

IPH

*Département des Technologies Industrielles (TIN)
Tronc commun - Orientations GE, MI, SI*

INTRODUCTION À LA PHYSIQUE

Prof. André Perrenoud

T A B L E D E S M A T I E R E S

PAGE

1. INTRODUCTION.....	1
1.1 OBJET DE LA PHYSIQUE.....	1
1.2 PLACE DE LA PHYSIQUE DANS LES ÉTUDES D'INGÉNIEUR (-E).....	2
1.3 LA MATIÈRE.....	3
1.4 PLAN DU COURS	4
1.5 FORMULAIRES ET LIVRES.....	5
2. UNITÉS DE MESURE.....	7
2.1 LE MÈTRE.....	7
2.2 LE KILOGRAMME.....	8
2.3 LA SECONDE	8
2.4 MULTIPLES ET SOUS-MULTIPLES	9
2.5 ORDRES DE GRANDEUR.....	10
2.6 MESURE DES AIRES ET DES VOLUMES	11
2.7 CONVENTIONS D'ÉCRITURE.....	11
2.8 MESURE DES ANGLES.....	12
3. QUELQUES RAPPELS MATHÉMATIQUES	13
3.1 MÉTHODE DE LOCALISATION D'UN POINT	13
3.2 LES VECTEURS.....	15
3.3 EXPRESSION ANALYTIQUE DU CALCUL VECTORIEL	17
3.4 MÉTHODE DE RÉOLUTION DES EXERCICES	19
3.5 ALPHABET GREC	19
3.6 DÉMONSTRATION DU THÉORÈME DE PYTHAGORE.....	20
4. INTRODUCTION À L'OPTIQUE	21
4.1 QUELQUES ÉTAPES HISTORIQUES	21
4.2 LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE	24
4.3 LE SPECTRE VISIBLE.....	25
4.4 LES MILIEUX OPTIQUES.....	26
4.5 LA PROPAGATION DE LA LUMIÈRE	26
4.5.1 Le concept de rayon lumineux.....	27
4.5.2 Ombres et pénombres.....	28
4.5.3 Diamètre apparent d'un objet.....	28
5. LES MIROIRS	29
5.1 MIROIR PLAN.....	29
5.2 MIROIRS SPHÉRIQUES	31
5.2.1 Image d'un objet par un miroir concave	32
5.2.1.1 Formule de Newton :	33
5.2.1.2 Grandissement.....	34
5.2.2 Image d'un objet par un miroir convexe	35
5.3 LES MIROIRS PARABOLIQUES.....	36
5.3.1 Rappels de quelques propriétés de la parabole.....	36
5.3.2 Le télescope de Newton.....	37
6. LA RÉFRACTION	39
6.1 LOIS DE LA RÉFRACTION.....	39
6.2 ANGLE LIMITE ET RÉFLEXION TOTALE.....	42

6.3	LAME À FACES PARALLÈLES	43
6.4	LE PRISME	44
	6.4.1 Indice de réfraction de quelques substances.....	46
7.	LES LENTILLES	49
7.1	LENTILLE MINCE PLAN-CONVEXE	50
7.2	LENTILLE MINCE BICONVEXE	53
7.3	AUTRES TYPES DE LENTILLES.....	54
7.4	LENTILLE DIVERGENTE.....	55
7.5	GRANDISSEMENT	56
7.6	FORMULE DE NEWTON :	56
7.7	ABERRATIONS DES LENTILLES :	56
	7.7.1 Aberration chromatique.....	56
	7.7.2 Aberration de sphéricité.....	57
	7.7.3 Astigmatisme.....	57
7.8	RÉSUMÉ	58
	7.8.1 Lentille convergente.....	58
	7.8.2 Lentille divergente.....	59
8.	L'OEIL	61
8.1	ANATOMIE DE L'ŒIL	61
8.2	CARACTÉRISTIQUES DE L'ŒIL	63
8.3	DÉFAUTS DE L'ŒIL	64
	8.3.1 La myopie	64
	8.3.2 L'hypermétropie	64
	8.3.3 La presbytie.....	65
	8.3.4 L'astigmatisme	65
	8.3.5 Mise en évidence de la tache aveugle de l'oeil	65
9.	QUELQUES INSTRUMENTS D'OPTIQUE.....	67
9.1	LA LOUPE.....	67
9.2	LE MICROSCOPE	68
9.3	LA LUNETTE ASTRONOMIQUE.....	71
	9.3.1 Lunette de Kepler.....	71
	9.3.2 Lunette de Galilée.....	72
10.	SOURCES LUMINEUSES.....	75
10.1	LE CORPS NOIR	75
10.2	LES UNITÉS PHOTOMÉTRIQUES.....	76
	10.2.1 Intensité lumineuse.....	76
	10.2.2 Le flux lumineux.....	76
	10.2.3 L'exitance (ou émittance lumineuse)	77
	10.2.4 La luminance	77
	10.2.5 L'éclairement	79
	10.2.6 Réflexion de la lumière par une surface.....	79
	<i>10.2.6.1 Élément d'angle solide et coordonnées sphériques.....</i>	<i>80</i>
11.	MÉCANIQUE.....	81
11.1	POSITION, DÉPLACEMENT, TRAJECTOIRE	81
11.2	LE TEMPS	82
11.3	LA VITESSE	82
	11.3.1 Vitesse moyenne (scalaire)	82
	11.3.2 Vitesse instantanée scalaire.....	83
	11.3.3 Diagramme espace – temps.....	83
	11.3.4 Vitesse instantanée vectorielle	84

11.4	RELATION ENTRE VITESSE ET DISTANCE PARCOURUE	85
11.4.1	Le mouvement rectiligne uniforme (MRU)	85
11.4.2	Mouvement quelconque	86
11.5	ACCÉLÉRATION	88
11.5.1	Accélération tangentielle	88
11.5.2	Accélération vectorielle instantanée	89
11.5.3	Le mouvement circulaire uniforme (MCU)	90
11.5.4	Le mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)	92
11.6	COMPOSITION DES DÉPLACEMENTS ET DES VITESSES	94
11.7	DYNAMIQUE	95
11.7.1	Premier principe (principe d'inertie)	95
11.7.2	Masse, force, le deuxième principe (principe ou loi de Newton)	95
11.7.3	Troisième principe (principe de l'action et de la réaction)	97
11.7.4	Principe de la gravitation universelle	97
11.7.5	Mesure de la constante G , balance de Cavendish	98
11.7.6	Poids, accélération gravitationnelle	98
11.7.7	Mesure de la masse et du poids	99
11.7.8	Masse et poids spécifiques	100
11.8	APPLICATIONS	101
11.8.1	La machine d'Atwood	101
11.8.2	Mouvement d'un satellite (orbite circulaire)	102
12.	INTRODUCTION AU LABORATOIRE	103
12.1	MESURES ET INCERTITUDES	103
12.1.1	Définition de la mesure	103
12.1.2	Précision de la mesure	103
12.2	INCERTITUDES	104
12.2.1	Incertitude absolue	104
12.2.2	Incertitude relative	104
12.2.3	Chiffres significatifs	105
12.3	AUTRES QUALITÉS D'UNE MESURE (OU D'UN INSTRUMENT DE MESURE)	105
12.4	CAUSES D'ERREUR	106
12.5	ESTIMATION DE L'INCERTITUDE SUR UNE MESURE DIRECTE	107
12.6	PROPAGATION DES INCERTITUDES SUR UNE MESURE INDIRECTE	108
12.6.1	Fonction d'une variable	108
12.6.2	Fonction de deux variables.	109
12.6.3	Présentation des mesures sous forme de tableau	111
12.7	VÉRIFICATION GRAPHIQUE D'UNE LOI PHYSIQUE	112
12.8	RÉPARTITION STATISTIQUE DES MESURES	114
12.8.1	Valeur moyenne	114
12.8.2	Variance et écart-type	114
12.8.3	Histogramme	115
12.8.4	Distribution normale (distribution de Gauss)	116
12.9	LA MÉTHODE DES MOINDRES CARRÉS	117
12.9.1	Position du problème	117
12.9.2	Résultat général	118
12.9.3	Cas où tous les écarts-types sont égaux	118
12.9.4	Cas où les écarts-types sont inconnus	119
12.9.5	Définition du coefficient de corrélation	119
12.9.6	Exemples	120
12.9.6.1	Mise en œuvre simple sur calculatrice	120
12.9.6.2	Mise en œuvre sur Excel	121
12.9.6.3	Mise en œuvre sur Matlab	123

1. INTRODUCTION

1.1 OBJET DE LA PHYSIQUE

La physique est une science. Comme toute science, son but est de connaître les phénomènes de la nature, de les expliquer et de les prévoir.

Son champ d'action est l'étude des propriétés et des phénomènes qui affectent la **matière inerte**. Il est très difficile de donner une définition de la physique. Car dans de nombreux domaines, elle se superpose à d'autres sciences (chimie, géologie, astronomie, etc...) si bien qu'on ne puisse définir aucune frontière précise.

La physique est une **science quantitative**, le langage qu'elle utilise est un langage **mathématique**, c'est-à-dire que les phénomènes qu'elle décrit s'expriment sous forme d'équations et de chiffres. Toute étude physique peut être décomposée en trois parties:

- a) **Observation**
- b) **Mesure**
- c) **Expression du phénomène par le symbolisme mathématique.**

L'observation est à la base de toute science; c'est elle qui nous permet de repérer les phénomènes intéressants et de suivre leur déroulement.

En physique, il est possible de procéder à des **expériences**, c'est-à-dire qu'on peut reproduire en tout temps les phénomènes que l'on désire observer. Ceci est un grand avantage que ne possèdent pas toutes les sciences. En astronomie, par exemple, on doit se borner à noter les faits. On ne peut pas modifier la position d'une planète du système solaire pour étudier les conséquences sur le mouvement des autres planètes.

La mesure consiste à associer aux phénomènes un certain nombre de grandeurs qui les définissent complètement et qui permettent de prévoir leur évolution; nous appellerons ces grandeurs des **observables**. Exemple: la longueur d'un objet, sa vitesse, sa position, sa température sont des observables. Le processus de mesure proprement dit consiste à comparer les observables à des grandeurs de même nature, choisies comme unités (le mètre est l'unité de longueur, la seconde celle de temps, etc...). Cette comparaison s'exprime sous forme de chiffres. Si l'on peut reporter 10 fois de suite le mètre le long de notre salle de cours, nous dirons qu'elle a dix mètres de longueur. L'observable "la longueur de la salle" s'exprime par le nombre 10 suivi de l'unité utilisée, soit 10 mètres ou 10 m en abrégé.

L'expression du phénomène par le symbolisme mathématique consiste à rechercher des relations mathématiques entre les diverses observables, de telle sorte que, connaissant certaines d'entre elles, on puisse déterminer les autres et ainsi prévoir le phénomène au cas où celui-ci se reproduirait.

On peut constater deux tendances en physique : la première se préoccupant d'observer la nature et de collectionner les résultats d'expériences, c'est la physique dite **expérimentale**. Ce cours¹ est essentiellement un cours de physique expérimentale. La deuxième tendance est celle qui recherche à énoncer des règles qui réalisent la synthèse de tous les résultats expérimentaux afin de tirer des lois générales qui expliquent le plus grand nombre de phénomènes possible et qui permettent de les prévoir : c'est la physique dite **théorique**.

Rappelons que, comme toute science, la physique ne cherche pas à dire **pourquoi** les choses sont ainsi, mais **comment** elles sont. L'étude du pourquoi est plutôt du ressort de la philosophie ou des religions.

Les explications données par la science ne sont jamais définitives; chaque fois que l'on découvre un nouveau fait qui ne rentre pas dans le cadre de la théorie, nous sommes contraints de réviser notre point de vue, quelquefois radicalement, comme par exemple avec la théorie des quanta ou celle de la relativité. En général, une nouvelle théorie n'invalide pas totalement l'ancienne, mais précise à quelles conditions l'ancienne théorie s'applique.

La possibilité de répéter des expériences suppose que les mêmes causes produisent les mêmes effets. C'est le **principe de causalité**. L'exposé de ce paragraphe est en quelque sorte un résumé de ce qu'on appelle la **méthode scientifique**.

1.2 PLACE DE LA PHYSIQUE DANS LES ÉTUDES D'INGÉNIEUR (-E)

Une grande partie de l'activité de l'ingénieur (-e) consiste à inventer, construire, produire, entretenir des dispositifs incorporant une foule de connaissances technologiques (machines, instruments de mesures, capteurs, cartes électroniques, etc...). Il n'est tout simplement pas possible de comprendre les produits techniques actuels, et a fortiori d'en concevoir de nouveaux, sans une connaissance des **sciences de base** dont la physique fait partie. La physique n'est pas un distributeur automatique de formules à appliquer les yeux fermés. Il faut être en mesure de savoir dans quelles situations elles s'appliquent, et au besoin les adapter.

De plus, l'étude de la physique contribue à former la **rigueur du raisonnement** et de la formulation de résultats. Cette rigueur est éminemment utile lorsqu'il s'agit de présenter un projet et convaincre des partenaires. La physique développe aussi l'aptitude à changer de point de vue, à proposer et à évaluer diverses solutions, ce qui est un avantage lorsqu'on doit relever de nouveaux défis.

La conception de nouveaux produits fait très souvent appel à la **modélisation** et à la **simulation**. L'ingénieur peut être appelé à manipuler des programmes de calculs qui utilisent, par exemple, la méthode des éléments finis. Pour modéliser correctement le comportement d'un nouveau dispositif, il est indispensable de connaître les phénomènes physiques élémentaires (lois du mouvement, propagation de la chaleur, conduction électrique, dynamique des fluides, etc...).

¹ Cette introduction est basée sur un cours donné à l'époque par le professeur Bernard Keller à l'Ecole Technique Supérieure du Soir de Lausanne.

1.3 LA MATIÈRE

Qu'est-ce que la matière ? Voilà une question qui a intrigué les plus grands esprits et à laquelle il est bien difficile de répondre. Voyons tout d'abord de quelle façon elle se manifeste à nous.

Premièrement nous constatons que la matière occupe un certain volume de l'espace, volume qui nous est dès lors inaccessible. Nous nous en rendons compte lorsque nous heurtons un objet. La matière est à l'origine de toutes nos sensations.

Pour déplacer des objets matériels, nous constatons expérimentalement qu'il faut leur appliquer des forces, ce qui ne va pas sans une certaine dépense d'énergie. (Dans la suite du cours, nous précisons les notions de déplacement, de force et d'énergie.) Plus les objets sont lourds, plus ils sont difficiles à déplacer. Les forces qui s'opposent à leur déplacement sont appelées forces d'**inertie**. Les objets ont une **masse**. La force d'attraction que la Terre exerce sur un objet est son **poids**.

Un principe fondamental, énoncé par Lavoisier, chimiste français (1743 – 1794), est celui de la conservation de la matière. *Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme*. Cependant, depuis les travaux d'Einstein (1879 – 1955), nous savons que matière et énergie sont deux aspects d'une même réalité et que ce principe doit être remplacé par celui de la **conservation de la matière + énergie**. Ce principe plus général prévaut notamment en physique nucléaire et en physique des particules, où les énergies mises en jeu ne peuvent être négligées par rapport aux masses des constituants étudiés (ou plus exactement du produit de leur masse par le carré de la vitesse de la lumière, $E = mc^2$). Toutefois, dans les phénomènes que nous étudierons dans ce cours, nous pourrions admettre que la masse est conservée pour elle-même, de même de l'énergie.

Autre propriété de la matière, elle se manifeste à nous sous d'innombrables formes. Comment retrouver une certaine unité sous la diversité ? L'hypothèse, probablement la plus importante jamais faite, est que la matière est constituée d'entités élémentaires. Ce qui nous apparaît continu n'est en fait pas divisible à l'infini. Historiquement, c'est Démocrite, philosophe grec (460 – 370 av. J.-C.), qui le premier a énoncé que la matière était formée d'**atomes** (littéralement, qui ne peut être divisé). Il a fallu ensuite attendre près de 2200 ans pour que les progrès de la chimie et de la physique viennent préciser cette hypothèse (Dalton, Avogadro).

Aujourd'hui, on sait que les corps purs sont constitués de **molécules** toutes semblables et que ces molécules, elles-mêmes sont formées d'atomes, les éléments. Il existe 92 **éléments** naturels et une quinzaine d'éléments fabriqués artificiellement. La première classification systématique des éléments a été faite, sur la base de leurs propriétés physico-chimiques, par Mendeleïev, physicien russe (1834 – 1887). Plus tard, expliquer cette classification périodique, il a fallu se rendre à l'évidence que les atomes n'étaient pas indivisibles comme le pensait Démocrite, mais qu'ils étaient constitués de particules plus petites, les **électrons** (Thomson, 1897), entourant un **noyau** (Rutherford, 1912). Par la suite les noyaux se sont révélés être faits de **protons** et de **neutrons** (Chadwick, 1932).

Dans la deuxième moitié du XX^e siècle, les expériences faites au moyen de grands accélérateurs de particules ont permis de produire une multitude de nouvelles particules, la plupart ayant une durée de vie éphémère. L'électron est toujours une particule fondamentale, mais le proton et le

neutron se sont révélés être des particules composites formées de **quarks** (hypothèse des quarks, Gell-Mann, 1960). Actuellement (en 2008) avec 12 particules fondamentales le "modèle standard" arrive à rendre compte de toutes les particules observées. En outre, il faut encore mentionner les quatre interactions (électromagnétique, forte, faible, gravitationnelle) et leurs particules associées.

Et la suite ? Selon toute probabilité, elle viendra des résultats attendus auprès du collisionneur de particules LHC² installé au CERN, le Centre Européen de Recherche Nucléaire, près de Genève. La confirmation expérimentale de l'existence du boson de Higgs devrait nous en apprendre plus sur l'origine de la masse et préciser la nature de la matière.

1.4 PLAN DU COURS

Selon le nouveau plan d'étude Bachelor, le cours de physique de première année de la HEIG-VD est divisé en deux unités d'enseignement : IPH et PHY1.

IPH - semestre d'hiver (64 périodes)

- **Introduction**
Le système d'unités SI, usage des unités et des préfixes, quelques rappels mathématiques.
- **Optique géométrique**
Etude la propagation des rayons lumineux. Lois de la réflexion et de la réfraction. Dispersion de la lumière par un prisme. Lentilles minces. L'œil humain. Instruments d'optique : loupe, microscope, télescope.
- **Mécanique**
Cinématique du point matériel, position, vitesse, accélération. Trajectoires planes.
- **Mesures, introduction au laboratoire**
Estimation des incertitudes, propagation des erreurs. Vérification graphique d'une loi physique. Régression linéaire.

PHY1 – semestre d'été (112 périodes)

- **Mécanique**
Dynamique du point matériel. Lois de Newtons. Travail, puissance, énergie cinétique, énergie potentielle. Oscillateur harmonique. Quantité de mouvement, lois de conservation. Mouvement d'une particule dans un champ de gravitation, dans un champ électrique, dans un champ magnétique ; applications au tube cathodique et au spectromètre de masse. Notions de dynamique du solide ; moment d'inertie.
- **Thermodynamique et transferts de chaleur**
Dilatation des solides, des liquides et des gaz. Notions de température et de chaleur. Chaleurs spécifiques. Diagrammes de phase. Transferts de chaleur, Cycles thermodynamiques.

Les cours sont complétés des exercices.

En 2^{ème} année, le cours PHY2 est consacré à l'électromagnétisme et aux ondes.

² LHC : Large Hadron Collider

1.5 FORMULAIRES ET LIVRES

Formulaires et tables CRM - Commissions romandes de mathématique, de physique et de chimie, éd, du Tricorne, ISBN 2-8293-0060-7

FORTEC – Formulaire Technique, Charles Pache, Editec, 2002.

GIECK – Formulaire Technique, 11^e édition, Gieck Verlag GmbH, ISBN 978 3 379 000 26 0.

Pour une introduction illustrée :

Physique - Chimie, Paul Avanzi, Alain Kespy, Jacques Perret-Gentil, Daniel Pfistner, éd. L.E.P., 1992, ISBN 2-606-00577-5.

Physique, Eugene Hecht., De Boeck Université, Paris, troisième tirage, 2003, ISBN 2-7445-0018-6.

Sur Internet : L'encyclopédie en ligne Wikipedia : <http://fr.wikipedia.org> donne une foule de renseignements sur les phénomènes physiques.

Métrologie et unités :

Loi fédérale sur le métrologie (No 941.20).

Ordonnance sur les unités (No 941.202).

Unités de mesure, Office fédéral de Métrologie (METAS).
www.metas.ch

Optique

Physique, Vol. 3, Ondes, Optique, H. Benson, De Boeck Université, 2004-2005, ISBN 2-7313-1472-7.

Physique générale, Vol. 3, Ondes, Optique et physique moderne, Douglas C. Giancoli, De Boeck Université, 1993, ISBN 2-8041-1702-2.

Physique, Vol. 3, Ondes, optique et physique moderne, David Halliday, Robert Resnik, Jearl Walker, Dunod, Sciences Sup, 6^e éd, 2004, ISBN 2-10-008148-9.

Mécanique

Physique Générale 1. Mécanique et Thermodynamique, Douglas Giancoli, De Boeck, Physique, Broché, 1993, Paris, ISBN 2-8041-1700-6.

Physique, Vol. 1. Mécanique, Harris Benson, De Boeck Université, Paris, 2004-2005, ISBN 2-8041-4549-2.

Physique, Vol. 1. Mécanique, David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker, Dunod, Sciences sup, Broché, 2003, 324 pages, ISBN 2-10008-1462.

2. UNITÉS DE MESURE

La mesure d'une observable physique est le processus de comparaison avec une grandeur physique de même nature qui sert de référence. En 1875, la Convention du mètre a été signée par 17 états, dont la Suisse, afin de faciliter les échanges techniques et commerciaux. En 1978, la Suisse s'est ralliée officiellement au Système International d'unités (SI). Le SI est conçu de façon rigoureusement scientifique. Il se fonde sur 7 unités fondamentales :

	Unité	Abréviation	Grandeur, observable
1.	mètre	m	longueur
2.	kilogramme	kg	masse
3.	seconde	s	temps
4.	ampère	A	intensité du courant électrique
5.	kelvin	K	température absolue
6.	mole	mol	quantité de matière
7.	candela	cd	intensité lumineuse

La définition et l'historique de ces unités sont décrits en détail, par exemple, dans les publications de l'Institut Fédéral de Métrologie³. Toutes les observables physiques peuvent être exprimées à partir de ces unités de base. Le SI s'efforce de rattacher chaque unité à un objet de référence ou à un phénomène physique reproductible avec la meilleure précision possible en laboratoire. Dans chaque pays se trouvent des instituts de métrologie⁴ dont la mission est de conserver les unités fondamentales et de les comparer sur demande avec les étalons secondaires utilisés dans le commerce et l'industrie. En principe, le contrôle périodique de l'étalonnage des instruments de mesure fait partie des procédures qualité de chaque entreprise.

2.1 LE MÈTRE

La première définition du mètre remonte à la Révolution française. Le mètre fut défini comme la dix millionième partie de la distance du Pôle à l'équateur. On mesura avec toute la précision possible à l'époque la distance d'un arc de méridien entre Dunkerque et Barcelone et on construisit un mètre prototype en platine servant d'étalon primaire de référence. Des copies furent distribuées aux pays qui s'y intéressaient.

Au cours du XX^e siècle, pour satisfaire aux exigences croissantes de précision, on chercha à s'affranchir des désavantages des prototypes matériels. Ces efforts aboutirent en 1960 à définir le mètre comme un multiple de la longueur d'onde dans le vide de la raie orange du krypton-86. L'invention de l'horloge atomique et celle du laser permirent d'affiner encore la définition du mètre. La précision de la mesure du temps devenant meilleure que celle de la longueur, on assigna en 1983 une valeur fixe à la vitesse de la lumière. On adopta la définition suivante :

Déf. Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde.

³ Unités de mesure, Office fédéral de métrologie (METAS). www.metas.ch

⁴ Métrologie, du grec *metron*, mesure. A ne pas confondre avec météorologie, étude des phénomènes atmosphériques.

2.2 LE KILOGRAMME

En même temps que la définition du mètre, en 1795, la France proposait une nouvelle unité de masse, afin de remplacer la multitude d'unités alors en vigueur. Le kilogramme fut défini comme la masse de 1 dm³ d'eau pure à sa densité maximale (4°C). Un prototype de même masse fut réalisé en platine et des copies furent mises à dispositions des autres pays, tout comme celles du mètre étalon.

La comparaison des masses se fait à l'aide de balances. Actuellement, la reproductibilité de la mesure d'une masse de 1 kg est de l'ordre de 0,25 microgrammes. Comme tous les efforts pour définir le kilogramme à partir d'une constante physique n'ont pas aboutit à ce jour à une meilleure précision, la définition actuelle du kilogramme est encore rattachée à un prototype matériel.

Déf. Le kilogramme est la masse du prototype international du kilogramme (déposé au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), à Sèvres, près de Paris.)

2.3 LA SECONDE

Historiquement, la mesure du temps se base sur la durée du jour, c'est-à-dire sur la durée entre deux passages du Soleil au zénith. Le jour est divisé en 24 heures, l'heure en 60 minutes, la minute en 60 secondes. Un jour compte ainsi 86 400 secondes.

Cette définition de l'unité de temps est donc liée implicitement au mouvement de la Terre autour du Soleil. La rotation de la Terre autour de son axe se fait en un jour et la rotation de la Terre autour du Soleil en une année.

A partir de 1950, environ, les progrès de la mesure du temps au moyen d'horloges atomiques permirent de mettre en évidence des fluctuations dans la régularité du mouvement de rotation de Terre, de l'ordre de quelques millisecondes par jour. Actuellement la précision des horloges atomiques est de l'ordre du dix milliardièmes de seconde par jour, soit un accroissement de précision d'un facteur 10⁷. La définition actuelle de la seconde se base donc sur la durée d'une transition atomique.

Déf. La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux hyperfins de l'atome de césium 133.

Les trois premières unités fondamentales, le mètre, le kilogramme et la seconde, suffisent pour l'étude de l'optique géométrique et de la mécanique. Nous verrons la définition des autres unités dans la suite du cours. L'étude de l'électricité nécessite l'ampère ; la tension électrique se définissant à partir des 4 premières. La mise en équation des échanges de chaleur et des phénomènes de dilatation conduit à la définition de l'unité de température, le kelvin. Ensuite, pour spécifier la quantité de matière sur la base du nombre de ses constituants élémentaires (atomes, molécules), on a introduit la mole. Enfin, en raison de l'importance de l'oeil humain en photométrie, il s'est révélé pratique d'introduire une unité d'intensité lumineuse à la longueur d'onde où l'oeil atteint son maximum de sensibilité.

L'historique des unités et les valeurs actuellement admises des constantes physiques peuvent se trouver dans les publications du METAS, l'office fédéral de métrologie (www.metas.ch).

2.4 MULTIPLES ET SOUS-MULTIPLES

En pratique, pour éviter d'écrire trop de zéros avant ou après les chiffres significatifs, on utilise un préfixe.

Facteur		Préfixe	Abréviation
1 000 000 000 000 000 000	= 10^{18}	exa	E
1 000 000 000 000 000	= 10^{15}	péta	P
1 000 000 000 000	= 10^{12}	téra	T
1 000 000 000	= 10^9	giga	G
1 000 000	= 10^6	méga	M
1 000	= 10^3	kilo	k
100	= 10^2	hecto	h
10	= 10^1	déca	da
1	= 10^0		
0,1	= 10^{-1}	déci	d
0,01	= 10^{-2}	centi	c
0,001	= 10^{-3}	milli	m
0,000 001	= 10^{-6}	micro	μ
0,000 000 001	= 10^{-9}	nano	n
0,000 000 000 001	= 10^{-12}	pico	p
0,000 000 000 000 001	= 10^{-15}	femto	f
0,000 000 000 000 000 001	= 10^{-18}	atto	a

Exemples :

$$12\,000\text{ m} = 12 \cdot 10^3\text{ m} = 12\text{ km}$$

$$0,000\,05\text{ s} = 50 \cdot 10^{-6}\text{ s} = 50\ \mu\text{s}$$

$$0,000\,004\text{ kg} = 4 \cdot 10^{-6}\text{ kg} = 4\text{ mg}$$

Remarques :

Le cumul des préfixes est interdit.

Certaines combinaisons sont inusitées, par exemple :

mégamètre (Mm), gigamètre (Gm). Pour les grandes distances, en astronomie, on préfère utiliser d'autres unités, comme l'année-lumière ou le parsec.

Pour les masses inférieures au kg, le préfixe s'applique au gramme.

Pour les masses supérieures à 1000 kg, on utilise la tonne (t).

$$1\text{ kt} = 10^6\text{ kg} ; 1\text{ Mt} = 10^9\text{ kg}.$$

En ce qui concerne les durées relativement longues, on préfère les exprimer en minutes, heures, jours, mois, années et non en kilosecondes (ks) ou mégasecondes (Ms).

Une unité dérivée d'un nom propre commence par une minuscule, mais s'abrège par une majuscule. Exemple : 10 ampères = 10 A.

2.5 ORDRES DE GRANDEUR

DURÉE	[s]	DISTANCE	[m]
Âge de l'Univers	10^{17}	Rayon de l'Univers	10^{26}
Temps écoulé depuis la disparition des dinosaures	10^{15}	Distance de la Terre à la galaxie la plus proche	10^{22}
Temps écoulé depuis la découverte de l'Amérique	10^{10}	Distance de la Terre à l'étoile la plus proche	10^{17}
Vie humaine	10^9	Distance Terre - Soleil	10^{11}
Une année	10^7	Diamètre de la Terre	10^7
Un jour	10^5	Taille humaine	10^0
Intervalle entre deux battements de coeur	10^0	Temps mis par le son pour traverser une salle se classe	10^{-2}
Durée d'un battement d'ailes de mouche	10^{-3}	Épaisseur d'une feuille de papier	10^{-4}
Temps mis par la lumière pour traverser une salle se classe	10^{-8}	Dimension d'une grande bactérie	10^{-5}
La plus courte impulsion laser	10^{-15}	Dimension d'un petit virus	10^{-8}
Temps mis par la lumière pour traverser un atome	10^{-18}	Diamètre d'un atome	10^{-10}
La plus courte durée de vie d'une particule (boson Z)	10^{-25}	Diamètre d'un proton	10^{-15}
MASSE	[kg]	MASSE	[kg]
Masse de l'Univers	10^{53}	Le plus haut gratte-ciel en 2007 (Burj Dubäi)	10^9
Masse d'une galaxie (Voie Lactée)	10^{42}	Locomotive	10^5
Soleil	10^{30}	Être humain	10^2
Terre	10^{25}	Globule rouge du sang	10^{-13}
Masse des océans	10^{21}	Protéine	10^{-21}
Masse de l'atmosphère	10^{19}	Proton	10^{-27}
Lac de Neuchâtel	10^{13}	Électron	10^{-30}

2.6 MESURE DES AIRES ET DES VOLUMES

Dans le système SI, les aires des surfaces s'expriment en mètres carrés (m^2) et les volumes en mètres cubes (m^3). Certains multiples ou sous-multiples ont des noms particuliers.

$$1 \text{ are} = \text{aire d'un carré de } 10 \text{ m de côté} = (10 \text{ m}) \cdot (10 \text{ m}) = 100 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ hectare} = \text{aire d'un carré de } 100 \text{ m de côté} = (100 \text{ m}) \cdot (100 \text{ m}) = 10\,000 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ litre} = \text{volume d'un cube de } 1 \text{ dm de côté} = (0,1 \text{ m}) \cdot (0,1 \text{ m}) \cdot (0,1 \text{ m}) = 0,001 \text{ m}^3$$

Ces exemples montrent comment utiliser correctement les préfixes SI lors des élévations au carré ou au cube.

1 are	= 1 dam ²	= (10 m) ²	= 10 ² m ²	abréviation
1 hectare	= 1 hm ²	= (100 m) ²	= 10 ⁴ m ²	1 a
1 litre	= 1 dm ³	= (0,1 m) ³	= 10 ⁻³ m ³	1 ha
				1 ℓ

Autres exemples :

$$1 \text{ km}^2 = (1000 \text{ m})^2 = 10^6 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ km}^3 = (1000 \text{ m})^3 = 10^9 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ mm}^2 = (0,001 \text{ m})^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ mm}^3 = (0,001 \text{ m})^3 = 10^{-9} \text{ m}^3$$

2.7 CONVENTIONS D'ÉCRITURE

On utilise l'écriture droite pour les chiffres et les unités. En revanche, les symboles s'écrivent italique. Exemple (longueur) : $y = 5,3 \text{ m}$.

Pour désigner l'unité utilisée pour exprimer la valeur d'une observable, on utilise les crochets. Exemple : $[y] = \text{m}$

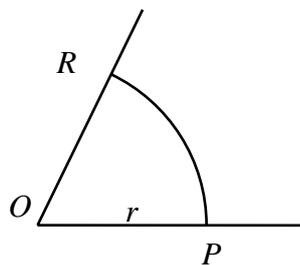
Si l'on veut spécifier l'unité dans laquelle est exprimée une équation, on met l'abréviation de l'unité entre crochets.

Exemple : $v = gt \quad [\text{m/s}]$

2.8 MESURE DES ANGLES

Dans la vie courante, on mesure habituellement les angles en degrés. Cette unité est telle que le cercle complet comporte 360° , soit 90° pour un angle droit. En mathématique et en physique, on utilise le radian, qui permet d'éviter le facteur 360 dans les formules, facteur qui est somme toute arbitraire.

Déf. Le radian est l'angle qui, ayant son sommet au centre d'un cercle, limite sur ce cercle un arc de circonférence dont la longueur est égale au rayon du cercle.



$$\text{Angle } POR = \frac{\text{longueur arc } PR}{r} \quad (2.1)$$

Abréviation : rad

Fig. 2.1

Puisque la longueur de la circonférence du cercle est égale à $2\pi r$, il s'ensuit qu'une circonférence (un tour) compte 2π radians.

$$1 \text{ angle droit} = \frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$$

$$1 \text{ degré vaut } \frac{\pi}{180} \text{ rad}$$

$$1 \text{ radian} = 57,296\dots \text{ degrés}$$

Converti en degrés, minutes et secondes d'arc : $1 \text{ rad} = 57^\circ 17' 45''$.

Le radian se subdivise en dixièmes, centièmes, etc..., selon le système décimal. Le degré se divise en 60 minutes d'arc qui se subdivisent elles-mêmes en 60 secondes d'arc.

L'application des préfixes SI n'est pas autorisée devant les unités d'angle $^\circ$, ' et ''.

Note :

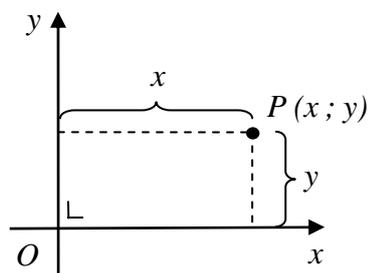
La raison pour laquelle le radian ne figure pas comme huitième unité dans le système SI est la suivante. Etant défini comme quotient de deux longueurs, le radian est en fait un nombre sans dimension. En technique, pour éviter toute confusion, il est vivement conseillé de toujours préciser l'unité d'angle.

3. QUELQUES RAPPELS MATHÉMATIQUES

3.1 MÉTHODE DE LOCALISATION D'UN POINT

Pour pouvoir spécifier la position d'un point, il faut pouvoir le situer par rapport à un objet de référence, fixé une fois pour toutes. Voyons tout d'abord la localisation dans l'espace à deux dimensions, c'est-à-dire dans un plan.

Dans le système dit des **coordonnées cartésiennes rectangulaires**, on choisit un point fixe O et deux axes fixes Ox et Oy perpendiculaires par rapport auxquels on spécifie la position du point mobile P . La **position** de P est **caractérisée par la distance** de P à Ox et Oy .



On désigne la distance de P à Ox par y .

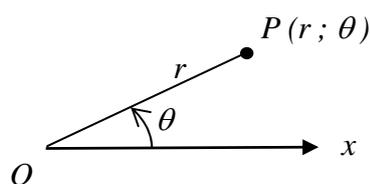
On désigne la distance de P à Oy par x .

Fig. 3.1

On désigne par $P(x; y)$ ou simplement $(x; y)$ les coordonnées de P .

x est l'**abscisse** de P ; y est l'**ordonnée** de P ; $(x; y)$ constituent les coordonnées de P .

Dans le système dit des **coordonnées polaires**, on prend comme référence un point fixe O et un demi axe ayant O comme origine.



O = origine

Ox = axe polaire

r = module

θ = angle (ou argument)

Fig. 3.2

La position de P est déterminée par la distance de O à P , et par l'angle entre l'axe fixe et OP en prenant l'axe de référence comme origine de l'angle.

Selon le phénomène étudié, la formulation mathématique peut être plus aisée dans un système que dans l'autre. Il est donc utile de connaître les formules pour passer d'un système de coordonnées à l'autre.

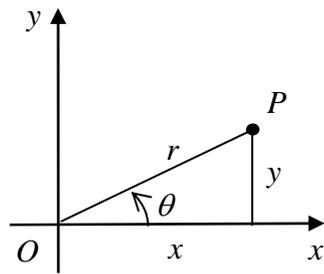


Fig. 3.3

Par le théorème de Pythagore :

$$r^2 = x^2 + y^2$$

D'où : $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

Trigonométriquement : $\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \end{cases}$

Formules de transformation :

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \end{cases}$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) = \arccos\left(\frac{x}{r}\right) = \arcsin\left(\frac{y}{r}\right) \quad (\text{Eqs. 3.1})$$

Note : Lors du calcul numérique de θ , il faut faire attention au signes de x et de y , c'est-à-dire au quadrant dans lequel se trouve le point P .

Position d'un point dans l'espace

Pour situer un point dans l'espace, il faut une troisième coordonnée. On choisira la distance du point P au plan Oxy ; on la désignera par z et on la reportera le long d'un axe Oz perpendiculaire à Oxy .

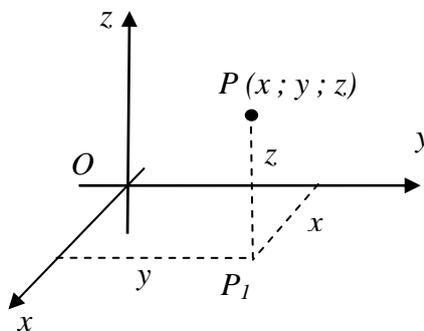


Fig. 3.4

$$z = P_1P = \text{cote}$$

Par convention, le trièdre $Oxyz$ est direct, c'est-à-dire orienté comme les 3 doigts de la main droite :

- $x =$ pouce
- $y =$ index
- $z =$ majeur.

Remarque :

Les coordonnées peuvent être positives ou négatives. Si elles sont reportées sur le demi axe portant la flèche, elles sont positives, dans le cas contraire, négatives.

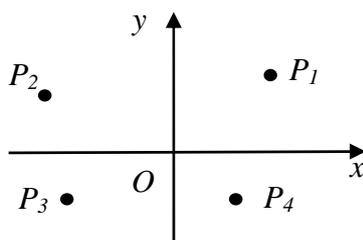


Fig. 3.5

$$P_1 \begin{cases} x_1 > 0 \\ y_1 > 0 \end{cases} \quad P_2 \begin{cases} x_2 < 0 \\ y_2 > 0 \end{cases}$$

$$P_3 \begin{cases} x_3 < 0 \\ y_3 < 0 \end{cases} \quad P_4 \begin{cases} x_4 > 0 \\ y_4 < 0 \end{cases}$$

3.2 LES VECTEURS

De nombreuses observables physiques ont un caractère vectoriel, par exemple le déplacement, la vitesse, le champ électrique, etc... Il est donc important de savoir manipuler les vecteurs.

Déf. On appelle vecteur un segment orienté.



On peut caractériser un vecteur par :

- son origine A, son extrémité B (par définition, l'origine est le départ, l'extrémité l'aboutissement de la flèche),
- son origine, sa longueur, sa direction (c'est-à-dire la droite qui le porte), son sens (sens de la flèche).

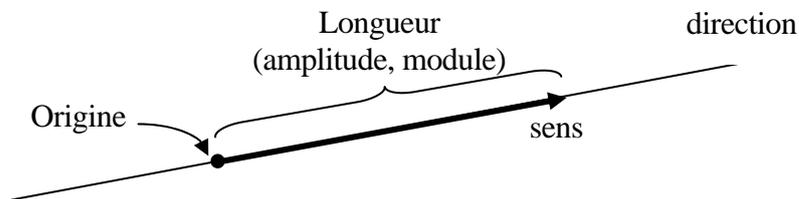


Fig. 3.6

Déf. On appelle vecteur lié un vecteur dont l'origine est fixe.

Déf. On appelle vecteur libre un vecteur dont le sens, la longueur et la direction sont déterminés, mais pas l'origine.

On peut désigner un vecteur par les majuscules désignant son origine et son extrémité surmontées d'une flèche dans le sens du vecteur.



On peut aussi simplement désigner un vecteur par une lettre surmontée d'une flèche.



On notera la longueur de vecteur par la même notation sans flèche ou avec des barres de valeur absolue.

$$AB, v \text{ ou } \left| \overrightarrow{AB} \right|, \left| \vec{v} \right|$$

Egalité de deux vecteurs

Déf. Deux vecteurs sont dits égaux s'ils ont même longueur, même sens et même direction.

Opérations mathématiques sur les vecteurs

Addition

Pour additionner deux vecteurs, on effectue la translation parallèle du second vecteur à l'extrémité du premier. Par définition, le vecteur somme est le vecteur ayant pour origine l'origine du premier vecteur et pour extrémité l'extrémité de second vecteur translaté (règle du parallélogramme).

Ex : vecteur $\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}$

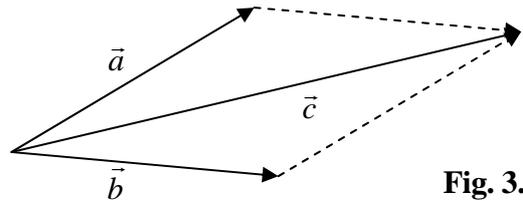


Fig. 3.7

Propriétés de l'addition :

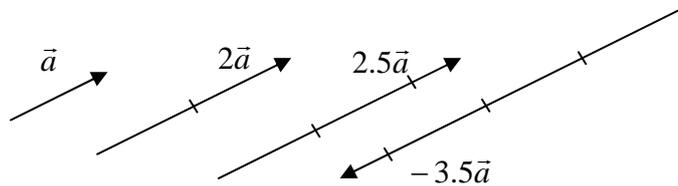
- elle est commutative $\vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a}$
- elle est associative : $(\vec{a} + \vec{b}) + \vec{c} = \vec{a} + (\vec{b} + \vec{c})$

Multiplication par un nombre

Le produit d'un vecteur \vec{a} par un nombre λ est un nouveau vecteur \vec{b} ayant même direction que \vec{a} , de longueur égale à $|\lambda|$ fois la longueur de \vec{a} , de sens identique si λ est positif, ou de sens contraire si λ est négatif.

$\vec{b} = \lambda \vec{a}$
avec $b = |\lambda|a$

Exemples :



Soustraction

Pour soustraire un vecteur \vec{b} d'un vecteur \vec{a} , on lui additionnera le vecteur $-\vec{b}$.

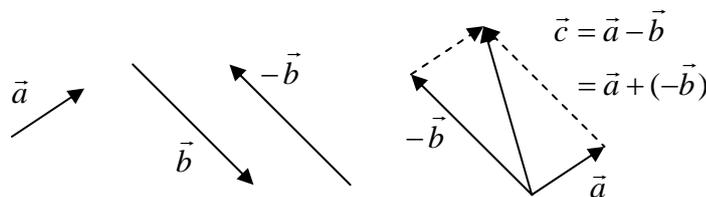


Fig. 3.8

Décomposition

Il est toujours possible de remplacer un vecteur par la somme de deux autres, et ceci d'une infinité de manières.

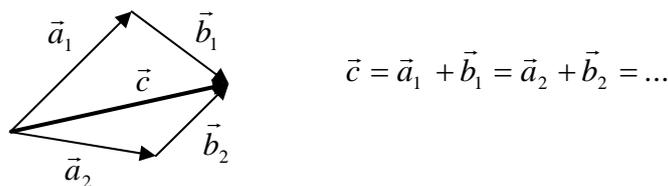


Fig. 3.9

Cette opération s'appelle la décomposition d'un vecteur en deux autres vecteurs.

3.3 EXPRESSION ANALYTIQUE DU CALCUL VECTORIEL

Considérons un système d'axes cartésiens Oxy et un vecteur \vec{a} .

Prenons sur chaque axe un vecteur de longueur unité.

Appelons \vec{i} et \vec{j} ces vecteurs.

$$|\vec{i}| = |\vec{j}| = 1$$

On peut décomposer le vecteur \vec{a} en deux vecteurs parallèles aux axes \vec{a}_x et \vec{a}_y .

$$\vec{a} = \vec{a}_x + \vec{a}_y$$

Les vecteurs \vec{a}_x et \vec{a}_y sont des multiples de \vec{i} et \vec{j} .

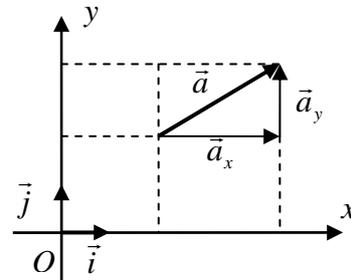


Fig. 3.10

On écrira :
$$\begin{cases} \vec{a}_x = x\vec{i} \\ \vec{a}_y = y\vec{j} \end{cases}$$

Les nombres x et y sont appelés les **composantes** de \vec{a} selon les axes Ox et Oy .

Déf. On appelle **composantes d'un vecteur selon les axes de coordonnées Ox et Oy** les **projections orthogonales de ce vecteur sur Ox et Oy** .

Si un vecteur est donné par les coordonnées de son origine et de son extrémité, on pourra facilement calculer ses composantes.

$$\begin{cases} x = x_2 - x_1 \\ y = y_2 - y_1 \end{cases}$$

Notations :

$$\begin{cases} A(x_1; y_1) \\ B(x_2; y_2) \end{cases} \quad \overrightarrow{AB}(x; y) \text{ ou } \vec{a}(x; y)$$

ou encore en colonne : $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ ou en ligne $(x; y)$

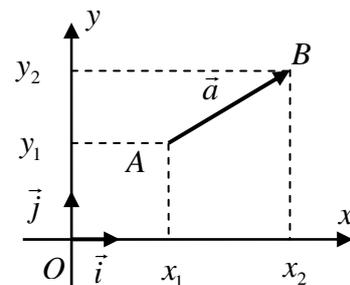


Fig. 3.11

La longueur d'un vecteur s'obtient par le théorème de Pythagore.

$$|\vec{a}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \tag{3.2}$$

Dans l'espace à trois dimensions :

$$|\vec{a}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \tag{3.2'}$$

Addition vectorielle

Soient : $\vec{a}(a_x; a_y)$ et $\vec{b}(b_x; b_y)$.

Les composantes de $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ sont les sommes des composantes de \vec{a} et \vec{b} .

$$\begin{cases} c_x = a_x + b_x \\ c_y = a_y + b_y \end{cases}$$

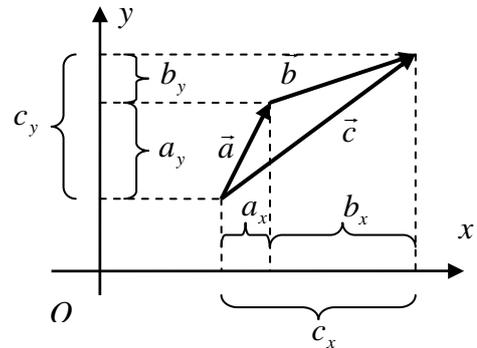


Fig. 3.12

Soustraction vectorielle

Les composantes de $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$ sont les différences des composantes de \vec{a} et \vec{b} .

$$\begin{cases} c_x = a_x - b_x \\ c_y = a_y - b_y \end{cases}$$

Multiplication par un nombre

Soient un vecteur $\vec{a}(a_x; a_y)$ et un nombre λ .

Les composantes de $\vec{c} = \lambda\vec{a}$ sont égales à λ fois les composantes de \vec{a} .

$$\begin{cases} c_x = \lambda a_x \\ c_y = \lambda a_y \end{cases}$$

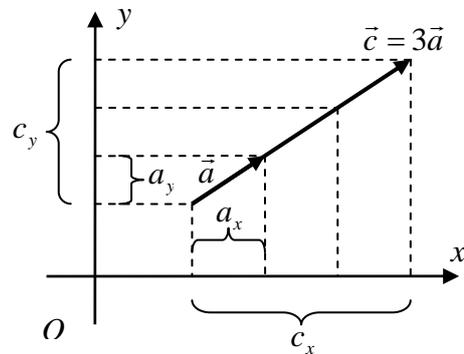


Fig. 3.13

Notation en vecteurs-colonnes de l'addition, de la soustraction et de la multiplication par un nombre.

$$\begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x + b_x \\ a_y + b_y \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x - b_x \\ a_y - b_y \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda a_x \\ \lambda a_y \end{pmatrix}$$

Par opposition aux vecteurs, on appellera **scalaire** une grandeur caractérisée uniquement par un nombre. Par exemple : la surface, le volume, la masse, la température.

3.4 MÉTHODE DE RÉOLUTION DES EXERCICES

En général, pour résoudre un problème, il est vivement conseillé de procéder de la manière suivante :

- faire un schéma qui résume le problème posé ;
- attribuer des lettres aux différentes grandeurs (observables) ;
- résoudre le problème littéralement ;
- introduire les valeurs numériques et calculer.

Contrôler les résultats :

- ordres de grandeurs plausibles ?
- si l'on peut résoudre de problème graphiquement, est-ce que la solution correspond au calcul numérique ?
- unités correctes ?

3.5 ALPHABET GREC

Pour désigner les symboles mathématiques et les nombreuses observables rencontrées en physique, on utilise les lettres grecques en plus des lettres latines.

A	α	alpha	I	ι	iota	P	ρ	rhô
B	β	bêta	K	κ	kappa	Σ	σ	sigma
Γ	γ	gamma	Λ	λ	lambda	T	τ	tau
Δ	δ	delta	M	μ	mu	Y	υ	upsilon
E	ε	epsilon	N	ν	nu	Φ	φ, ϕ	phi
Z	ζ	dzêta	Ξ	ξ	xi	X	χ	khi
H	η	êta	O	\omicron	omicron	Ψ	ψ	psi
Θ	θ	thêta	Π	π	pi	Ω	ω	oméga

En grisé, les lettres à éviter, car semblables aux lettres latines.

3.6 DÉMONSTRATION DU THÉORÈME DE PYTHAGORE

Dans un triangle rectangle, la somme des carrés des cathètes est égale au carré de l'hypoténuse.

(Cathète = côté adjacent à l'angle droit ; hypoténuse = côté opposé à l'angle droit.)

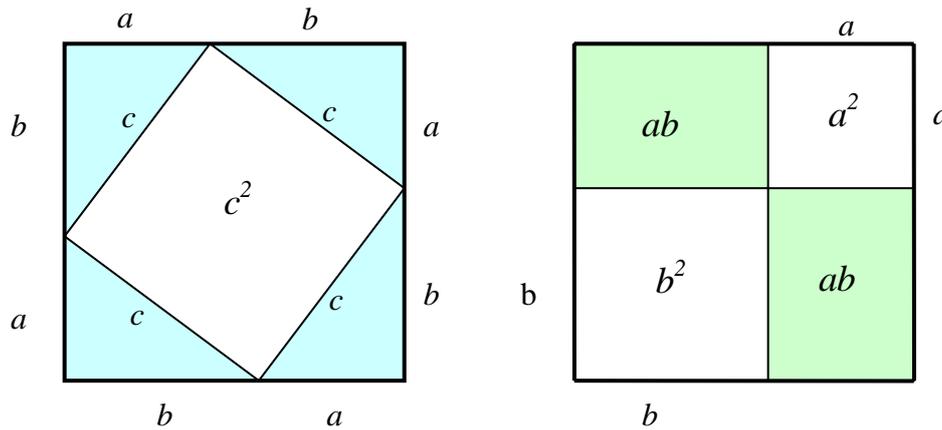


Fig. 3.14

Idée de démonstration :

Exprimer l'aire du grand carré de deux manières différentes.

Egaliser les deux expressions et simplifier. On obtient finalement $a^2 = b^2 + c^2$.

Pythagore,.

Note :

Ce théorème est attribué traditionnellement à Pythagore (École d'Athènes, 580 – 490 av. J.-C.). Toutefois, des documents attestent que les Chinois le connaissaient déjà vers 1100 av J.-C.

La photo ci-contre représente une « démonstration hydraulique » du théorème de Pythagore. Lorsqu'on fait pivoter l'ensemble, le liquide contenu dans le grand carré remplit exactement les deux petits et vice-versa. Ce dispositif se trouve au local D06 du bâtiment de la heig-vd, Route de Cheseaux 1.

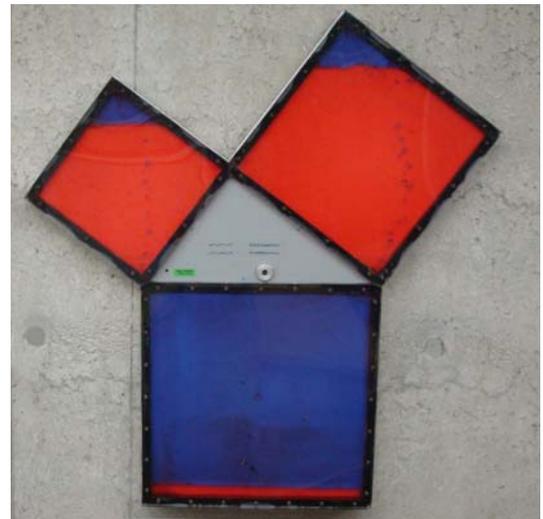


Fig. 3.15