

JE ME TROMPE  
DONC J'APPRENDS!

# Chimie

Stéphane Perrio  
Béatrice Roy  
Jean-Yves Winum



- ➔ PLUS DE 100 EXERCICES CORRIGÉS
- ➔ LES ERREURS CLASSIQUES ANALYSÉES
- ➔ LES PIÈGES DÉVOILÉS

DUNOD

Des mêmes auteurs : *Chimie*, coll. « Fluorescences », 2017

Direction artistique : Élisabeth Hébert  
Conception graphique de la couverture : Pierre-André Gualino  
Création de la maquette : Yves Tremblay  
Mise en page : Lumina Datamatics, Inc.  
Image de couverture : © Jacob Lund – AdobeStock.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2020

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff  
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-079565-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	VIII
<b>Remerciements</b>	X
<b>Fiche 1</b> Le système international d'unités et la masse volumique	1
<b>Fiche 2</b> Les chiffres significatifs et la notation scientifique	3
<b>Fiche 3</b> Les calculs d'incertitudes	5
<b>Fiche 4</b> Les phénomènes chimiques ou physiques	7
<b>Fiche 5</b> Les changements d'état	9
<b>Fiche 6</b> La composition de l'atome	11
<b>Fiche 7</b> Les hydrogéoïdes et l'énergie d'ionisation	13
<b>Fiche 8</b> La spectroscopie d'absorption et d'émission atomique	15
<b>Fiche 9</b> Les nombres quantiques ( $n, l, m_l, m_s$ )	17
<b>Fiche 10</b> La représentation des orbitales atomiques	19
<b>Fiche 11</b> La configuration électronique	21
<b>Fiche 12</b> Les électrons de valence	23
<b>Fiche 13</b> Le symbole et la famille des éléments chimiques	25
<b>Fiche 14</b> La structure de Lewis et le degré d'oxydation	27
<b>Fiche 15</b> Les charges formelles	29
<b>Fiche 16</b> Les règles de Gillespie (méthode VSEPR)	31
<b>Fiche 17</b> Les différents types de liaison chimique	33
<b>Fiche 18</b> Les liaisons chimiques intermoléculaires	35
<b>Fiche 19</b> Les entités chimiques	37
<b>Fiche 20</b> Le système cubique centré (CC)	39
<b>Fiche 21</b> Le système cubique faces centrées (CFC)	41
<b>Fiche 22</b> L'hybridation en chimie organique	43
<b>Fiche 23</b> La formule brute	45
<b>Fiche 24</b> La composition centésimale massique	47
<b>Fiche 25</b> Les formules planes	49
<b>Fiche 26</b> Le nombre d'insaturations	51
<b>Fiche 27</b> La masse molaire	53
<b>Fiche 28</b> La quantité de matière	55
<b>Fiche 29</b> La nomenclature des composés inorganiques	57
<b>Fiche 30</b> La nomenclature des alcanes	59
<b>Fiche 31</b> La nomenclature des alcènes et des alcynes	61

## Table des matières

<b>Fiche 32</b> Les fonctions chimiques	63
<b>Fiche 33</b> La classe des fonctions : primaire, secondaire ou tertiaire	65
<b>Fiche 34</b> Les tautomères et la tautomérie	67
<b>Fiche 35</b> La nomenclature des composés polyfonctionnels (1)	69
<b>Fiche 36</b> La nomenclature des composés polyfonctionnels (2)	71
<b>Fiche 37</b> Les plans et les axes de symétrie	73
<b>Fiche 38</b> La représentation de Cram	75
<b>Fiche 39</b> La projection de Newman	77
<b>Fiche 40</b> La projection de Fischer	79
<b>Fiche 41</b> L'écriture d'isomères de constitution à partir d'une formule brute	81
<b>Fiche 42</b> Les isomères de constitution	83
<b>Fiche 43</b> Les règles de Cahn, Ingold et Prelog	85
<b>Fiche 44</b> Les stéréodescripteurs <i>R</i> et <i>S</i>	87
<b>Fiche 45</b> Les relations d'isomérisie	89
<b>Fiche 46</b> La chiralité	91
<b>Fiche 47</b> L'activité optique et le pouvoir rotatoire	93
<b>Fiche 48</b> Les énantiomères et les diastéréoisomères	95
<b>Fiche 49</b> Les stéréodescripteurs <i>Z</i> et <i>E</i>	97
<b>Fiche 50</b> Les stéréodescripteurs <i>cis</i> et <i>trans</i>	99
<b>Fiche 51</b> Les séries <i>D</i> et <i>L</i>	101
<b>Fiche 52</b> Les composés <i>méso</i>	103
<b>Fiche 53</b> Les conformations et les conformères	105
<b>Fiche 54</b> Les conformations chaise du cyclohexane	107
<b>Fiche 55</b> La liaison polarisée et les effets inducteurs	109
<b>Fiche 56</b> La lacune électronique	111
<b>Fiche 57</b> Les systèmes conjugués et la mésomérisie	113
<b>Fiche 58</b> Les formes limites de résonance	115
<b>Fiche 59</b> La mésomérisie avec des entités chargées	117
<b>Fiche 60</b> La stabilité des carbocations	119
<b>Fiche 61</b> Les carbanions : stabilité et basicité	121
<b>Fiche 62</b> La basicité d'un centre azoté	123
<b>Fiche 63</b> L'aromaticité	125
<b>Fiche 64</b> Équilibrer une équation chimique	127
<b>Fiche 65</b> La loi des gaz parfaits	129

<b>Fiche 66</b> Le tableau d'avancement	131
<b>Fiche 67</b> La constante d'équilibre	133
<b>Fiche 68</b> Les échanges de chaleur	135
<b>Fiche 69</b> La vitesse d'une réaction	137
<b>Fiche 70</b> L'ordre d'une réaction	139
<b>Fiche 71</b> Le diagramme énergétique	141
<b>Fiche 72</b> Les nucléophiles et les électrophiles	143
<b>Fiche 73</b> L'écriture d'un mécanisme réactionnel	145
<b>Fiche 74</b> Les types de réaction en chimie organique	147
<b>Fiche 75</b> Les réactions acido-basiques en chimie organique	149
<b>Fiche 76</b> Stéréosélectivité et stéréospécificité	151
<b>Fiche 77</b> Les réactions d'oxydoréduction	153
<b>Fiche 78</b> La prévision des réactions d'oxydoréduction	155
<b>Fiche 79</b> Équilibrer une équation d'oxydoréduction en milieu acide	157
<b>Fiche 80</b> Équilibrer une équation d'oxydoréduction en milieu basique	159
<b>Fiche 81</b> La pile galvanique et le potentiel standard de réduction	161
<b>Fiche 82</b> Le potentiel d'une pile et l'équation de Nernst	163
<b>Fiche 83</b> La concentration et la dilution	165
<b>Fiche 84</b> La solubilité et le produit de solubilité	167
<b>Fiche 85</b> Les réactions acide-base	169
<b>Fiche 86</b> Le produit ionique de l'eau et le pH	171
<b>Fiche 87</b> Le diagramme de prédominance	173
<b>Fiche 88</b> Le pH d'une solution aqueuse d'un acide	175
<b>Fiche 89</b> Le pH d'une solution aqueuse d'une base	177
<b>Fiche 90</b> Les solvants	179
<b>Fiche 91</b> L'analyse fonctionnelle	181
<b>Fiche 92</b> L'analyse qualitative des ions	183
<b>Fiche 93</b> La réalisation d'un montage à reflux	185
<b>Fiche 94</b> Calcul du rendement d'une réaction	187
<b>Fiche 95</b> La chromatographie sur couche mince	189
<b>Fiche 96</b> L'extraction liquide-liquide	191
<b>Fiche 97</b> L'excès énantiomérique	193
<b>Fiche 98</b> Les ondes électromagnétiques	195

## Table des matières

<b>Fiche 99</b>	La résonance magnétique nucléaire (1)	197
<b>Fiche 100</b>	La résonance magnétique nucléaire (2)	199
<b>Fiche 101</b>	La spectroscopie UV-visible	201
<b>Fiche 102</b>	La spectroscopie infrarouge	203
<b>Annexe 1</b>	Tableau périodique des éléments	205
<b>Annexe 2</b>	Valeurs de quelques constantes fondamentales	206
<b>Annexe 3</b>	Électronégativité des atomes selon l'échelle de Pauling	207
<b>Annexe 4</b>	Fonctions chimiques et nomenclature	208
<b>Annexe 5</b>	Table simplifiée des déplacements chimiques ( $\delta$ ) en RMN $^1\text{H}$	209
<b>Index des mots-clés</b>		210
<b>Index</b>		211

# Je me trompe, donc j'apprends !

## STRUCTURES CHIMIQUES.

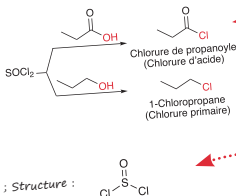
### 16 Les règles de Gillespie (méthode VSEPR)

#### Énoncé

Le chlorure de thionyle  $\text{SOCl}_2$ , est un réactif inorganique utilisé dans des réactions de chloration. Il permet, par exemple, la transformation de l'acide propanoïque en chlorure de propanoyle et du propan-1-ol en 1-chloropropane. Après avoir codifié la molécule  $\text{SOCl}_2$ , selon la terminologie VSEPR, la représenter dans l'espace. En déduire sa géométrie.

#### Réponse de l'étudiant

Codification :  $\text{AX}_2\text{E}_2$  ; géométrie plane ; Structure :



102 fiches de 2 pages, regroupées par thème

1 Chaque fiche commence par l'énoncé d'un exercice ou QCM type d'examen

2 La réponse fautive « type » de l'étudiant est donnée

3 Dans un encadré une analyse de la réponse fautive est proposée

#### Réflexes pour bien répondre

La codification est incorrecte, probablement à cause d'une mauvaise écriture de la structure de Lewis de la molécule (décompte électronique incorrect et absence de doublets non liants sur la structure proposée). Il en résulte que la géométrie est aussi fautive. Elle est toutefois cohérente avec la codification  $\text{AX}_2\text{E}_2$ , qui a été suggérée.

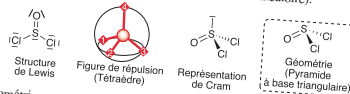
La géométrie d'une molécule simple avec un atome central peut être déterminée par les règles de Gillespie (méthode VSEPR, Valence Shell Electron Pair Repulsion) au travers du codification  $\text{AX}_m\text{E}_n$  (A : l'atome central ; m : le nombre d'atomes X directement et liés à l'atome central et n : le nombre de doublets non liants portés par l'atome central et liés à l'atome central et n : la notation est directement liée à la représentation de la molécule selon Lewis, et donc à son décompte électronique. Ce dénombrement, qui doit figurer dans la représentation de Lewis (Fiche 14), correspond aux électrons de valence  $N_v$  de chaque atome présent.

Dans le cas du chlorure de thionyle  $\text{SOCl}_2$ , proposé dans l'exercice, les trois atomes impliqués ont les caractéristiques résumées ci-dessous.

Atome	Numéro atomique Z	Configur.
Soufre (S)	16	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$
Oxygène (O)	8	$1s^2 2s^2 2p^4$
Chlore (Cl)	17	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$

Le nombre total d'électrons devant apparaître dans la structure de Lewis est de  $6 + 6 + (2 \times 7) = 26$  (13 paires électroniques). Il est lié aux deux atomes de chlore (Cl) par un doublet et à l'atome d'oxygène (O) avec une liaison double (3 paires électroniques).

comporte aussi un doublet non liant ( $n = 1$ ). On notera que l'atome de soufre s'est entouré de 10 électrons (règle de l'octet étendu, Fiche 14). Il en résulte la codification  $\text{AX}_2\text{E}_2$ . La molécule est en trois dimensions. Les deux atomes de chlore et l'atome d'oxygène pointent vers les trois sommets du tétraèdre, tandis que le doublet libre est positionné sur le quatrième sommet (on peut placer ces quatre éléments d'une manière aléatoire).



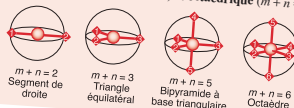
Pour la géométrie, on ne prend en compte que les atomes autour de l'atome central. C'est ici une pyramide à base triangulaire.

#### Réponse exacte

Codification :  $\text{AX}_2\text{E}_2$ . Figure de répulsion : tétraèdre. Géométrie : pyramide à base triangulaire.

#### Pour aller plus loin

La figure de répulsion rend compte de la répulsion entre tous les doublets, liants et non liants « fixés » à l'atome central A. Elle est définie par la valeur ( $m + n$ ) de la codification  $\text{AX}_m\text{E}_n$ . En plus de la figure de répulsion tétraédrique ( $m + n = 4$ ) abordée dans l'exercice, on rencontre les figures linéaire ( $m + n = 2$ ), triangulaire ( $m + n = 3$ ), bipyramide à base triangulaire ( $m + n = 5$ ) et octaédrique ( $m + n = 6$ ).



#### Ne tombez pas dans le piège

- Les orbitales vacantes (ou lacune électronique, Fiche 56) dans la notation VSEPR. Exemple :  $\text{AX}_2\text{E}_3$  pour  $\text{BH}_3$ .
- Ne pas confondre figure de répulsion et géométrie. Cependant, pour les codifications avec aucun doublet non liant sur l'atome central, le nom de la figure de répulsion est le même que celui de la géométrie.
- Des composés qui ont des formules qui se ressemblent fortement n'ont pas obligatoirement la même codification et, de surcroît, la même géométrie. Comparer  $\text{SOCl}_2$  ( $\text{AX}_2\text{E}_2$ , géométrie pyramide à base triangulaire) avec  $\text{COCl}_2$  ( $\text{AX}_2\text{E}_0$ , géométrie triangulaire).

Suivent ensuite des rappels de cours et la méthode à suivre pour répondre à l'énoncé...

...ce qui conduit à la réponse exacte qui apparaît au verso de la fiche

Un encadré tramé fait un zoom sur les points à retenir

Chaque fiche se termine par une rubrique « Les pièges à éviter »

# Avant-propos

*Le succès ne consiste pas à ne jamais faire d'erreurs,  
mais à ne jamais faire la même erreur deux fois.*

*George Bernard Shaw*

Aborder des exercices, en l'occurrence de chimie, en s'attardant sur l'erreur est une approche pédagogique particulièrement originale. Les erreurs sont parfois évoquées dans des ouvrages, mais de façon sporadique et sous la forme d'un bêtisier. Le concept de l'erreur est abordé ici d'une façon positive dans le processus d'apprentissage. Cet aspect constitue la philosophie même de cet ouvrage. Nous espérons que cette approche sera stimulante et sécurisante pour le lecteur étudiant. Il ne faut surtout pas considérer l'erreur comme une « perle » pour en rire, ni comme une faute difficile à vivre et systématiquement sanctionnée. Pour élaborer ce manuel, nous nous sommes appuyés sur nos expériences d'enseignement, déjà longues, à l'université et les erreurs que nous avons rencontrées de manière récurrente à travers les différents flux d'étudiants que nous avons côtoyés.

Ce manuel regroupe 102 fiches d'exercices, sous un format recto-verso. Chaque fiche aborde une notion de chimie bien spécifique, au travers d'un exercice court, et s'articule autour des sept éléments structuraux suivants :

- l'énoncé d'un problème « type » ;
- une réponse, fautive ou partiellement incorrecte, fréquemment rencontrée dans les copies d'étudiants ;
- un commentaire sur la réponse précédente, en se focalisant brièvement sur les points corrects et incorrects ;
- un rappel de cours sur la notion abordée, suivi de la méthode préconisée pour résoudre correctement l'exercice ;
- un récapitulatif de la réponse exacte ;
- un complément sur la notion, qui va au-delà de ce qui était nécessaire pour traiter l'exercice ;
- et enfin un rappel de vigilance sur les erreurs à éviter.

Nous n'avons pas souhaité regrouper ces fiches par chapitre ou par grand domaine de la chimie (chimie physique, chimie inorganique et chimie organique). En effet, la frontière pour ce dernier critère, peut être particulièrement ténue et fonction de l'exemple abordé dans l'exercice. Nous avons choisi de les ordonner selon une logique globale de progression des connaissances. Ainsi, afin que le lecteur puisse facilement identifier le sujet d'une fiche, nous lui avons affecté systématiquement un **mot-clé** (indiqué en haut à droite de chaque fiche) parmi les 17 énumérés ci-après par ordre d'occurrence décroissante (le nombre de fiches est indiqué entre parenthèses) : **stéréochimie** (17), **chimie des solutions** (13), **atomistique** (8), **structures chimiques** (8), **effets électroniques** (8), **nomenclature** (7), **chimie expérimentale** (7), **mécanismes réactionnels** (6), **spectroscopie** (5), **transformations chimiques** (4), **formules chimiques** (4), **métrologie** (3), **thermochimie** (3), **isomérisation** (3), **crystallographie** (2), **grandeurs** (2) et **cinétique** (2). Les fiches labélisées avec un mot-clé identique se succèdent le plus souvent, mais certaines peuvent aussi se trouver déconnectées.



Le nombre d'exercices de cet ouvrage est volontairement limité. Les exercices choisis sont donc ciblés et jugés incontournables ou impliquant des notions importantes, mais peu abordées de manière générale. Par ailleurs, nous avons essayé de varier le type d'exercices avec des énoncés sous la forme de problèmes, de questions ou de QCM. Certains QCM sont issus d'épreuves de concours d'accès aux études de santé. Une vision objective de la difficulté de la notion apparaît alors avec le pourcentage réel de réussite qui est mentionné.

Ce livre s'adresse globalement aux étudiants ayant un enseignement de chimie dans leur cursus post-baccalauréat, c'est-à-dire en L1 Sciences ou Accès Santé, en classes préparatoires ou en DUT/BTS.

*Des questions ? Des suggestions ? Des erreurs repérées ?  
N'hésitez pas à contacter l'équipe d'auteurs à l'adresse suivante :  
JeMeTrompe.Chimie@gmail.com*

Stéphane Perrio (université de Caen Normandie)

Béatrice Roy (université de Montpellier)

Jean-Yves Winum (université de Montpellier)

# Remerciements

Nous souhaitons vivement remercier les collègues, la plupart enseignants-chercheurs, qui ont participé comme correcteurs à l'élaboration de cet ouvrage. Ils ont contrôlé les exercices, mais aussi apporté de précieux commentaires et de judicieuses critiques, sur la base de leurs expériences pédagogiques dans les différents domaines de la chimie que nous avons abordés (chimie physique, organique ou inorganique). Toutefois, nous assumons l'entière responsabilité des coquilles ou erreurs qui pourraient subsister.

Nous souhaitons tout d'abord saluer le travail de relecture des collègues plus éloignés géographiquement : Paul-Alain Jaffrès (Brest), Jacques Uziel (Cergy-Pontoise), Isabelle Bonnamour et Nathalie Pérol (Lyon), Karine Julienne-Aphecette (Nantes), Isabelle Chataigner et Sylvain Oudeyer (Rouen). Un grand merci ensuite à ceux que nous croisons quotidiennement : Nathalie Bar, Marie-Claire Lasne, Cyprien Lemouchi, Jean-François Lohier, Emmanuel Pfund, Laetitia Oliviero, Vincent Reboul et Karine Thomas (Caen), Xavier Bantreil, Sébastien Clément, Jean-Sébastien Filhol, Patrice Huguet, David Egron et Florence Rouessac (Montpellier).

Enfin, nous tenons à remercier les éditions Dunod, et plus particulièrement Lætitia Hérin pour son écoute et son soutien depuis l'amorce de ce projet et Eléna Chryssos, pour le suivi de la réalisation de l'ouvrage.

L'ensemble des personnes mentionnées a contribué, nous l'espérons, à faire de ce manuel d'exercices, un outil de travail clair, agréable à consulter et utile au public étudiant ciblé.

# 1 Le système international d'unités et la masse volumique

## Énoncé

Le nickel (Ni) est un métal blanc argenté, très stable face à l'oxydation et la corrosion. Il est utilisé en particulier dans les pièces de monnaie, pour le plaquage du fer, du cuivre, du laiton. On le retrouve également dans un grand nombre d'alliages métalliques présentant des propriétés mécaniques et thermiques remarquables. Le nickel à l'état solide a une masse volumique  $\rho = 8,902 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  à une température de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Définir la masse volumique et convertir celle du nickel dans les unités du système international.

## Réponse de l'étudiant 😞

La masse volumique est la masse divisée par le volume. Dans le système international, la masse volumique du nickel est égale à  $8\ 902\ 000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

## 🔧 Réflexes pour bien répondre

La définition donnée par l'étudiant manque de précision. La conversion dans les unités du système international est fautive.

La masse volumique d'une substance notée  $\rho$  (lettre grecque rhô) est une grandeur physique caractérisant la masse d'une substance par unité de volume. Chaque corps pur a une masse volumique spécifique. Son unité dans le système international est le kilogramme par mètre cube ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

- Pour un liquide et un solide :  $\rho = m/V$ .
- Pour un gaz :  $\rho = m/V$ . En le considérant comme gaz parfait (► **Fiche 65**),  $m = n \times M$  avec  $n = (P \times V)/(R \times T)$  ; donc  $\rho = (M \times P)/(R \times T)$  avec  $P$  la pression en Pa,  $T$  la température en K,  $M$  la masse molaire en  $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$  et la constante des gaz parfaits  $R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

La température a une influence sur les propriétés physiques des substances, en particulier sur la pression et le volume. Étant donné que, par définition, la masse volumique implique un volume, il est nécessaire de préciser la température à laquelle elle a été calculée. On l'indique généralement en indice de  $\rho$ .

Dans l'exercice proposé, il est demandé de convertir la masse volumique du nickel dans les unités du système international (SI).

Les sept grandeurs de base correspondant aux sept unités de base du SI sont déclinées dans le tableau suivant :

Grandeurs	Unités
Longueur $l$	mètre : m
Masse $m$	kilogramme : kg
Temps $t$	seconde : s
Température $T$	kelvin : K
Quantité de matière $n$	mole : mol

Grandeurs	Unités
Courant électrique $I$	ampère : A
Intensité lumineuse $I_\nu$	candela : cd

Il existe également des grandeurs et unités dérivées du SI qui ont des noms qui leur sont propres (fréquence  $f$  : hertz [Hz] ; pression  $P$  : pascal [Pa] ; énergie  $E$  : joule [J]).

La masse volumique du nickel est donnée en  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Elle doit être convertie en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

$$\rho_{20^\circ\text{C}} = 8,902 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} = 8,902 \text{ g} ; 1 \text{ cm}^3 = 8,902\cdot 10^{-3} \text{ kg} ; 1\cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 8,902\cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}.$$

$$\text{Donc } \rho_{20^\circ\text{C}} = 8\,902 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}.$$

### Réponse exacte 😊

La masse volumique est le rapport entre la masse d'une substance et son volume :  $\rho = m/V$ .

Dans les unités du système international  $\rho_{20^\circ\text{C}} = 8\,902 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

### 📍 Pour aller plus loin

- **La masse volumique partielle  $\rho_i$  (aussi appelée concentration pondérale ou concentration massique)** d'un soluté en solution est le rapport entre la masse de soluté  $m_i$  sur le volume total de solution  $V$ . La somme des masses volumiques partielles des composants d'une solution (y compris le solvant) est égale à la masse volumique de la solution.
- **Ne pas confondre densité et masse volumique.** La densité ( $d$ ) d'un corps solide ou liquide est une grandeur sans dimension correspondant au rapport de la masse volumique du corps considéré à la masse volumique d'un corps pris comme référence. L'eau est généralement prise comme standard par les chimistes ( $\rho[\text{H}_2\text{O}] = 1\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} = 1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  à  $4^\circ\text{C}$  et sous 1 atm).  $d = \rho/\rho_{\text{eau}}$ .
- **Pour les gaz** (se comportant comme un gaz parfait), la densité par rapport à l'air (à  $0^\circ\text{C}$  et 1 atm) est  $d = \rho_{\text{gaz}}/\rho_{\text{air}} = M_{\text{gaz}}/M_{\text{air}} = M_{\text{gaz}}/29$  ( $R \times T/P$  identique pour l'air et le gaz,  $M_{\text{gaz}}$  en  $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$  et  $M_{\text{air}} = 29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ).

### ! Ne tombez pas dans le piège

- Attention à la manipulation mathématique des puissances de 10.
- Bien connaître les facteurs de conversion des unités de volumes :  $1 \text{ L} = 1\,000 \text{ mL} = 1 \text{ dm}^3 = 1\,000 \text{ cm}^3$  ;  $1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ mL}$ .
- Connaître parfaitement les sept grandeurs et unités de base et les grandeurs et unités dérivées dans le système international (SI).

## 2

## Les chiffres significatifs et la notation scientifique

### Énoncé

Effectuer les calculs de masse suivants (en gramme) et donner la réponse avec le nombre correct de chiffres significatifs. Exprimer également les résultats en notation scientifique.

a)  $2 \times 1,008 + 15,99$  ;

b)  $137,3 + 2 \times 35,45$  ;

c)  $118,7/2 - 35,5$ .

### Réponse de l'étudiant ☹️

a)  $18,006 \text{ g}$  ;  $18\ 006 \cdot 10^{-3} \text{ g}$  ;

b)  $208,2 \text{ g}$  ;  $0,2082 \cdot 10^3 \text{ g}$  ;

c)  $23,85 \text{ g}$  ;  $0,02385 \cdot 10^3 \text{ g}$ .

### ⚙️ Réflexes pour bien répondre

Seule la réponse b) a été donnée avec le nombre correct de chiffres significatifs. Les calculs a) et c) n'ont pas été arrondis au bon nombre de décimales (nombre de chiffres après la virgule). De plus, aucune réponse n'a été correctement écrite en notation scientifique.

Les **chiffres significatifs (CS)** correspondent à tous les chiffres certains d'une mesure, y compris le premier chiffre incertain. Pour déterminer le nombre de chiffres significatifs, voici les règles à suivre : 1) tous les chiffres non nuls sont significatifs ; 2) les zéros entre des chiffres non nuls sont significatifs ; 3) les zéros au début d'un nombre décimal ne sont pas significatifs ; 4) les zéros à la fin d'un nombre décimal sont significatifs ; 5) dans le cas des nombres entiers se terminant par un ou plusieurs zéros, c'est le contexte qui indique si ces derniers sont significatifs ou non. Dans ce cas, le recours à la notation scientifique est une façon d'éviter toute ambiguïté.

Les règles d'application des chiffres significatifs dans les calculs sont les suivantes :

- Pour une addition et une soustraction, la réponse doit avoir le même nombre de décimales que le terme qui en possède le moins. Ce n'est pas le nombre de chiffres significatifs qui impose la précision du résultat mais le nombre de décimales.
- Pour une multiplication et une division, la réponse doit avoir le même nombre de chiffres significatifs que le terme avec le moins de chiffres significatifs. Attention à ne pas tenir compte des chiffres significatifs du coefficient multiplicateur ou diviseur (ce n'est pas une donnée de mesure).
- Pour arrondir un résultat, abrégé à l'unité supérieure seulement si le premier chiffre supprimé est supérieur ou égal à 5.

Pour afficher un résultat en **notation scientifique**, on doit le présenter sous la forme d'un chiffre (a) compris entre 1 et 10 multiplié par 10 élevé à une puissance ( $a \cdot 10^n$ ).

Abordons maintenant les calculs :

a) On commence par la multiplication :  $2 \times \underline{1,008} = \underline{2,016}$  (4 CS pour les 2 valeurs)

On effectue ensuite l'addition :  $2,01\underline{6} + 15,9\underline{9} = 18,006$

2,106 : précision au millième et 15,99 : précision au centième.

18,006 doit donc être arrondi au centième, soit **18,01 g**.

18,01 g en notation scientifique est donc  **$1,801 \cdot 10^1$  g**.

b) On commence par la multiplication :  $2 \times \underline{35,45} = \underline{70,90}$  (4 CS pour les 2 valeurs)

L'opération d'addition donne :  $137,\underline{3} + 70,\underline{90} = 208,20$

137,3 : précision au dixième et 70,90 : précision au centième.

208,20 doit donc être arrondi au dixième, soit **208,2 g**.

Soit en notation scientifique :  **$2,082 \cdot 10^2$  g**.

c) On commence par la division :  $\underline{118,7/2} = \underline{59,35}$  (4 CS pour les 2 valeurs)

La soustraction conduit à  $59,35 - 35,5 = 23,85$

59,35 : précision au centième et 35,5 : précision au dixième.

23,85 doit donc être arrondi au dixième, soit **23,9 g**.

Soit en notation scientifique :  **$2,39 \cdot 10^1$  g**.

### Réponse exacte 😊

a)  $18,01$  g ;  $1,801 \cdot 10^1$  g.

b)  $208,2$  g ;  $2,082 \cdot 10^2$  g.

c)  $23,85$  g ;  $2,39 \cdot 10^1$  g.

### 📍 Pour aller plus loin

- Il existe une variante de la notation scientifique appelée la **notation ingénieur**. Dans cette notation, un à trois chiffres significatifs sont gardés devant la virgule afin que la puissance de 10 soit toujours un multiple de trois. Exemple : le nombre 56 745,9 s'écrit  $5,674 59 \cdot 10^4$  en notation scientifique, mais  $56,7459 \cdot 10^3$  en notation ingénieur.

### ! Ne tombez pas dans le piège

- Ne pas se tromper dans la détermination du nombre de chiffres significatifs. Les règles diffèrent entre addition-soustraction et multiplication-division.
- Attention au 0 dans les nombres décimaux :  $\underline{1,3700}$  (5 CS) ;  $0,\underline{37}$  (2 CS).
- Ne pas confondre notation scientifique et notation ingénieur.

## 3

## Les calculs d'incertitudes

## Énoncé

Pour les deux mesures suivantes, exprimer le résultat pour un niveau de confiance de 95 %.

- 1) Vous pesez une masse de 54,567 g sur une balance numérique précise au 1/1 000<sup>e</sup> de gramme.
- 2) Un thermomètre à alcool indique une température  $\theta$  de 24,0 °C. Une graduation du thermomètre correspond à 0,5 °C.

## Réponse de l'étudiant ☹️

- 1)  $54,567 \pm 0,0006 \text{ g}$  ;
- 2)  $20 \pm 0,3 \text{ °C}$ .

## ⚙️ Réflexes pour bien répondre

1) L'étudiant a bien évalué l'incertitude type et l'incertitude élargie pour le niveau de confiance de 95 %. Cependant, il n'a pas arrondi cette valeur au nombre de décimale de la mesure. 2) L'expression du résultat n'est pas correcte, et l'incertitude type et l'incertitude élargie sont fausses.

L'**incertitude** de mesure est la valeur qui caractérise la dispersion des valeurs qui peuvent être attribuées à une grandeur  $m$  mesurée.

Évaluer l'incertitude équivaut à estimer l'erreur (aléatoire et systématique) commise lors d'une mesure. Elle donne accès à un intervalle autour de la valeur mesurée  $x$  dans lequel est supposée appartenir la **valeur vraie**. L'écart-type de  $x$  est appelé **incertitude-type** sur le résultat du mesurage. On note  $u(x)$  cette incertitude-type sur  $m$ .

On distingue deux types d'incertitudes-types. L'**incertitude de type A** est une incertitude de type statistique. On **répète** un certain nombre de fois la mesure de la grandeur cherchée. Le résultat est la valeur moyenne des valeurs mesurées et une incertitude calculée statistiquement. L'**incertitude de type B** est une incertitude qui n'est pas statistique. C'est le cas d'une mesure **unique** réalisée avec un appareil de classe connue. L'incertitude-type est estimée en analysant toutes les sources d'erreurs, les spécifications des appareils de mesures et les conditions expérimentales. Différents cas peuvent se présenter :

- lorsque le constructeur fournit l'incertitude-type  $u(x)$ , on utilise directement son incertitude ;
- si le constructeur fournit une indication de type  $\Delta c$  sans autre information, l'incertitude type  $u(x) = \Delta c / \sqrt{3}$  ;
- pour un instrument à affichage numérique (comme dans le cas de la balance), l'incertitude-type de lecture est donnée par la relation  $u(x) = q / (2 \times \sqrt{3})$ ,  $q$  étant la résolution ;
- pour une mesure avec un instrument à graduation (appareil à cadran, thermomètre, etc.), l'incertitude type de lecture  $u(x) = q / 6$  ;
- pour un instrument vérifié et conforme à une classe, si la classe est  $\pm a$ , l'incertitude-type est  $u(x) = a / \sqrt{3}$ .

Pour les incertitudes de type B, on considère que l'incertitude de mesure à prendre en compte est l'**incertitude élargie**  $U(x) = k \times u(x)$ . Pour un niveau de confiance de 95 %,  $k = 2$ , pour un niveau de confiance de 99 %,  $k = 3$  ( $k$  est le **coefficient d'élargissement**).

L'**incertitude relative** =  $U(x)/x \times 100$ .

Le résultat de la mesure  $m$  est exprimée sous cette forme :

$$m = x \pm U(x), x \text{ étant le résultat de la mesure.}$$

1) Dans la pesée de l'énoncé, la balance, précise au 1/1 000<sup>e</sup> de gramme, affiche une masse de 54,567 g. C'est un instrument à affichage numérique. La résolution est donc  $q = 1/1\ 000$  g. L'incertitude type peut être calculée directement :

$$u(x) = q/(2 \times \sqrt{3}) = (1/1\ 000)/(2 \times \sqrt{3}) = \mathbf{0,0003}$$

L'incertitude élargie pour un niveau de confiance de 95 % ( $k$  égal à 2) :

$U(x) = 2 u(x) = 2 \times 0,0003 = \mathbf{0,0006}$  que l'on arrondit à **0,001** (la mesure est au 1/1 000, l'incertitude doit être au 1/1 000).

L'expression du résultat la mesure :  $m = \mathbf{54,567 \pm 0,001}$  g.

2) Le thermomètre est un instrument à graduation. Il en possède tous les 0,5 °C. La résolution est donc de 0,5 °C. L'incertitude type  $u(x) = q/6 = 0,5/6 = \mathbf{0,08}$ .

L'incertitude élargie pour un niveau de confiance de 95 % ( $k$  égal à 2) :

$U(x) = 2 u(x) = 2 \times 0,08 = \mathbf{0,16}$  que l'on arrondit à 0,2 (la mesure est au 1/10, l'incertitude doit être au 1/10).

L'expression du résultat la mesure :  $m = \mathbf{24,0 \pm 0,2}$  °C.

### Réponse exacte 😊

1)  $54,567 \pm 0,001$  g ; 2)  $24,0 \pm 0,2$  °C.

## 🔗 Pour aller plus loin

### • Ne pas confondre calcul d'erreurs et calcul d'incertitudes.

L'erreur est la différence entre la valeur mesurée et la valeur vraie de la grandeur que l'on mesure. Une **erreur de mesure** a en général deux composantes : une **erreur aléatoire** (qui apparaît de façon fortuite, appelée aussi erreur de répétabilité) et une **erreur systématique** (qui dépend de l'appareil de mesure, et qui va se reproduire à chaque mesure).

- Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. Voir le site du Bureau international des poids et mesures (BIPM) : [www.bipm.org/fr/publications/guides/gum.html](http://www.bipm.org/fr/publications/guides/gum.html)

## ! Ne tombez pas dans le piège

- Bien connaître les règles pour arrondir les résultats (► **Fiche 2**).
- Il n'est pas possible de mesurer la valeur exacte (valeur vraie) d'une grandeur. Lors d'une mesure, il est nécessaire d'évaluer l'incertitude type et l'incertitude élargie. Ceci permet d'obtenir le résultat de la mesure avec un niveau de confiance donné.



# Les phénomènes chimiques ou physiques

## Énoncé

Pour chacun des phénomènes suivants, indiquer s'il décrit un phénomène chimique ou un phénomène physique : a) l'évaporation d'un solvant ; b) la fermentation du jus de raisin ; c) une batterie qui se décharge ; d) l'eau qui se sépare de l'huile ; e) le glaçon qui fond ; f) la bougie qui se consume ; g) le violon qui se désaccorde sous l'effet de la chaleur ; h) un clou qui rouille ; i) une allumette qui brûle.

## Réponse de l'étudiant ☹️

a) chimique ; b) physique ; c) physique ; d) chimique ; e) physique ; f) physique ; g) physique ; h) physique ; i) chimique.

## ⚙️ Réflexes pour bien répondre

Seules les réponses e), g) et i) sont correctes. L'étudiant n'a pas su analyser correctement l'origine des différents phénomènes.

La matière peut subir différents changements qui sont classés en deux catégories :

- Les **phénomènes chimiques** sont observés lorsqu'on a une **transformation de la matière**, c'est-à-dire quand on a une **modification de la nature des entités chimiques** suite à une **réaction chimique**.
- Les **phénomènes physiques** ne modifient que l'apparence de la matière, et non la nature des entités chimiques.

Les phénomènes chimiques sont souvent **irréversibles** tandis que de nombreux phénomènes physiques correspondent généralement à des changements **réversibles** (exemple des **changements d'états**).

Pour les phénomènes décrits dans l'énoncé :

- L'évaporation d'un solvant : il s'agit d'un changement d'état. Le solvant passe de l'état liquide à l'état vapeur sans modification de la nature des molécules de solvant. On est en présence d'un **phénomène physique**.
- La fermentation du jus de raisin : au cours de ce processus, le sucre (glucose) contenu dans la chair des raisins est transformé en alcool (éthanol, sous l'action de levure). Au cours de cette fermentation dite alcoolique, on a bien une modification de la composition du jus de raisin. Il s'agit d'un **phénomène chimique**.
- Une batterie qui se décharge : une batterie correspond à un groupe de cellules électrochimiques galvaniques, où les potentiels des cellules individuelles s'additionnent pour donner le potentiel total de la batterie. La décharge de la batterie correspond à la réaction d'oxydo-réduction se produisant à l'intérieur des cellules galvaniques (► **Fiche 81**). Il s'agit d'un **phénomène chimique**.
- L'eau qui se sépare de l'huile : au cours de ce processus, il n'y a pas de modification de la composition de l'eau et de l'huile. On est en présence d'un **phénomène physique**. L'eau de nature polaire, et l'huile de nature apolaire, ne peuvent pas se mélanger et se séparent.
- Le glaçon qui fond : dans ce processus, on passe de l'eau sous forme solide, à de l'eau sous forme liquide. Il n'y a pas de modification de la structure des molécules d'eau, mais simplement un changement d'état. Il s'agit d'un processus de fusion. C'est un **phénomène physique**.

f) La bougie qui se consume : le constituant principal de la bougie est la paraffine, un hydrocarbure solide de formule  $C_{25}H_{52}$ . Lorsqu'une bougie se consume, il y a combustion de la paraffine selon la réaction :  $C_{25}H_{52(s)} + 38 O_{2(g)} \rightarrow 25 CO_{2(g)} + 26 H_2O_{(g)}$ . On a modification de la nature des entités présentes. Il s'agit d'un **phénomène chimique**.

g) Le violon qui se désaccorde sous l'effet de la chaleur : ce phénomène provient de la modification de la tension des cordes dû au phénomène de dilatation. Il n'y a pas, au cours de ce processus, de modification de la composition de la matière constituant la corde. Il s'agit d'un **phénomène physique**.

h) Un clou qui rouille : ce phénomène correspond à l'oxydation par l'air humide du fer métallique constituant le clou pour donner la rouille (oxyde de fer), selon la réaction :  $4 Fe_{(s)} + 3 O_{2(g)} \rightarrow 2 Fe_2O_{3(s)}$ . On a modification de la composition chimique du clou, donc il s'agit bien d'un **phénomène chimique**.

i) Une allumette qui brûle : une allumette est constituée sur sa pointe d'un mélange contenant du chlorate de potassium ( $KClO_3$ ) et d'un colorant rouge. Le grattoir qui contient du phosphore rouge va permettre lors du frottement de l'allumette de transformer le phosphore rouge en phosphore blanc ( $P_4$ ) qui s'enflamme immédiatement entraînant la décomposition du chlorate de potassium selon la réaction d'oxydo-réduction suivante :  $3 P_{4(s)} + 10 KClO_{3(s)} \rightarrow 3 P_4O_{10(s)} + 10 KCl$ . On a modification de la composition chimique de l'allumette. C'est un **phénomène chimique**.

## Réponse exacte 😊

	Chimique	Physique
a) L'évaporation d'un solvant		✓
b) La fermentation du jus de raisin	✓	
c) Une batterie qui se décharge	✓	
d) L'eau qui se sépare de l'huile		✓
e) Le glaçon qui fond		✓
f) La bougie qui se consume	✓	
g) Le violon qui se désaccorde		✓
h) Un clou qui rouille	✓	
i) Une allumette qui brûle	✓	

## 🔍 Pour aller plus loin

- Les **changements d'états** sont des phénomènes physiques souvent rencontrés en chimie. Les trois principaux états de la matière sont : l'**état solide**, l'**état liquide** et l'**état gazeux** (► **Fiche 5**).

## ⚠ Ne tombez pas dans le piège

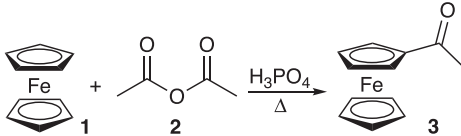
- Bien analyser le phénomène dans le détail.
- Savoir reconnaître les différents changements d'état.

## 5

## Les changements d'état

## Énoncé

Les dérivés du ferrocène sont des complexes organométalliques, dits « sandwich », constitués d'un cation  $\text{Fe}^{2+}$  piégé par deux anions cyclopentadiényle ( $\text{C}_5\text{H}_5^-$ ). Le ferrocène **1** est purifié, sous pression atmosphérique, par sublimation avec un chauffage doux à  $90^\circ\text{C}$ . Il est ensuite mis en réaction avec l'anhydride acétique **2** pour former, selon un processus de substitution, l'acétylferrocène **3**.



	$\theta_{\text{Fusion}}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$\theta_{\text{Ébullition}}$ ( $^\circ\text{C}$ )
<b>2</b>	-73	140
<b>3</b>	82	-

N.B. :  $\theta_{\text{Fusion}}$  et  $\theta_{\text{Ébullition}}$  sont données sous pression atmosphérique.

Quelles sont les affirmations correctes parmi les proposition suivantes ?

- Les précurseurs **1** et **2** sont solides à la température de  $20^\circ\text{C}$ .
- Au cours de sa sublimation, le ferrocène **1** devient liquide, puis gazeux.
- L'anhydride acétique **2** est gazeux à la température de  $150^\circ\text{C}$ .
- La fusion de l'acétylferrocène **3** est progressive, de  $20$  à  $82^\circ\text{C}$ .

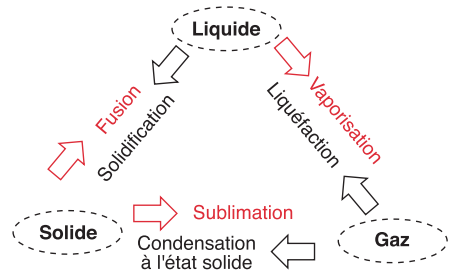
## Réponse de l'étudiant ☹️

La première affirmation (a) est fausse. Les trois suivantes (b, c et d) sont vraies.

## Réflexes pour bien répondre

L'étudiant a répondu correctement pour les questions (a) et (c). Il s'est trompé pour les deux autres.

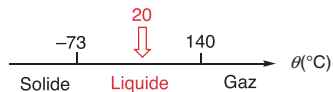
La matière peut se présenter sous trois états physiques principaux, l'état solide (*s*), l'état liquide (*l*) et l'état gazeux (*g*). Ces états dépendent des conditions de température et de pression. Un **changement d'état** est le passage d'un état de la matière à un autre, sous l'effet d'une modification de température ou de pression. C'est une transformation physique **réversible** qui correspond à une réorganisation de la matière. Il se produit à une température singulière, appelée **température de changement d'état**.



- La **fusion**, la **vaporisation** et la **sublimation** nécessitent un apport d'énergie. Ce sont des processus **endothermiques**.
- Les transformations inverses libèrent de l'énergie et sont **exothermiques**.

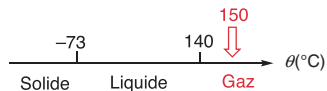
La **masse** d'une substance est **constante** lors d'un changement d'état (loi de conservation de la masse de Lavoisier). En revanche, le volume est modifié.

a) Il est mentionné dans l'énoncé que le ferrocène **1** a été purifié, sous pression atmosphérique, par sublimation (solide  $\rightarrow$  gaz) à  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Il est donc solide à température ambiante ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). En revanche, l'anhydride acétique **2** n'est pas solide, mais liquide dans ces conditions. Cette information découle des valeurs des températures de fusion ( $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) et d'ébullition ( $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) précisées dans l'énoncé. L'affirmation est **fausse**.



b) La sublimation est un changement d'état au cours duquel un composé passe directement de l'état solide à l'état gazeux. L'affirmation est **fausse**.

c) La température d'ébullition (liquide  $\rightarrow$  gaz) de l'anhydride acétique **2** est de  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ce composé est donc gazeux à la température supérieure, de  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . L'affirmation est **correcte**.



d) Sous pression atmosphérique, la fusion (solide  $\rightarrow$  liquide) de l'acétylferrocène **3** a lieu à la température constante de  $82\text{ }^{\circ}\text{C}$ . L'affirmation est **fausse**.

## Réponse exacte 😊

a) Les précurseurs **1** et **2** sont solides à la température de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Vrai Faux

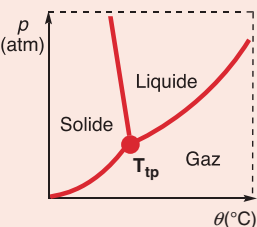
b) Au cours de sa sublimation, le ferrocène **1** devient liquide, puis gazeux.

c) L'anhydride acétique **2** est gazeux à la température de  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

d) La fusion de l'acétylferrocène **3** est progressive, de  $20$  à  $82\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 🔍 Pour aller plus loin

- Les énergies mises en jeu pour les changements d'état sont appelées **chaleurs latentes** de changement d'état. Par convention, elles sont de signe positif (+) pour les processus endothermiques et de signe négatif (−) pour les réactions exothermiques. On utilise ces règles en **thermodynamique**.
- Un **diagramme de phase** est un graphique à deux dimensions. La température ( $\theta$ ) est placée en abscisse et la pression ( $p$ ) en ordonnée. Il représente les domaines de l'état physique d'un corps pur ou d'un mélange de corps purs. Les courbes s'appellent les limites de phase (les deux états sont alors en équilibre). L'intersection des trois courbes est le **point triple**  $T_p$  (les trois états coexistent).
- Un solide peut être **cristallin** (état ordonné) ou **amorphe** (état désordonné).
- Le **plasma** est considéré comme un quatrième état de la matière.



## ⚠ Ne tombez pas dans le piège

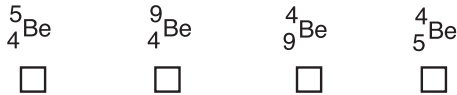
- Ne pas confondre les différents changements d'état.
- Un changement d'état est un phénomène physique (et pas chimique, ▶ **Fiche 4**).
- Faire la différence entre vaporisation (liquide  $\rightarrow$  gaz à la température d'ébullition) et évaporation (liquide  $\rightarrow$  gaz à une température quelconque).
- L'eau gazeuse n'est pas de l'eau à l'état gaz, mais de l'eau qui contient du  $\text{CO}_{2(g)}$ .

6

# La composition de l'atome

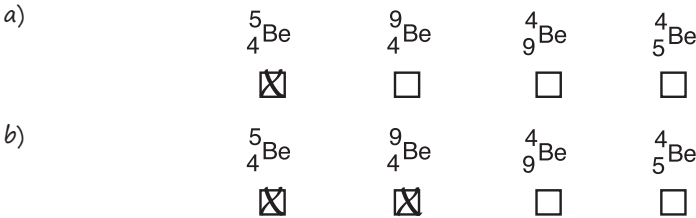
## Énoncé

Le béryllium (Be,  $Z = 4$ ), est un métal léger appartenant à la famille des alcalino-terreux. Il est utilisé, en tant que corps simple, comme durcissant dans certains alliages et aussi comme modérateur de neutrons dans les réacteurs nucléaires (projet ITER). À l'état naturel, on le retrouve dans les pierres utilisées en joaillerie, comme l'aigue-marine et l'émeraude, sous la forme de silicates de béryllium et d'aluminium. C'est l'un des éléments les plus toxiques pour l'homme. L'isotope stable de l'atome de béryllium contient 4 protons et 5 neutrons. Soient les 4 propositions suivantes :



a) Laquelle correspond à l'isotope stable du béryllium ? b) Identifiez les deux isotopes du béryllium. c) Donnez le nombre de protons et d'électrons du cation  $\text{Be}^{2+}$  correspondant.

## Réponses de l'étudiant ☹️

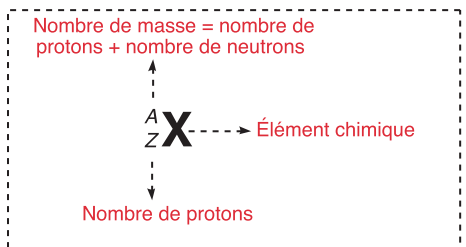


c)  $\text{Be}^{2+}$  : 4 protons et 6 électrons.

## ⚙️ Réflexes pour bien répondre

Les réponses a) et c) sont incorrectes. La réponse à la question b) est correcte.

Un élément est défini par son **nombre de protons Z**. Le **nombre de masse A** correspond au **nombre de nucléons**, c'est-à-dire à la somme des **protons** et des **neutrons**. Par convention on utilise la notation suivante pour représenter un élément chimique X :



a) L'isotope stable du béryllium contient 4 protons + 5 neutrons donc 9 nucléons. Donc  $Z = 4$  et  $A = 9$ .

b) Les **isotopes** sont des **nucléides** ayant le même nombre de protons, mais un nombre de neutrons différents. A est donc toujours supérieur à Z pour les différents isotopes d'un élément. Les deux premières réponses ( ${}^5\text{Be}$  et  ${}^9\text{Be}$ ) sont bien correctes.

c) Pour un élément chimique **le nombre de protons est égal au nombre d'électrons**. Dans le cas du béryllium, le nombre d'électrons est donc égal à 4.

Le cation  $\text{Be}^{2+}$  est un atome de Be qui a perdu 2 électrons. Donc  $\text{Be}^{2+}$  possède 4 protons et 2 électrons.

### Réponse exacte 😊

- a)
- |                          |                                     |                          |                          |
|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| ${}^5_4\text{Be}$        | ${}^9_4\text{Be}$                   | ${}^4_9\text{Be}$        | ${}^4_5\text{Be}$        |
| <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
- b)
- |                                     |                                     |                          |                          |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| ${}^5_4\text{Be}$                   | ${}^9_4\text{Be}$                   | ${}^4_9\text{Be}$        | ${}^4_5\text{Be}$        |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

c)  $\text{Be}^{2+}$  : 4 protons et 2 électrons.

### 🔍 Pour aller plus loin

#### • Caractéristiques d'un atome

Un atome a une taille de l'ordre de  $10^{-10}$  m (1 Å). Il comprend deux régions distinctes.

- Le **noyau** qui est constitué par les nucléons : protons + neutrons. Il a une taille de l'ordre de  $10^{-15}$  m. Le noyau concentre toute la masse du noyau. Les protons et les neutrons ont quasiment la même masse ( $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg). Les protons et les neutrons ne sont pas des particules élémentaires. Ils sont eux-mêmes constitués de particules appelées fermions.
- Le **nuage électronique** qui est constitué d'électrons. L'électron est une particule élémentaire ayant une masse négligeable, comparée à celles des protons et neutrons. ( $9,10 \cdot 10^{-31}$  kg).
- En physique nucléaire, on appelle nucléide un type d'atome défini par son nombre de protons et de neutrons. Sur les 90 éléments naturels, on peut distinguer 331 nucléides naturels (256 stables et 75 instables).
- Le béryllium (Be) possède 12 isotopes connus, de nombre de masse  $A$  variant de 5 à 16. Un seul de ces isotopes, le béryllium 9 ( ${}^9\text{Be}$ ), est stable, ce qui fait du béryllium un élément monoisotopique.

### ! Ne tombez pas dans le piège

- Un élément est toujours caractérisé par son nombre de protons  $Z$ . C'est cette valeur  $Z$  qui détermine la position de l'élément considéré dans la classification périodique.
- Le nombre de neutrons dans un atome est variable, mais pas le nombre de protons.
- Le nombre d'électrons est déterminé par le nombre de proton.  $Z =$  nombre de protons = nombre d'électrons. Si l'atome  $X$  perd ou gagne un ou plusieurs électrons, on dit que l'atome est ionisé ( $X^{n+}$ , ion positif : cation ;  $X^{n-}$ , ion négatif : anion).
- Le nombre de nucléons (indiqué en exposant avant le symbole de l'élément) est toujours supérieur au nombre de protons (en indice).

7

# Les hydrogénéoïdes et l'énergie d'ionisation

## Énoncé

Le bore  ${}_5\text{B}$  est le premier élément du groupe 13 du tableau périodique. C'est le seul élément non métallique de ce groupe. Il est utilisé dans l'industrie métallurgique et l'industrie du verre. Il entre par exemple dans la composition du verre Pyrex<sup>®</sup> sous la forme d'oxyde de bore  $\text{B}_2\text{O}_3$ , combiné avec de la silice  $\text{SiO}_2$ . Les composés du bore comme le borax ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), se retrouvent aussi dans les savons et les détergents. On les utilise également comme retardateurs de flamme ou désinfectants de fruits et légumes.

- Quel est le système hydrogénéoïde correspondant au bore  ${}_5\text{B}$  ?
- Écrire sa configuration électronique.
- Calculer (en joule et en électron-volt) l'énergie d'ionisation de l'ion hydrogénéoïde du bore dans son état fondamental.

## Réponse de l'étudiant ☹️

- L'hydrogénéoïde correspondant au  ${}_5\text{B}$  est  $\text{B}^{5+}$ .
- Sa configuration est  $1s^2 2s^2 2p^1$ .
- L'énergie d'ionisation  $E_i = -13,6 \times Z^2/n^2 = -13,6 \times 1^2/1^2 = -13,6 \text{ eV}$ .

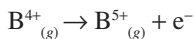
## 🔧 Réflexes pour bien répondre

L'hydrogénéoïde a été mal identifié au départ (pas  $\text{B}^{5+}$ ). Il ne possède pas 5 électrons comme dans la réponse proposée mais un seul. La valeur de l'énergie d'ionisation est fausse car le numéro atomique du bore a été mal renseigné dans la formule.

Un **hydrogénéoïde** est un atome ou ion atomique **isoélectronique (même nombre d'électron)** à l'hydrogène, c'est-à-dire ne comportant qu'un seul électron autour du noyau. Pour les éléments de la première et deuxième période, les hydrogénéoïdes sont :  $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{2+}$ ,  $\text{Be}^{3+}$ ,  $\text{B}^{4+}$ ,  $\text{C}^{5+}$ ,  $\text{N}^{6+}$ ,  $\text{O}^{7+}$ ,  $\text{F}^{8+}$  et  $\text{Ne}^{9+}$ .

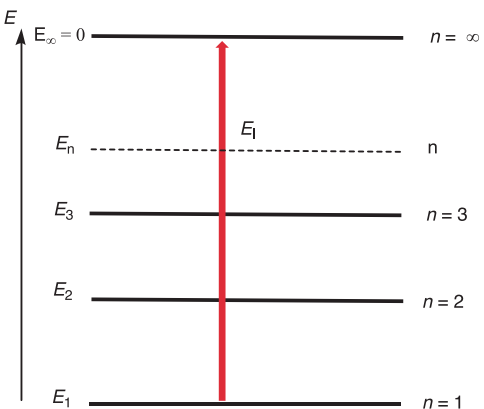
Pour le bore, l'hydrogénéoïde est  $\text{B}^{4+}$ . Il s'agit donc d'un élément **cationisé** dont la configuration électronique est  $1s^1$  (celle de l'hydrogène).

L'**énergie d'ionisation** d'un hydrogénéoïde  $E_i$  est l'énergie minimale qu'il faut fournir à l'atome, à l'état gazeux, pour lui arracher son électron. Pour l'hydrogénéoïde  $\text{B}^{4+}$ , la réaction suivante est à considérer :



L'énergie d'ionisation est égale à la différence d'énergie entre l'état  $n = \infty$  ( $E_\infty = 0$ ) et l'**état fondamental**  $n = 1$  ( $E_1$ ). Cette énergie est positive.

Dans le cas d'un hydrogénéoïde, on utilise la **relation de Bohr** pour calculer l'énergie de l'état fondamental.



$E_n = -\text{constante} \times Z^2/n^2$  (avec  $Z =$  numéro atomique de l'élément considéré et  $n =$  niveau d'énergie).

Constante  $= R_H \times c \times h$  ( $R_H =$  constante de Rydberg,  $c =$  vitesse de la lumière dans le vide,  $h =$  constante de Planck).

Si  $E_n$  est exprimée en joule (J), constante  $= 21,8 \cdot 10^{-19}$ .

Si  $E_n$  est exprimée en électron-volt (eV), constante  $= 13,6$ .

$$E_n = -13,6 \times Z^2/n^2 \text{ (valeur de l'énergie } E_n \text{ en électron-volt).}$$

$$E_1 = E_\infty - E_1$$

Pour  $B^{4+}$ ,  $E_\infty = 0$  et  $E_1 = -13,6 \times Z^2/n^2 = -13,6 \times 5^2/1^2 = -340 \text{ eV}$ .

$$E_1 = +340 \text{ eV}$$

L'électron-volt est une unité d'énergie. Elle correspond à l'énergie acquise par un électron soumis à une différence de potentiel de 1 volt. ( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ joule}$ )

$$E_1 = +340 \times 1,6 \cdot 10^{-19} = 544 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

### Réponse exacte 😊

- L'hydrogénoïde correspondant au  ${}_5B$  est le cation  $B^{4+}$ .
- Sa configuration électronique est  $1s^1$ .
- $E_1 = +340 \text{ eV} = +544 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

### 🔍 Pour aller plus loin

- Si l'énergie fournie à l'hydrogénoïde est supérieure à l'énergie d'ionisation, la différence d'énergie est cédée à l'électron sous la forme d'énergie cinétique. L'électron est alors expulsé et est en mouvement grâce à cet excédent d'énergie.
- L'état fondamental est l'état de plus basse énergie.

### ⚠ Ne tombez pas dans le piège

- Excepté l'hydrogène, un hydrogénoïde est toujours un élément cationisé  $X^{n+}$ .
- Dans la formule permettant de calculer l'énergie d'un état stationnaire d'un hydrogénoïdes ( $E_n = -13,6 \times Z^2/n^2$ ), attention de bien indiquer la valeur de  $Z$  correspondant à l'élément considéré.
- L'énergie d'ionisation est toujours positive.



8

# La spectroscopie d'absorption et d'émission atomique

## Énoncé

Le lithium (Li,  $Z = 3$ ) est un métal léger appartenant à la famille des alcalins. Il rentre dans la composition de céramiques, de verres, mais aussi d'alliages à haute performance pour l'aéronautique. Les propriétés électrochimiques du lithium en font un élément incontournable pour la conception des batteries et le développement des véhicules électriques. a) Donner l'expression de l'énergie pour le cation  $\text{Li}^{2+}$ . En déduire les valeurs de l'énergie de l'état fondamental et des deux premiers niveaux excités de  $\text{Li}^{2+}$  (en eV). Les représenter sur un diagramme énergétique. b) Si l'on envoie un photon de longueur d'onde  $\lambda = 11,4 \text{ nm}$  sur l'ion  $\text{Li}^{2+}$  à l'état fondamental, que se passe-t-il ? Quel est l'état final ? c) Quelle est la longueur d'onde du photon émis lorsque l'électron passe du niveau  $n = 3$  à  $n = 2$  ?

Données -  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ;  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

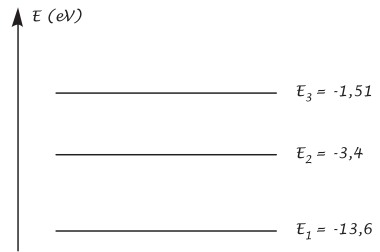
## Réponse de l'étudiant ☹️

a)  $\text{Li}^{2+}$  est un hydrogénoïde, donc  $E_n = -13,6 \times Z^2/n^2$  donc  $E_1 = -13,6 \text{ eV}$  ;  $E_2 = -3,4 \text{ eV}$  ;  $E_3 = -1,51 \text{ eV}$ .

b) Énergie du photon :  $E = h \times \nu = h \times c/\lambda$   
 $= 6,62 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8 / 11,4 = 1,74 \cdot 10^{-26} \text{ J} = 1,09 \cdot 10^{-7} \text{ eV}$ .

L'énergie n'est pas assez importante. Le photon n'est pas absorbé.  $\text{Li}^{2+}$  reste à l'état fondamental.

c) Énergie correspondant au photon émis :  $E = E_3 - E_2 = 1,89 \text{ eV}$ .  $E = h \times c/\lambda$  donc  $\lambda = h \times c/E = 6,62 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8 / (1,89 \times 1,6 \cdot 10^{-19}) = 9,91 \cdot 10^{-7} \text{ m}$  soit 991 nm.



## 🔧 Réflexes pour bien répondre

Les calculs des trois niveaux d'énergie dans a) sont incorrects car  $Z$  est égal à 3 pour le lithium, et pas à 1. Il en résulte que le diagramme énergétique est faux. Pour b), les formules pour le calcul de l'énergie du photon sont correctes, mais les calculs sont faux. La longueur d'onde doit être exprimée en m et pas en nm. Pour c), le calcul posé est correct, mais la réponse est fautive, à cause des valeurs erronées dans la question a) précédente.

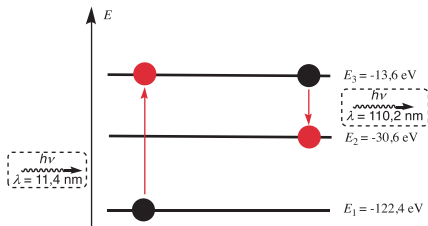
La **spectroscopie d'absorption et d'émission atomique** est une méthode permettant l'étude de la structure électronique des atomes, et la façon dont ces derniers interagissent avec une radiation électromagnétique.

- L'**absorption atomique** est le phénomène observé lorsqu'un atome absorbe une radiation électromagnétique à une longueur d'onde spécifique et passe à un état excité de plus haute énergie ( $E_{\text{final}} > E_{\text{initial}}$ ).
- L'**émission atomique** est le phénomène observé lorsqu'un rayonnement électromagnétique est émis par des atomes ou des ions excités qui retournent à un état de plus basse énergie ( $E_{\text{final}} < E_{\text{initial}}$ ).

Le cation  $\text{Li}^{2+}$  est **isoélectronique** à l'atome d'hydrogène H, c'est-à-dire qu'il ne possède qu'un seul électron. C'est donc un **hydrogénoïde** (► **Fiche 7**). Grâce à la théorie de Niels Bohr, on peut calculer l'énergie (en eV) des différents états stationnaires  $n$  en appliquant la formule :

$$E_n = -13,6 \times Z^2/n^2$$

a) Pour les 3 premiers niveaux de  $\text{Li}^{2+}$  :  $E_1 = -13,6 \times 3^2/1^2 = -122,4 \text{ eV}$  ;  $E_2 = -13,6 \times 3^2/2^2 = -30,6 \text{ eV}$  ;  $E_3 = -13,6 \times 3^2/3^2 = -13,6 \text{ eV}$ . Ces différentes valeurs sont positionnées sur un diagramme énergétique, comme illustré dans la figure ci-contre.



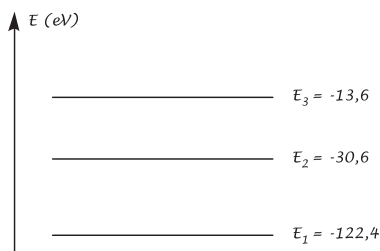
b) Si l'on envoie un photon de longueur d'onde  $\lambda = 11,4 \text{ nm}$ , ce dernier est absorbé si son énergie correspond exactement à la différence d'énergie entre deux niveaux stationnaires. Énergie du photon incident :  $E = h \times c/\lambda = 6,62 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8/11,4 \cdot 10^{-9} = 1,74 \cdot 10^{-17} \text{ J} = 108,8 \text{ eV}$ .  $E = 108,8 \text{ eV}$  correspond exactement à la différence d'énergie  $E_3 - E_1$ .

Il y a donc **absorption du photon** de longueur d'onde  $\lambda = 11,4 \text{ nm}$ . Une **transition électronique** est observée du niveau  $n = 1$  vers le niveau  $n = 3$ .

c) Lors de la transition électronique de  $n = 3$  vers  $n = 2$ , il y a **émission d'un photon** d'énergie  $E$  égale à  $E_3 - E_2$ . La longueur d'onde est facilement calculée :  $E = (E_3 - E_2) = h \times c/\lambda$  ; donc  $\lambda = h \times c/E = 6,62 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8/(17 \times 1,6 \cdot 10^{-19}) = 110,2 \text{ nm}$ .

### Réponse exacte 😊

a)  $\text{Li}^{2+}$  est un hydrogénoïde :  $E_1 = -122,4 \text{ eV}$  ;  $E_2 = -30,6 \text{ eV}$  ;  $E_3 = -13,6 \text{ eV}$  (voir diagramme énergétique ci-contre). b) Énergie du photon :  $E = h \times c/\lambda = 6,62 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8/11,4 \cdot 10^{-9} = 1,74 \cdot 10^{-17} \text{ J} = 108,8 \text{ eV}$ . L'électron passe du niveau  $n = 1$  à  $n = 3$ . c) Énergie du photon émis :  $E = E_3 - E_2 = 17 \text{ eV}$  ; donc  $\lambda = 110,2 \text{ nm}$ .



### 🔗 Pour aller plus loin

- La théorie de Bohr s'applique exclusivement aux atomes et cations qui possèdent un unique électron. Pour les atomes poly-électroniques, c'est la **théorie quantique de Schrödinger** qui doit s'appliquer. Dans ce cas l'énergie des électrons ne dépend pas seulement de  $n$ , mais aussi de  $l$  et de  $m$  (► **Fiche 9**).
- L'**énergie d'ionisation** est l'énergie minimale qu'il faut fournir à un atome à l'état gazeux pour lui arracher un électron (► **Fiche 7**). On peut ainsi définir pour les atomes poly-électroniques, des énergies de nième ionisation ( $I_n$ ). Pour le lithium ( $Z = 3$ ), on distingue 3 énergies d'ionisation :  $I_1 : \text{Li}_{(g)} \rightarrow \text{Li}^+_{(g)} + 1 \text{ e}^-$  ;  $I_2 : \text{Li}^+_{(g)} \rightarrow \text{Li}^{2+}_{(g)} + 1 \text{ e}^-$  ;  $I_3 : \text{Li}^{2+}_{(g)} \rightarrow \text{Li}^{3+}_{(g)} + 1 \text{ e}^-$ .

### ⚠️ Ne tombez pas dans le piège

- Être vigilant sur les unités dans les formules ! Toujours utiliser les unités du SI.
- La formule  $E_n = -13,6 \times Z^2/n^2$  ne s'applique qu'à l'hydrogène et aux hydrogénoïdes. Attention à bien utiliser la valeur de  $Z$  correspondant à l'élément considéré !