

Physique Générale C
Semestre d'automne (11P090)
Notes du cours basées sur le livre
Physique
de Eugene Hecht, éditions De Boeck

Chapitre 13

Enseignante:
Anna Sfyrla

Assistant(e)s:
Mireille Conrad
Tim Gazdic
Jean-Marie Poumirol
Rebecka Sax
Marco Valente

Bibliographie

- [1] Eugene Hecht, Physique, éditions De Boeck.
- [2] Eugene Hecht, College Physics, Schaum's outlines.
- [3] Randall D. Knight, Physics for Scientists and Engineers, Pearson.
- [4] Yakov Perelman, Oh, la Physique!, Dunod.

Table des matières

13 La matière	1
13.1 Les atomes	1
13.2 États de la matière	5

Dans notre étude de l'univers physique, un de nos sujets d'intérêt est la matière. La question "qu'est-ce que c'est la matière" était une des questions qui ont toujours intéressées l'humanité dès l'antiquité.

Ce chapitre introduit l'exploration de la matière. Dans les chapitres suivants nous étudierons ses propriétés mécaniques, thermiques, électriques, magnétiques et optiques. Nous commençons par un aperçu du paysage atomique. Nous explorons ensuite les différents états de la matière et leurs interactions avec l'environnement: les liquides et les gaz, appelés aussi "fluides"; et les solides.¹

13.1 Les atomes

Qu'est-ce que c'est la matière?

A ce jour (2017), on a identifié 118 éléments de base (oxygène, fer, hydrogène, etc...), dont 92 existent naturellement sur Terre (figure 13.1).

Un échantillon d'un élément donné est composé d'entités identiques sub-microscopiques, appelées **atomes**, chacun étant le plus petit échantillon représentatif de l'élément. Lorsque les éléments se combinent, on obtient des **corps composés**. L'entité fondamentale d'un corps composé, c'est-à-dire celle qui a les propriétés chimiques du composé, est une **molécule**, elle-même composée d'atomes (par exemple, $NaCl$, H_2O). Certains gaz comme l'Hélium (He) et l'Argon (Ar) sont monoatomiques (leurs molécules sont des atomes individuels), tandis que l'oxygène et l'azote sont diatomiques (O_2 , N_2 – chaque molécule est formée de deux atomes).

¹Le plasma est le troisième état de la matière, mais on n'en parle pas dans ce cours.

IUPAC Periodic Table of the Elements

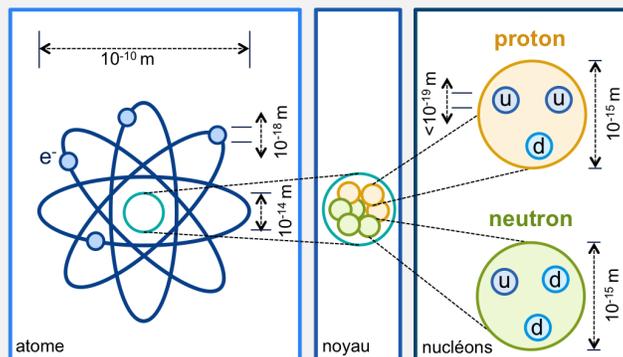
Key:																		
atomic number		Symbol		name		conventional atomic weight		standard atomic weight										
1	H	hydrogen	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	2	He	helium	4.0026	4.0026	4.0026	4.0026	4.0026	
3	Li	lithium	6.94	6.94	6.94	6.94	6.94	6.94	6.94	4	Be	beryllium	9.0122	9.0122	9.0122	9.0122	9.0122	9.0122
11	Na	sodium	22.990	22.990	22.990	22.990	22.990	22.990	22.990	12	Mg	magnesium	24.304	24.304	24.304	24.304	24.304	24.304
19	K	potassium	39.098	39.098	39.098	39.098	39.098	39.098	39.098	20	Ca	calcium	40.078(4)	40.078(4)	40.078(4)	40.078(4)	40.078(4)	40.078(4)
21	Sc	scandium	44.956	44.956	44.956	44.956	44.956	44.956	44.956	22	Ti	titanium	47.867	47.867	47.867	47.867	47.867	47.867
23	V	vanadium	50.942	50.942	50.942	50.942	50.942	50.942	50.942	24	Cr	chromium	51.996	51.996	51.996	51.996	51.996	51.996
25	Mn	manganese	54.938	54.938	54.938	54.938	54.938	54.938	54.938	26	Fe	iron	55.845(2)	55.845(2)	55.845(2)	55.845(2)	55.845(2)	55.845(2)
27	Co	cobalt	58.933	58.933	58.933	58.933	58.933	58.933	58.933	28	Ni	nickel	58.693	58.693	58.693	58.693	58.693	58.693
29	Cu	copper	63.546(3)	63.546(3)	63.546(3)	63.546(3)	63.546(3)	63.546(3)	63.546(3)	30	Zn	zinc	65.38(2)	65.38(2)	65.38(2)	65.38(2)	65.38(2)	65.38(2)
31	Ga	gallium	69.723	69.723	69.723	69.723	69.723	69.723	69.723	32	Ge	germanium	72.630(8)	72.630(8)	72.630(8)	72.630(8)	72.630(8)	72.630(8)
33	As	arsenic	74.922	74.922	74.922	74.922	74.922	74.922	74.922	34	Se	selenium	78.971(8)	78.971(8)	78.971(8)	78.971(8)	78.971(8)	78.971(8)
35	Br	bromine	79.904	79.904	79.904	79.904	79.904	79.904	79.904	36	Kr	krypton	83.798(2)	83.798(2)	83.798(2)	83.798(2)	83.798(2)	83.798(2)
37	Rb	rubidium	85.468	85.468	85.468	85.468	85.468	85.468	85.468	38	Sr	strontium	87.62	87.62	87.62	87.62	87.62	87.62
39	Y	yttrium	88.906	88.906	88.906	88.906	88.906	88.906	88.906	40	Zr	zirconium	91.224(2)	91.224(2)	91.224(2)	91.224(2)	91.224(2)	91.224(2)
41	Nb	niobium	92.906	92.906	92.906	92.906	92.906	92.906	92.906	42	Mo	molybdenum	95.95	95.95	95.95	95.95	95.95	95.95
43	Tc	technetium	98.906	98.906	98.906	98.906	98.906	98.906	98.906	44	Ru	ruthenium	101.07(2)	101.07(2)	101.07(2)	101.07(2)	101.07(2)	101.07(2)
45	Rh	rhodium	102.91	102.91	102.91	102.91	102.91	102.91	102.91	46	Pd	palladium	106.42	106.42	106.42	106.42	106.42	106.42
47	Ag	silver	107.87	107.87	107.87	107.87	107.87	107.87	107.87	48	Cd	cadmium	112.41	112.41	112.41	112.41	112.41	112.41
49	In	indium	114.82	114.82	114.82	114.82	114.82	114.82	114.82	50	Sn	tin	118.71	118.71	118.71	118.71	118.71	118.71
51	Sb	antimony	121.76	121.76	121.76	121.76	121.76	121.76	121.76	52	Te	tellurium	127.60(3)	127.60(3)	127.60(3)	127.60(3)	127.60(3)	127.60(3)
53	I	iodine	126.90	126.90	126.90	126.90	126.90	126.90	126.90	54	Xe	xenon	131.29	131.29	131.29	131.29	131.29	131.29
55	Cs	caesium	132.91	132.91	132.91	132.91	132.91	132.91	132.91	56	Ba	barium	137.33	137.33	137.33	137.33	137.33	137.33
57-71	lanthanoids					72	Hf	hafnium	178.49(2)	178.49(2)	178.49(2)	178.49(2)	178.49(2)	178.49(2)	178.49(2)	178.49(2)		
73	Ta	tantalum	180.95	180.95	180.95	180.95	180.95	180.95	180.95	74	W	tungsten	183.84	183.84	183.84	183.84	183.84	183.84
75	Re	rhenium	186.21	186.21	186.21	186.21	186.21	186.21	186.21	76	Os	osmium	190.23(3)	190.23(3)	190.23(3)	190.23(3)	190.23(3)	190.23(3)
77	Ir	iridium	192.22	192.22	192.22	192.22	192.22	192.22	192.22	78	Pt	platinum	195.08	195.08	195.08	195.08	195.08	195.08
79	Au	gold	196.97	196.97	196.97	196.97	196.97	196.97	196.97	80	Hg	mercury	200.59	200.59	200.59	200.59	200.59	200.59
81	Tl	thallium	204.38	204.38	204.38	204.38	204.38	204.38	204.38	82	Pb	lead	207.2	207.2	207.2	207.2	207.2	207.2
83	Bi	bismuth	208.98	208.98	208.98	208.98	208.98	208.98	208.98	84	Po	polonium	209	209	209	209	209	209
85	At	astatine	210	210	210	210	210	210	210	86	Rn	radon	222	222	222	222	222	222
87	Fr	francium	223	223	223	223	223	223	223	88	Ra	radium	226	226	226	226	226	226
89-103	actinoids					104	Rf	rutherfordium	261	261	261	261	261	261	261	261		
105	Db	duobium	262	262	262	262	262	262	262	106	Sg	seaborgium	263	263	263	263	263	263
107	Bh	bohrium	264	264	264	264	264	264	264	108	Hs	hassium	265	265	265	265	265	265
109	Mt	meitnerium	266	266	266	266	266	266	266	110	Ds	darmstadtium	267	267	267	267	267	267
111	Rg	roentgenium	268	268	268	268	268	268	268	112	Cn	copernicium	269	269	269	269	269	269
113	Nh	nihonium	270	270	270	270	270	270	270	114	Fl	flerovium	271	271	271	271	271	271
115	Mc	moscovium	272	272	272	272	272	272	272	116	Lv	livermorium	273	273	273	273	273	273
117	Ts	tennessine	274	274	274	274	274	274	274	118	Og	oganesson	276	276	276	276	276	276

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY

For notes and updates to this table, see www.iupac.org. This version is dated 28 November 2016. Copyright © 2016 IUPAC, the International Union of Pure and Applied Chemistry.

Figure 13.1: La dernière version du tableau périodique des éléments (28 Novembre 2016) a inclu les élément récemment ajoutés (113, 115, 117 et 118) ainsi que leurs noms et symboles. Plus d'information: <https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/>.

Les constituants de l'atome On connaît aujourd'hui que l'atome n'est pas une particule élémentaire. Il est constitué d'un noyau chargé positivement, autour duquel se trouvent des électrons, chargés négativement. Le noyau est constitué de protons et de neutrons, qui sont faits de quarks, d'antiquarks et de gluons. On considère actuellement que des particules comme l'électron ainsi que les quarks et les gluons sont des particules élémentaires. Dans les collisionnaires hadroniques (tel que le LHC au CERN) on étudie leurs propriétés ainsi que leurs interactions. La figure suivante montre une représentation *simplifiée* de l'atome et des ces constituants.



L'unité de masse atomique

La masse des atomes et des molécules s'exprime souvent en unité de masse atomique: **uma** ou **u**. Par définition : **12 u** correspondent très précisément à la masse d'un atome neutre de $^{12}_6C$. Exprimé en grammes: $1 \text{ uma} = 1.6605387 \times 10^{-24} \text{ g}$. L'atome d'hydrogène (1_1H) a une masse de 1.007825 u. L'atome d'oxygène ($^{16}_8O$) a une masse de 15.994915 u. La masse *moléculaire* est la somme des masses des atomes constituant la molécule; par exemple: CO_2 a une masse de $12 \text{ u} + 2 \times 15.994915 \text{ u} \approx 44 \text{ u}$.

Le nombre d'Avogadro

En 1811, Amedeo Avogadro, fit deux propositions brillantes (forgeant à l'occasion le mot "molécule"): (1) Les éléments gazeux peuvent exister sous forme moléculaire. (2) Des volumes égaux de gaz moléculaires (dans les mêmes conditions de températures et de pressions) contiennent le même nombre de molécules.

L'hydrogène moléculaire a une masse de $\sim 2 \text{ u}$. Supposons qu'on introduise 2 g de gaz d'hydrogène dans un ballon extensible, qui peut être maintenu à la température normale (0°C) et à la pression normale (1 atm), dites conditions normales de température et de pression (CNTP). Nous constatons que le gaz occupe un volume de 22.4 litres. Selon Avogadro, 22.4 litres d'oxygène ou de tout autre gaz contiennent le même nombre de molécules. Chaque molécule H_2 a une masse de $2 \times 1.007825 \text{ u} \approx 2 \text{ u}$ et chaque molécule O_2 a une masse de $2 \times 15.994915 \text{ u} \approx 32 \text{ u}$. Par conséquent, 22.4 litres d'oxygène devraient avoir une masse 16 fois plus grande que 22.4 litres d'hydrogène. Cela s'avère exact. 22.4 litres de tout gaz aux CNTP ont une masse qui, exprimée en grammes, a la même valeur numérique que la masse moléculaire du gaz. Cette mesure est appelée une **molécule-gramme** ou simplement une **mole** du gaz. Par exemple, une molécule de CO_2 a une masse de $12 + 2 \times 16 = 44 \text{ u}$; donc 1 mole de CO_2 a une masse de 44 grammes et, comme gaz aux CNTP, elle occupe 22.4 litres.

Le nombre de molécules dans une mole est le **nombre d'Avogadro** N_A , bien que Avogadro n'ait eu aucune idée de sa valeur numérique. La mesure actuelle de ce nombre est:

$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ molécules / mole}$$

Une mole d'une substance que ce soit des ions, des atomes, des molécules, ou même un mélange de différentes particules, contient toujours N_A constituants élémentaires.

Exemple 13.1.1. Déterminer (a) la masse d'un atome de carbone en kilogrammes et (b) l'équivalent d'une unité de masse atomique en kilogrammes.

Solution Données: la masse d'un atome de carbone est 12 u et une mole ou 12 g de carbone contient N_A atomes. À trouver: la masse d'un atome de carbone en kg et l'équivalent de 1 u en kg.

(a) La masse d'un atome de carbone est la masse d'une mole de carbone divisée par le nombre d'atomes dans une mole. Donc:

$$m_C = \frac{12 \text{ g}}{0.022 \times 10^{23}} = 1.993 \times 10^{-23} \text{ g}$$

soit $m_C = 1.993 \times 10^{-26}$ kg.

(b) Comme $12 \text{ u} = m_C = 1.993 \times 10^{-26}$ kg, on a:

$$1 \text{ u} = \frac{1.993 \times 10^{-26} \text{ kg}}{12} = 1.661 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Masse volumique et densité

La **masse volumique** s'exprime en kilogramme/m³:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Quelques exemples des masses volumiques ρ de certains matériaux sont listé sur le tableau à coté.

La **densité** est le rapport entre la masse volumique d'une substance et celle de l'eau à 4°C. C'est une valeur absolue, sans dimension, ni unité.

Materiau	ρ (kg/m ³)
Air 0°C / 1 atm	1.29
Air 20°C / 1 atm	1.21
Air 0°C / 50 atm	6.5
CO ₂ 0°C / 1 atm	1.98
Hélium 0°C / 1 atm	0.179
Eau (vapeur)	0.598
Eau 4°C / 1 atm	1000
Eau 4°C / 50 atm	1002
Eau de mer	1025
mercure	13600
Or	19300
Terre (noyau)	9500
Soleil (au centre)	1.6×10^5
Noyau atomique	10^{17}

Comme $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ en CNTP, la densité de n'importe quelle substance équivaut à l'expression numérique de sa masse volumique en g/cm³.

$$1 \text{ g/cm}^3 = \frac{1 \times 10^{-3} \text{ kg}}{(1 \times 10^{-2} \text{ m})^3} = 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Ainsi, la densité du mercure est $13600/1000 = 13.6$.

Exemple 13.1.2. Soit une sphère pleine en or de 10 cm de diamètre (masse atomique = 197 u). La masse volumique de l'or est $19.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Sa densité est de 19.3. Déterminez: (a) la masse de la sphère et (b) le nombre d'atomes d'or contenus dans la sphère.

Solution

(a) Le volume de la sphère est:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3} \cdot 3.14 \cdot (0.05)^3 \text{ m}^3 = 0.542 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

La masse volumique permet de trouver sa masse:

$$m = \rho V = \dots = 10.1 \text{ kg} = 10100 \text{ g}$$

(b) 1 mole d'or a une masse de 197 g. Cette sphère correspond donc à $10100 \text{ g}/197 \text{ g} = 51.27 \text{ mol}$. Le nombre d'atomes N est égal à:

$$N = N_A \times N_{\text{moles}} = (6.022 \times 10^{23} \text{ atomes/mol}) \times (51.27 \text{ mol}) \Rightarrow N = 3.1 \times 10^{25} \text{ atomes.}$$

Taille des atomes L'atome a une structure complexe. C'est un ensemble de particules en mouvement et en interaction. Il est constitué d'un noyau très petit et très dense entouré par un nuage d'électrons et il est électriquement neutre. Le noyau est une "boule" d'un diamètre 10^4 à 10^5 fois plus petit que celui de l'atome. Constituée de protons chargés positivement et de neutrons neutres qui se déplacent rapidement, liés par la force nucléaire.

Vers la fin des années 1880, plusieurs expériences ont déterminé grossièrement la taille des atomes et des molécules. Une des plus faciles à analyser consiste à prendre un volume connu d'huile et de le laisser s'étaler sur la surface de l'eau. Il y a de bonnes raisons pour supposer que la couche s'amincit jusqu'à l'épaisseur d'une molécule. En mesurant la superficie de la couche, nous pouvons déterminer son épaisseur et donc le diamètre de la molécule. Aujourd'hui, nous savons que les atomes de toutes sortes sont presque de même taille, de diamètre variant grossièrement entre 1×10^{-10} m à 3×10^{-10} m.

Nous pouvons obtenir une estimation des dimensions des atomes et des molécules dans un solide ou un liquide, en négligeant l'espace vide entre eux, et en supposant qu'ils 'remplissent' tout le volume du corps. En fait ce n'est pas exactement le cas; mais il ne peut pas y avoir un grand espace interatomique, car ni les solides ni les liquides ne peuvent être notablement comprimés. Si nous supposons que chaque atome est un petit cube de volume L^3 , le volume V d'une mole serait alors $N_A L^3$. Si la masse de cette mole est M_m , la masse volumique est:

$$\rho = \frac{M_m}{V} = \frac{M_m}{N_A L^3}$$

d'où $L = \left(\frac{M_m}{N_A \rho}\right)^{1/3}$. La taille d'une molécule d'eau, par exemple, serait alors:

$$L = \left(\frac{18 \text{ g}}{(6.022 \times 10^{23} \text{ atomes/mole})(1.0 \text{ g/cm}^3)}\right)^{1/3}$$

soit 3×10^{-10} m ou 0.3 nm.

13.2 États de la matière

Toute substance peut en principe exister dans quatre états physiques distincts. L'état du système est déterminé par une compétition entre l'énergie de cohésion et l'énergie thermique.

- **Le solide** conserve la forme et le volume.
- **Le liquide** coule et prend la forme du récipient dans lequel il est placé, mais conserve un volume constant (si incompressible).
- **Le gaz**: coule et se disperse prenant la forme et occupant tout le volume du récipient.
- **Le plasma** est un fluide conducteur, un mélange d'atomes, ions et électrons, crée si certains atomes d'un gaz sont ionisés (c'est à dire des électrons sont enlevés ou ajoutés).

Les solides Les atomes d'un solide sont en mouvement, mais se déplacent avec une très faible amplitude autour de leur position d'équilibre en petites vibrations.

On distingue les types de solides suivants:

- **solide cristallin** (minéraux, tous les métaux et sels): les atomes forment une structure ordonnée à trois dimensions qui se répète dans toutes les directions.
- **solide amorphe** (caoutchouc, résine, plastiques et divers matériaux vitreux): substances composées d'atomes qui ne sont pas disposés d'une façon ordonnée et répétitive (pas de réseau régulier).
- **solide quasi-cristallin** (forme de matière découverte en 1983): les atomes sont disposés dans une configuration ordonnée à trois dimensions mais qui ne se répète pas avec une périodicité régulière.
- **solides composites** tels que le bois, les fibres de verre, les os et les vaisseaux sanguins sont composés de plusieurs matériaux différents liés ensemble.

Les liquides L'eau et les liquides organiques (pétrole, huile etc..) sont les seuls liquides existant en grande quantité dans la nature. Beaucoup de liquides familiers, comme le sang, le vin et les jus de fruits sont essentiellement composés d'eau. L'eau est un solvant et peut contenir de nombreux autres composants chimiques dilués (sels, alcool, colorants, etc).

Le liquide est un état intermédiaire entre la violence aléatoire du gaz et le calme relatif du solide: il faut trouver le bon équilibre entre l'énergie thermique et l'énergie de liaison. L'aptitude à s'écouler est la propriété caractéristique des liquides. Elle varie avec la force de cohésion qui est différente pour chaque substance (acétone, eau, huiles, goudron). La viscosité est la résistance interne (frottement) qui s'oppose au mouvement d'un objet immergé dans un liquide.

Les gaz L'alchimiste van Helmont (~1620) a transposé le mot grec *chaos* en flamant, obtenant le mot **gaz**. Un gaz est effectivement un sacré chaos:

- Chaque cm^2 de peau reçoit un flux de 3×10^{23} molécules d'air par seconde puisant leur énergie dans le rayonnement solaire.
- La masse volumique de l'air est 800 fois plus faible que celle de l'eau.
- L'air sous CNTP (0°C et 10^5 Pa) contient $\sim 3 \times 10^{19}$ molécules par cm^3 . La distance moyenne entre ces molécules est 3 nm soit 10 fois la taille de la molécule.
- La vitesse moyenne, sans vent, est 450 m/s (1620 km/h - à partir du théorème d'équipartition). Chaque molécule ne parcourt que 8×10^{-8} m avant d'entrer en collision.

Transformations d'état

Lorsqu'on chauffe un **solide** (e.g. la glace), ses molécules reçoivent de l'énergie cinétique qui se manifeste par un mouvement désordonné (vibration thermique): elles oscillent plus vigoureusement autour de leur position d'équilibre. Le solide fond dès que l'énergie reçue est suffisante pour surmonter les forces intermoléculaires.

A l'état **liquide**, de petits groupements de molécules associées persistent, mais ils se font et se défont au gré des déplacements de l'échantillon. Il y a de l'ordre, mais il est local et changeant. Il subsiste des forces de cohésion intermoléculaires de portée assez longue; mais les molécules ont assez d'énergie pour se mouvoir aisément malgré cette force. Elles

restent relativement proches une à l'autre et interagissent sensiblement, mais la liaison puissante et rigide du solide a disparu.

En élevant la température, le liquide se rapproche de son point d'ébullition où les liens entre molécules finissent par céder. L'énergie cinétique thermique aléatoire de certaines molécules dépasse l'énergie potentielle de cohésion; elles s'échappent alors en groupe du liquide. Les agrégats locaux se désintègrent et le liquide s'évapore: il devient un **gaz**.

Exercices

Exercice 13.1. En supposant que les atomes dans un solide sont au contact un à l'autre et en prenant un diamètre courant de 0.2 nm, (a) quelle est la taille d'un cube correspondant à une mole d'un solide quelconque? (b) Quelle est la valeur courante du volume molaire (c'est à dire le volume d'une mole) d'un solide?