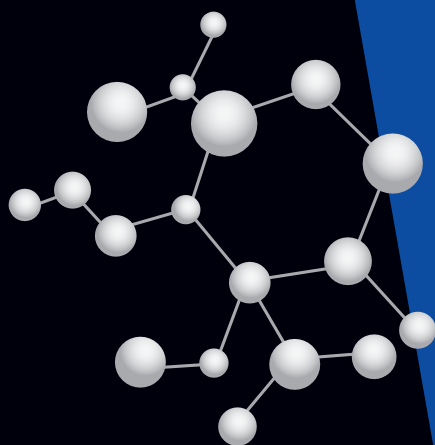


McQuarrie | Rock | Gallogly

Chimie générale

Traduction de la 4^e édition américaine par Jean Toullec
3^e édition



Chimie générale

Chez le même éditeur

ATKINS P.W., JONES L., Principes de chimie. 2^e éd.

ATKINS P.W., DE PAULA J., Chimie physique. 3^e éd.

BURROWS A., HOLMAN J., PARSONS A., PILLING G., PRICE G., Chimie 3. Introduction à la chimie inorganique,
à la chimie organique et à la chimie-physique

CLAYDEN J., GREEVES N., WARREN S., WOTHERS P., Chimie organique

HOUSECROFT C.E., SHARPE A.G., Chimie inorganique

KOTZ J.C., TREICHEL JR P.M., Chimie générale

KOTZ J.C., TREICHEL JR P.M., Chimie des solutions

MENDHAM J., DENNEY R.C., BARNES J.D., THOMAS M.J.K., Analyse chimique quantitative de Vogel

RABASSO N., Chimie organique. Généralités, études des grandes fonctions et méthodes spectroscopiques. 2^e éd.

RABASSO N., Chimie organique. 2. Hétéroéléments, stratégie de synthèse et chimie organométallique. 2^e éd.

SKOOG D.A., CROUCH S.R., HOLLER F.J., Chimie analytique, 2^e éd.

VOLLHARDT K.P.C., SCHORE N.E., Traité de chimie organique. 5^e éd.

McQuarrie | Rock | Gallogly

Chimie générale

3^e édition

Traduction de la 4^e édition américaine par Jean Toullec

Ouvrage original

D.A. McQuarrie, P.A. Rock, E.A. Gallogly, *General Chemistry*, 4th edition, University Science Books, © 2011.

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web: **www.deboeck.com**

© De Boeck Supérieur s.a., 2012
Rue des Minimes, 39 B-1000 Bruxelles

3^e édition

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit.

Imprimé en *Italie*

Dépôt légal:
Bibliothèque Nationale, Paris: novembre 2012
Bibliothèque royale de Belgique, Bruxelles: 2012/0074/267

ISBN 978-2-8041-7127-8

*Ce livre est dédié à la mémoire de
Peter A. Rock, 1939-2006, et
Donald A. McQuarrie, 1937-2009*

SOMMAIRE

1. Chimie et méthode scientifique	1
2. Atomes et molécules	41
3. Tableau périodique et périodicité chimique	79
4. Les prémices de la mécanique quantique	105
5. Mécanique quantique et structure atomique	137
6. Composés et liaisons ioniques	171
7. Formules de Lewis	197
8. Prédiction de la géométrie moléculaire	235
9. Liaison covalente	267
10. Réactivité chimique	307
11. Aspects quantitatifs de la chimie	349
12. Aspects quantitatifs de la chimie en solution	393
13. Propriétés des gaz	421
14. Thermochimie	469
15. Liquides et solides	519
16. Propriétés colligatives des solutions	569
17. Cinétique chimique : lois de vitesse	601
18. Cinétique chimique : mécanismes	649
19. Équilibre chimique	685
20. Propriétés des acides et des bases	729
21. Tampons et titrage des acides et des bases	777
22. Solubilité et réactions de précipitation	815
23. Thermodynamique chimique	853
24. Réactions d'oxydoréduction	899
25. Électrochimie	931
26. Chimie des métaux de transition	979

ANNEXES

Annexe A : Rappels de mathématiques	A-1
Annexe B : Unités SI et facteurs de conversion des unités	A-15
Annexe C : Résumé des règles de nomenclature de l'Union internationale de chimie pure et appliquée	A-19
Annexe D : Données thermodynamiques	A-23
Annexe E : Données pour une sélection d'acides et de bases	A-29
Annexe F : Solubilité de composés ioniques	A-32
Annexe G : Potentiels standards de réduction pour des solutions aqueuses à 25,0 °C	A-34
Annexe H : Production mondiale de produits chimiques	A-38
Annexe I : Réponses à une sélection de problèmes de numéro pair	A-40

INTERCHAPITRES (en ligne)

<http://superieur.deboeck.com>

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos *xv*

Préface à l'édition américaine *xix*

Préface à la 3^e édition française *xxi*

1. Chimie et méthode scientifique *I*

- 1-1 L'étude de la chimie *1*
- 1-2 La méthode scientifique *3*
- 1-3 Mesures quantitatives *5*
- 1-4 Le système métrique *7*
- 1-5 Unités d'énergie *13*
- 1-6 Exactitude et pourcentage d'erreur *17*
- 1-7 Précision et chiffres significatifs *20*
- 1-8 Nombre de chiffres significatifs dans les calculs *22*
- 1-9 Analyse dimensionnelle *25*
- 1-10 Notation de Guggenheim *30*

2. Atomes et molécules *41*

- 2-1 Éléments et symboles chimiques *41*
- 2-2 Les états de la matière *44*
- 2-3 Séparation des constituants des mélanges *45*
- 2-4 Loi des proportions définies *49*
- 2-5 Théorie atomique de Dalton *51*
- 2-6 Molécules *54*
- 2-7 Nomenclature chimique *55*
- 2-8 Masses atomiques et masses moléculaires *58*
- 2-9 Le noyau *59*
- 2-10 Protons, neutrons et électrons *62*
- 2-11 Isotopes *63*
- 2-12 Ions *68*

3. Tableau périodique et périodicité chimique *79*

- 3-1 Réactions chimiques *79*
- 3-2 Équations chimiques *81*
- 3-3 Regroupement des éléments d'après leurs propriétés *85*
- 3-4 Périodicité *88*
- 3-5 Groupes d'éléments *90*
- 3-6 Classification des éléments *94*
- 3-7 Tendances périodiques *97*

4. Les prémices de la mécanique quantique *105*

- 4-1 Énergies de première ionisation *105*
- 4-2 Énergies d'ionisation et périodicité *107*
- 4-3 Le spectre électromagnétique *111*
- 4-4 Spectre de raies des atomes *114*
- 4-5 Photons *116*
- 4-6 Longueur d'onde de De Broglie *120*
- 4-7 Dualité onde-particule *121*
- 4-8 Quantification de l'énergie *122*
- 4-9 Transitions électroniques *124*

5. Mécanique quantique et structure atomique *137*

- 5-1 L'équation de Schrödinger *137*
- 5-2 Nombre quantique azimutal *141*
- 5-3 Nombre quantique magnétique *144*
- 5-4 Spin électronique *145*
- 5-5 Niveaux d'énergie des atomes *150*
- 5-6 Principe d'exclusion de Pauli *151*
- 5-7 Configurations électroniques *153*
- 5-8 Règle de Hund *154*
- 5-9 États excités *156*
- 5-10 Configuration électronique et périodicité *157*
- 5-11 Métaux de transition, lanthanides et actinides *160*
- 5-12 Rayons atomiques, énergies d'ionisation et périodicité *162*

6. Composés et liaisons ioniques *171*

- 6-1 Liaisons ioniques *171*
- 6-2 Charges ioniques et formules chimiques *176*
- 6-3 Ions des métaux de transition *177*
- 6-4 Nomenclature électronique des ions de métaux de transition *179*
- 6-5 Configuration électrique des ions de métaux de transition *181*
- 6-6 Taille des ions *183*
- 6-7 Énergie des liaisons ioniques *185*

7. Formules de Lewis 197

- 7-1 Liaisons covalentes 197
- 7-2 Règle de l'octet et formules de Lewis 199
- 7-3 Atomes d'hydrogène, atomes terminaux des formules de Lewis 202
- 7-4 Charges formelles 205
- 7-5 Liaisons multiples 209
- 7-6 Hybrides de résonance 212
- 7-7 Radicaux libres 216
- 7-8 Extensions de la règle de l'octet 218
- 7-9 Électronégativité 222
- 7-10 Liaisons polaires 224
- 7-11 Moments dipolaires 226

8. Prédiction de la géométrie moléculaire 235

- 8-1 Géométrie moléculaire 235
- 8-2 Le tétraèdre régulier 236
- 8-3 La théorie RPECV/VSEPR 237
- 8-4 Géométrie et nombre de paires d'électrons 239
- 8-5 Géométrie et doublets libres 242
- 8-6 Géométrie et liaisons multiples 244
- 8-7 Composés bipyramidaux trigonaux 249
- 8-8 Composés octaédriques 251
- 8-9 Structure et moments dipolaires 253
- 8-10 Isomères optiques 255

9. Liaison covalente 267

- 9-1 Orbitales moléculaires 267
- 9-2 Orbitales moléculaires de H_2^+ 268
- 9-3 Ordre de liaison 274
- 9-4 Configuration électronique des molécules diatomiques 275
- 9-5 Orbitales hybrides sp 279
- 9-6 Orbitales hybrides sp^2 282
- 9-7 Orbitales hybrides sp^3 283
- 9-8 Orbitales non liantes 286
- 9-9 Hybridation des orbitales d 289
- 9-10 Doubles liaisons 291
- 9-11 Isomérisie *cis-trans* 293
- 9-12 Triples liaisons 295
- 9-13 Électrons π délocalisés du benzène 296

10. Réactivité chimique 307

- 10-1 Réactions de combinaison 308
- 10-2 Nomenclature des ions polyatomiques 309

- 10-3 Acides et bases 314
- 10-4 Réactions de décomposition 320
- 10-5 Hydrates 322
- 10-6 Réactions de simple déplacement 323
- 10-7 Réactivité relative des métaux 324
- 10-8 Réactivité relative des halogènes 327
- 10-9 Réactions de double déplacement 328
- 10-10 Réactions acide-base 332
- 10-11 Réactions d'oxydoréduction 335

11. Aspects quantitatifs de la chimie 349

- 11-1 Le concept de la mole 349
- 11-2 Nombre d'Avogadro 353
- 11-3 Formules brutes 356
- 11-4 Détermination des masses atomiques 360
- 11-5 Formules moléculaires 361
- 11-6 Analyses par combustion 363
- 11-7 Coefficients dans les équations chimiques 366
- 11-8 Stœchiométrie 372
- 11-9 Stœchiométrie sans disposer des équations chimiques 375
- 11-10 Réactifs limitants 377
- 11-11 Pourcentages de rendement 380

12. Aspects quantitatifs de la chimie en solution 393

- 12-1 Solutions 393
- 12-2 Molarité 395
- 12-3 Électrolytes 399
- 12-4 Réactions en solution 404
- 12-5 Réactions de précipitation 405
- 12-6 Titrages acide-base 408
- 12-7 Masse formulaire déterminée par titrage 410

13. Propriétés des gaz 421

- 13-1 État gazeux 421
- 13-2 Mesure de la pression d'un gaz 422
- 13-3 Unités de pression 424
- 13-4 Loi de Boyle-Mariotte et loi de Charles 426
- 13-5 Loi d'Avogadro 431
- 13-6 Équation des gaz parfaits 432
- 13-7 Détermination de masses molaires 439
- 13-8 Pressions partielles 443
- 13-9 Distribution de Maxwell-Boltzmann 448
- 13-10 Théorie cinétique des gaz et vitesse quadratique moyenne 450

- 13-11 Loi d'effusion de Graham 453
- 13-12 Libre parcours moyen 455
- 13-13 Équation de van der Waals 457

14. Thermochimie 469

- 14-1 Énergie, travail et chaleur 470
- 14-2 Enthalpie 473
- 14-3 Enthalpie et énergie de réaction 477
- 14-4 Loi de Hess 479
- 14-5 Enthalpies molaires de formation 484
- 14-6 Enthalpies molaires de liaison 492
- 14-7 Capacités calorifiques 496
- 14-8 Calorimétrie 501
- 14-9 Bombes calorimétriques 503
- 14-10 Interprétation à l'échelle moléculaire des capacités calorifiques 505

15. Liquides et solides 519

- 15-1 Molécules dans les solides et les liquides 519
- 15-2 Courbes de chauffage 521
- 15-3 Fusion et vaporisation 522
- 15-4 Forces intermoléculaires 527
- 15-5 Propriétés des liquides 533
- 15-6 Pression de vapeur 536
- 15-7 Humidité relative 540
- 15-8 Diagrammes de phases 541
- 15-9 Structure cristalline 545
- 15-10 Forces dans les cristaux 551
- 15-11 Électrons dans les métaux 554
- 15-12 Cristaux liquides 555
- 15-13 Colloïdes 557

16. Propriétés colligatives des solutions 569

- 16-1 Molalité et fraction molaire 569
- 16-2 Loi de Raoult 573
- 16-3 Élévation du point d'ébullition 576
- 16-4 Abaissement du point de congélation du solvant 579
- 16-5 Pression osmotique 583
- 16-6 Solutions idéales 587
- 16-7 Loi de Henry 590

17. Cinétique chimique : lois de vitesse 601

- 17-1 Vitesses de réaction 601
- 17-2 Variations de la vitesse avec le temps 607

- 17-3 Vitesses initiales 610
- 17-4 Réactions d'ordre 1 617
- 17-5 Demi-vies pour les réactions d'ordre 1 620
- 17-6 Désintégration d'un isotope radioactif 623
- 17-7 Datation au carbone-14 628
- 17-8 Réactions d'ordre 2 630
- 17-9 Demi-vies pour les réactions d'ordre 2 635

18. Cinétique chimique : mécanismes 649

- 18-1 Mécanismes réactionnels 649
- 18-2 Énergie d'activation 652
- 18-3 Équation d'Arrhenius 657
- 18-4 Étape déterminante 659
- 18-5 Réactions réversibles 660
- 18-6 Catalyse 663
- 18-7 Cinétique enzymatique 668

19. Équilibre chimique 685

- 19-1 Équilibre dynamique 686
- 19-2 Évolution d'un système vers l'état d'équilibre 687
- 19-3 Loi de Guldberg et Waage 689
- 19-4 Constantes d'équilibre exprimées en pressions partielles 695
- 19-5 Calculs fondés sur les constantes d'équilibre 697
- 19-6 Combinaison de constantes d'équilibre 703
- 19-7 Principe de Le Chatelier 705
- 19-8 Principe de Le Chatelier et ses applications quantitatives 712
- 19-9 Direction de spontanéité d'une réaction 715

20. Propriétés des acides et des bases 729

- 20-1 Acides et bases 729
- 20-2 Constante de produit ionique de l'eau 731
- 20-3 Acides forts et bases fortes 732
- 20-4 Acides carboxyliques 735
- 20-5 pH et acidité 738
- 20-6 Acides faibles et bases faibles 742
- 20-7 K_a et force de l'acide 743
- 20-8 Approximations successives 748
- 20-9 K_b et force de la base 751
- 20-10 Couples acide-base 754
- 20-11 Solutions de sels 758
- 20-12 Acides polyprotoniques 764

21. Tampons et titrage des acides et des bases 777

- 21-1 Équation de Henderson-Hasselbalch 777
- 21-2 Solutions tampons 781
- 21-3 Indicateurs 786
- 21-4 Titrage d'un acide fort par une base forte 791
- 21-5 Titrage d'un acide faible par une base forte 794
- 21-6 $\text{pH} = \text{p}K_a$ à la demi-équivalence 796
- 21-7 Titrage d'une base faible par un acide fort 802

22. Solubilité et réactions de précipitation 815

- 22-1 Constantes de produit de solubilité 815
- 22-2 Effet d'ion commun 821
- 22-3 Formation de complexes 823
- 22-4 Acidité et solubilité des sels 828
- 22-5 Quotient de précipitation 830
- 22-6 Précipitation sélective 833
- 22-7 Hydroxydes métalliques amphotères 835
- 22-8 Analyse qualitative 838

23. Thermodynamique chimique 853

- 23-1 Réactions spontanées 853
- 23-2 Deuxième principe de la thermodynamique 856
- 23-3 Entropie et désordre 860
- 23-4 Entropie et structure moléculaire 865
- 23-5 Entropie de réaction 868
- 23-6 $\Delta_r G^\circ$ et spontanéité de la réaction 869
- 23-7 $\Delta_r G^\circ$ et quotient de réaction 873
- 23-8 Relation entre $\Delta_r G$ et $\Delta_r G^\circ$ 875
- 23-9 Énergies de Gibbs de formation 880
- 23-10 Équation de van't Hoff 883

24. Réactions d'oxydoréduction 899

- 24-1 Nombres d'oxydation 899
- 24-2 Réactions d'oxydoréduction 906
- 24-3 Demi-réactions 908
- 24-4 Équations chimiques des réactions redox en solution acide 909
- 24-5 Équations chimiques des réactions d'oxydoréduction en solution basique 914
- 24-6 Réactions d'oxydoréduction et chimie analytique 917
- 24-7 Corrosion 920

25. Électrochimie 931

- 25-1 Réactions chimiques et courant électrique 931
- 25-2 Cellules galvaniques 934
- 25-3 Chaîne électrochimique 938
- 25-4 Équation de Nernst 941
- 25-5 Valeurs E° des demi-réactions 946
- 25-6 Mesure de la concentration des ions 952
- 25-7 $\Delta_r G$ et travail 957
- 25-8 Lois de Faraday de l'électrolyse 960
- 25-9 Électrolyse industrielle 964

26. Chimie des métaux de transition 979

- 26-1 Nombre d'oxydation 980
- 26-2 Chrome et manganèse 984
- 26-3 Production du fer dans les hauts fourneaux 986
- 26-4 Cobalt, nickel, cuivre et zinc 989
- 26-5 Or, argent et mercure 992
- 26-6 Séries de métaux de transition du bloc *d* 995
- 26-7 Complexes de métaux de transition 997
- 26-8 Nomenclature des complexes de métaux de transition 1000
- 26-9 Ligands polydentés 1003
- 26-10 Isomères 1005
- 26-11 Éclatement des orbitales *d* 1008
- 26-12 Configurations électroniques 1013
- 26-13 Série spectrochimique 1015

Annexes

Annexe A : Rappels de mathématiques A-1

Annexe B : Unités SI et facteurs de conversion des unités A-15

Annexe C : Résumé des règles de nomenclature de l'Union internationale de chimie pure et appliquée A-19

Annexe D : Données thermodynamiques A-23

Annexe E : Données pour une sélection d'acides et de bases A-29

Annexe F : Solubilité de composés ioniques A-32

Annexe G : Potentiels standards de réduction pour des solutions aqueuses à 25,0 °C A-34

Annexe H : Production mondiale de produits chimiques A-38

Annexe I : Réponses à une sélection de problèmes de numéro pair A-40

Crédits photographiques C-1

Index I-1

Interchapters sur <http://superieur.deboeck.com>

Interchapitre A : Elemental Etymology
Interchapitre B : A Brief History of the Periodic Table
Interchapitre C : Hydrogen and Oxygen
Interchapitre D : The Alkali Metals
Interchapitre E : Nitrogen
Interchapitre F : Saturated Hydrocarbons
Interchapitre G : Unsaturated Hydrocarbons
Interchapitre H : Aromatic Hydrocarbons
Interchapitre I : The Main-Group Metals
Interchapitre J : Sulfur
Interchapitre K : The Noble Gases
Interchapitre L : The World Supply of Energy
Interchapitre M : Carbon and Silicon
Interchapitre N : Phosphorus
Interchapitre O : Radiochemistry
Interchapitre P : Alcohols, Aldehydes, and Ketones
Interchapitre Q : The Halogens
Interchapitre R : Carboxylic Acids
Interchapitre S : Synthetic Polymers
Interchapitre T : Biological Polymers
Interchapitre U : Batteries

AVANT-PROPOS

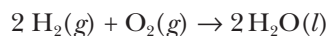
La dernière édition de l'ouvrage de McQuarrie et Rock est sortie en 1991. Au cours des années qui ont suivi cette publication, il a été agréable d'apprendre de la bouche de beaucoup de lecteurs qu'ils regrettaient que n'apparaisse pas une quatrième édition. C'est donc un grand plaisir pour nous de présenter cette nouvelle édition en bénéficiant d'un recul de presque vingt années.

Contrairement à ce qui est fait dans les rééditions de bon nombre d'ouvrages, nous avons procédé à de profonds remaniements dans cette nouvelle édition, le principal venant peut-être du fait que nous ayons choisi de présenter en premier la structure atomique, choix qui s'est beaucoup affirmé être le plus adopté ces vingt dernières années dans l'enseignement de la chimie générale. Après un chapitre d'introduction traitant de la méthode scientifique en chimie en général, nous présentons brièvement, dans un second chapitre, les éléments, les composés et la nomenclature chimique, ainsi que le modèle nucléaire de l'atome. Dans le chapitre 3, nous mettons en exergue les propriétés périodiques des éléments au moyen de quelques réactions convenablement choisies des éléments des différents groupes. Après avoir donc introduit le tableau périodique, ce qui est probablement le point le plus important de la chimie générale, nous avons maintenant une suite de six chapitres, dans lesquels nous utilisons la mécanique quantique pour présenter les fondements de la classification périodique des éléments. Dans le premier de ces six chapitres, le chapitre 4, nous examinons les spectres atomiques et le concept de quantification des niveaux d'énergie. Ensuite, dans le chapitre 5, nous traitons des atomes multiélectroniques et nous montrons la relation qui existe entre la périodicité et la configuration électronique des atomes multiélectroniques. Le chapitre 6 est dévolu aux liaisons ioniques, le mode de liaison le plus simple. Après une présentation assez complète des formules de Lewis dans le chapitre 7, nous montrons dans le chapitre 8 comment, à partir de celles-ci, la théorie *VSEPR* de Gillespie permet de prévoir les configurations géométriques moléculaires. Cela permet aux étudiants d'être mieux familiarisés avec un grand nombre de molécules et de composés et leur apporte une meilleure pratique de l'écriture des formules de Lewis. Dans le chapitre 9, le dernier des six chapitres consacrés aux applications de la mécanique quantique à la compréhension de la structure atomique et de la structure moléculaire, nous présentons de façon assez poussée la liaison covalente, en se fondant sur la théorie moléculaire simple des molécules diatomiques et des orbitales hybrides qui permet de décrire les modes de liaison entre atomes dans les molécules polyatomiques.

Dans le chapitre 10, nous commençons une séquence somme toute assez classique de chapitres consacrés à la réactivité chimique, aux calculs fondés sur les notions de mole et de stœchiométrie des réactions, aux propriétés des gaz, à la thermochimie, aux solides et liquides, aux solutions, à la cinétique chimique, aux équilibres chimiques, aux acides et bases, à la thermodynamique, à la solubilité des composés binaires et aux réactions de précipitation, aux réactions d'oxydoréduction, à l'électrochimie et aux métaux de transition.

Nous avons remarqué que de nombreux traités de chimie générale ne font pas une claire différence entre une réaction chimique, qui est le processus physique réel qui se produit au laboratoire, et l'équation chimique que l'on utilise pour décrire cette réaction. La façon dont on décrit une réaction chimique par une équation chimique est arbitraire car celle-ci dépend du choix des coefficients stœchiométriques. On peut en effet écrire une équation chimique avec un ensemble donné de coefficients stœchiométriques ou bien avec un ensemble de coefficients qui en sont les multiples. Ainsi peut-on décrire la réaction de

l'oxygène et de l'hydrogène par l'équation



mais aussi par l'équation



si l'on veut considérer la combustion d'une seule mole d'hydrogène. Dans cet exemple, la valeur de l'enthalpie de combustion de la réaction est de $-237,1$ kilojoules par mole dans le premier cas mais de $-118,5$ kilojoules par mole dans le second. Dans l'un et l'autre cas, l'unité « mole » se rapporte à une mole de la réaction telle qu'elle est décrite par l'équation. Cela souligne aussi le fait que les coefficients stœchiométriques sont des grandeurs relatives et qu'ils sont donc sans dimension. Ces deux points sont pratiquement en accord avec tous les ouvrages de chimie physique et il convient de s'y conformer.

Un autre point important concerne la présence ou non d'unités dans les valeurs des constantes d'équilibre. Dans les précédentes éditions, les constantes d'équilibre que nous avons écrites dans les chapitres d'introduction comportaient des unités, et cela a été parfois contesté. Il n'y a cependant aucun moyen d'échapper à cela. Écrire des constantes d'équilibre avec des unités est tout à fait juste quand on définit une constante d'équilibre K_c sur la base des concentrations ou une constante K_p sur la base des pressions. Vous pouvez certainement faire appel à un état standard d'unité de concentration ou de pression pour faire disparaître mystérieusement les unités, mais il est clair qu'une telle convention arbitraire n'est pas justifiée à ce point des études de chimie. En outre, quand on effectue des calculs à partir de ces constantes, les concentrations à l'équilibre obtenues doivent apparaître avec des unités de concentration ou de pression, ce qui ne serait pas le cas si les constantes K_c et K_p étaient prises sans unités. La raison pour supprimer les unités dans les constantes d'équilibre vient d'une anticipation de la nécessité d'utiliser l'équation thermodynamique

$$\Delta_r G = -RT \ln K$$

pour calculer les grandeurs thermodynamiques qui en sont dérivées. Il est clair que, dans cette équation, la constante K ne peut pas avoir d'unités si l'on veut prendre son logarithme. Il est important de réaliser qu'ici la constante K n'est pas identique à K_c et K_p . Il s'agit d'une *constante thermodynamique d'équilibre*, définie par

$$K = K_c/Q_c^\circ \quad \text{ou} \quad K = K_p/Q_p^\circ$$

où Q_c° est le quotient standard de réaction dont la valeur numérique est égale à 1 mais qui est exprimée en unités de molarité et où Q_p° est une grandeur analogue en pressions. Maintenant, et seulement maintenant, K est sans unités. Une introduction formelle du concept de constante thermodynamique d'équilibre n'est pas uniquement une façon différente de dire la même chose que dans les chapitres précédents ; K est une constante d'équilibre entièrement nouvelle. Tout cela est en accord avec les recommandations de 1982 de l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA).

Nous nous sommes généralement conformé aux recommandations de l'UICPA, mais nous n'avons pas pu nous y résoudre dans le cas des unités de pression. L'UICPA recommande d'utiliser les unités SI, bar et pascal, mais l'atmosphère normale est si profondément enracinée dans l'enseignement de la chimie qu'il s'avère difficile de ne pas l'utiliser. Par voie de conséquence, nous avons utilisé tout à la fois des bars et des atmosphères tout au long de l'ouvrage et demandé aux étudiants d'être « bilingues ». La définition UICPA des conditions standards de température et de pressions est fondée sur une pression de

1 bar et une température de 0 °C, tandis que la définition était auparavant basée sur une pression de 1 atm et une température de 0 °C. Une consultation informelle de nombreux enseignants de chimie de l'enseignement secondaire nous a montré que le fait bien connu qu'un gaz parfait occupe 22,414 L à 0 °C et 1 atm est encore bien enraciné, bien que l'UICPA recommande la valeur de 22,711 L à 0 °C et 1 bar.

Une innovation dans cet ouvrage est la présentation de ce que nous appelons des *Interchapitres* pour introduire une chimie plus descriptive. Ces *Interchapitres* sont disponibles à l'adresse <http://superieur.deboeck.com>. Tout auteur de chimie générale sait que la façon de présenter la chimie descriptive est un problème lancinant, comme l'attestent les nombreux articles publiés par le *Journal of Chemistry Education*. Dans la 3^e édition, nous avons incorporé deux chapitres complets sur la chimie des éléments des groupes principaux. Malheureusement, de nombreux enseignants n'ont simplement pas le temps, ni peut-être le désir, de traiter de ces chapitres, car ils n'apparaissent qu'à la fin de l'ouvrage. Nous avons choisi de présenter la chimie descriptive dans un certain nombre de textes brefs (environ dix pages) qui peuvent être traités facilement ou recommandés aux étudiants pour une lecture complémentaire. Les références à ces *Interchapitres* sont données partout dans le corps de l'ouvrage. Certains d'entre eux traitent, par exemple de l'hydrogène et de l'oxygène, des métaux alcalins, de l'azote, des hydrocarbures saturés, des hydrocarbures insaturés, des hydrocarbures aromatiques et des métaux des groupes principaux. Il apparaît particulièrement judicieux que l'on présente très tôt une étude *élémentaire* de la chimie organique, cela de façon à ce que des molécules organiques puissent servir d'exemples. Bien que nous ayons évité de faire référence à la quantité pléthorique de sites sur la toile qui sont disponibles, en raison de leur caractère souvent éphémère, on peut fortement recommander le site du *Journal of Chemical Education*, appelé *Periodic Table Live !*, dont vous trouverez un lien sur mcquarriegeneralchemistry.com*. Quand vous cliquez sur un des éléments figurant dans la page d'accueil de ce site, vous obtenez une liste de ses propriétés chimiques et physiques et même des photographies et des vidéographies relatives à un certain nombre de ses réactions. Il convient d'encourager les étudiants à s'y reporter fréquemment.

Donald A. McQuarrie

* Cette référence est accessible également à l'adresse <http://superieur.deboeck.com>

PRÉFACE À L'ÉDITION AMÉRICAINE

Quand avec Don McQuarrie et Peter Rock nous nous sommes mis d'accord pour collaborer à la réalisation d'une quatrième édition de leur traité classique de chimie générale, nous partagions la même perception de ce que serait la nouvelle édition.

Nous avons décidé de commencer l'ouvrage par la théorie atomique puis d'examiner les molécules et les modes de liaison des atomes, avant d'introduire les différentes classes de réactions et les différentes propriétés chimiques. Nous pensions que, puisque les classes de réactions et les propriétés chimiques découlent de la structure moléculaire et des modes de liaison entre atomes, cette séquence amènerait les étudiants à mieux comprendre ces domaines plus complexes. Par exemple, on utilise des formules de Lewis pour comprendre pourquoi l'acide acétique est acide, que l'hydroxyde de sodium est basique et que le méthanol est neutre, bien qu'ils possèdent tous les trois un groupe hydroxyle OH. Une telle présentation est pratiquement impossible si l'on parle d'abord des réactions avant de parler de la structure des composés, mais on y arrive naturellement dans l'approche consistant à présenter d'abord les atomes et les molécules.

Un autre changement important décidé par rapport aux précédentes éditions était la réalisation des frontispices en tête des différents chapitres présentant de courtes biographies de certains grands pionniers de la science dans le style des autres ouvrages de Don McQuarrie. Nous espérons que les parcours de ces scientifiques de renom serviraient de modèles lorsque les étudiants considéreraient leurs projets de carrière et que ces biographies intéresseraient à la fois les enseignants et les étudiants.

Nous voulions aussi intégrer de nombreux concepts de la chimie organique, de celle des polymères et de la biochimie, ainsi qu'une chimie plus descriptive en supplément des chapitres formant le cœur de l'ouvrage. Dans la seconde édition, D.A. McQuarrie et P.A. Rock avaient inséré ces informations dans de courts *Interchapitres* entre les différents chapitres. Dans la présente édition, nous avons sorti les *Interchapitres* du texte principal, nous les avons complétés et nous les avons rendus électroniquement accessibles par l'internet, en indiquant leurs références dans le texte imprimé. Cela permet à l'enseignant de prendre ce qui l'intéresse et d'apporter ces informations quand le besoin s'en présente. Nous espérons aussi des enseignants qu'ils nous soumettraient de courts *interchapitres* du même type, que nous pourrions présenter sur notre site et qui seraient donc accessibles à tous. Par ailleurs, le fait de rendre ces compléments accessibles électroniquement plutôt que de les incorporer dans le texte imprimé devait aussi permettre de réduire le volume de l'ouvrage et son coût pour les étudiants.

En préparant cette édition, nous avons travaillé avec *Sample Learning* pour fournir aux étudiants un système électronique de travail interactif à domicile accompagnant l'ouvrage. Cela leur permet de disposer d'un système d'échanges afin d'améliorer leur compréhension des notions fondamentales de chaque chapitre. Ce système permet d'améliorer l'utilisation du travail en classe et comporte de courts exercices pratiques aidant à la maîtrise des concepts.

Cette 4^e édition présente aussi un certain nombre d'innovations plus mineures, telles que l'emploi dans l'ensemble de l'ouvrage des règles de nomenclature et des conventions de l'UICPA, une attention soutenue sur la manipulation de valeurs numériques avec des nombres adéquats de chiffres significatifs et la présence de problèmes d'application après les exemples numérotés au cœur de chaque chapitre. Figure aussi l'emploi systématique du *CRC Handbook of Chemistry and Physics* comme source de la plupart des données.

Pour les lecteurs connaissant bien les éditions précédentes, signalons que, dans la version actuelle, les chapitres concernant la mécanique quantique et la cinétique sont maintenant coupés en deux parties, ce qui permet de disposer de davantage d'exemples et d'applications. Ainsi, le deuxième chapitre de cinétique traite aussi de la cinétique enzymatique. Nous avons également modifié la façon de présenter la chimie nucléaire. Au lieu d'introduire un chapitre centré essentiellement sur la physique nucléaire, nous avons choisi d'introduire un nouvel *Interchapitre* traitant de l'application des radio-isotopes en chimie et d'intégrer ce qui concerne les réactions nucléaires d'ordre 1 ainsi que la datation au carbone-14 des pièces archéologiques dans les chapitres de cinétique. Enfin, nous avons ajouté plusieurs *interchapitres*, tels que celui relatif aux ressources énergétiques dans le monde.

Comme je n'aurais pas pu l'imaginer en commençant ce travail, les deux auteurs initiaux de cet ouvrage décédèrent au cours du développement du projet. Peter nous quitta peu de temps après que le travail de révision eut débuté, mais, heureusement Don vécut suffisamment de temps pour voir le manuscrit de l'ouvrage presque achevé. Je suis particulièrement reconnaissant à Carole McQuarrie, l'épouse de Don, elle-même chimiste, dont l'aide fut inestimable et qui continua à collaborer à l'achèvement de l'ouvrage après le décès de son mari.

Le travail avec Don sur le projet de cette 4^e édition a énormément, accru ma propre compétence professionnelle, beaucoup plus que tout autre travail effectué précédemment. Je n'ai malheureusement plus maintenant aucun moyen de le payer en retour pour la sagesse et l'expérience qu'il a généreusement partagé avec moi tout au long de notre collaboration. J'espère seulement que cet ouvrage, fruit de nos efforts, profitera aux étudiants qui le liront autant que ce qu'il m'a personnellement apporté.

Cet ouvrage ne serait jamais arrivé à son terme sans le concours de nombreuses personnes et d'institutions. D'abord, et par-dessus tout, je souhaite remercier Don McQuarrie et Peter Rock dont les brillantes qualités scientifiques et pédagogiques transparaissent tout au long des lignes de ce livre.

Je voudrais aussi remercier notre éditeur, Bruce Armbruster de la maison d'édition *University Science Book* qui rendit possible cette quatrième édition, mon département de chimie qui m'accorda le temps nécessaire pour réaliser ce travail et dont les membres me prodiguèrent leurs conseils d'ordre pédagogique, Mervin Hanson pour l'énorme travail qu'il apporta en révisant toutes les solutions des problèmes et pour ses précieux conseils sur le texte, Naye Lewis pour sa contribution à l'*Interchapitre* sur l'énergie, Miriam Bennet, Lisa Dysleski, Harry B. Gray, Hal Harris, Mark L. Kearley, Joseph Kushick, Robert Lamoreaux, Jacob Morris et Allan Van Orden, qui contribuèrent tous à ce travail d'une façon ou d'une autre, George Kelvin et Laurel Muller pour leur excellent travail de graphisme sur l'ensemble du livre, Wang Zhaozheng pour la réalisation graphique de la couverture, Jane Ellis pour son aide pour la protection juridique des photos et du texte et sa contribution à la diffusion de l'ouvrage, Jennifer Uhlich et le personnel de *Wilstead Publishing Services* pour l'excellente mise en page. Je voudrais aussi remercier Kate Liba, qui, la première, m'apprit l'art d'écrire, ainsi que William M. Jackson, mon directeur de thèse à l'université de Californie, à Davis, auprès duquel j'appris l'art de la recherche. Je remercie aussi ma famille pour leur patience et leur soutien durant toutes ces années au cours desquelles j'ai travaillé sur ce traité.

Cette 4^e édition de General Chemistry est dédiée à la mémoire de Don McQuarrie et Peter Rock.

Ethan Gallogly

PRÉFACE À LA 3^e ÉDITION FRANÇAISE

General Chemistry de Donald D. McQuarrie, Peter A. Rock et Ethan B. Gallogly est depuis près de trente ans un des ouvrages majeurs de l'enseignement de la chimie dans le monde. Il s'adresse aux étudiants en début de cursus universitaire, mais des étudiants plus avancés et même des professionnels de la chimie y trouvent aussi un grand nombre de renseignements importants. Son importance a été très grande, non seulement pour sa qualité pédagogique, notamment dans l'art de présenter sur une base historique des notions complexes de façon imagée et attrayante, mais aussi par son influence sur le développement des idées elles-mêmes pour qu'elles soient abordables par tous quel que soit leur niveau scientifique initial, notamment en mathématique. *General Chemistry* est aussi tout particulièrement apprécié du fait de l'ensemble exceptionnel de plus de 2000 problèmes accompagnant le texte et utilisés comme véritable outil pédagogique.

La troisième édition de cet ouvrage, parue en 1991, a bénéficié en 1992 de sa traduction en français par mon collègue Paul Depovere de l'Université catholique de Louvain-La-Neuve (Belgique) pour le compte des éditions De Boeck. Cette traduction a été fort appréciée dans tous les pays francophones et reste jusqu'à aujourd'hui très utilisée par les étudiants et leurs professeurs. Elle a notamment nécessité six nouveaux tirages, dont le dernier daté de 2010. Une nouvelle édition en anglais, la quatrième édition de *General Chemistry*, est apparue en 2011 malgré le décès de Donald McQuarrie et de Peter Rock durant sa préparation, cela grâce à Ethan Gallogly, resté seul pour finir de préparer cet ouvrage. Il aurait été souhaitable que Paul Depovere assure la traduction de cette nouvelle édition, mais pris par d'autres engagements, il a préféré que la lourde tâche que constitue la traduction de cet ouvrage de 1100 pages soit assurée par un autre traducteur. En conséquence, Paul Depovere et les éditions DeBoeck m'ont fait l'honneur de me proposer d'effectuer ce travail *indépendamment* de la traduction précédente. La qualité de cet ouvrage et son impact sur la terminologie de la chimie, à laquelle je me consacre depuis plusieurs années, m'ont incité à accepter cette proposition. Cette traduction a donc été réalisée sans que je me réfère systématiquement à la traduction de Paul Depovere de la 3^e édition. J'y ai eu fréquemment recours, en empruntant notamment certaines notes de traduction, mais de nombreuses options sont différentes.

La traduction d'ouvrages anglo-saxons, et plus spécifiquement d'ouvrages américains pose un certain nombre de problèmes allant au-delà de l'emploi d'unités anglo-saxonnes, et qui viennent notamment de traditions scientifiques différentes. Nous verrons ci-dessous les solutions adoptées. De manière générale, j'ai cherché à garder le plus possible le vocabulaire de l'auteur. Néanmoins, j'ai apporté certaines modifications lorsque les pratiques dans l'enseignement francophone m'apparaissaient trop différentes. En quelques occasions, j'ai aussi changé les symboles lorsque ceux adoptés par l'auteur étaient de nature à perturber les habitudes des étudiants. Dans ce cas, les symboles recommandés par l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA) et employés en français ont été utilisés. Certaines de ces différences seront précisées à la fin de cette préface.

La plus grande différence entre le vocabulaire anglo-saxon et le vocabulaire francophone concerne sans doute la notion d'élément chimique. En anglais, et en accord avec les textes de l'UICPA (*IUPAC*), les auteurs adoptent implicitement la double définition suivante (*Compendium*) :

1. Une espèce d'atomes ; tous les atomes ont le même nombre de protons dans leur noyau atomique.

2. Une substance chimique pure composée d'atomes ayant le même nombre de protons dans leur noyau atomique.

Selon cette double définition, le terme « élément oxygène », par exemple, désigne non seulement la sorte d'atomes possédant 8 protons dans le noyau mais aussi les molécules allotropiques O_2 et O_3 . En français, par contre, comme indiqué dans *Grandeurs Unités et symboles de la Chimie Physique* (cf. ci-dessous), « on fait la différence entre un élément, caractérisé par son numéro atomique, et un corps simple qui est une espèce chimique constituée uniquement d'atomes d'un seul élément ». Dans cette acception du terme, O_2 et O_3 ne peuvent pas être nommés éléments, et le tableau 2-5, p. 44, où apparaissent O_2 , F_2 , Cl_2 et N_2 comme éléments ne serait pas accepté. Sur cette question, j'ai néanmoins adopté le langage des auteurs, car notamment cette distinction aurait conduit à des modifications trop profondes de l'ouvrage ; d'autre part, il existe dans la conception française des différences appréciables selon les auteurs. En effet, conformément à la conception traditionnelle en français, les substances O_2 et O_3 sont souvent présentées comme des formes différentes d'un même corps simple, l'oxygène, de la même façon que ce sont deux formes du même élément dans la conception anglo-saxonne ; dans une autre conception, par exemple celle adoptée récemment dans *Grandeurs, unités et symboles de la Chimie Physique*, traduction du *Green Book* de l'UICPA, O_2 (dioxygène) et O_3 (trioxygène, ozone) sont deux corps simples différents relatifs au même élément. Dans ce cas, le terme « corps simple » est pris comme antonyme du terme « corps composé » lorsque plusieurs éléments sont présents simultanément.

À cette question se greffe celle de l'emploi de noms tels que « dioxygène » pour désigner des espèces comme O_2 . Cette appellation, qui découle d'une recommandation de la Commission de chimie inorganique (CNIC) de l'IUCPA est très utilisée en français, notamment en France dans l'enseignement secondaire, mais l'est assez peu en anglais ; elle est ignorée par les auteurs qui indiquent spécifiquement qu'il est normal d'appeler « oxygène » l'espèce O_2 , car c'est, de très loin, la forme la plus abondante de l'élément à l'état naturel. Là encore, il fallait choisir, et, là encore, je me suis conformé aux auteurs. Il m'est apparu en outre que des appellations telles que « dioxygène » ou « trioxygène » n'ont de sens que si l'on considère O_2 et O_3 comme des corps simples distincts. Cette option n'est pas totalement contraire aux règles de l'UICPA qui stipule que des noms tels qu'oxygène et azote sont des alternatives acceptables à dioxygène et diazote.

La question très épineuse qui s'est présentée tout au long de cette traduction est celle de la présentation des unités, celle-ci étant souvent très différente des usages dans les pays francophones, notamment en France. D'une part, les unités sont incluses dans les équations, ce qui est nettement contraire à l'usage en français et, d'autre part, les auteurs ne font pas toujours une claire dichotomie entre les termes adoptés pour les unités et les grandeurs physiques, et utilisent, par exemple, le terme « nombre de grammes » pour désigner la masse exprimée en grammes. Cela est contraire à ce qui est recommandé notamment par le Bureau international des poids et mesures, (BIPM), l'Union internationale de physique appliquée (UIPPA) et l'Union internationale de chimie appliquée (UICPA). On lit, par exemple, dans *Grandeurs, unités et symboles de la Chimie Physique* que l'on ne dit pas « nombre de mètres » pour désigner une longueur. Une telle pratique se présentant dans la version originale de cet ouvrage, j'ai systématiquement changé les expressions du type « nombre de grammes du composé X » par « masse du composé X ».

Un problème de même nature, mais encore plus épineux, s'est présenté lorsque sont exprimées en moles les quantités de matière (dans le sens donné par le BIPM, l'UIPPA et l'UICPA) présentes dans un échantillon, ce qui se rencontre très fréquemment dans l'ensemble de l'ouvrage. Conformément à une pratique assez répandue, les auteurs parlent du « nombre de moles » d'une

espèce donnée. Traduites littéralement, on trouverait en effet des expressions telles que « le nombre de moles d'eau dans 36 grammes d'eau est de deux moles », ou de façon abrégée « nombre de moles de $\text{H}_2\text{O} = 2 \text{ mol}$ ». De telles expressions étant plus ou moins prohibées par de nombreux enseignants soucieux de suivre les recommandations officielles, il m'est paru préférable de les éviter. J'ai donc généralement choisi d'écrire « la quantité d'eau dans 36 g d'eau est de deux moles ». Cela ne me paraît pas une infidélité majeure au texte des auteurs. Je n'ai utilisé le terme « nombre de moles » que lors des études de la stœchiométrie des réactions en termes de moles. De la même façon que l'on dit que les coefficients stœchiométriques indiquent le nombre de molécules de réactifs et de produits intervenant dans une réaction, il est difficile de dire autre chose, au plan macroscopique, que « les coefficients stœchiométriques indiquent le nombre de moles de réactifs et de produits intervenant dans une réaction ».

Une autre difficulté s'est présentée quant à l'emploi du mot « espèce » tout au long de l'ouvrage. En effet, contrairement à l'usage recommandé par l'UICPA dans divers textes (voir, par exemple le *Gold Book*), les auteurs ne distinguent pas la notion d'« entité » (entité moléculaire ou entité élémentaire), relative à des ions, molécules, atomes, etc. individuels à l'échelle moléculaire, de celle d'« espèce », relative à une collection d'entités, généralement à l'échelle molaire. Une telle pratique étant très répandue, j'ai préféré garder le vocabulaire des auteurs, et, dans cet ouvrage, sachons que le mot espèce recouvre les deux significations.

Les auteurs utilisent fréquemment des symboles de grandeurs physiques qui se trouvent être différents de ceux le plus souvent adoptés en français, ces derniers étant généralement conformes à ceux officiellement recommandés. Dans ce cas, nous avons quelquefois préféré changer de notations. C'est ainsi, par exemple, que nous avons adopté les symboles maintenant classiques de l'UICPA du type $\Delta_r H$ (au lieu de ΔH_{rxn}) pour l'enthalpie de réactions et les autres grandeurs de réaction ou de changement d'état physique, et nous avons préféré le symbole U pour les tensions électriques (p. ex. U_{cell} pour une tension de cellule), c'est-à-dire une différence de potentiel, au lieu de E (p. ex. E_{cell}), du fait des risques de confusion entre les potentiels électriques individuels des électrodes, nommés E , et une différence de ces potentiels, aussi nommée E . Les principaux changements de symboles sont résumés dans le tableau suivant :

Grandeur	Symbole dans le texte original	Symbole dans la traduction
énergies de première et seconde ionisation	EA_1, EA_2	A_1, A_2
enthalpies, entropies et énergies de Gibbs de réaction, formation, fusion, vaporisation ; etc.	$\Delta H_{\text{rxn}}, \Delta G_{\text{rxn}}, \Delta S_{\text{rxn}}; \Delta H_f, \Delta G_f, \Delta S_f; \Delta H_m, \Delta G_m, \Delta S_m; \Delta G_{\text{vap}}, \Delta H_m, \Delta G_{\text{vap}}; \text{etc.}$	$\Delta_r H, \Delta_r G, \Delta_r S; \Delta_f H, \Delta_f G, \Delta_f S; \Delta_{\text{fus}} H, \Delta_{\text{fus}} G, \Delta_{\text{fus}} S; \Delta_{\text{vap}} H, \Delta_{\text{vap}} G, \Delta_{\text{vap}} S; \text{etc.}$
tension (ou différence de potentiel), tension de cellule	E, E_{cell}	U, U_{cell}
énergie électrique	U	E

Dans l'ensemble de l'ouvrage, il est fait référence à un certain nombre de textes de normalisation du vocabulaire de la chimie que nous avons souvent indiqués sous forme abrégée :

Gold Book Mc Naught, A.D. et Wilkinson, A. *Compendium of Chemical Terminology*, IUPAC Recommendations, 2nd ed., Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1997. Accessible gratuitement en ligne, <http://goldbook.iupac.org>.

Compendium : J.-C. Richer, *Compendium de Terminologie chimique*, IUPAC,

TEC & DOC - Lavoisier, Paris, 1994. *Traduction française du Gold Book*.

Green Book : E.R. Cohen, T. Cvitas, J.G. Frey, B. Holmström, K. Kuchitsu, R. Marquardt, I. Mills, F. Pavese, M. Quack, J. Stohner, H.L. Strauss, M. Takami, and A.J. Thor, « Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry », IUPAC Green Book, 3rd Edition, 2nd Printing, IUPAC & RSC Publishing, Cambridge (2008). Accessible en ligne : <http://media.iupac.org/publications/books/gbook/IUPAC-GB3-2ndPrinting-Online-22apr2011.pdf> (en cours de changement).

Grandeurs Unités et symboles de la Chimie Physique : R. Marquardt, M. Mottet, R. Rouquérol et J. Toullec, DeBoeck Supérieur, Bruxelles, Paris, 2012 (traduction du *Green Book*)

Brochure sur le SI : Le système international d'unités (SI), Bureau international des poids et mesures, Organisation intergouvernementale de la convention du mètre, 8^e éd., 2006, Sèvres, France. Téléchargeable gratuitement sur http://www.bipm.org/utls/common/pdf/si_brochure_8_fr.pdf

France Terme : Banque de données de la Délégation à la langue française et aux langues de France qui répertorie tous les termes publiés au *Journal officiel* par la Commission générale de terminologie et de néologie. <http://france-terme.culture.fr/FranceTerme>.

Je voudrais terminer cette préface en remerciant chaleureusement Paul Depovere de m'avoir permis de réaliser ce travail en me laissant toute liberté pour le mener à bien. C'est une attitude d'une grande élégance qui mérite d'être soulignée. Je voudrais aussi remercier vivement la Société DeBoeck, notamment Fabrice Chrétien (éditeur) et Florence Lemoine (éditeur-assistant), pour leur excellent travail d'édition. Cela fait maintenant plus de dix ans que je travaille en collaboration étroite avec les éditions DeBoeck et j'ai toujours été frappé par leur grand professionnalisme. Les éditions DeBoeck font beaucoup pour le maintien de la langue française dans le domaine scientifique, notamment à l'adresse des étudiants.

Jean Toullec



Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794) naquit à Paris dans une famille de la bourgeoisie aisée qui fut par la suite anoblie. De 1761 à 1763, il étudia le droit à l'université de Paris, où il devint bachelier en 1763, mais, en dépit du souhait de son père de le voir embrasser une carrière dans le domaine du droit, il choisit les sciences. Il fut élu membre de l'Académie des sciences dès l'âge de 27 ans. En 1771, il épousa Marie-Anne Paulze (1758-1836), fille d'un membre du Parlement et fermier général. Peu de temps après son mariage, elle apprit la chimie en autodidacte dans le but d'assister son mari dans son travail, mais elle fit bien davantage. Elle parlait couramment plusieurs langues et était capable de traduire en français les articles scientifiques publiés en d'autres langues, de sorte qu'elle était parfaitement au courant des recherches développées à l'étranger. Elle étudia aussi la peinture avec Jacques Louis David, peintre réputé, qui réalisa le portrait du couple présenté ci-dessus. Son aptitude à dessiner de façon détaillée l'équipement de laboratoire utilisé, en particulier dans le *Traité de chimie élémentaire* qu'Antoine-Laurent Lavoisier publia en 1789, permirent à leurs résultats d'être reproduits et vérifiés. En utilisant la balance la plus sensible disponible à cette époque, Lavoisier montra que les masses des réactifs et des produits sont identiques dans une réaction chimique, et donc découvrit la loi de conservation de la masse qui permit à la chimie de devenir une science quantitative. Il fut aussi le premier à montrer que la combustion est une réaction avec l'oxygène et, plus tard, de confirmer que l'eau n'est pas un élément mais qu'elle est composée d'hydrogène et d'oxygène. En raison de sa fonction de fermier général, agent collecteur des impôts, dont la charge était haïe par les révolutionnaires, Lavoisier fut dénoncé, arrêté et guillotiné avec 26 autres fermiers généraux le 8 mai 1794. Jean-Paul Marat, une figure clé de la révolution française avait développé une haine contre lui car il avait démontré que ce dernier était un piètre chimiste et critiqué son admission à l'Académie des Sciences. Bien qu'elle fut financièrement démunie à la mort de son mari, Marie-Anne Lavoisier veilla à ce que tous les manuscrits inachevés soient publiés et diffusés. Lavoisier est généralement perçu comme le père de la chimie moderne, mais, plus exactement, Antoine-Laurent et Marie-Anne Paulze-Lavoisier doivent être considérés ensemble comme les parents de cette chimie du fait de leur collaboration étroite. En 1804, Marie-Anne Lavoisier épousa en secondes noces le savant américain Benjamin Thompson, comte de Rumford, qui mourut 10 ans plus tard. Elle-même s'éteignit presque octogenaire en 1836.

I. Chimie et méthode scientifique

- I-1 L'étude de la chimie
- I-2 La méthode scientifique
- I-3 Mesures quantitatives
- I-4 Le système métrique
- I-5 Unités d'énergie
- I-6 Exactitude et pourcentage d'erreur
- I-7 Précision et chiffres significatifs
- I-8 Nombre de chiffres significatifs dans les calculs
- I-9 Analyse dimensionnelle
- I-10 Notation de Guggenheim

L'étudiant que vous êtes, au même titre qu'environ un million d'autres de par le monde, se trouve sur le point d'aborder un premier cours de chimie de niveau universitaire. La plupart d'entre vous n'ont pas fait le choix de devenir des chimistes professionnels : on peut estimer que seulement environ 1 % obtiendra un diplôme du type licence en chimie. Toutefois, quel que soit votre cursus, il est très probable que vous aurez besoin d'avoir une certaine connaissance de la chimie élémentaire.

Les chimistes font appel à la méthode scientifique pour décrire l'immense variété des substances que l'on trouve de par le monde, que ce soit un grain de sable ou l'un des nombreux constituants du corps humain. Comme vous le verrez, il leur est possible de suivre cette approche parce que la chimie est une science quantitative qui se base sur des mesures expérimentales et sur des calculs scientifiques. Vous devez donc vous efforcer, dès à présent, à bien comprendre la méthodologie employée par les scientifiques pour mesurer et calculer les grandeurs physiques. L'objectif de ce chapitre est de vous présenter ces notions de base.

I-1. Pourquoi étudier la chimie ?

La chimie est l'étude des propriétés de la matière et de la façon dont les espèces chimiques réagissent entre elles. L'univers dans tous ses aspects dépend de leur présence et de leurs réactions. En général, les nouvelles espèces qui se forment au cours des réactions présentent des propriétés très différentes de celles des réactifs qui leur ont donné naissance, propriétés que les chimistes sont capables de prévoir et de mettre à profit. Des centaines de substances que nous employons chaque jour, directement ou indirectement, sont des produits de la recherche en chimie (figure 1.1).

Les exemples de produits de grande utilité obtenus par des réactions chimiques sont innombrables. La mise au point de nouveaux engrais, qui représente l'un des principaux pôles d'intérêt de l'industrie chimique, a eu une profonde incidence sur la production agricole. L'industrie pharmaceutique présente également une importance considérable. Qui parmi nous n'a jamais été contraint de prendre un antibiotique pour soigner une infection ou un analgésique pour soulager la douleur due à des soins dentaires, à un accident ou à une intervention chirurgicale ? La médecine moderne, qui s'appuie fortement sur la chimie, a augmenté notre espérance de vie d'environ 18 ans depuis les années 1920. On a du mal à croire qu'il y a un siècle à peine une bonne part de la population mourrait à la suite d'infections aujourd'hui bénignes.

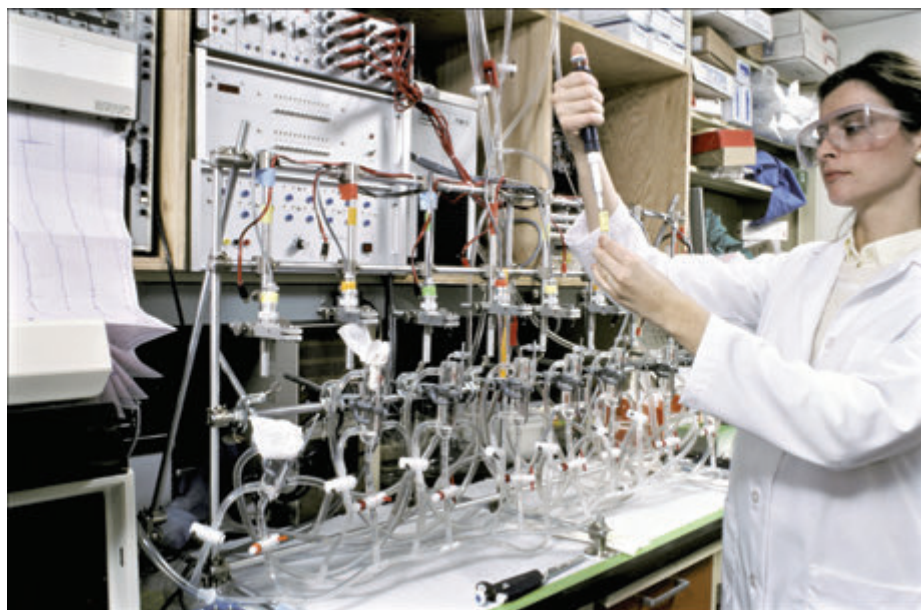


Figure I.1 Un laboratoire moderne de chimie.

Les produits chimiques qui nous sont peut-être les plus familiers sont les matières plastiques. Près de la moitié des chimistes travaillant dans l'industrie sont concernés par la recherche s'y rapportant ou par leur production. À eux seuls, les États-Unis produisent chaque année plus de 50 millions de tonnes de plastiques, dont 5 millions pour fabriquer des fibres synthétiques servant notamment à produire des draps, des vêtements, des sacs, des chaussures et autres textiles. On a ainsi une consommation annuelle d'environ 160 kg de plastiques et 16 kg de fibres synthétiques par personne. Des noms tels que nylon, polyéthylène, Formica, Saran, Téflon, Hollofil, Gore-Tex, polyester, PVC et silicone nous sont familiers, que ce soit dans nos maisons, comme tissu de nos vêtements ou dans nos activités quotidiennes. C'est également à la chimie que l'on doit les produits qui rendent possible notre vie de tous les jours, puces d'ordinateurs, papier, carburants, ciments, écrans à cristaux liquides, détergents, disques compacts, réfrigérants, piles, parfums, conservateurs, peinture, céramiques, cellules photovoltaïques, cosmétiques, pour ne citer que certains. Des métaux tels que l'acier et les alliages légers à base de titane et d'aluminium ont permis de construire les navires, les automobiles, les avions modernes et les satellites que nous connaissons.

La chimie est également nécessaire pour étudier et comprendre notre environnement. Malheureusement, un très grand nombre de personnes ont aujourd'hui un sentiment de peur à l'encontre des produits chimiques, dû en partie à l'héritage de nombreux pesticides, tels que le DDT, à la contamination des eaux et de l'air. Toutefois, une compréhension de ces problèmes et la recherche de leurs solutions reposent aussi sur l'étude de la chimie sous-jacente. Les emballages biodégradables, les piles à combustible utilisant l'hydrogène, les moquettes recyclables et les liquides réfrigérants ne provoquant pas la déplétion de l'ozone stratosphérique ne sont que quelques exemples de produits que la « chimie verte » développe actuellement.

Il est remarquable de constater que les produits chimiques sont tous élaborés à partir de 100 unités fondamentales différentes que l'on appelle les atomes. Selon la théorie atomique, les substances sont constituées d'atomes ou de groupes d'atomes liés entre eux sous forme d'entités appelées molécules et ions. Vous découvrirez la théorie atomique dans le chapitre 2, puis vous serez amenés à étudier les liaisons chimiques et les réactions chimiques ainsi qu'à effectuer les calculs que cela implique. Vous apprendrez à prévoir les réactions susceptibles de se produire, à quelle vitesse elles se dérouleront, quelles espèces

seront formées et quelles seront la structure de celles-ci, leurs propriétés et leur comportement. Vous apprendrez la chimie qui se trouve derrière les substances et les processus que nous venons de citer. Nous sommes certains que vous trouverez l'étude de la chimie à la fois intéressante et plaisante.

I-2. La chimie est une science expérimentale

La chimie est une science expérimentale qui se fonde sur la méthode scientifique. La **méthode scientifique** consiste essentiellement à trouver une réponse aux questions scientifiques grâce à des expériences soigneusement planifiées et exécutées (figure 1.2).

Pour suivre cette méthode, nous devons en premier lieu définir notre objectif. Ensuite, nous devons récolter des informations ou des données concernant le problème posé. Les données rassemblées seront de deux types, des **données qualitatives**, sous forme d'informations de nature descriptive, et des **données quantitatives** qui consistent en des nombres issus d'opérations de mesure. Si nous recueillons suffisamment de données concernant notre problème, nous serons alors à même de formuler une hypothèse. Une **hypothèse** est une proposition qui est avancée comme étant l'explication – ou la prévision – possible d'une observation ou d'un phénomène. Lorsque les hypothèses sont corroborées par un nombre suffisant d'observations expérimentales réalisées dans des conditions très diverses, il est alors possible d'élaborer des théories scientifiques.

Pour éprouver une hypothèse, on réalise des expériences. Si celles-ci viennent corroborer l'hypothèse, on poursuit l'expérimentation afin d'examiner si les résultats sont reproductibles. On souhaite en particulier vérifier la validité de l'hypothèse dans diverses situations expérimentales. Après de nombreuses expériences, un modèle peut se dégager sous la forme d'une relation constante entre des phénomènes intervenant dans les mêmes conditions expérimentales. Une formulation concise de cette relation est appelée **loi de la nature** ou **loi scientifique**. Il faut souligner qu'une loi exprime cette relation mais qu'elle ne l'explique pas.



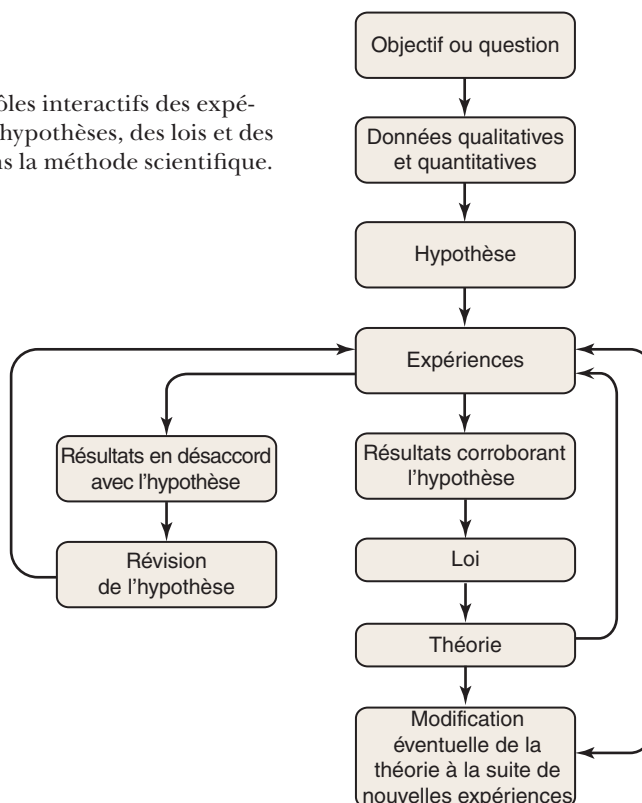
Figure 1.2 La chimie est fondée sur l'expérience. Des expériences soigneusement préparées sont constamment fascinantes, excitantes et motivantes.

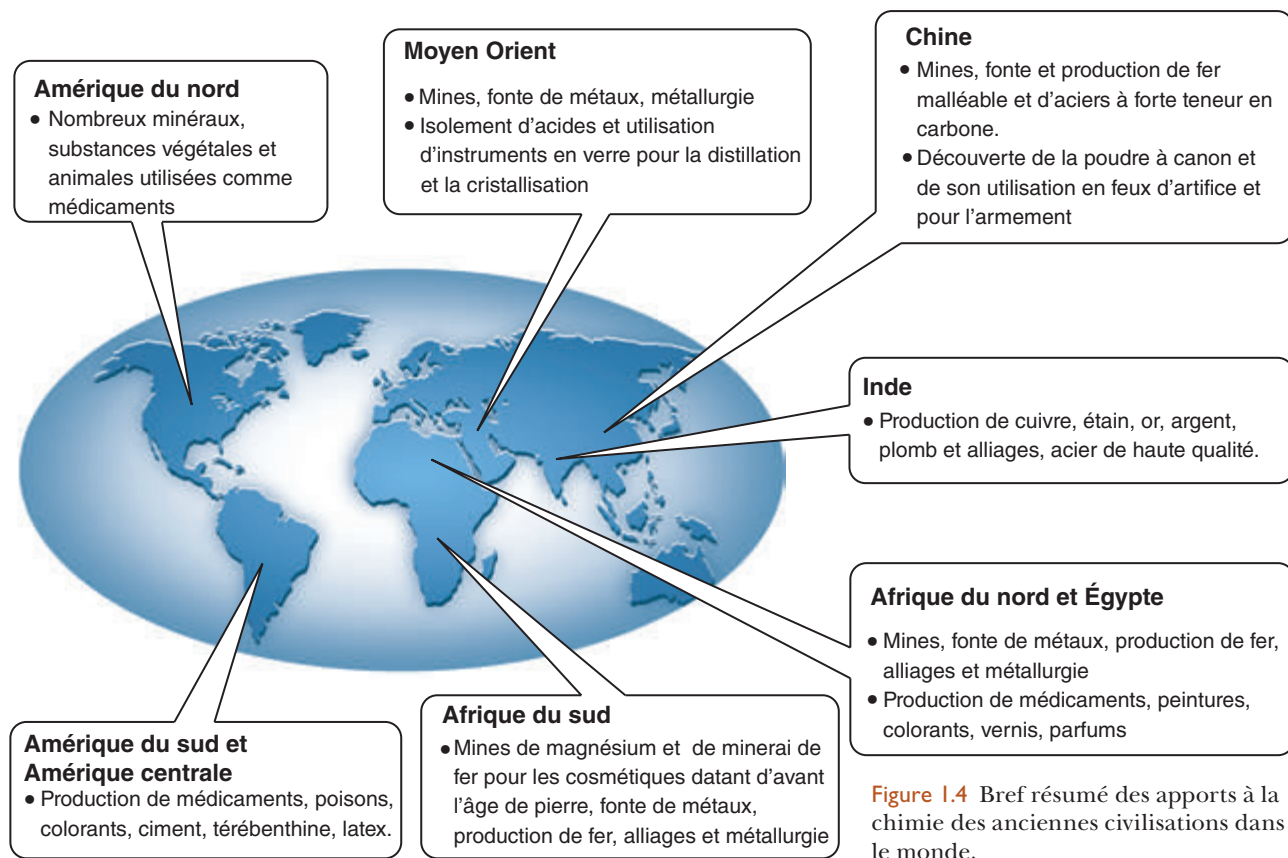
Dès l'instant où une loi a été formulée, les scientifiques tentent de mettre en place une **théorie**, c'est-à-dire un principe unificateur qui donne une explication de la loi issue des observations expérimentales. Finalement, la théorie elle-même sera éprouvée, à la suite de quoi il arrive qu'elle soit modifiée, voire rejetée. La chimie fait constamment appel à la méthode scientifique. Lorsque nous étudierons la théorie atomique dans le chapitre 2, nous verrons comment les résultats d'une somme considérable d'expériences ont abouti à la découverte de plusieurs lois importantes, qui, à leur tour, furent expliquées harmonieusement par une théorie atomique unificatrice de la matière.

Il est important de prendre conscience qu'aucune théorie ne peut être prouvée par l'expérience. Les résultats expérimentaux peuvent venir la conforter, mais, quel que soit le nombre d'expériences donnant des résultats en accord avec la théorie, il reste toujours possible que d'autres viennent l'infirmier. C'est la raison pour laquelle il est plus important de concevoir des expériences pour réfuter une hypothèse ou une théorie, plutôt que celles qui se bornent simplement à les corroborer. Les rôles respectifs des expériences, des hypothèses, des lois et des théories dans la méthode scientifique sont présentés dans la figure 1.3.

Comme la figure 1.3 le montre, les théories scientifiques sont sujettes à des révisions perpétuelles. Par exemple, la théorie que le Soleil tourne autour de la Terre a été remplacée par la théorie que la Terre tourne sur son orbite autour de Soleil, puis, plus tard, par celle dans laquelle chacune tourne sur une orbite centrée sur leur centre de gravité commun. Plus tard, encore, cette théorie a été remplacée par celle proposée par Albert Einstein en faisant intervenir conjointement l'espace et le temps. La plupart des théories en usage ont des limites bien connues. Une théorie imparfaite reste toutefois souvent utile, même si on ne peut pas se fier totalement à ses prévisions. Ainsi, par exemple, une théorie qui prévoit correctement le bon résultat dans 90 % des cas s'avère très précieuse. Étant donné que les théories scientifiques permettent de réunir les diverses idées en un tout cohérent, on ne les abandonne généralement pas, même si elles présentent des imperfections, tant qu'une meilleure théorie n'est pas élaborée.

Figure 1.3 Rôles interactifs des expériences, des hypothèses, des lois et des théories dans la méthode scientifique.





I-3. La chimie moderne repose sur des mesures quantitatives

Bien que plusieurs peuples dans le monde aient pratiqué des formes rudimentaires de la chimie et soient à l'origine de nombreuses découvertes technologiques importantes (figure 1.4), la chimie ne commença réellement à se développer en tant que science – au sens moderne du mot – qu'au XVIII^e siècle. Les sciences physiques modernes s'appuient délibérément sur des **mesures quantitatives**, à savoir des mesures par lesquelles le résultat est exprimé par un nombre. Ainsi, par exemple, le fait de déterminer que la masse de 1,00 centimètre cube (cm³) d'or est de 19,3 grammes (g) et que 1,25 g de calcium réagit avec 1,00 g de soufre revient à exprimer les résultats de mesures quantitatives. Par des **observations qualitatives**, au contraire, on cherche à déterminer les caractéristiques générales, telles que la couleur, l'odeur, le goût, de même que la tendance à réagir chimiquement en présence d'autres substances. Dire que le plomb est bien plus dense que l'aluminium est un exemple de formulation qualitative. Comme on le verra plus loin dans ce chapitre, la déclaration quantitative qui y correspond est que la masse de 1,00 cm³ de plomb est égale à 11,3 g, tandis que celle d'aluminium est de 2,70 g.

Le scientifique français Antoine Lavoisier (frontispice) fut le premier chimiste qui comprit pleinement l'importance qu'il y avait à effectuer des mesures quantitatives au sens actuel du terme. Lavoisier conçut des balances spéciales qui étaient bien plus précises que celles de ses prédécesseurs et grâce auxquelles il établit la **loi de la conservation de la masse** : lors d'une réaction chimique, la masse totale des réactifs est égale à la masse totale des produits formés. Autrement dit, grâce à des mesures quantitatives méticuleuses, Lavoisier put démontrer que la masse se conserve au cours des réactions chimiques. On ne mettra jamais assez en exergue l'influence de Lavoisier sur le développement de la chimie en tant que science moderne. Il publia en 1789 son *Traité élémentaire de chimie* (figure 1.5), dans lequel il présenta de façon cohérente l'état des

Le mot français actuel de *chimie* et le mot arabe *alchimie* viennent du mot grec *chemeia* qui se rapporte au travail des métaux et à la transmutation, la croyance que les métaux ordinaires peuvent être transformés en or. Quant au mot grec *chemeia*, on a voulu y voir le nom de l'ancienne Égypte (*pays de Cham*), en l'honneur des égyptiens pour leur technique du travail des métaux et les premières théories de la transmutation. Toutefois, certains érudits pensent que *chemeia* est d'origine chinoise et dérivé des mots *kim mi* en dialecte du sud, qui signifie « le secret de l'or ».



Figure I.5 Page de titre du traité de chimie de Lavoisier.

connaissances de la chimie à cette époque. Cet ouvrage fut traduit en plusieurs langues et le premier traité de chimie fondé sur des expériences quantitatives.

Dans le présent ouvrage, nous utiliserons fréquemment l'**écriture scientifique** des nombres. C'est l'expression d'un nombre sous forme d'un nombre multiplié par une puissance de 10. Par exemple, un grand nombre tel que 6 000 000 peut s'écrire par 6×10^6 , car $10^6 = 1\,000\,000$, et

$$6 \times 10^6 = 6 \times 1\,000\,000 = 6\,000\,000$$

De même, le nombre $1,626 \times 10^{-9}$ est équivalent à

$$1,626 \times 10^{-9} = 1,626 \times 0,000\,000\,001 = 0,000\,000\,001\,626$$

Il est plus pratique d'exprimer ces nombres sous forme de puissances de 10 qu'en adoptant l'écriture décimale habituelle.

Pour réussir dans vos études de chimie, il importe que vous deveniez un expert de l'emploi et de la manipulation des nombres en écriture scientifique. Une étude plus complète de la manipulation des nombres en écriture scientifique est présentée dans l'annexe A.

EXEMPLE I-1 : Écrire les nombres a) 24 000 et b) 0,000 000 572 en écriture scientifique.

Solution : a) Le nombre 24 000 comporte quatre puissances de 10 au-delà du premier chiffre.

$$\begin{array}{c} 24\,000 \\ \underbrace{}_{1\,2\,3\,4} \end{array}$$

De ce fait, le nombre peut s'écrire sous la forme

$$2,4 \times 10\,000 = 2,4 \times 10^4$$

en écriture scientifique.

b) En comptant en arrière, à partir du 5, le nombre 0,000 000 572, on compte sept puissances de 10 entre le 5 et le séparateur décimal.

$$\begin{array}{c} 0,000\,000\,572 \\ \underbrace{}_{7\,6\,5\,4\,3\,2\,1} \end{array}$$

Puisque la virgule est à gauche du 5, ce nombre s'écrit sous la forme $5,72 \times 10^{-7}$ en écriture scientifique.

PROBLÈME D'APPLICATION I-1 : Effectuer l'addition $2,26 \times 10^{-5} + 1,7201 \times 10^{-3}$. Donner le résultat en écriture scientifique.

Réponse : $1,7427 \times 10^{-3}$

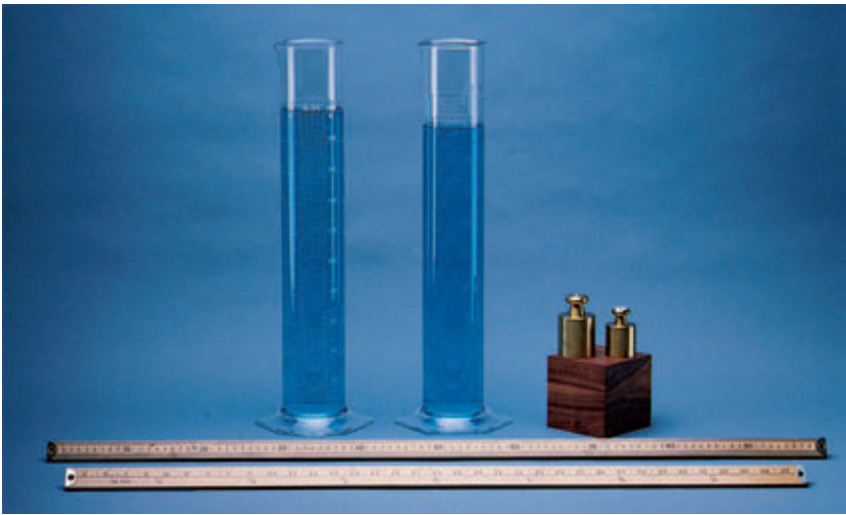


Figure 1.6 Comparaison entre l'éta-
lon du mètre et celui du yard (l'éta-
lon du mètre est à peu près 10 % plus
long que celui du yard) ; comparaison
entre un litre et un quart de gallon US
(ce dernier volume est inférieur à celui
du litre et vaut 0,946 L) ; comparai-
son entre un kilogramme et une livre
(sur Terre, la masse d'un kilogramme
est environ 2,2 fois plus grande que la
masse d'une livre).

I-4. Unités et étalons dans les travaux scientifiques : Le système métrique

À la suite de tout nombre qui exprime le résultat d'une mesure, il est indispen-
sable d'indiquer les unités de la mesure. Si l'on mesure, par exemple, le dia-
mètre d'un fil de cuivre et que l'on trouve 1,35 millimètres (mm), on exprimera
le résultat en écrivant 1,35 mm. Dire que le diamètre du fil de cuivre est de 1,35
n'aurait aucun sens.

Dans les travaux scientifiques, le système d'unités recommandé est le **sys-
tème métrique**. Celui-ci comprend divers ensembles d'unités, mais, depuis
quelques années, on exprime toutes les mesures en utilisant un seul ensemble
d'unités métriques appelées **unités SI** (unités du système international). La plu-
part des unités de base du SI sont données dans le tableau 1.1.

L'unité SI de base de la **longueur** est le **mètre** (m). Avant l'apparition des uni-
tés SI en 1960, le mètre était défini comme la longueur d'une barre de platine
iridié, déposée au Bureau international des poids et mesure à Sèvres (BIPM),
près de Paris. Cet étalon du mètre n'est toutefois pas assez précis pour les tra-
vaux scientifiques modernes, à cause essentiellement des variations de sa lon-
gueur avec la température. La définition du mètre dans le système international
est actuellement donnée à partir de la vitesse de la lumière dans le vide (voir
l'annexe B), une constante physique fondamentale qui n'est pas sensible à la
température et qui n'est pas tributaire d'un objet susceptible d'être perdu ou
de subir de dommages mécaniques. Un mètre est équivalent à 1,094 yards et est
environ 10 % plus long (figure 1.6).

TABLEAU 1.1 Unités de base du SI

Grandeur mesurée	Unité de mesure	Symbole
longueur	mètre	m
masse	kilogramme	kg
température	kelvin	K
temps	seconde	s
quantité de matière	mole	mol



Figure 1.7 Panneau de signalisation routière indiquant les distances en miles et en kilomètres.

Le SI des unités utilise des préfixes qui désignent des multiples ou des sous-multiples décimaux des unités SI. Ainsi, par exemple, 1000 mètres sont dénommés un **kilomètre** (km), lequel correspond à 0,621 miles. C'est l'unité qui sert dans la plupart des pays du monde à exprimer les distances entre localités sur les cartes et sur les panneaux routiers (figure 1.7). Un **centimètre** (cm) est le centième d'un mètre (un pouce correspond à 2,54 cm). Les préfixes les plus couramment utilisés dans le SI sont répertoriés dans le tableau 1.2 (un tableau plus complet est donné dans l'annexe B). Certains de ces préfixes, kilo- (kilogramme et kilomètre), centi- (centimètre), milli- (millilitre et millimètre), méga- (méga-byte et mégatonne) et giga- (gigabyte) sont utilisés journellement. Nous verrons plus tard que les deux préfixes pico- et atto- sont couramment employés pour donner les dimensions des molécules et leur énergie.

EXEMPLE I-2 : À l'aide des préfixes du tableau 1.2, expliquer ce que l'on entend par a) une microseconde, b) un milligramme et c) 100 picomètres.

Solution : a) Le tableau 1.2 indique que le préfixe micro- signifie 10^{-6} , de sorte qu'une microseconde (μs) vaut 10^{-6} seconde, c'est-à-dire un millionième ($1/1\,000\,000$) de seconde. Des événements qui se déroulent pendant quelques microsecondes sont monnaie courante dans des expériences scientifiques. b) Le préfixe milli- signifie 10^{-3} , de sorte qu'un milligramme vaut un millième ($1/1000$) de gramme. c) Le préfixe pico- signifie 10^{-12} , si bien qu'un picomètre vaut 10^{-12} mètre ou un millionième de millionième de mètre (10^{-12} est égal à $10^{-6} \times 10^{-6}$ et 10^{-6} est un millionième). Dès lors, 100 picomètres, ou 100 pm, sont égaux à 100×10^{-12} mètre ou $1,00 \times 10^{-10}$ mètre. Nous verrons que le picomètre est une unité de longueur appropriée quand on donne les dimensions des atomes ou des molécules.

PROBLÈME D'APPLICATION I-2 : Que veut dire a) 400 nm et b) 20 ps ?

Solution : a) $4,00 \times 10^{-7}$ m ; b) $2,0 \times 10^{-11}$ s.

TABEAU 1.2 Préfixes courants utilisés dans le SI*

Préfixe	Symbole	Multiple ou sous-multiple	Exemple*
giga-	G	10^9 ou 1 000 000 000	1 gigajoule, 1 GJ = 1×10^9 joules
méga-	M	10^6 ou 1 000 000	1 mégajoule, 1 MJ = 1×10^6 joules
kilo-	k	10^3 ou 1000	1 kilomètre, 1 km = 1×10^3 mètres
centi-	c	10^{-2} ou 1/100	1 centimètre, 1 cm = 1×10^{-2} mètre
milli-	m	10^{-3} ou 1/1000	1 millilitre, 1 mL = 1×10^{-3} litre
micro-	μ	10^{-6} ou 1/1 000 000	1 microlitre, 1 μL = 1×10^{-6} litre
nano-	n	10^{-9} ou 1/1 000 000 000	1 nanomètre, 1 nm = 1×10^{-9} mètre
pico-	p	10^{-12} ou 1/1 000 000 000 000	1 picomètre, 1 pm = 1×10^{-12} mètre
femto-	f	10^{-15} ou 1/1 000 000 000 000 000	1 femtoseconde, 1 fs = 1×10^{-15} seconde
atto-	a	10^{-18} ou 1/1 000 000 000 000 000 000	1 attojoule, 1 aJ = 1×10^{-18} joule

* Le joule et le litre sont définis plus loin dans ce chapitre

L'unité de **volume**, celui-ci étant désigné par le symbole V , est dérivée du mètre, l'unité de base de la longueur dans le SI. Un mètre cube (1 m^3) est le volume d'un cube dont les arêtes sont de 1 m. Au laboratoire, toutefois, il est plus aisé d'exprimer les volumes en litres. Un **litre** (1 L ou 1 l) est égal au volume d'un cube dont les arêtes ont une longueur de 10 cm, c'est-à-dire le dixième d'un mètre (figure 1.8). Le volume d'un cube est égal au cube de la longueur d'une arête dudit cube ; soit :

$$1 \text{ L} = (10 \text{ cm})^3 = 1000 \text{ cm}^3$$

Un **millilitre**, 1 mL, est le millièmes (1/1 000) d'un litre ; autrement dit, il y a 1000 mL dans 1 L. Étant donné que 1000 mL ou 1000 cm^3 valent tous deux 1 L, on en conclut que $1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3$, ou encore, qu'un millilitre (1 mL) est égal à un **centimètre cube** (1 cm^3). Un litre est égal à 1,057 quart de gallon US, de sorte que le volume du litre lui est supérieur de 5,7 % (figure 1.6). Le gallon US (c'est-à-dire quatre quarts) correspond à 3,785 L.

L'unité SI de la masse est le **kilogramme**. Le kilogramme étalon est la masse d'un cylindre en alliage de platine et d'iridium, conservé au Bureau international des poids et mesures à Sèvres (France). C'est la seule unité SI de base qui soit encore définie par un objet fabriqué. Un kilogramme est égal à 1000 **grammes** ($1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$).

Au laboratoire, on détermine la masse d'un objet en contrebalançant son poids par le poids d'un ensemble de masses de référence (figure 1.9). Les valeurs des masses de référence ont été établies par comparaison avec le kilogramme étalon.

Étant donné qu'une masse est déterminée par comparaison avec des masses de référence (les poids), les termes *masse* et *poids* sont souvent employés l'un pour l'autre (par exemple, on dira « l'échantillon pèse 28 grammes »). Ces termes ne veulent cependant pas dire la même chose. La **masse** d'un objet caractérise l'inertie de l'objet, c'est-à-dire la résistance à être déplacé. Le **poids** d'un objet est égal à la force d'attraction par un très grand objet tel que la Terre ou la lune. Sur la lune, un objet pèse environ un sixième de son poids sur Terre, alors que la masse de l'objet reste inchangée. Afin d'éviter des ambiguïtés de cette sorte, nous emploierons généralement le terme *masse* au lieu de *poids* dans cet ouvrage. Une masse de 1 kg pèse 2,205 livres sur Terre ; dès lors, 1 livre équivaut à 453,6 grammes (figure 1.6).

Dans une balance moderne d'analyse (en haut de la figure 1.9), les masses de référence sont situées dans la partie cachée de l'appareil et actionnées par un jeu interne de leviers mobiles. Le principe de l'opération est le même que pour la balance à plateaux Roberval (milieu de la figure 1.9), mis à part le fait que la position d'équilibre soit détectée optiquement grâce à un faisceau lumineux, au lieu d'être observée à l'œil nu. Une balance électronique (ou digitale) (en bas de la figure 1.9), utilise un cristal piézoélectrique pour mesurer la masse. Les balances électroniques que l'on trouve dans la plupart des laboratoires de chimie générale n'ont qu'une précision de $\pm 1 \text{ mg}$ environ. Pour des mesures plus précises, on doit utiliser une balance d'analyse.

La **température** est une grandeur qui caractérise quantitativement la tendance d'un objet à perdre de la chaleur. Plus est élevée la température de l'objet, plus est grande sa tendance à perdre de la chaleur. Quand nous disons que de l'eau est « chaude », cela veut dire que de la chaleur est transmise facilement de l'eau à votre doigt, celui-ci étant à une température plus basse que l'eau. Quand l'eau est « froide », il y a un flux de chaleur du doigt à l'eau, dont la température est, cette fois, inférieure à celle du doigt. Les **échelles de température** sont définies en attribuant des températures à deux systèmes de référence. Ainsi, par exemple, on peut concevoir une échelle de température en attribuant une température exactement égale à 0 degré au point de congélation de l'eau et à exactement 100 degrés à son point d'ébullition sous 1,00 atmosphère (c'est-à-

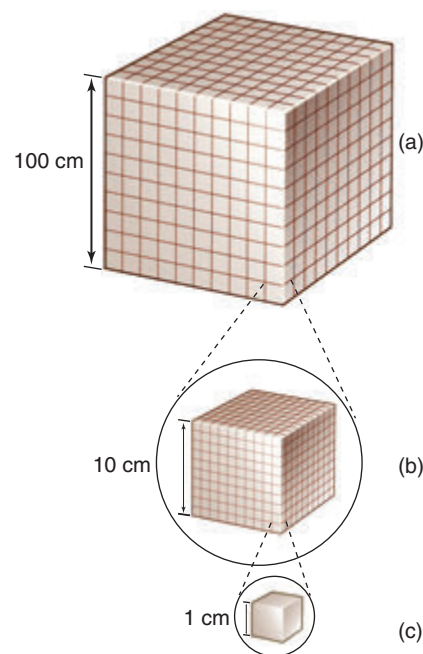


Figure 1.8 (a) Chaque arête d'un cube d'un mètre cube (1 m^3) a une longueur de 100 cm. Un mètre cube contient 1000 L. (b) Chaque arête d'un cube de 1 L a une longueur de 10 cm. Un litre contient 1 000 mL. (c) Chaque arête d'un cube d'un millilitre a une longueur de 1 cm. Un millilitre est donc équivalent en volume à un centimètre cube ($1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3$).

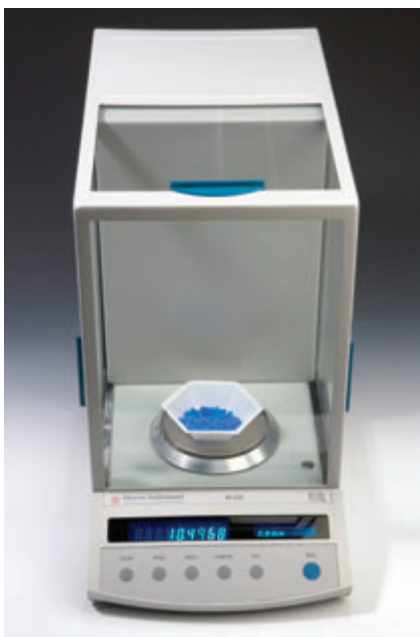


Figure 1.9 (en haut) Balance automatique d'analyse ; (au milieu) balance Roberval et (en bas) balance électronique de laboratoire. La balance Roberval nécessite que l'on place des masses de référence dans un des plateaux et, dans l'autre, l'échantillon à peser.

dire la pression de l'air au niveau de la mer par temps clair). Nous étudierons la pression de façon plus complète dans le Chapitre 13.

Un **thermomètre** est un instrument qui sert à mesurer la température. Il contient une substance dont les propriétés varient d'une manière reproductible en fonction de la température. L'une de ces propriétés peut être le volume d'une certaine quantité d'un liquide, par exemple du mercure. Le volume d'une petite quantité de mercure augmentant avec la température par dilatation, il peut être utilisé pour le mesurer. Par exemple, lorsque le mercure est contenu dans un réservoir surmonté d'un tube fin, et en se servant de l'échelle de température définie plus haut, on marque sur la tige de verre la position du haut de la colonne de mercure quand le thermomètre est plongé dans un mélange d'eau et de glace ; cette position est notée 0,0. Ensuite, on inscrit 100,0 au niveau de la position supérieure de la colonne de mercure quand le thermomètre est plongé dans de l'eau à l'ébullition sous une pression d'une atmosphère normale. Ces deux points sont des points de référence, et l'échelle est construite en graduant linéairement la hauteur de colonne entre ces deux points.

Nous étudierons la température de façon plus complète dans le chapitre 13. Il nous suffit pour l'instant de savoir que trois échelles de température, différentes mais liées entre elles, sont couramment employées : l'échelle de température Celsius, l'échelle de température Fahrenheit et l'échelle de température Kelvin.

L'échelle de température dont l'intérêt est le plus fondamental est l'**échelle de température Kelvin** qui permet de définir l'unité SI de température, appelée **kelvin** (K). La température la plus basse possible sur l'échelle Kelvin est le zéro kelvin (0 K), qui, comme l'apprendrons plus tard, est la plus basse température pouvant être atteinte par n'importe quelle substance. Notons qu'aucun signe n'est ici indiqué et que toutes les températures sur l'échelle Kelvin sont positives. L'**échelle de température Celsius** (°C), désignée par t , et autrefois appelée « échelle de température centigrade », est reliée à l'échelle de température Kelvin (désignée par T) par l'équation

$$T \text{ (en K)} = t \text{ (en } ^\circ\text{C)} + 273,15 \quad (1.1)$$

Ainsi, une température Kelvin de 373,15 K correspond à $373,15 - 273,15 = 100,00$ °C (cf. figure 1.10). Un degré sur l'échelle de température Celsius correspond au même intervalle de température qu'un degré sur l'échelle de température Kelvin. Les deux échelles diffèrent uniquement par la position de leur point zéro.

L'**échelle de température Fahrenheit** (°F) est une échelle de température anglo-saxonne dans laquelle la température du mélange eau-glace est posée égale à 32 °F et la température d'ébullition de l'eau à 212 °F. L'échelle de température Celsius est corrélée à l'échelle de température Fahrenheit par l'équation

$$t \text{ (en } ^\circ\text{C)} = (5/9) [t \text{ (en } ^\circ\text{F)} - 32,0] \quad (1.2)$$

Notons que $t \text{ (en } ^\circ\text{C)} = 0$ °C quand $t \text{ (en } ^\circ\text{F)} = 32$ °F et que $t \text{ (en } ^\circ\text{C)} = 100$ °C quand $t \text{ (en } ^\circ\text{F)} = 212$ °F. D'après l'équation 1.2, on voit que la température Fahrenheit de 98,6 °F (température corporelle normale) correspond à une température Celsius de

$$t = (5/9) (98,6 - 32,0) ^\circ\text{C} = 37,0 ^\circ\text{C}$$

et à une température Kelvin de

$$T = (273,15 + 37,0) \text{ K} = 310,2 \text{ K}$$

EXEMPLE I-3 : Établir l'équation 1.2 en considérant les informations de la figure 1.10

Solution : On remarque tout d'abord que sur l'échelle Celsius il y a 100 °C d'écart entre les points d'ébullition de l'eau et de fusion de la glace. Sur l'échelle de Farenheit, ces deux points sont séparés de 180 °F (212 °F – 32 °F). Donc, un degré Farenheit vaut le cinq neuvièmes (100 °C/180 °F = 5 °C/9 °F) d'un degré Celsius. Il ressort aussi que 0 °C correspond à 32 °F. Quand on passe de l'échelle Farenheit à l'échelle Celsius, le point zéro est donc décalé de $(5/9) \times 32$ degrés. La combinaison de ces résultats aboutit à :

$$t \text{ (en } ^\circ\text{C)} = (5/9) t \text{ (en } ^\circ\text{F)} - (5/9)(32,0 ^\circ\text{F)}$$

ou

$$t \text{ (en } ^\circ\text{C)} = (5/9)[t \text{ (en } ^\circ\text{F)} - 32,0 ^\circ\text{F}]$$

PROBLÈME D'APPLICATION I-3 : a) Convertir –90 °F en degrés Celsius et en kelvins. b) À quelle valeur la température sur l'échelle Farenheit coïncide-t-elle numériquement avec celle sur l'échelle Celsius ?

Réponse : a) –68 °C, 205 K ; b) –40 °C = –40 °F.

La masse volumique est un exemple de grandeur exprimée en **unités dérivées** puisque ces dernières impliquent à la fois une unité de masse et une unité de volume. La **masse volumique**¹, ρ , d'une substance est la masse de celle-ci par unité de volume, soit :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.3)$$

Pour connaître la masse volumique d'une substance, il suffit de déterminer le volume d'une masse connue de cette substance puis d'appliquer l'équation 1.3.

Le concept de masse volumique conduit à comparer les masses de volumes identiques² de substances. Le plaisantin qui demande : « qu'est ce qui est plus lourd, un kilogramme de plomb ou un kilogramme de plumes ? » joue sur notre conception intuitive de la notion de masse volumique. Lorsque nous disons qu'une substance est lourde ou légère, nous pensons bel et bien que sa masse volumique est forte ou faible.

L'équation 1.3 indique que les **dimensions** de la masse volumique sont celles d'une masse par unité de volume, lesquelles peuvent être exprimées en différentes unités. Si l'on exprime la masse en grammes et le volume en centimètres cubes, il s'ensuivra que les unités de la masse volumique seront des grammes par centimètre cube. Ainsi, par exemple, la masse volumique de la glace est de 0,92 g/cm³, où la barre oblique signifie « divisé par ». Autrement dit, 0,92 g de glace occupe un volume de 1 cm³ (l'unité de volume dans le cas présent).

Nous savons qu'en algèbre $1/a^n = a^{-n}$, où n est un exposant. Dès lors, $1/\text{cm}^3 = \text{cm}^{-3}$, et l'on peut exprimer la masse volumique en g · cm⁻³ aussi bien qu'en g/cm³. L'emploi de points centrés entre les unités de base et séparés par des intervalles est conforme aux recommandations du SI (*Brochure sur le SI*, p. 41)(voir aussi l'annexe B). Par exemple, m · s désigne l'unité mètre · seconde, tandis que ms (sans le point et sans les intervalles) signifie « milliseconde »³.

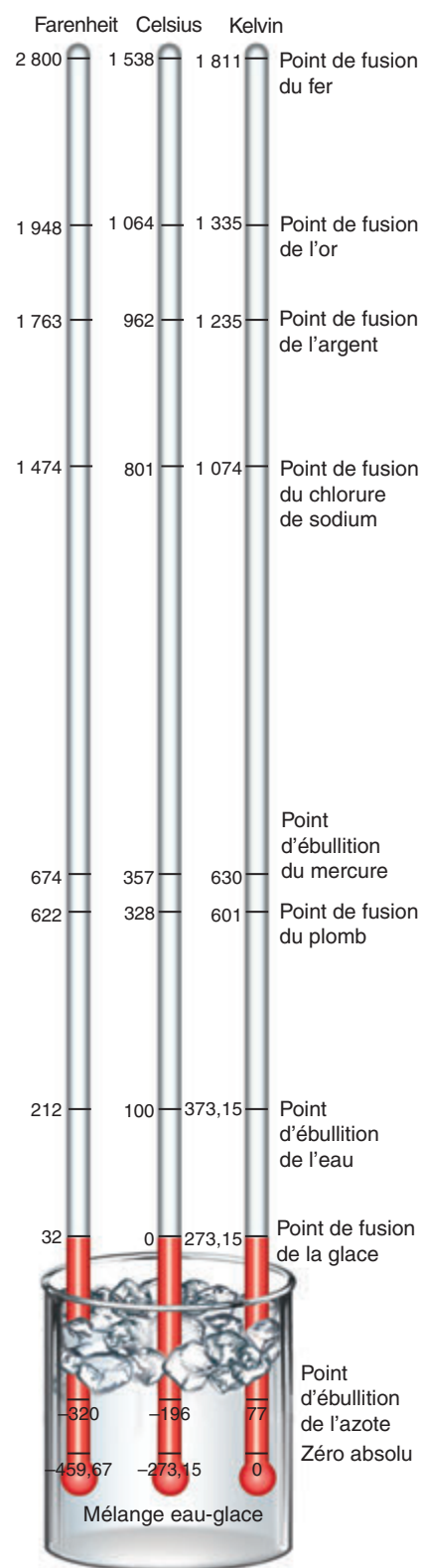


Figure 1.10 Comparaison des échelles de température Farenheit, Celsius et Kelvin.

1 N.d.t. : À ne pas confondre avec la densité, qui est (en français) un nombre sans dimension, exprimant le rapport de la masse d'un certain volume d'un corps à celle du même volume d'eau à 4 °C.

2 N.d.t. : On se sert, à cet effet, d'un pycnomètre.

3 N.d.t. : Le Bureau international des poids et mesures (BIPM, *Brochure sur le SI*) n'indique pas la nécessité d'introduire un point entre les unités de base. En l'absence de point, un espace est nécessaire (par exemple, g cm⁻³). Les auteurs de la version originale de cet ouvrage utilisent un point à mi-hauteur entre les unités de base mais n'introduisent pas d'espace de part et d'autre du point, c'est-à-dire, par exemple, g·cm⁻³. En règle générale, nous utiliserons la forme complète g · cm⁻³, qui est la forme la plus fréquente en français et, à notre avis, la plus claire. Le BIPM (*Brochure sur le SI*) utilise aussi la forme g/cm³. Nous l'utiliserons aussi quelquefois.

On utilise souvent un indice pour représenter une grandeur en un instant particulier ou dans des conditions particulières. Par exemple, v_{15} peut désigner la vitesse après 15 secondes ; T_a peut représenter la température d'une substance a, etc. On utilise généralement l'indice zéro ou i pour indiquer qu'il s'agit de conditions initiales ou de départ. Par exemple, t_0 désigne le temps de départ. De la même façon, on utilise souvent l'indice f pour désigner l'état final d'un système. Tout au long de cet ouvrage, nous aurons l'occasion de définir d'autres symboles, chaque fois que nous les rencontrerons.

EXEMPLE I-4 : Calculer la masse volumique de l'or, sachant que, à 20 °C, 5,00 cm³ d'or ont une masse de 96,5 g.

Solution : À partir de l'équation 1.3, on trouve :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{96,5 \text{ g}}{5,00 \text{ cm}^3} = 19,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

Comme toujours, les réponses numériques doivent être accompagnées d'unités, dans le cas présent des g · cm⁻³. Une réponse du type « la masse volumique est égale à 19,3 » n'a pas de sens, car il n'est pas clair qu'elle se rapporte à 19,3 g · cm⁻³, à 19,3 g · L⁻¹, ou à 19,3 lb · ft⁻³, ou encore à toute combinaison d'unités exprimant une masse volumique.

PROBLÈME D'APPLICATION I-4 : Le mercure est le seul métal qui est liquide à 25 °C. Sachant que 1,667 mL de mercure possède une masse de 22,60 g à 25 °C, calculer la masse volumique du mercure en g · mL⁻¹ et en g · cm⁻³.

Réponse : 13,53 g · mL⁻¹ = 13,53 g · cm⁻³

La masse volumique d'une substance dépend de la température. Puisque le volume d'une masse donnée d'un corps quelconque augmente généralement avec la température, la masse volumique de la plupart des substances décroît lorsque la température augmente. Par exemple, puisque un échantillon de 10,0 g de mercure occupe un volume de 0,735 mL à 0 °C et 0,749 mL à 100 °C, les masses volumiques sont les suivantes :

$$\rho = \frac{10,0 \text{ g}}{0,735 \text{ mL}} = 13,6 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1} \quad (0^\circ \text{C})$$

$$\rho = \frac{10,0 \text{ g}}{0,749 \text{ mL}} = 13,4 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1} \quad (100^\circ \text{C})$$

La masse volumique et la température sont des exemples de **propriétés intensives** d'une substance, c'est-à-dire des grandeurs dont les valeurs sont indépendantes de la quantité de matière dans l'échantillon. Par exemple, la masse volumique de l'or est de 19,3 g · cm⁻³ à 20 °C, que l'échantillon d'or soit de 5,00 g ou de 5,00 kg. Au contraire des propriétés intensives, les **propriétés extensives** sont directement proportionnelles à la quantité de matière. Ainsi, la masse et le volume sont tous deux des propriétés extensives. Si l'on double la quantité de matière, on double aussi la masse et le volume, mais la masse volumique reste inchangée (à une température donnée).

I-5. L'unité SI d'énergie est le joule

Jusqu'à présent, nous avons introduit les unités SI (ou unités métriques) de longueur, de volume, de masse et de température. L'énergie jouant un rôle central en chimie, cette section sera consacrée à une brève introduction du concept d'énergie et de ses unités.

L'énergie peut être définie comme l'aptitude à provoquer un changement dans un système, tels que la compression d'un gaz dans un cylindre, l'augmentation de la température d'un corps ou le mouvement d'une masse. Il est utile de distinguer dès à présent deux formes de l'énergie, d'une part l'énergie associée à un objet en mouvement, appelée **énergie cinétique**, et d'autre part l'énergie liée à la position relative de cet objet par rapport à un point de référence, l'**énergie potentielle**.

L'énergie cinétique d'un objet est définie par l'équation

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.4)$$

où E_c est l'énergie cinétique, m la masse de l'objet et v sa vitesse. En unités SI, la masse est donnée en kilogrammes et la vitesse en mètres par seconde, ce qui donne $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ pour l'unité d'énergie. L'unité SI d'énergie est le **joule (J)**, avec $1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (voir l'annexe B). Le nom de joule a été donné en hommage à James Prescott Joule (chapitre 14, frontispice) dont les recherches ont conduit à la loi de conservation de l'énergie que l'on étudiera plus loin. Un joule est approximativement l'énergie nécessaire pour lever une masse de 100 g (environ la masse d'une orange) d'une hauteur de 1,0 m. La tableau 1.3 répertorie d'autres exemples qui vous donneront une meilleure idée de ce que représente

TABEAU 1.3 Valeurs comparées de l'énergie

Exemple	Énergie approximative
Énergie solaire arrivant sur la Terre en un jour	$1,5 \times 10^{23} \text{ J}$
Valeur approximative de l'énergie consommée dans le monde en 2005	$4,8 \times 10^{20} \text{ J}$
Plus grand dispositif nucléaire jamais testé	$2,5 \times 10^{17} \text{ J}$
Valeur approximative de l'énergie de la bombe atomique lâchée sur Hiroshima	$8,4 \times 10^{13} \text{ J}$
Une kilotonne de TNT	$4,2 \times 10^{12} \text{ J}$
Énergie correspondant à la diète journalière d'un individu	$7 \times 10^6 \text{ J}$
La Calorie des nutritionnistes	4 184 J
Unité britannique de chaleur (<i>BTU</i>)	1 055 J
Énergie dépensée pour soulever d'un mètre un poids de 100 g	1 J
Énergie d'un photon de rayons X	10^{-14} J
Énergie de l'électron d'un atome d'hydrogène	$2 \times 10^{-18} \text{ J}$
Énergie typique d'une liaison chimique	$2 \times 10^{-19} \text{ J}$
Énergie d'un photon dans le visible	10^{-19} J
Énergie cinétique moyenne d'une molécule à température ambiante	$4 \times 10^{-21} \text{ J}$

un joule. Une chose à noter dans ce tableau est que les énergies moléculaires ou atomiques sont de l'ordre de 10^{-18} J. Cette unité est appelée **attojoule** (aJ).

EXEMPLE I-5 : Calculer l'énergie cinétique d'une balle de pistolet de 5,0 g se déplaçant à la vitesse de $515 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Solution : À partir de l'équation 1.4, on trouve :

$$\begin{aligned} E_c &= \left(\frac{1}{2}\right)(0,0050 \text{ kg})(515 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 = 6,6 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \\ &= 6,6 \times 10^2 \text{ J} = 0,66 \text{ kJ} \end{aligned}$$

PROBLÈME D'APPLICATION I-5 : Calculer l'énergie cinétique d'un Boeing 747 en ordre de vol (322 000 kg) se déplaçant à la vitesse de 950 km/h.

Réponse : $1,12 \times 10^{10} \text{ J}$

L'énergie potentielle est l'énergie emmagasinée dans un objet du fait de sa position relative par rapport à un point de référence. Par exemple, une balle de base-ball de 142 g à une hauteur de 30 m possède une énergie potentielle par rapport au sol, car elle tomberait en accélérant si on la lâchait. Pour un objet situé au dessus du sol, l'énergie potentielle, désignée par E_p , est directement proportionnelle à sa masse, m , et à sa hauteur, h . On a donc :

$$E_p = mgh \quad (1.5)$$

où g est une constante de proportionnalité, appelée **accélération due à la pesanteur**, dont la valeur a été déterminée expérimentalement, $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ sur la Terre. Si la balle de base-ball (0,142 kg) est à 15 mètres du sol, on peut calculer son énergie potentielle, soit :

$$\begin{aligned} E_p &= mgh = (0,142 \text{ kg})(9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})(15 \text{ m}) \\ &= 21 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = 21 \text{ J} \end{aligned}$$

Une des lois fondamentales de la Nature est la **loi de conservation de l'énergie**, qui stipule que, dans tout processus, l'énergie n'est jamais ni créée ni détruite. L'énergie peut être transformée d'une forme en une autre ou bien être transférée d'un système à un autre, mais l'énergie totale ne change jamais.

De la loi de conservation de l'énergie, il découle que la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle d'un objet est constante sur sa trajectoire. C'est-à-dire :

$$E_{\text{total}} = E_c + E_p = \text{constante}$$

Par conséquent, lorsqu'un objet s'élève, il va perdre de la vitesse du fait que de l'énergie cinétique se transforme en énergie potentielle. Un objet au point culminant (apogée) d'une trajectoire verticale ne possède que de l'énergie potentielle mais plus d'énergie cinétique. Lorsque l'objet retombe, il y a transformation de l'énergie potentielle en énergie cinétique, l'énergie cinétique atteignant son maximum au moment où il touche le sol (figure 1.11).

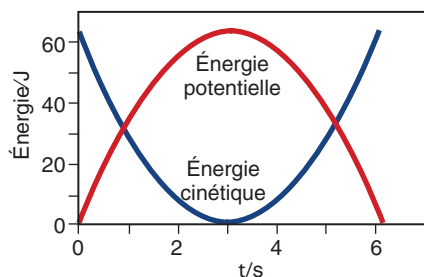


Figure 1.11 Énergie cinétique et énergie potentielle d'un objet qui s'élève puis retombe.

EXEMPLE I-6 : Calculer la hauteur qu'atteindra une balle de fusil d'une masse de 25 g tirée verticalement avec une vitesse initiale, v_0 , de $450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. (On négligera les effets de résistance de l'air.)

Solution : Toute l'énergie de la balle à la sortie du canon est de l'énergie cinétique. Nous avons donc (équation 1.4) :

$$\begin{aligned} E_c (\text{initiale}) &= \frac{1}{2}mv_0^2 = \left(\frac{1}{2}\right)(0,025 \text{ kg})(450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \\ &= 2,5 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \\ &= 2,5 \times 10^3 \text{ J} \\ &= 2,5 \text{ kJ} \end{aligned}$$

L'énergie totale s'écrit :

$$\begin{aligned} E_{\text{total}} (\text{initiale}) &= E_c (\text{initiale}) + E_p (\text{initiale}) \\ &= 2,5 \text{ kJ} + 0 \text{ kJ} \\ &= 2,5 \text{ kJ} \end{aligned}$$

À la hauteur maximale de la balle (apogée), l'énergie cinétique est nulle (car sa vitesse est nulle), si bien que son énergie correspond seulement à son énergie potentielle, soit :

$$\begin{aligned} E_{\text{total}} (\text{apogée}) &= E_c (\text{apogée}) + E_p (\text{apogée}) \\ &= 0 \text{ kJ} + 2,5 \text{ J} \\ &= 2,5 \text{ J} \end{aligned}$$

On peut utiliser l'équation 1.5 pour calculer la hauteur maximale, soit :

$$E_p (\text{apogée}) = 2,5 \text{ kJ} = 2,5 \times 10^3 \text{ J} = mgh$$

À l'apogée, on a donc :

$$\begin{aligned} h(\text{apogée}) &= \frac{E_p (\text{apogée})}{gm} = \frac{2,5 \times 10^3 \text{ J}}{(9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})(0,025 \text{ kg})} \\ &= \frac{2,5 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{(9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})(0,025 \text{ kg})} \\ &= 1,0 \times 10^4 \text{ m} \end{aligned}$$

PROBLÈME D'APPLICATION I-6 : L'électricité est produite dans des centrales hydroélectriques en convertissant l'énergie potentielle de l'eau d'un lac en énergie cinétique lorsque l'eau est collectée par des conduites reliées à des turbines (figure 1.12). Celles-ci convertissent en électricité l'énergie cinétique de l'eau. Sachant que l'eau tombe d'une hauteur de 200 m, calculer l'énergie cinétique par kilogramme d'eau à l'entrée de la turbine.

Réponse : $2 \times 10^3 \text{ J}$ ou 2 kJ

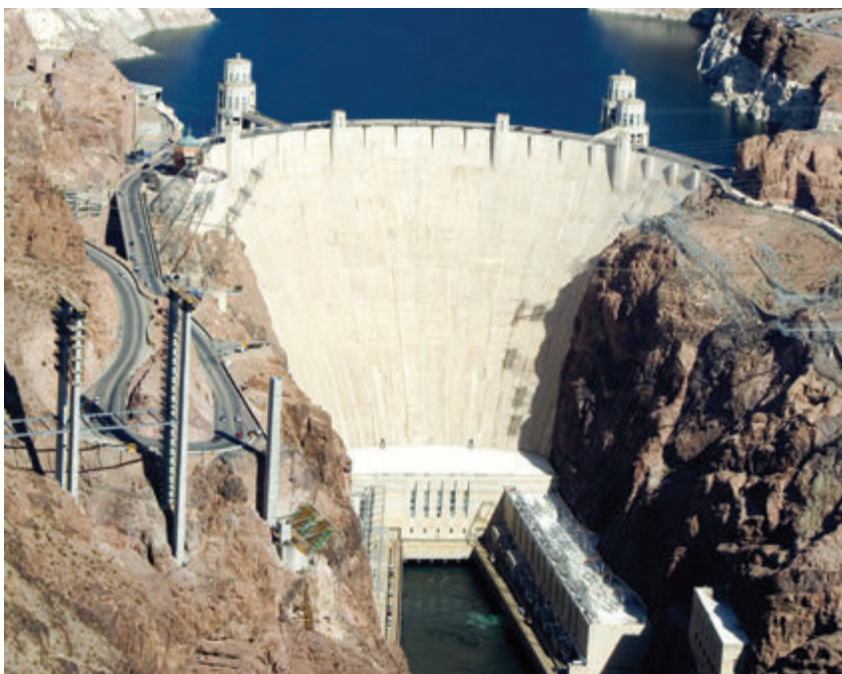


Figure 1.12 Le Hoover Dam est un grand barrage sur le Colorado retenant l'eau du Lac Mead. L'énergie potentielle de l'eau du lac est convertie en énergie électrique lorsque l'eau chute de la surface du lac jusqu'au bas du barrage. La chute de l'eau entraîne des turbines qui produisent de l'électricité.

La vitesse avec laquelle l'énergie est produite ou utilisée est appelée **puissance**. L'unité SI de la puissance est le **watt** (W), défini comme exactement égal à un joule par seconde, c'est-à-dire $1 \text{ W} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$. Par exemple, une lampe à incandescence émet de l'énergie sous forme d'énergie lumineuse (20 %) et de chaleur (80 %) avec une puissance de $40 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$. La consommation domestique d'énergie est souvent exprimée en **kilowatts-heures**. Un kilowatt-heure ($\text{kW} \cdot \text{h}$) est l'énergie consommée par un appareil d'une puissance de un kilowatt pendant une heure. Dès lors,

$$\begin{aligned} 1 \text{ kilowatt-heure} &= \left(\frac{1 \text{ kJ}}{\text{s}} \right) (1 \text{ h}) \\ &= \left(\frac{1 \text{ kJ}}{\text{s}} \right) (1 \text{ h}) \left(\frac{3600 \text{ s}}{\text{h}} \right) \\ &= 3600 \text{ kJ} \end{aligned}$$

EXEMPLE 1-7 : Les besoins énergétiques quotidiens d'une habitation moyenne américaine se situent aux alentours de $30 \text{ kW} \cdot \text{h}$. Quelle quantité d'énergie électrique est consommée en un jour ? Si le coût du kilowatt-heure est de $0,10 \$$ par $\text{kW} \cdot \text{h}$, quelle est la dépense en un mois de 30 jours pour assurer l'énergie nécessaire à une habitation moyenne.

Solution :

$$\begin{aligned} 30 \text{ kW} \cdot \text{h} &= \left(\frac{30 \text{ kJ}}{\text{s}} \right) (1 \text{ h}) \\ &= \left(\frac{30 \times 10^3 \text{ J}}{\text{s}} \right) (1 \text{ h}) \left(\frac{3600 \text{ s}}{\text{h}} \right) \\ &= 1 \times 10^8 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Une maison typique américaine consomme donc environ $1 \times 10^8 \text{ kJ}$ d'énergie électrique par jour. Avec un tarif à $0,10 \$$ par $\text{kW} \cdot \text{h}$, le coût pour 30 jours est de

$$\text{coût} = (30 \text{ jours}) \left(\frac{30 \text{ kW} \cdot \text{h}}{\text{jour}} \right) \left(\frac{0,10 \$}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right) = 90 \$$$

PROBLÈME D'APPLICATION I-7 : Un séchoir électrique à vêtements moderne a une puissance d'environ 7,5 kW quand il est en mode « chauffage ». En supposant que le séchage nécessite 55 min pour une charge importante de vêtements, calculer le coût en électricité consommée pour un seul séchage (utiliser le même tarif de 0,10 \$ que dans l'exemple I-7).

Réponse : 0,69 \$

I-6. L'erreur relative peut être utilisée pour mesurer l'exactitude d'un résultat

Le dénombrement d'objets est le seul type d'opérations que l'on puisse exécuter de façon totalement exacte, c'est-à-dire sans aucune erreur inhérente à l'observation. Admettons que l'on doive compter les pièces de monnaie contenues dans un pot. En les comptant une à une, on peut déterminer le nombre exact de pièces. Admettons, par exemple, qu'il y en ait 1542. Le nombre 1542 est un nombre exact : aucune incertitude ne pèse sur ce nombre. Il en va autrement si l'on désire, à présent, déterminer la masse des 1542 pièces à l'aide d'une balance (figure 1.9). Supposons que la balance à notre disposition puisse mesurer la masse d'un objet au dixième de gramme près et que, lors de la pesée des 1542 pièces, elle nous indique pour celles-ci une masse de $4776,2 \pm 0,1$ g. Étant donné que cette balance ne pouvait donner un résultat qu'au dixième de gramme près, nous savons que le nombre 0,2 complétant 4776 dans 4776,2 n'est pas un nombre exact. Ce pourrait en être réalité 4776,4 g, 4776,262 ou tout nombre entre 4776,1 et 4776,3. Le $\pm 0,1$ indique l'incertitude qui pèse sur le dernier chiffre dans le résultat de 4776,2 g.

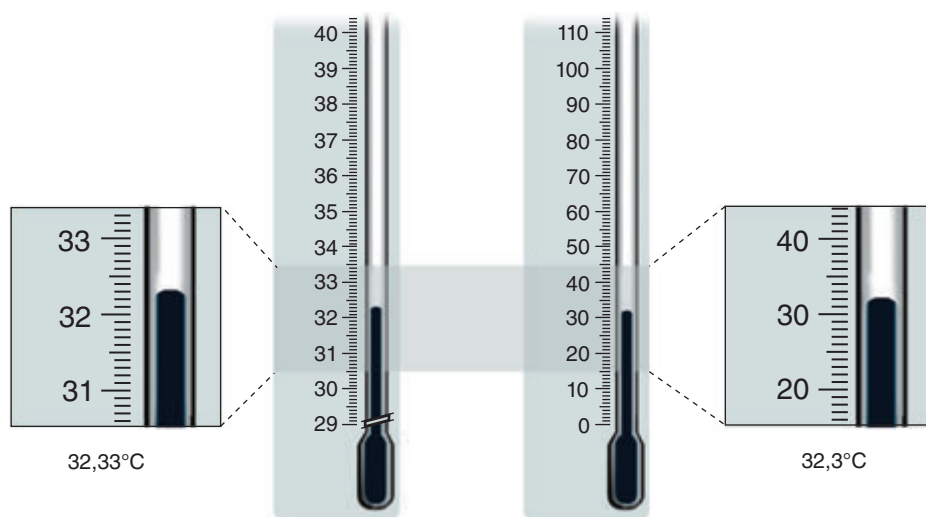
Supposons maintenant que nous ayons pu disposer d'une balance plus précise, capable de mesurer des pièces jusqu'au centième de gramme près. Le résultat aurait pu être de $4776,23 \pm 0,01$ g, ce qui signifie qu'il se situe dans la plage entre 4776,22 et 4776,24. Il aurait été nécessaire de disposer d'une balance encore plus sensible pour déterminer la masse des pièces de monnaie jusqu'au millième de gramme près ($\pm 0,001$ g). Ainsi, contrairement au comptage direct, nous ne pouvons pas déterminer avec une certitude absolue quelle est la masse de nos 1542 pièces.

Dans tout travail scientifique, il est nécessaire de faire la distinction entre la précision d'un résultat et son exactitude. L'**exactitude** se rapporte au degré de proximité d'un résultat avec la **vraie valeur**. Pour comprendre ce qui distingue la précision de l'exactitude, retournons à notre mesure de la masse des 1542 pièces. Le résultat de $4776,2 \pm 0,1$ g, quant à la masse de ces pièces, peut différer nettement de la vraie masse, soit parce que la balance a été mal étalonnée, soit parce que nous n'avons pas lu correctement le résultat affiché sur la balance, soit encore parce que nous n'avons pas remis la totalité des 1542 pièces dans le pot, soit enfin parce que nous avons oublié de déduire la masse du pot.

La **précision** d'un résultat se rapporte à la fois au degré d'accord entre des mesures répétées d'une même grandeur et à la sensibilité de l'appareil de mesure utilisé. On comprend donc qu'une grande précision ne va pas forcément de pair avec une grande exactitude parce que la même source d'erreur peut entacher toute la série de mesures. La figure 1.14 illustre la différence entre exactitude et précision de données expérimentales.

Une expression de l'exactitude d'une mesure est donnée par le **pourcentage d'erreur relative** (ou, de façon abrégée, le **pourcentage d'erreur**), défini comme

Figure 1.13 Des mesures précises sont nécessaires pour que les résultats obtenus soient reproductibles. Une mesure de 32,33 °C est plus précise qu'une mesure à 32,3 °C.



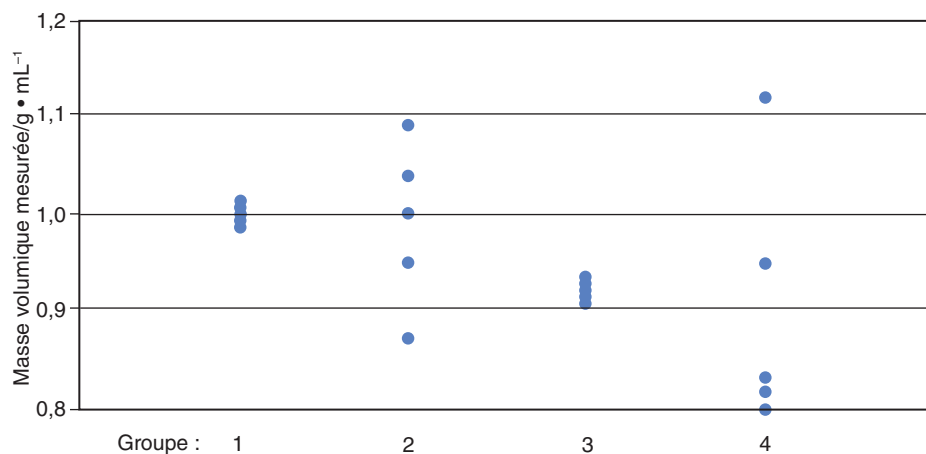
la différence entre, d'une part, la valeur moyenne des résultats expérimentaux et, d'autre part, la valeur vraie ou acceptée, le tout divisé par la vraie valeur et multiplié par 100. Sous forme d'équation, on a :

$$\text{pourcentage d'erreur} = \frac{\text{valeur moyenne} - \text{vraie valeur}}{\text{vraie valeur}} \times 100 \quad (1.6)$$

Le *CRC Handbook of Chemistry and Physics* est depuis presque un siècle une source classique de données dans le domaine de la chimie et de la physique.

La **vraie valeur** dans l'équation 1.6 est la valeur connue le plus exactement possible par l'expérimentateur. Par exemple, lors d'expériences de première année de chimie, nous prenons généralement comme vraie valeur celle publiée dans un manuel de référence comme le *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (figure 1.15), mais, les valeurs dans ce genre de manuels pouvant être révisées lorsque des expériences plus fiables sont réalisées, il s'avère que le choix d'une « vraie valeur » peut varier avec le temps.

Figure 1.14 Quatre séries de cinq résultats obtenus par quatre groupes d'étudiants pour la mesure expérimentale de la masse volumique de l'eau effectuée à 25 °C et sous 1 atm, la vraie valeur acceptée étant égale à 1,00 g · mL⁻¹. Les résultats obtenus par le groupe 1 sont à la fois exacts et précis. En revanche, bien qu'exactes, car la moyenne des cinq points est proche de la vraie valeur, les résultats du groupe 2 sont moins précis que ceux obtenus par les précédents puisque les points représentatifs sont beaucoup plus dispersés de part et d'autre de la vraie valeur. Quant aux résultats obtenus par le groupe 3, ils sont précis mais de faible exactitude, comparés avec ceux des deux autres groupes de données. Les résultats obtenus par le groupe 4 sont à la fois inexacts et peu précis.



EXEMPLE I-8 : Un étudiant a mesuré la masse et le volume d'un morceau de cuivre métallique à 20 °C. Les résultats suivants ont été obtenus :

Essai	Masse	Volume
1	5,051 g	0,571 cm ³
2	5,052 g	0,577 cm ³
3	5,055 g	0,575 cm ³

a) À partir de ces résultats, calculer la masse volumique moyenne du morceau de cuivre. b) Rechercher dans le *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (disponible dans la plupart des bibliothèques), ou par une recherche en ligne, la masse volumique du cuivre à 20 °C, puis calculer le pourcentage d'erreur relative associée à la masse volumique mesurée, ρ .

Solution : a) La masse volumique peut être calculée par l'équation 1.3, en divisant la masse par le volume du cuivre. Pour chaque essai, on obtient donc :

$$\text{Essai 1} \quad \rho = \frac{5,051 \text{ g}}{0,571 \text{ cm}^3} = 8,85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$\text{Essai 2} \quad \rho = \frac{5,051 \text{ g}}{0,577 \text{ cm}^3} = 8,76 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$\text{Essai 3} \quad \rho = \frac{5,055 \text{ g}}{0,575 \text{ cm}^3} = 8,79 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

La moyenne de ces résultats est simplement la somme des masses volumiques divisée par le nombre d'essais (3), de sorte que :

$$\text{masse volumique moyenne} = \frac{(8,85 + 8,76 + 8,79) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}}{3} = 8,80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

b) La vraie valeur de la masse volumique du cuivre métallique est donnée dans le *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, égale à 8,96 g · cm⁻³ à 20 °C. En utilisant l'équation 1.6, on obtient le pourcentage d'erreur relative, soit :

$$\begin{aligned} \text{pourcentage d'erreur} &= \frac{\text{valeur moyenne} - \text{vraie valeur}}{\text{vraie valeur}} \times 100 \\ &= \frac{8,80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} - 8,96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}}{8,96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}} \times 100 = -1,8 \% \end{aligned}$$

Notons que le signe négatif dans -1,8 % nous indique que notre réponse est 1,8 % trop faible par rapport à la vraie valeur. Souvent, on ne donne pas le signe de l'erreur relative, si bien que le pourcentage d'erreur pour cette mesure peut être écrit -1,8 % ou 1,8 % selon la convention utilisée. Dans l'ensemble de cet ouvrage, nous inclurons son signe lorsque que nous donnerons un pourcentage d'erreur.

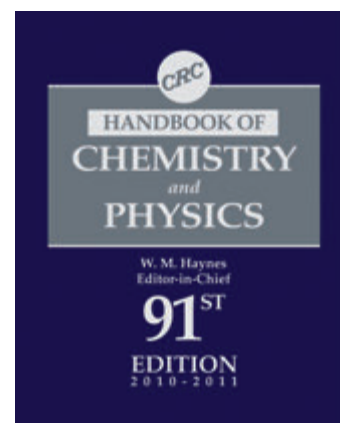


Figure I.15 Le *CRC Handbook of Chemistry and Physics* est un manuel de référence pour une large variété de propriétés. Il contient des données validées par un certain nombre de scientifiques. La plupart des bibliothèques universitaires et de laboratoires en possèdent un exemplaire et certaines ont une version en ligne. La plupart des données numériques citées dans cet ouvrage proviennent de cet ouvrage.

PROBLÈME D'APPLICATION I-8 : Un chimiste a testé les qualités d'un nouveau microscope conçu pour mesurer le diamètre de microfibrilles. Dans un des tests, il a obtenu les résultats suivants pour une microfibre connue pour avoir un diamètre exactement égal à $2,00 \times 10^{-7}$ m.

Essai	Diamètre
1	0,203 μm
2	0,209 μm
3	0,209 μm

Calculer le pourcentage d'erreur sur ces mesures.

Réponse : 2 %

I-7. La précision d'une mesure est indiquée par le nombre de chiffres significatifs

Lorsque l'on présente des résultats expérimentaux dans le domaine scientifique, il est important de donner à la fois la valeur de la grandeur étudiée et son exactitude (ou sa précision). Par exemple, si nous rentrons subitement dans un bar et que nous voyons un joueur de fléchettes atteindre exactement le centre de la cible, nous n'avons aucune information quant à savoir si ce bon lancer est dû uniquement à de la chance ou si le joueur est un champion international, ou encore si c'est un peu deux. Ce n'est seulement qu'après une série de lancers que nous saurons si c'est un bon joueur ou non. C'est pour une raison identique que les résultats expérimentaux ne sont considérés valables qu'après un certain nombre d'essais permettant de connaître la précision ou l'incertitude.

Il est souhaitable en général d'utiliser l'écriture avec + ou – devant la valeur numérique, mais cela est souvent un peu lourd, et, dans cet ouvrage, nous indiquerons souvent la précision des valeurs expérimentales par le nombre de **chiffres significatifs** servant à exprimer un résultat.

Tous les chiffres d'une valeur numérique sont significatifs si seul le dernier présente une certaine incertitude. Un résultat tel que 4776,2 signifie que seul le dernier chiffre est incertain d'au moins une unité et les chiffres significatifs sont au nombre de cinq. Les zéros sont considérés comme des chiffres significatifs. Ainsi, les deux zéros de 1001,2 sont significatifs. Toutefois, ils ne sont pas considérés comme significatifs s'ils servent à placer la virgule, comme dans 0,00125, qui a seulement trois chiffres significatifs). Dans certains cas, le nombre de chiffres significatifs n'apparaît pas clairement dans un nombre donné. Considérons, par exemple, le nombre 100. Quand il est présenté comme cela, ce nombre peut vouloir dire qu'il est exactement égal à 100, mais les deux zéros peuvent aussi ne pas être significatifs, et l'on peut comprendre que la valeur est approximativement égale à 100, disons 100 ± 10 . Le nombre de chiffres significatifs est donc incertain dans ce cas. Habituellement, le nombre de chiffres significatifs peut être compris d'après l'énoncé du problème, et il incombe à celui qui l'écrit d'indiquer clairement le nombre de chiffres significatifs en se servant de manière appropriée de la virgule et de zéros. Ainsi, 100,0 a quatre chiffres significatifs et 35×10^3 en a deux. De manière générale, il est souvent préférable d'exprimer en écriture scientifique les nombres tels que 100 afin d'éviter toute ambiguïté quant au nombre de chiffres significatifs.

On peut résumer comme suit les règles permettant de déterminer le nombre de chiffres significatifs :

1. Sont significatifs tous les chiffres autres que zéro, de même que les zéros situés entre deux autres chiffres.
2. Ne sont pas significatifs les zéros servant seulement à marquer la position du séparateur décimal. Par exemple, 0,000 206 L a trois chiffres significatifs (soulignés). Les zéros à gauche du 2 ne le sont pas.
3. Sont significatifs les zéros qui terminent un nombre ou qui se situent à droite du séparateur décimal. Par exemple, 2,200 g a quatre chiffres significatifs.
4. Peuvent ou non être significatifs les zéros qui finissent un nombre et qui ne sont pas à droite du séparateur décimal. Dans ce cas, on doit déduire le nombre de chiffres significatifs d'après le contexte. Par exemple, la phrase « 350 000 spectateurs étaient sur le trajet du défilé » implique un nombre de spectateurs ayant probablement au mieux deux chiffres significatifs. On déduit cela du fait que personne n'a en réalité compté les spectateurs.
5. Un moyen simple de savoir si des zéros sont ou non des chiffres significatifs consiste à examiner s'ils disparaissent quand on utilise une écriture scientifique. Par exemple, dans le nombre 0,0197, qui peut s'écrire $1,97 \times 10^{-2}$, les zéros ne sont pas significatifs, et dans le nombre 0,01090, qui peut s'écrire $1,090 \times 10^{-2}$, les deux premiers zéros ne sont significatifs mais les deux autres le sont.
6. Sont considérés comme **nombres exacts** tous les nombres pouvant être obtenus par une opération de dénombrement, tels que dans « 5 essais » ou « 60 atomes de carbone dans la formule C_{60} », ou qui sont des facteurs définis de conversion comme dans $1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$. Par exemple, si, pour venir à l'université, vous partagez votre voiture avec trois camarades, il n'y a pas d'incertitude sur leur nombre ; il n'est pas possible qu'il y ait 3,17 personnes supplémentaires dans le véhicule. Les nombres exacts n'ont pas de limite à leur précision et n'obéissent pas aux règles relatives aux chiffres significatifs (ou être traités comme ayant un nombre infini de chiffres significatifs).

EXEMPLE I-9 : Combien y a-t-il de chiffre significatifs dans les nombres suivants : a) 0,0312 ; b) 0,031 20 ; c) 312 (pages) ; d) $3,1200 \times 10^5$ (grammes).

Solution :

- a) 0,0312 a trois chiffres significatifs (soulignés)
- b) 0,031 20 a quatre chiffres significatifs (soulignés)
- c) 312 est un nombre exact (les pages sont exactement dénombrables)
- d) 3,1200 $\times 10^5$ a cinq chiffres significatifs (soulignés) ; le gramme est l'unité d'une masse mesurée (non pas dénombrée).

PROBLÈME D'APPLICATION I-9 : Déterminer le nombre de chiffres significatifs dans les nombres suivants : a) Le nombre d'habitants aux États-Unis s'élève à environ 301 000 000 ; b) 30 006 ; c) 0,0029060 ; d) 12 (atomes d'hélium).

Réponse : a) seulement 3 ; b) 5 ; c) 5 ; d) nombre exact

I-8. Les résultats d'un calcul numérique doivent comporter un nombre correct de chiffres significatifs

Dans les calculs scientifiques, on doit exprimer le résultat final avec un nombre correct de chiffres significatifs. Sinon, on donnerait une impression fausse de la précision du résultat.

Pour la multiplication et la division, il convient de ne pas donner le résultat avec davantage de chiffres significatifs que le facteur ayant le moins de chiffres significatifs. Si l'on effectue la multiplication $8,3145 \times 298,2$, par exemple, sur une calculatrice, on obtient 2479,3839 sur l'écran. Toutefois, tous les chiffres ne sont pas significatifs. Le résultat correct est de 2479 car le facteur 298,2 n'a que quatre chiffres significatifs et il doit en être de même pour le résultat. Les autres chiffres ne sont pas significatifs et doivent être supprimés.

EXEMPLE I-10 : Calculer le résultat de la suite des opérations suivantes avec le nombre correct de chiffres significatifs :

$$y = \frac{2,90 \times 0,082\,05 \times 298}{0,93}$$

Solution : À l'aide d'une calculatrice de poche, on obtient :

$$y = 76,224\,742$$

C'est le facteur 0,93 qui a le plus petit nombre de chiffres significatifs – seulement deux. Dès lors, le résultat calculé n'est acceptable qu'avec seulement deux chiffres significatifs. La réponse correcte est donc $y = 76$.

PROBLÈME D'APPLICATION I-10 : Écrire avec le nombre correct de chiffres significatifs le résultat du calcul suivant :

$$y = \frac{8,314 \times 298,15}{96\,485,3}$$

Réponse : 0,025 69

Pour les additions et les soustractions, il convient que la valeur calculée n'ait pas davantage de chiffres après la virgule que celui des nombres additionnés ou soustraits ayant le plus faible nombre de chiffres après la virgule. Considérons, par exemple, la somme

$$\begin{array}{r} 6,939 \\ + 1,007\,07 \\ \hline 7,946\,07 = 7,946 \end{array}$$

Les deux derniers chiffres de 7,946 07 ne sont pas significatifs, car on sait que la valeur du premier nombre intervenant dans l'addition, 6,939, n'a que trois chiffres après la virgule. Aussi le résultat ne peut-il pas avoir plus de trois chiffres après la virgule. Par conséquent, le résultat avec le nombre correct de chiffres significatifs doit être 7,946. Dans cet exemple, nous avons tracé une ligne verticale pour souligner le fait que l'on doit supprimer les deux derniers chiffres.

Considérons maintenant la soustraction

$$y = 1,750 \times 10^6 - 2,50 \times 10^4$$

On doit exprimer chaque nombre avec la même puissance de 10 puis effectuer la soustraction afin de déterminer le nombre de chiffres significatifs dans le résultat. Ainsi, on commence par récrire $2,50 \times 10^4$ sous la forme $0,0250 \times 10^6$, puis on effectue la soustraction, soit :

$$\begin{array}{r} 1,750 \times 10^6 \\ - 0,0250 \times 10^6 \\ \hline 1,725 \times 10^6 \end{array}$$

La réponse correcte est $y = 1,725 \times 10^6$ avec quatre chiffres significatifs. (On aurait aussi pu résoudre ce problème en convertissant $1,750 \times 10^6$ en une puissance en 10^4 .)

Pour supprimer les chiffres qui ne sont pas significatifs, on utilise la convention suivante : quand le chiffre qui suit le dernier chiffre retenu est 5, 6, 7, 8 ou 9, on ajoute une unité au chiffre précédent ; autrement (c'est-à-dire avec 0, 1, 2, 3 ou 4), le chiffre précédent sur la gauche doit être laissé inchangé. Ainsi, quand on arrondit à trois chiffres significatifs les nombres suivants, on obtient : 27,35 → 27,4 ; 27,34 → 27,3 et 27,348 → 27,3. Notons que dans la moitié des cas (0, 1, 2, 3 ou 4) on supprime simplement le dernier chiffre mais que, pour l'autre moitié (5, 6, 7, 8 ou 9), on augmente d'une unité le chiffre précédent.

Quand on combine des opérations mathématiques, tels qu'une multiplication suivie d'une soustraction, le nombre de chiffres significatifs doit être calculé séparément pour chaque étape, dans le même ordre que l'on effectue les opérations.

Les règles pour l'addition et la soustraction de chiffres significatifs sont différentes de celles pour la multiplication ou pour la division. Il conviendra de s'en souvenir lorsqu'on calculera des moyennes ou lorsqu'on déterminera des pourcentages d'erreur relative.

EXEMPLE I-II : Écrire avec le nombre correct de chiffres significatifs le résultat du calcul suivant :

$$y = 2796,8 - 2795$$

Solution : La soustraction donne 1,8, nombre qui doit être arrondi à 2 parce que le second nombre impliqué dans l'opération (2795) n'a pas de partie décimale ; dès lors, le résultat correct ne peut pas non plus avoir de partie décimale et doit donc ne comporter qu'un seul chiffre significatif.

PROBLÈME D'APPLICATION I-II : Écrire avec le nombre correct de chiffres significatifs le résultat du calcul suivant :

$$y = \frac{7,2960}{8,9000} - 132,0$$

Réponse : -131,2

EXEMPLE I-12 : Un étudiant a mesuré la masse volumique d'un objet en aluminium et obtenu les résultats suivants :

Essai	Masse volumique
1	3,1 g · cm ⁻³
2	3,0 g · cm ⁻³
3	2,7 g · cm ⁻³
4	3,3 g · cm ⁻³

Calculer la masse volumique de l'objet avec le nombre correct de chiffres significatifs.

Solution : La masse volumique moyenne est obtenue comme suit :

$$\begin{aligned} \text{masse volumique moyenne} &= \frac{(3,1 + 3,0 + 2,7 + 3,3) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}}{4} \\ &= \frac{12,1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}}{4} = 3,03 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \end{aligned}$$

Ce calcul implique une addition et une division. En suivant les règles des chiffres significatifs pour l'addition et la soustraction, l'étape d'addition donne la valeur 12,1 g · cm⁻³. Le nombre d'essais (4) étant un nombre exact, on ne fait pas intervenir les règles concernant les chiffres significatifs dans la division par 4, si bien que la réponse comporte aussi trois chiffres significatifs. Notons que, dans ce cas, la masse volumique expérimentale a un chiffre significatif de plus que chacune des trois mesures individuelles. Cela n'est pas inhabituel : une moyenne est généralement plus précise que chacune des mesures individuelles dont elle dérive. Donc, même pour des expériences pour lesquelles les erreurs de mesure sont relativement grandes, une façon d'améliorer la précision consiste à effectuer des mesures répétées et d'en prendre la moyenne.

PROBLÈME D'APPLICATION I-12 : Dans le *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, on trouve que la masse volumique de l'aluminium est égale à 2,70 g · cm⁻³. Calculer avec le nombre correct de chiffres significatifs le pourcentage d'erreur sur la masse volumique moyenne déterminée dans l'exemple I-12.

Réponse : 12 % (deux chiffres significatifs)

En règle générale, pour éviter d'accumuler des erreurs d'arrondis, il est préférable d'effectuer d'abord tous les calculs mathématiques avec un excédent de chiffres significatifs, puis de couper ensuite le nombre obtenu pour ne retenir que le nombre correct chiffres significatifs en fonction de l'opération effectuée à chaque étape. Par exemple, considérons la suite suivante d'opérations

$$y = (1,0 + 0,46)^3$$

Pour l'addition de la première étape on obtient $1,0 + 0,46 = 1,46$, qui est égal à 1,5 quand on prend le nombre correct de chiffres significatifs. En portant y au cube, on trouve :

$$y = (1,5)^3 = 3,375 = 3,4$$

avec deux chiffres significatifs (porter un nombre au cube équivaut à le multiplier deux fois pas lui-même, ce qui permet d'appliquer aux puissances les mêmes règles que pour la multiplication). En revanche, si l'on effectue la suite d'opérations avec une calculatrice de poche on obtient :

$$y = (1,0 + 0,46)^3 = (1,46)^3 = 3,112\,136 = 3,1$$

Ainsi, effectuer les arrondis à chaque étape conduit à une erreur globale sur le dernier chiffre significatif plus grande que celle supposée. Autrement dit :

$$3,4 \pm 0,1 \neq 3,1 \pm 0,1$$

Plus il y a d'étapes dans la suite des opérations, plus il y a de telles erreurs d'arrondis. C'est pour cela qu'il est de loin préférable d'effectuer d'abord tous les calculs mathématiques avec un excédent de chiffres significatifs, puis de couper ensuite le nombre obtenu pour ne retenir que les chiffres significatifs dont le nombre est défini d'après l'opération effectuée dans chaque étape.

Quand on effectue des calculs impliquant plusieurs étapes, le résultat final dépend du nombre de chiffres que l'on conserve à chaque étape intermédiaire du calcul, ce qui peut être un choix quelque peu arbitraire. Bien qu'il soit important de donner des résultats avec le nombre correct de chiffres significatifs, des résultats qui diffèrent légèrement quant au dernier chiffre ne sont pas fondamentalement différents par suite de l'incertitude inhérente au dernier chiffre. Par exemple, il n'y a pas de différence notable entre 0,3456 et 0,3457 si l'on considère que le nombre est à quatre chiffres significatifs.

I-9. Utilisation de l'analyse dimensionnelle pour simplifier de nombreux calculs

L'**analyse dimensionnelle** est une méthode qui s'avère particulièrement utile lors de calculs qui impliquent des grandeurs portant des unités. Le principe essentiel est de traiter les unités des différentes grandeurs impliquées dans le calcul comme des grandeurs qui suivent les règles de l'algèbre. Les calculs sont présentés de sorte que les unités inutiles s'éliminent deux à deux et que le résultat soit obtenu dans les unités souhaitées. Si le résultat obtenu n'a pas les unités souhaitées, c'est que la méthode suivie pour l'obtenir est erronée.

Examinons quelques exemples typiques de l'emploi de l'analyse dimensionnelle dans les calculs. Le premier principe est que seuls des nombres ayant les mêmes unités peuvent être additionnés ou soustraits. Par exemple, si on additionne 2,12 cm et 4,73 cm, on obtient 6,85 cm. En revanche, si l'on veut ajouter 76,4 cm à 1,19 m, on doit d'abord convertir 76,4 cm en mètres ou 1,19 m en centimètres. On passe d'une unité à une autre en utilisant un **facteur de conversion des unités**. Ainsi, supposons que l'on souhaite convertir les mètres en centimètres. Dans l'annexe B, on trouve que

$$1\text{ m} = 100\text{ cm} \quad (1.7)$$

Cette équation est une équation de définition ; elle est donc exacte. Il n'y a pas de limite au nombre de chiffres significatifs de part et d'autre de l'équation. Si l'on divise des deux côtés par 1 m, on obtient :

$$1 = \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \quad (1.8)$$

L'équation 1.8 est l'équation d'un facteur de conversion d'unités parce qu'on peut s'en servir pour transformer un nombre exprimé en mètres en un nombre en centimètres. Comme cette équation l'indique, un facteur de conversion d'unités est égal à 1, de sorte que toute valeur d'une grandeur dans une unité donnée peut toujours être multipliée par un facteur de conversion d'unités sans qu'il y ait de changement de sa valeur intrinsèque. Par exemple, si l'on multiplie 1,19 m par le facteur de conversion de l'équation 1.8, on obtient :

$$(1,19 \cancel{\text{ m}}) \left(\frac{100 \cancel{\text{ cm}}}{1 \cancel{\text{ m}}} \right) = 119 \text{ cm}$$

On peut noter que l'unité m disparaît par simplification, ce qui permet d'avoir le résultat en centimètres.

Pour convertir 76,4 cm en mètres, on emploie l'inverse de l'équation 1.8, soit :

$$76,4 \cancel{\text{ cm}} = \left(\frac{1 \cancel{\text{ m}}}{100 \cancel{\text{ cm}}} \right) = 0,764 \text{ m}$$

Notons que, cette fois, c'est l'unité cm qui disparaît, ce qui donne le résultat en mètres. À partir de ces résultats, on peut voir que la somme de 76,4 cm et de 1,19 m s'écrit :

$$76,4 \text{ cm} + (1,19 \text{ m}) \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right) = 195 \text{ cm}$$

ou

$$(76,4 \text{ cm}) \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) + 1,19 \text{ m} = 1,95 \text{ m}$$

Notons que les deux résultats sont donnés avec trois chiffres significatifs.

Comme autre exemple de conversion d'un ensemble d'unités à un autre, convertissons 55 miles par heure (généralement désigné par mph) en kilomètres par heure. Du tableau en troisième de couverture de cet ouvrage, on trouve que

$$1 \text{ mile} = 1,609 \text{ km} \quad (1.9)$$

Si l'on divise les deux membres de l'équation 1.9 par 1 mile, on obtient le facteur de conversion des unités, soit :

$$1 = \frac{1,609 \text{ km}}{1 \text{ mile}} \quad (1.10)$$

L'équation 1.10 est le facteur de conversion des unités que l'on utilise pour convertir une vitesse donnée en miles par heure en une vitesse en kilomètres par heure. Ainsi,

$$\left(\frac{55 \text{ miles}}{1 \text{ heure}} \right) \left(\frac{1,609 \text{ km}}{1 \text{ mile}} \right) = 89 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

Notons que l'emploi des unités adéquates pour chaque valeur permet un contrôle interne de l'exactitude du calcul. On doit multiplier 55 mph par 1,609 km/1mile pour obtenir le résultat dans les unités souhaitée, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$. Notons aussi que si nous avons utilisé la conversion $1 \text{ km} = 0,6214 \text{ mile}$ provenant aussi de la troisième de couverture, la conversion des unités se serait écrite :

$$\left(\frac{55 \text{ miles}}{1 \text{ heure}} \right) \left(\frac{1 \text{ km}}{0,6214 \text{ miles}} \right) = 89 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

avec l'unité « mile » s'éliminant à nouveau.

EXEMPLE I-13 : Sachant que le facteur de conversion des unités « quart de gallon US (qt) » en millilitres est 946,3 mL/quart et que $1 \text{ L} = 1\,000 \text{ mL}$, combien il y a-t-il de litres dans 1,00 gallon US (gal) ? (Il y a 4 quarts dans 1 gal)

Solution : Avant de commencer, il est bon de planifier la façon de procéder pour effectuer la conversion souhaitée. Notre objectif est de convertir des gallons en litres. On peut illustrer le processus en utilisant une flèche, soit :

$$\text{gallons} \xrightarrow{?} \text{litres}$$

Puisque nous connaissons le facteur de conversion des gallons en quarts, on peut écrire :

$$\text{gallons} \xrightarrow{4 \text{ qt/gal}} \text{quarts} \xrightarrow{?} \text{litres}$$

comme première étape du protocole. En continuant de cette façon, on obtient un schéma de la suite des opérations, soit :

$$\text{gallons} \xrightarrow{4 \text{ qt/gal}} \text{quarts} \xrightarrow{946,3 \text{ mL/qt}} \text{millilitres} \xrightarrow{1\text{L}/1000\text{mL}} \text{litres}$$

Ensuite, en employant les facteurs de conversion donnés et en s'arrangeant pour que les unités s'éliminent deux à deux (comme montré en rouge), on trouve le nombre de litres dans un gallon, soit :

$$(1,00 \text{ gal}) \left(\frac{4 \text{ qt}}{1 \text{ gal}} \right) \left(\frac{946,3 \text{ mL}}{1 \text{ qt}} \right) \left(\frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \right) = 3,79 \text{ L}$$

Avec quelque pratique de ce genre de calcul, vous commencerez à avoir dans la tête le plan de calcul et vous n'aurez plus besoin de l'écrire ; vous aurez toujours, cependant, à écrire tous les facteurs de conversion et les unités. Le fait que les unités puissent s'éliminer deux à deux est excellent moyen de contrôler que vous avez effectué correctement tous vos calculs.

PROBLÈME D'APPLICATION I-13 : Supposons que vous ayez à conduire en France et que la ville la plus proche soit à 72 km. Quelle distance cela fait-il en miles ? Si l'altitude de la ville est de 1250 m, quelle est son altitude en pieds (ft) ?

Réponse : 45 miles ; 4130 ft.

EXEMPLE I-14 : Dans la plupart des pays, la viande sur le marché est vendue en kilogrammes. Supposons que le prix d'une certaine tranche de bœuf soit de 1400 pesos le kilogramme et que le taux de change soit de 124 pesos pour 1 dollar US. Quel est prix en dollars d'une livre de viande ?

Solution : Le prix de la viande, obtenu par analyse dimensionnelle est le suivant :

$$\left(\frac{1400 \text{ pesos}}{1 \text{ kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ dollar}}{124 \text{ pesos}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{2,20 \text{ livres}} \right) = 5,13 \text{ dollar} \cdot \text{livre}^{-1}$$

PROBLÈME D'APPLICATION I-14 : Un certain disque dur d'ordinateur est donné comme ayant une vitesse de 45 MBps (mégabytes par seconde). Utiliser les facteurs de conversion des unités de l'annexe B pour déterminer le temps nécessaire pour enregistrer 25 photos numériques de 1,2 GB (gigabytes) chacune (en supposant que la vitesse d'écriture soit la vitesse déterminante du transfert des données).

Réponse : 11 min.

Considérons maintenant un exemple comportant plusieurs conversions d'unités entre unités dérivées. On a pu estimer que tout l'or extrait jusqu'à présent des différents gisements du monde occuperait, si on le rassemblait, un cube d'arête égale à 19 m (figure 1.16). Sachant que la masse volumique de l'or est de $19,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, calculons la masse de tout cet or. Le volume d'un cube dont les arêtes sont de 19 m vaut

$$\text{volume} = (19 \text{ m})^3 = 6\,859 \text{ m}^3 \quad (1.11)$$

Bien que le volume calculé par l'équation 1.11 ne comporte normalement que deux chiffres significatifs (car la valeur de 19 m n'en comporte que deux), nous allons conserver les chiffres significatifs supplémentaires. Comme indiqué plus haut, cette manière de procéder permet de réduire au maximum les erreurs d'arrondis des différentes étapes et nous ramènerons à la fin à deux le nombre de chiffres significatifs. La masse de l'or s'obtient en multipliant la masse volumique par le volume, mais, avant d'effectuer cette multiplication, il faut transformer les mètres cubes en centimètres cubes parce que la masse volumique est donnée en $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Dans l'annexe B, on trouve que

$$1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

En élevant au cube les deux membres de cette expression, on obtient :



Figure 1.16 Lingots d'or d'un kilogramme. Chaque lingot est estampillé avec sa masse, sa pureté et son numéro de référence.

$$(1 \text{ m})^3 = (100 \text{ cm})^3 = 1 \times 10^6 \text{ cm}^3$$

si bien que le facteur de conversion s'écrit :

$$1 = \frac{10^6 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3}$$

Ainsi, le volume en centimètres cubes est égal à :

$$\text{volume} = (6859 \text{ m}^3) \left(\frac{10^6 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3} \right) = 6,859 \times 10^9 \text{ cm}^3$$

Quand on multiplie le volume de la quantité d'or par sa masse volumique, on obtient la masse de l'or, soit :

$$\begin{aligned} \text{masse} &= \text{volume} \times \text{masse volumique} \\ &= (6,859 \times 10^9 \text{ cm}^3) (19,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}) = 1,3 \times 10^{11} \text{ g} \end{aligned}$$

On a arrondi ce résultat à deux chiffres significatifs, car, comme nous l'avons signalé plus haut, la longueur de l'arête du cube (19 m) n'est donnée qu'avec deux chiffres significatifs. Pour obtenir ce résultat, on s'est servi du fait que $(\text{cm}^3)(\text{cm}^{-3}) = 1$.

Calculons ce que cette masse vaudrait à 850 \$ l'once troy (oz t)⁴, le prix de l'or en février 2009 (l'or se vendant par once troy, qui représente une masse 10 % environ plus élevée que l'once avoirdupois, cette dernière étant l'once servant à exprimer aux États-Unis la masse des aliments). Un once troy représente 31,1 g, de sorte que le facteur de conversion des ces unités s'écrit :

$$1 = \frac{1 \text{ oz t}}{31,1 \text{ g}}$$

On calcule ensuite la masse de l'or en onces troy, soit

$$\begin{aligned} \text{masse} &= (1,3 \times 10^{11} \text{ g}) \left(\frac{1 \text{ oz t}}{31,1 \text{ g}} \right) \\ &= 4,2 \times 10^9 \text{ oz t} \end{aligned}$$

À 850 \$ l'once troy, tout l'or extrait jusqu'ici a la valeur ci-dessous en dollars US :

$$\begin{aligned} \text{valeur} &= (4,2 \times 10^9 \text{ oz t}) \left(\frac{850 \$}{1 \text{ oz t}} \right) \\ &= 3,6 \times 10^{11} \$ = 3,6 \text{ mille milliards de dollars US.} \end{aligned}$$

Les calculs scientifiques font intervenir des manipulations de nombres associés à des unités avec lesquelles vous n'êtes pas très familiarisés. Si, toutefois, vous vous établissez soigneusement les facteurs de conversion nécessaires et si vous vous assurez que les unités appropriées s'éliminent pour donner les résultats en unités adéquates – en bref, si vous utilisez l'analyse dimensionnelle –, les transformations d'unités se feront sans problème.

4 N.d.t. : L'once troy (symbole oz t) est égale au douzième de la livre troy (d'après la ville de Troyes en France) et vaut 31,103 4768 g dans le Système de poids de troy ; l'once troy est couramment utilisée (notamment en France) pour la cotation de métaux précieux, comme l'or et l'argent, et pour les médicaments.

I-10. Utilisation de la notation de Guggenheim pour les en-têtes de ligne ou de colonne des tableaux et les axes des graphiques.

TABEAU I.4 Données répertoriées avec des en-têtes exprimées dans le mode de notation de Guggenheim

(a) Masse/g	(b) Masse/ 10^{-4} g
1,604	1,29
2,763	3,58
3,006	7,16

Lorsqu'on présente sous forme d'un tableau diverses grandeurs accompagnées d'unités, il est plus commode d'indiquer les valeurs numériques sans leur unité, cette dernière étant spécifiée en tête de colonne. La présentation la plus explicite consiste à écrire le nom ou le symbole de la grandeur concernée, suivi d'une barre oblique, puis du symbole de l'unité. Ainsi, par exemple, l'en-tête « Distance/m » indique que les données numériques dans le tableau sont des distances exprimées en mètres. Ce mode d'écriture est appelé **notation de Guggenheim**, en hommage à E.A. Guggenheim⁵, le chimiste anglais à l'origine de cette méthode.

Pour voir comment on applique la notation de Guggenheim, supposons que l'on doive répertorier un certain nombre de masses, par exemple 1,604 g, 2,763 g et 3,006 g. On utilise la notation « masse/g » en-tête de colonne et l'on dresse la liste des valeurs numériques des masses sous la forme de nombres sans unité, comme montré dans le tableau 1.4, colonne (a). Supposons à présent que l'on désire retrouver les valeurs des masses avec leur unité. L'en-tête indique que les nombres qui apparaissent dans la colonne sont des masses par gramme, si bien que l'on écrit, par exemple, masse/g = 1,604. En multipliant les deux membres de cette équation par « gramme », on obtient masse = 1,604 g. Notons que l'en-tête est traitée comme une grandeur algébrique et que l'on retrouve les données par une simple opération algébrique.

La notation de Guggenheim est particulièrement commode quand les valeurs à répertorier sont exprimées en notation scientifique. Imaginons, par exemple, qu'il faille répertorier des masses telles que $1,29 \times 10^{-4}$ g, $3,58 \times 10^{-4}$ g et $7,16 \times 10^{-4}$ g. Dans ce cas, on porte en en-tête « Masse/ 10^{-4} g » de façon à simplifier les données de la table, comme représenté dans le tableau 1.4, colonne (b). Pour retrouver les valeurs à partir des données du tableau, on écrit, par exemple, masse/ 10^{-4} g = 1,29, à partir de quoi on obtient la masse, $m = 1,29 \times 10^{-4}$ g. Soulignons que l'intérêt essentiel de la notation de Guggenheim découle de la possibilité de répertorier des données sous forme de nombres sans unité.

EXEMPLE I-15 : Considérons le tableau suivant de résultats :

Temps/ 10^{-5} s	Vitesse/ 10^5 m · s ⁻¹
1,00	3,061
1,50	4,153
2,00	6,302
2,5	8,999

Retrouver les valeurs – les valeurs numériques et leurs unités de temps et de vitesse – pour les quatre paires de données.

Solution : Pour retrouver les valeurs du temps, on utilise, par exemple, temps/ 10^{-5} s = 1,00, d'où l'on obtient temps = $1,00 \times 10^{-5}$ s. La vitesse correspondante est donnée par vitesse/ 10^5 m · s⁻¹ = 3,061, d'où vitesse = $3,061 \times 10^5$ m · s⁻¹. Les autres couples de données sont : $1,50 \times 10^{-5}$ s, $4,153 \times 10^5$ m · s⁻¹ ; $2,00 \times 10^{-5}$ s, $6,302 \times 10^5$ m · s⁻¹ ; $2,50 \times 10^{-5}$ s, $8,999 \times 10^5$ m · s⁻¹ :

⁵ N.d.t. : Edward Armand Guggenheim (1901-1970) est un thermodynamicien anglais qui fut professeur à l'Université de Reading (GB). On doit aussi à Guggenheim une méthode de traitement des données cinétiques pour les réactions d'ordre 1, aussi connue sous le nom de « méthode de Guggenheim ».

PROBLÈME D'APPLICATION I-15 : L'unité SI de quantité d'électricité est le coulomb (C). Utiliser le mode de notation de Guggenheim pour répertorier les données suivantes : $7,05 \times 10^{-15}$ C, $3,24 \times 10^{-15}$ C et $9,86 \times 10^{-16}$ C.

Réponse :

Charge/ 10^{-15} C
7,05
3,24
0,986

En parcourant cet ouvrage, vous verrez que les axes des graphiques sont notés comme les en-têtes de colonnes des tableaux et que les nombres sur les axes sont sans unité. La notation est tout particulièrement intéressante pour la présentation graphique des résultats, car seules des grandeurs sans dimension peuvent être représentées et car il est facile et sans ambiguïté de revenir aux valeurs avec leurs unités lorsque la notation de Guggenheim est utilisée pour les axes⁶.

EXEMPLE I-16 : Porter sur un graphique les résultats ci-dessous en utilisant la notation de Guggenheim pour nommer et graduer les axes.

t/s	$v/m \cdot s^{-1}$
0	0
1,0	16
2,0	64
3,0	144
4,0	256

Solution : Sur une feuille de papier millimétré (figure 1.17), nommer et graduer les axes, avec t/s en abscisse et $v/m \cdot s^{-1}$ en ordonnée. Les couples de données correspondent aux coordonnées des différents points et servent donc à les placer sur le graphique. Une fois les points marqués, on trace une courbe continue passant au plus près des points.

PROBLÈME D'APPLICATION I-16 : Tracer un autre graphique avec les données de l'exemple I-16 mais en portant maintenant v en fonction de t^2 . Que pouvez-vous en déduire en ce qui concerne la forme de l'équation reliant v à t ?

Réponse : On obtient une droite, ce qui indique que v est proportionnel à t^2 .

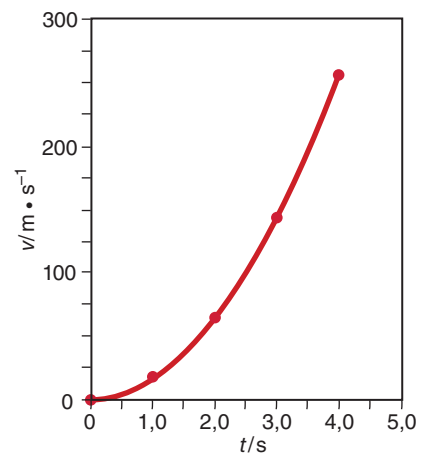


Figure 1.17 Représentation graphique des données de l'exemple I-17, utilisant la notation de Guggenheim pour nommer et graduer les axes.

Si vous rencontrez des difficultés avec l'exemple I-16 et le problème d'application I-16, il convient de vous reporter à l'annexe B, où vous trouverez des rappels de mathématique.

⁶ N.d.t. : Cela signifie que lorsque l'on porte une grandeur y en fonction d'une autre grandeur x avec y variant linéairement avec x , c'est-à-dire correspondant à une équation du type $y = ax + b$, on porte en réalité (y /unité de y) en fonction de (x /unité de x). L'ordonnée à l'origine, égale à (b /unité de y), et la pente de la droite, égale à ($a \times$ unité de x /unité de y) sont des *nombre sans dimension*. Les valeurs de b et a sont obtenues en multipliant respectivement l'ordonnée à l'origine par l'unité de y et la pente par l'unité de y divisée par l'unité de x . Par exemple, si, pour un mouvement uniforme on représente la distance parcourue, l , en fonction du temps, t , dans la notation de Guggenheim, on porte l/m en fonction de t/s , l'ordonnée à l'origine devra être multipliée par 1 m et la pente par $1 m \cdot s^{-1}$. Cela est souvent ignoré, y compris dans cet ouvrage, pour des raisons de simplification.

L'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA) (*IUPAC*, pour l'*International Union of Pure and Applied Chemistry*) est une organisation internationale qui émet des recommandations concernant les unités, les symboles, les conventions et la nomenclature qu'il convient que les scientifiques utilisent à travers le monde. Nous nous référerons fréquemment à ces recommandations dans les différents chapitres de cet ouvrage.

La notation de Guggenheim a été adoptée par l'Union internationale de chimie pure et appliquée, UICPA (*IUPAC*, pour l'*International Union of Pure and Applied Chemistry*)⁷ ; elle est officiellement recommandée pour les en-têtes de colonne et de rangée dans les tableaux de données et les axes des représentations graphiques. Bien que d'autres modes conventionnels de notation plus anciens, mais souvent plus ambigus, soient aussi utilisés, ils sont généralement considérés comme tombant en désuétude dans la littérature scientifique.

Dans ce chapitre, nous avons donc étudié divers aspects des calculs scientifiques, dont l'analyse dimensionnelle et les chiffres significatifs. Le chapitre suivant sera consacré à la compréhension de la nature des éléments et des composés chimiques, avec comme toile de fond la théorie atomique de Dalton.

RÉSUMÉ

La chimie est une science expérimentale fondée sur la méthode scientifique. Les réponses aux questions que les scientifiques se posent sont apportées par des expériences appropriées. Les lois scientifiques résument un grand nombre d'observations expérimentales. Des théories sont élaborées pour apporter des explications aux lois et aux observations, mais elles sont constamment sujettes à être revues ou complétées pour tenir compte de nouvelles observations et de nouveaux résultats.

Les unités qui ont été retenues au plan international pour exprimer les résultats expérimentaux sont les unités du SI. L'unité SI de base pour la longueur est le mètre, celle de la masse le kilogramme et celle de la température le kelvin. Les unités SI dérivées sont des combinaisons des unités de base.

L'unité SI d'énergie est le joule. Deux formes d'énergie ont été examinées dans ce chapitre ; il s'agit de l'énergie cinétique, due au mouvement d'un objet, et l'énergie potentielle, due à sa position. Bien que les énergies de différentes formes, dont l'énergie cinétique et l'énergie potentielle, puissent s'interconvertir, l'énergie totale doit être conservée.

Les degrés d'exactitude et de précision d'un résultat peuvent tous deux être précisés en donnant le pourcentage d'erreur ou par le biais du nombre de chiffres significatifs. Pour effectuer des calculs scientifiques, vous devez comprendre ce que sont les chiffres significatifs, les unités de mesure et les facteurs de conversion des unités. Il existe des règles qui permettent de déterminer le nombre correct de chiffres significatifs. Les résultats des mesures sont donnés par des nombres, mais ceux-ci doivent toujours être accompagnés d'unités, faute de quoi ces nombres n'auraient aucun sens. Des valeurs de même ordre doivent être converties en unités du même type avant de pouvoir les utiliser ensemble dans un calcul. Pour convertir les unités, on utilise des facteurs de conversion. On appelle analyse dimensionnelle la méthode générale selon laquelle on dispose un calcul scientifique de façon à ce que toutes les unités s'éliminent deux à deux sauf celles dans lesquelles on désire qu'un résultat soit exprimé.

La notation de Guggenheim est employée pour les en-têtes de colonne et de rangée dans les tableaux, ainsi que pour les axes des graphiques, si bien que l'on peut toujours revenir sans ambiguïté, avec les unités appropriées, aux valeurs répertoriées dans un tableau ou à celles relatives aux points d'un graphique.

⁷ N.d.t. : Voir le *Green Book*, p. 3. Pour une discussion exhaustive des avantages de la notation de Guggenheim, voir E.A. Guggenheim, « Notations in Physics and Chemistry », *J. Chem. Educ.*, **35**, 606 (1958).

TERMES QUE VOUS DEVEZ CONNAÎTRE

méthode scientifique 3	pico-, p 8	énergie cinétique, E_c 13
donnée qualitative 3	femto-, f 8	énergie potentielle, E_p 13
donnée quantitative 3	atto-, a 8	joule, J 13
hypothèse 3	volume, V 9	attojoule, aJ 14
loi de la nature, loi scientifique 3	litre, L 9	accélération due à la
théorie 4	millilitre, mL 9	pesanteur, g 14
mesure quantitative 5	centimètre cube, cm^3 9	loi de conservation de l'éner-
observation qualitative 5	kilogramme, kg 9	gie 14
loi de conservation de la masse 5	gramme, g 9	puissance 16
écriture scientifique 6	masse, m 9	watt, W 16
système métrique 7	poids 9	kilowatt-heure, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 16
unités SI 7	température 9	exactitude 17
longueur, l 7	échelle de température 9	précision 17
mètre, m 7	thermomètre 10	pourcentage d'erreur relative,
kilomètre, km 8	température Kelvin, T 10	pourcentage d'erreur 17
centimètre, cm 8	kelvin, K 10	vraie valeur 17
giga-, G 8	température Celsius, t 10	chiffres significatifs 20
méga-, M 8	température Fahrenheit, t_F 10	nombre exact 21
kilo-, k 8	unités dérivées 11	analyse dimensionnelle 25
centi-, c 8	masse volumique, ρ 11	facteur de conversion des
milli-, m 8	dimensions 11	unités 25
micro-, μ 8	propriété intensive 12	notation de Guggenheim 30
nano-, n 8	propriété extensive 12	

ÉQUATIONS QUE VOUS DEVEZ SAVOIR UTILISER

$T \text{ (en K)} = t \text{ (en } ^\circ\text{C)} + 273,15$	(1.1) (relation entre les échelles de température Kelvin et Celsius)
$t \text{ (en } ^\circ\text{C)} = (5/9) [t \text{ (en } ^\circ\text{F)} - 32,0]$	(1.2) (relation entre les échelles de température Celsius et Fahrenheit)
$\rho = \frac{m}{V}$	(1.3) (définition de la masse volumique)
$E_c = \frac{1}{2}mv^2$	(1.4) (énergie cinétique)
$E_p = mgh$	(1.5) (énergie potentielle d'un objet en fonction de sa hauteur par rapport au sol)
$\text{pourcentage d'erreur} = \frac{\text{valeur moyenne} - \text{vraie valeur}}{\text{vraie valeur}} \times 100$	(1.6) (pourcentage d'erreur relative)

PROBLÈMES

MÉTHODE SCIENTIFIQUE

I-1. Quelles sont les différences entre une hypothèse, une loi et une théorie ?

I-2. Un chercheur a réalisé une expérience en désaccord avec une théorie bien établie. Dans l'esprit de la méthode scientifique, quelle attitude convient-il qu'il adopte ?

I-3. Dans le contexte de la méthode scientifique, commenter la phrase suivante : « La théorie de l'évolution est une réalité incontournable ».

I-4. Dans le contexte de la méthode scientifique, commenter la phrase suivante : « Il n'y a pas deux flocons de neige semblables ».

ÉCRITURE SCIENTIFIQUE

I-5. Exprimer en écriture scientifique les nombres suivants :

- (a) 0,000 000 0277
- (b) 0,001 82
- (c) 123 000 000
- (d) 1254

I-6. Exprimer en écriture décimale les nombres suivants exprimés en écriture scientifique :

- (a) $2,998 \times 10^8$
- (b) $5,485\,80 \times 10^{-4}$
- (c) $5,292 \times 10^{-11}$
- (d) $1,55 \times 10^{15}$

I-7. Que devient $1,206 \times 10^{-23}$ exprimé avec le facteur 10^{-25} ?

I-8. Que devient $5,560 \times 10^5$ exprimé avec le facteur 10^3 ?

UNITÉS

I-9. Quels sont les préfixes SI et leur symbole correspondant aux facteurs suivants :

- (a) 10^{-2}
- (b) 10^{-6}
- (c) 10^{-3}
- (d) 10^9
- (e) 10^6
- (f) 10^{-18}

I-10. Quels sont les facteurs correspondant aux préfixes SI suivants :

- (a) pico
- (b) giga
- (c) nano
- (d) kilo
- (e) atto
- (f) femto

I-11. Disposer les valeurs suivantes par ordre croissant de longueur :

- (a) 100 nm
- (b) 1,0 km
- (c) $1,0 \times 10^3$ cm
- (d) 100 pm
- (e) $1,00 \times 10^3$ nm
- (f) 1000 m

I-12. Disposer les valeurs suivantes par ordre croissant de volume :

- (a) 10 L
- (b) 100 mL
- (c) 0,10 ML
- (d) $1,0 \times 10^3$ μ L
- (e) 20 cL
- (f) $1,0 \times 10^4$ nL

I-13. Le volume d'une sphère se calcule par la formule $V = (4/3)\pi r^3$, où r désigne son rayon. Quel est le volume d'une sphère dont le rayon est de 100,0 pm. Donner le résultat en m^3 .

I-14. Le volume d'un cube se calcule par la formule $V = l^3$, où l désigne la longueur de ses arêtes. Quel est le volume d'un cube dont les arêtes sont de 200,0 pm. Donner le résultat en m^3 .

I-15. Le volume d'une masse de 20,4 g d'une certaine substance est de $1,5\text{ cm}^3$. Calculer sa masse volumique en $g \cdot \text{cm}^{-3}$.

I-16. La masse volumique de l'or est de $19,3\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Calculer en cm^3 le volume occupé par 31,1 g (1 once troy) d'or.

I-17. L'hélium a un point normal d'ébullition de 4,22 K. Exprimer cette température en degrés Celsius et en degrés Fahrenheit.

I-18. Le titre d'un roman bien connu de Brad Bradbury est *Fahrenheit 451*. Quel serait-il en a) degrés Celsius et b) en kelvins ?

CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

I-19. Quelle est la hauteur atteinte par un objet de 0,500 kg qu'on lance verticalement avec une vitesse de $55\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$? On négligera la résistance de l'air.

I-20. Si un alpiniste tombait accidentellement d'une hauteur de 375 m, quelle serait la vitesse qu'il atteindrait au moment de toucher le sol. On négligera la résistance de l'air.

I-21. Un sauteur à la perche de 75 kg court à une vitesse de $9,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ au moment où il s'élance. Quelle hauteur pourrait-il atteindre si toute son énergie devenait dirigée verticalement ?

I-22. Une voiture de 1200 kg roule à une vitesse de $89 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ au moment où son moteur s'arrête subitement au bas d'une côte. Quelle hauteur cette voiture peut-elle atteindre si l'on néglige la résistance de l'air et les forces de frottement ?

I-23. En moyenne, une maison individuelle aux États-Unis consomme $40 \text{ kW} \cdot \text{h}$ par jour d'énergie (se rappeler qu'un watt est équivalent à un joule par seconde). En admettant qu'un gallon de fioul domestique peut fournir 121 MJ d'énergie, combien faut-il de gallons US pour constituer l'apport énergétique journalier de cette maison. Qu'est-ce qui consomme le plus d'énergie, votre maison ou votre voiture ?

I-24. En admettant que l'électricité coûte $0,10 \$$ par $\text{kW} \cdot \text{h}$ aux États-Unis d'Amérique (se souvenir qu'un watt est équivalent à un joule par seconde), calculer le coût de fonctionnement par jour et par année d'un lampadaire à halogène de 300 W. Pourquoi pensez-vous que les lampes à halogène remplaceront progressivement les lampes à fluorescence pour un emploi domestique ?

POURCENTAGE D'ERREUR

I-25. On a trouvé que, pour un corps donné, le point de fusion est de $128,7^\circ\text{C}$. La valeur correcte trouvée dans le *CRC Handbook of Chemistry and Physics* est de $129,5^\circ\text{C}$. Quel est le pourcentage d'erreur ?

I-26. Un étudiant de physique a mesuré une vitesse du son de $352 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, mais la valeur classique dans les tables officielles de données est de $344 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Calculer le pourcentage d'erreur sur la mesure effectuée par l'étudiant.

I-27. Les indications portées sur l'emballage d'un flacon de comprimés de vitamine indiquent que chaque comprimé contient 150 mg de vitamine C. Au cours de mesures quantitatives, on a prélevé cinq échantillons pris au hasard et trouvé que ceux-ci contenaient respectivement 153,2 mg, 151,1 mg, 152,0 mg, 146,9 mg et 149,8 mg. Quel est le pourcentage d'erreur sur la teneur moyenne des comprimés si l'on se base sur la valeur indiquée sur le flacon, celle-ci étant supposée juste.

I-28. Un étudiant a mesuré la masse volumique du mercure liquide à 35°C et obtenu les résultats suivants :

Essai	Masses volumique/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
1	13,56
2	13,62
3	13,59

Utiliser le *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (que l'on peut trouver en bibliothèque), une autre table de données ou celles trouvées sur la toile, pour obtenir la vraie masse volumique du mercure à 35°C , puis calculer le pourcentage d'erreur sur cette expérience. N'oubliez pas de citer l'origine de la valeur prise comme référence.

CHIFFRES SIGNIFICATIFS

I-29. Déterminer le nombre de chiffres significatifs dans chacun des nombres suivants :

- (a) 0,0390
- (b) $6,022 \times 10^{23}$
- (c) $3,652 \times 10^{-5}$
- (d) 1 300 000 000, la population de la Chine en 2007.
- (e) un hexagone a 6 côtés.

I-30. Déterminer le nombre de chiffres significatifs dans chacun des nombres suivants :

- (a) 578
- (b) 0,000 578
- (c) Il y a 1000 m dans un kilomètre
- (d) $\pi = 3,141\,592\,65$
- (e) 93 000 000 miles (la distance de la Terre au Soleil)

I-31. Calculer z avec, dans chaque cas ci-dessous, le nombre correct de chiffres significatifs

- (a) $656,29 - 654 = z$
- (b) $(27,5)^3 = z$
- (c) $51/18,02 = z$
- (d) $1,187 \times 10^{-3} - 9,5 \times 10^{-4} = z$

I-32. Calculer z avec, dans chaque cas ci-dessous, le nombre correct de chiffres significatifs

- (a) $213,3642 + 17,54 + 32\,978 = z$
- (b) $373,26 - 119 = z$
- (c) $(6,626\,075) \times 10^{-34} (2,997\,925 \times 10^8) / (1,380\,66 \times 10^{-23}) = z$
- (d) $(9,109\,390) \times 10^{-31} + 1,672\,62 \times 10^{-27} - 1,674\,93 \times 10^{-27} (2,997\,925 \times 10^8)^2 = z$

I-33. L'aire de la surface d'un cercle est donnée par l'expression πr^2 , où r est le rayon. Calculer l'aire d'un

cercle de 20,55 cm de diamètre avec le nombre correct de chiffres significatifs. Exprimer votre réponse en cm^2 .

I-34. L'arête de la maille élémentaire cubique d'un cristal donné est de 133 pm. Calculer le volume d'une maille élémentaire avec le nombre correct de chiffres significatifs.

CONVERSION DES UNITÉS ET ANALYSE DIMENSIONNELLE

I-35. Effectuer les conversions d'unités suivantes :

- (a) 21,5 cm en m
- (b) $7,56 \times 10^{-6}$ m en μm
- (c) $1,2 \times 10^{-7}$ mg en pg
- (d) 15 000 000 kilobytes en gigabytes
- (e) $6,67 \text{ mm}^3$ en cm^3

I-36. Effectuer les conversions d'unités suivantes :

- (a) $1,259 \times 10^3$ J en kJ
- (b) $2,18 \times 10^{-18}$ J en aJ
- (c) 5,5 MJ en kJ
- (d) $7,5 \times 10^{-3}$ ns en fs
- (e) $2,0 \text{ m}^3$ en mL

I-37. À l'aide du tableau de la 3^e de couverture, effectuer les conversions d'unités suivantes et exprimer vos réponses avec le nombre correct de chiffres significatifs :

- (a) 1,00 litre en quarts de gallon
- (b) 186 000 miles par seconde en mètres par seconde
- (c) $8,3145 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ en $\text{cal} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

I-38. À l'aide du tableau de la 3^e de couverture, effectuer les conversions d'unités suivantes et exprimer vos réponses avec le nombre correct de chiffres significatifs :

- (a) 325 pieds en mètres
- (b) 1,54 angströms ($\text{\AA}$) en picomètres et en nanomètres
- (c) 175 livres en kilogrammes

I-39. Quel est le temps en minutes nécessaire à la lumière pour aller du Soleil à la Terre, sachant que le Soleil est environ à 93 millions de miles de la Terre ?

I-40. Dans les vieilles voitures aux États-Unis d'Amérique, le volume total des cylindres était exprimé en pouces cubes. Calculer le volume en litres d'un moteur de 454 pouces cubes.

I-41. Une radiateur de bureau produit chaque heure une énergie de 2440 BTU (énergie britannique de chaleur). Sachant que 1 BTU = 1,055 kJ (kilojoules), quelle énergie en mégajoules peut être produite annuellement sous forme de chaleur ? On supposera que la consommation est continue.

I-42. Un certain convertisseur MP3 convertit 75 kilobytes de musique par seconde à partir d'un disque CD classique. Quel temps en minutes serait nécessaire pour convertir 12,8 mégabytes de musique à partir d'un CD ?

I-43. Une moquette est vendue au prix de 28,99 \$ le yard carré. Quel son prix au mètre carré ? Quel sera le prix de 1475 pieds carrés ?

I-44. Utiliser les facteurs de conversion $100 \text{ cm} = 1 \text{ m}$, $1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ mL}$ et $1 \text{ L} = 1000 \text{ mL}$ pour déterminer le volume en millilitres correspondant à un mètre cube.

I-45. Un certain procédé permet de déposer $80,6 \mu\text{m}^3$ d'or par seconde sur une surface métallique. Quel sera le temps nécessaire pour réaliser, par ce procédé, un placage à $0,01 \mu\text{m}$ d'épaisseur d'une surface d'aire égale à $0,30 \text{ cm}^2$?

I-46. Une fiole Erlenmeyer de 200 mL pèse 215,8 g quand elle est vide et 297,1 g quand elle est remplie jusqu'au trait de jauge avec un alcool inconnu. Déterminer en $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ la masse volumique de l'alcool.

NOTATION DE GUGGENHEIM

I-47. Dans une expérience destinée à connaître la relation entre le volume d'un gaz et sa température, on a obtenu les résultats suivants : $0,0^\circ\text{C}$, 1,00 L ; 100°C , 1,37 L ; 200°C , 1,73 L ; 300°C , 2,10 L. Dresser un tableau de ces résultats en adoptant la notation de Guggenheim.

I-48. Dans une expérience destinée à mesurer l'accélération d'une voiture, les résultats ont été obtenus : au temps initial, véhicule au repos ; après 2,0 s, distance parcourue égale à 51 ft ; après 4,0 s, distance parcourue égale à 204 ft ; après 6,0 s, distance parcourue égale à 459 ft. Dresser un tableau de ces résultats en adoptant la notation de Guggenheim.

I-49. Sur une feuille papier millimétré et en prenant comme axes le temps et la concentration en notation de Guggenheim, porter graphiquement les données expérimentales du tableau suivant :

t/min	$[\text{N}_2\text{O}_5]/10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
0	1,24
23	0,62
46	0,31
69	0,16
92	0,080

I-50. Soient les données suivantes :

Temps/s	Hauteur/ft
6,09	0,87
11,65	1,40
18,11	1,99
30,41	4,24

Convertir les hauteurs en centimètres et dresser un nouveau tableau.

PROBLÈMES SUPPLÉMENTAIRES

I-51. Quelles sont parmi les grandeurs suivantes celles qui sont des propriétés extensives ?

- (a) masse (b) volume
(c) point d'ébullition (d) masse volumique

I-52. Les affirmations suivantes permettent caractériser l'élément plomb dans les banques de données :

- Sa masse moléculaire est de 207,2.
- Son symbole est Pb.
- C'est un métal blanc bleuté d'aspect brillant.
- Il a une masse volumique de $11,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.
- C'est un métal mou, facilement malléable, ductile et assez mauvais conducteur de la chaleur.
- Son point de fusion est de $327,462^\circ\text{C}$ et son point d'ébullition de 1749°C .

Classer ces propriétés en propriétés qualitatives et propriétés quantitatives.

I-53. Quelle est la différence entre la précision et l'exactitude ?

I-54. Quelle information le nombre de chiffres significatifs donne-t-il ?

I-55. Quelle information le pourcentage d'erreur donne-t-il ?

I-56. Peut-on avoir une précision de 100 % ?

I-57. Une règle pratique importante quand on utilise des calculs scientifiques consiste à prendre au moins un chiffre significatif de plus que ceux présents dans toutes les constantes physiques dont dépendent les données expérimentales. Pourquoi ?

I-58. On m'a raconté la plaisanterie suivante : Un couple visitait un musée lorsque le guide leur dit que la pierre lunaire qu'ils regardaient datait d'un million et six ans. Le couple fut surpris et le questionna sur la raison qui l'amenait à être si précis. Il répondit : « Je ne sais pas comment ce nombre a été obtenu, mais ce que je sais c'est que, lorsque j'ai commencé ce travail, il y a six ans, on m'a dit qu'elle avait un million d'années ; elle a donc maintenant un million et six ans. » En utilisant le concept de chiffre significatif, expliquer pourquoi le raisonnement du guide était erroné.

I-59. Plusieurs groupes étudiants essayent de mesurer séparément la masse volumique du plomb par différentes méthodes. Les résultats obtenus par chacun des groupes sont donnés ci-dessous.

Groupe	Masse volumique mesurée/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$		
	Essai 1	Essai 2	Essai 3
1	12,7	11,2	10,3
2	11,5	11,4	11,4
3	10,9	11,3	11,1

Les banques de données donnent la masse volumique égale à $11,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. a) Pour chacun des trois groupes, calculer la masse volumique moyenne du plomb obtenue par le groupe et le pourcentage d'erreur de la moyenne par rapport à la vraie valeur, le tout avec les nombres corrects de chiffres significatifs. b) Lequel de ces groupes a fourni les résultats les plus exacts ? Lequel a donné les résultats les plus précis ?

I-60. a) En utilisant toutes les données du problème précédent, calculer avec le nombre correct de chiffres significatifs la moyenne globale de la masse volumique expérimentale du plomb et le pourcentage d'erreur global. b) Comparer la précision et l'exactitude pour l'ensemble des données avec celles obtenus dans le problème précédent par les groupes individuels.

I-61. Estimer le volume de liquide dans cette éprouvette graduée avec le nombre correct de chiffres significatifs.



I-62. Estimer la température indiquée par ce thermomètre avec le nombre correct de chiffres significatifs.



I-63. L'acide sulfurique commercial « pour laboratoire » contient 96,7 % en masse d'acide sulfurique, le reste étant de l'eau. Sa masse volumique est de $1,845 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Calculer la masse en kilogrammes et en livres de l'acide sulfurique dans une bouteille de 2,20 L du produit commercial.

I-64. Calculer le volume de 55 g de benzène, sachant que la masse volumique du benzène est de $0,879 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

I-65. Selon les règlements de la fédération de baseball, la masse de la balle doit être comprise entre 5 et $5\frac{1}{4}$ onces avoirdupois⁸ et sa circonférence être comprise entre 9 et $9\frac{1}{4}$ pouces. Calculer entre quelles limites doit se trouver la masse volumique de la balle en onces par pouce cube ($\text{oz av} \cdot \text{in}^{-3}$) pour être conforme aux règlements de la fédération.

⁸ N.d.t. : L'once avoirdupois (symbole oz av) est égale au seizième de la livre avoirdupois et vaut 28,349 g dans le Système avoirdupois. D'origine française, cette unité continue à être utilisée dans les nations du Commonwealth et par les États-Unis d'Amérique.

I-66. La nouvelle tour de la Liberté que l'on construit à Manhattan est prévue pour avoir une hauteur de 1776 ft ; elle deviendra le gratte-ciel le plus haut du monde. Calculer l'énergie qui sera nécessaire pour faire monter au sommet de la tour un homme de 180 livres par l'un des ascenseurs.

I-67. En admettant que l'électricité coûte 0,10 \$ aux États-Unis d'Amérique, calculer l'économie réalisée sur le coût annuel due au remplacement d'une ampoule de 100 watts à incandescence utilisée six heures par jour dans un réverbère par une ampoule à économie d'énergie de 25 watts ayant la même puissance lumineuse ? Une lampe classique à incandescence coûte 0,89 \$ et a une durée de vie d'une année environ, tandis qu'une ampoule fluorescente à économie d'énergie coûte 3,49 \$ et dure environ 3 ans. Est-ce que le surcoût de l'ampoule à économie d'énergie est justifié ?

I-68. Actuellement, le meilleur panneau solaire disponible dans le commerce a environ un rendement de 18 % pour la conversion de l'énergie solaire en électricité. Une maison individuelle aux États-Unis utilise en moyenne 40 kW · h d'électricité par jour et l'électricité coûte 0,10 \$ par kW · h. a) En supposant que l'ensoleillement soit suffisant 8 heures par jour avec un éclairage énergétique moyen de $0,5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, calculer l'aire de la surface minimum nécessaire pour assurer les besoins de la maison en électricité. Est-ce qu'un panneau de la taille voulue peut occuper le toit de la maison ? b) Si le coût d'installation est de 15 000 \$ pour un panneau solaire de cette taille, combien de temps sera nécessaire pour avoir un retour sur investissement ? On supposera que le coût de l'énergie restera la même pendant cette durée.

I-69. Le *cheval-vapeur* est une unité de puissance, un cheval-vapeur (1 hp) étant équivalent à 745 W. Le record du monde du monter à la corde de 25 m fut établi par Garvin Smith à Los Angeles en 1947 ; il monta la corde de 25 m en 4,7 s. En supposant que Mr Smith avait une masse corporelle de 65 kg, calculer la puissance moyenne (en watts et en chevaux-vapeur) qu'il développa durant cette montée.

I-70. L'équation certainement la plus emblématique de la science est la relation $E = mc^2$; elle provient de la théorie de la relativité d'Einstein. Einstein fut le premier à montrer que la masse peut être convertie en énergie et que, réciproquement, l'énergie peut être convertie en masse. Cette équation relie la quantité d'énergie produite quand la masse d'un système décroît, ou, inversement, la quantité d'énergie nécessaire pour accroître la masse d'un système. Dans chaque cas, l'équation relie le changement d'énergie au changement de masse, et, avec les notations utilisées dans ce chapitre, la relation d'Einstein s'écrit :

$$\Delta E = c^2 \Delta m$$

où ΔE est le changement d'énergie et Δm le changement de masse. Calculer la quantité d'énergie produite quand 1,0 g est complètement converti en énergie.

I-71. La vitesse du son au niveau de la mer est d'environ 770 mph (770 miles par heure). Calculer le temps nécessaire au son pour traverser 1,00 miles au niveau de la mer et comparer cette valeur avec le temps nécessaire à la lumière pour couvrir la même distance.

I-72. La masse volumique de l'air au niveau de la mer à 98 °F est environ de $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. Le volume des poumons d'un homme adulte après inspiration est d'environ 6 L. Sachant que l'air est constitué à 20 % en masse d'oxygène, calculer la masse d'oxygène dans vos poumons.

I-73. La masse volumique de l'or pur est de $19,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ à 20 °C. Un certain objet qui semble être en or a une masse de 365 g et un volume de 26,5 mL. Est-ce que cet objet a des chances d'être en or ?

I-74. La température de la flamme d'un simple bec Bunsen est d'environ 1200 °C. Calculer les températures Fahrenheit et Kelvin correspondantes.

I-75. Établir la relation suivante entre les échelles de température Kelvin et Fahrenheit :

$$T \text{ (en K)} = 255,37 + \frac{5}{9}t \text{ (en } ^\circ\text{F)}.$$

Quelle est la température Fahrenheit qui correspond au zéro absolu sur l'échelle Kelvin de température ?

I-76. Soit un récipient qui peut contenir jusqu'à 6780 g de mercure mais seulement jusqu'à 797 g de tétrachlorure de carbone. Sachant que la masse volumique du mercure est de $13,6 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$, quelle est la masse volumique du tétrachlorure de carbone ?

I-77. Il y a exactement 640 acres⁹ dans un mile carré. Calculer le nombre de mètres carrés dans un acre.

I-78. L'hectare est une unité métrique correspondant à un carré de 100 mètres de côté. Utiliser le résultat du problème précédent pour calculer le nombre d'acres dans un hectare.

I-79. Les aérogels sont des substances solides de masse volumique extrêmement faible. Ils ont des propriétés remarquables comme, par exemple, celle d'être les meilleurs isolants connus. La NASA a récemment utilisé un aérogel pour piéger des particules de poussière provenant de la queue d'une comète, ce qui a permis de l'amener sur Terre. Quelle est la masse en kilogrammes d'un mètre cube d'un aérogel dont la masse volumique est de $1,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$?

I-80. L'aluminium a une masse volumique de $2,70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Considérons une feuille d'aluminium rec-

tangulaire mesurant 20,5 cm de longueur et 15,2 cm de largeur et dont la masse est de 1,683 g. Quelle est en millimètres l'épaisseur de la feuille ?

I-81. Le cuivre est un métal très ductile, ce qui signifie qu'il peut être étiré sous forme de fils fins. Quelle longueur en mètres de fil cylindrique de gauge 10 (2,588 27 mm de diamètre)¹⁰ peut-on fabriquer avec un bloc de cuivre de 10,0 kg dont la masse volumique est de $8,96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$? Combien de fil de gauge 24 (0,5105 mm de diamètre) peut-on obtenir à partir du même bloc.

I-82. Concevoir une expérience permettant de déterminer le volume total de votre corps et sa masse volumique.

I-83. Sachant que l'air dans un immeuble possède une masse volumique de $1,184 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, quelle est la masse d'air (en livres) dans une pièce de 30,0 ft et 7,0 in de large, 41,0 ft de long et 9,00 ft de hauteur ?

I-84. D'après les indications du fabricant, 1,0 gal US d'une peinture latex acrylique est sensé pouvoir recouvrir une surface de 350 ft² d'une pièce intérieure. Quelle l'épaisseur moyenne (en millimètres) de la couche de peinture ?

I-85. (*) L'atmosphère externe de Jupiter contient des nuages gelés d'ammoniac. Supposons qu'un habitant de Jupiter ait créé une échelle de température fondée sur le point de fusion de l'ammoniac à 0 °J [degrés Jove, Jove (ou Jupiter) étant en latin le Dieu mythologique du ciel] et sur son point d'ébullition à 100 °J, qui correspondent respectivement à -77,7 °C et -33,4 °C. Cette échelle est divisée en 100 degrés régulièrement espacés. a) Établir la formule de conversion entre les degrés Jove et les degrés Celsius. b) Quel est l'écart entre deux degrés Jove comparé à celui entre deux degrés Celsius ? c) Quels sont en degrés Jove le point normal de congélation de l'eau et son point normal d'ébullition.

I-86. (*) Le penny US était à l'origine entièrement frappé en cuivre, mais, après 1857, il fut fabriqué en différents métaux en raison du coût élevé du cuivre. Depuis 1982, il est constitué de zinc plaqué d'une fine couche de cuivre ; il pèse 2,500 g, son diamètre est de 19,05 mm et son épaisseur moyenne de 1,224 mm. Sachant que les masses volumiques du zinc et du cuivre sont respectivement de $8,96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ et de $7,13 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, déterminer le pourcentage massique de cuivre dans un penny actuel.

¹⁰ N.d.t. : Le gauge est une unité américaine permettant notamment de mesurer le diamètre des fils électriques. Il est également parfois utilisé en français. On trouve aussi cette unité dans le domaine scientifique pour mesurer notamment le diamètre des microseringues. Plus précisément il s'agit de l'*American Wire Gauge* (abrégé en AWG, également connu sous le nom de *Brown and Sharp* (*B&S*) *Wire Gauge*). La valeur numérique de l'unité représente le nombre d'opérations nécessaires pour produire un câble d'un diamètre donné. Plus le câble est fin, plus le nombre de passages dans la machine est grand.

⁹ N.d.t. : Il s'agit ici de l'acre anglo-saxonne, définie avec une chaîne de 66 ft (soit 20,1168 mètres) et donc égale à $66 \times 660 = 43\,560 \text{ ft}^2$ ou $4046,856\,4224 \text{ m}^2$.

INDEX

La lettre *t* indique un tableau dans le texte ou les annexes.

A

2-aminobutane, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)$

$\text{NH}_2(aq)$ 758

abaissement de (la) pression de
vapeur 574

abaissement du point de
congélation 579

abaissement du point de fusion 579

absorption multiphonique 135

accélération due à la pesanteur 14

accepteur de doublets
d'électrons 730

accepteur de protons 730

acétaldéhyde, CH_3CHO 211, 358

acétate 317

(ion ~) 312*t*, 736, A-20*t*

de plomb(II) A-20*t*

de potassium 582

de vinyle

production mondiale A-39*t*

double de calcium et de magné-
sium 582

acétone

entropie standard 868

production mondiale A-39*t*

acétylène

entropie standard 867

propriétés 441

structure 295

acétylène, C_2H_2 212

acétylène, $\text{C}_2\text{H}_2(g)$, synthèse 484

acide 315

binaire 318

carboxylique 318, 735

conjugué d'une base 754

d'Arrhenius 729

de Brønsted-Lowry 730

de Lewis 730, 731

diprotique (diprotique) 764

faible 733

fort 732, 734*t*

monoprotique

(monoprotique) 316, 739

organique 318, 735

polyprotique (polyprotique) 764

triprotique (triprotique) 764

acide acétique, CH_3COOH 317, 318,

533, 736, A-22*t*

courbe de titrage par

$\text{NaOH}(aq)$ 794

dissociation acide 580

formule 736

production mondiale A-39

propriétés 403

acide acétylsalicylique (aspirine)

formule 750

acide benzoïque, $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$

formule 546

propriétés 506

acide bromhydrique, HBr 319, 734

réaction 404

acide carbonique, H_2CO_3 317

acide chloreux, HClO_2 318

acide chlorhydrique, HCl 319, 734

courbe de titrage par

$\text{NaOH}(aq)$ 787

production mondiale A-38*t*

propriétés 318, 403

réactions 332, 334, 405

acide chlorique, HClO_3 318

acide éthanoïque

Voir acide acétique

acide fluorhydrique, HF A-22

dissociation acide 582

acide formique, HCHO_2 318

formule 736

acide hypochloreux, $\text{HClO}(aq)$ 318

acide iodhydrique, HI 319, 734

acide méthanoïque

Voir acide formique

acide nitreux, HNO_2 A-22*t*

acide nitrique, HNO_3 317, A-22

production mondiale A-38*t*

acide oxalique

formule 410, 737

réaction 410

acide perchlorique,

HClO_4 317, 318, A-22

nombres d'oxydation 901

acide phosphorique, H_3PO_4 317

courbe de titrage par $\text{NaOH}(aq)$ 806

production mondiale A-38*t*

acide sulfhydrique 319, A-22

acide sulfurique, H_2SO_4 317

production mondiale A-38*t*

propriétés 397

acide tétraaurochlorique(III)

utilisation 993, 14

acier

à haute teneur en carbone 989

allié 988

doux 988

inoxydable 989

mi-dur 989

non allié 988

acrylonitrile

production mondiale A-39*t*

actinides 93, 96, 161

actinium, Ac 93

ADN 552

ADP, adénosine diphosphate 668

adsorption 667

aérogel 39

aérosol 558

affinité électronique 185

deuxième 186

première 185

agent

dessiccant 322

émulsifiant 559

oxydant 337, 906, 934, 937

réducteur 337, 906, 934, 937

tensioactif 535

air (composition de l'~) 443

aire, A A-17

alanine 257

alcalin 86

alcène (mécanisme d'hydratation

des ~) 664

alcool éthylique 358

Voir éthanol

alcool isopropylique 357

Voir propan-2-ol

aliments (contenu énergétique

des ~) 490

aluminium, Al 24, 88, 157

aluminium, Al(s) 476

fabrication 965, 966

réactions 325

aluminium (ion ~) 402

aluminothermie 379

amidure (ion ~), NH_2^- 204

ammoniac, $\text{NH}_3(aq)$ 398

courbe de titrage

par $\text{HCl}(aq)$ 802-805

ammoniac, $\text{NH}_3(g)$ 398

équilibre de formation

de l'~ 366, 371, 443, 691, 696,

710, 711, 712

préparation 436

production mondiale A-38*t*

propriétés 403

réaction avec $\text{Cl}_2(g)$ 489

structure 287
 (synthèse de l'~) 366, 371, 443, 691, 696, 710, 711, 712
 ammoniac, $\text{NH}_3(l)$
 enthalpie de vaporisation 528
 ammoniacque 72
 ammonium (ion ~), NH_4^+ 311, 312, A-20*t*
 dissociation acide 755
 nombres d'oxydation 902
 géométrie 240
 structure 202, 284, 285, 311
 ampère, A 932, 933
 Ampère, André-Marie 932
 amu (unité de masse atomique) 53
 analyse
 dimensionnelle 25
 élémentaire 357, 362, 363, 440, 441
 par combustion 363, 364
 qualitative 838
 quantitative 839
 angle de liaisons 238, 242
 angle tétraédrique 236, 237
 angström, angström, Å A-17
 anhydride phtalique
 production mondiale A-39*t*
 aniline, $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2(l)$ 752
 production mondiale A-39*t*
 usage et propriétés 754
 anion 68, 174
 anions (noms des ~) 69
 anode 936
 antigels 579
 antilogarithme 618, A-5
 antimoine, Sb 98
 approximation de l'état
 stationnaire 670
 argent, Ag 95, 160, 177, 994
 argent, Ag(s), réactions 325
 argon, Ar 44, 157, 158
 arrangement périodique 90
 Arrhenius, Svante 170, 729
 arsenic, As 43, 92, 160
 arsénite de cuivre(II)
 utilisation 991, 12
 aspirine 352
 atmosphère normale, atm 424, 425, A-17, A-18
 atome 41, 44, 108, 109, 154, 422
 atome central 245, 246
 atome d'hydrogène acide 316, 735
 atome neutre 62
 atome polyélectronique 150
 atomes liants 1003
 ATP, adénosine triphosphate 668
 atto-, a 8, A-16
 attojoule, aJ 14

attraction dipôle-dipôle 528
 attraction moléculaire 458
 autoprotonation de l'eau (réaction d')
 effets de température 885
 Avogadro, Amedeo 41, 353, 420, 431
 AX_2E_2 (type ~) (coudé) 244, 245, 246
 AX_2E_3 (type ~) (linéaire) 245, 246, 249, 251
 AX_2E (type ~) (coudé) 245, 246
 AX_2 (type ~) (linéaire) 245, 246
 AX_3E_2 (type ~) (en forme de T) 245, 246, 249
 AX_3E_3 (type ~) (en forme de T) 251, 252
 AX_3E (type ~) (pyramidal à base triangulaire) 244, 245, 246
 AX_3 (type ~) (plan trigonal) 245, 246
 AX_4E_2 (type ~) (plan carré) 245, 246, 251, 252
 AX_4E (type ~) (en balançoire) 245, 246, 249
 AX_4 (type ~) (tétraédrique) 245, 246
 AX_5E (type ~) (pyramidal à base carrée) 245, 246, 251, 252
 AX_5 (type ~) (bipyramidal trigonal) 245, 246, 528
 AX_6 (type ~) (octaédrique) 245, 246, 251, 252, 272, 273, 289, 528
 AXE_3 (type ~) (linéaire) 250
 axe internucléaire 245, 246, 270, 272, 273
 AX_mE_n 244, 246, 247
 azéotrope 590
 azométhane
 cinétique de décomposition 613
 décomposition 601
 azote, N 155, 156
 azote, $\text{N}_2(g)$ 43, 486
 production mondiale A-38*t*
 réactions 359, 443
 structure 209
 vitesse moléculaire 452
 azoture de sodium, réactions 321

B

balances 9
 balançoire (forme en ~) 249
 Balmer, Johann 115
 bande de conduction 555
 bande de valence 554
 bande interdite 555
 bar 425, A-17
 barboteur aux sels chromeux 985
 baromètre 423, 427
 baryum, Ba 86, 117, 159
 baryum, Ba(s), réactions 325
 base 315
 d'Arrhenius 729
 de Brønsted-Lowry 730
 de Lewis 730, 731
 faible 733
 forte 733
 base conjuguée d'un acide 754
 bases fortes dans l'eau 734*t*
 Becquerel, Antoine-Henri 40, 60
 benzène, C_6H_6 215
 production mondiale A-39*t*
 propriétés 587
 résonance 216, 296-298
 structure 215, 296-298
 benzoate d'argent
 équilibre de solubilité 829
 benzoate de sodium
 équilibre de solubilité 828
 béryllium, Be 108, 110, 159
 bicarbonate de sodium
Voir hydrogénocarbonate de sodium 767
 bipyramidale à base
 triangulaire 241
 bipyramidal trigonal 241
 bismuth, Bi 98
 Bohr, Niels 104, 122
 Boltzmann, Ludwig 450
 bombe calorimétrique 503
 bore, B 43, 94, 154
 Born, Max 136
 Boyle, Robert 426
 bromate d'argent
 équilibre de solubilité 815, 816, 821, 823, 824, 825
 bromate (ion)
 réaction redox 916
 brome, Br 160
 brome, Br_2 43, 87, 199,
 préparation 404
 bromure d'argent
 utilisation 993, 14
 bromure de diméthylammonium 751
 bromure de nitrosyle
 cinétique de décomposition 632
 bromure de potassium, propriétés 396
 bromure d'hydrogène, HBr 202, 227
 bromure d'hydrogène 319
 bromure d'iode
 nombre d'oxydation 904
 Brønsted, Johannes 730
 bronze 991
 burette 409
 butadiène
 production mondiale A-39*t*

butane 482
butane-1,4-diamine (putrescine) 751
butanol
production mondiale A-39t

C

11-cis-rétinal 294
cadmium, Cd 117, 161
calcium, Ca 86, 117, 159
calcium, Ca(s), réactivité 86, 325
calcul différentiel et intégral 630
calorie (cal), unité 490, A-17
calorie des nutritionnistes, Cal 490, A-17
calorimètre 501
Cannizaro, Stanislao 420, 443
capacité calorifique 496
à volume constant 504
d'un calorimètre 502, 503
massique 499
molaire 497
capacités calorifiques molaires 498t
caprolactame
production mondiale A-39t
caractère métallique 94
caractère partiellement ionique 225
carbonate (ion ~), CO_3^{2-} 312, 317, A-20t
formule 214
géométrie 248
carbonate de calcium 321
équilibre de décomposition 686, 687
carbonate de sodium
production mondiale A-38
carbonate de zinc
utilisation, minéral 991, 12
carbone-12 353, 355
carbone-14
(période radioactive du ~) 628
carbone, C 43, 54, 109, 157
carbone, C(s) 486
oxydation en $\text{CO}(g)$ 483
carbone (noir de)
production mondiale A-38t
carburant 474, 491
Carnot, Sadi 857
castine 987
catalyse
hétérogène 666
homogène 666
catalyseur 663, 664, 666
catalyseur hétérogène 667
cathode 936
cation 68, 174
cations (nom des ~) 69
célérité de la lumière 113

cellule de concentration 952
cellule d'électrolyse 935, 960
cellule électrochimique 935
cellule étalon de Weston 940, 975
cellule galvanique 935
plomb-argent 937
zinc-cuivre 935, 941
zinc-hydrogène 939
centi-, c 8, A-16
centimètre cube 9
césium, Cs 90, 127
chaîne électrochimique 938
chalcopyrite, CuFeS_2 376
chaleur 471
chaleur latente molaire
de fusion 522
de vaporisation 522
champ magnétique 146
changement d'enthalpie 474, 475
changement d'entropie 857
changement d'état physique 522
changement et variation 470
changement (variation) d'énergie 472
charge d'un électron 933
charge du noyau 41
charge électrique 932
charge électrique élémentaire 942
charge formelle 205, 206, 207, 208, 214, 216, 219
charge nette d'un ion 900, 901
charge partielle, δ 225
Charles, Jacques Alexandre César 427
cheval-vapeur 38
chiffre significatif 20, 22, 23, 24, 25, 26
chiffres significatifs 429, 882, A-5
chiffres significatifs et logarithmes 618
chimie analytique 116
chimie nucléaire 601
chimie structurale 237
chirales 257
chiralité 1007
chlorate
(ion ~) 312, 313, A-20t
chlorate de potassium, réactions 321, 436
chlorate de sodium
production mondiale A-38t
chlors, Cl 98, 157
chlors, Cl_2 43, 87, 198, 909
formule 199
chlors, $\text{Cl}_2(g)$ 439, 486
formule 199
production mondiale A-38t

réaction avec Sn(s) 479
chlorite
(ion ~) 312, 313, A-20t
chloroforme, CHCl_3 203, 240
chlorométhane, CH_3Cl 656
chlorure d'ammonium, NH_4Cl 312, A-20
propriétés 310
réaction 436
chlorure d'argent
équilibre de solubilité 825
précipitation 376, 412, 502
chlorure de baryum, propriétés 403
chlorure de béryllium, géométrie 238
chlorure de brome
nombre d'oxydation 904
chlorure de calcium 400, 401
chlorure de calcium hydraté, propriétés 395
chlorure de calcium, propriétés 402
chlorure de césium
nombre d'oxydation 901
chlorure de cuivre(II), propriétés 403
chlorure de fer(III)
utilisation 986, 7
chlorure de mercure(I) A-20t
chlorure de mercure(I), calomel
utilisation 993, 14
chlorure de mercure(II) 400
utilisation 993, 14
propriétés 403
réactions 401
chlorure de nickel(II)
utilisation 989, 10
chlorure de nitrosyle
nombre d'oxydation 903, 904
chlorure de phosphoryle, POCl_3 219
chlorure de plomb(II) A-20t
chlorure de potassium, propriétés 395, 403
chlorure de sodium 351
propriétés 309, 393, 394, 395
chlorure de sodium, NaCl (structure cristalline de ~) 189
chlorure de sulfuryle
cinétique de décomposition 612
chlorure de sulfuryle, SO_2Cl_2 221
chlorure de thionyle, géométrie 248
chlorure de vinyle
production mondiale A-39t
chlorure de zinc, ZnCl_2 A-19t
chlorure de zinc(II)
structure 282
utilisation 12, 991
chlorure de zinc, structure 282

- chlorure d'hydrogène, HCl 54, 202, 227, 319, A-21
 équilibre de formation 694, 701, 702
 chlorure d'or(III), propriétés 401
 cholestérol 556
 chromate
 (ion ~) A-20t
 chromate d'argent Ag_2CrO_4 407
 équilibre de solubilité 818, 832
 chromate de baryum
 équilibre de solubilité 816, 817
 chromate (ion) 312
 chrome, Cr 95, 160, 984
 nombres d'oxydation 980, 984
 chrome, Cr(s), réactivité 325
 circuit extérieur 935, 936
 Clausius, Rudolf 857
 cobalt, Co 60, 160, 980
 cobalt-60
 désintégration radio-active 626
 cobalt, Co(s), réactivité 325
 coefficient d'Avogadro 353
 coefficient directeur A-11
 coefficient stœchiométrique 81, 366, 367, 476, 606
 coefficient stœchiométrique des électrons 963
 coke 987
 collision élastique 450
 collision réactive 652
 collisions 520
 colloïdes 557
 combinaison de constantes
 d'équilibre 703
 combinaison (réaction de ~) 308, 309
 combustion 474, 504, 505
 combustion du carbone 54
 combustion (réaction de ~) 308
 complexation
 réaction de ~ 823
 complexations des ions
 et séparation 827
 complexe activé 656
 complexe donneur-accepteur 731
 complexe enzyme-substrat 669
 complexe neutre 998
 complexe octaèdre 1009
 complexe octaédrique 997, 998, 1006, 1008, 1009
 complexes carrés 1005
 complexes de coordination 997
 complexes octaédriques 1005
 complexes plans carrés 999
 composé 41, 54
 composé binaire 55
 composé covalent 171, 308, 332, 334, 399
 composé déficient en électron 216, 218
 composé ionique 171, 309, 399
 composé ionique binaire 176
 composé organique 98, 205, 400
 composition élémentaire 363
 compressibilité 422
 concentration 395
 à l'équilibre 689
 stœchiométrique 742, 778
 concrétions calcaires 829
 condensation 48
 condition quantique 123
 conditions ambiantes de température et de pression 437
 conditions normales de température et de pression 437
 conditions standards de température et de pression 437
 conditions standards 877
 conductance 401
 conducteur de l'électricité 399
 solution aqueuse de NaCl 399
 conductivité électrique 401
 conductivité molaire
 (unités : $\text{S} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$) 401, 402, 403
 configuration à 18 électrons 177
 configuration bas spin 1013
 configuration de gaz noble 179
 configuration d'état fondamental 274
 configuration électronique 153, 157, 159
 des gaz nobles 174, 175, 199
 des ions 158, 174, 182
 des atomes 158
 configuration électronique externe 980
 configuration haut spin 1013
 configuration moléculaire 242, 246
 configurations électroniques 154
 configuration spatiale 242
 conservation des orbitales
 (principe de ~) 283
 constante cryométrique 579
 constante cryoscopique 579
 constante d'acidité 744
 constante d'autoprotolyse 731
 constante de dissociation acide 744
 constante de Faraday 942
 constante de la loi de Henry 590, 591
 pour quelques gaz 591t
 constante de Michaelis-Menten 670
 constante de Planck 117, 138
 constante de produit de solubilité 816
 constante de produit ionique de l'eau 731
 constante d'équilibre
 et coefficients stœchiométriques 689
 en concentrations, K_c 690
 en pressions, K_p 690
 de formation d'un ion complexe, K_f 823
 de solubilité 816
 constante de Rydberg 115
 constante des gaz parfaits 434
 constante de vitesse 610, 651
 constante de vitesse et température 657, 658
 constante ébulliométrique 578
 constante (molaire) de gaz 434
 constante (molaire) des gaz (valeurs de ~) 434
 constantes de van der Waals 458
 constantes thermodynamiques
 d'équilibre 744, 752, 816, 875, 876, 885
 constituant 393
 contre-ion 997
 convention de signe pour le transfert de chaleur
 et de travail 470-473
 convergence d'un calcul A-10
 convertisseur 988
 corps composé 41
 corps noir 118
 corps noir (rayonnement du ~) 116, 117
 corps simple 41, 44
 corrosion 920
 couche 108, 109, 110
 couche de valence 222
 couche externe 108, 109, 158, 162
 couche interne 162
 coulomb, C 31, 60, 932, A-17
 Coulomb, Charles-Augustin de 186
 couple acide-base 754
 courbe de chauffage
 de la glace à la vapeur d'eau 521, 522
 courbe de titrage 786
CRC Handbook of Chemistry and Physics 18, 19, 24
 cristal 44, 175
 atomique 551
 covalent 552
 ionique 551
 liquide 556
 métallique 554
 moléculaire 175, 551
 critères de Gibbs de spontanéité
 d'une réaction 870, 871t

critères de formation d'un précipité 831*t*
 cryolite 74
 cuivre, Cu 95, 160, 990
 cuivre, Cu(s) 351, 980, 990
 oxydation 482
 réactions 325
 cumène
 production mondiale A-39*t*
 Curie, Marie 40, 60
 Curie, Pierre 40, 60
 cyanure 400
 (ion ~) A-20*t*
 cyanure de nickel(II)
 utilisation 989, 10
 cyanure de potassium, KCN 312
 cyanure d'hydrogène, HCN 211, 247
 nombres d'oxydation 903
 structure 296
 cyanure (ion) 312
 cyclobutane
 cinétique d'isomérisation 619
 cyclohexane
 production mondiale A-39*t*

D

1,2-dichloroéthane 363
 1,2-dichloroéthène, structure 293
 Dalton, John 50, 51, 54
 (théorie atomique de ~) 81
 (théorie de ~) 41
 dalton (unité) 53
 datation au carbone-14 628, 629
 datation des roches par le couple uranium-plomb 628
 datation par radiochronologie 628
 datation radiométrique 628
 Davisson, Clinton Joseph 121
 Davy, Humphrey 934
 De Broglie, Louis-Victor 120
 déca-, da 56, A-16, A-21
 déci-, d A-16
 décomposition (réaction de ~) 320
 dégénérées (orbitales ~) 142, 273
 degré Celsius 430
 degré d'hygrométrie 540
 degré d'oxydation 900
 de Hevesy, George Charles 814, 820
 délocalisée (charge ~) 213
 délocalisée (orbitale ~) 278
 demi-réaction (oxydoréduction) 908
 demi-réaction (temps de ~) 620
 de réduction 908, 938, 939
 d'oxydation 908, 938, 939
 demi-vie 620, 625
 demi-vies de radio-isotopes 625
 densité 11

denticité d'un ligand 1003
 désintégration radioactive 623, 625, 651
 désordre de position 860
 désordre thermique 861
 deutérium, D 64
 deuxième ionisation 108
 deuxième principe de la thermodynamique 857, 858
 di- 56, A-21
 diagramme de Lineweaver-Burk 671
 diagramme d'énergie d'activation 654, 655, 656
 diagramme de niveaux de probabilité 268
 diagramme de phases 541
 diagramme de phases de l'eau 542, 576
 diagramme de phases du dioxyde de carbone 544
 diagramme de points 141, 143
 diagramme enthalpique 475
 diamagnétique 277, 1013
 diamant 552
 diamètres moléculaires 456
 diborane, B₂H₆(g) 486
 diborane, enthalpie standard de formation 486
 dichlorodifluorométhane CCl₂F₂ 562
 dichloriodure (ion ~)
 nombre d'oxydation 904
 dichlorométhane, CH₂Cl₂ 235, 236
 géométrie 236, 237, 254
 propriétés 254
 dichlorure d'éthylène 363
 production mondiale A-39*t*
 dichromate de potassium 919, A-20
 agent oxydant 910
 dichromate (ion ~) 312, A-20*t*
 agent oxydant 984
 nombre d'oxydation 902
 différence de potentiel électrique tension (*U*) 932, A-17
 différence entre $\Delta_r H^\circ$ et $\Delta_r U^\circ$ 477
 diffraction de rayons X 121, 545, 546
 diffraction électronique 121
 difluorure de xénon, XeF₂ 219
 difluorure d'oxygène, OF₂ 200, 207, 226
 dilution 398
 dimensions 11
 dimérisation
 (cinétique d'une réaction de ~) 634
 diméthylamine
 formule 751
 diméthylammonium
 (ion ~) 751

dioxyde d'azote, NO₂
 cinétique de décomposition 613, 651
 cinétique de réaction avec CO(g) 631, 658
 dissociation en éléments 482
 équilibre de décomposition 704
 réactions 635, 651
 structure 57, 218
 dioxyde de carbone, CO₂ 54, 210, 227, 228, 244
 réduction par l'hydrogène 712
 enthalpie standard de formation 484
 formation 334
 géométrie 247
 propriétés 526
 réaction de formation 483
 réactions 364
 dioxyde d'azote
 cinétique de décomposition 605
 dioxyde de manganèse, réactions 404
 dioxyde de soufre, SO₂ 214
 oxydation catalysée 667
 géométrie 249
 réactions 480
 dioxyde d'étain, réaction 487
 dioxygène, O₂ 41, 44
 direction de spontanéité d'une réaction 716
 dismutation 992
 dispersions colloïdales 557
 dissociation acide
 réaction de ~ 743
 dissocié 400
 dissolution 46
 distance internucléaire 270
 distillation 48
 distillation fractionnée 49, 589
 distribution de Maxwell-Boltzmann 450
 distribution statistique des vitesses moléculaires 449
 données
 qualitatives 3
 quantitatives 3
 donneur de doublets d'électrons 730
 donneur d'électrons 337
 donneur de protons 730
d (orbitale ~) 142
 double déplacement (réaction de ~) 328, 405
 double liaison 209
 double liaison carbone-carbone 292
 doublet d'électrons 108, 109, 730
 doublet libre 198, 218, 242, 243

doublet non liant 198.

Voir doublet libre

droite de meilleur ajustement A-13

dualité onde-particule 120, 122

ductile 42, 989

E

eau 538

structure 286

eau de Javel 965

eau de mer 578, 584

eau d'hydratation 322

eau, enthalpie de vaporisation 528

eau, H_2O 54, 55, 57

eau, $H_2O(l)$

enthalpie de vaporisation 885

enthalpie molaire de vaporisation 864

entropie molaire de vaporisation 522, 865

enthalpie standard de formation 484

eau, $H_2O(s)$

enthalpie molaire de fusion 522, 864, 865

eau lourde 64, 589

eau régale 835

écart au gaz parfait 457

échelle de Celsius 428

échelle de réactivité des métaux 325

échelle de température 9

absolue 427

Celsius, °C 10

de Kelvin 428

Fahrenheit, °F 10

échelle moléculaire 421, 422, 426, 427, 653

éclatement des orbitales d 1008

écrans à cristaux liquides 557

écriture scientifique des nombres 6, A-1

effet de capillarité 535

effet d'ion commun 822

effet photoélectrique 118, 120

effet Tyndall 559

effusion des gaz 453

Einstein, Albert 4, 38, 118, 119

einstein (unité) 132

électricité 172

électrode 935

à gaz 939

argent-chlorure d'argent 956

au calomel 955

de verre 956

standard à hydrogène (ESH) 946, 956

électrodépôt d'argent 961

électrodépôt de cuivre 961

électrolyse 960

électrolyse de l'eau 933

électrolyse du nitrate d'argent 961

électrolyse du sulfate de cuivre 961

électrolyte 399, 569

faible 400, 402, 403, 580

fort 400, 402, 403, 572

électron 60

célibataire (non apparié) 151

de valence 110, 158, 159, 197, 200, 203, 206, 214, 218, 219, 905

électronégativité des éléments 223, 224, 226, 901*t*

électrons délocalisés 298

élément 41, 65, 308

éléments

du bloc d 162, 980

du bloc f 162

du bloc p 162

du bloc s 162

éléments (noms des ~) 43

élément transurien 161

élévation du point d'ébullition 576

émission atomique 114

émulsifiant 559

émulsion 558

énantiomère 256

enclume de diamant 426

énergie 13

(loi de conservation de ~) 14

potentielle 13, 14

énergie cinétique 13, 14, 15, 448, 449

énergie cinétique moyenne 451

énergie d'activation 653, 664

énergie d'appariement des électrons 1014

énergie d'éclatement des orbitales d 1014

énergie d'éclatement du champ cristallin 1010, 1016*t*, 37*t*

énergie de combustion 503, 504

énergie de deuxième ionisation 106

énergie de Gibbs de réaction, $\Delta_r G$ 870

énergie de Gibbs, G 870

énergie de Gibbs standard

de formation 880

de diverses espèces A-23*t*

de formation de diverses espèces 866*t*

énergie de Gibbs standard de réaction 876

énergie de liaison 274, 276

énergie de première ionisation 106, 107, 108, 163

énergie de réaction 472

énergie de réticulation 190

énergie d'ionisation 105, 107, 108, 109, 129

énergie, E A-17

de réaction, 472

énergie interne 472

énergie interne de réaction 472

énergie moyenne de liaison 210

énergie réticulaire 190

enthalpie 473

de combustion 491

de réaction 473

de vaporisation et nombre d'électrons 531*t*

libre 870

libre standard de réaction 876

enthalpie molaire

de fusion 522, 523, 524*t*, 525

de liaison 494*t*, 495

de liaison, H_{liaison} 492, 493

de sublimation 526

de vaporisation 522, 523, 525

moyenne de liaison 494*t*

enthalpie standard de formation,

$\Delta_f H^\circ$ 484, 487, 488*t*, 489, 493, 866, A-23*t*

enthalpie standard de vaporisation, $\Delta_{\text{vap}} H^\circ$ 524

enthalpie standard de réaction, $\Delta_r H^\circ$ 475, 493, 495

enthalpies standards de combustion 485

de divers carburants 491

entropie 857

entropie molaire

absolue 865

de fusion, $\Delta_{\text{fus}} S$ 864

de vaporisation, $\Delta_{\text{vap}} S$ 864

entropies standards 865

de diverses espèces A-23*t*, 866

des gaz nobles 867*t*

des halogènes 867*t*

entropie standard de réaction 868

environnement 470, 857

enzyme 668

équation chimique 81, 404

équation chimique équilibrée 81

équation

d'Arrhenius 657, 658

de bilan de matière 744

de Clausius 857

de dissociation 402

de Henderson-Hasselbalch, conditions de validité 780

d'équilibre 690

de Lineweaver-Burk 671

de Nernst 943, 955

de réaction nucléaire 623
 de Rydberg-Balmer 115
 de Schrödinger 140, 157, 159, 162, 267
 des gaz parfaits 433, 437
 d'état 434
 de van der Waals 458, 459
 de van't Hoff 883, 884, 885
 du second degré 748, A-8
 (ou équation quadratique) 698
 équation globale de la réaction 650
 équation ionique 405, 408
 complète 331
 nette 330, 331, 332
 équation nucléaire 623
 équation quadratique 749, A-8
 équilibre 661, 685
 chimique 686, 815
 dynamique 537, 686
 (système en $\sim$) 537
 rapide 661
 équilibrer une équation chimique 81
 méthode algébrique 82, 84
 méthode des tâtonnements 82
 méthode des demi-réactions 909
 espèce atomique 350
 espèce chimique 45
 espèce diatomique 439
 espèce intermédiaire 650
 espèce moléculaire 350
 espèces principales 797
 étain, Sn(s),
 réaction avec $\text{Cl}_2(\text{g})$ 479
 réactions 325
 étape déterminante, étape limitante 660
 étape élémentaire
 (loi de vitesse d'une $\sim$) 652
 état
 de transition 656
 d'équilibre 686
 d'oxydation 900
 état de référence 487
 de l'élément 44, 484, 487, 881
 état électronique fondamental 153
 état excité
 deuxième 123, 127
 premier 123, 156
 état fondamental 123, 154, 157, 159
 états physiques 520*t*
 états de la matière 44
 état standard
 des gaz 875
 des solutés 502, 875
 états standards 475
 état stationnaire 123, 124
 éthanal *voir* acétaldéhyde

éthane, C_2H_6 205
 entropie standard 867
 formation 666
 structure 285, 286
 éthanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 45, 363, 538, 590
 enthalpie standard
 de combustion 490
 propriétés 309, 401
 éthène, C_2H_4 209, 291
 production mondiale A-39*t*
 structure 291, 292
 éther diméthylque 363
 éthylamine
 formule 751
 éthylbenzène
 production mondiale A-39*t*
 éthylène *Voir* éthène
 entropie standard 867
 hydrogénation catalysée (Pt) 666
 éthylènediamine (en) 1003
 éthylènediaminetétraacétate (ion $\sim$) 1004
 éthylènediaminetétracétate
 (EDTA^{4-}) 1003
 éthylèneglycol
 production mondiale A-39*t*
 éthylèneglycol, antigel 579, 580
 éthylotest 919
 éthyne 212, 295. *Voir* acétylène
 évaporation 47
 exactitude 17
 expérience de Stern et Gerlach 147
 extension de la règle de l'octet 218
 extensive
 (propriété $\sim$) 12

F

f (orbitale $\sim$) 142
 facteur de conversion des unités 25, 26, 27
 facteur *i* de van't Hoff 580
 facteur stérique 657
 facteur stoechiométrique de
 conversion des unités 367, 371
 famille d'éléments 91
 Faraday, Michael 930, 942, 960
 faraday (unité) 961
 femto-, f 8, A-16
 fer, Fe 95, 160
 configuration électronique 986
 minerais 986
 nombre d'oxydation 986
 fer, Fe(s) 486, 980
 réactions 323, 325
 figure de diffraction 122
 des rayons X 545, 121
 optique 545

filtration 47
 fiole jaugée 396
 flamme 127
 flamme (test de $\sim$) 127
 fluor, F 109, 157
 fluor, F_2 43, 87, 199
 fluor, $\text{F}_2(\text{g})$ 486
 fluorure de bore, structure 284
 fluorure de nitrile, $\text{NO}_2\text{F}(\text{g})$
 synthèse 659, 660
 fluorure d'hydrogène, HF 202, 227, 533
 enthalpie standard
 de formation 495
 fonction d'état 472, 473
 fonction de transfert de l'énergie 472
 fonction d'onde de l'état fondamental 267
 fonctions d'onde 140
 fonte 988
 force
 attractive entre molécules 527
 de London 531
 de van der Waals 527, 532, 556
 électrostatique 173, 527
 intermoléculaire 528
 intramoléculaire 528
 motrice 328, 405
 force, F A-17
 formaldéhyde, H_2CO 211, 247, 527
 production mondiale A-39*t*
 géométrie 247
 structure 292, 293
 formation d'un précipité 405
 formule brute 357, 358, 361, 440
 formule chimique 55, 173
 formule de Lewis 153, 172, 198, 200, 201, 206, 207, 208, 210, 211, 212, 213, 215, 216, 218, 219, 222, 226, 228, 235, 900, 901
 formule de Lewis de l'atome 110, 111, 157
 formule développée 494
 formule minimale 357
 formule moléculaire 358, 361, 362, 363, 440, 441
 formule quadratique 698, A-8
 fraction molaire 444, 446, 570, 571
 francium, Fr 90
 fréquence 112, 113, 118
 fréquence de collision 456, 652, 653
 fréquence, ν A-17
 fusion (processus de $\sim$) des
 minerais 326

G

gallium, Ga 93, 160
 Galvani, Luigi 931
 galvanoplastie 967
 gauge 39
 Gay-Lussac, Joseph Louis 431, 432
 gaz, (g) 45, 421
 idéal 433
 inerte 91
 monoatomique 432, 505, 506
 nobles 91, 94, 106, 110, 161
 entropies standards 867
 (points d'ébullition des ~) 532
 parfait 433
 rares 91
 gaz diatomique 432
 gazéification de la houille 722
 Geiger, Hans 61
 gel de silice 322
 géométrie bipyramidale
 trigonale 241
 géométrie moléculaire 242
 géométrie pyramidale à base
 triangulaire 242
 Gerlach, Walther 147
 germanium, Ge 94, 97, 160
 germanium, Ge(s) 555
 Gibbs, Josiah Willard 852
 giga-, G 8, A-16
 Gillespie, Ronald J. 234, 237
 glace carbonique, CO₂(s), sublimation 526
 glace (point de fusion de la ~) 521
 glucides 490
 Goudsmit, Samuel 146
 Graham, Thomas 454
 gramme 9
 grandeur moléculaire 451
 grandeur vectorielle 227
 graphite 552
 groupe 1 (métaux du ~) 91
 groupe 2 (métaux du ~) 91
 groupe alkyle 735
 groupe carboxyle 735
 groupe d'éléments 91
 groupes principaux 91, 92, 96, 110, 159, 901
 Guggenheim, Edward Armand 30
 Guldborg, Cato 684

H

H₂(l) 491
 Hafnium, Hf 95
 Hall, Charles 965
 halogène, X 87
 halogènes, X₂ 87, 199
 entropies standards 867
 ordre de réactivité 327
 halogénures alcalins 87
 halogénures d'hydrogène, HX 202
 différences d'électronégativité 227
 (enthalpie de liaison des ~) 734
 moments dipolaires 227
 Hasselbalch, Karl Albert 776
 haut fourneau 987
 hecto-, h A-16
 Heisenberg (inégalités de ~) 137
 Heisenberg, Werner 138
 hélium, He 44, 108, 117, 153, 156
 hélium, He₂ 274
 hélium, He(g) 454
 hématite, Fe₂O₃(s) 986
 hémoglobine humaine 586
 Henderson, Lawrence Joseph 776
 Henry, William 590
 hepta- 56, A-21
 heptoxyde de dimanganèse
 formule 906
 heptoxyde de manganèse
 nombre d'oxydation 901
 Hérault, Paul 966
 Herschbach, Dudley 600
 hertz, Hz 113, A-17
 Hess, Germain Henri 479
 hétérogène (mélange ~) 46
 hexa- 56, A-21
 hexachlorophosphate (ion ~),
 géométrie 241
 hexafluorure de soufre, SF₆ 56, 220, 253
 géométrie 241, 528
 structure 289
 hexafluorure de xénon, XeF₆ 220
 hiatus de bande 555
 Hildebrand, Joel 392
 Hodgkin, Dorothy Crowfoot 518, 546
 homogène (mélange ~) 47
 humidité relative 540
 Hund, Friedrich 155
 hybride de résonance 737
 hydrates 322
 nomenclature 322
 hydrates acides des cations
 métalliques 760

hydrazine
 enthalpie standard
 de formation 495
 formule 204, 495
 carburant 380, 495
 structure 288
 hydrocarbures 362
 hydrogène, H 117, 122, 124, 127, 128, 129, 140, 150, 533
 hydrogène, H (ads.) 667
 hydrogène, H₂, 43, 86, 115
 structure 267, 274
 production mondiale A-38t
 hydrogène, H₂(g) 486
 combustion catalysée (Pt) 666
 formation 323, 405, 436
 propriétés 448
 réaction avec O₂(g) 475, 478, 484
 réactions 443
 hydrogène (ion) 315
 hydrogène moléculaire (ion ~), H₂⁺ 269
 hydrogénocarbonate (bicarbonate) (ion ~) 312, A-20t
 hydrogénocarbonate de sodium, NaHCO₃(aq) 767
 hydrogénodifluorure (ion) nombre d'oxydation 902
 hydrogénosulfate (bisulfate) (ion ~) 312, A-20
 hydrogénosulfite (bisulfite) (ion ~) 312, A-20t
 hydronium (ion) 315
 géométrie 244, 730
 hydroxocarbonate de cuivre, Cu₂(OH)₂CO₃(s) 990
 hydroxyde
 de baryum, Ba(OH)₂ 314, 401, 734t
 de calcium, Ca(OH)₂ 436, 734t
 de césium, CsOH 734t
 de fer(II), Fe(OH)₂(s) 920
 de lithium, LiOH 734t
 de potassium, KOH 734t
 de rubidium, RbOH 734t
 de sodium, NaOH 312, 314, 405, 734t
 production mondiale A-38t
 propriétés 403
 réactions 332
 de strontium, Sr(OH)₂ 734t
 de thallium(I), TlOH 734
 d'aluminium, Al(OH)₃
 équilibre de solubilité 835
 hydroxyde (ion ~) 312, A-20t
 hydroxydes amphotères des métaux 835
 hydroxylamine, NH₃O 208

hydrure binaire 92
 hydrure de béryllium, BeH_2 216, 281
 structure 279, 280
 hydrure de sodium A-21
 hygroskopique 322
 hypochlorite 313
 (ion $\sim$) 312, A-20*t*
 hypochlorite de sodium
 fabrication 965
 hypothèse 3
 hypothèse d'Avogadro 431, 432

I

incertitude-type 138
 indicateurs 787
 pK_{ai} et changements de couleur 789*t*
 zone de virage 789
 inerte 315
 infrarouge 112
 Ingold, Christopher Kelk 225
 intensive (propriété $\sim$) 12
 interaction électrostatique 189, 308
 interhalogénés (composés $\sim$) 250
 intermédiaire 650, 651, 664
 inverse du logarithme A-5
 iodate de cuivre(II)
 équilibre de solubilité 817, 822, 832
 iode, I_2 43, 87, 199
 iodure d'ammonium
 équilibre de décomposition 701
 iodure d'argent
 utilisation 993, 14
 iodure de mercure(I), Hg_2I_2 406
 iodure de plomb
 équilibre de solubilité 820
 iodure de potassium, réaction 405
 iodure d'hydrogène, HI 202, 227, 319
 équilibre de formation 704
 iodure (ion $\sim$)
 oxydation 907
 ion 422
 ion acétate 312, 736, A-20
 ion carboxylate 737
 ion commun 822
 ion diatomique 995
 ion d^* 995
 ion formiate 736, 737
 ion hydronium, $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ 731
 (structure de l' $\sim$) 244
 ion hydroxyde, OH^- 315
 ion hydroxyde, $\text{OH}^-(\text{aq})$ 731, A-20
 ion neutre 735
 ion oxonium, $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ 730

ion polyatomique 310
 ions (nomenclature des $\sim$) 180
 ions complexes 823, 997, 998
 notation des $\sim$ 824
 ions complexes linéaires 1000
 ions complexes octaédriques 998, 1000
 ions complexes tétraédriques 999
 ions des métaux de transition 3*d*
 configuration électronique 995
 ions des métaux de transition 4*d*
 configuration électronique 996
 ions halogénure
 rayons ioniques 183
 ions métalliques
 pK_a des hydrates 760*t*
 ions polyatomiques courants A-20*t*
 ions spectateurs 331
 iridium, Ir 95
 isobutane, enthalpie standard
 de combustion 482
 isoélectronique 69, 154, 184
 isolant 554
 isomère
 de constitution 255
 de structure 255
 géométrique 256
 optique 256
 isomères
 cis et *trans* 294, 1005
 de constitution 867
 géométriques 1005, 1006
 optiques 1007
 isomérisations *cis-trans* 294
 isotherme 861
 isotope 63, 65
 itération A-10
 IUPAC 32. Voir UICPA

J

jauge de pression 424
 Joliot-Curie, Irène 40
 Joliot, Frédéric 40
 joule, J 13, A-17
 Joule, James Prescott 13, 468
 Julian, Percy 306

K

K_a et pK_a d'acides faibles 748*t*, A-29*t*
 K_a et pK_a des cations complexes
 hydratés 760*t*
 K_a , pK_a , K_b et pK_b pour divers couples 757*t*
 K_b et pK_b de bases faibles 753*t*
 K_f d'ions complexes hydroxylés 836*t*

K_{ps} pour divers composés ioniques 819*t*, A-32*t*
 Kamerlingh-Onnes, Heike 473
 Kekulé, von Stradonitz August 215
 kelvin, K (unité) 7, 10, 428, A-15
 Kelvin, William 10, 427-428
 kilogramme, kg 7, 9
 kilo-, k 8, A-16
 kilowatt-heure 16
 krypton, Kr 44, 94, 97, 160
 Kusch, Polykarp 449

L

laitier 988
 laiton 991
 lanthane, La 93, 161
 lanthanides 93, 96, 161
 laser 113
 laser ultra rapide 657
 Lavoisier, Antoine-Laurent xxvi, 5, 49, 363
 Le Bel, Joseph Achille 236, 237
 Le Chatelier, Henri 705
 Lee, Yuan Tseh 600
 Lewis, Gilbert Newton 110, 196, 730
 liaison covalente 198, 242, 268
 apolaire 224
 polaire 224
 pure 224
 localisée 279
 liaison de coordination 997
 liaison hydrogène 528, 529, 530
 dans la glace 530
 dans l'ammoniac liquide 530
 dans l'eau liquide 530
 et la vie 530
 liaison ionique 173, 189
 liaison ionique pure 224
 liaison purement covalente 224
 liaison purement ionique 224
 liaison π 292
 liaison σ 281, 299
 Libby, Willard Franck 628
 libre parcours moyen 455
 Liebig, Justus von 348, 363
 ligand 243, 979, 997
 bidenté 1003
 chélatant 1003
 polydenté 1003
 tridenté 1003
 liquéfaction du charbon 722
 liqueur surnageante 840
 liquide 421
 liquide (*l*) 44
 lithium, Li 85, 86, 90, 108, 117, 127, 153, 156
 lithium, Li(s), réaction 325

litre-atmosphère, L · atm 471
 litre, L A-17
 livre par pouce carré A-18
 logarithmes
 de base 10 A-3, A-4, A-5
 décimaux A-3, A-4, A-5
 naturels A-5
 népériens A-5, 617
 loi
 d'Avogadro 431, 442, 443
 de Boyle-Mariotte 426, 427, 432, 433
 de Charles 427, 429, 430, 432, 433
 de combinaison des volumes 431
 de conservation de la masse 4, 52
 de conservation de l'énergie 14
 de Coulomb 186, 187
 de Dalton des pressions partielles 443
 de Dulong et Petit 506
 d'effusion de Graham 454
 de Gay-Lussac 439
 de gaz parfait 433
 de Guldberg et Waage 690
 de Henry 590
 de Hess 479, 493
 de la nature 3
 de la vitesse initiale 616
 de Raoult 574, 587, 588
 des combinaisons gazeuses 431
 des pressions partielles
 Voir loi de Dalton des pressions partielles
 des proportions définies 49, 50, 52
 des proportions multiples 50, 52
 de vitesse 656, 663
 de vitesse de réaction 610
 (de vitesse) d'ordre 1 611, 617, 625
 (de vitesse) d'ordre 2 614
 scientifique 3
 de Faraday 963
 pour l'électrolyse 962
 London, Fritz 531
 longueur 7
 longueur de liaison 198, 202, 274, 276
 longueur d'onde 112, 113, 114, 115, 119, 138
 longueur d'onde de De Broglie 120, 121
 longueur moyenne de liaison 210
 Lowry, Thomas 730

M

magnésium, Mg 86, 87, 157, 159
 magnésium, Mg(s) 486
 réactions 324, 325, 359
 magnétite, Fe₃O₄(s) 986

maille élémentaire 545
 à faces centrées 547
 centrée 545
 cubique à faces centrées 548
 cubique centrée 548
 cubique simple 545, 548
 dioxyde de carbone 552
 malléable 42, 988
 manganèse, Mn 160
 configuration électronique 985
 manganèse, Mn(s) 980
 réactions 325
 manomètre 422
 Marcus, Rudolph Arthur 898
 Mariotte, Adme 426
 Marsden, Ernest 61
 masse 7, 9
 masse atomique 53, 349, 361, 443
 (détermination de la ~) 360
 moyenne 67, 68
 relative 53, 93
 masse formulaire 350, 441, 442
 (détermination de la ~) 455
 masse isotopique 65, 67
 masse, *m* A-17
 masse, *m* (loi de la conservation de la ~) 5
 masse molaire 351, 372, 440, 441, 442, 448, 452
 masse moléculaire 58, 350, 361, 439, 440, 441, 586
 de l'hémoglobine 586
 élevée 585
 moyenne de l'air 440
 masses atomiques relatives 52
 masse volumique, ρ 11, 24, 422, 423, 440, 441, 520, A-17
 Maxwell, James Clerk 112, 450
 mécanique classique 116, 146
 mécanique quantique 120, 123, 146
 mécanisme de Michaelis-Menten 669
 mécanisme plausible 664
 mécanisme réactionnel 650, 651, 652
 méga-, M 8, A-16
 mélange gazeux 444, 445
 mélanges 45
 membrane semi-perméable 584
 Mendeleïev, Dmitri 78, 88
 ménisque 409, 535, 536
 Menten, Maud 648
 mercure, Hg 42, 117, 994
 nombres d'oxydation 994
 toxicité 995
 mercure, Hg(l) 486
 réactivité 325

mercure, Hg(s), réactions 325
 mercure(I)
 (ion ~) 312, 405, A-20*t*
 oxydation 662
 mésomérie 212. *Voir* résonance
 mesure du pH 953
 mesure quantitative 5
 métal alcalin 86, 159, 335
 métal alcalino-terreux 86, 159, 161
 métalloïdes 89, 94
 métal réactif 323
 métaux 42, 89, 94
 de transition 95, 96
 de transition 3*d* 160
 nombre d'oxydation courants des ~ 982*t*
 de transition internes 96, 161, 162
 du groupe 1 91
 du groupe 2 91
 (ordre de réactivité des ~) 324, 328
 méthanal *Voir* formaldéhyde
 méthanation 722
 méthane
 combustion 854, 855
 enthalpie de vaporisation 528
 géométrie 236, 237, 239
 réactions 474
 structure 279, 283
 méthane, CH₄ 54, 57, 205, 351
 méthane, CH₄(*g*) 474, 485
 méthanol, CH₃OH 54, 204, 205
 équilibre de formation 687, 692, 693
 production mondiale A-39*t*
 structure 287, 288
 synthèse 381
 méthode des approximations
 successives 748, 749
 méthode des vitesses initiales 610
 méthode par itérations 748
 méthode scientifique 3
 méthylamine
 formule 751
 mètre, m 7
 micelles 559
 Michaelis, Leonor 648
 micro-, μ 8, A-16
 micron, μ A-17
 micro-ondes 112
 microscope électronique 121
 microscopie à effet tunnel 864
 milieu dispersant 558
 milieu extérieur 470, 857
 millilitre 9
 milli-, m 8, A-16
 millimètre de mercure A-18
 millimètres de mercure (mm Hg) 423

- millimoles 781
 modèle de Bohr 122, 124, 129, 139, 157
 modèle moléculaire 43, 208, 209, 211, 220
 compact 199, 202, 203, 205, 210, 212, 215, 219, 227, 228, 237, 556
 éclaté 237
 modèle nucléaire
 de l'atome 62
 molalité, m 571
 colligative 572
 molarité, M 395, 402, 404, 570
 colligative, M_c 584, 585, 586
 mole, mol 7, 350, 372, 395, 402, 475
 molécule 41, 44, 54, 267, 274, 422
 apolaire 228, 253
 coudée 243
 bipyramidale trigonale 238, 239, 241
 diatomique 44, 505
 diatomique hétéronucléaire
 niveaux d'énergie 277, 278
 diatomique homonucléaire 268, 276
 niveaux d'énergie 275, 276
 en forme de T 240
 linéaire 227, 238, 249
 monoatomique 432
 octaédrique 238, 239, 241
 plane 215, 235
 plane trigonale 215, 237, 238, 239, 240
 polaire 228, 254
 polyatomique 226, 227, 279, 505
 pyramidale à base triangulaire 238
 tétraédrique 237
 molybdène, Mo 160
 moment cinétique orbital 141
 moment dipolaire 226, 227, 253, 254, 527
 instantané 531
 net 254
 mono- 56, A-21
 monoxyde d'azote, NO 57, 217
 équilibre de formation 694, 705
 oxydation 661
 monoxyde de carbone, CO 55, 373
 équilibre de formation 699, 707, 708
 réaction de formation 483
 structure 296
 mouvement
 de rotation 505, 520
 de translation 505, 519, 520
 de vibration 520
 moléculaire 520
 moyenne pondérée 66
 multiplicité de spin 155
- ## N
- nano-, n 8, A-16
 naphthalène, $C_{10}H_8(s)$ 575
 naphthalène, sublimation 526
National Institute of Standards 116
 n-butane, enthalpie standard
 de combustion 482
 néon, Ne 44, 109, 156, 157
 Nernst, Walther 941
 neutralisation (réaction de $\sim$) 332, 408
 neutralisés (acides et bases $\sim$) 332
 neutron 62
 newton, N 424, A-17
 nickel, Ni 95, 160, 182
 nickel, Ni(s) 980
 réactions 325
 niobium, nb 160
 nitrate, NO_3^- 213, 317
 (ion $\sim$) 312, 402, A-20*t*
 nomenclature 311, A-20
 nitrate d'aluminium, propriétés 402
 nitrate d'ammonium A-20*t*
 production mondiale A-38*t*
 dissolution 474
 nitrate d'argent 407
 utilisation 993, 14
 propriétés 403
 nitrate de cuivre(II)
 utilisation 991, 12
 nitrate de mercure(I), réaction 405
 nitrate de potassium, propriétés 395
 nitrate de sodium, propriétés 401
 nitrite (ion $\sim$), NO_2^- 212, 213, 312, A-20*t*
 nomenclature 311
 nitrure de magnésium, formation 359
 niveau moléculaire 520
 niveaux d'énergie 123
 niveaux d'énergie des atomes 150
N,N-diméthylhydrazine,
 $H_2NN(CH_3)_2(l)$, carburant 491
 nombre d'Avogadro 353, 354, 444, 455
 nombre d'Avogadro (détermination du $\sim$) 550
 nombre de charge d'un ion 901
 nombre de chiffres significatifs 28
 nombre de coordination 997
 nombre de masse, A 63, 64, 65, 624
 nombre de molécules 444, 573
 nombre de moles 351
 nombre de rotations (*turnover*) 678
 nombre d'états de spin 155
 nombre d'oxydation 900
 nombres d'oxydation courants de
 certains métaux A-19*t*
 nombre exact 21
 nombre quantique
 azimutal, l 141, 150, 161
 de spin, m_s 148, 151
 magnétique 144
 principal, n 140, 150
 secondaire 141
 nombre stérique 244, 246
 nombre volumique 455, 458
 nomenclature chimique 55
 nomenclature des oxyanions 311
 nomenclature systématique des
 complexes 1000
 nona- 56, A-21
 non-électrolyte 399, 400
 non-métaux 42, 43, 44, 89, 94
 (ordre de réactivité des $\sim$) 328
 (points d'ébullition des $\sim$) 532
 notation de Guggenheim 30, 31, 32, 428, 620
 noyau 62
 numéro atomique 62, 64, 88, 90, 624
 Nyholm, Ronald Sydney 234, 237
- ## O
- observation qualitative 5
 octa- 56, A-21
 octaèdre, octaédrique 241
 octane, propriétés 504, 505
 octanol
 production mondiale A-39*t*
 or, Au 95, 993
 orbitale
 1s 141, 142, 151, 153, 270
 2*p* 142, 143, 144
 2s 142
 3*d* 150, 160
 3*p* 150
 3s 150
 4*d* 160
 4*f* 161
 4*p* 161
 4s 160
 5*p* 161
 5s 160, 161
 6s 161
 d 145
 e_g 1008
 t_{2g} 1008
 π 272
 π^* 272
 σ 270

σ_{1s}^* 270
 σ_{1s} 270
 orbitale antiliante 270
 orbitale atomique 140, 269
 orbitale délocalisée 298
 orbitale hybride 279
 orbitale liante 270
 orbitale localisée de liaison 279
 orbitale moléculaire 268, 278
 orbitale non liante 287
 orbitales 995, 1009
 atomiques
 énergies relatives 150
 (désignation des) 142
 d 146, 1008, 1009
 d_{xy} , d_{xz} , d_{yz} , $d_{x^2-y^2}$ et d_{z^2} 146, 1008, 1009
 (hybrides) *sp* 280
 (hybrides) *sp*² 282
 (hybrides) *sp*³ 283
 (hybrides) *sp*³*d* 289
 (hybrides) *sp*³*d*² 289
 moléculaires
 niveaux d'énergies des ~ 275
 théorie des ~ 268, 275
 orbite 123
 ordonnée à l'origine 428, A-11
 ordre de liaison 274
 ordre de remplissage des orbitales
 des ions 181
 ordre global 615
 osmium, Os 95
 osmose 584
 osmose inverse 585
 oxacide 318
 oxalate
 (ion ~) 312, A-20*t*
 oxalate de plomb(III),
 précipitation 407
 oxénate
 entropie standard 868
 oxonium (ion) 315.
 Voir hydronium (ion)
 oxyacides 313, 317
 oxyanions 311
 oxydant 337, 906
 oxydation 335
 oxydation du fer, Fe(s) 854
 oxydation par aluminothermie 476
 oxydé 335
 oxyde d'aluminium 358
 oxyde d'argent
 utilisation 993, 14
 oxyde d'azote 57, 217.
 Voir monoxyde d'azote
 propriétés 217

oxyde de baryum, BaO 314, A-19
 réactions 315
 oxyde de carbone
 équilibre de formation 706
 oxyde de cobalt(II)
 utilisation 989, 10
 oxyde de cuivre(I)
 utilisation 991, 12
 oxyde de fer(III), Fe₂O₃(s) 920
 utilisation 986, 7
 carburant de l'aluminothermie 476
 oxyde de manganèse 372
 agent oxydant 985
 oxyde de manganèse(II)
 redox 907
 oxyde de mercure(II), HgO(s) 320, 351, 994
 utilisation 993, 14
 oxyde de plomb(IV) A-20*t*
 oxyde de propylène
 production mondiale A-39*t*
 oxyde de scandium 982
 oxyde de sodium, Na₂O 314
 réactions 315
 oxyde d'éthylène
 production mondiale A-39*t*
 oxyde de titane
 production mondiale A-38*t*
 réaction 982
 utilisation 983
 oxyde de vanadium
 amphotère 983
 catalyseur 983
 oxyde de zinc
 utilisation, minéral 991, 12
 oxyde magnétique, Fe₃O₄(s) 920
 oxyde manganèse(II)
 formation 985
 oxyde métallique 314
 oxydes de fer 920
 oxydoréduction (réaction d'~) 335, 899
 oxygène O 155, 156
 oxygène, O₂(g) 43, 54, 86, 486
 entropie molaire en fonction de la température 861
 production mondiale A-38*t*
 réaction avec H₂(g) 475, 478, 484
 solubilité 591
 (préparation de ~) 369

P

paire d'ions 185
 (distance d'équilibre d'une ~) 185
 (énergie d'une ~) 185
 palladium, Pd 160

papier tournesol 320
 paramagnétique 276, 1013
 particules subatomiques 59, 62, 139
 particule α 60, 61, 623
 particule β 60, 61, 623
 particules de désintégration
 radioactive 624*t*
 pascal, Pa 424, A-17
 Pauling, Linus 223, 266, 277
 Pauli, Wolfgang 146, 151
 penta- 56, A-21
 pentachlorure de phosphore, PCl₅
 56, 201, 220, 221, 253
 équilibre de décomposition 691, 692
 nombre d'oxydation 904
 formation 482
 structure 289
 pentafluorotellurate (ion ~), TeF₅⁻
 220, 221
 pentafluorure de brome, BrF₅ 220, 221
 géométrie 252
 pentafluorure de potassium,
 géométrie 528
 pentane-1,4-diamine (cadavérine)
 751
 pente 428, A-11
 pentoxyde de diazote
 cinétique de décomposition 605, 620
 pentoxyde de diiode, I₂O₅ 373
 perchlorate (ion ~) 312*t*, 313*t*, 317, A-20*t*
 perchlorate d'ammonium, carburant
 de combustion autogène 492
 perchlorate de magnésium 364
 période 88
 périodes radioactives 625*t*
 périodicité 88, 90, 92, 106, 163
 permanganate
 (ion ~) 312, A-20*t*
 permanganate de potassium 985
 propriétés 313
 formule et nombre d'oxydation 905
 oxydant, potentiels rédox 985
 peroxyde
 (ion ~) 312, A-20*t*
 peroxyde d'hydrogène, H₂O₂ 208, 914
 cinétique de décomposition 619
 nombre d'oxydation 901
 production mondiale A-38*t*
 structure 288
 péta-, P A-16

- pH 738, 780
 définition 740
 phase 541
 cholestérique 557
 dispersée 558
 nématique 556
 smectique 556
 phénol
 production mondiale A-39*t*
 pH-mètre 741
 phosgène
 équilibre de formation 700, 701
 synthèse et mécanisme 652
 géométrie 248
 phosphane 203
 Voir phosphène
 phosphate (ion ~), PO_4^{3-} 222, 312, A-20
 phosphate de cadmium, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 375, 376
 phosphate de cobalt(II)
 utilisation 989, 10
 phosphite
 (ion ~) 312, A-20*t*
 phosphore, P 43, 44, 92, 157
 phosphore, P(s), réactions 374, 482
 phosphore-32 624, 627
 phosphorylation 668
 phosphure de sodium, formation 374
 photodissociation 278
 photon 118
 pico-, p 8, A-16
 pierres précieuses
 couleur 1013
 pile à combustible 667, 957, 958
 hydrogène-oxygène 958
 méthane-oxygène 959
 pile de concentration 952
 pile électrique 935
 pile voltaïque 931
 pK_a des divers acides polyprotodiques 765*t*
 Planck, Max 104, 116, 117, 118
 plan carré 252
 plan équatorial 241
 plan triangulaire 239
 plan trigonal 239
 plan nodal 272, 298
 platine, Pt 95
 plomb, Pb(s), réactions 325
 plutonium, Pu 161
 demi-vie 627
 plutonium-239 627
 pOH 739
 poids 9
 point critique 541, 544
 point d'ébullition 576
 de la solution 576
 de l'eau 11
 point de demi-équivalence 797, 802, 806
 point de fin de titrage 790
 point de fusion de la glace 11
 point d'équivalence 802
 point d'équivalence et point de fin de titrage 790
 point de rosée 540
 point normal
 d'ébullition 524*t*, 540
 de congélation 541
 de fusion 521, 524*t*, 541
 de sublimation 544, 545
 points de fusion (courbe des ~) 541
 point triple 544
 polarité 534*t*, 536
 poly- 137
 pont salin 936, 937
 p (orbitale ~) 142
 postulat de Dalton 52
 potassium, K 85, 86, 90, 110, 127
 potassium, K(s), réactions 325
 pôts catalytiques 667
 potentiels standards de réduction 949*t*, A-34
 potentiels standards et réactivité 950
 pôts catalytiques 481
 pourcentage
 de dissociation 742
 de rendement 381
 d'erreur (relative) 17, 18, 19
 en masse 570
 massique 49, 358, 397
 précipitation (réaction de ~) 328, 405
 précipitation sélective 834
 précision 17
 précision de la verrerie de laboratoire 396
 préfixes grecs 56
 préfixes utilisés pour les multiples et sous-multiples d'unités SI A-16*t*
 premier principe de la thermodynamique 472
 pression, P 422, A-17
 atmosphérique 423, 424
 barométrique 424
 de sublimation (courbe des ~) 541
 de vapeur (saturante) 446, 538, 573
 de vapeur de l'eau 539*t*
 osmotique 584, 585, 586
 partielle 443, 446
 pressions de vapeur (courbe des ~) 538
 Priestley, Joseph 320
 Prigogine, Ilya 857
 principe de conservation des orbitales 283
 principe de Heisenberg 139
 principe de Le Chatelier 705
 fondement quantitatif 712
 principe d'exclusion de Pauli 151, 156, 274, 275, 1009
 principe d'incertitude d'Heisenberg 137, 139
 probabilité volumique 140, 143, 162
 procédé à l'oxygène 988
 procédé chlore-alcali 964
 procédé de Haber 711
 procédé Hall-Héroult 965, 966
 processus
 cyclique 480
 irréversible 857
 réversible 857
 production mondiale de produits chimiques A-38*t*, A-39*t*
 produit 80
 produit de solubilité 816
 produit ionique 731
 profil d'énergie potentielle 655
 propan-2-ol 357
 propan-2-ol, formule 358
 propan-2-one 868
 propan-2-one (acétone) 533
 propane 370
 propène, propriétés 441
 propriété colligative 569
 propriété extensive 12
 propriété intensive 12
 propriété périodique 88, 162
 propriétés acides ou basiques de quelques ions 759*t*
 propylène
 production mondiale A-39*t*
 propylèneglycol
 production mondiale A-39*t*
 protéines 490, 552
 (détermination de la masse moléculaire des ~) 585
 proton 62
 proton acide 316
 Proust, Joseph Louis 49
 puissance 16
 pyramidal à base triangulaire 242
 pyramidal à base carrée 252
 pyramide à base triangulaire 242
 pyramide trigonale 242
 pyridine 752
 pyrite de fer, $\text{FeS}_2(s)$ 986

Q

quantification de l'énergie 120
 quantifiée (énergie ~) 123
 quantité
 de charge électrique, Z A-17
 d'électricité 31, 932
 de matière 7
 de mouvement 120, 138
 volumique 440
 quantum, quanta 117
 quart de gallon A-17
 quotient de précipitation, Q_{ps} 830
 quotient de réaction, quotient réactionnel, Q_c et Q_p 715
 quotient standard de réaction, quotient réactionnel standard 875
 quotient thermodynamique de réaction 877

R

radiation électromagnétique 111, 112, 114, 118, 138, 156
 radiation et rayonnement 111
 radical libre 216
 radioactif 93, 96, 161
 radioactivité 60, 686
 radiofréquences 112
 radio-isotopes (périodes radio-actives des ~) 625
 radium, Ra 159
 radon, Rn 161
 rampe à vide 443
 Raoult, François Marie 574
 rayon ionique 183
 rayons
 atomiques 162
 cathodiques 59
 cristallographiques des ions 162, 163, 183, 184, 548
 gamma 61, 112, 113
 X 61, 112, 119, 121, 122
 rayonnement du corps noir 116, 120
 rayonnement électromagnétique 111-114, 116, 122
 spectre 111-114
 rayonnement infrarouge 111
 rayonnement micro-ondes 111
 rayonnement ondes radio 111
 rayonnement rayons X 61, 111, 112
 rayonnement rayons γ 61, 111, 112, 623
 rayonnement ultraviolet 111
 rayonnement visible 111, 114
 réactif 80
 réactif en excès 378

réactif limitant 378, 437
 réaction
 acide-base 730
 aluminothermique 380
 autocatalysée 985
 autocatalytique 985
 bimoléculaire 651
 d'autoprotonation 731, 746
 d'ordre 0 616
 d'ordre 1 611, 617, 620
 d'ordre 2 614, 630, 635
 d'autoprotolyse 731
 de cellule 938
 de dismutation 928
 de dissociation de $N_2O_4(g)$ 690
 de méthanation 727
 de protonation 730
 de substitution de ligands 998
 de transfert de protons 730
 de transfert d'électrons 906
 directe 686
 élémentaire 650, 651
 endothermique 471, 475
 énergétiquement favorisée 869
 entropiquement favorisée 869
 exergonique 875
 exothermique 471, 475, 476, 854
 globale 651
 inverse 686
 sous contrôle entropique 869
 spontanée 870
 trimoléculaire 665
 unimoléculaire 651
 réaction quantitative 918
 redox (réactions ~) 335, 899
 réducteur 337, 906
 réduction 335
 réduit 335
 région du rayonnement visible 114
 règle de Hund 155, 156, 277, 1009
 règle de l'octet 174, 199, 200, 204, 207, 209, 210, 211, 216, 219
 règle de multiplicité maximale 155
 règle des 18 électrons 177
 règle du nombre maximal d'états de spin 155
 règles de solubilité des composés ioniques 329, 330
 régression linéaire A-13
 relations diagonales 98
 rendement absolu 380
 rendement de Carnot 860
 rendement relatif 381
 rendement théorique 380
 réseau 422
 réseau cristallin 162, 545
 réseau de diffraction 114

résonance
 (énergie de ~) 213
 (hybride de ~) 213
 (stabilisation par ~) 216
 (structures limites de ~) 212, 213, 214, 216, 218
 résistance de deux solutions tampons à des changements de pH 784*t*
 rhénium, Re 95
 rhodium, Rh 160
 RPECV/VSEPR (théorie ~) 238, 279, 281, 282, 283, 286, 287, 905
 rubidium, Rb 90, 127, 161
 ruthénium, Ru 160
 Rutherford, Ernest 60, 61
 rutile, oxyde de titane minéral 982
 Rydberg, Johannes 115

S

saccharose 351
 propriétés 395, 400
 scandium, Sc 160
 configuration électronique 982
 scandium, Sc(s) 980
 Schrödinger, Erwin 136, 140
 seconde, s 7
 sel anhydre 322
 sélecteur de vitesses moléculaires 448
 séléniate d'ammonium 397
 sélénium, Se 43, 160
 semi-conducteurs 94, 555
 semi-métaux 89, 94
 série
 de Balmer 124, 125, 127
 de Brackett 124
 de Lyman 124, 126
 de Paschen 124
 des actinides 93, 161
 des lanthanides 93, 161
 des métaux de transition $3d$ 160
 des métaux de transition $4d$ 161
 seuil de fréquence 118
 sidérite, $FeCO_3(s)$ 986
 siemens (unité, symbole : S) 401
 silane, SiH_4 240
 silicate de sodium
 production mondiale A-38*t*
 silicium amorphe 553
 silicium, Si 94, 157
 silicium, Si(s) 555
 simple déplacement (réaction de ~) 323, 324
 site actif 668
 sites de coordination 1003

- sodium, Na 90, 111, 117, 127, 157, 158
sodium, Na(s) 486
réactions 85, 86, 325, 335, 374
sodium-25
période radio-active 626
sol 558
solide (s) 44, 421
solide cristallin 422
solide amorphe 552
solubilité 394, 815
des composés ioniques
(règles) 329, A-32t
des gaz 591
des hydroxydes en fonction du pH 843
des hydroxydes amphotères en fonction du pH 837
des sels d'acides faibles 828
des sulfures en fonction du pH 841, 842
soluté 47, 393
solution 47
acide 319, 732
basique 319, 732
neutre 732
aqueuse 47
idéale 587, 588
insaturée 394
saturée 394
sursaturée 831
tampon 777
solutions de l'équation du second degré A-8
solutions (types et exemples de ~) 394
solvant 47, 393
solvaté 569
sommets axiaux 241
sommets équatoriaux 241
s (orbitale ~) 142
Sørensen, Søren Peter Lauritz 728
soufre, S 43, 157, 308
soufre, S(s) 351, 375, 486
sous-couches 153
spectre atomique de l'hydrogène 115
spectre continu 114
spectre d'absorption 127, 128, 129, 601
spectre d'absorption des complexes 1011
spectre d'émission atomique 114, 115, 122, 129
spectre d'émission de H 125
spectre de raies 114
spectre électromagnétique 111, 112, 113
spectre visible 114, 127
spectres d'émission atomique 117
spectromètre de masse 66, 67
spectroscopie atomique 116
spectroscopie ultra rapide 657
spin
en bas 151
en haut 151
intrinsèque de l'électron 146, 148
non apparié 151
spins appariés 151
spins parallèles 155
spontané
processus 854
squelette de liaisons σ 292, 295, 296, 297
stannate d'or(I)
utilisation 993, 14
stéréo-isomère 235, 255
stéréospécifique 258
Stern et Gerlach (expérience de ~) 160
Stern, Otto 147
stœchiométrie 356, 651
stœchiométriquement équivalent à, 357
strontium, Sr 86, 117, 159, 161
structure cristalline 189
structure cristalline de la glace 529
structure de l'eau liquide 529
structure électronique des atomes 105, 116, 153
structure en couches 107
styrène
production mondiale A-39t
sublimation 526
substitution (réaction de ~) 323
substrat 668
sulfate (ion ~), SO_4^{2-} 311, 312t 317t, A-20t
sulfate d'aluminium
production mondiale A-38t
sulfate d'ammonium
production mondiale A-38t
sulfate de baryum, précipitation 407
sulfate de cobalt(II)
utilisation 989, 10
sulfate de cuivre(II) pentahydraté A-21
utilisation 991, 12
sulfate de cuivre pentahydraté, $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 351, 991
sulfate de fer(II)
utilisation 986, 7
sulfate de magnésium
propriétés 310
réactions 321
sulfate de sodium
production mondiale A-38t
sulfite (ion ~) 312t, A-20t
sulfite de calcium, réactions 321
sulfure de cadmium, propriétés 378
sulfure de carbone
équilibre de formation 699
sulfure de mercure(II), cinabre 994
sulfure de nickel(II), propriétés 406
sulfure de sodium A-19
sulfure d'hydrogène, $\text{H}_2\text{S}(\text{aq})$ 319
préparation 841
formation 334
superoxyde de potassium
nombre d'oxydation 901
surface nodale 142, 145
suspension 557
symbole chimique 42
symétrie cylindrique 143
symétrie sphérique 141
synthèse du gaz à l'eau 722
système 470, 857
système diatherme 858
système international des unités, SI 7, A-15
système isolé 858
système métrique 7, A-15
T
11-trans-rétinal 294
tableau des concentrations 693, 694
tableau périodique des éléments 90, 106, 109, 159, 162, 328
tampon acide acétique-acétate 778
taux de dissociation 401, 742
taux de dissociation d'un électrolyte 580
taux d'humidité 540
température 7, 9
absolue 430
Celsius °C 10
critique 541
de flamme 495
Fahrenheit °F 10
Kelvin, K 7, 10, A-15
standard d'ébullition 540
temps 7
temps de demi-réaction 620
tendance à s'échapper 584
teneur isotopique naturelle 65, 66, 67
tension électrique (différence de potentiel)(U) 932, A-17
tension standard de cellule 944
tension superficielle 534, 535
tensions superficielles 534t
tétra-, T 56, A-16, A-21
terres rares 96

- tétrachlorure de carbone, CCl_4 200, 253
- tétrachlorure d'étain, réaction de formation 479
- tétrachlorure de titane utilisation 982
- tétrachlorure de titane, réactions 323
- tétraèdre régulier 239
- tétraèdre régulier, tétraédrique 236, 237
- tétraédrique 254
- tétrafluoroborate (ion $\sim$), BF_4^- 207
géométrie 240
structure 285
- tétrafluorure de soufre, SF_4 56, 218, 219
géométrie 250, 528
- tétrafluorure de titane
formule et nombre d'oxydation 905
- tétrafluorure de xénon, XeF_4 220, 253
géométrie 252
- tétraoxyde de diazote
décomposition 660
équilibre de décomposition 687, 688, 697, 708, 709
équilibre de formation 704
- tétravalent 237
- tétroxyde de diazote, N_2O_4 57, 380
équilibre de décomposition 686
comburent 491
- T (forme en $\sim$) 249
- thallium, Tl 117
- thallium(I) (ion $\sim$)
oxydation par le cérium(IV) 665
réaction d'oxydation 908
- thallium, Tl 117, 178
- théorie 4
atomique 51, 52
atomique de Dalton 54, 81
cinétique des gaz 448
de la relativité 38
des collisions 652
des répulsions des paires d'électrons de la couche de valence
Voir RPECV
du champ cristallin 1009
du complexe activé 655
RPECV/VSEPR 527, 905
- thermochimie 469
- thermodynamique 470
- thermomètre 10, 427
- thermomètre à gaz 430
- thiocyanate
(ion $\sim$) 312, A-20
- thiosulfate
(ion $\sim$) 312, A-20*t*
- thiosulfate de sodium
agent réducteur 918, 919
- Thomson, George Paget 121, 122
- Thomson, Joseph John 59, 122
- titane, préparation 323
- titane, Ti 95, 160
configuration électronique 982
- titane, Ti(s) 980
- titrage 409, 786
d'un acide faible par une base faible 794
d'une base faible par un acide fort 802
du thiosulfate de sodium par $\text{I}_2(\text{aq})$ 919
- toluène
production mondiale A-39*t*
propriétés 587
- tonne, t A-17
- Torricelli, Evangelista 423
- torr, Torr 423, 425, A-17
- traité de chimie élémentaire XXVI, 6
- transfert d'électron (réaction de $\sim$) 335
- transfert thermique entre deux métaux 857
- transition du niveau énergétique 124
- travail 470
- tri- 56, A-21
- trichlorure de brome
nombre d'oxydation 904
- trichlorure de phosphore, réaction avec $\text{Cl}_2(\text{g})$ 482
- trifluorure de bore, BF_3 217, 253
géométrie 239
structure 282
- trifluorure de brome, BrF_3 220, 253
- trifluorure de chlore, ClF_3 250
géométrie 250, 251
- triiodure de phosphore,
préparation 374
- triiodure (ion), I_3^- 220
nombre d'oxydation 902
géométrie 251
- triméthylamine
formule 751
- trioxyde de diazote
décomposition 635
- trioxyde de soufre SO_3 222
équilibre de formation 710
synthèse catalysée 667
- triple liaison 209, 295, 296
- troisième principe de la thermodynamique 862
- tube à décharge 60, 114
- tube cathodique, TC 60
- tungstène, W 95
- ## U
- ure (terminaison) 55, 69
- u (unité de masse atomique) 53
- Uhlenbeck, George 146
- UICPA 32, 53, 55, 180, 254, 425, 735
- ultra violet 112
- Union internationale de chimie pure et appliquée, *Voir* UICPA
- unité de base SI 7
- unité de masse atomique 53
- unité formulaire 350, 401, 585, 817
- unités dérivées 11, A-16
- unité SI 7
- unités SI de pression 425
- uranium, U 161, 238
période radio-active 628
- urée
production mondiale A-39*t*
- ## V
- vanadate (ion)
formule et géométrie 905, 906
- vanadium, V 160
configuration électronique 983
- vanadium, V(s) 980
- van der Waals, Johannes Diderik 459
- van't Hoff, Jacobus Henricus 236, 237, 568
- vaporisation 422
- vaporisation d'un liquide 857
- vase de Dewar 501
- viscosité 533, 534, 534*t*
- visible 112
- vitesse, v A-17
- vitesse
de condensation 573
de consommation 606
de décomposition 605
de disparition 606
d'effusion 454
de formation 606
de la lumière 113
de réaction 605
d'évaporation du solvant 573
de variation 605
de variation de concentration 604
du son 39, 452, 453
instantanée de variation de concentration 603
moléculaire 427, 448, 449
moyenne de formation 608, 609
moyenne de variation de concentration 602
quadratique moyenne 452

INDEX

volatil 48, 308
volt 932
Volta, Alessandro 931
voltmètre 936
volume molaire 434, 520, 549
volume moléculaire 458
volume, V 9, A-17
vraie valeur 18
VSEPR *Voir* RPECV

W

Waage, Peter 684
watt, W 16
Werner, Alfred 978, 1008

X

xénon, Xe 44, 94
xénon, $Xe(g)$ 454
xylènes
production mondiale A-39*t*

Y

ytterbium, Yb 161

Z

zéro absolu 428, 862
Zewail, Ahmed 657
zinc, Zn 160, 992

zinc, $Zn(s)$ 980
réaction avec $HCl(aq)$ 854
réactions 325
zone de virage 789*t*
zone tampon 798, 802

Tableau périodique des éléments

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H 1s ¹	2 He 4,002602 1s ²																
3 Li 6,941 2s ¹	4 Be 9,012182 2s ²	5 B 10,811 2s ² 2p ¹	6 C 12,0107 2s ² 2p ²	7 N 14,0067 2s ² 2p ³	8 O 15,9994 2s ² 2p ⁴	9 F 18,9984032 2s ² 2p ⁵	10 Ne 20,1797 2s ² 2p ⁶										
11 Na 22,989770 3s ¹	12 Mg 24,3050 3s ²	13 Al 26,981538 3s ² 3p ¹	14 Si 28,0855 3s ² 3p ²	15 P 30,973761 3s ² 3p ³	16 S 32,065 3s ² 3p ⁴	17 Cl 35,453 3s ² 3p ⁵	18 Ar 39,948 3s ² 3p ⁶										
19 K 39,0983 4s ¹	20 Ca 40,078 4s ²	21 Sc 44,955910 4s ² 3d ¹	22 Ti 47,867 4s ² 3d ²	23 V 50,9415 4s ² 3d ³	24 Cr 51,9961 4s ¹ 3d ⁵	25 Mn 54,938049 4s ² 3d ⁵	26 Fe 55,845 4s ² 3d ⁶	27 Co 58,933200 4s ² 3d ⁷	28 Ni 58,6934 4s ² 3d ⁸	29 Cu 63,546 4s ¹ 3d ¹⁰	30 Zn 65,409 4s ² 3d ¹⁰	31 Ga 69,723 4s ² 4p ¹	32 Ge 72,64 4s ² 4p ²	33 As 74,92160 4s ² 4p ³	34 Se 78,96 4s ² 4p ⁴	35 Br 79,904 4s ² 4p ⁵	36 Kr 83,798 4s ² 4p ⁶
37 Rb 85,4678 5s ¹	38 Sr 87,62 5s ²	39 Y 88,90585 5s ² 4d ¹	40 Zr 91,224 5s ² 4d ²	41 Nb 92,90638 5s ¹ 4d ⁴	42 Mo 95,94 5s ¹ 4d ⁵	43 Tc (98) 5s ² 4d ⁵	44 Ru 101,07 5s ¹ 4d ⁷	45 Rh 102,90550 5s ¹ 4d ⁸	46 Pd 106,42 4d ¹⁰	47 Ag 107,8682 5s ¹ 4d ¹⁰	48 Cd 112,411 5s ² 4d ¹⁰	49 In 114,818 5s ² 5p ¹	50 Sn 118,710 5s ² 5p ²	51 Sb 121,760 5s ² 5p ³	52 Te 127,60 5s ² 5p ⁴	53 I 126,90447 5s ² 5p ⁵	54 Xe 131,293 5s ² 5p ⁶
55 Cs 132,90545 6s ¹	56 Ba 137,327 6s ²	57-71 Lanthanides	72 Hf 178,49 6s ² 5d ²	73 Ta 180,9479 6s ² 5d ³	74 W 183,84 6s ² 5d ⁴	75 Re 186,207 6s ² 5d ⁵	76 Os 190,23 6s ² 5d ⁶	77 Ir 192,217 6s ² 5d ⁷	78 Pt 195,078 6s ¹ 5d ⁹	79 Au 196,96655 6s ¹ 5d ¹⁰	80 Hg 200,59 6s ² 5d ¹⁰	81 Tl 204,3833 6s ² 6p ¹	82 Pb 207,2 6s ² 6p ²	83 Bi 208,98038 6s ² 6p ³	84 Po (209) 6s ² 6p ⁴	85 At (210) 6s ² 6p ⁵	86 Rn (222) 6s ² 6p ⁶
87 Fr (223) 7s ¹	88 Ra (226) 7s ²	89-103 Actinides	104 Rf (261) 7s ² 6d ²	105 Db (262) 7s ² 6d ³	106 Sg (266) 7s ² 6d ⁴	107 Bh (264) 7s ² 6d ⁵	108 Hs (277) 7s ² 6d ⁶	109 Mt (268) 7s ² 6d ⁷	110 Ds (271) 7s ¹ 6d ⁹	111 Rg (272) 7s ¹ 6d ¹⁰	112 Cn (285) 7s ² 6d ¹⁰	113 Uut (289)	114 Uuq (289)	115 Uup (289)	116 Uuh (289)	117 Uus (289)	118 Uuo (289)

Métaux solides

Non-métaux solides

Liquides

Gaz

TABLEAU DES MASSES ATOMIQUES*

Nom	Symbole	Numéro atomique	Masse atomique
actinium	Ac	89	[227,0277]
aluminium	Al	13	26,9815386(8)
américium	Am	95	[243,0614]
antimoine	Sb	51	121,760(1)
argent	Ag	47	107,8682(2)
argon	Ar	18	39,948(1)
arsenic	As	33	74,92160(2)
astate	At	85	[209,9871]
azote	N	7	14,0067(2)
baryum	Ba	56	137,327(7)
berkélium	Bk	97	[247,0703]
béryllium	Be	4	9,012182(3)
bismuth	Bi	83	208,98040(1)
bohrium	Bh	107	[264,12]
bore	B	5	10,811(7)
brome	Br	35	79,904(1)
cadmium	Cd	48	112,411(8)
calcium	Ca	20	40,078(4)
californium	Cf	98	[251,0796]
carbone	C	6	12,0107(8)
cérium	Ce	58	140,116(1)
césium	Cs	55	132,9054519(2)
chlore	Cl	17	35,453(2)
chrome	Cr	24	51,9961(6)
cobalt	Co	27	58,933195(5)
copernicium	Cn**	112	[285]
cuivre	Cu	29	63,546(3)
curium	Cm	96	[247,0704]
darmstadtium	Ds	110	[271]
dubnium	Db	105	[262,1141]
dysprosium	Dy	66	162,500(1)
einsteinium	Es	99	[252,0830]
erbium	Er	68	167,259(3)
étain	Sn	50	118,710(7)
europium	Eu	63	151,964(1)
fer	Fe	26	55,845(2)
fermium	Fm	100	[257,0951]
flovorium	Fl***	114	[289]
fluor	F	9	18,9984032(5)
francium	Fr	87	[223,0197]
gadolinium	Gd	64	157,25(3)
gallium	Ga	31	69,723(1)

Nom	Symbole	Numéro atomique	Masse atomique
germanium	Ge	32	72,61(1)
hafnium	Hf	72	178,49(2)
hassium	Hs	108	[277]
hélium	He	2	4,002602(2)
holmium	Ho	67	164,93032(2)
hydrogène	H	1	1,00794(7)
indium	In	49	114,818(3)
iode	I	53	126,90447(3)
iridium	Ir	77	192,217(3)
krypton	Kr	36	83,798(2)
lanthane	La	57	138,90547(7)
lawrencium	Lr	103	[262,1097]
lithium	Li	3	6,941(2)
livermorium	Lv****	116	[289]
lutétium	Lu	71	174,967(1)
magnésium	Mg	12	24,3050(6)
manganèse	Mn	25	54,938045(5)
meitnérium	Mt	109	[268,1388]
mendélévium	Md	101	[258,0984]
mercure	Hg	80	200,59(2)
molybdène	Mo	42	95,96(2)
néodyme	Nd	60	144,242(3)
néon	Ne	10	20,1797(6)
neptunium	Np	93	[237,0482]
nickel	Ni	28	58,6934(2)
niobium	Nb	41	92,90638(2)
nobélium	No	102	[259,1010]
or	Au	79	196,966569(4)
osmium	Os	76	190,23(3)
oxygène	O	8	15,9994(3)
palladium	Pd	46	106,42(1)
phosphore	P	15	30,973762(2)
platine	Pt	78	195,084(9)
plomb	Pb	82	207,2(1)
plutonium	Pu	94	[244,0642]
polonium	Po	84	[208,9824]
potassium	K	19	39,0983(1)
praséodyme	Pr	59	140,90765(2)
prométhium	Pm	61	[144,9127]
protactinium	Pa	91	231,03588(2)
radium	Ra	88	[226,0254]
radon	Rn	86	[222,0176]

* Les nombres entre crochets sont les masses atomiques ou les numéros atomiques correspondant à l'isotope de plus longue période radioactive (demi-vie) ; les nombres entre parenthèses indiquent l'incertitude combinée sur le dernier chiffre, les données proviennent du *CRC Handbook of Chemistry*, 87th ed., 2006–2007 sauf celles indiquées en bleu et qui correspondent à des dénominations récentes.

** N.d.t. : Nommé par l'UICPA le 19 février 2010 (anciennement le ununbium).

**** N.d.t. : Nommé par l'UICPA le 30 mai 2011 (anciennement le ununhexium).

***N.d.t. : Nommé par l'UICPA le 30 mai 2011 (anciennement le ununquadium).

Constantes physiques

Constante	Symbole	Valeur
unité de masse atomique	u (anciennement amu)	$1,660\,538\,782 \times 10^{-27}$
nombre d'Avogadro	N_A	$6,022\,141\,79 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
rayon de Bohr	a_0	$5,291\,7721 \times 10^{-11} \text{ m}$
constante de Boltzmann	k	$1,380\,6504 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
charge d'un proton	e	$1,602\,1765 \times 10^{-19} \text{ C}$
constante de Faraday	F	$96\,485,34 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$
constante des gaz	R	$8,314\,472 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ $0,083\,1447 \text{ L} \cdot \text{bar} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ $0,082\,0575 \text{ L} \cdot \text{atm} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
masse d'un électron	m_e	$9,109\,382\,15 \times 10^{-31} \text{ kg}$ $5,485\,779\,094 \times 10^{-4} \text{ u}$
masse d'un neutron	m_n	$1,674\,9272 \times 10^{-27} \text{ kg}$ $1,008\,664\,916 \text{ u}$
masse d'un proton	m_p	$1,672\,621637 \times 10^{-27} \text{ kg}$ $1,007\,276\,467 \text{ u}$
constante de Planck	h	$6,626\,069 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
vitesse de la lumière	c	$2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Préfixes SI

Préfixe	Symbole	Multiple	Préfixe	Symbole	Sous-multiple
péta-	P	10^{15}	déci-	d	10^{-1}
téra-	T	10^{12}	centi-	c	10^{-2}
giga-	G	10^9	milli-	m	10^{-3}
méga-	M	10^6	micro-	μ	10^{-6}
kilo-	k	10^3	nano-	n	10^{-9}
hecto-	h	10^2	pico-	p	10^{-12}
déca-	da	10^1	femto-	f	10^{-15}
			atto-	a	10^{-18}

Unités SI et facteurs de conversion des unités

Longueur	
Unité SI : mètre (m)	
1 mètre	= 1,0936 yards
1 centimètre	= 0,39370 pouces
1 pouce	= 2,54 centimètres (exact)
1 kilomètre	= 0,62137 miles
1 mile	= 5280 pieds = 1,6093 kilomètres
1 angström	= 10^{-10} mètre = 100 picomètre

Volume	
Unité SI : mètre cube (m³)	
1 litre	= 10^{-3} m³ = 1 dm³ = 1,0567 quarts US
1 gallon US	= 4 quarts US = 8 pintes = 3,7854 litres
1 quart	= 0,94633 litre

Énergie	
Unité SI : joule (J)	
1 joule	= $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ = 1 N · m = 0,23901 calorie = $9,4781 \times 10^{-4}$ btu (unité thermique britannique)
1 calorie	= 4,184 joules = $3,965 \times 10^{-3}$ btu
1 btu	= 1055,06 joules = 252,2 calories
1 calorie des nutritionnistes	= 0,62137 miles

Masse	
Unité SI : kilogramme (kg)	
1 kilogramme	= 1000 g = 2,2046 livres
1 livre (avoirdupois)	= 453,59 grammes = 0,45359 kilogramme = 16 onces (avoirdupois)
1 tonne	= 1000 kilogrammes = 2204,6 livres
1 unité de masse atomique	= $1,660\,538 \times 10^{-27}$ kg

Pression	
Unité SI : pascal (kg)	
1 pascal	= $1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ = $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
1 atmosphère normale	= 101,325 kilopascals = 760 torrs (mm Hg) = 14,70 livres par pouce carré (psi)
1 bar	= 10^5 pascals = 0,98692 atmosphère normale = 750,06 torrs = 14,51 psi

Température	
Unité SI : kelvin (K)	
0 K	= -273,15 °C = -459,67 °F
K	= °C + 273,15
°C	= $\frac{5}{9} (°F - 32)$
°F	= $\frac{9}{5} (°C) + 32$

Chimie générale

L'objectif de ce grand classique de la chimie générale

L'objectif de la 4^e édition américaine de ce **grand classique** est d'apporter une base solide en chimie générale à tout étudiant en sciences, quelle que soit l'orientation à laquelle il se destine (chimie, biologie, médecine, pharmacie...). Sa réputation mondiale provient notamment de la façon originale avec laquelle les auteurs présentent clairement et de façon vivante, **pédagogique** et agréable les concepts fondamentaux de la chimie. Les auteurs évitent notamment tous les développements trop théoriques que les étudiants pourraient trouver rebutants. De ce fait, seule la formation en mathématiques et en physique donnée au niveau secondaire est requise.

Un parcours historique de la chimie

Cet ouvrage retrace l'histoire de la chimie depuis deux siècles et la genèse des notions qui prévalent actuellement. Cela donne à l'ouvrage un caractère captivant. On baigne dans la chimie depuis la révolution scientifique du XIX^e siècle et l'on voit comment ces concepts se sont progressivement imposés.

Une réorganisation et modernisation complète

Cette nouvelle édition de *Chimie générale* a bénéficié d'une réorganisation complète, d'une modernisation du vocabulaire employé et d'exemples plus actuels. Comme précédemment, une des grandes forces de cet ouvrage vient des 2 500 problèmes de difficulté diverse proposés tout le long de l'ouvrage et pour lesquels un étudiant trouvera les solutions en fin de volume. Les exercices étant magnifiquement choisis pour illustrer chacune des notions, l'étudiant trouvera le moyen de tester ses connaissances et de les appliquer concrètement.

Traduction de la 4^e édition américaine

Jean Toullec, Directeur de recherche honoraire au CNRS, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, est président de la Commission spécialisée de terminologie et de néologie de la chimie et des matériaux (CSTN chimie et matériaux) qui s'inscrit dans le dispositif d'enrichissement de la langue française.

- Une réputation mondiale
- Des anecdotes historiques
- 2 500 problèmes avec différents niveaux de difficulté
- Le solutionnaire à la fin du livre
- Des interchapitres en ligne

ISBN : 978-2-8041-7127-8



QUARRIE



de boeck

www.deboeck.com