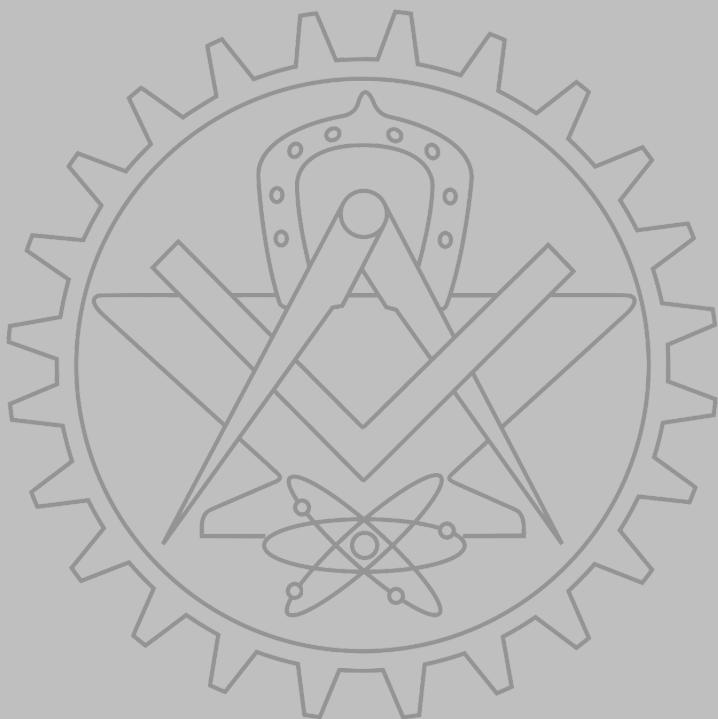


Physique-chimie

Pré-requis





Physique-chimie

Pré-requis



Bruno DOUCHY

Édition 2020.11



Association ouvrière des Compagnons du Devoir et du Tour de France
constituée selon la loi de 1901, reconnue d'utilité publique
82, rue de l'Hôtel-de-Ville - 75180 Paris Cedex 04 - Téléphone : 01 44 78 22 50
www.compagnons-du-devoir.com

Table des matières

Table des matières	i
Liste des tableaux	ii
Liste des figures	iii
Liste des formules	iv
Liste des définitions	v
Préface	vii
Avant-propos	vii
Références additionnelles et L ^A T _E X	vii
1 Chimie atomique	1
1.1 Nature de la matière	1
1.2 Description de la matière	1
1.3 Description de l'atome	2
1.4 Description détaillée d'un atome d'aluminium	6
2 Chimie de la conduction électrique	9
2.1 Dernière couche électronique	9
Annexes	11
A Addendum de chimie atomique	13
B Unité de mesure et grandeurs physique	19
B.1 Généralités	19
B.2 Mathématique	23
B.3 Espace & temps	24
Bibliographie	25



Liste des tableaux

1.1	Description des nombres quantiques	4
1.3	Distribution des électrons dans les orbitales atomiques par sous-couche électronique ⁴ . .	5
1.4	Cases quantiques en état de valence	5
A.1	Distribution des électrons dans les orbitales atomiques par sous-couche électronique ⁴ . .	13
A.2	Orbitales réelles d'un atome hydrogénoides par triplet de nombres quantiques (n, ℓ, m_ℓ) ³ . .	15
B.1	Alphabet grec	20
B.2	Unités SI et grandeurs correspondante de base	21
B.3	Préfixes des unités SI	21
B.4	Unités SI dérivées avec des noms et des symboles spéciaux	21
B.5	Unités en usage avec le SI	22
B.6	Unités en usage avec le SI dont la valeur est obtenue expérimentalement	22
B.7	Signes mathématiques	23
B.8	Classification des locaux	23
B.9	Unités SI et grandeurs définissant l'espace et le temps	24



Liste des figures

1.1	Décomposition de la matière	1
1.2	Ordre de répartition des sous-couches électroniques	6
1.3	Modélisation détaillée (animation à la figure A.2 page 18)	7
1.4	Représentation atomique de Lewis et de Bohr	8
A.1	Tableau périodique des éléments chimiques	14
A.2	Modélisation animée d'un atome d'aluminium avec ses différentes couches atomiques . .	18



Liste des formules

2.1 Valeur expérimentale de l'eV	9
--	---



Liste des définitions

1.1	Matière	1
1.2	Molécule	1
1.3	Atome	1
1.4	Proton	1
1.5	Neutron	2
1.6	Électron	2
1.7	Isotope	3
1.8	Masse molaire	3
1.9	Configuration électronique	3
1.10	Couche électronique de valence	3
1.11	Valence d'un l'atome	3
1.12	Électron libre	3
1.13	Ion	3
1.14	Nucléide	3
1.15	État fondamental	3



Préface

Avant-propos

Ces cours de physique – chimie appliquées à l'électrotechnique sont à la disposition des étudiants BTS Électrotechnique pour appréhender les origines de l'énergie électrique et sa maîtrise appliquée aux environnements professionnels. La compréhension de ces matières est indispensable pour saisir la nature un peu abstraite de l'énergie électrique que les détenteurs du BTS Électrotechnique se doivent de maîtriser.

Ces cours sont la référence pédagogique pour toute la formation et ils regroupent toutes les connaissances théoriques à maîtriser à l'issue de la formation. Il couvrira donc le programme initial et abordera également des notions de physique – chimie supplémentaires, pour favoriser à l'étudiant sortant lors de son insertion professionnelle. Chaque fin de chapitre est composé d'un résumé de l'essentiel à retenir.

L'énergie électrique puise ses origines dans l'aspect chimique de la matière. Ce cours abordera donc des notions élémentaires de chimie atomique et quantique, qui sont des chapitres nécessaires pour comprendre le comportement des électrons, pourquoi tel ou tel élément est conducteur ou encore ce qu'on appelle un semi-conducteur.

Tout ce qui sera abordé dans ce chapitre aura des répercussions dans les chapitres suivants de génie électrique et de physique – chimie. Toutefois, comme les notions présentées pour ce cours de pré-requis de chimie sont issues de références de sciences techniques de l'ingénieur, leur maîtrise ne sera donc pas à exigée. Néanmoins, leur compréhension permettra de préparer judicieusement le terrain d'une éventuelle poursuite des études dans le secteur de l'électrotechnique.

Références additionnelles et L^AT_EX

Ces cours n'ayant aucune prétention d'exhaustivité ni de savoirs innés, on retrouve en fin de document une bibliographie interactive compilant les références (livres, cours, sites internet...) dont sont issues les informations contenues dans ce cours.

Les liens de couleurs ■ vous permettront d'accéder à ces documents contenus dans une base de données sur l'Intranet pour ceux en libre accès, ou de vous rediriger vers une librairie en ligne pour les quelques livres de références que nous vous conseillons d'investir.

La rédaction de ces documents est réalisée à partir d'un environnement de programmation L^AT_EX. C'est un outil utilisé pour rédiger les livres, les publications scientifiques et universitaires ou encore les thèses de doctorats de façon normée.

Il s'agit donc d'introduire cette nouvelle matière qui est enseignée dans les études supérieures des sciences techniques. Elle vous permettra autant de se familiariser avec un univers de programmation et ses mécanismes que de maîtriser un outil de rédaction de document de qualité. Cela apportera un gain de crédibilité certain sortants lors de la rédaction de documents tels que le dossier du travail de réception ou les documents professionnels comme les lettres et les présentations.



CHAPITRE

1 Chimie atomique

1.1 Nature de la matière

Comme explicité par la [figure 1.1 page 1](#), la matière peut être décomposée en corps purs, qui sont des substances dont les propriétés physiques et chimiques sont déterminées quels que soient l'origine et le procédé à partir desquels elles ont été obtenues. Ces corps purs désignent les atomes – les *corps simples* – et les molécules – les *corps composés* – qui consistent en un assemblage d'atomes.

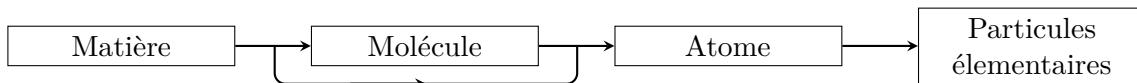


FIG. 1.1: Décomposition de la matière

1.2 Description de la matière

Définition 1.1 (Matière) — *Ce qui compose tout corps ayant une réalité tangible ;*

- *Mélange homogène (propriétés identiques en tout point) ou hétérogène (propriétés non identiques en tout point) de molécules en proportions diverses et variées ;*
- *Substance matérielle dont les caractéristiques fondamentales sont l'étendue et la masse ;*
- *La matière peut prendre au moins quatre états (solide, liquide, gazeux, plasma...).*

Définition 1.2 (Molécule) — *Assemblage chimique (corps composé) d'au moins deux atomes (corps simple) représentant la plus petite quantité de matière conservant les propriétés caractéristiques de celle-ci ;*

- *Entité électriquement neutre ;*
- *Siège de liaisons chimiques lui conférant sa structure ;*
- *Plus grande entité de la matière susceptible de subir des réactions chimiques.*

Définition 1.3 (Atome) — *Plus petite entité de la matière pouvant se combiner chimiquement avec des corps purs ;*

- *Constituant élémentaire de toutes les substances sous tous leurs états ;*
- *Constitué d'un noyau dense de protons et neutrons entouré d'un nuage d'électrons ;*
- *Présent au nombre de 118 éléments chimiques.*

Définition 1.4 (Proton) — *Particule élémentaire p^+ constituant une partie du noyau de l'atome ;*

- *Dénommé nucléon car constituant une partie du noyau ;*
- *Lié aux neutrons par interactions fortes formant un noyau dense ;*
- *Quantité définissant l'élément chimique nommé numéro atomique Z et identique à la quantité d'électron d'un même élément dans le cas d'un atome à l'état électriquement neutre ;*
- *Particule porteuse d'une charge élémentaire positive $+e$ (ou \oplus) attirée par la charge élémentaire négative $-e$ (ou \ominus) de l'électron ;*
- *Charge élémentaire positive $+e = 1,6022 \times 10^{-19} C$ d'une masse $m = 1,6726 \times 10^{-27} kg$.*



Définition 1.5 (Neutron) — Particule élémentaire n^0 constituant une partie du noyau de l'atome ;

- Dénommé nucléon car constituant une partie du noyau ;
- Lié aux protons par interactions fortes formant un noyau dense ;
- Quantité définie par l'isotope de l'élément chimique ;
- Particule électriquement neutre d'une masse $m = 1,6726 \times 10^{-27}$ kg.

Définition 1.6 (Électron) — Particule élémentaire e^- gravitant autour du noyau atomique ;

- Gravitation à une très grande distance relative autour du noyau, avec une répartition en couches électroniques dont l'agencement est bien spécifique à chaque atome ;
- Vitesse de gravitation variable selon l'orbitale atomique ($v_{e^-} \approx 2100 \text{ km s}^{-1}$) avec une position aléatoire sur la couche électronique ;
- Quantité identique à celle de protons d'un même élément à l'état électriquement neutre ;
- Particule porteuse d'une charge élémentaire négative $-e$ (ou \ominus) attirée par la charge élémentaire positive $+e$ (ou \oplus) du proton ;
- Charge élémentaire négative $-e = -1,6022 \times 10^{-19}$ C d'une masse négligeable ($m = 9,109\,389\,7 \times 10^{-31}$ kg) ;
- Particule régissant la grande majorité des liaisons et interactions chimiques entre atomes et molécules, dont l'électricité.

1.3 Description de l'atome

1.3.1 Caractéristiques des éléments périodiques

Chaque élément périodique présente une série de caractéristiques uniques que l'on retrouve sur le tableau périodique des éléments chimique (figure A.1 page 14) et qui vont déterminer leurs propriétés chimiques et physiques :

Nom de l'élément

Symbol de l'élément X

Famille Groupement d'éléments qui présentent le même nombre d'électrons de valence.

Numéro atomique Z Nombre de protons que présente le noyau de l'élément selon l'isotope le plus abondant.

Nombre de neutrons N Nombre de neutrons que présente le noyau de l'élément.

Nombre de masse A nombre de nucléons (neutrons + protons) que présente le noyau de l'élément.

Masse molaire Masse d'une mole de l'élément selon la proportions des isotopes de cet élément.

Configuration électronique Répartition des électrons autour du noyau de l'élément donnant la formule quantique (détaillée dans le tableau 1.3 page 5).



Les éléments périodiques présentent d'autres caractéristiques qui ne sont pas annotées sur le tableau périodique (figure A.1 page 14) :

Électronégativité Capacité de l'élément à attirer les électrons lors de la formation d'une liaison chimique avec un autre élément.

1^{re} énergie d'ionisation en kJ mol⁻¹ Énergie qu'il faut fournir à un atome neutre à l'état gazeux pour lui arracher un électron (le moins lié au noyau) et former un ion positif.

Nombre d'oxydation Nombre de charges électriques élémentaires réelles ou fictives que présente un atome au sein de l'élément. Il est utilisé pour le calcul *d'oxydo-réduction* à l'œuvre dans les générateurs électrochimiques.

1.3.2 Définitions utiles

Définition 1.7 (Isotope) *Les isotopes sont des déclinaisons atomiques d'un élément donné qui diffèrent par le contenu en neutrons de leur noyaux mais avec un nombre de protons ou d'électrons identiques entre isotopes. La masse atomique de l'élément fait la moyenne des masses de chaque isotope selon leur abondance naturelle.*

Définition 1.8 (Masse molaire) *La masse molaire d'un élément est la masse que feront $6,0221 \times 10^{23}$ atomes de cet élément (nombre d'Avogadro).*

Définition 1.9 (Configuration électronique) *La configuration électronique d'un élément indique la répartition probable des couches d'électrons gravitant autour du noyau.*

Définition 1.10 (Couche électronique de valence) *La couche électronique de valence d'un atome comprend les électrons de valence correspondant aux niveaux d'énergie pour lesquels, dans la formule quantique, n présente la valeur la plus grande.*

Définition 1.11 (Valence d'un atome) *La valence d'un atome est égale au nombre d'électrons célibataire situés sur cette couche de valence.*

Définition 1.12 (Électron libre) *Un électron libre est un électron de valence qui a été excité par une énergie suffisante et qui va permettre la conduction électrique par le transfert de sa charge électrique négative \ominus .*

1. Chimie atomique

Définition 1.13 (Ion) *Un ion est un atome ou une molécule dont un – ou plusieurs – électron(s) ont été arrachés ou captés. Il est porteur d'une charge électrique positive – cation – ou négative – anion – et la manifestation chimique de l'énergie électrique.*

Définition 1.14 (Nucléide) *Un nucléide est la dénomination d'un noyau atomique caractérisé par son nombre de protons et de neutrons.*

Définition 1.15 (État fondamental) *Notion de physique caractérisant l'état de plus basse énergie pour un électron, ou à l'état de plus grande neutralité électrique pour un atome.*

1.3.3 Nombres quantiques

Les électrons gravitant autour d'un noyau sont répartis en couches électroniques (voir figure 1.3 page 7) qui sont elles même divisées en sous-couches.

Ceux-ci peuvent sauter d'une couche à l'autre avec absorption ou émission d'énergie. Chaque électron est défini par un nombre quantique unique pour un état donné, séparé en quatre parties.

- Le nombre quantique d'un électron indique sa position probable dans l'espace électronique autour du noyau atomique ¹ dénommé orbitale atomique ;
- L'état quantique est unique à chaque électron. Deux électrons ne peuvent pas se situer dans le même espace probable autour du noyau d'un atome.

1. Des représentations des géométries orbitales se situent au tableau A.2 page 15.



TAB. 1.1: Description des nombres quantiques

Nombre quantique	Valeurs	Description
<i>Nombe quantique principal n</i>		
$n \geq 1$: Entier positif non nul		Définition de la couche électronique : distance entre le noyau et l'électron.
Exemple :		Exemple :
– $n = 1$; – $n = 2$; – $n = 3$; – ...		– $n = 1$ pour la couche K ; – $n = 2$ pour la couche L ; – $n = 3$ pour la couche M ; – ...
<i>Nombe quantique secondaire/azumital ℓ</i>		
$0 \geq \ell < n - 1$: Entier positif à n valeur(s)		Définition de la sous-couche électronique : forme et symétrie de l'orbitale atomique.
Exemple :		Valeurs :
– $\ell = 0$; – $\ell = 1$; – $\ell = 2$; – Jusqu'à $\ell = (n - 1)$.		– $\ell = 0$ pour la sous-couche s (sharp) ; – $\ell = 1$ pour la sous-couche p (principal) ; – $\ell = 2$ pour la sous-couche d (diffuse) ; – $\ell = 3$ pour la sous-couche f (fondamental).
Forme :		
		– $\ell = 0$: 1 lobe ; – $\ell = 1$: 2 lobes ; – $\ell = 2$: 4 lobes ; – $\ell = 3$: 8 lobes.
<i>Nombe quantique tertiaire/magnétique m_ℓ</i>		
$-\ell \geq m_\ell < +\ell$: Entier positif à $(2\ell + n)$ valeur(s)		Définition de l'orientation : orientation de l'orbitale dans l'espaces selon les axes.
Exemple :		Exemple si $\ell = 2$:
– $-\ell$; – $(-\ell + 1)$; – $(-\ell + 2)$; – ... – 0 ; – ... – $(\ell - 2)$; – $(\ell - 1)$; – $+\ell$.		– Forme d'haltères croisées ; – $m_\ell = -2; -1; 0; 1; 2$.
<i>Nombe quantique du spin S</i>		
$S = 1/2$		Moment magnétique dû à la rotation de l'électron sur lui-même.
<i>Nombe quantique magnétique du spin m_S</i>		
$m_S = -1/2; 1/2$		Sens de rotation de l'électron sur lui-même.



TAB. 1.3: Distribution des électrons dans les orbitales atomiques par sous-couche électronique[4]

Période ¹	Sous-couche	Nombres quantiques		Nombre quantique magnétique							Nombre d'électrons	
		Principal	Azimutal	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	Sous-couche	Couche
<i>Couche K</i>												
	1s		$n = 1$		$\ell = 0$			1l			2	2
<i>Couche L</i>												
	2s		$n = 2$		$\ell = 0$			1l	1l		2	2
	2p		$n = 2$		$\ell = 1$			1l	1l	1l	6	
<i>Couche M</i>												
	3s		$n = 3$		$\ell = 0$			1l	1l		2	2
	3p		$n = 3$		$\ell = 1$			1l	1l	1l	6	
<i>Couche N</i>												
	4s		$n = 4$		$\ell = 0$			1l	1l		2	
	3d		$n = 3$		$\ell = 2$			1l	1l	1l	10	18
	4p		$n = 4$		$\ell = 1$			1l	1l	1l	6	
<i>Couche O</i>												
	5s		$n = 5$		$\ell = 0$			1l	1l		2	
	4d		$n = 4$		$\ell = 2$			1l	1l	1l	10	18
	5p		$n = 5$		$\ell = 1$			1l	1l	1l	6	
<i>Couche O</i>												
	6s		$n = 6$		$\ell = 0$			1l	1l		2	
	4f		$n = 4$		$\ell = 3$			1l	1l	1l	14	
	5d		$n = 5$		$\ell = 2$			1l	1l	1l	10	
	6p		$n = 6$		$\ell = 1$			1l	1l	1l	6	
<i>Couche P</i>												
	7s		$n = 7$		$\ell = 0$			1l	1l		2	
	5f		$n = 5$		$\ell = 3$			1l	1l	1l	14	
	6d		$n = 6$		$\ell = 2$			1l	1l	1l	10	
	7p		$n = 7$		$\ell = 1$			1l	1l	1l	6	

¹ Une *période* est une ligne du tableau périodique (même nombre de couches électroniques) tandis qu'une *couche électronique* désigne l'ensemble des orbitales atomiques partageant un même *nombre quantique principal* n .

1.3.4 Énergie électronique

1.3.4.1 Règle de Klechkowski et de stabilité

- L'énergie contenue dans les sous-couches électroniques augmente lorsque la somme des nombres quantiques principal et azimutal $n + \ell$ augmente. Si celle-ci est identique pour deux sous-couches, celle de plus basse énergie sera celle pour laquelle n sera le plus petit.
- Les électrons se répartissent de façon à obtenir la configuration présentant un minimum d'énergie. La répartition s'effectue par ordre croissant d'énergie en commençant par la sous-couche de plus basse énergie (valeurs de $n + \ell$ puis n croissantes).

Un *état de valence* est un état excité de l'atome, noté « * », de plus haute énergie. Cet état apparaît quand l'atome participe à la formation d'une liaison, les électrons de valences se répartissant dès lors dans le nombre maximal de cases quantiques qu'ils peuvent occuper :

TAB. 1.4: Cases quantiques en état de valence



Comme cité dans le tableau 1.3 page 5, toutes les sous-couches d'une période n'appartiennent pas nécessairement à la même couche électronique : à partir de la troisième période, des sous-couches appartenant à des couches différentes se remplissent à la même période.



L'ordre précis des sous-couches électroniques est donné par la règle de Kleckowski, en figure 1.2 page 6.

Cela donne l'ordre de répartition suivant, applicable à plus de 80% du tableau périodique :

- 1s ; 2s ; 2p ; 3s ; 4s ; 3p ; 4p ; 5s ; 4d ; 5p ; 6s ; 4f ; 5d ; 6p ; 7s ; 5f ; 6d ; 7p ; 7d.

Une vingtaine d'éléments ne respectent pas cette répartition électronique. Si l'on respecte la *règle de Hunt* – plus le spin S résultant des électrons d'une orbitale atomique est élevé, plus la configuration électronique sur cette orbitale est stable – pour les éléments des blocs d et f , il est moins énergétiquement favorable de respecter la règle de Kleckowski que de favoriser l'occupation impaire des sous-couches les plus externes lorsque la couche d ou f est vide, à moitié remplie ou entièrement remplie. Effectivement, l'écart d'énergie entre ces sous-couches est inférieur au gain d'énergie induit par la redistribution des électrons de telle sorte que leur nombre quantique magnétique de spin m_S résultant soit le plus élevé.

Ces « exceptions » sont listées dans le tableau A.1 page 13.

1.3.4.2 Principe d'exclusion de Pauli

Dans le même atome, il ne peut y avoir deux électrons dont les quatre nombres quantiques sont identiques :

Triplet Un triplet n, l, m donné décrit deux électrons dont le sens de rotation est précisé par le signe de m_S et définit l'orbitale atomique de ceux-ci ;

Quadruplet Un quadruplet vaut donc soit $n, l, m, m_S = +\frac{1}{2}$, soit $n, l, m, m_S = -\frac{1}{2}$ et est unique pour chaque électron.

- 2 e^- maximum sur une sous-couche s ;
- 6 e^- maximum sur une sous-couche p ;
- 10 e^- maximum sur une sous-couche d ;
- 14 e^- maximum sur une sous-couche f .

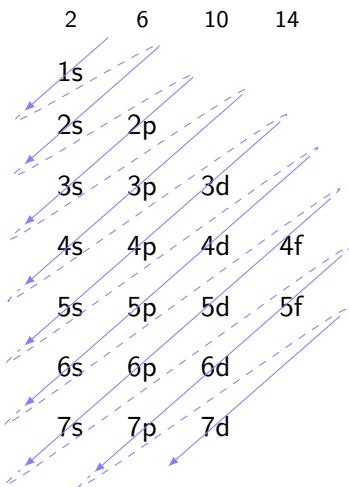


FIG. 1.2: Ordre de répartition des sous-couches électroniques

1.4 Description détaillée d'un atome d'aluminium

Dans cette section est détaillée la description complète du 13^{ème} élément du tableau périodique situé en figure A.1 page 14, l'aluminium.

13	26.982
Al	
Aluminium	$3s^23p^1$

Symbol : Al

Famille : métaux de transitions

Numéro atomique Z : 13 protons

Nombre d'électrons : 13 protons

Nombre de neutrons N : 14 neutrons pour l'isotope le plus abondant

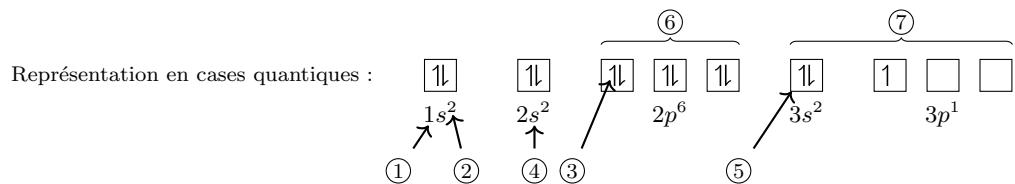
Nombre de masse A : 27 nucléons

Masse molaire M : $M = 26,981\ 386\text{g mol}^{-1}$

Formule électronique/quantique : $1s^22s^22p^63s^23p^1$

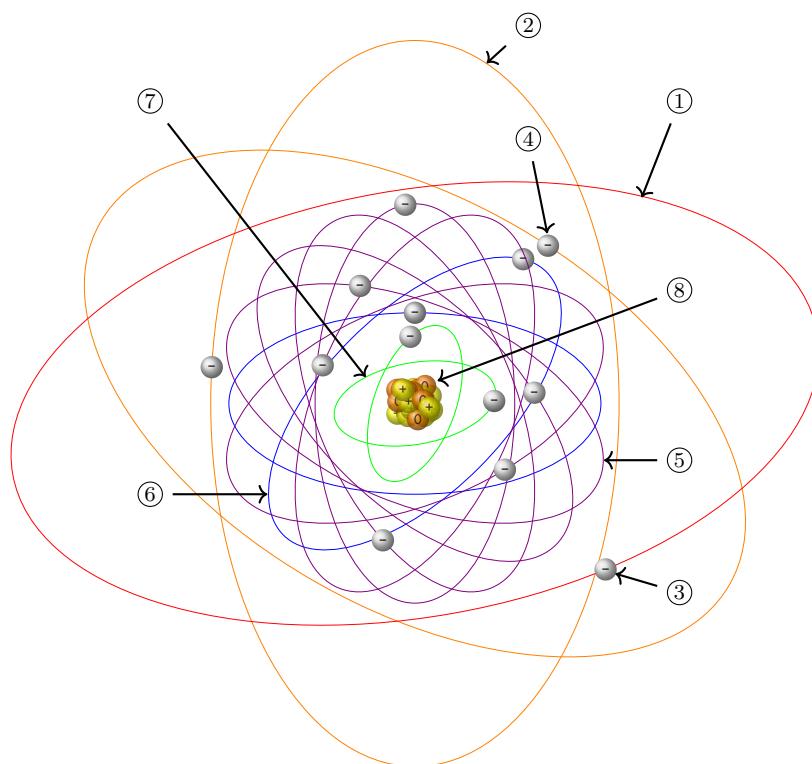


1.4.1 Configuration électronique



- ① : couche électronique $n = K$
- ② : nombre d'électrons présents dans la sous-couche électronique $\ell = s$ de la couche électronique $n = K$
- ③ : électron dans le sens de rotation du spin $m_S = -\frac{1}{2}$
- ④ : sous-couche électronique $\ell = s$ de la couche électronique $n = L$
- ⑤ : paire d'électrons de la sous-couche $\ell = s$ de la couche électronique électronique $n = M$ différenciés par le signe du nombre quantique du spin S
- ⑥ : cases quantiques désignant les nombres quantiques magnétiques du spin M_S des électrons de la sous-couche $\ell = p$ de la couche électronique $n = L$
- ⑦ : dernière couche électronique $n = M$ (couche de valence)

1.4.2 Représentations graphiques



- ① : couche électronique M sous-couche p (bande de conduction)
- ② : couche électronique M sous-couche s (valence)
- ③ : électron libre
- ④ : électron de valence
- ⑤ : couche électronique K sous-couche p
- ⑥ : couche électronique K sous-couche s
- ⑦ : couche électronique L sous-couche s
- ⑧ : noyau atomique

FIG. 1.3: Modélisation détaillée (animation à la figure A.2 page 18)



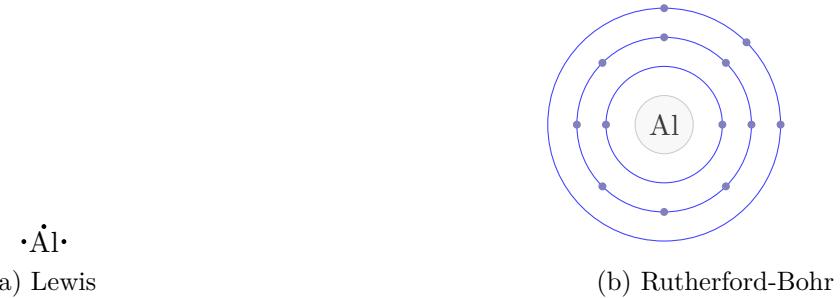


FIG. 1.4: Représentation atomique de Lewis et de Bohr

À l'état fondamental, l'atome d'aluminium possède trois électrons de valence sur sa dernière couche électronique $3s^2 + 3p^1$.

CHAPITRE

2

Chimie de la conduction électrique

2.1 Dernière couche électronique

2.1.1 Électron-volt

Les couches électroniques $K, L, M \dots$ répartissent les électrons autour du noyau atomique :

- Plus un électron est proche du noyau atomique, plus l'énergie nécessaire pour arracher l'électron du champ électrique du noyau sera grande ;
- Énergie quantifiée en *electron-volt* eV.

Un *electron-volt* est la mesure physique de l'énergie cinétique d'un électron accéléré sous l'action d'une *différence de potentiel* d'1V. Il est égal à :

Formule 2.1 (Valeur expérimentale de l'eV)

$$U = \frac{W}{Q} \quad (2.1)$$

$$\text{eV} = \sqrt{\frac{2h\alpha}{\mu c_0}} \frac{W}{Q}$$

$$= 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ J}$$
(2.2)

Avec :

Grandeur dans l'ISQ	Unité SI de mesure	Valeur
U : différence de potentiel	volt (V)	$V = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3} \text{A}^{-1}$
W : énergie	joule (J)	$J = \text{kg m}^2/\text{s}^2$
Q : charge électrique	coulomb (C)	$C = \text{As}$
eV : électron-volt	joule (J)	$\text{eV} = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ J}$
h : constante de Planck	joule seconde (Js)	$h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ Js}$
α : constante de structure fine	sans dimension ()	$\alpha = 7,297\,352\,556\,4 \times 10^{-3}$
μ : perméabilité magnétique du vide	henry par mètre (H m^{-1})	$\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$
c_0 : vitesse de la lumière dans le vide	mètre par seconde (m s^{-1})	$c_0 = 2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

 2 Chimie de la conduction
électrique


Annexes



A Addendum de chimie atomique

Cette annexe regroupe tous les tableaux et figures mentionnés dans le [chapitre 1 page 1](#) qui contiennent un nombre importants de données. Il n'est pas nécessaire de les retenir par cœur mais ces informations constituent un support appréciable pour toute précision concernant ce chapitre.

TAB. A.1: Distribution des électrons dans les orbitales atomiques par sous-couche électronique⁴

	Élément chimique	Famille		Configuration électronique
24	Cr	Chrome	Métal de transition	[Ar] $4s^1 3d^5$
28	Ni	Nickel	Métal de transition	[Ar] $4s^1 3d^9$ (*)
29	Cu	Cuivre	Métal de transition	[Ar] $4s^1 3d^{10}$
41	Nb	Niobium	Métal de transition	[Kr] $5s^1 4d^4$
42	Mo	Molybdène	Métal de transition	[Kr] $5s^1 4d^5$
44	Ru	Ruthénium	Métal de transition	[Kr] $5s^1 4d^7$
45	Rh	Rhodium	Métal de transition	[Kr] $5s^1 4d^8$
46	Pd	Palladium	Métal de transition	[Kr] $4d^{10}$
47	Ag	Argent	Métal de transition	[Kr] $5s^1 4d^{10}$
57	La	Lanthane	Lanthanide	[Xe] $6s^2 5d^1$
58	Ce	Cérium	Lanthanide	[Xe] $6s^2 4f^1 5d^1$
64	Gd	Gadolinium	Lanthanide	[Xe] $6s^2 4f^7 5d^1$
78	Pt	Platine	Métal de transition	[Xe] $6s^1 4f^1 4d^9$
79	Au	Or	Métal de transition	[Xe] $6s^1 4f^{14} 5d^{10}$
89	Ac	Actinium	Actinide	[Rn] $7s^2 6d^1$
90	Th	Thorium	Actinide	[Rn] $7s^2 6d^2$
91	Pa	Protactinium	Actinide	[Rn] $7s^2 5f^2 6d^1$
92	U	Uranium	Actinide	[Rn] $7s^2 5f^3 6d^1$
96	Cm	Curium	Actinide	[Rn] $7s^2 5f^7 6d^1$
103	Lr	Lawrencium	Actinide	[Rn] $7s^2 5f^{14} 7p^1$

(*) Le nickel présente deux configurations électroniques :

- Une configuration régulière [Ar] $4s^2 3d^8$ présentant le niveau d'énergie le plus bas expérimentalement ;
 - Une configuration irrégulière [Ar] $4s^1 3d^9$ présentant le niveau d'énergie moyen le plus bas.
- C'est cette configuration qui sera utilisée dans les calculs.



1 IA

	1	1.0079	H	Hydrogen $1s^1$	
1					2 II A
2	[He]	3 6.941	4 9.0122	Be	Beryllium $2s^2$
3	[Ne]	11 22.990	12 24.305	Na	Sodium $3s^1$
4	[Ar]	19 39.098	20 40.078	Ca	Calcium $4s^2$
5	[Kr]	37 85.468	38 87.62	Sc	Scandium $3d^14s^2$
6	[Xe]	55 132.91	56 137.33	Ti	Titanium $3d^24s^2$
7	[Rn]	87 223	88 226	V	Vanadium $3d^34s^2$
		89-103	Ac-Lr	Cr	Chromium $3d^54s^1$
		Fr	Ra	Mn	Manganese $3d^54s^2$
		Rutherfordium	Actinide	Fe	Iron $3d^64s^2$
		$5f^{14}6d^27s^2$		Co	Cobalt $3d^74s^2$
				Ni	Nickel $3d^84s^2$
				Cu	Copper $3d^{10}4s^1$
				Zn	Zinc $3d^{10}4s^2$
				Ga	Gallium $3d^{10}4s^24p^1$
				Ge	Germanium $3d^{10}4s^24p^2$
				As	Arsenic $3d^{10}4s^24p^3$
				Se	Selenium $3d^{10}4s^24p^4$
				Br	Bromine $3d^{10}4s^24p^5$
				Kr	Krypton $3d^{10}4s^24p^6$

Tableau périodique des éléments chimiques

Métaux alcalins **Non-métaux** **Actinides**
Métaux alcalino-terreux **Halogènes** **Métaux de transition**
Métaux **Gaz nobles**
Métalloïdes **Lanthanides**

1 IA	2 II A	3 III A	4 IV B	5 V B	6 VI B	7 VII B	8 VIIIB	9 VIIIIB	10 VIIIIB	11 IB	12 IIB	13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA		
1	2 [He]	3 [Ne]	4 [Ar]	5 [Kr]	6 [Xe]	7 [Rn]						5	6	7	8	9	10		
1.0079	6.941	9.0122	22.990	24.305	39.098	40.078	37.468	38.62	39.806	40.224	41.906	42.94	43.96	44.107	45.102	46.1042	47.982	12.011	
H	Li	Be	Na	Mg	K	Ca	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Pd	Ag	Al	C	
Hydrogen $1s^1$	Lithium $2s^1$	Beryllium $2s^2$	Sodium $3s^1$	Magnesium $3s^2$	Potassium $4s^1$	Calcium $4s^2$	Rubidium $5s^1$	Strontrium $5s^2$	Yttrium $4d^15s^2$	Zirconium $4d^25s^2$	Niobium $4d^35s^2$	Molybdenum $4d^55s^1$	Technetium $4d^55s^2$	Ruthenium $4d^75s^1$	Rhodium $4d^85s^1$	Palladium $4d^{10}$	Silver $4d^{10}5s^1$	Boron $2s^22p^1$	Carbon $2s^22p^2$
																		Nitrogen $2s^22p^3$	
																		Oxygen $2s^22p^4$	
																		Flourine $2s^22p^5$	
																		Neon $2s^22p^6$	

Légende élément

z	Masse
Symbol	
Nom	
Configuration	

[Xe]	57 138.91	58 140.12	59 140.91	60 144.24	61 145	62 150.36	63 151.96	64 157.25	65 158.93	66 162.50	67 164.93	68 167.26	69 168.93	70 173.04	71 174.97
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	Lanthanum $5d^16s^2$	Cerium $4f^15d^1$	Praseodymium $4f^36s^2$	Neodymium $4f^46s^2$	Promethium $4f^56s^2$	Samarium $4f^66s^2$	Europium $4f^76s^2$	Gadolinium $4f^75d^16s^2$	Terbium $4f^96s^2$	Dysprosium $4f^{10}6s^2$	Holmium $4f^{11}6s^2$	Erbium $4f^{12}6s^2$	Thulium $4f^{13}6s^2$	Ytterbium $4f^{14}6s^2$	Lutetium $6s^24f^{14}5d^1$
[Rn]	89 227	90 232.04	91 231.04	92 238.03	93 237	94 244	95 243	96 247	97 247	98 251	99 252	100 257	101 258	102 259	103 262
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
	Actinium $6d^17s^2$	Thorium $6d^27s^2$	Protactinium $5f^26d^17s^2$	Uranium $5f^36d^17s^2$	Neptunium $5f^46d^17s^2$	Plutonium $5f^67s^2$	Americium $5f^77s^2$	Curium $5f^96d^17s^2$	Berkelium $5f^{10}7s^2$	Californium $5f^{10}7s^2$	Einsteinium $5f^{11}7s^2$	Fermium $5f^{12}7s^2$	Mendelevium $5f^{13}7s^2$	Nobelium $5f^{14}7s^2$	Lawrencium $5f^{14}7s^27p^1$

FIG. A.1: Tableau périodique des éléments chimiques

TAB. A.2: Orbitales réelles d'un atome hydrogénoides par triplet de nombres quantiques $(n, \ell, m_\ell)^3$

Nombre quantique		Sous-couche	Module $ M_\ell $ du nombre quantique magnétique			
Principal	Azimutal		0	1	2	3
$n = 1$	$\ell = 0$	$1s$				
		$1s$				
$n = 2$	$\ell = 0$	$2s$		$2s$		
		$2p$		$2p_z$		$2p_x$
$n = 3$	$\ell = 0$	$3s$		$3s$		
		$3p$		$3p_z$		$3p_x$
$n = 3$	$\ell = 1$	$3p$		$3p_y$		
		$3d$		$3d_z^2$		$3d_{xy}$
				$3d_{xz}$		$3d_{yz}$
				$3d_{x^2-y^2}$		

Nombre quantique		Sous-couche	Module $ M_\ell $ du nombre quantique magnétique			
Principal	Azimutal		0	1	2	3
$n = 4$	$\ell = 0$	$4s$				
		$3s$				
	$\ell = 1$	$4p$				
		$3p_z$		$3p_x$	$3p_y$	
		$4d$				
	$\ell = 2$					
		$4f$				
						
$n = 5$	$\ell = 0$	$5s$				
		$5s$				
	$\ell = 1$	$5p$				
		$5p_z$		$5p_x$	$5p_y$	

Nombre quantique		Sous-couche	Module $ M_\ell $ du nombre quantique magnétique			
Principal	Azimutal		0	1	2	3
$n = 5$	$\ell = 2$	$5d$				
			$5d_{z^2}$	$5d_{xz}$	$5d_{yz}$	$5d_{xy}$
				$6s$		
		$6p$				
			$6p_z$	$6p_x$	$6p_y$	
$n = 6$	$\ell = 1$	$6d$				
			$6d_{z^2}$	$6d_{xz}$	$6d_{yz}$	$6d_{xy}$
$n = 7$	$\ell = 0$	$7s$		$7s$		

FIG. A.2: Modélisation animée d'un atome d'aluminium avec ses différentes couches atomiques



B Unité de mesure et grandeurs physique

B.1 Généralités

B.1.1 Différences

Cette annexe énumère les unités de mesures et de leur grandeurs physiques associées à connaître pour la maîtrise des formules mathématiques en électrotechnique. Il convient de bien identifier ce qu'est une grandeur physique et une unité de mesure :

Unité de mesure Étalon de mesure nécessaire pour la mesure d'une grandeur physique dont le fondement est l'exacte reproductibilité expérimentale de l'étalement ;

Grandeur physique Toute propriété des sciences de la nature qui peut être mesurée ou calculée et dont les différentes valeurs s'expriment à l'aide d'un nombre réel ou complexe. Une grandeur physique peut s'exprimer sans unité de mesure, ce sont des *grandes sans dimension*. Mais l'inverse n'est pas vraie, toute unité de mesure est associée une grandeur physique.

La notion générale de grandeur physique peut être divisées en des notions plus précises, indiquée au moyen d'indices ou d'un symbole usuel différent.

Dimension Expression de la dépendance d'une grandeur par rapport aux grandeurs de base d'un système de grandeurs sous la forme d'un produit de puissance de facteurs correspondant aux grandeurs de base, en omettant tout facteur numérique.

Les tableaux situés en [sous-section B.1.5 page 20](#) sont issus des normes ISO 80000-xx⁵, les normes internationales régissant le Système International de grandeurs (*International System of Quantities*, ISQ), qui font également le lien avec le Système International d'unités (SI).

B.1.2 Quelques règles de rédaction

Symboles des grandeurs Les symboles usuels des grandeurs prennent généralement la forme d'une seule lettre (alphabet grec ou latin), toujours en italique, et peuvent être précisés par des indices.

Indice Un indice permet de différencier des grandeurs présentant le même symbole usuel ou, pour une même grandeur, différentes applications de celle-ci.

- Symbole d'une grandeur physique ou d'une variable mathématique ;
- Mots ou nombres fixes.

Symboles des unités Les symboles des unités prennent généralement la forme d'une seule lettre (alphabet grec ou latin), toujours en caractère droit, ce qui permet de les différencier des symboles des grandeurs.

Une unité composée d'une multiplication de deux unités ou plus peut être indiquée de deux manières :

N · m

Nm

Il convient de faire attention lorsque le symbole d'une unité est le même que celui d'un préfixe.



B.1.3 Terminologie

Coefficient Dans une équation type $A = k \cdot B$, k est le coefficient/facteur et A est une grandeur proportionnelle à B . Usage du terme *coefficient* (ou *module*) lorsque les grandeurs A et B présentent des *dimensions* différentes.

Facteur Dans une équation type $A = k \cdot B$, k est le coefficient/facteur et A est une grandeur proportionnelle à B . Usage du terme *facteur* lorsque les grandeurs A et B sont de même *dimension*.

Paramètre Combinaison de grandeurs qui apparaissent sous une telle forme dans les équations, pouvant être considérée comme constituant de nouvelles grandeurs.

Nombre Combinaison de grandeurs sans dimension.

Rapport Quotient sans dimension de deux grandeurs.

Constante Grandeur qui présente la même valeur en toutes circonstances.

Massique Adjectif apposé à une grandeur caractérisant le quotient de cette grandeur par la masse.

Volumique Adjectif apposé à une grandeur caractérisant le quotient de cette grandeur par le volume.

Surfacique Adjectif apposé à une grandeur caractérisant le quotient de cette grandeur par l'aire.

Densité Adjectif apposé à une grandeur exprimant un flux ou un courant, qui caractérise le quotient de cette grandeur par l'aire.

Linéique Adjectif apposé à une grandeur caractérisant le quotient de cette grandeur par la longueur.

Molaire Adjectif apposé à une grandeur caractérisant le quotient de cette grandeur par la quantité de matière.

Concentration Adjectif apposé à une grandeur, spécifiquement dans le cas d'un mélange, caractérisant le quotient de cette grandeur par le volume total.

B.1.4 Alphabet

TAB. B.1: Alphabet grec

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

B.1.5 Système International

B.1.5.1 Généralités

Le Système International d'unités est un système cohérent d'unités dans l'*ISQ*. Il est abrégé *SI* dans toutes les langues et est formé de :



- Sept unités de base ;
- Des unités dérivées de ces unités de base.

B.1.5.2 Unités SI et grandeurs

TAB. B.2: Unités SI et grandeurs correspondante de base

Grandeur de base de l'ISQ		Unité SI de base	
Nom	Symbole usuel	Nom	Symbole
Longueur	L	mètre	m
Masse	M, m	kilogramme	kg
Temps	T	seconde	s
Courant électrique	I	ampère	A
Température thermodynamique	Θ	kelvin	K
Quantité de matière	N	mole	mol
Intensité lumineuse	J	candela	cd

TAB. B.3: Préfixes des unités SI

Facteur	Préfixe		Facteur	Préfixe	
	Nom	Symbole		Nom	Symbole
10^{24}	yotta	Y	10^{-1}	déci	d
10^{21}	zetta	Z	10^{-2}	centi	c
10^{18}	exa	E			
10^{15}	péta	P	10^{-3}	milli	m
			10^{-6}	micro	μ
10^{12}	téra	T	10^{-9}	nano	n
10^9	giga	G	10^{-12}	pico	p
10^6	méga	M			
10^3	kilo	k	10^{-15}	femto	f
			10^{-18}	atto	a
10^2	hecto	h	10^{-21}	zepto	z
10^1	déca	da	10^{-24}	yocto	y

TAB. B.4: Unités SI dérivées avec des noms et des symboles spéciaux

Grandeur dérivée de l'ISQ		Unité SI dérivée	
Nom	Symbole usuel	Nom	Symbole & Valeur
Angle plan	α	radian	rad = $m \cdot m^{-1}$
Angle solide	Ω	stéradian	sr = $m^2 \cdot m^{-2}$
Fréquence	f	hertz	Hz = s^{-1}
Force	F	newton	N = $kg \cdot m \cdot s^{-2}$
Pression, contrainte	P	pascal	Pa = $N \cdot m^{-2}$
Énergie, travail	W	joule	J = $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
Puissance	P	watt	W = $J \cdot s^{-1}$
Charge électrique	Q	coulomb	C = As

Page suivante



Grandeur dérivée de l'ISQ		Unité SI dérivée	
Nom	Symbole usuel	Nom	Symbole & Valeur
Différence de potentiel électrique	U, V	volt	$V = WA^{-1}$
Capacité électrique	C	farad	$F = CV^{-1}$
Résistance électrique	R	ohm	$\Omega = VA^{-1}$
Conductance électrique	G	siemens	$S = \Omega^{-1}$
Flux magnétique	Φ	weber	$Wb = Vs$
Induction magnétique	\vec{B}	tesla	$T = Wbm^{-2}$
Inductance	L	henry	$H = WbA^{-1}$
Température Celsius	T	celsius	$^{\circ}C = K - 273,15$
Flux lumineux	J	lumen	$lm = cd sr$
Éclairement lumineux	E, E_v	lux	$lx = lm m^{-2}$

TAB. B.5: Unités en usage avec le SI

Grandeur		Unités	
Nom	Symbole usuel	Nom	Symbole & Valeur
Temps	t	minute	$min = 60s$
		heure	$h = 60min$
		jour	$d = 24h$
Angle plan	α	degré	$^{\circ} = 180/\pi \times rad$
		minute	$' = 1/60 \times ^{\circ}$
		seconde	$'' = 1/60 \times '$
Volume	V	litre	$l, L = dm^3$
Masse	M, m	tonne	$t = 1000kg$

TAB. B.6: Unités en usage avec le SI dont la valeur est obtenue expérimentalement

Grandeur		Unités	
Nom	Symbole usuel	Nom	Symbole & Valeur
Énergie	W	électronvolt	Énergie cinétique acquise par un électron en traversant une différence de potentiel de 1V dans le vide. $eV = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19} J$
Masse	M, m	dalton	$^{1/12}$ de la masse d'un atome du nucléide ^{12}C au repos et à l'état fondamental. $Da = 1,660\ 538\ 782 \times 10^{-27} kg$
Longueur	L	unité astronomique	Valeur conventionnelle approximativement égale à la valeur moyenne de la distance entre le Soleil et la Terre. $au = 1,495\ 978\ 706\ 91 \times 10^{11} m$



B.2 Mathématique

Les tableaux suivants sont extraits de l'ouvrage « Électrotechnique », ils réfèrent les notations mathématiques utilisées en électrotechnique.

TAB. B.7: Signes mathématiques

Signe	Utilisation	Énoncé	Signe	Utilisation	Énoncé
=	$a = b$	a égal b	+	$a + b$	a plus b
≠	$a \neq b$	a est différent de b	-	$a - b$	a moins b
△	$a \triangleq b$	a correspond à b	×	$a \times b$	a multiplié par b
≈	$a \approx b$	a est approximativement égal à b	.	$a \cdot b$	a b
<	$a < b$	a est strictement inférieur à b	-	$\frac{a}{b}$	a divisé par b
>	$a > b$	a est strictement supérieur à b	/	a/b	
≤	$a \leq b$	a est inférieur ou égal à b	Σ	$\sum_{i=1}^n a_i$	$a_1 + a_2 + a_3 \dots a_n$
≥	$a \geq b$	a est supérieur ou égal à b	Π	$\prod_{i=1}^n a_i$	$a_1 \times a_2 \times a_3 \dots a_n$
≪	$a \ll b$	a est très inférieur ou égal à b	!	$n!$	$1 \times 2 \times 3 \dots n$
≫	$a \gg b$	a est très supérieur ou égal à b		a^n	a puissance n
∞		infini		$\sqrt[n]{a}$	racine carrée de a
±	$a \pm b$	a plus ou moins b		$a^{1/n}$	racine n^e de a
∈	$x \in A$	x appartient à A		$ a $	valeur absolue de a
∉	$x \notin A$	x n'appartient pas à A			

TAB. B.8: Classification des locaux

Symbol	Énoncé	Symbol	Énoncé
f	fonction ou application	$\frac{\delta f}{\delta x}$	variation élémentaire de la fonction f par rapport à x
$f(x)$	valeur de la fonction f respectivement en x	$\int_a^b f(x)dx$	intégrale définie de la fonction f de a à b
$[f(x)]_a^b$	$f(b) - f(a)$	$\int_a^b f(x)dx$	intégrale définie de la fonction f de a à b
$f(x) _b^a$		N	ensemble des entiers naturels
$\lim_{x \rightarrow a} f(x)$	limite de $f(x)$ quand x tend vers a	Z	ensemble des entiers
f'	dérivée (première) de la fonction f	Q	ensemble des nombres rationnels
$f^{(k)}(x)$	dérivée d'ordre k de la fonction f	R	ensemble des entiers réels
Δf	dérivée totale globale de la fonction f^2	C	ensemble des nombres complexes
$\frac{df}{dx}$	dérivée totale locale de la fonction f par rapport à x	P	ensemble des nombres premiers
$\frac{\partial f}{\partial x}$	dérivée partielle locale de la fonction f par rapport à x	$\cos x$	cosinus de x
		$\sin x$	sinus de x
		$\tan x$	tangente de x
		$\cot x$	cotangente de x

Colonne suivante

Page suivante



Symbol	Énoncé	Symbol	Énoncé
$\arccos x$	réciproque du cosinus de x	$\ln x$	logarithme népérien de x
$\arcsin x$	inverse du sinus de x	$\lg x$	logarithme décimal de x
$\arctan x$	inverse de la tangente de x	i ou j	unité imaginaire
$e = 2,7182818$	base des logarithmes népériens	\arg	argument
$\exp x$	exponentielle de base e de x		

Colonne suivante

B.3 Espace & temps

B.3.1 Généralités

Les tableaux suivants détaillent les noms, les symboles et les définitions des unités et grandeurs utilisées pour décrire mathématiquement l'espace et le temps. Ces notations seront d'application pour le restant des cours.

TAB. B.9: Unités SI et grandeurs définissant l'espace et le temps

Nom	Grandeur Symbol usuel	Unité		Remarque
		Nom	Symbol	
Longueur	L, l	Mètre	m	
Largeur	B, b			
Hauteur	H, h			Le symbole H est régulièrement utilisé pour désigner l'altitude.
Épaisseur	d, δ			
Rayon	R, r			
Distance radiale	r_Q, ρ			
Diamètre	D, d			
Longueur curviligne	s			
Distance	d, r			
Rayon (vecteur)	\mathbf{r}			



Bibliographie

- [1] René BOURGEOIS et Denis COGNIEL. « Électrotechnique ». In : *Mémotech Plus*. Casteilla, 2005.
- [2] CONTRIBUTEURS WIKIPEDIA. *Notations delta en sciences*. Wikimédia. 2 sept. 2019. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Notations_delta_en_sciences.
- [3] CONTRIBUTEURS WIKIPEDIA. *Orbitale atomique*. Wikimédia. 6 jan. 2020. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Orbitale_atomique.
- [4] CONTRIBUTEURS WIKIPEDIA. *Tableau périodique des éléments*. Wikimédia. 11 mai 2020. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Tableau_p%C3%A9riodique_des_%C3%A9l%C3%A9ments.
- [5] *Grandeurs et unités*. ISO 80000. AFNOR. 2013.
- [6] Jacques LE COARER. « Chimie. Le minimum à savoir ». In : *Collection Grenoble Sciences*. Dir. Jean BORNAREL. EDP Sciences, 2003.

