

PRINCIPES DE  
**CHIMIE**  
**Une approche moléculaire**

# SOMMAIRE

<b>À propos des auteurs</b> .....	VII
<b>Avant-propos</b> .....	VIII
<b>Guide visuel</b> .....	XII

## **CHAPITRE 1**

INTRODUCTION	1
--------------	---

---

## **CHAPITRE 2**

ATOMES, ÉLÉMENTS ET COMPOSÉS	41
------------------------------	----

---

## **CHAPITRE 3**

CONCEPTION MODERNE DE L'ATOME ET MÉCANIQUE QUANTIQUE	87
---	----

---

## **CHAPITRE 4**

PROPRIÉTÉS DE L'ATOME ET MODÈLE ATOMIQUE MODERNE	137
--	-----

---

## **CHAPITRE 5**

LIAISONS CHIMIQUES	181
--------------------	-----

---

## **CHAPITRE 6**

MOLÉCULES ET FORCES INTERMOLÉCULAIRES	225
---------------------------------------	-----

---

## **CHAPITRE 7**

GAZ, LIQUIDES ET SOLIDES : FORCES INTERMOLÉCULAIRES ET SUBSTANCES	271
--	-----

---

## **CHAPITRE 8**

STœCHIOMÉTRIE I : LES SUBSTANCES	313
----------------------------------	-----

---

## **CHAPITRE 9**

STœCHIOMÉTRIE II : LES RÉACTIONS CHIMIQUES	349
--	-----

---

## **CHAPITRE 10**

LES SOLUTIONS	395
---------------	-----

---

<b>CHAPITRE 11</b>	
CINÉTIQUE CHIMIQUE	449
<hr/>	
<b>CHAPITRE 12</b>	
ÉQUILIBRE CHIMIQUE	497
<hr/>	
<b>CHAPITRE 13</b>	
ACIDES ET BASES	547
<hr/>	
<b>CHAPITRE 14</b>	
ÉQUILIBRE IONIQUE DANS LES SOLUTIONS AQUEUSES	599
<hr/>	
<b>CHAPITRE 15</b>	
ÉNERGIE LIBRE ET THERMODYNAMIQUE	655
<hr/>	
<b>CHAPITRE 16</b>	
OXYDORÉDUCTION ET ÉLECTROCHIMIE	697
<hr/>	
<b>Annexe I</b>	Opérations mathématiques courantes en chimie ..... 745
<b>Annexe II</b>	Données utiles ..... 749
<b>Annexe III</b>	Réponses aux exercices de fin de chapitre ..... 759
<b>Annexe IV</b>	Réponses aux exercices pratiques des exemples ..... 822
<b>Annexe V</b>	Réponses aux liens conceptuels..... 831
<b>Glossaire</b>	..... 838
<b>Sources des photos et des illustrations</b>	..... 850
<b>Index</b>	..... 853

# TABLE DES MATIÈRES

À propos des auteurs	VII
Avant-propos	VIII
Guide visuel	XII

## CHAPITRE 1

### INTRODUCTION 1

1.1 Atomes et molécules	2
1.2 Approche scientifique de la connaissance	4
1.3 Classification de la matière	6
États de la matière : solide, liquide et gaz	6
Classification de la matière selon sa composition : éléments, composés et mélanges	8
1.4 Changements physiques et chimiques et propriétés physiques et chimiques	10
1.5 Unités de mesure	13
Unités standard	13
Mesure de longueur : le mètre	13
Mesure de masse : le kilogramme	14
Mesure de temps : la seconde	14
Mesure de température : le kelvin	14
Préfixes multiplicateurs	16
Unités dérivées : volume et masse volumique	17
Calcul de la masse volumique	18
1.6 Fiabilité d'une mesure	19
Comment compter les chiffres significatifs ?	21
Nombres exacts	22
Chiffres significatifs dans les calculs	23
Fiabilité, exactitude et précision	25
1.7 Résolution de problèmes en chimie	26
Conversion d'une unité en une autre	26
Stratégie générale de résolution de problèmes	27
Unités élevées à une puissance	29
Problèmes comportant des équations	31

### Résumé du chapitre 33

### Exercices 34

## CHAPITRE 2

### ATOMES, ÉLÉMENTS ET COMPOSÉS 41

2.1 Voir les atomes	42
2.2 Atomes et éléments	44
Particules subatomiques	44
Les éléments : définis par le nombre de protons	45
Les isotopes : lorsque le nombre de neutrons varie	47
Les ions : perte et gain d'électrons	48

2.3 Classer les éléments : le tableau périodique	49
Ions et tableau périodique	52

2.4 Masse atomique	54
--------------------	----

2.5 Combiner les atomes : les liaisons chimiques	56
Hydrogène + oxygène = eau !	57
Liaisons entre les atomes	58

2.6 Éléments et composés	60
--------------------------	----

2.7 Représenter les composés : formules chimiques et modèles moléculaires	64
Types de formules chimiques	64
Modèles moléculaires	65

2.8 Formules et nomenclature des composés ioniques	67
Écriture des formules de composés ioniques	67
Nomenclature des composés ioniques	68
Nomenclature des composés ioniques binaires contenant un métal qui ne forme qu'un seul type de cation	69
Nomenclature des composés ioniques binaires contenant un métal formant plus d'une sorte de cation	70
Nomenclature des composés ioniques contenant des ions polyatomiques	72
Nomenclature des composés ioniques hydratés	74

2.9 Formules et nomenclature des composés moléculaires	74
Nomenclature des composés moléculaires	74
Nomenclature des acides	76
Nomenclature des hydracides	77
Nomenclature des oxacides	77

### Résumé du chapitre 78

### Exercices 80

## CHAPITRE 3

### CONCEPTION MODERNE DE L'ATOME ET MÉCANIQUE QUANTIQUE 87

3.1 D'Aristote à Rutherford : un rappel de l'évolution du modèle atomique classique	88
Les philosophes et la théorie atomiste	88
John Dalton et les lois à l'origine du modèle atomique moderne	89

Joseph John Thomson et la découverte de l'électron . . .	91	4.5	Propriétés physiques des éléments . . . . .	153
Ernest Rutherford et le modèle nucléaire de l'atome . . .	91		Rayon atomique des éléments	
<b>3.2</b> Nature de la lumière et modèle de Bohr . . . . .	93		des groupes principaux . . . . .	153
Nature ondulatoire de la lumière . . . . .	94		Rayon atomique des éléments de transition . . . . .	158
Nature corpusculaire de la lumière . . . . .	96		Rayon atomique des ions . . . . .	158
Spectre électromagnétique . . . . .	100		Énergie d'ionisation . . . . .	161
Modèle de Bohr . . . . .	102		Variations de l'énergie de première ionisation . . . . .	161
<b>3.3</b> Mécanique quantique et atome :			Exceptions concernant les variations de l'énergie	
au-delà du modèle de Bohr . . . . .	108		de première ionisation . . . . .	164
Interférence et diffraction . . . . .	108		Variations entre les ionisations successives . . . . .	167
Nature ondulatoire de l'électron: la longueur d'onde			Affinité électronique . . . . .	169
de De Broglie . . . . .	110		Électronégativité des éléments	
Principe d'incertitude . . . . .	112		des groupes principaux . . . . .	171
<b>3.4</b> Équation de Schrödinger :		<b>4.6</b>	Caractère métallique . . . . .	174
une vision quantique de l'atome . . . . .	114		<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	176
Principe d'indétermination . . . . .	114		<b>Exercices</b> . . . . .	177
Équation de Schrödinger . . . . .	116			
Orbitales atomiques: les solutions de l'équation		<b>CHAPITRE 5</b>		
de Schrödinger pour l'atome d'hydrogène . . . . .	117	<b>LIAISONS CHIMIQUES</b>		181
<b>3.5</b> Niveaux et sous-niveaux d'énergie . . . . .	121	<b>5.1</b>	Molécules contre le sida . . . . .	182
Niveau principal d'énergie et périodicité . . . . .	121	<b>5.2</b>	Former des liaisons . . . . .	183
Sous-niveaux électroniques et énergie d'ionisation . . . . .	124	<b>5.3</b>	Modèle de Lewis . . . . .	185
<b>3.6</b> Nombres quantiques . . . . .	126	<b>5.4</b>	Liaison métallique et modèle de la mer	
Nombre quantique principal ( $n$ ) . . . . .	127		d'électrons . . . . .	186
Nombre quantique de moment angulaire ( $l$ ) . . . . .	127	<b>5.5</b>	Liaison ionique et modèle du réseau . . . . .	187
Nombre quantique magnétique ( $m_l$ ) . . . . .	127		Liaison ionique et transfert d'électrons . . . . .	187
Nombre quantique de spin ( $m_s$ ) . . . . .	128		Énergie de réseau . . . . .	188
<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	130		Variations de l'énergie de réseau: taille des ions . . . . .	189
<b>Exercices</b> . . . . .	132		Variations de l'énergie de réseau: charge des ions . . . . .	190
			Liaison ionique: modèle et réalité . . . . .	191
<b>CHAPITRE 4</b>		<b>5.6</b>	Liaison covalente et modèle de Lewis . . . . .	192
<b>PROPRIÉTÉS DE L'ATOME</b>			Liaison covalente et partage des électrons . . . . .	192
<b>ET MODÈLE ATOMIQUE MODERNE</b>	137		Énergies de liaison . . . . .	193
<b>4.1</b> Transmission du signal nerveux . . . . .	138		Longueurs de liaison . . . . .	197
<b>4.2</b> Configurations électroniques :			Polarité des liaisons . . . . .	198
placer les électrons dans les orbitales			Moment dipolaire et pourcentage	
du modèle quantique . . . . .	139		de caractère ionique . . . . .	201
Principe de minimisation de l'énergie potentielle . . . . .	139		Liaison covalente: modèle et réalité . . . . .	202
Principe de minimisation de l'énergie potentielle		<b>5.7</b>	Liaison covalente et modèle quantique . . . . .	203
et tableau périodique . . . . .	140		Théorie de la liaison de valence: liaison chimique	
Éléments de transition . . . . .	142		par recouvrement d'orbitales . . . . .	203
Principe d'exclusion de Pauli et règle de Hund . . . . .	142		Hybridation des orbitales atomiques . . . . .	206
Configurations électroniques des ions . . . . .	145		Hybridation $sp^3$ et liaisons simples . . . . .	207
<b>4.3</b> Pouvoir de prédiction du modèle			Hybridation $sp^2$ et liaisons doubles . . . . .	209
de la mécanique quantique . . . . .	147		Hybridation $sp$ et liaisons triples . . . . .	213
Électrons de valence et électrons de cœur . . . . .	148		Hybridation $sp^3d$ et $sp^3d^2$ . . . . .	214
Effet d'écran . . . . .	149		Représentation des schémas d'hybridation	
Charge nucléaire effective . . . . .	150		et de liaison . . . . .	216
Loi de Coulomb . . . . .	151		<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	219
<b>4.4</b> Propriétés chimiques des éléments . . . . .	152		<b>Exercices</b> . . . . .	220

**CHAPITRE 6****MOLÉCULES ET FORCES  
INTERMOLÉCULAIRES**

225

<b>6.1</b>	Agents édulcorants: le goût trompé par la forme moléculaire . . . . .	226
<b>6.2</b>	Structures de Lewis-Pauling . . . . .	227
	Charge formelle . . . . .	227
	Écriture de la structure de Lewis-Pauling de composés moléculaires . . . . .	229
	Octets étendus . . . . .	233
	Espèces à nombre impair d'électrons . . . . .	235
	Octets incomplets . . . . .	235
	Résonance . . . . .	236
<b>6.3</b>	Théorie RPEV: déterminer la géométrie des molécules . . . . .	238
	Formes de base des molécules . . . . .	239
	Influence des doublets libres . . . . .	242
	Prédire la géométrie moléculaire . . . . .	246
	Prédire la forme des molécules plus volumineuses . . . . .	249
<b>6.4</b>	Forme des molécules et polarité . . . . .	251
<b>6.5</b>	Polarité et forces intermoléculaires . . . . .	254
	Forces de dispersion . . . . .	255
	Forces dipôle-dipôle . . . . .	257
	Pont hydrogène . . . . .	258
	Forces ion-dipôle . . . . .	262
	<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	263
	<b>Exercices</b> . . . . .	264

**CHAPITRE 7****GAZ, LIQUIDES ET SOLIDES: FORCES  
INTERMOLÉCULAIRES ET SUBSTANCES**

271

<b>7.1</b>	Gecko grimpeur et forces intermoléculaires . . . . .	272
<b>7.2</b>	Solides, liquides et gaz: une comparaison à l'échelle moléculaire . . . . .	272
	Changements d'état: une introduction . . . . .	274
<b>7.3</b>	Gaz . . . . .	275
	Gaz parfaits et théorie cinétique moléculaire . . . . .	276
	Gaz réels: influence du volume fini des particules de gaz à haute pression . . . . .	279
	Gaz réels: influence des forces intermoléculaires ou des liaisons à faible température . . . . .	280
	Équation de Van der Waals . . . . .	281
<b>7.4</b>	Liquides: tension superficielle, viscosité et capillarité . . . . .	283
	Tension superficielle . . . . .	283
	Viscosité . . . . .	284
	Capillarité . . . . .	285
<b>7.5</b>	Liquides: vaporisation et pression de vapeur . . . . .	286
	Processus de vaporisation . . . . .	286
	Énergétique de la vaporisation . . . . .	287
	Pression de vapeur et équilibre dynamique . . . . .	288

<b>7.6</b>	Solides . . . . .	290
	Solides moléculaires . . . . .	291
	Solides ioniques . . . . .	292
	Solides atomiques . . . . .	292
<b>7.7</b>	L'eau, une substance extraordinaire . . . . .	295
<b>7.8</b>	Changements d'état . . . . .	296
	Ébullition et condensation . . . . .	297
	Fusion et congélation . . . . .	297
	Sublimation et déposition . . . . .	298
	Point critique: transition vers un état inhabituel de la matière . . . . .	299
	Courbe de chauffage de l'eau . . . . .	300
<b>7.9</b>	Diagrammes de phases . . . . .	301
	Principales caractéristiques d'un diagramme de phases . . . . .	301
	Interprétation d'un diagramme de phases . . . . .	302
	<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	305
	<b>Exercices</b> . . . . .	306

**CHAPITRE 8****STœCHIOMÉTRIE I: LES SUBSTANCES**

313

<b>8.1</b>	Chimie quantitative: de Lavoisier au rover martien <i>Curiosity</i> . . . . .	314
<b>8.2</b>	Masse atomique et concept de mole pour les éléments . . . . .	315
	La mole: la « douzaine » du chimiste . . . . .	315
	Conversion entre la quantité de substance ( $n$ ) et le nombre d'atomes ( $N$ ) . . . . .	316
	Conversion entre la masse et la quantité de substance en moles ( $n$ ) . . . . .	317
<b>8.3</b>	Masse formulaire et concept de mole pour les composés . . . . .	320
	Masse molaire d'un composé . . . . .	321
	Utilisation de la masse molaire pour compter les molécules en les pesant . . . . .	321
<b>8.4</b>	Rapports de masse et de quantité de substance . . . . .	323
	Rapports stœchiométriques . . . . .	325
<b>8.5</b>	Détermination d'une formule chimique à partir de données expérimentales . . . . .	327
	Calcul des formules moléculaires des composés . . . . .	329
	Analyse par combustion . . . . .	329
<b>8.6</b>	Calculs en milieu gazeux . . . . .	332
	Loi de Boyle-Mariotte: volume et pression . . . . .	333
	Loi de Charles: volume et température . . . . .	336
	Loi d'Avogadro: volume et quantité (en moles) . . . . .	338
	Loi des gaz parfaits . . . . .	340
	<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	343
	<b>Exercices</b> . . . . .	344

**CHAPITRE 9****STœCHIOMÉTRIE II :  
LES RÉACTIONS CHIMIQUES** 349

<b>9.1</b>	Changements climatiques et combustion des combustibles fossiles . . . . .	350
<b>9.2</b>	Écrire et équilibrer des équations chimiques. . . . .	352
	Écriture des équations chimiques équilibrées . . . . .	353
<b>9.3</b>	Stœchiométrie des réactions : quelle quantité de dioxyde de carbone ? . . . . .	356
	Faire une pizza : relations entre les ingrédients. . . . .	356
	Faire des molécules : convertir des moles en moles . . . . .	357
	Faire des molécules : conversions des masses en masses . . . . .	357
<b>9.4</b>	Réactif limitant, rendement théorique et pourcentage de rendement . . . . .	361
	Réactif limitant, rendement théorique et pourcentage de rendement à partir des masses initiales de réactif . . . . .	363
<b>9.5</b>	Stœchiométrie des réactions qui mettent en jeu des gaz . . . . .	366
	Volume molaire et stœchiométrie . . . . .	368
<b>9.6</b>	Stœchiométrie de réactions particulières . . . . .	369
	Réactions de dissociation en milieu aqueux . . . . .	370
	Réactions de précipitation. . . . .	373
	Réactions acide-base . . . . .	376
	Réactions de dégagement gazeux . . . . .	379
	Réactions d'oxydoréduction. . . . .	381
	États d'oxydation . . . . .	382
	Reconnaître les réactions d'oxydoréduction . . . . .	384
	Réactions de combustion . . . . .	386
	<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	387
	<b>Exercices</b> . . . . .	389

**CHAPITRE 10****LES SOLUTIONS** 395

<b>10.1</b>	Solutions avides d'eau : pourquoi il ne faut pas boire d'eau de mer. . . . .	396
<b>10.2</b>	Types de solutions et solubilité . . . . .	398
	Tendance naturelle au mélange : entropie. . . . .	398
	Effet des forces intermoléculaires . . . . .	399
<b>10.3</b>	Aspects énergétiques de la formation des solutions . . . . .	402
	Solutions aqueuses et chaleurs d'hydratation . . . . .	404
<b>10.4</b>	Équilibre des solutions et facteurs influant sur la solubilité . . . . .	406
	Solubilité des solides en fonction de la température. . . . .	407
	Facteurs qui modifient la solubilité des gaz dans l'eau . . . . .	407

<b>10.5</b>	Concentration molaire volumique . . . . .	410
	Utilisation de la concentration molaire volumique dans les calculs. . . . .	412
<b>10.6</b>	Autres modes d'expression de la composition des solutions . . . . .	416
	Masse molaire . . . . .	417
	Quantité de substance. . . . .	417
	Masse volumique. . . . .	417
	Molalité . . . . .	417
	Rapport par masse et rapport par volume. . . . .	417
	Fraction molaire et pourcentage molaire . . . . .	419
<b>10.7</b>	Propriétés colligatives : abaissement de la pression de vapeur, abaissement du point de congélation, élévation du point d'ébullition et élévation de la pression osmotique. . . . .	421
	Abaissement de la pression de vapeur . . . . .	423
	Pression de vapeur des solutions contenant un soluté volatil (non-électrolyte). . . . .	429
	Abaissement du point de congélation et élévation du point d'ébullition. . . . .	433
	Osmose . . . . .	438
	<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	440
	<b>Exercices</b> . . . . .	441

**CHAPITRE 11****CINÉTIQUE CHIMIQUE** 449

<b>11.1</b>	Capture de lézards . . . . .	450
<b>11.2</b>	Vitesse d'une réaction chimique. . . . .	451
<b>11.3</b>	Loi de vitesse : effet de la concentration sur la vitesse de réaction. . . . .	454
	Détermination de l'ordre d'une réaction. . . . .	456
	Ordre d'une réaction comportant des réactifs multiples . . . . .	458
<b>11.4</b>	Loi de vitesse intégrée : dépendance de la concentration par rapport au temps . . . . .	461
	Demi-vie d'une réaction . . . . .	466
<b>11.5</b>	Effet de la température sur la vitesse de réaction . . . . .	470
	Diagrammes d'Arrhenius : mesures expérimentales du facteur de fréquence et de l'énergie d'activation . . . . .	473
	Modèle des collisions : gros plan sur le facteur de fréquence . . . . .	476
<b>11.6</b>	Mécanismes réactionnels . . . . .	477
	Lois de vitesse des étapes élémentaires . . . . .	477
	Étapes cinétiquement déterminantes et lois de vitesse des réactions globales . . . . .	478
	Mécanismes comportant une étape initiale rapide . . . . .	479

11.7 Catalyse . . . . .	483
Catalyse homogène et catalyse hétérogène . . . . .	483
Enzymes: catalyseurs biologiques . . . . .	484
<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	485
<b>Exercices</b> . . . . .	487

**CHAPITRE 12****ÉQUILIBRE CHIMIQUE** 497

12.1 Hémoglobine fœtale et équilibre chimique . . . . .	498
12.2 Concept d'équilibre dynamique . . . . .	500
12.3 Constante d'équilibre ( $K$ ) . . . . .	500
Expression des constantes d'équilibre des réactions chimiques. . . . .	501
Signification de la constante d'équilibre. . . . .	502
Relations entre la constante d'équilibre et l'équation chimique . . . . .	503
12.4 Expression de la constante d'équilibre en termes de pression. . . . .	505
Unités de $K$ . . . . .	506
12.5 Équilibre hétérogène: réactions faisant intervenir des solides et des liquides. . . . .	507
12.6 Calcul de la constante d'équilibre à partir des concentrations à l'équilibre mesurées. . . . .	509
12.7 Quotient réactionnel: prédiction de la direction du changement. . . . .	512
12.8 Détermination des concentrations à l'équilibre . . . . .	514
Calcul des concentrations à l'équilibre à partir de la constante d'équilibre et des concentrations à l'équilibre de tous les réactifs et produits, sauf une . . . . .	515
Calcul des concentrations ou des pressions partielles à l'équilibre à partir de la constante d'équilibre et des concentrations ou des pressions partielles initiales. . . . .	516
Approximations simplifiant la résolution des problèmes sur l'équilibre . . . . .	520
12.9 Équilibres de solubilité et produit de solubilité . . . . .	527
$K_{ps}$ et solubilité molaire . . . . .	528
$K_{ps}$ et solubilité relative . . . . .	530
Effet d'un ion commun sur la solubilité. . . . .	530
12.10 Précipitation . . . . .	532
12.11 Principe de Le Chatelier: comment un système à l'équilibre répond à des perturbations. . . . .	533
Effet d'une variation de concentration sur l'équilibre . . . . .	533
Effet d'une variation de volume (ou de pression) sur l'équilibre . . . . .	535

Effet d'une variation de température sur l'équilibre . . . . .	536
---	-----

<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	538
-------------------------------------	-----

<b>Exercices</b> . . . . .	539
----------------------------	-----

**CHAPITRE 13****ACIDES ET BASES** 547

13.1 Brûlures d'estomac . . . . .	548
13.2 Nature des acides et des bases . . . . .	549
13.3 Définitions des acides et des bases . . . . .	550
Définition d'Arrhenius . . . . .	550
Définition de Brønsted-Lowry. . . . .	551
13.4 Force des acides et constante d'ionisation des acides ( $K_a$ ). . . . .	553
Acides forts . . . . .	553
Acides faibles . . . . .	554
Constante d'acidité des acides ( $K_a$ ) . . . . .	555
13.5 Auto-ionisation de l'eau et pH . . . . .	557
L'échelle de pH: un moyen de quantifier l'acidité et la basicité. . . . .	559
pOH et autres échelles p. . . . .	561
13.6 Détermination de la $[H_3O^+]$ et du pH des solutions d'acides forts et faibles . . . . .	561
Acides forts . . . . .	562
Acides faibles . . . . .	562
Acides polyprotiques. . . . .	567
Pourcentage d'ionisation d'un acide faible . . . . .	569
13.7 Solutions de bases . . . . .	571
Bases fortes . . . . .	571
Bases faibles . . . . .	571
Détermination de la $[OH^-]$ et du pH des solutions basiques. . . . .	572
13.8 Propriétés acidobasiques des ions et des sels . . . . .	575
Anions en tant que bases faibles . . . . .	576
Cations en tant qu'acides faibles . . . . .	579
Classification des solutions de sels selon leur pH . . . . .	581
Propriétés des amphotères . . . . .	583
13.9 Force des acides et structure moléculaire . . . . .	583
Acides binaires . . . . .	583
Oxacides . . . . .	585
13.10 Acides et bases de Lewis . . . . .	586
Molécules agissant comme des acides de Lewis . . . . .	587
Cations agissant comme des acides de Lewis . . . . .	588
13.11 Effet du pH sur la solubilité . . . . .	588
13.12 Équilibres d'ions complexes. . . . .	589
<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	591
<b>Exercices</b> . . . . .	593

**CHAPITRE 14****ÉQUILIBRE IONIQUE DANS  
LES SOLUTIONS AQUEUSES** 599

<b>14.1</b>	Danger de l'antigel . . . . .	600
<b>14.2</b>	Tampons : solutions qui résistent à une variation de pH . . . . .	601
	Calcul du pH d'une solution tampon . . . . .	602
	Équation de Henderson-Hasselbalch . . . . .	604
	Calcul des variations de pH dans une solution tampon . . . . .	607
	Tampons contenant une base et son acide conjugué . . . . .	611
<b>14.3</b>	Efficacité des tampons : zone tampon et pouvoir tampon . . . . .	612
	Quantités relatives d'acide et de base . . . . .	613
	Concentrations absolues d'acide et de base conjuguée . . . . .	613
	Zone tampon . . . . .	614
	Pouvoir tampon . . . . .	615
<b>14.4</b>	Préparation de solutions tampons à l'aide des substances disponibles . . . . .	616
<b>14.5</b>	Titrages et courbes de pH . . . . .	620
	Titration d'un acide fort par une base forte . . . . .	620
	Titration d'un acide faible par une base forte . . . . .	624
	Indicateurs : couleurs dépendantes du pH . . . . .	632
<b>14.6</b>	Constante de réaction d'un mélange d'acide et de base faibles . . . . .	633
<b>14.7</b>	Calcul du pH des solutions contenant plusieurs acides et/ou plusieurs bases . . . . .	634
	<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	646
	<b>Exercices</b> . . . . .	647

**CHAPITRE 15****ÉNERGIE LIBRE ET THERMODYNAMIQUE** 655

<b>15.1</b>	Taxe « chaleur » de la nature : impossible de gagner ni même d'avoir un match nul . . . . .	656
<b>15.2</b>	Processus spontanés et non spontanés . . . . .	657
<b>15.3</b>	Entropie et deuxième loi de la thermodynamique . . . . .	658
	Entropie . . . . .	660
	Variation d'entropie associée à un changement d'état . . . . .	664
<b>15.4</b>	Transfert de chaleur et variation de l'entropie du milieu extérieur . . . . .	666
	Dépendance de $\Delta S_{\text{ext}}$ envers la température . . . . .	666
	Quantification de la variation d'entropie du milieu extérieur . . . . .	667
<b>15.5</b>	Énergie libre de Gibbs . . . . .	669
	Effet de $\Delta H$ , de $\Delta S$ et de $T$ sur la spontanéité . . . . .	671

<b>15.6</b>	Variation d'entropie dans les réactions chimiques : calcul de $\Delta S_{\text{Rn}}^{\circ}$ . . . . .	673
	Entropie molaire standard ( $S^{\circ}$ ) et troisième loi de la thermodynamique . . . . .	673
<b>15.7</b>	Variation d'énergie libre standard dans les réactions chimiques : calcul de $\Delta G_{\text{Rn}}^{\circ}$ . . . . .	677
	Calcul de la variation d'énergie libre standard avec $\Delta G_{\text{Rn}} = \Delta H_{\text{Rn}}^{\circ} - T\Delta S_{\text{Rn}}^{\circ}$ . . . . .	678
	Calcul de $\Delta G_{\text{Rn}}^{\circ}$ avec les valeurs tabulées d'énergie libre de formation . . . . .	679
	Calcul de $\Delta G_{\text{Rn}}^{\circ}$ dans le cas d'une réaction par étapes à partir des variations d'énergie libre de chaque étape . . . . .	681
	Pourquoi l'énergie libre est-elle « libre » ? . . . . .	682
<b>15.8</b>	Variation d'énergie libre pour des états non standard : relation entre $\Delta G_{\text{Rn}}^{\circ}$ et $\Delta G_{\text{Rn}}$ . . . . .	683
	Variation d'énergie libre d'une réaction dans des conditions non standard . . . . .	684
<b>15.9</b>	Énergie libre et équilibre : relier $\Delta G_{\text{Rn}}^{\circ}$ à la constante d'équilibre ( $K$ ) . . . . .	687
	<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	689
	<b>Exercices</b> . . . . .	690

**CHAPITRE 16****OXYDORÉDUCTION ET ÉLECTROCHIMIE** 697

<b>16.1</b>	Adieu réseau électrique . . . . .	698
<b>16.2</b>	Réactions d'oxydoréduction . . . . .	699
	États d'oxydation . . . . .	699
	Reconnaître les réactions d'oxydoréduction . . . . .	701
<b>16.3</b>	Équilibrage des équations d'oxydoréduction . . . . .	704
<b>16.4</b>	Piles galvaniques : production d'électricité à partir de réactions chimiques spontanées . . . . .	707
	Représentation d'une pile électrochimique . . . . .	709
<b>16.5</b>	Potentiel d'électrode standard . . . . .	710
	Prediction de la direction spontanée d'une réaction d'oxydoréduction . . . . .	715
	Prediction de la dissolution d'un métal dans un acide . . . . .	718
<b>16.6</b>	Potentiel de pile, énergie libre et constante d'équilibre . . . . .	719
	Relation entre $\Delta G^{\circ}$ et $E_{\text{pile}}^{\circ}$ . . . . .	719
	Relation entre $E_{\text{pile}}^{\circ}$ et $K$ . . . . .	721
<b>16.7</b>	Potentiel de pile et concentration . . . . .	722
	Piles de concentration . . . . .	726
<b>16.8</b>	Piles : recours à la chimie pour produire de l'électricité . . . . .	727
	Piles sèches . . . . .	727
	Batteries au plomb-acide . . . . .	728
	Autres piles rechargeables . . . . .	729
	Piles à combustible . . . . .	730

## XXVIII TABLE DES MATIÈRES

<b>16.9</b>	Électrolyse : recours à l'électricité pour provoquer des réactions chimiques non spontanées . . . . .	731
	Stœchiométrie de l'électrolyse . . . . .	734
<b>16.10</b>	Corrosion : réactions d'oxydoréduction indésirables . . . . .	735
	Prévention de la corrosion . . . . .	737
	<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	737
	<b>Exercices</b> . . . . .	739
<b>Annexe I</b>	Opérations mathématiques courantes en chimie . . . . .	745
<b>Annexe II</b>	Données utiles . . . . .	749
<b>Annexe III</b>	Réponses aux exercices de fin de chapitre . . . . .	759
<b>Annexe IV</b>	Réponses aux exercices pratiques des exemples . . . . .	822
<b>Annexe V</b>	Réponses aux liens conceptuels . . . . .	831
<b>Glossaire</b>	. . . . .	838
<b>Sources des photos et des illustrations</b>	. . . . .	850
<b>Index</b>	. . . . .	853