la fonction qui à un nombre x fait correspondre un nombre y tel que : $x = 10^y$

Règle :

- $\log(A.B) = \log A + \log B$
- Ex : $\log 20 = \log(2.10) = \log 2 + \log 10$

Ex :

- Si $I = 10^{-5} w/m^2$, alors $\beta = 10.\log 10^7 = 70dB$
- Si 2 hauts parleurs émettent une onde de $I = 10^{-5} w/m^2$, alors $I_{tot} = 2.10^{-5} w/m^2$ et $\beta = 10.\log(2.10^7) = 73dB$
- Si 4 hauts parleurs émettent une onde de $I = 10^{-5} w/m^2$, alors $I_{tot} = 4.10^{-5} w/m^2$ et $\beta = 10.\log(4.10^7) = 76dB$
- Si 8 hauts parleurs émettent une onde de $I = 10^{-5} w/m^2$, alors $I_{tot} = 8.10^{-5} w/m^2$ et $\beta = 10.\log(8.10^7) = 79dB$
- Si 10 hauts parleurs émettent une onde de $I = 10^{-5} w/m^2$, alors $I_{tot} = 10.10^{-5} w/m^2 = 10^{-4} w/m^2$ et $\beta = 10.\log(10^8) = 80dB$
- Si 100 hauts parleurs émettent une onde de $I = 10^{-5} w/m^2$, alors $I_{tot} = 10^{-3} w/m^2$ et $\beta = 10.\log(10^9) = 90dB$

Tableau d'exemples

9 Le timbre en musique

Nous savons maintenant que 2 instruments de musiques peuvent émettre des ondes sonores de même hauteur (ou de même fréquence) et de même intensité. Pourtant un piano, un haut-bois, une harpe, un flute, une trompette et une guitare qui jouent la même note avec une même intensité sont tout à fait identifiables.

C'est qu'il existe une troisième caractéristique de l'onde sonore : le timbre.

A Oscillogramme

Si nous comparons l'oscillogramme de 3 instrument de musique différents, nous pouvons constater que si les 3 ondes ont même fréquence, leurs ondes complexes n'ont pas la même forme. C'est cette forme que nous appellerons désormais le timbre.

B Conclusion

C'est cette forme de l'oscillogramme que nous appellerons désormais le timbre. Il est possible de montrer que tout son complexe de fréquence f est le mélange de sons sinusoïdaux de fréquence $f, 2f, 3f, 4f, \dots, nf, \dots$

La fréquence f est appelée la **fondamentale**.
 Les fréquences $2f, 3f \dots$ sont appelées les **harmoniques**.
 Les proportions d'intensités respectives des différentes fréquences (fondamentale et harmoniques) déterminent le timbre d'un instrument, d'une voix, ...

10 Exercices

Chapitre 55

L'effet Doppler

Sommaire

1	Expériences	394	
	A	Observations	394
	B	rappel : hauteur d'un son	394
	C	Conclusion	394
2	Illustration : un nageur et les vagues	394	
	A	Calcul	394
	B	2 ^{eme} cas : S \leftrightarrow A	395
3	Synthèse	395	
	A	Définition	395
	B	Formule	395
4	Applications	395	
	A	Détecteur de vitesse automobile	396
	B	Alarme	396
	C	vitesse du sang	396
	D	vitesse du son et BANG supersonique	396
5	Exercices	396	

Introduction

Quels sont les points communs aux différents objets, situations, personnes que je vais vous présenter maintenant ?

1 Expériences

Prenons un diapason électronique. Qu'observons nous si je l'avance très rapidement vers vous ?
Qu'observons nous si je l'éloigne très rapidement de vous ?

A Observations

Le son devient plus aigu si le son vient vers nous.
Le son devient plus grave si le son s'éloigne de nous.

a) anecdote

Pour vérifier celà, un contemporain de Doppler a fait monter un orchestre sur un train et a demandé à un musicien de juger le changement de hauteur du son.

B rappel : hauteur d'un son

Son plus aigu = fq. plus petite = λ plus grand
Dessiner l'onde avant et après

Son plus grave = fq. plus grande = λ plus petit
Dessiner l'onde avant et après

C Conclusion

Cet effet "transforme" l'onde selon le mvt. relatif de la source et de l'observateur.

2 Illustration : un nageur et les vagues

Les vagues vont vers la plage.
Le nageur va dans l'eau vers le large.
Dessin

Puis revient.
Dessin

A Calcul

Dessin : S - distance d - A

a) 1^{er} cas : S ->- A

Le nageur va vers les vagues. La source **S** et l'auditeur **A** se rapprochent.

La distance **d** qui sépare S et A diminue.

La première vague (ou onde de compression) venant de S va mettre un temps $t = d/v$ pour atteindre A.

Si A et S étaient immobiles l'un par rapport à l'autre, la suivante arriverait après une période **T**.

MAIS, la suivante va mettre **moins** de temps pour arriver en A puisque la distance à franchir va en diminuant!

Donc, l'arrivée en A de deux crêtes ou de deux maxima successifs se fera en une durée inférieure à T.

b) Conclusion

A perçoit des ondes de période $T' < T$ et donc de fq. $f' > f$.

Le son perçut est plus aigu. Les vagues semblent plus nombreuses.

B 2^{eme} cas : S <-> A

Le faire vous même!

3 Synthèse

A Définition

L'effet Doppler-Fizeau est une modification de la fréquence d'une onde lorsque source et observateur sont en mouvement relatif.

B Formule**a) Obs en mvt.**

$$f' = f \left(1 \pm \frac{v_{obs}}{v_{onde}} \right)$$

— + si Obs -> Src

— - si Obs <- Src

b) Src. en mvt.

$$f' = f \left(\frac{v_{onde}}{v_{onde} \mp v_{src}} \right)$$

— - si Src -> Obs

— + si Src <- Obs

4 Applications

Détection d'objet en mouvement et de leur vitesse. On utilise la réflexion d'ondes envoyées vers l'objet. La fq. des ondes réfléchies est modifiées si l'objet est en mouvement.

- A Détecteur de vitesse automobile**
- B Alarme**
- C vitesse du sang**
- D vitesse du son et BANG supersonique**

5 Exercices

Exercice 1. *Un musicien est en train d'accorder son instrument et joue la note La dans la même rue où vous marchez. Vous percevez un son à une fréquence de 444 Hz. Etes vous en train de vous approcher ou de vous éloigner de lui ? A quelle vitesse ? (Justifier)*

Exercice 2. *Assis à une terrasse par un beau jour d'été, vous entendez une ambulance qui vient vers vous. L'amis musicien avec qui vous êtes assis vous affirme que la sirène émet un note à 500 Hz. Lorsque l'ambulance est passée et s'éloigne de vous, il vous affirme que la sirène émet un son à 420 Hz. Quel est la vitesse de l'ambulance ? (Justifier)*

Exercice 3. *(Justifier)*

Chapitre 56

La diffraction des ondes

Sommaire

1	Expériences	398
	A	Bord d'un obstacle 398
	B	Fente 398
	C	Objet 399
2	Synthèse	399
	A	Définition 399
	B	$\lambda \ll L$ 399
	C	$\lambda \simeq L$ 399
	D	$\lambda \gg L$ 399
3	Applications	399
	A	En général 399
	B	Echolocation 400
4	Exercices	400

Introduction

Une onde se propage en ligne droite si elle ne change pas de milieu ou si elle ne "heurte" pas un obstacle. Qu'en est-il si elle passe près du bord d'un obstacle ?

1 Expériences

Utilisons à nouveau la cuve à ondes.

A Bord d'un obstacle

Envoyons les ondes sur le bord d'un obstacle.

a) λ *petit*

Les ondes passent à côté de l'obstacle et continuent en ligne droite.

Derrière l'obstacle, il n'y a pas d'onde.

Il y a propagation rectiligne.

b) λ *plus grand*

Les ondes passent à côté de l'obstacle et continuent en ligne droite.

Derrière l'obstacle, il y a des ondes (quarts de cercle).

Si une partie de l'onde est déviée et apparaît derrière l'obstacle, on dit que l'onde est **diffractée**.

B Fente

Envoyons des ondes rectilignes vers deux obstacles qui forment une fente

Soit L la largeur de cette fente.

a) $L \gg \lambda$

Les ondes passent à travers la fente et continuent en ligne droite.

Derrière les obstacles, il n'y a pas d'onde diffractée.

b) $L \searrow$ *et* $\rightarrow \lambda$

Il y a de plus en plus d'ondes diffractées.

c) $L \leq \lambda$

Les ondes passent à travers la fente et deviennent des ondes circulaires dont la fente est le centre!

La fente devient une source ponctuelle d'ondes!.

d) **Ouvertures des ports**

Remarque sur l'ouvertures des ports.

C Objet

Envoyons des ondes rectilignes vers un objet.
Soit L la largeur de cet objet.

a) $L \gg \lambda$

Les ondes passent sur les côtés de l'objet et continuent en ligne droite.
Derrière l'objet, il n'y a pas d'onde diffractée.

b) $L \sim \lambda$ et $\rightarrow \lambda$

Il y a de plus en plus d'ondes diffractées.

c) $L \leq \lambda$

Les ondes passent sur les côtés de l'objet et se rejoignent! Très rapidement elles continuent en ligne droite comme si l'objet n'existait pas.

d) **Radio**

Remarque sur les ondes radios.

2 Synthèse

A Définition

La diffraction est le phénomène qui a lieu quand des ondes interagissent avec de obstacles dont la taille est proche de leur longueur d'onde.

B $\lambda \ll L$

Quasiment pas d'effet.
Propagation rectiligne

C $\lambda \simeq L$

La diffraction apparaît.

D $\lambda \gg L$

Beaucoup de diffraction.
Fente devient source ponctuelle.
Obstacle devient "invisible".

3 Applications

A En général

Son dans l'air : 340 Hz $\lambda = 1$ m. 440 Hz $\lambda = 78$ cm

Piliers, colonne, fenêtres, portes, ... provoquent de la diffraction et nous permettent d'entendre des sons dont nous ne voyons pas les sources.

La longueur d'onde du son est proche du mètre, ce qui est la taille caractéristique d'une porte. Il y a donc diffraction. Les ondes arrivant à la porte sont peut-être planes, elles deviennent circulaires après la porte.

Rmq sur les écrans au bord des autoroutes.

B Echolocation

Expliquer pourquoi le sonar emploie des ultrasons.

Pourquoi des sons de basses fréquences se prêtent-ils mal à l'écholocation ? (justifier)

4 Exercices

Exercice 4. *Quelle est la fréquence minimum qu'un sonar peut utiliser pour détecter des poissons de 10 cm ? (Justifier)*

$$v_{\text{son ds.eau}} = 1500 \text{ m/s}$$

$$\lambda_{\text{max}} = 0,1 \text{ m}$$

$$v_{\text{min}} = \frac{v_{\text{son ds.eau}}}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{1500 \text{ m/s}}{0,1 \text{ m}} = 15000 \text{ Hz}$$

Exercice 5. *Quelles sont les fréquences qu'un radar (ondes radios) peut utiliser pour détecter des voiture de 2 m de large ? (Justifier)*

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda_{\text{max}} = 2 \text{ m}$$

$$v_{\text{min}} = \frac{c}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \text{ m}} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ Hz}$$

Exercice 6. *Une chauve souris émet des ultrasons de fréquence 50 KHz. Peut-elle détecter un insecte de 7 mm de long ? (Justifier)*

$$v_{\text{son ds.air}} = 340 \text{ m/s}$$

$$v = 5 \cdot 10^4 \text{ Hz}$$

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{v_{\text{son ds.air}}}{v} = \frac{340 \text{ m/s}}{5 \cdot 10^4 \text{ Hz}} \simeq 7 \text{ mm}$$

Chapitre 57

Les fentes de Young

Sommaire

1	Principe de superposition et interférences	402	
	A	Principe de superposition	402
	B	Interférences d'ondes circulaires	402
2	Interférences et lumière	403	
	A	Expérience	403
	B	Interprétation	403
	C	Conclusion	403

Introduction

Dans le chapitre concernant les ondes électromagnétiques nous avons affirmé que la lumière visible était une onde électromagnétique. Pourtant nous n'en avons apporté aucune preuve. C'est ce que nous allons faire ici.

Historiquement, jusqu'au début du $XIX^{\text{ème}}$ siècle, le poids intellectuel de Newton faisait plutôt accepter le point de vue selon lequel la lumière était constituée de particules. Les trajectoires en ligne droite des rayons lumineux rappelaient les trajectoires de projectiles très rapides.

Le débat faisait rage avec les partisans du modèle ondulatoire de la lumière. Dès le $XVII^{\text{ème}}$ siècle, Huyghens et d'autres défendait ce point de vue. Pour chaque expérience réalisée par les membres d'un groupe et "prouvant" leur point de vue, l'autre groupe trouvait une explication tout aussi satisfaisante.

C'est l'expérience des fentes de Young qui a permis de trancher.

1 Principe de superposition et interférences

Nous n'avons, jusqu'à présent, travaillé qu'avec des sources uniques d'onde (quelle que soit l'onde d'ailleurs). Nous allons discuter ici des phénomènes observables avec 2 (ou plusieurs) sources d'onde.

Si les deux sources sont à des fréquences très légèrement décalées, on parle de battement. C'est ce phénomène qui est utilisé avec les diapasons pour accorder un instrument de musique.

Lorsque nous avons parlé du timbre d'un instrument de musique, nous avons discuté d'addition d'ondes dont la fréquence est un multiple d'une fréquence de base.

Nous allons ici étudier l'addition d'ondes de même fréquence mais dont les sources sont relativement proches l'une de l'autre en comparaison avec leur longueur d'onde.

fig 1 et 2

La superposition de deux ondes de ce type s'appelle dans ce cas "*interférence*".

A Principe de superposition

Si nous provoquons dans la cuve à ondes, des ondes planes et des ondes circulaires de même fréquence, leur croisement provoque des ondes d'amplitudes doubles :

Deux crêtes qui se rencontrent produisent une crête deux fois plus haute,
deux creux qui se superposent créent un creux deux fois plus profond,
une crête et un creux qui se rencontrent correspondent à un élongation nulle.

Nous énoncerons ainsi ce principe connu sous le nom de principe de superposition : A tout instant, l'élongation résultante de la superposition de deux ondes est la somme de des élongations des deux ondes.

B Interférences d'ondes circulaires

Si 2 pointes sont connectées au vibreur de la cuve à ondes puis plongées à la surface de l'eau, chaque pointe est source d'ondes circulaires. Ces ondes sont de même fréquence, se propagent à la même vitesse et sont donc de même longueur d'onde.

Les ondes se superposent et interfèrent. Des ondes s'éloignent des sources S_1 et S_2 . Des couloirs se forment avec des vagues entre des zones où l'eau est immobile.

fig 3

Ces lignes courbes où l'eau est immobile sont nommées lignes de repos.

fig 4

Utilisons le principe de superposition pour comprendre cette observation.

fig 5

Sur cette figure, les traits pleins représentent des crêtes et les traits pointillés des creux.

Consignes :

- Utiliser le principe de superposition pour indiquer sur la figure, les points o :
 - L'amplitude sera toujours nulle,
 - l'amplitude sera toujours maximale (en rouge)
- Tracer les lignes de repos.

2 Interférences et lumière

A Expérience

Expérience réalisée par Young vers 1800

Utilisation moderne avec un laser : une seule lg d'onde (fq.),...

2 fentes parallèles très rapprochées et très étroites Si le laser éclaire ces fentes, elles deviennent quasiment 2 src. ponctuelles. Sur un écran, nous pouvons observer le résultat.

DESSIN laser fentes écran

Sur l'écran, nous observons, alignées à l'horizontale, des taches de lumière alternant avec des taches sombres.

B Interprétation

Selon l'optique telle qu'étudiée jusqu'à présent, la lumière se propage en ligne droite. Nous devrions donc observer 2 taches alignées sur le laser et les fentes.

En fait, ce modèle de l'optique est celui de l'optique corpusculaire. L'expérience ne peut s'expliquer que par le modèle ondulatoire de la lumière.

Les fentes sont suffisamment étroites pour qu'il y ait diffraction. Elles deviennent donc source d'ondes circulaires.

Les taches sombres sont le lieu o les lignes de repos rencontrent l'écran.

De la lumière + de la lumière donne de l'obscurité!

C Conclusion

L'expérience des fentes de Young est la preuve de la nature ondulatoire de la lumière.

Des lumières de couleurs différentes donneraient des figures d'interférences différemment espacées.

Chapitre 58

Les ondes électromagnétiques

Sommaire

1	Caractéristiques des ondes électromagnétiques	406
2	Le spectre électromagnétique	406
A	Les ondes HERTZIENNES	406
B	LES MICRO- ONDES	407
C	RAYONNEMENT INFRAROUGE	407
D	LA LUMIERE VISIBLE	408
E	LE RAYONNEMENT ULTRAVIOLET	408
F	LE RAYONNEMENT X	408
G	LE RAYONNEMENT GAMMA	408

Introduction

Nous avons étudié, jusqu'à présent, les ondes en mécanique et en particulier les ondes sonores. La vitesse v et la longueur d'onde λ en étaient des caractéristiques déterminantes.

Nous savons qu'elles peuvent se réfléchir, se diffracter et que leur fréquence peut changer du fait du mouvement relatif de la source et de l'observateur..

1 Caractéristiques des ondes électromagnétiques

L'existence d'ondes électromagnétiques fut prévues par le physicien écossais Maxwell vers 1865. Il prédit aussi leur vitesse dans l'air et dans le vide : $3.10^8 m/s$.

C'est un physicien allemand, Hertz qui réussit à les produire vers 1887. Elles peuvent être produites par des courants de haute tension. Hertz vérifia leurs propriétés parmi lesquelles leur réflexion et leur diffraction.

2 Le spectre électromagnétique

La vitesses des ondes électromagnétiques étant connue, celles-ci peuvent se caractériser par leur longueur d'onde λ (ou par leur fréquence ce qui est équivalent).

L'ensemble des valeurs possibles de λ est appelé le **spectre électromagnétique**.

Le spectre électromagnétique peut être divisé en différentes parties suivant :

- Le mode de production de l'onde
- Le mode de détection de l'onde
- Le domaine privilégié d'applications

Nous allons parcourir ces différentes zones en donnant la plage de longueur d'onde λ les caractérisant.

A Les ondes HERTZIENNES

:

a) Les ondes radio

(i) Longueur d'onde

- les grandes ondes $600m < \lambda < 300m$
- les ondes moyennes $50m < \lambda < 600m$
- les ondes courtes $10m < \lambda < 50m$

(ii) Transmission Le signal acoustique doit être transformé en signal électrique . Un signal haute fréquence , appelé signal porteur est modulé par le signal à envoyer . Cette modulation sert à modifier l'amplitude ou la fréquence . En amplitude moyenne (AM) , c'est l'amplitude du signal porteur qui varie . En modulation de fréquence (FM) , c'est la fréquence du signal qui varie . Le signal électrique est alors transformé en onde électromagnétique grâce à l'antenne .

(iii) propagation en fonction de la longueur d'onde La propagation des ondes électromagnétiques dépend de leur longueur d'onde.

- Les grandes ondes suivent la courbure de la terre et sont reçues loin .

- Les ondes courtes se propagent en ligne droites et ne suivent pas la courbure de la terre. Elles sont limitées et pour entendre une même station émettrice , il faut des antennes qui vont amplifier et réémettre le signal de départ à différentes fréquences .

b) les ondes de télévision

(i) Longueur d'onde

- des ondes très courtes VHF $10m < \lambda < 1m$
- des ondes ultra courtes UHF $\lambda < 1m$

La fréquence des ondes utilisées est plus élevée en télévision (images) , qu'en radio (son). Ceci est lié à la quantité d'information à transmettre : 25 images/sec càd. $10^7 \text{ informations/sec}$

c) les ondes radar

- des ondes très courtes (pour éviter la diffraction)
- qui se propagent en ligne droite - qui se réfléchissent sur des objets

d) Le téléphone mobile

(i) Fréquence $900MHz < \nu < 1800MHz$

e) Les télécommunications par satellites

- les satellites reçoivent et réémettent les ondes hertziennes après amplification .

Le principe : une antenne émettrice placée au foyer d'un réflecteur parabolique . Un faisceau presque parallèle se crée et toute l'énergie part dans une seule direction vers un satellite . Mais il faut que la longueur d'onde soit beaucoup plus petite que le diamètre du réflecteur pour avoir beaucoup d'ondes réfléchies . Si le réflecteur est trop petit , il y aurait trop de diffractions et les ondes ne seraient plus réfléchies .

B LES MICRO- ONDES

(i) Fréquence $300MHz < \nu < 300GHz$

Dans le four à micro-ondes la fréquence est de 2,45 GHz. Ces ondes provoquent la vibration et la rotation des molécules d'eau . Et les aliments contiennent beaucoup d'eau . Ces molécules d'eau vibrent et tournent et donc la température s'élève .

C RAYONNEMENT INFRAROUGE

Propriétés : - lumière invisible qui transporte de l'énergie thermique . permet de faire des photos dans l'obscurité permet l'observation géologique des sols permet de détecter des pertitions calorifiques dans les habitations

Les infrarouges peuvent être modulés pour les transport d'infos , dans les télécommandes de TV , les ouvertures automatiques de portes , ?

Applications :

La lumière du soleil chauffe le sol et est absorbée en partie ce qui est égal à l'échauffement . Le sol chaud devient émetteur du rayonnement infrarouge . Mais la nuit , cette émission d' IR fera perdre au sol sa chaleur . Tandis que le verre des vitres dans les serres de jardins absorbent les IR . Il les réémet dans toutes les directions . Et qui dit toutes les directions , dit aussi vers le sol de la serre qui sera maintenu chaud . C'est l'effet de serre .

D LA LUMIERE VISIBLE

Les ondes magnétiques que nous pouvons voir sont des longueurs d'ondes très étroites .

E LE RAYONNEMENT ULTRAVIOLET

:

Propriétés : - il impressionne une plaque photo plus fort que les autres rayonnements - il transforme la provitamine D en vitamine D et active les synthèses chimiques au niveau de la peau - il a une activité bactéricide . - il exerce une action physiologique sur l'épiderme : brûlure de peau , et cancer de la peau .

F LE RAYONNEMENT X

Ils peuvent traverser des substances qui absorbent toute lumière visible . Ils sont utilisés en radioscopie , radiographie , dans l'industrie métallurgique , dans les expertises de peintures anciennes .

G LE RAYONNEMENT GAMMA

Ce sont des ondes électromagnétiques très courtes . Elles sont énergiques et ont un pouvoir de pénétration dans la matière assez important . Leurs effets biologiques peuvent être néfastes .

Douzième partie
Physique atomique

Chapitre 59

La radioactivité

Sommaire

1	Découverte de la radioactivité	412
	A Historique	412
2	Structure des atomes	412
	A Rappel : le modèle de Rutherford	412
	B Rappel : le modèle de Bohr	412
	C Chimie	413
3	Stabilité du noyau	413
	A Force de répulsion entre protons	413
	B Masse des nucléons	413
	C Masse manquante	413
	D Liaison entre nucléons	414
	E Définition de la radioactivité	415
	F Loi de la décroissance radioactive	415
	G La demi-vie	415
	H L'activité	416
4	La fission	417
	A Équation nucléaire	417
	B Réactions en chaîne	417
5	La fusion	417

1 Découverte de la radioactivité

A Historique

Becquerel (1896) : photographe et géologue amateur Met du pelbenche à proximité de plaques photos : plaque voilée

a) Radiations

Conclusion : le minerai émet des “radiations”.

b) Le plomb

Le plomb arrête les radiations. D’où l’idée d’enfermer l’uranium dans une boîte en plomb : Première source radioactive.

c) Expériences : Effet du champ magnétique

La source radioactive est enfermée dans une chambre où on fait le vide.

Entre la source et la plaque photo, on place un aimant de sorte que le champs magnétique croise le trajet du faisceau.

SCHEMA

conclusion : 3 rayonnements α, β, γ

2 Structure des atomes

A Rappel : le modèle de Rutherford

Atome constitué de

— noyau t.q.

1. au centre de l’atome
2. constiuté de p^+ et n^0
3. n_{p^+} fixe identité de l’atome
4. $m_{p^+} \simeq m_{n^0}$
5. $m_{atome} \simeq m_{noyau}$
6. $\varnothing_{atome} \simeq 10^4 \cdot \varnothing_{noyau}$

— electrons t.q.

1. en orbite autour du noyau (cfr. système planétaire)
2. $|q_{e^-}| = q_{p^+}$
3. $n_{e^-} = n_{p^+}$: atome électriquement neutre
4. $m_{e^-} \simeq \frac{1}{1836} m_{p^+}$

B Rappel : le modèle de Bohr

Répartiton des e^-

- Rutherford : e^- en orbite autour du noyau (cfr. système planétaire)
- Bohr : e^- orbite autour du noyau sur orbitales bien précises

C Chimie

La chimie étudie les transformations des structures électroniques sans transformations des noyaux.

3 Stabilité du noyau

Comme il y a émission de noyau dans l'expérience, il est clair que la stabilité du noyau doit être discutée.

A Force de répulsion entre protons

La force entre les deux protons dans un noyau d'Hélium est énorme :

$$F = 9 \cdot 10^9 \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(10^{-14})^2} = 2,8 N$$

Pourtant un noyau d'hélium est très stable!

De même, comment le noyau d'uranium garde-t-il sa cohérence alors qu'il compte nonante deux (92) protons ?

B Masse des nucléons

- masse du proton = 1,007276470 uma.
- masse du neutron = 1,008665012 uma.

a) Rappel : u.m.a.

$$1 \text{ u.m.a.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{Et donc } N_{Av} \cdot 1 \text{ u.m.a.} = 1 \text{ g}$$

$$\text{càd. } (6,022045 \cdot 10^{23}) \cdot (1,6605655 \cdot 10^{-27}) = 10^{-3} \text{ kg} = 1 \text{ g}$$

C Masse manquante

Étudions le noyau d'hélium d'un peu plus près : Et donc la masse de $2p^+ + 2n^0 = 4,031882964$ uma.

Or la masse mesurée est de 4,0015059 uma.

Ceci est en contradiction apparente avec la loi de Lavoisier :

La réaction $2n^0 + 2p^+ \rightarrow 2He$ provoque une disparition de masse.

a) Einstein à la rescousse

La fameuse formule d'Einstein

$$E = mc^2 \tag{59.1}$$

permet d'expliquer cette disparition de masse : La masse peut être convertie en énergie.

C'est ce qui se passe ici : une petite partie de la masse des nucléons est convertie en énergie potentielle de liaison.

S'il existe une énergie potentielle de liaison, cela signifie qu'il existe aussi une *force de liaison* entre les nucléons.

Cette force est appelée la force forte et c'est une des quatre forces fondamentales de la physique.

La relation 59.1 permet de calculer la valeur de cette énergie de liaison (E) correspondant à la différence de masse (Δm).

Après calcul, une valeur typique d'énergie de liaison par nucléon est 2 million de fois supérieure à celle d'une liaison chimique covalente.

Ceci explique les énormes énergies mises en jeu dans les phénomènes radioactifs : Les transformations nucléaires libérant une particule produisent aussi une énergie (thermique) du même ordre de grandeur que celle de l'énergie de liaison.

D Liaison entre nucléons

La présence de neutron doit donc jouer pour contrecarrer la répulsion entre protons vue en section A page 413. Cette répulsion devient encore plus grande si le nombre de protons augmente.

La proportion de neutrons et de protons dans un noyau est un facteur de stabilité de celui-ci.

a) Les isotopes

C'est le nombre de protons qui donne l'identité chimique d'un élément. Le nombre de neutrons peut être variable.

Des *isotopes* sont des éléments qui ont le même nombre de protons mais des nombres différents de neutrons.

(i) Exemple : Le carbone courant est le carbone 12 : 6 p^+ et 6 n^0 . Mais tout le monde connaît le carbone 14 : 6 p^+ et 8 n^0 .

Reprécisons quelques notations :

b) Isotopes : Z, A

L'isotope d'un élément X va désormais s'écrire de la manière suivante :

$${}^A_Z X \quad (59.2)$$

où :

- X est le symbole chimique de l'élément tel qu'utilisé dans le tableau périodique ;
- Z est le numéro atomique (= le nombre de p^+ = la "place" dans le tableau périodique) ;
- A est le nombre de masse (= le nombre de nucléons = le nombre de p^+ + le nombre de n^0).

c) Le tableau des isotopes

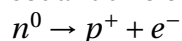
Le tableau des isotopes fournit la liste des éléments et de leurs isotopes (éventuels). La stabilité des éléments y est également renseignée.

L'observation du tableau nous permet de tirer quelques conclusions concernant les isotopes stables :

- Si $Z \leq 20$, alors Le nombre de n^0 est égal au nombre de p^+ .
- Si $Z \geq 20$, alors Le nombre de n^0 est supérieur au nombre de p^+ .

Ces isotopes seront caractérisés par des émissions de rayonnements de natures différentes selon qu'ils appartiennent à la région I ou II :

Isotopes avec un excès de n^0 (région II) : Ils émettent une particule β^- (c'est-à-dire un e^-) possédant une énergie énorme (et donc une très grande vitesse).



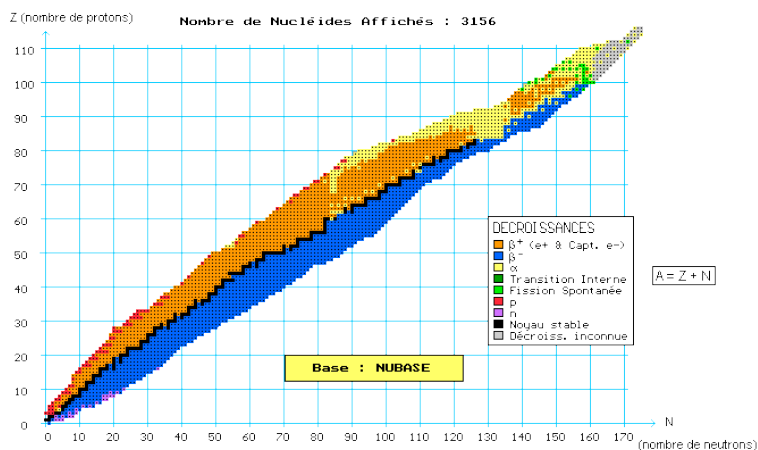
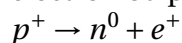
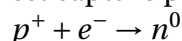


FIGURE 59.1 – Le tableau des isotopes (N(Z))

Isotopes avec un excès de p^+ (région I) : Ils émettent une particule β^+ (c'est-à-dire un e^+ , un anti-électron ou positon : de l'anti-matière).



Une autre réaction possible est une émission γ suite à une capture électronique : un électron est capturé par le noyau.



Notons deux autres types de radioactivités caractéristiques de *noyaux lourds* (en général $Z > 60$)

Émission α : noyau ${}^4_2\text{He}$ à grande vitesse,

Fission spontanée : c'est un phénomène de rupture, d'éclatement du noyau en deux fragments de masses plus ou moins égales, accompagné de l'émission de particules et de rayonnements γ .

E Définition de la radioactivité

La radioactivité est la propriété des atomes instables qui se transforment en un autre élément suite à une transformation de leur noyau. Cette transformation s'accompagne d'émission de rayonnements de nature corpusculaire (particule) et/ou électromagnétique.

a) mise en évidence

La radioactivité est mise en évidence par les effets des radiations produites.

F Loi de la décroissance radioactive

Tout corps voit sa radioactivité décroître au cours du temps.

G La demi-vie

En faisant des mesures précises, on peut observer que la quantité de radiations diminue de moitié après un temps $T_{1/2}$. Si on attend de nouveau un temps $T_{1/2}$, la radioactivité aura à nouveau diminué de moitié, elle ne vaudra plus que le $\frac{1}{4}$ de la valeur de départ.

Ce temps $T_{1/2}$ est appelé la demi-vie.

H L'activité

La quantité de radiations est appelée l'*activité* et nous la symboliserons par la lettre A . Son évolution au cours du temps peut se représenter comme suit :

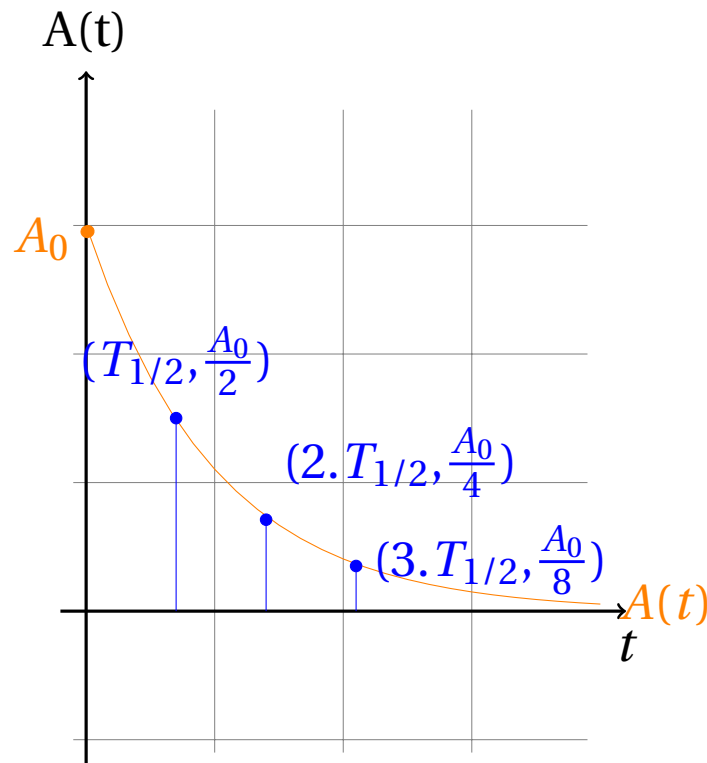


FIGURE 59.2 – L'activité en fonction du temps

Il est clair qu'il s'agit du graphique d'une fonction exponentielle décroissante. L'expression analytique de cette fonction est :

$$f(x) = a \cdot e^{-a \cdot x} \quad (59.3)$$

Nous pouvons donc écrire :

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (59.4)$$

L'activité est le nombre de désintégrations par seconde. Elle correspond à la variation du nombre d'atomes radioactifs (ΔN) par unité de temps (Δt). En passant à la limite pour $\Delta t \rightarrow 0$, nous obtenons :

$$act. = \lim_{\Delta N \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta N}{\Delta t} \right) = - \frac{dN}{dt} \quad (59.5)$$

Par dérivation, nous obtenons facilement :

$$act. = \lambda \cdot N \quad (59.6)$$

Si nous dérivons, nous pouvons montrer que :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (59.7)$$

4 La fission

A Équation nucléaire

B Réactions en chaîne

5 La fusion

Treizième partie

Annexes

Annexe A

Listes diverses

Liste des tableaux

1.1	Unites SI	6
1.2	Multiples	7
2.1	Erreurs absolues et relatives	12
3.1	Repos et mouvement selon l'observateur.	20
4.1	Vitesses de différents mobiles.	34
7.1	Relations accélérations – vitesses.	54
7.2	Ordre de grandeurs d'accélérations.	54
8.1	Signes de v et de a	62
12.1	Les équations horaires du tir horizontal.	105
17.1	Forces, longueurs et leviers	156
44.1	Puissance et intensité de courant dans différentes lampes.	338

Table des figures

3.1	Un saut.	18
3.2	Seuls les mouvements de quelques points sont analysés.	19
3.3	Les différentes positions de quelques points.	19
3.4	Un axe à une dimension : l'emplacement du point "P" est donné par le réel "r".	21

3.5	Un système cartésien à deux dimensions : l'emplacement du point "P" est donné par les réels " P_x " et " P_y ".	22
3.6	Un système cartésien à trois dimensions : l'emplacement du point "P" est donné par les réels " P_x ", " P_y " et " P_z ".	22
3.7	Un système polaire à deux dimensions : l'emplacement du point "P" est donné par les réels " r " et " θ ".	23
3.8	Coordonnées sphériques	23
3.9	Coordonnées sphériques	24
3.10	Vecteurs unités dans système de référence en coordonnées polaires.	26
3.11	Vecteurs unités ramenés à l'origine dans système de référence en coordonnées polaires.	26
3.12	Vecteurs unités au point P dans système de référence en coordonnées polaires.	27
3.13	Le mouvement d'une coccinelle sur un ressort.	28
4.1	Vecteur position	30
4.2	Deux vecteurs position	31
4.3	Vecteur déplacement	32
4.4	Vecteur vitesse moyenne	33
4.5	De la vitesse moyenne à la vitesse instantanée.	36
5.1	Sens et signes des vecteurs déplacements et vitesses : $r_1 \& r_2 \geq 0, r_2 > r_1 \Rightarrow v > 0$	41
5.2	Sens et signes des vecteurs déplacements et vitesses : $r_1 \& r_2 \leq 0, r_2 > r_1 \Rightarrow v > 0$	41
5.3	Sens et signes des vecteurs déplacements et vitesses : $r_1 \& r_2 \geq 0, r_2 < r_1 \Rightarrow v < 0$	42
5.4	Sens et signes des vecteurs déplacements et vitesses : $r_1 \& r_2 \leq 0, r_2 < r_1 \Rightarrow v < 0$	42
5.5	Un objet important en mouvement.	42
5.6	L'évolution de la position au cours du temps.	43
6.1	Graphique de la position en fonction du temps en MRU.	46
6.2	Graphique de la vitesse en fonction du temps en MRU.	47
7.1	"Tu tires ou tu pointes ?"	52
7.2	Le vecteur vitesse à la pétanque.	52
7.3	La voiture accélère. La différence de vitesse est constante.	53
7.4	Dans ce mouvement circulaire, la différence de vitesse est dirigée vers le centre.	53
8.1	Variation de la vitesse avec un mouvement dans le sens de l'axe.	60
8.2	Variation de la vitesse avec un mouvement dans le sens opposé de celui de l'axe.	60
8.3	Variation de la vitesse avec un mouvement dans le sens de l'axe.	61
8.4	Variation de la vitesse avec un mouvement dans le sens opposé de celui de l'axe.	61
8.5	Le graphe de $v(t)$ en MRUA.	65
9.1	Expérience de la plume et du marteau sur la Lune (Apollo XV - Juillet 1971).	68
9.2	Chute de bille sur la Terre (Novembre 2015).	69
9.3	Analyse de la chute de bille sur la Terre (Novembre 2015).	69
10.1	L'objet M est en rotation autour de C à une distance R de C.	76
10.2	L'objet M parcourt un arc de cercle Δs	77
10.3	Les vecteurs vitesses sont de même grandeur et perpendiculaires aux rayons.	79
10.4	Les vecteurs vitesses à deux instants t_1 et t_2	80
10.5	Soustraire un vecteur : somme d'un vecteur et de l'opposé de l'autre.	80
10.6	Les vecteurs vitesses comme vecteurs libres.	81
10.7	Les vecteurs accélérations.	81

10.8 La position de P en coordonnées polaires : $P(\theta, R)$	82
10.9 La position de P en coordonnées cartésiennes : $P(r_x, r_y)$	83
10.10 Le vecteur vitesse en coordonnées cartésiennes.	84
11.1 La position de P en coordonnées cartésiennes : $P(r_x, r_y)$	90
11.2 Le vecteur vitesse en coordonnées cartésiennes.	91
11.3 L'accélération linéaire en MCUA.	94
12.1 Deux pièces, une latte, un axe sur une table.	96
12.2 Les deux pièces vont tomber.	97
12.3 Chute dans le train : point de vue du passager.	97
12.4 Chute dans le train : point de vue de la vache.	98
12.5 Bombardement.	98
12.6 Le lancer d'une balle selon Aristote.	99
12.7 Tir de canon selon Aristote.	99
12.8 Mesure d'angle de tir.	100
12.9 Le lancer du boulet de canon au Moyen Âge : deuxième version.	100
12.10 Le lancer du boulet de canon au Moyen Âge : troisième version.	100
12.11 Le lancer du boulet de canon au Moyen Âge : quatrième version.	101
12.12 Le lancer du boulet de canon selon Léonard de Vinci (1493).	101
12.13 Le lancer du boulet de canon selon Galilée.	101
12.14 Chronophotographie de deux billes.	102
12.15 Graphique de la chronophotographie.	103
12.16 La trajectoire est parabolique.	106
12.17 La portée du tir horizontal.	107
12.18 L'angle de la vitesse avec l'horizontale dans le tir horizontal.	108
12.19 Les accélérations normales et tangentielles.	109
12.20 Les accélérations normales et tangentielles peu après le départ.	110
13.1 Le tir oblique.	112
13.2 Les composantes de la vitesse initiale.	113
13.3 La trajectoire du tir oblique est une parabole.	115
13.4 La hauteur "h" est la hauteur maximale dans le tir oblique.	116
13.5 La portée dans le tir oblique.	117
13.6 La portée maximale dans le tir oblique.	118
13.7 La cible dans le tir oblique.	119
13.8 La position de la cible, cas général dans le tir oblique.	120
13.9 La parabole de sûreté enveloppe les trajectoires possibles.	122
13.10 La parabole de sûreté de Léonard de Vinci.	123
13.11 La cible est dans la plaine, le canon en hauteur.	124
13.12 La cible est en hauteur.	125
14.1 Mouvement hélicoïdal simple.	131
14.2 Une tornade.	132
14.3 Une spirale à la surface d'une sphère.	132
14.4 Une maquette pour expliquer les éclipses.	133
15.1 La loi des ressorts : $F_0 = 0$ et $F_1/\delta l_1 = F_2/\delta l_2$	139
15.2 La méthode du parallélogramme de forces.	142
15.3 La méthode du polygone de forces.	143
16.1 La méthode du parallélogramme de forces.	147

16.2	Le triangle des forces.	147
16.3	Le plan incliné et les forces en présence	149
16.4	Triangle de forces et plan incliné.	149
16.5	Le plan incliné et les forces en présence.	150
17.1	Timbre de 1948 consacré à Simon Stevin à l'occasion des 400 ans de sa naissance.	154
17.2	Un char à voile.	154
17.3	Un premier équilibre selon Simon Stevin.	155
17.4	Les forces et les distances dans la latte en équilibre.	156
17.5	Trois forces sur un levier selon Simon Stevin.	160
17.6	Lever avec cinq forces : deux à gauche et trois à droite du point d'appui.	160
17.7	Un poutre avec deux points d'appui selon Simon Stevin.	162
17.8	Les forces sur la poutre avec deux points d'appui.	162
17.9	Point d'appui de gauche.	163
17.10	Point d'appui de droite.	163
17.11	Un poutre avec deux points d'appui = un levier selon Simon Stevin.	164
17.12	Le treuil.	165
17.13	Le pédalier de vélo.	165
17.14	Bras de levier avec angle droit.	167
17.15	Bras de levier avec angle plat.	167
17.16	Bras de levier avec angle faible.	168
17.17	Bras de levier avec angle important.	168
18.1	Wagon en MRU.	173
18.2	Wagon soumis à une accélération.	174
19.1	La cire qui brille sans glisser!	180
21.1	Pneus lisses dans un virage.	189
21.2	les balançoires du carrousel.	189
21.3	Vélos de vitesse pure.	190
21.4	Satellite.	190
21.5	Force de Coriolis.	191
22.1	Rappel : les forces et les distances dans la latte en équilibre	196
22.2	Rappel : les forces et les distances dans la latte en équilibre	197
23.1	Travail à une dimension : force et déplacement entre A et B	203
23.2	Lancer d'une masse m à la verticale avec une vitesse v_0 depuis le sol.	205
23.3	Deux trajectoires aux montagnes russes : la gravité est une force conservative.	207
23.4	Énergie potentielle et travail	209
23.5	Lancer d'une masse depuis le sol : bilan en énergie.	210
28.1	La Terre est un cylindre chez Anaximandre.	228
28.2	Les phases de la Lune selon Anaxagore.	229
28.3	Les épicycles selon Hipparque.	230
28.4	Le Soleil selon Hipparque.	230
28.5	Les épicycles selon Ptolemée.	231
28.6	Une ellipse : les distances depuis ses foyers jusqu'à un point de sa périphérie.	232
28.7	Une planète balaie des aires égales en des temps égaux.	233
29.1	Trajectoires avec et sans gravité lors d'un lancer depuis le sol.	237
29.2	Trajectoires d'un objet lancé d'une grande hauteur selon Newton.	237

29.3	Une orbite elliptique : le soleil occupe un des foyers (F_1 ou F_2) et pas le centre O .	239
30.1	Schéma de l'œil.	248
30.2	Un cône.	249
30.3	Absorption des couleurs selon le type de récepteur. (échelle de longueur d'onde en nm)	250
30.4	Les deux carrés "A" et "B" sont identiques mais non perçus comme tels.	252
32.1	Du rouge au pourpre.	256
32.2	Le disque de Newton.	256
32.3	Une échelle de couleurs : la longueur d'onde est indiquée en nm sous la couleur correspondante.	257
32.4	Une échelle de couleurs : la fréquence approximative est indiquée en THz sous la couleur correspondante.	257
32.5	Trois couleurs de base : rouge, vert et bleu.	258
32.6	Mélange des couleurs de base dans le modèle RGB.	259
32.7	Triangle comme palette dans le modèle RGB.	259
32.8	Trois couleurs de base de KYMC : Jaune, magenta et cyan.	260
33.1	Images réelle et virtuelle par rapport à un système optique.	262
34.1	Réflexion spéculaire et réflexion diffuse.	266
34.2	loi de la réflexion sur un miroir plan.	267
34.3	L'objet A' est une image virtuelle de l'objet réel A .	268
34.4	Les catadioptrés de la mission Apollo 15.	270
34.5	Aberration dans un miroir sphérique : il n'y a pas de foyer.	271
34.6	Le miroir parabolique a un foyer.	271
34.7	Image réelle inversée avec un miroir peu profond. L'image $A'B'$ est réelle, inversée et plus petite que l'objet AB	272
34.8	Image virtuelle droite avec un miroir peu profond. L'image est droite et plus grande que l'objet.	274
35.1	Réfractions.	278
35.2	Loi de Snell-Descartes.	279
35.3	La réflexion totale.	280
35.4	Réflexion totale dans une fibre optique.	280
35.5	Mirages et déviation du faisceau de lumière dans un milieu stratifié.	281
36.1	Double réfraction dans un prisme.	284
36.2	Déviation δ par un prisme.	285
37.1	Lentille convergente.	293
37.2	Lentille divergente.	293
37.3	Rayons principaux dans les lentilles minces.	294
37.4	Formation d'image dans une lentille convexe.	295
37.5	Rayons principaux dans les lentilles minces.	295
37.6	Triangles semblables et loi des lentilles.	296
38.1	Construction d'image pour la combinaison de deux lentilles convergentes.	302
39.1	Fonctionnement de l'œil.	306
39.2	La vision lointaine.	306
39.3	La vision rapprochée.	307

39.4 Image floue - nette.	307
39.5 L'œil myope.	308
39.6 L'œil hypermétrope.	308
40.1 Fonctionnement de l'œil.	314
40.2 La lunette astronomique.	315
40.3 Le microscope.	316
40.4 Symboles utilisés dans les schémas électriques.	319
42.1 Un dipôle.	324
42.2 Un transistor a trois bornes.	324
42.3 Quelques éléments "standards" d'un circuit électrique.	325
42.4 Plan du circuit électrique d'une maison.	326
42.5 Montage en série.	327
42.6 Montage en parallèle.	328
42.7 Un générateur (type batterie).	329
42.8 Circuit avec un générateur et un récepteur.	329
42.9 Mesure avec l'ampèremètre.	330
42.10 Intensités de courants dans un circuit en série.	331
42.11 Intensités de courants dans un circuit en parallèle.	331
44.1 Mesure de I dans deux lampes.	338
44.2 Mesure de U entre les deux bornes d'un dipôle.	340
45.1 L'ajout de batteries augmente la puissance dissipée par la lampe.	342
45.2 L'ajout de batteries en parallèle augmente la puissance dissipée par la lampe.	343
46.1 Symbole de la résistance R	346
46.2 Mesure simultanée de U et de I dans le récepteur R	346
46.3 Le triangle magique de la loi d'Ohm	347
46.4 Mesure des U et des I dans un montage en série	349
46.5 Mesure des U et des I dans un montage en parallèle	350
48.1 Un aimant droit	359
48.2 Attraction entre aimant et boussoles	359
48.3 La limaille de fer s'aligne selon le champ magnétique d'un aimant	360
48.4 Le champ magnétique d'un aimant droit	361
48.5 Le champ magnétique terrestre	362
48.6 Une vue du crâne en IRM	363
48.7 Une aurore boréale	363
48.8 La magnétosphère protège la Terre	364
48.9 Une aurore polaire sur Jupiter	364
49.1 Le champ magnétisme créé par un courant dans un fil droit	367
49.2 La règle du pouce droit pour un courant dans un conducteur droit	367
49.3 Une spire	368
49.4 Le champ magnétique dû au courant dans une spire	368
49.5 Un solénoïde	369
49.6 Le champ magnétique dû au courant dans un solénoïde	369
49.7 Un électroaimant industriel	370
50.1 Un gérérateur de courant continu	372

52.1	L'onde sinusoïdale	380
59.1	Le tableau des isotopes (N(Z))	415
59.2	L'activité en fonction du temps	416

Table des théorèmes, définitions et autres

1	Remarque	4
1	Définition (mètre)	5
2	Définition (kilogramme)	5
3	Définition (seconde)	5
4	Définition (ampère)	5
5	Définition (kelvin)	5
6	Définition (mole)	6
7	Définition (candela)	6
8	Définition (Litre)	7
9	Définition (instant)	19
10	Définition (durée)	20
11	Définition (position)	20
12	Définition (trajectoire)	20
1	Propriété (Décomposition en vecteurs unités)	25
13	Définition (vecteur position)	30
1	Schéma	31
2	Schéma	31
14	Définition (vecteur déplacement)	32
2	Remarque (positions de départ et d'arrivée)	32
15	Définition (vecteur vitesse moyenne)	33
2	Propriété (Du km h^{-1} au m s^{-1})	34
3	Remarque (vitesses moyennes plus ou moins constantes)	35
16	Définition (vecteur vitesse instantanée)	36
17	Définition (mouvement rectiligne)	40
18	Définition (déplacement rectiligne)	41
19	Définition (vitesse rectiligne)	41
3	Propriété (Signe et sens de la vitesse)	42
20	Définition (MRU)	46
21	Définition (Vecteur variation de vitesse)	53
22	Définition (vecteur accélération)	54
23	Définition (vecteur accélération instantanée)	55
4	Remarque	57
24	Définition (MRUA)	60

25	Définition (chute libre)	69
5	Remarque (Choix d'axe en chute libre)	70
26	Définition (Accélération de pesanteur)	70
6	Remarque	77
27	Définition (norme de la vitesse linéaire en MCU)	77
28	Définition (Vitesse angulaire)	79
29	Définition (accélération en MCU)	84
30	Définition (Accélération angulaire en MCUA)	88
31	Définition (Vitesse angulaire en MCUA)	88
32	Définition (Angle instantané en MCUA (cas particulier))	88
33	Définition (Angle en fonction du temps en MCUA (cas général))	89
34	Définition (accélération en MCUA)	93
7	Remarque	93
1	Conclusion	97
4	Propriété	102
2	Conclusion (Équation de la trajectoire du tir horizontal)	105
35	Définition (Portée du tir horizontal)	106
36	Définition (Hauteur maximale h du tir oblique)	115
37	Définition (Portée du tir oblique)	117
38	Définition (Portée maximale du tir oblique)	117
39	Définition (Parabole de sûreté)	121
40	Définition (Force)	138
1	Loi (de Hooke)	138
2	Loi (Loi d'équilibre statique des forces)	146
3	Loi (Loi des leviers)	157
41	Définition (Moment de force : valeur (absolue))	159
8	Remarque (sur l'usage des moments de force)	159
4	Loi (Loi des leviers en terme de moments de force)	159
5	Loi (Signe des moments de force)	161
6	Loi (Équilibre de rotation : $\sum \vec{O} = \vec{O}$)	161
7	Loi (Équilibre de rotation : $\sum \vec{O} - \vec{O} = 0$)	161
42	Définition (Moment de force)	161
9	Remarque	163
43	Définition	166
10	Remarque	166
1	Principe (Principe d'inertie)	172
2	Principe (Principe fondamental de la dynamique)	177
3	Principe (Principe d'action réciproque)	177
8	Loi (Force de frottement statique)	181
9	Loi (Force de frottement dynamique)	181
10	Loi (Frottements fluide-solide)	182
44	Définition	196
45	Définition	196

46	Définition (Travail d'une force et d'un déplacement parallèles)	197
47	Définition (Le joule)	197
48	Définition (Travail d'une force non parallèle au déplacement)	198
49	Définition (Travail comme produit scalaire)	198
50	Définition (Travail moteur et travail résistant)	198
51	Définition (Travail moteur ou résistant en terme de cosinus)	198
52	Définition (Travail d'une force le long d'un chemin à une dimension)	203
53	Définition (Énergie cinétique)	204
1	Théorème (Théorème de l'énergie cinétique)	204
54	Définition (Travail d'une force le long d'un chemin à trois dimensions)	206
55	Définition (Force conservative)	207
2	Théorème (Énergie potentielle et travail)	208
56	Définition (Puissance)	212
57	Définition (Cheval vapeur français)	213
58	Définition (Cheval vapeur impérial (hp))	213
59	Définition (Cheval vapeur de chaudière)	213
60	Définition (Quantité de mouvement (ou impulsion))	216
5	Propriété	216
6	Propriété (Conservation de la quantité de mouvement 1)	217
61	Définition (Systèmes de particules)	217
11	Loi (Conservation de l'impulsion et forces internes)	218
12	Loi (Choc et conservation de la quantité de mouvement)	219
11	Remarque	251
13	Loi (Loi des miroirs plans)	267
1	Méthode (Construction d'images et miroirs courbes)	273
62	Définition (Indice de réfraction)	278
14	Loi (Snell-Descartes)	279
7	Propriété (Angle limite)	280
63	Définition (Pouvoir réflecteur)	281
8	Propriété (Déviation minimale par un prisme)	287
4	Principe (Les rayons principaux)	294
15	Loi (Loi des lentilles)	295
64	Définition (Grandissement)	296
65	Définition (Grossissement)	296
66	Définition (Puissance d'une lentille)	297
16	Loi (loi des lentilles minces)	297
17	Loi (Position de l'image finale avec deux lentilles)	303
67	Définition (Montage en série)	327
68	Définition (Montage en parallèle)	328
69	Définition (Intensité du courant électrique)	329
12	Remarque	330
18	Loi (Intensités de courant dans un montage en série)	331
19	Loi (Intensités de courant dans un montage en parallèle)	332

70	Définition (Tension électrique)	339
13	Remarque	339
71	Définition (Résistance électrique)	347
20	Loi (de Pouillet)	349
72	Définition (Force électromotrice)	354
73	Définition (Tension aux bornes)	354
1	Exercice	396
2	Exercice	396
3	Exercice	396
4	Exercice	400
5	Exercice	400
6	Exercice	400

Annexe B

Bibliographie

Annexe C

Index

Annexe D

Table des matières

Table des matières

I	Métrologie	1
1	Les unités de mesures	3
1	Le système international d'unités	4
A	Le système SI	4
a)	Majuscule ou minuscule	4
b)	les unités de base	4
(i)	mksA	5
(i).1	Le mètre	5
(i).2	Le kilogramme	5
(i).3	La seconde	5
(i).4	L' ampère	5
(ii)	Les autres unités de base du système international	5
(ii).1	Le kelvin	5
(ii).2	la mole	6
(ii).3	La candela	6
(iii)	Résumé	6
c)	Multiples et sous-multiples	6
B	Les volumes	7
2	Les unités dérivées	7
A	Les unités dérivées comme produit de puissances des unités de base	7
a)	Notations	8
b)	Exemple : le joule	8
B	Analyse dimensionnelle	8
3	Exercices	8
2	Les erreurs de mesures	9
1	Imprécisions sur les mesures	10
A	Précision des mesures	10
B	Erreur aléatoire	10

	C	Erreur systématique	10
2		Types d'erreurs	11
	A	Erreur absolue	11
	B	Erreur relative	11
3		Calcul d'erreur	11
	A	Types de grandeurs	11
	B	Exemple : erreur sur une surface	12
	C	Règles de calcul d'erreur	12
4		La notation scientifique et les chiffres significatifs	12
	A	Les chiffres significatifs	12
	B	La notation scientifique	13
5		Exercices	13
II Cinématique			15
3 Positions, trajectoires et systèmes de référence			17
1		Le mobile ponctuel	18
2		Le temps	19
	A	Date et instant	19
	B	Durée	20
3		Positions, trajectoires	20
	A	Repos et mouvement	20
	B	Positions	20
	C	Trajectoires	20
4		Les systèmes de référence	21
	A	Cartésiens	21
	a)	À une dimension	21
	b)	À deux dimensions	22
	c)	À trois dimensions	22
	B	Polaires, cylindriques et sphériques	23
	a)	Polaires	23
	b)	Cylindriques	23
	c)	Sphériques	24
	C	Différentes coordonnées sphériques	24
	a)	Physiciens	24
	b)	Mathématiciens	24
	c)	Géographes	24
	d)	Astronomes	24
	D	Vecteurs unités	25
	a)	Cartésiens	25
	b)	$\vec{I}_r, \vec{I}_\theta$	25
	E	Degrés de libertés	27
	F	Changement de système	28
	a)	Jacobien	28
5		Exercices	28
4 Déplacements et vitesses			29
1		Vecteurs positions et déplacements	30
	A	Vecteur position	30
	a)	Définition	30

	b)	Relativité	30
B		Vecteur déplacement	30
	a)	Justification	30
	b)	Définition	32
	c)	Relativité	32
2		Vitesses	32
A		Histoire du concept de vitesse	32
B		Le vecteur vitesse moyenne	33
	a)	Définition	33
	b)	Du km h^{-1} au m s^{-1}	33
	(i)	Exemples	34
	c)	Ordres de grandeur	34
	d)	La vitesse moyenne n'est pas la moyenne des vitesses	34
	(i)	Exemple	34
	e)	Limitations de la vitesse moyenne	34
	(i)	Vitesses variables en grandeur	34
	(ii)	Vitesses variables en sens	34
	(iii)	Vitesses variables en direction	35
	(iv)	Cas général	35
	(v)	Conclusion	35
C		Vecteur vitesse instantanée	35
	a)	Une solution aux limitations de la vitesse moyenne	35
	(i)	Tangente	36
	b)	Définition	36
	c)	En pratique : Δt petit! Mais petit comment?	37
	(i)	Chronophotographie	37
	(ii)	Exercices	37
	d)	Propriétés du point de vue de la physique mathématique	37
3		Exercices	38
5		Mouvements rectilignes	39
1		Définition	40
A		L'axe OX : mouvements dans \mathbb{R}	40
2		Simplification des notations	40
A		Le vecteur déplacement	40
B		Les vecteurs vitesses	40
C		Définitions (ou de l'art de faire du neuf avec du vieux)	41
3		Sens et signes des vecteurs déplacements et vitesses	41
A		Graphiques déplacement et vitesse	41
B		Vitesses négatives	42
4		Étude d'un mouvement rectiligne : différents types de mouvements rectilignes	42
A		MRU	43
B		Repos	43
C		MRUV	43
5		Exercices	43
6		MRU	45
1		Définition et conséquences	46
A		Conséquences	46
2		Graphe de la position en fonction du temps	46

	(i) Conclusion	47
3	Graphe de la vitesse en fonction du temps	47
4	Problèmes de croisement	48
	A Croisement et systèmes d'équations	48
	a) Croisement	48
	B Détermination des paramètres	48
	a) En partant de la position 0, en fixant l'instant du départ comme zéro.	48
	b) En partant de la position r_0 , en fixant l'instant du départ comme zéro.	48
	c) En partant de la position r_0 , l'instant du départ est t_0	49
5	exercices	49
7	Variation de vitesse et accélération	51
1	Vitesses variables	52
	A Vecteur variation de vitesse	52
	a) Mise en situation	52
	b) Définition	53
	B Démarrage de voiture	53
	C Centrifugeuse	53
2	Variation de vitesse et accélération	53
	A Vecteur accélération	53
	a) Définition	54
	b) Ordres de grandeur	54
	B Vecteur accélération instantanée	55
	a) Définition	55
3	Accélération, dérivées et intégrales	55
	A L' accélération instantanée et les dérivées	55
	B Accélération et intégrales	55
	a) variation de vitesse	55
	b) déplacement	55
	c) Une application : frottement aérodynamique	56
4	Le vecteur accélération comme somme de vecteurs perpendiculaires	57
	A Retour sur les exemples	57
	a) La voiture	57
	b) L'essoreuse	57
	B Accélérations normale et tangentielle	57
5	Exercices	57
8	MRUA	59
1	MRUA	60
	A Notations	60
	B Définition	60
2	Sens des vitesses et signe de l'accélération	60
	A En utilisant les vecteurs	60
	a) La vitesse "compteur" augmente : une accélération	60
	(i) Mouvement dans le sens de l'axe	60
	(ii) Mouvement dans le sens opposé à celui de l'axe	60
	b) La vitesse "compteur" diminue : une décélération	61
	(i) Mouvement dans le sens de l'axe	61
	(ii) Mouvement dans le sens opposé à celui de l'axe	61

	c)	Conclusion	61
B		En n' utilisant <i>pas</i> les vecteurs	61
	a)	La vitesse "compteur" augmente : une accélération	61
	(i)	Mouvement dans le sens de l'axe	61
	(ii)	Mouvement dans le sens opposé à celui de l'axe	61
	b)	La vitesse "compteur" diminue : une décélération	62
	(i)	Mouvement dans le sens de l'axe	62
	(ii)	Mouvement dans le sens opposé à celui de l'axe	62
	c)	Conclusion	62
3		Lois du MRUA	62
A		La loi des vitesses	62
	a)	Graphique de $v(t)$	62
B		La loi des espaces	63
	a)	Graphique de $v(t)$	63
	(i)	Caractéristiques de $v(t)$	63
	(ii)	Démonstration graphique de la loi des espaces.	64
	b)	Graphique de $r(t)$	65
4		Exercices	65
9		Chute libre	67
1		Chute d'objets dans l'atmosphère	68
2		Chute libre	68
	A	Définition	69
3		L'accélération de gravité sur Terre	69
4		Choix d'axes pour résoudre des problèmes	70
	A	Pure chute	70
	B	Lancer vers le haut	70
5		Exercices	70
III		Cinématique dans l'espace	73
10		MCU	75
1		mouvement circulaire uniforme	76
2		Vitesse linéaire et vitesse angulaire	77
	A	Vitesse linéaire	77
	a)	Exemple :	78
	b)	Caractéristiques du vecteur vitesse	78
	B	Vitesse angulaire	79
3		L'accélération en MCU	79
	A	L'accélération centripète	79
	a)	Différence de vitesses vectorielles	79
	B	Grandeur de l'accélération centripète	81
	a)	Équations du mouvement : position	82
	b)	Équations du mouvement : vitesse	83
	c)	Équations du mouvement : accélération	84
	C	Résumé	84
4		Exercices :	85
11		MCUA	87
1		Hypothèses de départ	88

	A	ω croissant et accélération angulaire	88
	a)	Vitesse angulaire initiale	89
2		Équations du mouvement	89
	A	Le vecteur position	89
	B	Le vecteur vitesse	90
	C	le vecteur accélération	90
	a)	Accélérations normale et tangentielle	91
		(i) Accélération tangentielle :	91
		(ii) Accélération normale :	92
	b)	Norme de l'accélération	92
	c)	Direction de l'accélération	93
	d)	En résumé	93
3		Exercices :	94
12 Le tir horizontal			95
1		Mise en situation	96
	A	Expérience	96
	B	Autres exemples	97
	a)	Dans le train	97
	b)	Largage depuis un avion	98
	C	La notion de trajectoire d'Aristote à Galilée en passant par Léonard de Vinci : les boulets de canons	98
2		Chronophotographie	102
	A	analyse du mouvement vertical	102
	B	Analyse quantitative du mouvement	102
3		Conclusions	104
4		Les équations du mouvement	104
	A	Tableau récapitulatif : Les équations horaires ou paramétriques	104
	B	Trajectoire : les équations cartésiennes	105
5		Portée	106
6		Autres	107
	A	Vitesse en fonction de l'altitude	107
	B	Angles	107
	C	\vec{a}_n, \vec{a}_{tg}	108
7		Exercices	110
13 Le tir oblique ou parabolique			111
1		Équations du mouvement	112
	A	Les règles du jeu	112
	B	Vitesse initiale oblique	113
	C	Vitesse	113
	a)	Composante horizontale	113
	b)	Composante verticale	114
		(i) Signes	114
	D	Équations paramétriques ou horaires	114
2		Trajectoire : équation cartésienne	114
	A	Hauteur maximale	115
3		Portée	116
	A	En général	116
	B	Portée maximale	117

	a)	Optimisation	118
4	Autres		118
	A	Vitesse en fonction de l'altitude	118
	B	Angles	118
	C	\vec{a}_n, \vec{a}_{tan}	118
5	Cibles		118
	A	Équations générales	119
	a)	Solutions de l'équation du second degré	121
		(i) Le discriminant	121
		(ii) Discriminant nul ou la parabole de sûreté	121
		(iii) Trop loin !	123
		(iv) Deux solutions	123
	B	De haut, c'est plus beau : la citadelle	124
	a)	Cible en hauteur	125
6	Avec les frottements		126
7	Exercices		126
14	Mouvements à trois dimensions		129
1	Coordonnées et vecteurs dans \mathbb{R}^3		130
2	Équations paramétriques		130
	A	Équations de droites	130
	B	Généralisation	130
3	Exemples		131
	A	Exemples généraux	131
	a)	Mouvement hélicoïdal simple	131
	b)	"Tornade"	131
	c)	Spirale à la surface d'une sphère	132
	B	Mécanique céleste	133
IV	Statique		135
15	Les forces		137
1	Définitions et caractéristiques		138
	A	Mesure des forces	138
	B	Loi des ressorts	138
2	La force de pesanteur		139
	A	Les caractéristiques de la force de pesanteur	139
	B	Différences entre masse et poids	140
3	Autres forces		140
	A	Forces électrostatique	140
	a)	Note historique	140
	b)	A retenir	140
	B	La force magnétique	141
	C	La force électromagnétique	141
	D	Les forces de frottement	141
	E	Les forces fondamentales	141
4	Additions de forces		141
	A	En pratique : Méthodes	141
	a)	Le parallélogramme de forces	142
	b)	Le polygone des forces	142

	c) Composantes	143
5	Exercices	143
16	Les forces : équilibres de translation	145
1	Énoncé du principe	146
2	En pratique : Méthodes	146
	A Parallélogramme	146
	B Polygone	147
	C Composantes	147
	D Exemples	148
3	La résistance	148
4	Le plan incliné	148
	A Caveat	148
	B Identifier les forces en présence	148
	C Déterminer les forces en présence	149
	D Point de vue analytique	150
	a) Force parallèle et normale	150
	E Marche à suivre	150
5	Exercices	151
17	Équilibres de rotation et moments de force	153
1	Un peu d'histoire : Simon Stevin	154
2	Équilibre de rotation et leviers	155
	A Observations	155
	B Déduction	156
	C Loi des leviers	156
	a) Vocabulaire	157
	b) F et d orthogonaux	157
	D Types de leviers	157
	a) Inter appui	157
	b) Inter moteur :	158
	c) Inter résistant :	158
3	Moments de force	158
	A Définition	158
	B Reformulation de la loi des leviers	159
	C Somme des moments de force	159
	D Signes des moments de force	160
	a) Sens de rotation et signe des moments de force	161
	E Condition d'équilibre de rotation	161
	F Définition	161
4	Poutres et autres	161
	A Analyse de la situation	162
	a) Les forces	162
	b) Les moments de force	163
	(i) Point d'appui de gauche	163
	(ii) Point d'appui de droite	163
	(iii) Système d'équation	164
	B Équivalence poutre et leviers	164
5	Autres machines simples qui peuvent être comparées aux leviers	165
	A Le treuil	165

	B	Le pédalier de vélo	165
6		Le produit vectoriel	166
	A	Le produit vectoriel	166
	a)	Repère direct et indirect	166
	b)	Définition du produit vectoriel	166
	c)	Technique de calcul du produit vectoriel avec les coordonnées des vecteurs	166
	d)	Cas particulier où les deux vecteurs sont dans le plan "xy"	167
	B	Application aux moments de force	167
	a)	La force et le bras de levier sont perpendiculaires	167
	b)	Sens de la rotation	167
	C	la force et le bras de levier ne sont pas perpendiculaires	167
	a)	Différentes situations	167
	(i)	Force et le bras de levier perpendiculaires	167
	(ii)	Force et bras de levier parallèles	167
	(iii)	Force et bras de levier faiblement inclinés l'un par rapport à l'autre	167
	(iv)	Force et bras de levier fortement inclinés l'un par rapport à l'autre	168
	b)	Analyse	168
	c)	Synthèse	168

V Dynamique

169

18 Les lois de Newton

171

1		Le principe d'inertie	172
	A	Principe	172
	a)	Exemple	172
	b)	L'inertie	172
	c)	Première loi de Newton	172
	d)	Cas particulier	172
	e)	Exemple (suite)	173
	B	Importance du système de référence	173
	a)	Exemple	173
2		Le principe fondamental de la dynamique	174
	A	Introduction	174
	B	Recherche de la relation qui lie F , m et a	174
	a)	Dispositif expérimental	174
	b)	Trois grandeurs entrent en jeu.	175
	c)	Démarche théorético expérimentale	175
	d)	Expérience établissant le lien entre masse et accélération	175
	e)	Expérience établissant le lien force et accélération	176
	C	Le principe fondamental de la dynamique (finalement)	176
	a)	Expression mathématique du principe fondamental de la dynamique	176
3		Le principe d'action réciproque (action et réaction)	177
	A	Exemples	177
	B	Principe	177
4		Exercices	177

19 Les forces de frottements	179
1 Mise en situation	180
2 Nature des frottements	180
3 Différents types de frottements	180
A Frottements entre 2 surfaces solides	180
a) Règles générales pour les forces de frottements solide-solide	180
b) Les forces de frottements statiques	181
c) Les forces de frottements dynamiques	181
B Frottements Solide-Fluide	181
a) Lois des frottements fluide-solide	181
4 Exercices	182
20 Chute libre	183
21 La force centripète	185
1 Force centripète	186
A Introduction	186
a) Rappel : le principe d'inertie	186
b) mouvement circulaire uniforme	186
B Rappel des définitions : période, vitesse d'un mouvement circulaire uni- forme,	186
a) Caractéristiques du vecteur vitesse	187
b) Vitesse angulaire	187
C La force centripète	187
D L'accélération centripète	187
a) Rappel : principe fondamental de la dynamique	187
b) Application de principe fondamental de la dynamique en MCU	187
E Grandeur de la force et de l'accélération centripète	188
a) introduction	188
b) Considérations expérimentales	188
c) Conclusion	188
2 Applications	189
A Pourquoi les pneus lisses sont-ils dangereux?	189
B Les balançoires du carrousel	189
C Les vélos de vitesse pure	190
D Les satellites	190
3 Force de Coriolis	191
4 Exercices	191
VI Les lois de conservation	193
22 Travail	195
1 Rappel sur les leviers	196
2 Définitions, formules	196
A Une première définition	196
B Une deuxième définition	196
a) Découverte	197
b) Définition en terme de force et de déplacement	197
c) Définition de l'énergie	197
C Une troisième définition	197

	a)	Mise en situation	198
	b)	Définition en terme d'angle	198
	c)	Définition en terme vectoriel	198
3		Travail moteur ou résistant	198
	A	Définition qualitative	198
	B	Définition quantitative	198
4		Exercices	199
23		Énergie	201
1		Travail	202
	A	Énergie et chute	202
		a) Expérience : trous dans le sable	202
		b) Impact et énergie	202
		c) Énergie et hauteur : travail de la gravité	202
		(i) Énergie et force	202
	B	Travaux moteurs et résistants	203
		a) Découverte	203
		(i) Exemples :	203
		(ii) conditions	203
		b) Formule	203
2		Travail et énergie	203
	A	Définition du travail le long d'un chemin	203
		a) À une dimension	203
	B	Théorème de l'énergie cinétique	204
		a) Exemple : la gravité	205
		b) Principe d'inertie et théorème de l'énergie cinétique	206
	C	À trois dimensions	206
	D	Forces conservatives et non conservatives	206
3		Énergies potentielle et cinétique	207
	A	Énergies potentielles	208
		a) Énergie potentielle et travail	208
	B	Énergie cinétique	209
		a) Calcul	210
		(i) Rappel MRUA	210
	C	Application à la conservation de l'énergie	210
4		Exercices	210
24		Puissance	211
1		Illustration	212
2		Définition	212
3		Exemple	212
4		Autres unités	212
	A	Chevaux	212
		a) Cheval vapeur français	213
		b) Cheval vapeur anglais (hp)	213
		c) Cheval vapeur de chaudière	213
5		Exercices	213
25		Quantité de mouvement	215
1		Définition et propriété	216
	A	Définition	216

	B	Conséquence	216
2		Forces internes, forces externes et quantité de mouvement	217
	A	Contexte : systèmes de particules	217
	B	Uniquement des forces internes	217
	a)	Action réciproque	217
	b)	Somme de forces internes	218
	c)	Principe d'inertie	218
	d)	Variation de vitesse	218
3		Chocs élastiques et chocs inélastiques	218
	A	Chocs inélastiques	219
	B	Chocs élastiques	219
	a)	Quantité de mouvement et chocs élastiques	219
	C	Chocs et conservation de la quantité de mouvement	219
4		Exercices	219
26 Moment angulaire			221
1		Définition	222
2		Exemples	222
3		exercices	222
VII Modèles de l'univers et gravitation universelle			223
27 Tailles de l'univers			225
1		Dimensions de l'univers	226
2		Caractéristiques des planètes	226
28 Géocentrisme et héliocentrisme			227
1		Le modèle géocentrique	228
	A	Thalès de Milet (600 avant J.-C.)	228
	B	Anaximandre (550 avant J.-C.)	228
	C	Pythagore (530 avant J.-C.)	228
	D	Anaxagore (450 avant J.-C.)	229
	E	Hipparque (150 avant J.-C.)	230
	F	Ptolémée (120 après J.-C.)	230
	G	Conclusions	231
2		Le modèle héliocentrique	231
	A	Aristarque de Samos (IIIe siècle avant J.C.)	231
	B	Nicolas Copernic (Début XVIe siècle)	231
	C	Tycho-Brahé (Fin XVIe siècle)	232
	D	Kepler (1571-1630)	232
	a)	Loi n° 1	232
	b)	Loi n° 2	233
	c)	Loi n° 3	233
	d)	En résumé	234
	E	Galilée (1564-1642)	234
29 La gravitation universelle			235
1		Découverte de la loi de Newton (17ème siècle)	236
	A	Question	236
	B	Observations	236

C	Hypothèse : Fin de la dualité Terre-Ciel	236
a)	Trajectoire d'un objet lancé obliquement à la surface de la Terre.	236
b)	Trajectoire d'un corps lancé horizontalement à partir d'une grande hauteur au-dessus de la surface de la Terre avec des vitesses différentes	237
c)	Conclusions	238
D	Conséquences	238
a)	La Terre attire la Lune	238
b)	Le Soleil attire les planètes	238
c)	Lien avec les lois de Kepler : pourquoi une loi en $1/d^2$	238
2	Loi de la gravitation universelle	239
A	Formulation	239
B	Conséquences	239
C	Applications	239
a)	La vitesse orbitale des satellites	239
b)	Les satellites géostationnaires et géosynchrones	240
3	Applications	240
A	La masse de la Terre	240
B	La masse du Soleil	241
a)	La constante de Kepler	241
C	Autres calculs possibles	242

VIII Optique géométrique 243

30	L'oeil	247
1	Anatomie de l'œil	248
A	Cornée	248
B	Iris et pupille	248
C	Cristallin	248
D	Liquides	249
E	Rétine	249
a)	Fovéa	249
b)	Photorécepteurs	249
(i)	Cônes	249
(ii)	Bâtonnets	250
(iii)	Désensibilisation	250
c)	Le point aveugle	251
F	Nerf optique	251
G	Cerveau	251
2	Illusions	251
A	Renforcement des contrastes	251
a)	Niveaux de gris	251
b)	Contraste de couleurs	252
B	Le cerveau	252
31	Faisceaux de lumière	253
1	Historique	254
2	Faisceaux de lumière	254
3	Les faisceaux de lumière ne sont pas lumineux	254
4	Trajets des faisceaux de lumière	254

5	Exercices	254
32	Couleurs	255
1	Lumière blanche et couleurs	256
	A Couleur = longueur d'onde	256
	a) Espace de couleurs	257
2	Addition et soustraction de couleurs	257
	A Addition de couleurs	257
	a) RGB	258
	b) Couleurs complémentaires	259
	B Soustraction de couleurs	260
	a) KYMC	260
33	Images	261
1	Image = intersections de faisceaux	262
2	Deux types d'images	262
	A Image réelle	262
	B Image virtuelle	262
3	Conclusion	263
34	Miroirs	265
1	La réflexion	266
2	Miroirs plans	266
	A Loi des miroirs plans	266
	B Images dans un miroir	267
	C Inversion gauche-droite	268
	a) Un peu de géométrie	268
	(i) Catadioptré	269
	D Systèmes optiques utilisant la loi des miroirs.	270
3	Miroirs courbes	270
	A Miroirs concaves	270
	a) Miroirs sphériques	271
	b) Miroirs paraboliques	271
	(i) Applications	272
	c) Miroirs peu profonds	272
	d) Images dans un miroir concave	272
	(i) Objet se trouvant au delà du centre "C" : image réelle	272
	(ii) Techniques pour la construction d'images	273
	(iii) Objet se trouvant entre le centre "C" et le foyer "F"	273
	(iv) Objet se trouvant entre le foyer "F" et la surface du miroir	273
	B Miroirs convexes	274
	a) Images dans un miroir convexe	274
4	Exercices	274
	A Miroirs plans	274
	B Miroirs sphériques	275
35	Réfraction	277
1	Déviation du faisceau de lumière : la réfraction	278
2	Indice de réfraction	278
3	Loi de Snell-Descartes	279
4	Angle limite : la réflexion totale	279

	A	Fibres optiques	280
	B	Les mirages	280
		a) Mirage inférieur	281
		b) Mirage supérieur	281
5		Pouvoir réflecteur	281
6		Exercices	281
36		Prismes	283
1		Le prisme	284
	A	Description	284
	B	Double réfraction	284
	C	Angle de déviation	284
	D	Déviation minimale	286
2		Décomposition de la lumière blanche	288
	A	La dispersion	288
	B	L'arc-en-ciel	288
		a) Le bleu du ciel	289
3		Exercices	289
37		Lentilles minces	291
1		Combinaison de prismes	292
2		Lentilles	292
3		Lentilles minces	292
4		Types de lentilles	292
	A	Lentilles convergentes	292
	B	Lentilles divergentes	293
5		Point focal	293
	A	Distance focale	294
6		Rayons principaux	294
7		Formation d'images	294
8		Lois des lentilles	295
	A	Grandissement	296
	B	Grossissement	296
	C	La puissance d'une lentille	297
	D	Lentille convergente, divergente et loi des lentilles minces	297
9		Exercices	298
38		Combinaisons de lentilles	301
1		Constructions géométriques	302
2		Loi	302
3		Exercices	303
39		Les défauts de l'oeil	305
1		Fonctionnement	306
2		Principaux défauts	307
	A	Myopie	308
	B	Hypermétropie	308
	C	Presbytie	309
	D	Astigmatisme	309
3		Les corrections	309
	A	Myopie	310

	B	Hypermétropie	311
	C	Presbytie	312
	D	Astigmatisme	312
4		Exercices	312
40		Télescopes et microscopes	313
1		Combinaisons de lentilles	314
	A	La loupe	314
	B	La lunette astronomique	315
	C	Le microscope	315
2		Exercices	316
IX		Électricité	317
41		Électrostatique	321
1		Historique	322
2		Observation	322
3		Théorie	322
4		Exercices	322
42		Courants, circuits	323
1		Schémas électriques	324
	A	Dipôles	324
	B	Conventions d'écriture d'un schéma électrique	324
	C	Plan du circuit électrique d'une maison	325
2		Montages en série et en parallèle	327
	A	Montages en série	327
	a)	Conséquence	327
	B	Utilisation	327
	C	Montages en parallèle	328
	a)	Conséquence	328
	b)	Utilisation	328
	D	Logique de blocs	328
3		Intensité de courant	328
	A	Définition	329
	a)	remarque	330
	b)	Analogie avec un débit	330
	B	Mesure de I	330
	C	Lois des intensités de courant dans des montages de plusieurs dipôles	331
	a)	Montages en série	331
	b)	Montages en parallèle	331
4		Exercices	332
43		Énergie électrique : le "kWh"	333
1		Énergie et électricité	334
	A	Energie, puissance	334
	B	Watt et kilowattheure	334
	C	La facture d'électricité	335
2		Exercices	335

44	Différence de potentiel	337
1	Expérience	338
	A exemples	339
2	Définition	339
	A unité	339
	B Analogie	339
3	Mesure	339
4	Application	340
5	Exercices	340
45	Association de générateurs	341
1	Montages en série et en parallèle	342
	A Montages en série	342
	B Montages en parallèle	343
2	Applications	344
3	Exercices	344
46	La loi d'Ohm	345
1	La loi d'Ohm	346
	a) Le triangle magique	347
2	Application	347
	A Exemples	348
	a) Résistances typiques d'appareils électriques	348
	b) Résistance du corps humain	348
	B Résistance électrique et électrocution	348
	a) Sec	348
	b) Mouillé	348
	c) Loi de Pouillet	348
3	Résistances en parallèle et en série	349
	A Résistances en série	349
	B Montages en parallèle	350
4	Exercices	351
47	Force électromotrice	353
1	La force électromotrice	354
	A Définition	354
	B Tension aux bornes	354
X	Electromagnétisme	355
48	Le magnétisme	357
1	Historique	358
	A Les origines	358
	B Les chinois	358
	C En occident	358
	D Les lumières	358
2	Les aimants	358
	A La force magnétique	358
	B Les pôles d'un aimant	358
	a) Types de pôles	359

	b)	Interaction entre pôles	359
	c)	Pas de monopôle magnétique	359
3		Effet sur les matériaux	360
4		L'analyse du magnétisme	360
	A	Champ magnétique	360
	a)	Lignes de champs magnétique	360
	b)	Vecteur champ magnétique	360
	(i)	Ordres de grandeur de champs magnétiques	361
49		Les champs magnétiques induits	365
1		Historique	366
	A	Électricité et magnétisme	366
	a)	Ørsted et Faraday	366
	b)	Les premiers moteurs électriques	366
	c)	Maxwell	366
2		Champ magnétique créé par un courant	366
	A	Courant dans un fil droit	366
	B	Courant dans une spire	367
	C	Courant dans une bobine	369
	a)	Les électroaimants	369
50		Les courants induits	371
1		Historique	372
	A	Electricité et magnétisme	372
2		Courants engendré par le magnétisme	372
	A	Expérience	372
	B	Loi	372
51		Force électromagnétique	373
1		Historique	374
2		Force, courants et magnétisme	374
	A	Expérience	374
	B	Loi	374
3		La force électromagnétique	374
XI		Les ondes	375
52		Les ondes : généralités	377
1		Introduction	378
	A	Travail : analyse de texte	378
2		Onde : définition	378
3		Autres définitions	379
	A	Elongation et amplitude	379
	B	Vitesse de propagation	379
	C	Ondes transversales et longitudinales	379
	a)	Ondes transversales	379
	b)	Ondes longitudinales	379
	D	Ondes sinusoïdales	379
	E	Progression d'une onde transversale	380
	F	La longueur d'onde	380

4	Exercices	381
53	La réflexion des ondes	383
1	La cuve à ondes	384
	A Ondes circulaires	384
	B Ondes planes	384
	C Conclusion	384
2	La réflexion des ondes	384
	A Ondes circulaires	385
3	Exercices	385
54	Les ondes sonores	387
1	Introduction	388
2	Création d'une onde sonore	388
3	Propagation du son	388
4	Visualisation du son avec l'oscilloscope	388
	A Matériel et méthode	388
	B Types de son	389
5	Hauteur du son	389
	A Expériences	389
	B Conclusion	389
6	Intensité du son	389
	A Expérience	389
7	Définition d'intensité de l'onde sonore	389
	A rappel	389
8	L'échelle décibel	390
9	Le timbre en musique	391
	A Oscillogramme	391
	B Conclusion	391
10	Exercices	392
55	L'effet Doppler	393
1	Expériences	394
	A Observations	394
	a) anecdote	394
	B rappel : hauteur d'un son	394
	C Conclusion	394
2	Illustration : un nageur et les vagues	394
	A Calcul	394
	a) 1 ^{er} cas : $S \ll A$	395
	b) Conclusion	395
	B 2 ^{eme} cas : $S \leftrightarrow A$	395
3	Synthèse	395
	A Définition	395
	B Formule	395
	a) Obs en mvt.	395
	b) Src. en mvt.	395
4	Applications	395
	A Détecteur de vitesse automobile	396
	B Alarme	396
	C vitesse du sang	396

	D	vitesse du son et BANG supersonique	396
5		Exercices	396
56 La diffraction des ondes			397
1		Expériences	398
	A	Bord d'un obstacle	398
		a) λ petit	398
		b) λ plus grand	398
	B	Fente	398
		a) $L \gg \lambda$	398
		b) $L \searrow$ et $\rightarrow \lambda$	398
		c) $L \leq \lambda$	398
		d) Ouvertures des ports	398
	C	Objet	399
		a) $L \gg \lambda$	399
		b) $L \searrow$ et $\rightarrow \lambda$	399
		c) $L \leq \lambda$	399
		d) Radio	399
2		Synthèse	399
	A	Définition	399
	B	$\lambda \ll L$	399
	C	$\lambda \simeq L$	399
	D	$\lambda \gg L$	399
3		Applications	399
	A	En général	399
	B	Echolocation	400
4		Exercices	400
57 Les fentes de Young			401
1		Principe de superposition et interférences	402
	A	Principe de superposition	402
	B	Interférences d'ondes circulaires	402
2		Interférences et lumière	403
	A	Expérience	403
	B	Interprétation	403
	C	Conclusion	403
58 Les ondes électromagnétiques			405
1		Caractéristiques des ondes électromagnétiques	406
2		Le spectre électromagnétique	406
	A	Les ondes HERTZIENNES	406
		a) Les ondes radio	406
		(i) Longueur d'onde	406
		(ii) Transmission	406
		(iii) propagation en fonction de la longueur d'onde	406
		b) les ondes de télévision	407
		(i) Longueur d'onde	407
		c) les ondes radar	407
		d) Le téléphone mobile	407
		(i) Fréquence	407
		e) Les télécommunications par satellites	407

B	LES MICRO- ONDES	407
	(i) Fréquence	407
C	RAYONNEMENT INFRAROUGE	407
D	LA LUMIERE VISIBLE	408
E	LE RAYONNEMENT ULTRAVIOLET	408
F	LE RAYONNEMENT X	408
G	LE RAYONNEMENT GAMMA	408

XII Physique atomique 409

59 La radioactivité 411

1	Découverte de la radioactivité	412
A	Historique	412
	a) Radiations	412
	b) Le plomb	412
	c) Expériences : Effet du champ magnétique	412
2	Structure des atomes	412
A	Rappel : le modèle de Rutherford	412
B	Rappel : le modèle de Bohr	412
C	Chimie	413
3	Stabilité du noyau	413
A	Force de répulsion entre protons	413
B	Masse des nucléons	413
	a) Rappel : u.m.a.	413
C	Masse manquante	413
	a) Einstein à la rescousse	413
D	Liaison entre nucléons	414
	a) Les isotopes	414
	(i) Exemple :	414
	b) Isotopes : Z, A	414
	c) Le tableau des isotopes	414
E	Définition de la radioactivité	415
	a) mise en évidence	415
F	Loi de la décroissance radioactive	415
G	La demi-vie	415
H	L'activité	416
4	La fission	417
A	Équation nucléaire	417
B	Réactions en chaîne	417
5	La fusion	417

XIII Annexes 419

A Listes diverses 421

Liste des tableaux	421
Liste des illustrations	427
Liste des définitions	430

B Bibliographie 431

C	Index	433
D	Table des matières	435