

Complément 1

Alphabet grec

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

Multiples et sous-multiples décimaux

Facteurs	Préfixes	Symboles
1 000 000 000 000 000 000 = 10 ¹⁸	trillion	E
1 000 000 000 000 000 = 10 ¹⁵	billiard	P
1 000 000 000 000 = 10 ¹²	billion	T
1 000 000 000 = 10 ⁹	milliard	G
1 000 000 = 10 ⁶	million	M
1 000 = 10 ³	mille	k
100 = 10 ²	cent	h
10 = 10 ¹	dix	da
1 = 10 ⁰	un	-
0,1 = 10 ⁻¹	dixième	d
0,01 = 10 ⁻²	centième	c
0,001 = 10 ⁻³	millième	m
0,000001 = 10 ⁻⁶	millionième	μ
0,00000001 = 10 ⁻⁹	milliardième	n
0,0000000001 = 10 ⁻¹⁰	billionième	p
0,000000000001 = 10 ⁻¹¹	billiardième	f
0,00000000000001 = 10 ⁻¹⁴	trillionième	a

Complément 3. Constantes universelles

Nombre d'Avogadro	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constante des gaz parfaits	$R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Charge électrique élémentaire	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Masse de l'électron au repos	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Masse du proton au repos	$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Masse du neutron au repos	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Vitesse de la lumière dans le vide	$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Constante universelle de gravitation	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
Permittivité du vide (constante d'influence)	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
Constante de la loi de Coulomb	$k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \quad (k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0})$
Perméabilité magnétique du vide	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$
Constante de Boltzmann	$k = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
Constante de Planck	$h = 6,6252 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Complément 2. Conventions d'écriture

- Un symbole n'est jamais suivi d'un point d'abréviation; il suit immédiatement le nombre et reste invariable.**

Exemples ■ 15 m ; 3 A ; 20 Pa ; 89 V ; 130 kg
- Tous les noms d'unités sont des noms communs, même s'ils dérivent d'un nom propre. Leur première lettre est donc une minuscule et ils suivent les règles habituelles de l'orthographe.**

Exemples ■ un newton ; quinze watts ; huit pascals
- Le préfixe est placé devant le nom ou le symbole de l'unité, sans intervalle, ni trait d'union.**

Exemples ■ 300 mégawatts ou 300 MW
■ 100 kilopascals ou 100 kPa
- Le cumul des préfixes est incorrect.**

Exemples ■ on utilise la nanoseconde [ns] et non pas la millimicroseconde.
- S'il y a risque de confusion entre le symbole d'un multiple ou d'un sous-multiple et celui d'une unité dérivée, il est indispensable de différencier clairement le symbole de l'unité dérivée par l'emploi d'un signe de multiplication ou de division.**

Exemples ■ Le mètrenewton [m · N] (avec le point de multiplication), mais jamais [mN] (qui se lit millinewton).
- Le signe du quotient doit être lu « par » ou « à la » ou « au ».**

Exemples ■ [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$] se lit « mètre par seconde » ou bien « mètre à la seconde » mais jamais « mètresseconde » dont l'abréviation serait [m · s] !
■ [$\frac{\text{km}}{\text{h}}$] se lit « kilomètre par heure » ou bien « kilomètre à l'heure » mais jamais « kilomètreheure » dont l'abréviation serait [km · h] !

Complément 4. Tables de valeurs numériques

Substance	Masse volumique	Dilatation		Température		
		Coefficient de dilatation volumique	Coefficient de dilatation linéaire	Température de fusion	Température d'ébullition	
Valeurs aux conditions normales						
■ Solides et liquides: $\theta = 20^\circ\text{C}$						
■ Gaz: $p = 1013 \text{ hPa}$ et $\theta = 0^\circ\text{C}$ (jusqu'en 1982)						
■ Gaz: $p = 1000 \text{ hPa}$ et $\theta = 0^\circ\text{C}$ à partir de 1982.						
A	Acier (99% Fe; 0,2% C; ...)	$7,85 \cdot 10^3$		$11 \cdot 10^{-6}$	1515	~ 2500
	Air (23% O ₂ ; 76% N ₂ ; ...)	1,29	$3,67 \cdot 10^{-3}$		- 220	- 194
	Aluminium (Al)	$2,7 \cdot 10^3$		$25 \cdot 10^{-6}$	660	2467
	Argent (Ag)	$10,5 \cdot 10^3$		$19 \cdot 10^{-6}$	962	2212
	Azote gazeux (N ₂)	1,25	$3,67 \cdot 10^{-3}$		- 210	- 196
B	Béton	$2,3 \cdot 10^3$		$10 \cdot 10^{-6}$		
	Bois de chêne	$0,7 \cdot 10^3$		$\sim 50 \cdot 10^{-6}$		
	Bois de sapin	$0,5 \cdot 10^3$		$\sim 40 \cdot 10^{-6}$		
	Bronze (alliage de Cu et de Sn)	$8,8 \cdot 10^3$		$\sim 16 \cdot 10^{-6}$	~ 1000	
C	Caoutchouc naturel	$0,93 \cdot 10^3$			~ 75	
	Carbone (graphite)	$2,25 \cdot 10^3$			~ 3700	4827
	Constantan (60% Cu; 40% Ni)	$8,9 \cdot 10^3$		$15 \cdot 10^{-6}$	~ 1200	
	Cuivre (Cu)	$8,92 \cdot 10^3$		$17 \cdot 10^{-6}$	1083	2567
E	Eau (H ₂ O)	$1,00 \cdot 10^3$	$0,2 \cdot 10^{-3}$		0	100
	Etain (Sn)	$7,35 \cdot 10^3$		$20 \cdot 10^{-6}$	232	2270
	Ethanol (alcool à brûler)	$0,79 \cdot 10^3$		$1,1 \cdot 10^{-3}$	- 117	78,5
	Essence (benzine)	$0,7 \cdot 10^3$				
F	Fer (Fe)	$7,86 \cdot 10^3$		$12 \cdot 10^{-6}$	1535	2750
	Fonte grise (95% Fe; 5% C)	$7,2 \cdot 10^3$		$9 \cdot 10^{-6}$	1177	
G	Gaz carbonique (CO ₂)	1,98	$3,72 \cdot 10^{-3}$		- 57 ^(300, pression)	- 78,5
	Glycérine (C ₃ H ₅ (OH) ₃)	$1,26 \cdot 10^3$		$0,5 \cdot 10^{-3}$	20	290
	Granit	$2,6 \cdot 10^3$		$\sim 7 \cdot 10^{-6}$	~ 1250	
	Glace (H ₂ O)	$0,917 \cdot 10^3$			0	
H	Hélium (He)	0,178	$3,66 \cdot 10^{-3}$		- 272	- 269
	Huile de chauffage (mazout)	$0,84 \cdot 10^3$		$1 \cdot 10^{-3}$	~ - 15	
	Huile d'olive ou de tournesol	$0,88 \cdot 10^3$		$0,7 \cdot 10^{-3}$	~ - 10	~ 300
	Hydrogène gazeux (H ₂)	0,0899	$3,66 \cdot 10^{-3}$		- 259	- 253

Substance	Masse volumique	Dilatation		Température	
		Coefficient de dilatation volumique	Coefficient de dilatation linéaire	Température de fusion	Température d'ébullition
Valeurs aux conditions normales					
■ Solides et liquides: $\theta = 20^\circ\text{C}$					
■ Gaz: $p = 1013 \text{ hPa}$ et $\theta = 0^\circ\text{C}$ jusqu'en 1982					
■ Gaz: $p = 1000 \text{ hPa}$ et $\theta = 0^\circ\text{C}$ à partir de 1982					
	ρ kg · m ⁻³	γ °C ⁻¹	α °C ⁻¹	θ_f °C	θ_e °C
I Invar (64% Fe; 36% Ni)	$8,13 \cdot 10^3$		$2 \cdot 10^{-6}$	~ 1450	
L Laiton (70% Cu; 30% Zn)	$8,47 \cdot 10^3$		$18 \cdot 10^{-6}$	932	
Liège	$0,2 \cdot 10^3$				
Marbre	$2,7 \cdot 10^3$				
M Mercure (Hg)	$13,6 \cdot 10^3$	$0,18 \cdot 10^{-3}$		- 39	357
Méthanol	$0,791 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-3}$		- 94	65
N Nichrome (60% Ni; 12% Cr; 28% Fe)	$8,2 \cdot 10^3$			~ 1400	~ 3000
Nickel (Ni)	$8,9 \cdot 10^3$		$13 \cdot 10^{-6}$	1455	2730
Nylon (polyamide PA 6)	$1,14 \cdot 10^3$		$70 \cdot 10^{-6}$	215	
O Or (Au)	$18,9 \cdot 10^3$		$14 \cdot 10^{-6}$	1064	3080
Oxygène gazeux (O ₂)	1,43			- 218	- 183
P Platine (Pt)	$21,5 \cdot 10^3$		$9 \cdot 10^{-6}$	1772	~ 3800
Plomb (Pb)	$11,3 \cdot 10^3$		$29 \cdot 10^{-6}$	327	1740
PVC (chlorure de polyvinyle)	$1,35 \cdot 10^3$		$78 \cdot 10^{-6}$	160	
Plexiglas (verre acrylique)	$1,18 \cdot 10^3$		$68 \cdot 10^{-6}$	210	
Pétrole lampant	$0,77 \cdot 10^3$				
Polyester et fibres de verre	$1,6 \cdot 10^3$		$21 \cdot 10^{-6}$		
Q Quartz	$2,65 \cdot 10^3$		$0,5 \cdot 10^{-6}$	1610	2400
Sagex (polystyrène expansé)	$0,02 \cdot 10^3$				
S Silicone (caoutchouc)	$1,25 \cdot 10^3$				
Silicium (Si)	$2,33 \cdot 10^3$		$3 \cdot 10^{-6}$	1410	2355
T Tungstène (W)	$19,4 \cdot 10^3$		$4,5 \cdot 10^{-6}$	3410	5660
U Uranium (U)	$19 \cdot 10^3$				
V Verre ordinaire	$2,6 \cdot 10^3$		$9 \cdot 10^{-6}$		
Verre pyrex	$2,32 \cdot 10^3$		$3 \cdot 10^{-6}$		
Z Zinc (Zn)	$7,14 \cdot 10^3$		$35 \cdot 10^{-6}$	420	907

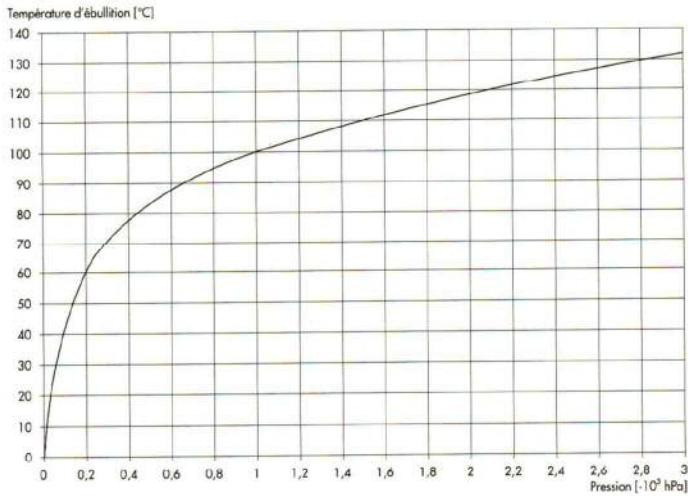
Substance	Chaleur			Résistivité	
	Chaleur massique	Chaleur latente de fusion	Chaleur latente de vaporisation	Résistivité	Coefficient de température de la résistivité
Valeurs aux conditions normales					
■ Solides et liquides: $\theta = 20^\circ\text{C}$					
■ Gaz: $p = 1013 \text{ hPa}$ et $\theta = 0^\circ\text{C}$ jusqu'en 1982					
■ Gaz: $p = 1000 \text{ hPa}$ et $\theta = 0^\circ\text{C}$ à partir de 1982					
	c J · kg ⁻¹ · °C ⁻¹	l_f J · kg ⁻¹	l_v J · kg ⁻¹	ρ Ω · m	α °C ⁻¹
I Invar (64% Fe; 36% Ni)	$0,5 \cdot 10^3$				
L Laiton (70% Cu; 30% Zn)	$0,39 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^5$		$7 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-3}$
M Mercure (Hg)	$0,14 \cdot 10^3$	$0,11 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$98,4 \cdot 10^{-8}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$
Méthanol	$2,72 \cdot 10^3$	$0,99 \cdot 10^5$			
N Nichrome (60% Ni; 12% Cr; 28% Fe)				~ $100 \cdot 10^{-8}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$
Nickel (Ni)	$0,44 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^5$		$6,84 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-3}$
Nylon (polyamide PA 6)	$1,36 \cdot 10^3$			$5 \cdot 10^{10}$	
O Or (Au)	$0,13 \cdot 10^3$	$0,64 \cdot 10^5$		$2,21 \cdot 10^{-8}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$
Oxygène gazeux (O ₂)	$0,92 \cdot 10^3$	$0,14 \cdot 10^5$	$2,13 \cdot 10^5$		
P Platine (Pt)	$0,13 \cdot 10^3$	$1,01 \cdot 10^5$		$10,6 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
Plomb (Pb)	$0,12 \cdot 10^3$	$0,25 \cdot 10^5$		$20,6 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-3}$
PVC (chlorure de polyvinyle)	$1,05 \cdot 10^3$			10^{14}	
Plexiglas (verre acrylique)	$1,45 \cdot 10^3$			10^{17}	
Polyester et fibre de verre				10^{12}	
Q Quartz	$0,8 \cdot 10^3$				
S Silicium (Si)	$0,7 \cdot 10^3$	$14,1 \cdot 10^5$			
T Tungstène (W)	$0,13 \cdot 10^3$	$1,92 \cdot 10^5$		$5,6 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-3}$
V Verre ordinaire	$0,84 \cdot 10^3$			10^{12}	
Z Zinc (Zn)	$0,39 \cdot 10^3$	$1,02 \cdot 10^5$		$5,9 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$

Substance	Chaleur			Résistivité	
	Chaleur massique	Chaleur latente de fusion	Chaleur latente de vaporisation	Résistivité	Coefficient de température de la résistivité
Valeurs aux conditions normales					
■ Solides et liquides: $\theta = 20^\circ\text{C}$					
■ Gaz: $p = 1013 \text{ hPa}$ et $\theta = 0^\circ\text{C}$ jusqu'en 1982					
■ Gaz: $p = 1000 \text{ hPa}$ et $\theta = 0^\circ\text{C}$ à partir de 1982					
	c J · kg ⁻¹ · °C ⁻¹	l_f J · kg ⁻¹	l_v J · kg ⁻¹	ρ Ω · m	α °C ⁻¹
A Acier (99% Fe; 0,2% C; ...)	$0,46 \cdot 10^3$			~ $12 \cdot 10^{-8}$	~ $6 \cdot 10^{-3}$
Air (23% O ₂ ; 76% N ₂ ; ...)	$1 \cdot 10^3$				
Aluminium (Al)	$0,90 \cdot 10^3$	$3,96 \cdot 10^5$		$2,7 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Argent (Ag)	$0,23 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^5$		$1,59 \cdot 10^{-8}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$
Azote gazeux (N ₂)	$1,04 \cdot 10^3$	$0,26 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$		
B Béton	~ $0,9 \cdot 10^3$			~ 10^9	
Bois de chêne	~ $2,4 \cdot 10^3$			~ 10^{11}	
Bois de sapin	~ $1,5 \cdot 10^3$			~ 10^{11}	
C Carbone (graphite)	$0,72 \cdot 10^3$			$1,38 \cdot 10^{-5}$	
Constantan (60% Cu; 40% Ni)	$0,41 \cdot 10^3$			$49 \cdot 10^{-8}$	~ $0,01 \cdot 10^{-3}$
Cuivre (Cu)	$0,39 \cdot 10^3$	$2,05 \cdot 10^5$		$1,63 \cdot 10^{-8}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$
E Eau (H ₂ O)	$4,18 \cdot 10^3$		$23 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	
Etain (Sn)	$0,21 \cdot 10^3$	$0,6 \cdot 10^5$		$11 \cdot 10^{-8}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$
Ethanol (alcool à brûler)	$2,46 \cdot 10^3$	$1,09 \cdot 10^5$	$8,5 \cdot 10^5$		
F Fer (Fe)	$0,44 \cdot 10^3$	$2,67 \cdot 10^5$	$63,1 \cdot 10^5$	$9,71 \cdot 10^{-8}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$
Fonte grise (95% Fe; 5% C)	$0,53 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^5$		$67 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-3}$
G Gaz carbonique (CO ₂)	$0,84 \cdot 10^3$		$1,81 \cdot 10^5$	$5,9 \cdot 10^5$	
Glycérine (C ₃ H ₈ (OH) ₃)	$2,4 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^5$			
Granit	$0,84 \cdot 10^3$			~ 10^5	
Glace (H ₂ O)	$2,06 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^5$			
H Hélium (He)	$5,2 \cdot 10^3$	$0,04 \cdot 10^5$	$0,25 \cdot 10^5$		
Huile de chauffage (mazout)	$2,1 \cdot 10^3$				
Huile d'olive ou de tournesol	$2 \cdot 10^3$				
Hydrogène gazeux (H ₂)	$14,3 \cdot 10^3$	$0,58 \cdot 10^5$	$4,52 \cdot 10^5$		

Complément 5. Pouvoir calorifique moyen de quelques combustibles

Combustible	J · kg ⁻¹
Alcool à brûler (éthanol)	$27 \cdot 10^6$
Anthracite (charbon)	$32 \cdot 10^6$
Bois	$15 \cdot 10^6$
Briquettes (lignite)	$19 \cdot 10^6$
Coke (charbon)	$29 \cdot 10^6$
Essence	$45 \cdot 10^6$
Gaz butane	$50 \cdot 10^6$
Gaz naturel (méthane)	$56 \cdot 10^6$
Gaz propane	$50 \cdot 10^6$
Huile de chauffage (mazout)	$44 \cdot 10^6$
Huile comestible	$39 \cdot 10^6$
Hydrogène	$120 \cdot 10^6$
Pétrole lampant	$40 \cdot 10^6$
Stéarine (bougie)	$34 \cdot 10^6$
Tourbe	$14 \cdot 10^6$

Complément 6. Température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression



Complément 8. Indices de réfraction

(lumière jaune: raie D du sodium; $\lambda = 0,5893 \mu\text{m}$)

Solides (à 20 °C)

- diamant: 2,42
- glace: 1,31
- plexiglas: 1,49
- quartz: 1,54
- verre crista: 1,60
- verre ordinaire: 1,50
- verres spéciaux: 1,5 à 2,1

Liquides (à 20 °C)

- alcool: 1,36
- acétone: 1,36
- benzène: 1,50
- sulfure de carbone: 1,63
- eau: 1,33
- huile de cèdre: 1,52
- glycérine: 1,47
- butanol: 1,40

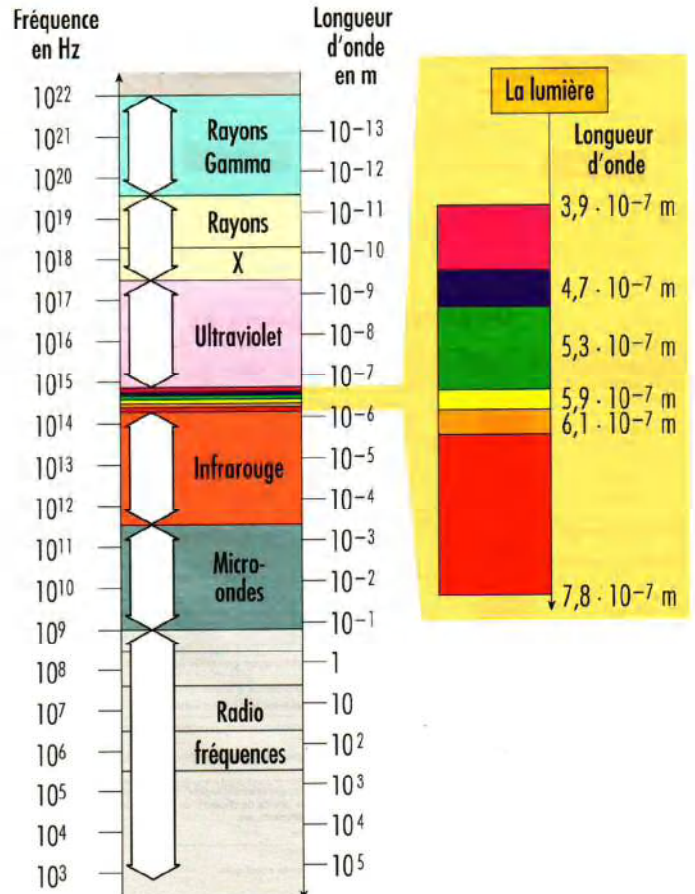
Gaz (conditions normales)

- air: 1,000293
- azote: 1,000297
- hélium: 1,000036
- hydrogène: 1,000132
- gaz carbonique: 1,000448
- oxygène: 1,000271

Complément 7. Symboles pour les schémas électriques

Croisement de conducteurs sans connexion		Voltmètre	
Croisement de conducteurs avec connexion		Ampoule	
Mise à la masse		Générateur	
Mise à terre		Pile	
Interrupteur ouvert		Condensateur	
Interrupteur fermé		Condensateur variable	
Résistance		Bobine	
Photorésistance		Moteur	
Résistance variable		Diode	
Fusible		Transformateur	
Ampèremètre			

Complément 9. Ondes électromagnétiques



Complément 10. Données sur le système solaire

Astre	Symbole	Dieu grec	Dieu romain	Jour de la semaine	Distance moyenne au Soleil (x 10 ⁶ km)	diamètre équatorial (km)	masse (x 10 ²⁴ kg)	volume (x 10 ¹⁰ km ³)	masse volumique (10 ³ kg/m ³)	gravitation de surface g à l'équateur (N/kg)	température moyenne au sol (°C)	période de révolution autour du Soleil (jours)	temps de trajet de la lumière (min)	nombre de satellites connus en 2000
Soleil	☉	Hélios	Sol	Sunday / Sonntag	0	1 400 000	1 982 111	1 400 000	1,42	273,4	5770	365,256 jours	8 min	0
Mercure	☿	Aphrodite / Hermès	Mercure	mardi / mercoledì	58	4878	0,33	0,054	6,11	3,78	-170 à 390	88 jours	17 min	0
Vénus	♀	Éosphoros / Hesperos	Vénus	vendredi / venerdì	108	12 100	4,87	0,95	5,13	8,6	450 à 600	225 jours	243 jours	0
Terre	♁	Gaïa	Tellus	jeudi / giovedì	150	12 800	5,97	1,08	5,52	9,78	-88 à 48	365,256 jours	23 min	1
Lune	☾	Artemis / Hécaté / Séléné	Diana	lundi / lunedì / Montag / Monday	0,384 (distance à la Terre)	3500	0,0735	0,0216	3,4	1,63	-180 à 120	27,1 h	1,3 s	0
Mars	♂	Ares	Mars	mardi / martedì	228	6800	0,642	0,162	3,76	3,72	-133 à 27	687 jours	24 h 37 min	2
astéroïdes					420									
Jupiter	♃	Zeus	Jupiter	jeudi / giovedì / Donnerstag	778	142 600	1 900	1 413	1,34	22,38	-140	11 ans 315 jours	9 h 50 min	16
Saturne	♄	Cronos	Saturne	Saturday	1 427	120 000	568	826	0,688	9,05	-160	29 ans 167 jours	10 h 30 min	18
Uranus	♅	Dionisos	Uranus		2 870	52 300	86,6	63,7	1,36	7,77	-180	84 ans 8 jours	15 h 35 min	21
Neptune	♆	Poseidon	Neptune		4 500	50 700	103	77,7	1,33	11	-200	164 ans 282 jours	15 h 48 min	8
Pluton	♇	Hades	Pluton		5 900	2300	0,012	0,0044	≈ 2	20 à 40	-238	248 ans 157 jours	6 h 9 min 17 ms	1

Complément 12. Naissance, vie et mort des étoiles

C'est dans les étoiles que les interactions fondamentales sont mises en concurrence de façon spectaculaire.

La naissance des étoiles est due à l'interaction gravitationnelle. En effet, une étoile naît au cœur d'un vaste nuage de gaz qui s'effondre sous l'effet de sa propre masse. Le gaz s'échauffe et lorsque sa température atteint une dizaine de millions de degrés, les réactions de fusion de l'hydrogène en hélium démarrent... et le nuage de gaz devient étoile.

Ces réactions thermonucléaires produisent une pression qui s'oppose à l'effondrement de l'étoile sur elle-même due à la gravitation. L'étoile vit et reste stable tant qu'il y a de l'hydrogène.

Lorsque l'étoile a utilisé tout son combustible nucléaire, l'effondrement du cœur de l'étoile peut se poursuivre et l'étoile meurt de façon plus ou moins spectaculaire, par exemple en expulsant son atmosphère (nova, supernova). Trois scénarios sont alors possibles.

- 1) Cas des étoiles où le résidu central a une masse allant jusqu'à 1,4 masses solaires. Ces étoiles atteignent un état stable qui s'explique par un équilibre entre la gravitation qui condense la matière et l'interaction électrique qui s'y oppose. Elles deviennent alors des naines blanches et ont une taille comparable à celle de la Terre.

sphère de quelques kilomètres de diamètre. Sa structure ressemble à celle d'un gigantesque noyau atomique. Sa densité moyenne est alors de 500 millions de tonnes par centimètre cube, ce qui équivaut à mettre la totalité de la population mondiale dans un volume équivalent à celui de 10 gouttes d'eau.

- 3) Dans le cas d'étoiles où le résidu stellaire vaut plus de 6 masses solaires, l'interaction nucléaire forte elle-même n'est plus suffisante pour s'opposer à l'effondrement gravitationnel. Le résidu devient alors si petit et donc si dense que la gravitation de surface ne laisse plus rien échapper, même pas la lumière. La gravité comprime inexorablement l'astre jusqu'à l'état le plus étrange qu'on puisse imaginer: le trou noir. Toute la masse de l'étoile se trouve concentrée en un point. Pour devenir un trou noir, la Terre devrait être comprimée en un volume inférieur à celui d'un petit pois (0,87 cm de diamètre). Pour l'instant (1995), on ne sait pas ce que devient la matière dans un trou noir!



Une étoile meurt en expulsant son atmosphère constituée essentiellement d'hydrogène et d'hélium (ici la nébuleuse Hélix).

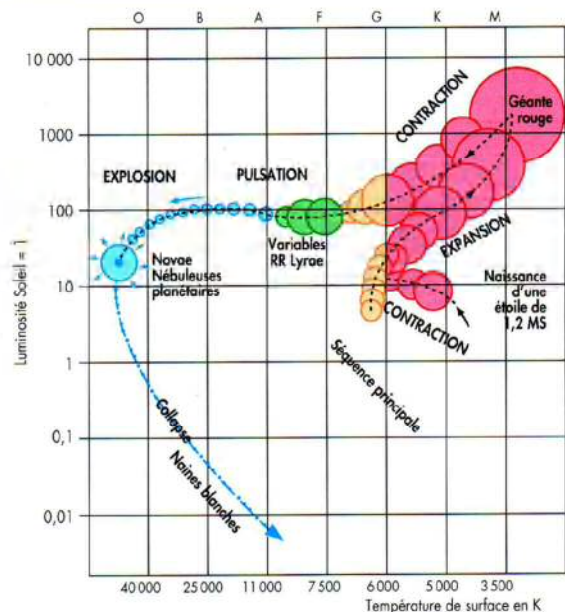
Complément 11. Étoiles les plus proches et les plus brillantes

Les 20 étoiles les plus proches

Nom	Constellation	Distance en années-lumière	Nom	Constellation	Distance en années-lumière
Proxima Centauri	Centaur	4,22	Ross 154	Sagittaire	9,45
Rigel (α Centauri A)	Centaur	4,35	Ross 248	Andromède	10,27
α Centauri B	Centaur	4,35	ε Eridani	Éridan	10,76
Étoile de Barnard	Ophiucus	5,90	Luyten 789-6	Verseau	10,76
Wolf 359	Lion	7,60	Ross 128	Vierge	10,82
Lalande 21 185	Grande Ourse	8,12	δ1 Cygni A	Cygne	11,08
Sirius A	Grand Chien	8,64	δ1 Cygni B	Cygne	11,08
Sirius B	Grand Chien	8,64	ε Indi	Indien	11,21
UV Ceti A	Baleine	8,87	Procyon A	Petit Chien	11,41
UV Ceti B	Baleine	8,87	Procyon B	Petit Chien	11,41

Les 20 étoiles les plus brillantes

Nom	Constellation	Distance en années-lumière	Nom	Constellation	Distance en années-lumière
Sirius	Grand Chien	8,64	Altair	Aigle	16,1
Canopus	Carène	190	Bételgeuse	Orion	650
Rigel (α Centauri A)	Centaur	4,35	Aldébaran	Taureau	68
Arcturus	Bouvier	36	Acrux	Croix du Sud	260
Véga	Lyre	26,5	Épi	Vierge	260
Capella	Cocher	45	Antarès	Scorpion	425
Rigel	Orion	660	Pollux	Gémeaux	36
Procyon A	Petit Chien	11,41	Fomalhaut	Poisson austral	23
Achernar	Éridan	130	Deneb	Cygne	1600
Agema	Centaur	390	Mimosa	Croix du Sud	490

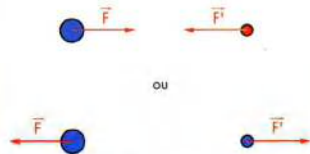


Représentation graphique de l'évolution d'une étoile ayant une masse de 1,2 masse solaire.

Complément 13. Les différentes interactions

27 Les interactions

Si l'on peut facilement constater l'existence d'une force par ses effets, il est moins évident de comprendre la nature même des forces. Pour pouvoir décrire toutes les forces qui existent dans l'Univers, on a recouru à un concept plus général qui est celui de l'interaction. Une interaction est une influence réciproque qui s'exerce entre les particules élémentaires. Elle est représentée par deux forces d'intensité égale mais de sens contraire.



L'interaction est attractive ou répulsive.

A l'heure actuelle, on est parvenu à réduire à trois le nombre d'interactions fondamentales pour décrire le comportement de la matière.

a) L'interaction gravitationnelle

Lorsque deux corps sont en présence, il s'exerce une attraction entre eux à cause de leurs masses. Cela veut dire, par exemple, que la Lune attire autant la Terre que la Terre attire la Lune.

Cette interaction, uniquement attractive, permet d'expliquer les phénomènes suivants: la chute des corps, la formation des planètes, des étoiles et des galaxies, la sphéricité des astres, la satellisation de la Lune autour de la Terre, des planètes autour du Soleil, les marées, etc.

b) L'interaction électrofaible

Elle regroupe les interactions électrique, magnétique et nucléaire faible dans une même théorie; elle peut être attractive ou répulsive. Le prix Nobel de physique de 1979 décerné aux savants A. Salam, S. Glashow et S. Weinberg a récompensé des travaux liés à cette théorie. Cinq ans plus tard, au CERN, Carlo Rubia et Simon van der Meer apportent une confirmation expérimentale (Nobel 1984).

L'interaction électrofaible permet d'interpréter les phénomènes suivants: le confinement des électrons autour du noyau des atomes (interaction électrique), toutes les réactions chimiques (interaction électrique), la radioactivité (interaction nucléaire faible), l'attraction ou la répulsion de deux aimants (interaction magnétique), la tension dans une corde (interaction électrique), la force musculaire (interaction électrique), etc.



La cohésion du liquide s'explique par l'interaction électrique.

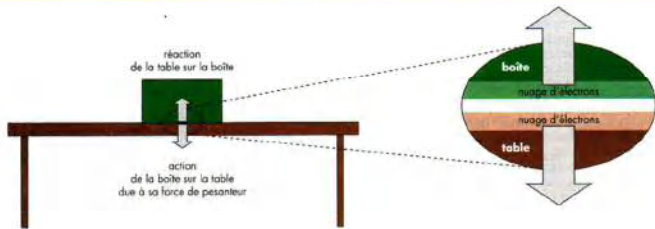
Lorsque deux corps solides sont en contact, la représentation des forces agissant au point de contact n'est qu'une interprétation macroscopique de la répulsion entre les électrons de ces corps. En réalité, les objets ne se touchent pas... bien qu'ils soient extrêmement proches!

c) L'interaction nucléaire forte

Elle est nécessaire pour expliquer la cohésion entre les nucléons (protons et neutrons) constituant le noyau des atomes, malgré les forces de répulsion électrique qui s'exercent entre les protons. L'interaction nucléaire forte agit à de très faibles distances (10^{-10} mètre).

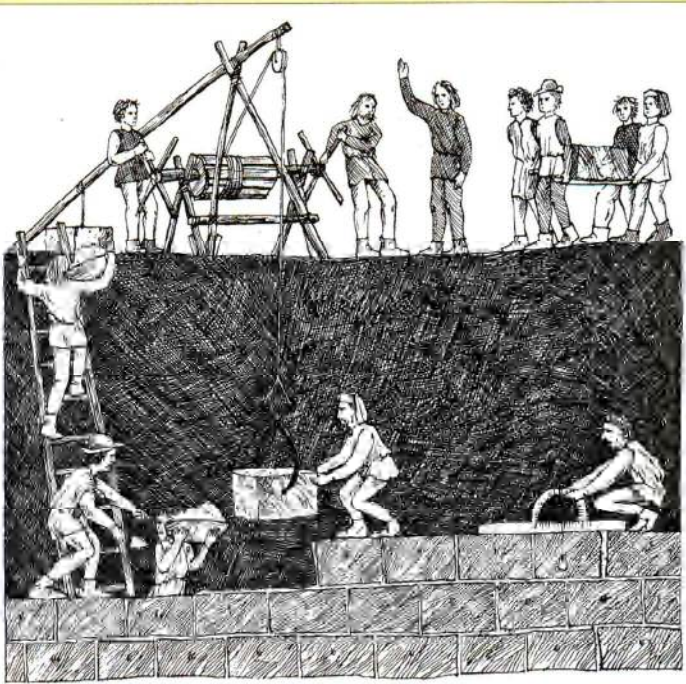
L'interaction nucléaire forte permet l'interprétation des phénomènes suivants: structure du noyau des éléments chimiques, fusion nucléaire (source d'énergie du Soleil), etc.

Les physiciens cherchent actuellement à réunir en un seul modèle les interactions électrofaible et nucléaire forte. Ce modèle a pour nom: **théorie de la Grande Unification**; elle apporterait bon nombre de réponses à des questions concernant les premiers instants de l'Univers.



Interprétation du contact de deux corps solides (les proportions ne sont pas respectées).

Complément 14. Moyens de levage

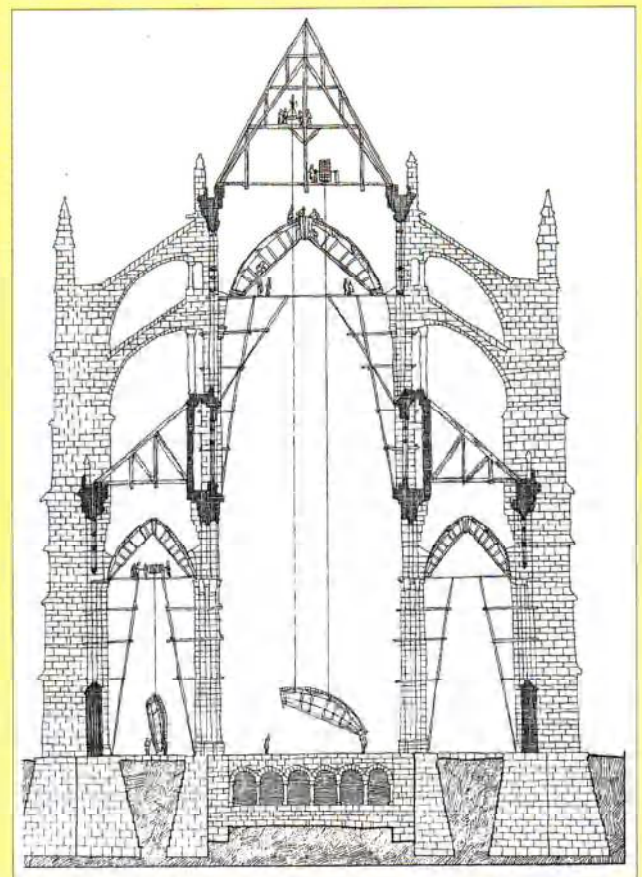


Le 14 avril 1253, l'évêque de Chateaux bénit le premier bloc de calcaire alors qu'il descendait prendre sa place sur le hérisson de pierres couvrant la terre argileuse au fond de l'excavation.

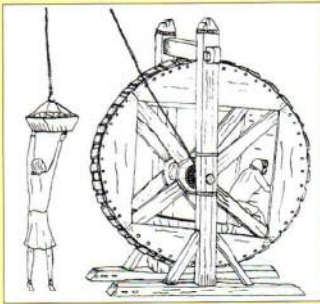
Les gâcheurs tenaient prêt leur mélange soigneusement dosé de sable, de chaux et d'eau. Les manœuvres, portant sur l'épaule une auge de mortier, allaient et venaient sur les échelles. Les maçons disposaient les pierres l'une sur

l'autre, étaient à la truelle une couche de mortier entre chaque bloc et sur chaque rangée. Ainsi, en séchant, le mortier souderait les pierres durablement.

Le maître maçon déplaçait constamment son niveau pour s'assurer que les pierres étaient bien horizontales. Un fil à plomb lui permettait de veiller également à ce que le mur s'élevât exactement à la verticale. La moindre erreur dans les fondations risquait de compromettre la solidité de la superstructure.



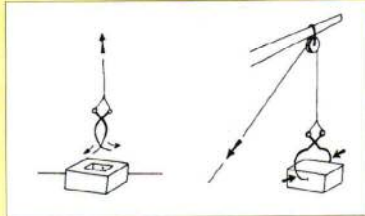
Jusqu'au XI^e siècle, on monte les pierres à dos d'homme, à partir du XII^e, les appareils de levage se généralisent.



La roue à écrouil



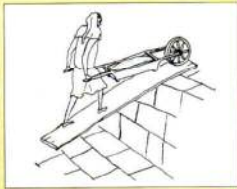
Roue



La louve



Une grue



Plan incliné



Marques de louve dans la pierre

Complément 16. Origine de la force d'Archimède

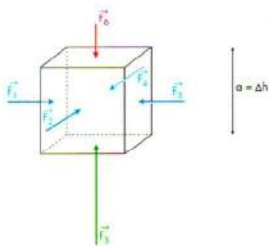
Pour expliquer d'où vient cette force, examinons comment agissent les forces pressantes sur les six faces d'un cube immergé.

La pression au centre de chaque face latérale a la même valeur, car ces centres se trouvent à la même profondeur.

La différence de pression entre la face inférieure et supérieure se calcule avec la relation suivante:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h = \rho \cdot g \cdot a$$

- Δp différence de pression en [Pa]
- ρ masse volumique du liquide en [kg/m³]
- g gravitation terrestre = 9,81 [N/kg] ou [m/s²]
- Δh dénivellation en [m]
- a arête du cube en [m]



Sur les faces 1, 2, 3 et 4, les forces pressantes s'annulent puisqu'elles sont situées à la même profondeur et opposées deux à deux.

Par contre, les forces qui s'exercent sur les faces supérieure et inférieure du cube sont différentes: le liquide exerce une force pressante plus intense sur la face inférieure que sur la face supérieure ($F_5 > F_6$). Il en résulte une poussée vers le haut: la force d'Archimède.

Calculons l'intensité F_A de la force d'Archimède:

$$F_A = F_5 - F_6 = p_5 \cdot a^2 - p_6 \cdot a^2 = (p_5 - p_6) \cdot a^2$$

$$F_A = \Delta p \cdot a^2 = \rho \cdot g \cdot a \cdot a^2 = \rho \cdot g \cdot a^3$$

a^3 représente le volume V du cube, donc:

$$F_A = \rho_{\text{liquide}} \cdot g \cdot V$$

- F_A intensité de la force d'Archimède en [N]
- ρ_{liquide} masse volumique du liquide en [kg/m³]
- g gravitation terrestre = 9,81 [N/kg] ou [m/s²]
- V volume du cube en [m³]

Ce résultat est généralisable à un solide de forme quelconque.

Remarques

Si le corps immergé est indéformable et si le fluide est incompressible, la force d'Archimède ne dépend pas de la profondeur. Les forces s'exerçant sur les faces supérieure et inférieure augmentent ou diminuent de la même valeur; leur différence est constante.

Le point d'application de la force d'Archimède est appelé *centre de poussée*, c'est le centre de gravité du fluide déplacé. Ce point n'est pas toujours confondu avec le centre de gravité du corps immergé, en particulier lorsqu'il flotte (bateau, voir ex. 16).

Complément 15. Mesure de la pression sanguine

Pour «prendre» la pression sanguine (tension artérielle) de la personne qu'il examine, le médecin entoure le bras d'une manchette qu'il gonfle au moyen d'une petite pompe à main.

Un manomètre à mercure, gradué en mm, indique la pression de l'air dans la manchette.

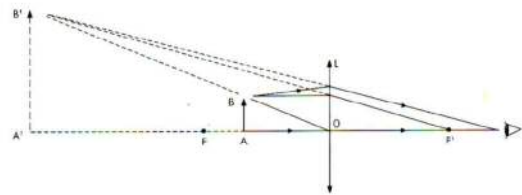
Au moyen d'un stéthoscope, le médecin écoute le flux sanguin passant dans l'artère humérale au niveau du coude. Il commence par gonfler la manchette de manière à ne plus entendre de bruit (la circulation sanguine est bloquée), puis il laisse la pression diminuer jusqu'à ce qu'il entende un souffle lors des contractions cardiaques (systoles). Ce souffle indique que le sang commence à passer (flux turbulent). La pression indiquée par le manomètre à ce moment est appelée *pression systolique*. C'est la pression due à la contraction du cœur (pression maximale).

Ensuite, le médecin laisse encore la manchette se dégonfler jusqu'à ce que le bruit de souffle disparaisse. A cet instant, il peut lire sur le manomètre la pression diastolique, qui est la pression sanguine durant la phase de repos du cœur (diastole).



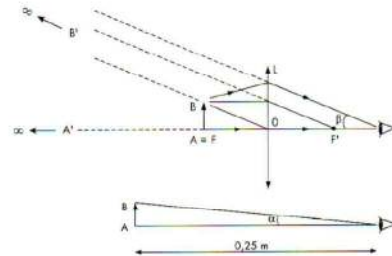
Complément 17. Instruments d'optique

La loupe



Une loupe est une lentille convergente généralement fixée sur une monture munie d'un manche.

Le grossissement d'une loupe



Dans le but de caractériser une loupe, les constructeurs indiquent habituellement son grossissement sur la monture. Celui-ci est défini de la manière suivante:

Le **grossissement** G d'une loupe est le rapport du diamètre apparent β de l'image virtuelle d'un objet, quand elle est rejetée à l'infini, au diamètre apparent α du même objet, situé à 0,25 mètre de l'œil.

On a donc, par définition:

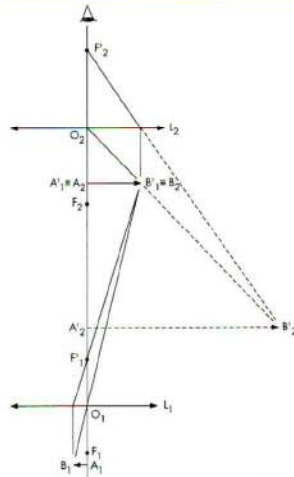
$$G = \frac{\beta}{\alpha}$$

Cette définition est aussi valable pour les microscopes.

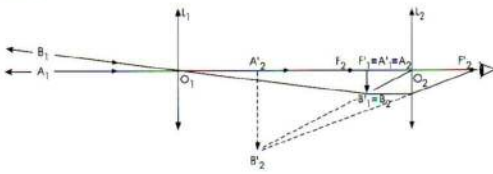
Le microscope

Un **microscope** est un instrument destiné à l'observation de très petits objets. Il comprend les deux éléments optiques suivants:

- l'**objectif** L_1 dont la fonction est de donner d'un petit objet lumineux A_1B_1 une image réelle $A'_1B'_1$ fortement agrandie.
- l'**oculaire** L_2 qui est une loupe donnant de l'image $A'_1B'_1$ (qui devient l'objet A_2B_2) l'image virtuelle $A''_2B''_2$.



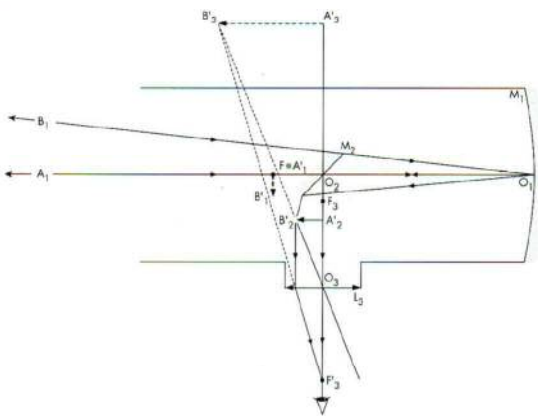
La lunette astronomique



Une **lunette astronomique** est un instrument destiné à l'observation des astres. Une lunette astronomique comprend les deux éléments optiques suivants:

- l'**objectif** L_1 , dont la fonction est de donner, d'un objet A_1B_1 très éloigné de son centre optique O_1 , une image réelle $A'_1B'_1$ située dans un de ses plans focaux.
- l'**oculaire** L_2 , qui est une loupe donnant de l'image $A'_1B'_1$ une image virtuelle $A''_2B''_2$.

Les télescopes

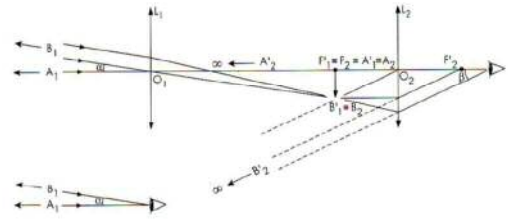


En astronomie, il est important de pouvoir collecter un maximum de lumière provenant des astres que l'on observe. Pour ce faire, il est nécessaire d'augmenter le diamètre de l'objectif. La fabrication de systèmes de lentilles de plus de 1 mètre de diamètre présentant de très grandes difficultés, il a fallu, pour réaliser de plus grands instruments, substituer à un système de lentilles, un miroir parabolique. On obtient ainsi un autre type d'instruments appelés **télescopes**.

Remarque: *Newton, vers 1671, construisit le premier télescope.*



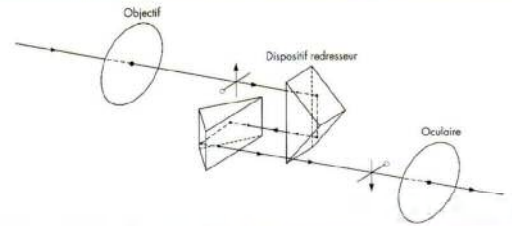
Le grossissement d'une lunette



Le **grossissement** G d'une lunette est le rapport du diamètre apparent β de l'image virtuelle produite par l'oculaire quand elle est rejetée à l'infini, au diamètre apparent α de l'objet observé à l'œil nu.

On a donc, par définition: $G = \frac{\beta}{\alpha}$ Cette définition est aussi valable pour les autres instruments d'observation d'objets lointains.

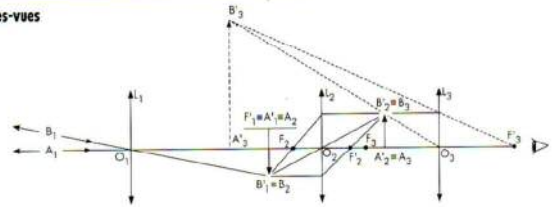
Les jumelles à prismes



Les **jumelles à prismes** sont: constituées par deux petites lunettes astronomiques, montées en parallèle et munies d'un système redresseur de l'image placé entre l'objectif et l'oculaire. Le système redresseur, inventé par le piémontais De Porro, comprend deux prismes à réflexions totales.



Les longues-vues

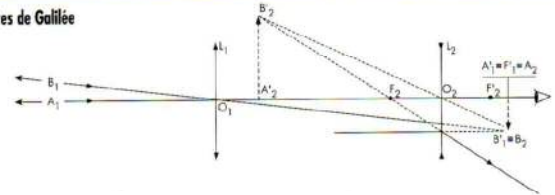


Une **longue-vue** est une lunette astronomique comprenant une lentille convergente L_2 (ou un système convergent de lentilles) placée entre l'objectif L_1 et l'oculaire L_2 . Cette lentille L_2 donne de l'image $A'_1B'_1$ produite par l'objectif L_1 , une image réelle renversée $A''_2B''_2$ qui devient l'objet dont l'oculaire L_3 produit l'image virtuelle $A'''_3B'''_3$.



Remarque: *C'est l'astronome Johannes Kepler qui fut le premier à imaginer ce type de lunettes.*

Les lunettes de Galilée



Une **lunette de Galilée** est un système comprenant un objectif convergent L_1 associé à une lentille divergente L_2 dont le centre optique O_2 est situé entre le centre optique O_1 et le foyer F'_1 de l'objectif L_1 .

Par ce système, l'image $A'_1B'_1$ d'un objet éloigné A_1B_1 , produite par l'objectif, devient l'objet virtuel A_2B_2 pour la lentille L_2 qui en donne l'image virtuelle $A''_2B''_2$ droite par rapport à A_1B_1 .

Remarque: *C'est à l'opticien hollandais Jansen, inventeur du microscope, que l'on attribue la fabrication des premières lunettes de ce type, appelées parfois lunettes bataves ou lunettes hollandaises; mais c'est le physicien Galilée qui, en utilisant une telle lunette au début du XVII^e siècle, fit les découvertes qui révolutionnèrent la conception de l'univers admise à cette époque; les jumelles de théâtre sont habituellement constituées par deux petites lunettes de Galilée montées en parallèle.*

Complément 18. Du microampère au kiloampère

Une gamme étendue de courants

Les techniques modernes nécessitent une gamme d'intensité de courants électriques de plus en plus étendue. Aussi bien dans les domaines des courants faibles que dans ceux des courants forts, cette gamme s'élargit.

L'intensité du courant électrique qui circule à l'intérieur d'une «puce électronique» n'est que de quelques microampères [μA], celle qui circule à l'intérieur des cuves à électrolyses pour la fabrication de l'aluminium, peut dépasser cent kiloampères [kA].

Unité d'intensité	Symbole	Correspondance
microampère	μA	$1 \mu\text{A} = 0,000001 \text{ A}$
milliampère	mA	$1 \text{ mA} = 0,001 \text{ A}$
ampère	A	
kiloampère	kA	$1 \text{ kA} = 1000 \text{ A}$

Des courants faibles

L'intensité des courants faibles ne dépasse pas quelques dizaines de milliampères. De tels courants font fonctionner la radio, le téléphone, le téléviseur, de même qu'une calculatrice ou une montre.

Dans ces appareils, ce n'est pas l'intensité qui est importante, mais ce sont ses variations au cours du temps.

Des courants forts

Plus l'intensité d'un courant est grande, plus ses effets sont importants.

Les courants forts sont donc utilisés dans des radiateurs pour produire de la chaleur, dans des électroaimants puissants ou pour réaliser certaines réactions chimiques.

La foudre est un exemple naturel de courant intense.



Intérieur d'une montre à quartz à aiguilles.



Eclair réalisé en laboratoire.

Complément 19. Différentes sortes de générateurs de tension

On utilise un grand nombre de générateurs de tension. Les tensions fournies varient de quelques millivolts [mV] à plusieurs millions de volts [MV].

Un générateur très utilisé

La batterie d'accumulateurs d'une voiture est un générateur électrochimique qui produit entre ses bornes une tension de 12 volts. Cette tension est obtenue par le montage en série de 6 éléments fournissant chacun 2 volts.



Batterie de voiture (12 V).

Un générateur inusable

La cellule photovoltaïque, ou photopile, fournit, convenablement éclairée, une tension de 0,5 volt à ses bornes. Les générateurs solaires sont constitués par l'association d'un grand nombre de photopiles.

Les photopiles sont utilisées pour fournir, par exemple, l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des satellites, de certaines montres ou calculatrices.

Un générateur exceptionnel

Le générateur Van de Graaf est une grosse machine. Il peut produire des tensions de plusieurs millions de volts. Il est utilisé dans les laboratoires de recherche de hautes énergies.



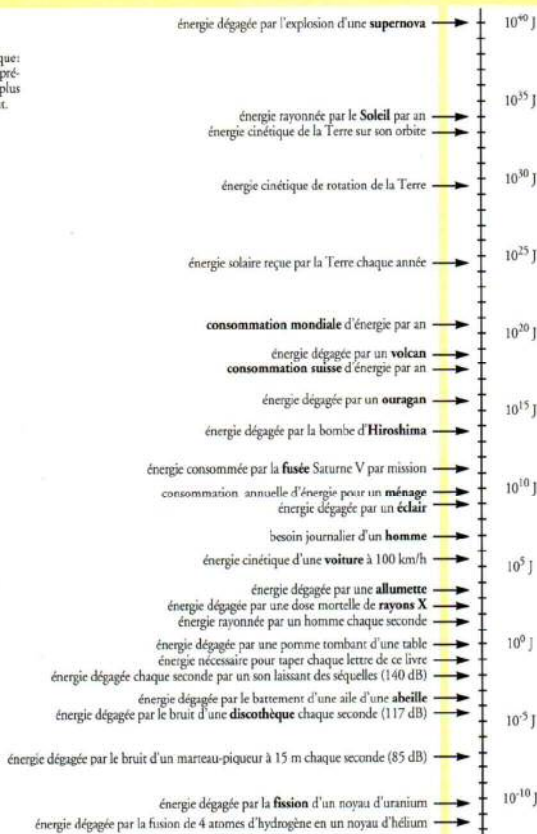
Téléphone alimenté par une batterie solaire (en haut du mât).



Générateur Van de Graaf.

Complément 20. Echelle d'énergie

Cette échelle est logarithmique: la graduation supérieure représente une énergie 10 fois plus grande que celle la précédente.



Complément 21. L'isolation thermique

Dans une habitation, l'air chaud fuit par les ouvertures et entre en contact avec les murs, les fenêtres et le toit de la maison. Ceux-ci transmettent la chaleur par conduction. Enfin, ces parties solides rayonnent la chaleur perdue. Cette dernière peut être détectée à l'aide de photos infrarouges des bâtiments.

Les pertes par conduction dépendent de plusieurs facteurs:

- de la différence de température $\Delta\theta$
- de l'épaisseur de la paroi e
- de la conductivité thermique du matériau λ (lambda)

La chaleur Q transmise chaque seconde par 1m^2 de surface de paroi se calcule de la manière suivante:

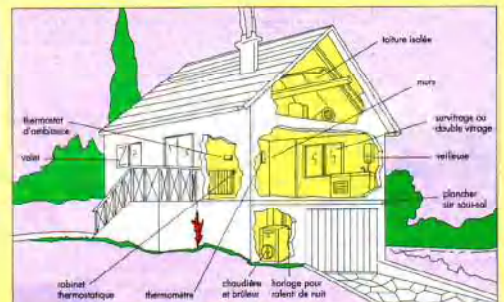
$$\frac{Q}{S \cdot t} = \frac{\lambda}{e} \cdot \Delta\theta$$

λ est un nombre caractérisant chaque matériau; son unité est le [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]. Si λ est grand, l'énergie transmise est grande. Le matériau est donc bon conducteur de chaleur. S'il est petit, on parle d'isolant thermique.

Tableau de conductivité thermique

matériau	λ en $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$
argent	418
cuivre	389
aluminium	202
fer	63
ciment	1,82
brique rouge	0,83
verre	0,8
eau	0,578
bois de sapin	0,15
liège en graine	0,05
polystyrène	0,04
laine de verre	0,04
air	0,025
vide	0

Il existe des moyens d'isoler correctement une habitation et il convient d'en tenir compte. En effet, en Suisse, 30% de l'énergie totale utilisée sert au chauffage des bâtiments.



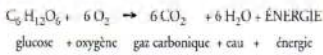
Complément 22. La machine humaine

L'énergie nécessaire à la vie de l'Homme est fournie par les aliments qu'il mange. Ces aliments sont un mélange dans des proportions diverses d'eau, de sucres (glucides), de graisses (lipides) et de substances azotées (protéides).

- 1 gramme de glucides ou de protéides apporte 16,7 kJ
- 1 gramme de lipides apporte 37,6 kJ
- 1 gramme d'eau n'apporte pas d'énergie.

Les besoins énergétiques d'un homme dépendent d'un certain nombre de facteurs. Le métabolisme de base nécessite une énergie de 8000 kJ par jour et assure le fonctionnement minimum de la machine humaine. En moyenne, pour satisfaire à ses activités, un homme a besoin d'environ 10000 à 14000 kJ par jour. L'apport énergétique d'une alimentation équilibrée devrait se répartir ainsi: 60% de glucides, 25% de lipides, et 15% de protéides.

La digestion des aliments est une réaction de combustion telle que celle du glucose par exemple:



L'eau est perdue par les poumons, l'urine et la transpiration; le gaz carbonique par la respiration.

Cette réaction est la réaction inverse de la photosynthèse.



Complément 24. Bilan énergétique de la Terre

La totalité de l'énergie thermique diffusée par le Soleil sur la Terre retourne tôt ou tard dans l'espace sous forme de réflexion, de rayonnement, d'évaporation ou de convection. Cela vaut également pour la chaleur accumulée à l'intérieur de la Terre.

La consommation d'énergie primaire totale n'atteint que 0,004% de la totalité de l'énergie solaire diffusée sur notre planète. Compte tenu de certains pays industriels, cette valeur augmente quelque peu, jusqu'à un pour cent. Plus des neuf dixièmes de la consommation d'énergie primaire sont couverts par les combustibles fossiles, pétrole, charbon, gaz, ainsi que par le bois.



Complément 23. Le chauffage solaire

On peut chauffer une maison grâce à des panneaux captant l'énergie rayonnée par le Soleil. Toute l'énergie venant du Soleil n'est pas récupérable. La totalité de cette énergie retourne tôt ou tard dans l'espace. Le schéma ci-après dresse le bilan des échanges énergétiques entre l'espace et la Terre.

L'énergie solaire peut être absorbée par un panneau où de l'eau circule dans un serpentin. Cette eau réchauffée peut être envoyée dans le système de chauffage ou stockée dans un réservoir. L'économie d'énergie réalisée est loin d'être négligeable.

L'inconvénient de l'énergie solaire est qu'elle est disponible quand on en a le moins besoin. Aussi est-il nécessaire de stocker cette énergie, l'idéal étant de la stocker en été (fort rayonnement, faible besoin en chauffage) et de l'utiliser en hiver (faible rayonnement, grand besoin de chauffage). Cela est très difficile à réaliser avec un bon rendement et à des prix abordables.

Par une construction judicieuse, on peut accumuler de l'énergie dans des murs épais correctement orientés qui stockent de la chaleur pendant la journée pour la restituer la nuit. Ce type d'énergie est appelée énergie solaire passive.

L'énergie tombant chaque seconde sur une surface de 1 m² orientée perpendiculairement aux rayons du soleil a les valeurs suivantes:

Audessus de l'atmosphère:	1,39 kW/m ²
Valeur maximale sur le plateau par temps clair en été:	1 kW/m ²
Par temps couvert:	50 à 100 W/m ²

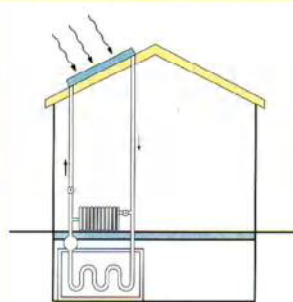
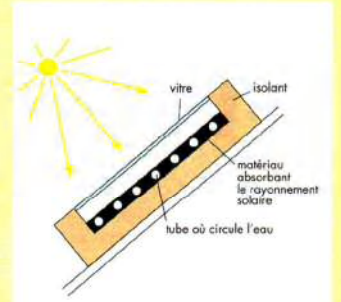
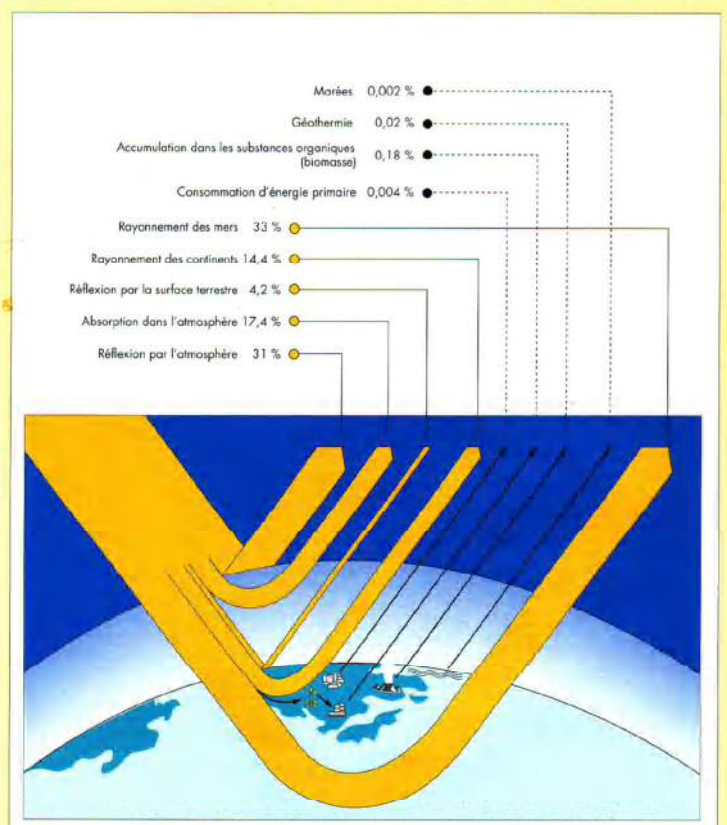


Schéma d'installation d'un capteur solaire.



Coupe d'un capteur solaire.



(Source: OFEL, Énergies renouvelables)

Complément 25. L'humidité de l'air

La quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air ne peut dépasser une certaine valeur, qui augmente avec la température. Quand cette valeur maximale est atteinte, on dit que l'air est saturé. Il se produit alors une condensation, visible sous forme de brouillard ou de buée. Ce phénomène se produit si on dissout trop de vapeur dans l'air (condensation sur les parois d'une cuisine) ou si la température baisse (expiration dans l'air froid).

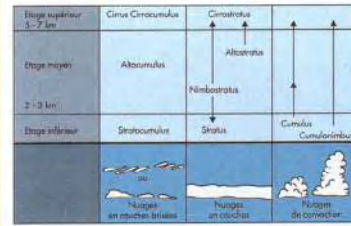
L'humidité relative s'exprime en %. Si, à 20°C, l'air d'une salle contient 0,4 kg d'eau alors qu'il devrait en contenir 1 kg pour arriver à saturation, l'humidité relative vaut 40%. La température baisse. A 7°C, il suffit de 0,5 kg d'eau pour saturer l'air de la salle. Il y a toujours 0,4 kg d'eau dissoute; l'humidité relative s'est élevée à 80%.



Complément 26. Les nuages

Dans la nature, la condensation de la vapeur d'eau se traduit par l'apparition d'un nuage (qu'on appelle aussi brouillard lorsqu'on se trouve à l'intérieur).

Le nom des nuages dépend de leur forme et de leur altitude:



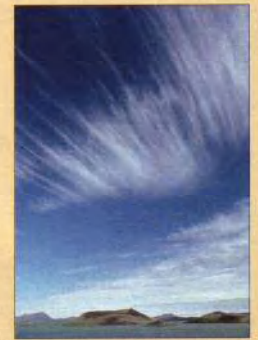
Cumulonimbus.



Stratus ou de dessous (mer de brouillard) et altimurus.



Altimurus.



Cirrus.

Photos F. Doleys

Complément 27. Unités de mesure de l'énergie

L'énergie est une grandeur mesurable. Il est donc nécessaire de définir des unités servant à la caractériser. Historiquement, un grand nombre d'unités ont été introduites en relation avec les différents aspects de l'énergie. Actuellement, l'unité d'énergie admise par le système international est le joule. (Ce système admet 7 unités de base: le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le Kelvin, la candela et le mole).

Dans le système CGS (centimètre, gramme, seconde), l'unité d'énergie est l'erg.

$$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$$

Les unités propres aux diverses formes de l'énergie sont dites hors systèmes.

Energie mécanique

L'emploi du joule est pour ainsi dire généralisé. Cependant, on trouve encore le kilogramme-force (kgm) qui correspond au travail fourni par une force de 1 kilogramme-force (force de gravitation subie par une masse de 1 kilogramme) déplaçant son point d'application de 1 mètre dans sa direction.

$$1 \text{ kgm} = 9,81 \text{ J}$$

Chaleur

La calorie (cal) correspond à la chaleur nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau de 1 degré.

$$1 \text{ cal} = 4,1855 \text{ J}$$

La kilocalorie ou grande calorie est bien connue des diététiciennes. La thermie (th) correspond à 1 million de calories. La millithermie (mth) est également utilisée dans l'industrie. L'industrie frigorifique qui traite de quantités de chaleur élevées emploie la frigorie (fg). Elle est égale à une kilocalorie négative.

Energie électrique

Un joule correspond à l'énergie nécessaire à faire fonctionner un appareil d'une puissance de 1 watt pendant 1 seconde.

$$1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$$

Le joule est cependant une unité assez petite, aussi utilise-t-on fréquemment le watt-heure (Wh) et le kilowatt-heure (kWh). Les compteurs électriques d'installations sont gradués dans cette dernière unité.

$$1 \text{ kWh} = 3600000 \text{ J}$$

Energie chimique

Elle se manifeste surtout lors de sa transformation en chaleur ou travail mécanique. Aussi les unités usitées sont le joule et la calorie.

Energie nucléaire

Pour mesurer l'énergie des particules, les physiciens ont introduit une unité appelée électron-volt (eV). Elle correspond à l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré sous une différence de potentiel de 1 volt.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Ses multiples le MeV (10^6 eV) et le GeV (10^9 eV) sont couramment utilisés.

D'autres unités ont été introduites pour mesurer l'énergie produite ou reçue lors de désintégration radioactive.

Le béquerel (Bq) mesure l'activité d'une source.

Le roentgen (R) mesure l'effet d'ionisation produit par le rayonnement nucléaire.

Le rem mesure l'énergie rayonnante absorbée par le milieu vivant.

Energie rayonnante

La mesure de cette forme d'énergie est particulièrement délicate car elle dépend de la direction d'observation et de la longueur d'onde de la source lumineuse. Citons en vrac quelques unités:

Le lumen qui mesure la puissance du flux lumineux.

Le lux (lumen/m²) qui mesure le flux lumineux reçu par unité de surface.

Le candela (cd) qui mesure l'intensité de la source.

Le nits (cd/m²) qui mesure l'intensité par unité de surface.

Actuellement on développe la photométrie énergétique qui permet de transformer la lumière en chaleur.

NB: Il est utile de connaître ces diverses unités, mais il ne faut utiliser que les unités du système international.

Complément 28. Masses volumiques de diverses substances

Substances (par ordre croissant de la masse volumique)	Masse volumique en [kg·m ⁻³]
Polystyrène expansé	20
Liège	120 à 260
Charbon de bois	200 à 240
Pin, sapin	300 à 500
Paraffine	850 à 950
Chêne	600 à 750
Glace	910 à 920
Soufre (en canon)	2070
Verre à vitre	2600
Aluminium	2700
Fontes	7100 à 7300
Aciers	7800 à 7900
Cuivre	8900
Plomb	11300
Or	18900
Platine	21400
Ether	714
Essence	740
Kérosène	780
Alcool à brûler	800
Huile	820
Vin	920
Eau	1000
Eau de mer	1030
Lait	1020
Glycérine	1260
Mercurie	13600
Hydrogène gazeux	0,089
Hélium	0,178
Méthane	0,717
Air	1,3
Dioxyde de carbone	1,98
Butane	2,7

Les masses volumiques des gaz sont données aux conditions normales de température et de pression (0° C et 1013 hPa).

Complément 29. Cinématique: en étant plus rigoureux

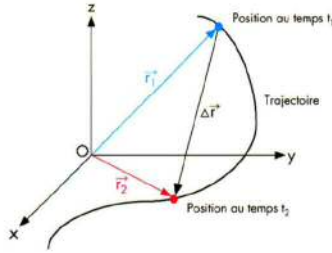
Déplacement

Le **déplacement** d'un point matériel durant un intervalle de temps compris entre deux instants t_1 et t_2 est la quantité vectorielle notée $\Delta \vec{r}$ et définie par

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

\vec{r}_1 et \vec{r}_2 étant les vecteurs position aux temps t_1 et t_2 .

On peut faire coïncider l'origine de $\Delta \vec{r}$ avec la position du point matériel au temps t_1 et son extrémité avec la position au temps t_2 .



Vitesse moyenne

En cinématique, la vitesse est représentée par un vecteur. La **vitesse moyenne** est une quantité vectorielle définie à partir du déplacement $\Delta \vec{r}$ durant l'intervalle de temps Δt compris entre deux instants t_1 et t_2 .

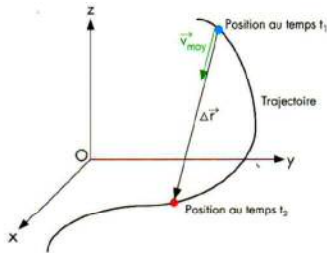
Le vecteur vitesse moyenne \vec{v}_{moy} est défini par:

$$\vec{v}_{moy} = \frac{\Delta \vec{r}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

Son intensité vaut

$$v_{moy} = \frac{\Delta r}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta r}{\Delta t}$$

Elle s'exprime en $m \cdot s^{-1}$



Vitesse instantanée

Le vecteur **vitesse instantanée** \vec{v} au temps t se définit comme le vecteur vitesse moyenne mais en considérant un intervalle de temps Δt très petit; on se place à la limite où l'intervalle Δt tend vers zéro:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

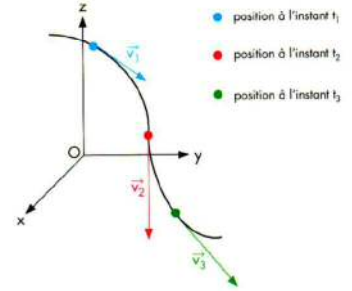
Sa norme vaut:

$$|\vec{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \right|$$

Le vecteur **vitesse instantanée** est en chaque point tangent à la trajectoire du mobile.

Dans le langage mathématique, la vitesse instantanée est la **dérivée** du déplacement par rapport au temps.

Par abus, on dit seulement « vitesse » à la place de « vitesse instantanée ».



Accélération instantanée

Comme pour la vitesse, l'**accélération instantanée** se définit en considérant un très court intervalle de temps Δt . On se place dans le cas où Δt tend vers zéro:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Sa norme est donnée par:

$$|\vec{a}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \right|$$

Dans le langage mathématique, l'accélération instantanée est la **dérivée** de la vitesse par rapport au temps.

Par abus, on dit « accélération » à la place de « accélération instantanée ».

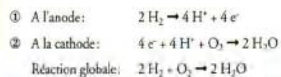
Complément 30. La pile à combustible

Ordinairement, lorsqu'un mélange d'hydrogène (H_2) et d'oxygène (O_2) est chauffé dans des proportions convenables, il y a explosion et formation d'eau. Si l'on sépare l'hydrogène et l'oxygène par une « membrane » que l'hydrogène est obligé de traverser pour que la réaction ait lieu, cette dernière est ralentie et de l'énergie électrique et de la chaleur sont générées. C'est le principe de fonctionnement de la pile à combustible découverte en 1839 par le physicien anglais Sir William Robert Grove.

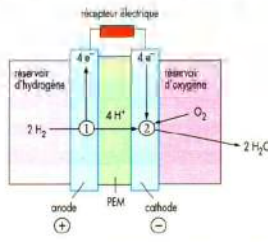
Dans les capsules Apollo, par exemple, des piles à combustible fournissaient non seulement de l'énergie électrique mais aussi de l'eau. Depuis le début des années 90, cinq types de piles à combustible sont connus (voir tableau ci-dessous).

Une pile à combustible fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse. L'énergie chimique d'un mélange d'hydrogène et d'oxygène est transformée en énergie électrique dans la pile à combustible. Selon le type de pile à combustible, l'hydrogène peut provenir de différentes sources, comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

La pile décrite ci-après est alimentée par de l'hydrogène gazeux. Elle a un cœur constitué d'une membrane échangeuse de protons (PEM: Proton-Exchange-Membrane) à travers les réactions:



On peut représenter schématiquement ce phénomène:



Les ions H^+ migrent en direction de la cathode à travers la membrane conductrice. Les électrons passent par le récepteur électrique. L'énergie électrique est récupérée dans le circuit au niveau du récepteur.

La pile à combustible propose une perspective d'avenir intéressante dans l'optique de la production d'énergie électrique. En effet, on peut imaginer la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau à l'aide d'un système utilisant l'énergie solaire. Cette production se ferait principalement dans les régions bénéficiant d'un fort ensoleillement. Cela permettrait en quelque sorte de stocker l'énergie solaire. On transporterait ensuite l'hydrogène vers les régions en ayant besoin pour produire de l'énergie électrique à l'aide de piles à combustible. Soulignons que cette façon de produire de l'énergie électrique est non polluante, les « déchets » étant de l'eau.

Type	Température de fonctionnement	Rendement de conversion de l'énergie chimique en énergie électrique	Utilisation
A FC (alkaline)	70-85 °C	63%	Véhicules électriques
PEM FC (feuille de polymère)	80-120 °C	60%	Véhicules électriques
PA FC (acide phosphorique)	200 °C	40-46%	Centrale de production électrique
MC FC (carbonate)	650 °C	48-56%	Centrale de production électrique
SO FC (chromique oxyde)	900-1000 °C	55-65%	Centrale de production électrique

Complément 31. La dose d'irradiation annuelle

L'Homme est depuis toujours soumis à une irradiation naturelle. La dose d'irradiation annuelle de la population tient compte des différentes irradiations, naturelles, médicales, accidentelles (Tchernobyl), etc. Elle est en moyenne d'environ 5 mSv en Suisse.

Dose annuelle en Suisse



- Radon
- Irradiation interne
- Rayonnement terrestre
- Rayons cosmiques
- Applications médicales
- Autres (centrales nucléaires)
- Tchernobyl (1^{re} année)

La répartition de cette dose est due aux facteurs suivants:

- Rayons cosmiques: 0,35 mSv
- Rayonnement terrestre (roches): 0,45 mSv
- Irradiation interne (due à la présence dans le corps humain de divers isotopes): 0,4 mSv
- Radon dans l'habitat: 2,2 mSv
- Accident de Tchernobyl (première année): 0,2 mSv
- Autres sources de radiations (installations nucléaires, industrielles, hôpitaux, ...): 0,2 mSv
- Applications médicales: 1,0 mSv

A noter que, dans certaines régions des Alpes ou du Jura, la dose annuelle due au radon peut atteindre 150 mSv.

Notions de radioprotection

Toute irradiation inutile doit être évitée. Toute exposition aux radiations justifiée.

Le principal risque d'un excès d'irradiation est le développement de cancers. On ne peut pas raisonnablement admettre de seuil sans effets des radiations. Chaque exposition au rayonnement doit être maintenue aussi basse que possible (Principe ALARA: As Low As Reasonably Achievable). L'ordonnance suisse sur la radioprotection stipule que les personnes professionnellement exposées aux radiations ne doivent en aucun cas absorber une dose annuelle supérieure à 50 mSv (applications médicales exclues).

Pour les individus de la population, cette dose ne doit pas excéder 5 mSv par an.

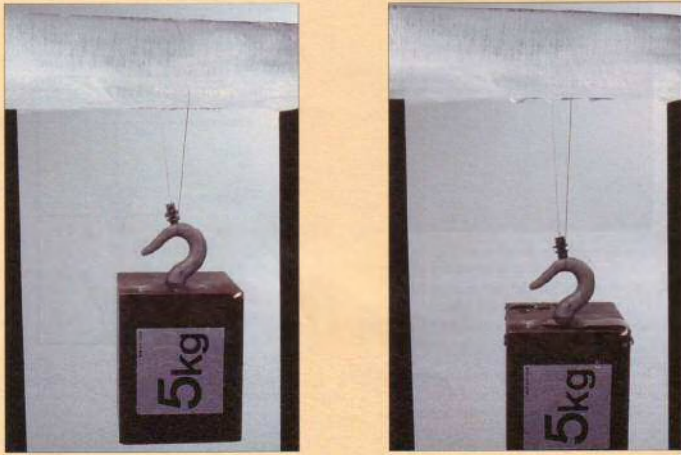
Toutefois, la commission internationale de protection radiologique (CIPR) stipule que la dose moyenne annuelle maximale admissible sur plusieurs années, pour la population, ne devrait pas excéder 1 mSv (applications médicales et sources naturelles exclues), dose dérivée par des sources artificielles.

En cas d'accident, les principes de radioprotection sont, pour se protéger d'une irradiation externe: se tenir à distance, utiliser un écran protecteur et limiter la durée de séjour en présence de radiations au strict minimum. Pour éviter l'irradiation interne par contamination: éviter la ventilation des locaux et les maintenir fermés, se nourrir d'aliments non contaminés (emballés de manière étanche avant l'apparition du risque), ingérer des comprimés d'iode qui saturent la thyroïde (celle-ci n'absorbera plus d'iode radioactif).

La commission fédérale de protection atomique-chimique (COPAC) contrôle de manière permanente la radioactivité ambiante et prend toute mesure nécessaire en cas de radioactivité accrue.

Complément 32. Faire fondre de la glace avec un fil

Il est possible de faire fondre localement de la glace sans qu'il soit nécessaire de la chauffer.
 Passons un fil lesté en ses deux extrémités sur un bloc de glace. Sous l'effet de la pression appliquée, la glace fond sous le fil. Il s'enfonce ainsi dans le morceau de glace, de part en part, sans couper le bloc car, après le passage du fil, la glace se reforme.



Complément 34. Le cyclotron

Le cyclotron est un accélérateur de particules chargées comme des protons (noyaux d'hydrogène) ou des deutrons (noyaux d'hydrogène lourd formés d'un proton et d'un neutron). Ces particules sont accélérées à grande vitesse dans le vide et servent de projectiles que l'on envoie sur des cibles de matière. Les collisions qui en résultent permettent d'étudier la structure de la matière. Le premier cyclotron a été mis en service en 1932; son inventeur est le physicien américain Ernest Orlando Lawrence (1901-1958) qui reçut le prix Nobel en 1938.

Un cyclotron est constitué de deux parties creuses demi-cylindriques dont la forme rappelle celle d'un fromage à raclette ou celle de la lettre D; en raison de cette forme particulière, on les appelle «dees».

Les «dees» sont placés dans un champ magnétique B perpendiculaire.

On établit un champ électrique entre les «dees» en leur appliquant une différence de potentiel de l'ordre de 10000 V.

La source S de particules à accélérer est placée près du centre de l'appareil.

Les particules de charge q et de masse m sont émises à la vitesse v₁ par la source. Sous l'effet du champ magnétique, elles parcourent un demi-cercle de rayon r₁ dans le premier «dee» :

$$r_1 = \frac{m \cdot v_1}{q \cdot B}$$

Elles sont ensuite accélérées par le champ électrique et pénètrent dans le second «dee» à la vitesse v₂.

Leur trajectoire dans le second «dee» est un demi-cercle de rayon r₂ :

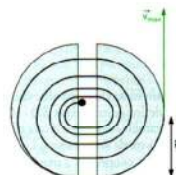
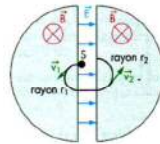
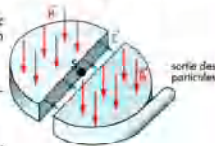
$$r_2 = \frac{m \cdot v_2}{q \cdot B}$$

Lorsque les particules pénètrent pour la seconde fois dans l'espace entre les «dees», il faut, pour qu'elles soient à nouveau accélérées, changer le sens du champ électrique. Comme la période de rotation des particules est indépendante de leur vitesse, on inverse le champ électrique en appliquant aux «dees» une tension alternative qui varie suivant la même période.

Le processus se répète jusqu'à ce que le rayon de la trajectoire des particules soit maximal, c'est-à-dire égal au rayon R des «dees». La vitesse maximale des particules à la sortie de l'appareil vaut :

$$v_{max} = \frac{q \cdot B \cdot R}{m}$$

Lorsque la vitesse des particules s'approche de la vitesse de la lumière, les effets relativistes se manifestent : la masse des particules augmente. Dans ce cas, la période de révolution des particules n'est plus constante, ce qui complique le processus d'inversion du champ électrique. L'appareil qui tient compte de cet effet en ajustant la fréquence d'inversion du champ électrique est un synchrocyclotron. Il est aussi possible de maintenir constante la période de révolution des particules en ajustant la valeur du champ magnétique; les appareils qui fonctionnent suivant ce principe sont des synchrotrons. Actuellement, les cyclotrons ne sont plus utilisés.



Complément 33. Une installation moderne de chauffage central

Dans une installation de chauffage, l'eau peut circuler par simple convection, mais cette circulation est lente. C'est la raison pour laquelle toutes les installations actuelles comportent une pompe qui fait circuler l'eau plus rapidement.

L'eau se dilate environ 10 fois plus que les parties métalliques qui la contiennent. Quand elle est chauffée, elle n'a plus assez de place dans les canalisations; on installe donc un vase d'expansion.

Dans les anciennes installations, ce vase était situé tout en haut et ouvert à l'air libre. De nos jours, on le place près de la chaudière et on le ferme hermétiquement; il contient un gaz séparé de l'eau par une membrane déformable. Quel est le rôle de ce gaz?

Une chaudière possède un système qui règle le chauffage selon la température maximale désirée pour l'eau (aquastat) ou la température souhaitée dans la maison (thermostat d'ambiance). De plus, pour réguler la température pièce par pièce et par souci d'économie, les radiateurs sont équipés de robinets thermostatiques.

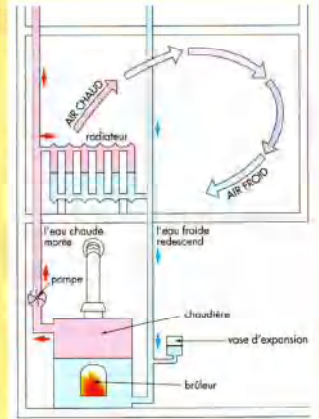
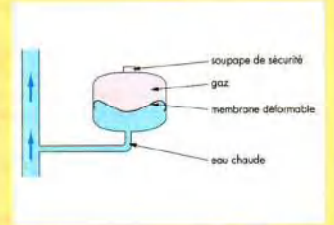


Schéma de principe d'une installation de chauffage central.



Installation de chauffage: vase d'expansion.



Principe des vases d'expansion utilisés actuellement.

Complément 35. L'éclipse du 11 août 1999

L'éclipse solaire totale du 11 août 1999 a été visible à 100% dans une bande de 110 km de large environ (voir carte ci-dessous). Le phénomène a traversé la France en une dizaine de minutes d'ouest en est. En chaque point d'observation, l'éclipse totale a eu une durée d'environ 2 minutes.

Lorsque le Soleil, la Lune et la Terre sont alignés, on peut observer une éclipse totale du Soleil. La distance Terre-Lune et le diamètre de la Lune sont tels que la lumière du Soleil est alors totalement occultée.

L'observation de la couronne solaire ne peut avoir lieu que lors d'une éclipse totale. Une éclipse totale de Soleil ne peut avoir lieu qu'à la nouvelle Lune. Ceci n'a évidemment pas lieu à chaque nouvelle Lune car les orbites de la Lune et de la Terre ne se trouvent pas dans le même plan. Le prochain événement identique aura lieu, dans notre hémisphère, en septembre 2081.



Verdun, 11 août 1999, 12 h 26.



Eclipse totale, Verdun, 11 août 1999, 12 h 30 min 10 sec.



Verdun, 11 août 1999, 12 h 33



Nord de la France: la bande noire représente les endroits depuis lesquels on a pu observer l'éclipse totale du 11 août 1999.

Complément 36. Les disques audionumériques

Le disque compact, qui a fait son apparition en 1983, est l'aboutissement de longues études d'optimisation. Les disques compacts ne sont enregistrés que sur une seule face, l'autre étant entièrement prise par l'étiquette. Ces disques ne subissent pas d'usure puisque la lecture se fait optiquement par un rayon laser, donc sans contact. Il existe deux variantes d'impression: mécano-optique, et magnéto-optique, c'est-à-dire effaçable et réenregistrable par l'utilisateur.



Pour obtenir un disque numérique, on part en général d'une bande originale numérique, corrigée, montée, qui est lue et si besoin convertie dans le codage du disque compact.

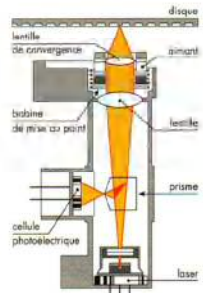
Le signal ainsi codé est envoyé dans un laser de gravure qui impressionne un disque de verre recouvert d'une pellicule photosensible. Le développement fait apparaître des petits creux qui peuvent être lus mais aussi dupliqués par galvanoplastie et pressage tout comme pour le disque ordinaire.

Le disque final est en matière transparente d'environ 1,2 mm d'épaisseur. La surface gravée est métallisée pour être réfléchissante et recouverte d'une couche de protection et de l'étiquette. La lecture se fait au travers de l'autre face par un petit faisceau laser réfléchi vers des cellules photoélectriques. Les différences de mise au point entre plans microscopiques produisent des écarts de luminosité, donc des variations de tension électrique qui engendrent les 1 du signal numérique, après quoi le processus de correction d'erreurs et de décodage restitue le signal analogique de départ.

Innovations et perspectives

Nous avons assisté, à la fin des années quatre-vingt, à une prolifération de formats, dictée souvent par des intérêts plus commerciaux que techniques. Le disque optique numérique se prête à tous les usages. Outre le son (CD-Audio), il peut véhiculer des images, fixes (CD-Photo) ou animées (CD-Vidéo, DVD), des programmes informatiques ou des données quelconques (CD-ROM), accessibles aléatoirement et de façon interactive (CD-I), etc.

L'innovation la plus importante est sans nul doute le disque magnéto-optique, effaçable et réenregistrable à volonté, contrairement au CD mécano-optique classique, où l'information reste de type mécanique (reliefs ou creux), même si la lecture se fait par un processus optique. Le disque magnéto-optique porte une information de type magnétique sous forme d'une aimantation de la couche magnétique. Cette aimantation n'est plus parallèle à la piste comme sur les bandes, mais perpendiculaire au plan du disque, ce qui permet d'enregistrer et lire sans contact, par des procédés optiques. Le champ magnétique d'enregistrement n'a plus besoin d'être localisé avec précision sur la piste. Il est inférieur au champ coercitif de la couche et n'influence cette dernière qu'au point précis où le faisceau laser d'enregistrement élève momentanément la température au-dessus du point de Curie. Pour la lecture, on utilise l'effet Faraday, qui met en jeu un faisceau laser de lumière polarisée dont le plan de polarisation, à la réflexion, est dévié dans un sens qui dépend du sens d'aimantation de la couche.



Principe du lecteur de disque compact (CD).

Complément 37. Applications des lasers

En physique et dans l'industrie

Un avantage essentiel des lasers par rapport à toute autre source lumineuse est que la lumière, étant émise en faisceau, peut être acheminée, pratiquement sans pertes, vers l'utilisation.

Éclairage, alignement, guidage

Afin d'obtenir des éclaircissements très intenses, on focalise un faisceau laser sur la région à étudier; ces éclaircissements peuvent être aussi très brefs: jusqu'à 10⁻¹¹ seconde grâce aux lasers dits à modes synchronisés. Utilisés en photographie ultrarapide, ces éclairs servent également à l'étude de certains comportements des molécules: réactions chimiques, diffusions, polarisation, etc., dont la rapidité interdite jusqu'à présent l'étude dynamique.

On peut aussi, grâce au laser, éclairer des objets très lointains: des photographies de satellites distants de 1500 km ont été ainsi obtenues avec un laser à rubis de 50 J.



Les armes modernes sont souvent guidées par laser.

Les militaires utilisent cette propriété pour désigner une cible lointaine à l'attention du tir terrestre ou aérien ou de fusées qui se dirigent de façon automatique vers l'objet éclairé.

On peut aussi asservir un engin à se déplacer le long d'un faisceau laser: un engin antichar sera ainsi guidé comme par un fil vers le char adverse, une machine de forage creusera en ligne droite malgré les irrégularités de la roche.

Tous les éclairages par laser ne sont pas aussi élaborés: il existe, dans les laboratoires, des milliers de petits lasers continus pour les réglages et les alignements d'éléments optiques ou mécaniques.

Plus simples et encore bien plus nombreux sont les lecteurs de code-barre, dans lesquels un mince faisceau laser (généralement He-Ne ou semi-conducteur), démultiplié par des miroirs tournants multiples, balaie l'espace traversé par les objets à identifier, tandis qu'un détecteur analyse le signal retour pour y repérer un code. Plusieurs centaines de milliers de tels appareils sont vendus chaque année.



Lecteur code-barre.

Enfin, dans deux autres secteurs encore plus proches du grand public, le marché du laser a véritablement explosé. Il s'agit des imprimantes laser, où un faisceau laser, très fin, est dévié par des miroirs. Le pinceau fin du laser permet d'utiliser des miroirs très petits et donc très rapides. Plusieurs millions de ces imprimantes, utilisant comme source des diodes lasers d'une fraction de watt, sont vendus chaque année.



Imprimante laser.

Pour terminer, mentionnons l'application maintenant la plus connue du laser: le lecteur de disques compacts, dans lequel le faisceau d'une diode laser d'environ 1 mW éclaire un disque en rotation dont le pouvoir de réflexion en chaque point est codé en fonction de l'information (son, images, signaux informatiques) à restituer. Dans certains cas, l'enregistrement est possible par la même méthode: des dizaines de millions de ces appareils sont produits chaque année.



Lecteur de disques CD.

Soudure et usinage des matériaux

Dans les applications qui précèdent, l'état de surface de l'objet visé n'est pas modifié par le flux laser (sauf pour les réactions photochimiques), et l'on peut parler d'éclaircissement. Il n'en est plus de même lorsqu'on concentre suffisamment le faisceau lumineux.

La partie du flux incident, qui n'est pas renvoyée mais absorbée par le corps, devient capable d'élever de façon notable sa température superficielle: l'impulsion de 1 J d'un petit laser à rubis, concentrée sur un diamètre de 0,1 mm, représente un flux de 12 MW/cm² si l'impulsion dure 1 ms. Ainsi, même un laser relativement modeste, concentré sur une très petite surface, peut y créer localement des températures très élevées.

Focalisés sur des aires du même ordre, des lasers plus puissants permettent d'atteindre des températures auxquelles aucun matériau, même réfractaire, ne résiste. De plus, cet apport d'énergie, très intense mais très localisé, provoque la fusion (voire la volatilisation) très rapidement, sans que le chapeau d'air le temps de se propager notablement: on réduit ainsi fortement les phénomènes collatéraux (déformation, corrosion, recristallisation), qui affectent par exemple la découpe ou la

soudure au chalumeau ou à l'arc. Typiquement, un laser au néodyme de 1,5 à 2 kW coupe une plaque métallique d'acier doux, inox, alliage léger, de 5 mm d'épaisseur à des vitesses de l'ordre de quelques mètres par minute, et un laser CO₂ de 10 kW obtient les mêmes résultats jusqu'à plus de 1 cm d'épaisseur.

A plus faible vitesse, on peut couper (ou souder) des épaisseurs plus importantes. Des lasers beaucoup moins puissants sont utilisés pour couper, à très grande vitesse, les matériaux non conducteurs: tissus, papiers, matières plastiques, verres. C'est pourquoi un nombre croissant de lasers sont utilisés dans l'industrie pour des applications qui représentent, en valeur, le tiers du marché (civil) total de tous les lasers.



Pièces découpées au laser.

Mesure des distances

Les lasers ont permis de réaliser des dispositifs que, par analogie avec le radar (radio detection and ranging), on a appelé lidar (light detection and ranging). Le principe consiste à envoyer vers l'objet dont on veut connaître l'éloignement une impulsion lumineuse très courte. Une partie de cette lumière, diffusée par l'objet, revient vers le point d'émission où elle est recueillie. Du temps t séparant l'émission du retour de l'écho, on tire la distance d de l'objet à l'observateur par la relation $d = 2ct$.



Sol lunaire.

Depuis ces premières réalisations, l'augmentation de la cadence de fonctionnement des lasers a permis d'utiliser des lidars pour reconstruire, point par point, de véritables images en relief des objets observés. De tels lidars existent maintenant pour toute une variété d'applications, depuis le guidage des petits robots, jusqu'au repérage et à l'identification de cibles militaires à très grande distance.

Pour des objets plus lointains comme les satellites terrestres et la Lune, il convient de mettre à profit la cohérence du laser pour émettre un pinceau très fin dont une fraction notable sera interceptée par la cible. Des satellites ainsi équipés renvoient un écho suffisant pour que l'on puisse déterminer leur distance à 0,1 m près jusqu'à plus de 3000 km. En effectuant à plusieurs reprises des mesures simultanées depuis trois stations au moins, on peut déterminer avec une très haute précision (de un à quelques centimètres) leurs positions relatives.

Télécommunications par laser

Le laser est un excellent support d'information, et cela d'autant plus que sa fréquence très élevée (de l'ordre de 10¹⁴ Hz) autorise, en on module jusqu'à plus de 10⁹ Hz: des milliers de canaux de télévision, des millions de voies téléphoniques pourraient ainsi être acheminées simultanément. Cependant, la propagation des ondes dans l'atmosphère nécessiterait des points d'émission et de réception élevés, et pourrait de surcroît être perturbée par les intempéries. On s'est affranchi de ces contraintes en faisant propager le faisceau dans des fils de verre de très faible diamètre qui canalisent l'onde lumineuse comme les guides d'onde canalisent les ondes hertziennes.



Lampe à fibres optiques.

Après plusieurs années de recherche, on est parvenu à obtenir des verres très purs et presque parfaitement transparents, dans lesquels l'atténuation des ondes lumineuses n'est plus due qu'à l'inévitable diffusion de la lumière par les molécules du milieu.

La fusion nucléaire par laser

La cohérence du laser autorise la focalisation du faisceau dans un volume très petit. Le laser donne naissance à de considérables concentrations d'énergie. Si cette propriété est déjà largement mise à profit avec des lasers continus ou impulsions pour l'usinage des matériaux, l'utilisation comme source de très puissants lasers conduit à des densités de puissances comparables à celles qui règnent au sein des explosions nucléaires.

On peut alors montrer que le chauffage par laser d'un mélange de deutérium et de tritium devrait permettre d'amorcer la réaction de fusion nucléaire.



Un réacteur expérimental pour la fusion nucléaire: le Tokamak. (Photo: CERN, Centre de recherches en physique des plasmas, Lausanne)

De nombreux pays consacrent des efforts importants pour montrer la faisabilité de la fusion, mettant en œuvre des lasers de plus en plus puissants, d'abord pour atteindre le seul d'amorçage de la réaction, puis pour améliorer le rendement du processus de fusion. En effet, les perspectives entrevues sont immenses, puisque le deutérium est abondant dans l'eau de mer, tandis que le tritium nécessaire pourrait assez facilement être fabriqué par une réaction auxiliaire sur du lithium. Dans ces conditions, une source quasi inépuisable d'énergie deviendrait, pour la première fois de son histoire, accessible à l'homme.

Une nouvelle génération de lasers ultrapuissants se prépare aux Etats-Unis et en France. La décision officielle n'est pas encore prise, mais les études et les premières

réalisations sont déjà très avancées. Le projet américain s'appelle Nova Upgrade, et ses caractéristiques sont impressionnantes: en effet, les énergies par impulsion de 3 à 5 nanosecondes de durée atteindront de 1,5 à 2 mégajoules à une longueur d'onde de 351 nanomètres. Cela correspondra à des puissances crêtes de 300 à 600 térawatts (de 3 à 6 · 10¹⁴ W). Ils auront une structure en 18 faisceaux avec chacun 16 amplificateurs (288 faisceaux lasers en tout).

Autres applications des lasers

Les applications des lasers sont multiples; en voici encore quelques-unes:

- Mesure des vitesses linéaires par effet Doppler.
- Mesure des vitesses angulaires à l'aide de lasers en anneaux.
- Spectroscopie résolue en temps avec les lasers femtosecondes qui permettent d'émettre des impulsions jusqu'à 10⁻¹⁵ seconde.
- Mesures à distance des composants atmosphériques par absorption sélective.
- Mesures à distance par rétrodiffusion Rayleigh ou Raman.
- Mesure des températures par l'étude des raies spectrales.
- Séparation isotopique par excitation des atomes.
- Photoionisation, qui consiste à arracher les électrons des atomes.
- Photodissociation par excitation des molécules.

En médecine

L'apparition en 1960 du laser a permis aux médecins et aux biologistes de réaliser des expériences nombreuses. Rappelons la caractéristique fondamentale d'un laser: c'est une source de rayonnement qui présente une grande cohérence temporelle et spatiale. La cohérence spatiale permet d'obtenir, par focalisation du faisceau laser, des densités de puissance énormes, car l'énergie lumineuse peut être concentrée dans un petit volume déterminé à la limite par les lois de la diffraction.



Laser Argon pour traitement ophthalmique.

Aspects physiques de l'interaction rayonnement laser-matériau biologique

L'absorption de la lumière visible par les êtres vivants est liée à l'excitation des pigments. Ces molécules reviennent à leur état initial de plusieurs façons: thermalisation de l'énergie absorbée; fluorescence ou phosphorescence; transformations chimiques.

D'un point de vue macroscopique, les quatre principaux effets de l'action du laser sur du matériel biologique sont les suivants:

- une action photochimique qui ne se distingue pas de celle obtenue avec une source classique, comme l'a montré une série d'expériences d'irradiation dans l'ultraviolet de cellules en culture de tissus;
- l'évaporation d'une partie du matériel biologique;
- une action thermochimique et la dégradation thermique des matériaux;
- des effets acoustiques peuvent accompagner l'action du laser, dus principalement à la dilatation rapide des matériaux après absorption de l'énergie du laser.

On a introduit le laser dans les diverses disciplines médicales, telles la chirurgie, l'ophtalmologie, la cancérologie, la stomatologie, l'urologie et la cardiologie; il peut être utilisé pour le diagnostic ou bien en thérapeutique.

En chirurgie. un laser continu peut servir comme une sorte de scalpel lumineux incisant les tissus par brûlure. L'introduction de ce scalpel en microchirurgie nécessite de réduire le diamètre du spot jusqu'à quelques dizaines de microns. On est donc obligé de matérialiser ce faisceau à l'aide d'un autre laser continu émettant dans le visible, et la manipulation doit être effectuée sous microscope.



Traitement au laser d'une affection de la cornée.

En cancérologie. l'utilisation du laser pour le traitement de certaines tumeurs malignes avait fait naître bien des espoirs. Les résultats obtenus sont variés et discutés. Le laser ne peut reconnaître les cellules malades que si ces dernières présentent une absorption plus grande que les cellules saines. C'est pour cette raison que l'on s'est intéressé au traitement des mélanomes: après une irradiation avec une énergie de 1500 à 1700 J/cm², la tumeur se nécrose et laisse place à une cicatrice. Mais l'existence dans les tumeurs de nombreuses cellules achromiques et le fait que le rayonnement du laser n'atteint pas les cellules qui se trouvent en profondeur expliquent que pour le moment, le laser ne constitue pas un outil dans le traitement des cancers; par contre, il est employé pour effacer les tatouages et les taches de vieillesse.



Traitement au laser d'une tumeur cutanée.

En ophtalmologie

Les lasers peuvent avoir différents effets sur les tissus biologiques cible en fonction de leur longueur d'onde, de leur puissance et de leur durée d'application. Les applications des lasers en ophtalmologie dérivent des 3 principes types d'interaction de la lumière avec les tissus:

- **Un effet thermique:** l'absorption de l'énergie laser par les tissus absorbants (pigments de l'œil) provoque une augmentation de la température locale de 10° à 20°, ce qui les photocoagule (= dénature les protéines). On a donc ici une conversion de la lumière en chaleur.

Exemples: traitement de la rétinopathie diabétique (figures 1a et 1b) et de la forme classique de la dégénérescence maculaire liée à l'âge (figures 2a et 2b) avec les lasers à Argon ou Krypton.

- **Un effet mécanique:** l'absorption tissulaire de l'énergie laser, visible ou infrarouge, crée une microexplosion au moment où la température de l'eau passe au-dessus du point d'ébullition (= vaporisation). Le principe de cet effet repose sur la formation d'un plasma, c'est-à-dire d'un gaz fortement ionisé induit par la focalisation d'un grand nombre de photons sur une petite surface pendant un temps bref (une nanoseconde). Le plasma restitue l'énergie sous la forme d'une onde de choc.

Exemple: la capsulotomie postérieure au laser Nd-YAG en cas de cataracte secondaire.

- **Un effet photoablatif:** dans l'ultraviolet lointain, les photons sont si puissants qu'un seul photon peut casser une jonction intramoléculaire. Le rayonnement à une très faible pénétration et chaque photon casse une chaîne moléculaire quasiment sans effet thermique ni onde de choc. Les lasers permettent donc de réaliser une ablation en surface à l'échelle submicroscopique.

Exemples: le laser Excimer pour corriger la myopie et l'hypermétropie.

Actuellement, les effets thermiques représentent toujours le domaine principal des indications, dans un but prophylactique ou thérapeutique. Les effets mécaniques viennent en seconde position, puis les effets photoablatifs.

Il existe donc différents types de lasers utilisés en ophtalmologie, certains tels les lasers Argon vert (514 nm) et les lasers Krypton rouge (647 nm) vont traiter des maladies de la rétine. D'autres tels les lasers YAG (532 nm) et Excimer (193 nm) permettront de faire des interventions chirurgicales dans la partie antérieure de l'œil.

D René-Pierre COPT
Hôpital Ophtalmique, Lausanne



Figure 1a
Rétinopathie diabétique avant traitement.



Figure 1b
Rétinopathie diabétique après traitement.



Figure 2a
Dégénérescence maculaire liée à l'âge avant traitement.



Figure 2b
Dégénérescence maculaire liée à l'âge après traitement.

Complément 38. L'homme face aux champs électromagnétiques

Les champs électromagnétiques sont une composante essentielle de l'univers. Certains d'entre eux sont omniprésents: champ électrique atmosphérique, rayons cosmiques, champ magnétique terrestre. A ce bruit de fond naturel s'ajoutent aujourd'hui les champs électromagnétiques générés par la multiplication des applications de l'électricité. Dans quelle mesure ces rayonnements affectent-ils la santé des êtres vivants? Favorisée par la propagation de rumeurs alarmistes, l'inquiétude se répand. Est-elle fondée?

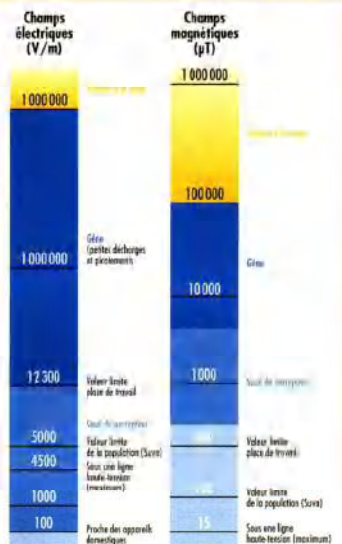
Notre exposition aux champs électriques est constante. En se déplaçant d'un endroit à l'autre, en enclenchant des appareils, l'homme s'expose à des forces électriques sans cesse changeantes. A partir d'un certain seuil, les champs deviennent physiquement perceptibles: dès 3000 volts par mètre (V/m), des personnes sensibles éprouvent une sensation de souffle. Au-delà de 20 000 volts, un individu sur vingt environ ressent des picotements au contact de la peau.

Or, il s'agit là de valeurs relativement élevées, perceptibles dans le voisinage immédiat d'installations électriques à haute tension. En revanche, la proximité des appareils domestiques ne génère que des champs situés entre 5 et 100 volts par mètre. Ces chiffres, qui relaissent d'emblée les risques sanitaires encourus, ont été confirmés par plusieurs études scientifiques réalisées notamment dans le cadre de l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

Valeurs limites

S'appuyant sur les travaux de l'OMS, la Commission internationale pour la protection contre les radiations non ionisantes (CIPRNI) a édicté en 1998 des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques. Les seuils retenus pour la population ont été fixés à 5000 volts par mètre (V/m) pour les champs électriques et à 100 microtesla (µT) pour les champs magnétiques. Ces valeurs ont été adoptées en Suisse dans le cadre de l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI).

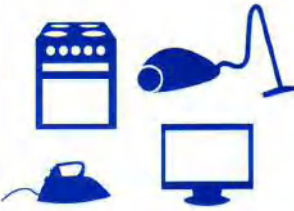
Ce sont des limites légales, au-delà desquelles toute exposition instantanée doit être évitée, et qui ont été définies avec une marge de sécurité considérable. En fait, les seuls réelles dangers pour les organismes vivants sont nettement plus élevés. C'est à partir d'une exposition à 1 million de volts par mètre et de 100 000 microtesla que les atteintes à la santé sont avérées.



Effets des champs électromagnétiques sur les organismes vivants.

Chez soi

Réalisée de 1994 à 1995, une campagne de mesures a révélé que l'exposition de la population suisse aux champs magnétiques se situe autour de 0,2 µT, valeur négligeable au regard du seuil légal de 100 µT. Il s'agit d'une exposition moyenne. Le tableau 1 présente les champs résultant de l'utilisation des appareils électriques du ménage et du bureau.



	Champ électrique (volts par mètre V/m)	Champ magnétique (microtesla µT)
Cuisinière	4	5
Fer à repasser	90	0,4
Aspirateur	20	20
Ecran vidéo	1 à 50	1,2 à 1,4
Imprimante	3 à 6	0,2 à 1,4

Champs électromagnétiques générés par des appareils d'utilisation courante. À comparer avec seuils de sécurité (5000 V/m et 100 µT). Ces valeurs sont mesurées à 30 cm des appareils. Elles diminuent fortement en fonction de l'éloignement.

Sous les lignes

Les lignes électriques à haute tension suscitent certaines craintes. Leurs effets sur les organismes vivants ont fait l'objet de nombreuses études dans plusieurs pays. Aucune d'elles n'a débouché sur la preuve de déclenchement de maladies graves.



	Sous les fils	A 30 mètres	A 100 mètres
Champ électrique (V/m)	4500	400	25
Champ magnétique (µT)	15	1	0,01

Champs générés par une ligne à très haute tension de 380 kV (Galmiz-Verbois).

Nous sommes tous électriques

La majorité des fonctions du corps physique sont stimulées par des tensions électriques ou par des phénomènes électro-chimiques. Exemple: les courants qui traversent le cerveau humain sont 400 à 10 000 fois plus élevés que les courants induits dans notre environnement par les installations et appareils électriques. Autrement dit, notre environnement technique n'ajoute que des quantités de rayonnements très faibles en comparaison de notre propre activité électrique.

Les conséquences de l'accroissement des sources de rayonnement (multiplication des appareils électroménagers, renforcement des lignes électriques, informatisation de l'économie) ont fait l'objet de nombreux travaux d'analyses et de recherches médicales à partir des années 80, notamment sous l'égide de l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

Globalement, ces études ont débouché sur les conclusions suivantes:

- Aucune relation entre l'exposition à des faibles champs magnétiques - tels qu'on les subit dans la vie quotidienne - et des déclenchements de cancers n'a pu être établie, y compris pour les sujets plus fragiles (nourrisson, femmes enceintes, personnes âgées), contrairement à d'autres déclencheurs confirmés où le risque augmente avec l'exposition (tabac, alcool, mode d'alimentation, pollution atmosphérique).
- Au cas où des études épidémiologiques plus poussées devaient néanmoins révéler des risques de cancers, ceux-ci seraient dans tous les cas extrêmement réduits, comparables avec celui d'être frappé par la foudre.
- Les recherches scientifiques n'ont pas non plus confirmé la sensibilité d'individus à des champs électromagnétiques très faibles (troubles du sommeil, allergies, autres maladies). Ces désagréments pourraient provenir de facteurs liés à des conditions d'habitat ou de travail, ou être d'origine psychosomatique.

Et voilà les mobiles...

La multiplication des téléphones mobiles expose les humains à un nouveau type de rayonnement: les champs de radiofréquences (RF). Les appareils actuels fonctionnent à des fréquences très élevées, comprises entre 800 et 2100 mégahertz. Elles se situent par conséquent dans une plage comprise entre 1 et 10 000 mégahertz dont les effets sur la santé sont étudiés depuis plusieurs dizaines d'années.

Les champs RF, dont la source est proche d'un organisme vivant, pénètrent les tissus exposés et provoquent un échauffement dû à l'absorption d'énergie.

Ce phénomène est connu de longue date. Raison pour laquelle les normes techniques internationales qui réglementent la fabrication des téléphones mobiles et des stations de base excluent d'emblée tout échauffement significatif des tissus vivants.

L'énergie absorbée par l'organisme provient de l'antenne des appareils. Cette exposition est limitée par des lignes directrices internationales, de manière à ce que la hausse de température au niveau de la tête ne dépasse pas 1 degré Celsius en cas de conversation prolongée.

Dans l'état actuel des connaissances scientifiques, rien ne permet d'affirmer qu'une exposition régulière à des champs de radiofréquences de faible intensité, tels qu'ils sont émis par les téléphones cellulaires, favorise l'apparition de cancers.

Mais une certaine prudence s'impose. Car la téléphonie mobile est un phénomène récent. On manque du recul nécessaire pour se baser de certitudes. Confrontée au développement explosif de ce secteur, l'OMS entend multiplier les précautions.

(Extrait d'une brochure éditée par «Les Electriciens Romands» en 2000)

Complément 39. Eléments biographiques dans l'ordre chronologique

- 640-562 av. J.-C.** **THALES**
Mathématicien et philosophe grec de l'école ionienne. Il fut l'un des Sept Sages de la Grèce. Il voyait dans l'eau le principe générateur de l'Univers.
- 490-435 av. J.-C.** **EMPÉDOCLE**
Philosophe grec. Pour lui, les substances primordiales sont au nombre de quatre: l'eau, l'air, le feu et la terre; ce sont les quatre « racines » des choses. Il introduit également les principes de répulsion et d'attraction (l'Amour et la Haine), des forces qui mènent à la composition et la décomposition des choses.
- 460-370 av. J.-C.** **LEUCIPPE**
Philosophe grec, fondateur de la théorie atomiste.
- 460-370 av. J.-C.** **DÉMOCRITE**
Philosophe grec, contemporain de Socrate, représentant de l'atomisme. *Matérialiste*, il identifie l'être à la matière [composée d'atomes qui se déplacent dans le vide] et le non-être au vide.
- 384-322 av. J.-C.** **ARISTOTE**
Une des superstars de la philosophie grecque. Fils du médecin Nicomaque, disciple de Platon, précepteur d'Alexandre le Grand, fondateur du Lycée (école péripatéticienne). Fondateur de la logique formelle, ses écrits couvrent tout le savoir de l'époque: la Logique, la Physique, la Métaphysique, la Politique, la Rhétorique, la Constitution d'Athènes... Reprise par Saint Thomas d'Aquin au XIII^e siècle, l'œuvre d'Aristote sera à la base du dogme scientifique de l'Eglise catholique jusqu'au XVIII^e siècle.
- 287-212 av. J.-C.** **ARCHIMÈDE**
Célèbre mathématicien de l'Antiquité né et mort à Syracuse. On lui doit de très importantes découvertes en physique. Le principe qui porte son nom fut énoncé dans son *Traité des corps flottants*. La légende veut qu'Archimède le découvrit dans sa baignoire et que, ébloui par cette découverte, il s'élança nu dans la rue en criant « Eureka » (« j'ai trouvé »).
- 100-170 av. J.-C.** **PTOLÉMÉE CLAUDE**
Savant grec. Sa *Grande Syntaxe mathématique* (ou *Almageste*), vaste compilation des connaissances astronomiques des Anciens, et sa *Géographie* ont fait autorité jusqu'à la fin du Moyen-Âge et à la Renaissance. Il imaginait la Terre fixe au centre de l'Univers et développa un système cosmologique ingénieux, apte à rendre compte des mouvements astronomiques observés à son époque.
- II^e siècle av. J.-C.** **HIPPARQUE DE NICÉE**
Astronome et mathématicien grec, il est l'auteur d'un des premiers catalogues des étoiles visibles. Il a également calculé les dates des éclipses de la Lune et du Soleil.
- 1473-1543** **COPERNIC NICOLAS**
Astronome polonais qui émit l'hypothèse du double mouvement des planètes, sur elles-mêmes et autour du Soleil (héliocentrisme).

- 1546-1601** **BRAHE TYCHO**
Astronome danois, bien qu'il fut un défenseur du géocentrisme (selon lequel la Terre serait au centre de l'Univers), il est à l'origine de remarquables perfectionnements des instruments d'optique et d'observations très précises dont Kepler, son élève, tira les lois qui portent son nom.
- 1564-1642** **GALILEI GALILEO dit GALILÉE**
Mathématicien, physicien et astronome italien. Célèbre par ses expériences de mécanique, il peut être considéré comme le fondateur de la physique des temps modernes. Constructeur des premières lunettes utilisables en astronomie, il fit des découvertes qui révolutionnèrent la conception de l'univers à son époque.
- 1571-1630** **KEPLER JOHAN**
Astronome et physicien allemand. Il découvrit les lois du mouvement des planètes. Il établit la loi approchée de la réfraction. Il fabriqua une des premières longues-vues.
- 1588-1632** **JANSSEN ZACHARIAS**
Verrier hollandais qui inventa le microscope.
- 1596-1650** **DESCARTES RENÉ**
Illustre philosophe et mathématicien français, rendu célèbre par la doctrine du *cartésianisme*, mouvement philosophique dont le *Discours de la Méthode* [1637] fut l'origine. Il contribua au développement de la géométrie analytique et au progrès de la mécanique. On lui doit, en optique, l'énoncé de la loi de la réfraction.
- 1601-1665** **FERMAT PIERRE DE**
Illustre mathématicien français, il établit, entre autres, les bases du calcul infinitésimal et du calcul des probabilités.
- 1602-1686** **QUERICKE OTTO DE**
Bourgmestre de la ville de Magdebourg. Il construisit une des premières pompes à air et réalisa l'expérience des sphères de Magdebourg.
- 1608-1647** **TORRICELLI EVANGELISTA**
Physicien et mathématicien italien qui inventa le baromètre à mercure.
- 1620-1684** **MARIOTTE ABBÉ EDMÉ**
Physicien français qui contribua au développement de la physique expérimentale en France. On lui doit des travaux importants en mécanique, en hydrostatique, ainsi que dans l'étude des gaz.
- 1623-1662** **PASCAL BLAISE**
Illustre mathématicien, physicien, philosophe et écrivain français qui étudia de nombreux problèmes scientifiques. Il énonça le principe fondamental de l'hydrostatique et imagina le fonctionnement d'une presse hydraulique.
- 1625-1712** **CASSINI JEAN DOMINIQUE**
Astronome et inventeur français qui fit progresser par ses observations la connaissance du système solaire.

1627-1691	BOYLE ROBERT Physicien irlandais qui a étudié la compressibilité des gaz (loi de Boyle-Mariotte) et introduit la notion d'analyse en chimie.
1629-1695	HUYGENS CHRISTIAN Physicien, géomètre et astronome hollandais. Il perfectionna la technique de la taille des verres d'optique et découvrit notamment l'anneau de Saturne. Ses contributions à la mécanique et à l'optique ont été très importantes. Il énonça une théorie ondulatoire de la lumière.
1642-1727	NEWTON ISAAC Illustre physicien anglais. Sa loi de l'attraction universelle en fit le fondateur de la mécanique céleste. Génial mathématicien, il a inventé, en même temps que Leibnitz, le calcul infinitésimal. En optique, il réalisa la décomposition de la lumière blanche par le prisme et en tira une théorie des couleurs. Il construisit le premier télescope à miroirs. Par l'étendue et la hauteur de ses idées et par son autorité au XVII ^e siècle, Newton a exercé sur la physique de son époque une influence considérable, largement prolongée jusqu'à nos jours.
1647-1712	PAPIN DENIS Savant et inventeur français qui donna en 1687 le principe de la première machine à vapeur à piston.
1656-1742	HALLEY EDMOND Astronomie britannique, auteur de nombreuses publications concernant la géophysique, la météorologie et l'astronomie, il reste surtout connu pour avoir étudié le mouvement des comètes (1705) et pour avoir le premier prédit par le calcul le retour près du Soleil de l'une d'entre elles, qui porte à présent son nom.
1686-1736	FAHRENHEIT DANIEL Physicien allemand qui inventa un aéromètre et perfectionna les thermomètres. On lui doit l'échelle des températures qui porte son nom.
1701-1744	CELSIUS ANDRÉ Astronome allemand qui proposa l'échelle thermométrique centésimale encore utilisée aujourd'hui.
1706-1790	FRANKLIN BENJAMIN Homme politique et physicien américain qui inventa le paratonnerre.
1731-1810	CAVENDISH HENRY Chimiste et physicien anglais qui utilisa une balance de torsion pour mesurer la constante de la gravitation universelle et en déduisit la masse de la Terre. Il est surtout connu pour ses travaux en électrostatique.
1736-1819	WATT JAMES Mécanicien écossais qui perfectionna la machine à vapeur et permit ainsi sa généralisation dans l'industrie.
1736-1806	COULOMB CHARLES-AUGUSTIN DE Officier du génie français qui étudia l'attraction et la répulsion des corps électrisés. Il mit au point une balance de torsion très sensible permettant la mesure de forces de très faibles intensités.

1778-1829	DAVY HUMPHRY (SIR) Chimiste et physicien anglais qui isola les métaux alcalins et alcalino-terreux par électrolyse. Il pressentit les idées actuelles sur la mobilité des ions H ⁺ et OH ⁻ et amena une révision de la théorie de Lavoisier sur les acides. Il est l'inventeur d'une célèbre lampe utilisée dans les mines de charbon.
1784-1846	BESSEL FRIEDRICH WILHELM Astronome allemand. Il publia en 1838 la première mesure précise d'une distance stellaire et donna un grand essor à l'astrométrie. Il développa des fonctions mathématiques qui ont de nombreuses applications en physique.
1787-1854	OHM GEORGES-SIMON Physicien allemand auteur d'une théorie mathématique du circuit électrique. Il précisa la notion de résistance électrique.
1788-1827	FRESNEL AUGUSTIN Physicien français, créateur de l'optique vibratoire et de l'optique cristalline affirmant la nature ondulatoire de la lumière.
1791-1867	FARADAY MICHAEL Physicien et chimiste anglais qui découvrit les phénomènes d'induction électromagnétique, étudia l'électrolyse et réalisa la liquéfaction de nombreux gaz.
1796-1832	CARNOT SADI Physicien français qui étudia le premier les liens entre la chaleur et le travail. Il énonça le deuxième principe de la thermodynamique.
1801-1868	PLÜCKER JULIUS Mathématicien et physicien allemand. Il proposa une approche algébrique de la géométrie projective et étendit la notion de coordonnées. A partir de 1847, il se consacra à la physique.
1802-1875	WHEATSTONE CHARLES Physicien anglais dont les travaux ont porté sur l'acoustique et l'électricité. Il inventa le rhéostat et une méthode de mesure des résistances, ainsi que le télégraphe électromagnétique.
1803-1853	DOPPLER CHRISTIAN Mathématicien et physicien allemand, il est connu pour ses travaux en acoustique et pour le phénomène qui porte son nom : l'effet Doppler-Fizeau.
1811-1827	LE VERRIER URBAIN Astronome français. Spécialiste de mécanique céleste, il fut, par ses calculs, à l'origine de la découverte (par l'Allemand Galle 1812-1910) de la planète Neptune (1846).
1811-1899	BUNSEN ROBERT WILHELM Chimiste et physicien allemand. Il a construit une pile électrique, imaginé un brûleur à gaz et inventé, avec Kirchhoff, l'analyse spectrale.

1743-1794	LAVOISIER ANTOINE LAURENT DE En définissant la matière par la propriété d'être pesante, en introduisant l'usage systématique de la balance, en énonçant la loi de conservation de la masse et celle de conservation des éléments, ce savant français peut être considéré comme le créateur de la science chimique.
1745-1827	VOLTA ALEXANDRE Physicien italien qui inventa la pile électrique et l'électroscope.
1746-1822	CHARLES JACQUES-ALEXANDRE Physicien expérimentateur qui étudia notamment l'influence de la température sur les propriétés des gaz. Au cours de ses nombreuses ascensions, il perfectionna la technique des ballons à gaz.
1749-1827	LAPLACE PIERRE SIMON DE Mathématicien, physicien et astronome, il fut l'un des plus grands savants français. On lui doit, entre autres, la loi de Laplace qui permet de calculer la force qui s'exerce sur un conducteur placé dans un champ magnétique lorsqu'il est parcouru par un courant électrique.
1754-1826	PROUST JOSEPH LOUIS Chimiste français, il fut un des fondateurs de l'analyse chimique. Il énonça la loi des proportions définies ou loi de Proust : les masses des corps simples qui constituent un composé sont entre elles dans un rapport constant.
1766-1844	DALTON JOHN Physicien et chimiste anglais, il est le premier à publier une théorie atomique en 1808. Ses travaux sur les défauts de la vision des couleurs sont très connus (daltonisme).
1775-1836	AMPÈRE ANDRÉ-MARIE Illustre mathématicien et physicien français qui s'occupa avec succès de science, de poésie, de littérature et de philosophie. Il étudia particulièrement l'influence d'un champ magnétique sur un courant électrique et posa les bases de l'électromagnétisme.
1776-1850	GAY-LUSSAC JOSEPH-LOUIS Physicien et chimiste français qui perfectionna le baromètre et étudia la dilatation des gaz.
1776-1856	AVOGADRO AMEDEO Chimiste italien qui énonça en 1811 la loi de constitution moléculaire des gaz (dans les mêmes conditions de température et de pression, un volume de n'importe quel gaz contient toujours le même nombre de molécules).
1777-1851	OERSTED CHRISTIAN Physicien danois qui découvrit l'induction magnétique par un courant électrique en 1820.
1777-1855	GAUSS CARL FRIEDRICH Mathématicien, astronome et physicien allemand qui effectua de nombreux travaux en magnétisme, électricité et optique. Auteur du théorème de Gauss donnant l'expression du flux électrique ou magnétique sortant d'une surface fermée placée dans un champ.

1818-1889	JOULE JAMES PRESCOTT Physicien anglais qui montra l'équivalence des énergies thermique et mécanique. Il établit en électricité la loi qui porte son nom.
1819-1868	FOUCAULT JEAN BERNARD LÉON Physicien français. Il obtint en 1845 la première photographie du Soleil. Il mesura la vitesse de la lumière et perfectionna les télescopes à miroirs. En mécanique, son expérience prouvant la rotation de la Terre au moyen d'un pendule est célèbre.
1819-1896	FIZEAU LOUIS HIPPOLYTE Physicien français. Il mesura le premier la vitesse de la lumière au moyen d'une roue dentée.
1821-1894	HELMOLTZ HERMANN LUDWIG FERDINAND VON Physiologiste et physicien allemand connu pour ses travaux sur la vue, l'ouïe, les muscles et la fibre nerveuse. Il expliqua l'origine du timbre des sons et élabora la théorie de la réversibilité des piles électriques.
1822-1888	CLAUSIUS RUDOLF EMANUEL Physicien allemand qui montra l'importance théorique de la chaleur spécifique des gaz à volume constant, perfectionna la théorie cinétique des gaz et mit en évidence la dégradation de l'énergie. Il définit en 1865 la notion d'entropie.
1824-1887	KIRCHHOFF GUSTAV ROBERT Physicien allemand, il imagine le concept de corps noir, invente le spectroscopie et énonce les lois des courants dérivés dans un circuit électrique.
1824-1907	LORD KELVIN (SIR WILLIAM THOMSON) Physicien anglais, auteur de nombreuses recherches en chaleur et en magnétisme, qui proposa l'échelle absolue des températures.
1824-1914	HITTORF WILHELM Physicien allemand qui a découvert les rayons cathodiques (1869) et observé leur déviation par les champs magnétiques.
1825-1898	BALMER JOHANN JAKOB Physicien suisse. Il expliqua la répartition des raies du spectre de l'hydrogène (séries Balmer).
1831-1879	MAXWELL JAMES-CLERK Physicien écossais, il a été l'un des principaux artisans de la théorie cinétique des gaz et de la théorie de la vision des couleurs. Ses contributions à la mécanique et à la thermodynamique ont également été importantes. Sa plus grande réalisation est sa théorie électromagnétique de la lumière.
1832-1819	CROOKES WILLIAM (SIR) Chimiste et physicien britannique. Il découvrit le thallium (1861), inventa un tube électronique (1872) et montra que les rayons cathodiques sont des particules électrisées (1878).

1833-1896	NOBEL ALFRED Chimiste et industriel suédois. Il consacra sa vie à l'étude des poudres et des explosifs, et inventa la dynamite (1886). Il fonda, par testament, les prix qui portent son nom.
1834-1887	MENDELÉËV DIMITRI Chimiste russe qui classa les éléments chimiques selon leur masse et démontra que leurs propriétés chimiques sont des fonctions périodiques de leur masse atomique.
1837-1923	VAN DER WAALS JOHANNES DIDERIC Physicien néerlandais. Il étudia la continuité des états liquides et gazeux (1873) et les forces d'interaction d'origine électrostatique entre molécules. Il donna aussi une équation d'état des fluides. Prix Nobel en 1910.
1839-1903	GIBBS WILLARD Physicien américain. Il fonda la chimie physique en étendant la thermodynamique à la chimie. Il perfectionna la mécanique statistique de Boltzmann et énonça la loi des phases, bases d'étude des équilibres physico-chimiques.
1844-1906	BOLTZMANN LUDWIG Physicien autrichien, pionnier de la thermodynamique statistique.
1845-1923	ROENTGEN WILHELM CONRAD Physicien allemand qui découvrit les rayons X en 1895. Prix Nobel en 1901.
1850-1936	LE CHATELIER HENRY Chimiste et métallurgiste français connu pour ses travaux sur les alliages, le déplacement des équilibres physico-chimiques, les céramiques, les ciments et la synthèse de l'ammoniac.
1852-1908	BECQUEREL HENRI Physicien français, il étudia la phosphorescence et découvrit la radioactivité de l'uranium. Prix Nobel en 1903.
1852-1931	MICHELSON ALBERT ABRAHAM Expérimentateur américain très habile. Ses mesures de la vitesse de la lumière sont célèbres et contribuèrent aux travaux qui conduisirent à la théorie de la relativité restreinte due à Albert Einstein.
1853-1928	LORENTZ HENDRIK ANTOON Physicien néerlandais dont les importants travaux sur l'électromagnétisme permirent à Einstein d'élaborer sa théorie de la relativité restreinte. Prix Nobel en 1902.
1856-1940	THOMSON SIR JOSEPH JOHN Physicien anglais, il mesura le rapport entre la charge et la masse de l'électron et inventa le spectrographe de masse. Prix Nobel en 1906.
1856-1943	TESLA NIKOLA Ingénieur et physicien américain d'origine croate. Il réalisa le premier moteur asynchrone à champ tournant, imagina les courants polyphasés et les commutatrices, et inventa le couplage de deux circuits oscillants par induction mutuelle.

1879-1955	EINSTEIN ALBERT Physicien et mathématicien naturalisé américain, Einstein est d'origine allemande et a fait une importante partie de ses études en Suisse. A l'origine de la théorie de la relativité restreinte (1905), puis générale (1916), prix Nobel en 1921 pour l'effet photoélectrique, il a fait d'importants travaux dans divers domaines de la physique.
1882-1945	GEIGER HANS Physicien allemand. Après des recherches en physique nucléaire, avec Rutherford, il inventa en 1913 le compteur de particules qui porte son nom.
1882-1970	BORN MAX Physicien anglais d'origine allemande, c'est un des pionniers de la mécanique quantique. Prix Nobel en 1954.
1883-1964	HESS VICTOR FRANZ Physicien autrichien, naturalisé aux USA en 1944, connu pour ses travaux sur les rayons cosmiques. Prix Nobel en 1936.
1885-1962	BOHR NIELS Physicien atomique et nucléaire danois qui est à l'origine du modèle planétaire de l'atome. Prix Nobel en 1922.
1887-1961	SCHRÖDINGER ERWIN Physicien autrichien célèbre pour ses travaux de physique nucléaire et de mécanique ondulatoire. Prix Nobel en 1933 avec Paul Dirac.
1889-1953	HUBBLE EDWIN POWELL Astronome américain connu pour ses travaux sur les galaxies. Il a établi que la vitesse d'éloignement des galaxies est proportionnelle à la distance qui nous en sépare; la constante de proportionnalité est nommée constante de Hubble.
1891-1974	CHADWICK SIR JAMES Physicien britannique qui montra en 1932 l'existence du neutron. Prix Nobel en 1935.
1892-1987	BROGLIE LOUIS VICTOR, DUC DE Physicien français, il établit une relation trouvant l'hypothèse selon laquelle les particules matérielles présentent un caractère ondulatoire; la mécanique ondulatoire ainsi développée est à l'origine de la mécanique quantique. Prix Nobel en 1929.
1900-1958	PAULI WOLFGANG Physicien américain et suisse d'origine autrichienne. L'un des créateurs de la théorie quantique des champs, il a énoncé, en 1925, le principe d'exclusion, selon lequel deux électrons d'un atome ne peuvent avoir les mêmes nombres quantiques. Avec Fermi, en 1931, il émit l'hypothèse de l'existence du neutrino. Prix Nobel en 1945.
1901-1954	FERMI ENRICO Physicien nucléaire italien, il réalisa en 1942 la première pile atomique à Chicago. On a donné son nom à une famille de particules élémentaires: les fermions.

1857-1894	HERTZ HEINRICH Physicien allemand, il découvre les ondes électromagnétiques en 1887 et montre qu'elles possèdent toutes les propriétés de la lumière; la même année, il met en évidence l'effet photoélectrique.
1858-1947	PLANCK MAX Physicien allemand qui révolutionna la physique moderne en élaborant la physique des quanta. Prix Nobel en 1918.
1859-1906	CURIE PIERRE Physicien français, découvre la piézo-électricité et, avec sa femme Marie, le radium en 1898. Prix Nobel en 1903 avec sa femme et Henri Becquerel.
1860-1934	VILLARD PAUL Physicien français qui a découvert en 1900 le rayonnement gamma des corps radioactifs.
1865-1943	ZEEMAN PETER Physicien néerlandais. Il découvrit, en 1943, l'action des champs magnétiques sur l'émission de la lumière (effet Zeeman) et étudia la propagation de la lumière dans les milieux en mouvement, confirmant ainsi les théories relativistes. Prix Nobel en 1902.
1867-1934	CURIE MARIE (née Skłodowska) Physicienne française, d'origine polonaise, première femme à enseigner à la Sorbonne. Elle découvre, avec son mari Pierre, le radium en 1898. Deux prix Nobel: en 1903 (avec son mari Pierre et Henri Becquerel) et en 1911.
1868-1953	MILLIKAN ROBERT ANDREWS Physicien américain qui détermina la charge électrique et la masse de l'électron, calcula la valeur de la constante de Planck et étudia les rayons cosmiques. Prix Nobel en 1923.
1871-1937	RUTHERFORD ERNEST Physicien anglais connu pour ses travaux sur la radioactivité, les isotopes et la structure de la matière; il met en évidence que la matière de l'atome est concentrée principalement dans le noyau et réussit la première transmutation d'un élément stable. Prix Nobel de chimie en 1908.
1872-1946	LANGEVIN PAUL Physicien français. Auteur de travaux sur les ions, le magnétisme, la thermodynamique, la relativité, il s'est également efforcé d'améliorer l'enseignement des sciences et de populariser les théories de la relativité et de la physique quantique.
1875-1946	LEWIS GILBERT NEWTON Physicien et chimiste américain, auteur, en 1916, de la théorie de la covalence. Il a donné une définition générale des acides et a proposé, en 1926, le terme de « photon » pour désigner le quantum d'énergie rayonnante.
1877-1956	SODDY FREDERICK Chimiste britannique. Ses travaux sur la radioactivité lui permirent d'expliquer le mécanisme de désintégration des atomes et de donner la loi de filiation (1902). Il découvrit en 1903 l'isotopie. Prix Nobel en 1921.

1901-1976	HEISENBERG WERNER Physicien allemand qui fut l'un des fondateurs de la théorie quantique. Il a formulé en 1927 les inégalités qui stipulent qu'il est impossible de mesurer simultanément la position et la vitesse d'un objet quantique. Prix Nobel en 1932.
1902-1984	DIRAC PAUL Physicien britannique, un des créateurs de la mécanique quantique; il introduisit un formalisme mathématique qui lui permit de prévoir l'existence de l'électron positif, ou positron. Prix Nobel en 1933 avec Erwin Schrödinger.
1904-1968	GAMOW GEORGE ANTHONY Physicien et astrophysicien américain d'origine russe. Il a donné son nom à la barrière de potentiel dépendant l'accès du noyau d'un atome. En cosmologie, il a repris et développé l'hypothèse selon laquelle l'Univers, actuellement en expansion, aurait connu une explosion primordiale, le Big Bang (1948).
1905-1991	ANDERSON CARL DAVID Physicien américain. Il a découvert le positron (1932) ainsi que le méson (1937). Prix Nobel en 1936.
1918-1988	FEYNMAN RICHARD P. Physicien américain. Ses travaux ont porté sur la théorie des interactions entre électrons et photons (électrodynamique quantique) et sur la physique de la matière condensée. Prix Nobel en 1965.
1927-...	MÜLLER KARL ALEXANDER Physicien suisse. Il a synthétisé en 1986, avec J. Bednorz, une céramique supraconductrice à une température de 35 K. Prix Nobel en 1987.
1929-...	GELL-MANN MURRAY Physicien américain qui a contribué aux classifications des particules à interactions fortes (hadrons) introduisant la notion d'étrangeté (charge conservée au cours d'interactions fortes). Il a postulé l'existence des constituants élémentaires des hadrons, les quarks. Prix Nobel en 1969.
1950-...	BEDNORZ JOHANNES GEORG Physicien allemand. Avec K. Müller, il a effectué des recherches sur les céramiques supraconductrices à haute température. Prix Nobel en 1987.