

# Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	1
<b>Partie 1. Nanomatériaux, amplification, séparation, reconnaissance et transduction</b> . . . . .	5
<b>Chapitre 1. Les nanomatériaux</b> . . . . .	7
1.1. Les nanomatériaux carbonés. . . . .	7
1.1.1. Les fullerènes . . . . .	7
1.1.1.1. Électrophilie des fullerènes et propriétés anti-oxydantes . . . . .	8
1.1.1.2. Réactivité chimique et exo-fonctionnalisation. . . . .	9
1.1.1.3. Les endo-métallofullerènes (EMF) . . . . .	10
1.1.2. Les nanodiamants (ND) de carbone . . . . .	11
1.1.3. Les <i>carbon dots</i> ou <i>carbon quantum dots</i> (CQD) . . . . .	13
1.1.4. Les nanotubes de carbone (CNT). . . . .	16
1.1.4.1. Chiralité des nanotubes de carbone . . . . .	17
1.1.4.2. Quelques propriétés et applications des CNT . . . . .	19
1.1.4.3. Conclusion. . . . .	21
1.1.5. Le graphène . . . . .	21
1.1.5.1. Propriétés électriques extrêmes du graphène exfolié . . . . .	22
1.1.5.2. Les techniques de préparation du graphène . . . . .	24
1.1.5.3. Quelques applications du graphène et de ses dérivés. . . . .	28
1.1.6. Les <i>quantum dots</i> de graphène (GQD) . . . . .	34
1.1.6.1. Méthodes de fabrication des GQD. . . . .	35
1.1.6.2. Propriétés et applications des GQD . . . . .	36

1.2. Les nanomatériaux inorganiques . . . . .	39
1.2.1. Les nanoparticules métalliques . . . . .	40
1.2.1.1. Les nanoparticules d'or . . . . .	40
1.2.2. Les agrégats d'atomes métalliques (MNC, <i>Metal Nanoclusters</i> ) . . . . .	43
1.2.3. Les boîtes quantiques semiconductrices (QD, <i>quantum dots</i> semi-conducteurs) . . . . .	45
1.2.4. Les nanofeuillets lamellaires inorganiques bidimensionnels. . . . .	48
1.2.4.1. Les dichalcogénures . . . . .	48
1.2.4.2. Les MXènes . . . . .	51
1.2.4.3. Le phosphorène . . . . .	52
1.2.5. Les réseaux hybrides organo-métalliques (MOF, <i>Metal Organic Frameworks</i> ) . . . . .	53
1.2.6. Méthodes de fabrication des MOF . . . . .	54
1.3. Conclusions. . . . .	58

## **Chapitre 2. Techniques de séparation et d'amplification . . . . . 61**

2.1. Principe de la technique PCR appliquée à l'amplification de concentration de traces d'ADN . . . . .	61
2.2. Techniques de séquençage . . . . .	65
2.3. Techniques de séparation de mélanges de produits . . . . .	70
2.3.1. Techniques de chromatographie . . . . .	70
2.3.2. Techniques d'électrophorèse . . . . .	74
2.3.2.1. Électrophorèse à deux dimensions. . . . .	74
2.3.2.2. Électrophorèse capillaire (CE, <i>Capillary Electrophoresis</i> ) . . . . .	77
2.4. Conclusions. . . . .	98

## **Chapitre 3. Principes de reconnaissance . . . . . 101**

3.1. Les différentes reconnaissances moléculaires ou chimiques . . . . .	102
3.1.1. Reconnaissance d'ions par des ligands synthétiques . . . . .	102
3.1.2. Reconnaissance immunologique : anticorps, nanobodies et peptides . . . . .	105
3.1.3. Reconnaissance par des acides nucléiques : les aptamères . . . . .	108
3.1.4. Reconnaissance par polymères à empreinte moléculaire . . . . .	110
3.1.4.1. Polymérisation en masse . . . . .	111
3.1.4.2. Impression sur un polymère déjà formé . . . . .	112
3.1.4.3. Méthode d'estampillage ( <i>stamping</i> ). . . . .	113
3.1.5. Reconnaissance suivie d'une transformation : enzymes et catalyseurs . . . . .	113
3.1.5.1. Reconnaissance enzymatique. . . . .	113

3.1.5.2. Activité catalytique des nanozymes . . . . .	115
3.1.6. Reconnaissance d'espèces gazeuses . . . . .	117
3.1.6.1. Comportement des oxydes métalliques semiconducteurs . .	117
3.1.6.2. Comportement de NP d'oxydes métalliques . . . . .	118
3.2. Les réseaux de capteurs et l'intelligence artificielle . . . . .	122
3.2.1. Principes de base . . . . .	122
3.2.2. Application aux capteurs chimiques . . . . .	124
3.2.2.1. Cas d'un capteur de gaz . . . . .	124
3.2.2.2. Cas d'un biocapteur . . . . .	126
3.3. Conclusions. . . . .	126

## **Chapitre 4. Techniques physico-chimiques de transduction . . . . . 129**

4.1. Les méthodes électrochimiques . . . . .	130
4.1.1. L'analyse potentiométrique . . . . .	131
4.1.2. L'analyse voltammétrique. . . . .	132
4.1.2.1. Voltammétrie cyclique (CV) . . . . .	133
4.1.2.2. Voltammétrie différentielle à impulsions. . . . .	134
4.1.3. L'impédancemétrie . . . . .	136
4.2. La piézoélectricité pour l'analyse gravimétrique . . . . .	138
4.2.1. La microbalance à quartz . . . . .	138
4.2.2. Capteurs à ondes acoustiques de surface . . . . .	141
4.3. Transistors à effet de champ (FET). . . . .	142
4.3.1. Principe de fonctionnement d'un FET. . . . .	142
4.3.2. Principaux dispositifs de type FET appliqués à l'analyse chimique . . . . .	144
4.3.2.1. Transistors à effet de champ sensibles aux espèces ioniques et biologiques (ISFET et BioFET) . . . . .	145
4.3.2.2. Transistors organiques électrochimiques (OECT) . . . . .	150
4.3.2.3. FET organiques à grille électrolytique (EGOFET, <i>Electrolyte-Gated OFET</i> ) . . . . .	152
4.4. Les méthodes optiques et optoélectrochimiques de détection . . . . .	154
4.4.1. Luminescence des molécules . . . . .	154
4.4.1.1. Diagramme énergétique des émissions de fluorescence et de phosphorescence . . . . .	154
4.4.1.2. Les diverses formes d'exploitation de la fluorescence . . . .	155
4.4.2. L'électrochimiluminescence (ECL) . . . . .	157
4.4.2.1. Principe de base de l'ECL . . . . .	158
4.4.2.2. Impact des nanomatériaux (NM) sur l'ECL . . . . .	160
4.4.2.3. Conclusions et perspectives de l'ECL. . . . .	174

4.4.3. La photoélectrochimie (PEC) . . . . .	175
4.4.3.1. Principes de base d'un LAPS ( <i>Light Adressed Potentiometric Sensors</i> ) . . . . .	175
4.4.3.2. Application des LAPS à l'imagerie et à la multidétection . . . . .	178
4.4.3.3. LAPS à base de composites nanostructurés fonctionnant par irradiation dans le proche infrarouge (NIR, <i>Near IR</i> ) . . . . .	180
4.4.3.4. Conclusions relatives à la PEC . . . . .	184
4.4.4. La spectroscopie de diffusion Raman . . . . .	185
4.4.5. Diffusion Raman exaltée de surface et résonance plasmonique . . . . .	186
4.4.5.1. Résonance plasmonique . . . . .	187
4.4.5.2. Spectroscopie SERS . . . . .	193
4.5. Conclusions . . . . .	195

## **Partie 2. Capteurs pour l'environnement et la biologie . . . . . 197**

### **Chapitre 5. Capteurs pour les ions et les gaz . . . . . 199**

5.1. Électrodes membranaires pour la mesure potentiométrique du pH . . . . .	200
5.2. Électrodes membranaires sélectives aux ions (ISE, <i>Ion Selective Electrodes</i> ) . . . . .	202
5.2.1. Vers les ISE à très faibles limites de détection . . . . .	205
5.2.2. Les ISE à contact solide . . . . .	208
5.2.3. Conclusions relatives aux électrodes ISE . . . . .	217
5.3. Capteurs pour les gaz . . . . .	217
5.3.1. Capteurs de gaz à base d'oxydes métalliques nanostructurés . . . . .	218
5.3.2. Capteurs de gaz fondés sur l'utilisation de polymères conducteurs . . . . .	221
5.3.3. Capteurs de gaz fondés sur l'utilisation de matériaux bidimensionnels en couches minces . . . . .	225
5.3.3.1. Capteurs de gaz à base de graphène et de ses dérivés . . . . .	225
5.3.3.2. Capteurs de gaz à base de dichalcogénures . . . . .	231
5.3.3.3. Nouveaux matériaux 2D pour les capteurs de gaz . . . . .	234
5.3.3.4. Conclusions relatives aux matériaux 2D . . . . .	240
5.3.4. Réseaux de capteurs et leur application au nez artificiel . . . . .	241
5.3.4.1. Réseaux de capteurs électroniques . . . . .	241
5.3.4.2. Réseaux de capteurs colorimétriques . . . . .	248
5.4. Conclusions . . . . .	252

---

<b>Chapitre 6. Les biocapteurs pour la santé . . . . .</b>	<b>255</b>
6.1. Glycémie, urémie, cholestérol . . . . .	256
6.1.1. Glycémie . . . . .	257
6.1.1.1. Dosages enzymatiques du glucose. . . . .	258
6.1.1.2. Dosages électrochimiques du glucose non enzymatiques . . . . .	259
6.1.1.3. Les dispositifs utilisables à domicile ou PoC . . . . .	261
6.1.1.4. Méthodes non invasives . . . . .	264
6.1.2. Urémie . . . . .	267
6.1.2.1. Détection enzymatique . . . . .	267
6.1.3. Cholestérol . . . . .	272
6.1.3.1. Transductions électrochimiques . . . . .	272
6.1.3.2. Transductions optiques . . . . .	274
6.1.3.3. Quelques exemples pratiques. . . . .	275
6.2. Biomarqueurs . . . . .	276
6.2.1. Biomarqueurs de cancers . . . . .	278
6.2.1.1. Dépistage des cancers par des capteurs optiques . . . . .	278
6.2.1.2. Dépistage des cancers par des méthodes électriques et électrochimiques. . . . .	281
6.2.2. Biomarqueurs d'affections cardiaques. . . . .	282
6.2.2.1. Biocapteurs optiques. . . . .	283
6.2.2.2. Biocapteurs électrochimiques et à transistors . . . . .	286
6.2.3. Biomarqueurs du stress . . . . .	289
6.2.3.1. Le cortisol . . . . .	289
6.2.3.2. Biocapteur de la dopamine . . . . .	298
6.3. Pathogènes . . . . .	298
6.3.1. Détection de virus. . . . .	298
6.3.1.1. Technologie CRISPR/Cas pour la détection du SARS-CoV-2 . . . . .	299
6.3.1.2. Dosages du SARS-CoV-2 par l'intermédiaire des protéines virales . . . . .	300
6.3.1.3. FET à nanofils pour le dosage de virus . . . . .	305
6.3.2. Détection de toxines . . . . .	307
6.4. Conclusions. . . . .	309
<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>311</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>313</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>363</b>