

# Table des matières

<b>Préface</b> . . . . .	17
Guy Frija	
<b>Chapitre 1. Les bases physiques : l'interaction rayonnement-matière, ses conséquences sur la détection et l'imagerie médicale</b> . . . . .	19
Jean-Pierre MOY	
1.1. Les limites de l'imagerie utilisant la lumière . . . . .	19
1.2. Imagerie avec d'autres rayonnements . . . . .	20
1.3. Les rayons X : leur interaction avec la matière . . . . .	22
1.3.1. Nature des rayons X, production . . . . .	22
1.3.2. Loi de Beer-Lambert . . . . .	23
1.3.3. L'effet photoélectrique . . . . .	24
1.3.3.1. Cas d'un corps simple . . . . .	24
1.3.3.2. Matériau composé, mélange . . . . .	26
1.3.3.3. Application au filtrage . . . . .	28
1.3.3.4. Pouvoir ionisant . . . . .	29
1.3.3.5. Fluorescence X, échappement . . . . .	30
1.3.4. Création de paires . . . . .	32
1.3.5. Déviation et perte d'énergie. L'effet Compton . . . . .	32
1.3.5.1. Indice de réfraction . . . . .	35
1.3.6. Absorption et atténuation . . . . .	36
1.3.7. Effets chimiques . . . . .	37
1.3.8. La dose . . . . .	37
1.4. L'imagerie radiologique repose sur l'interaction rayons X-matière . . . . .	38

1.4.1. Constitution de l'image . . . . .	38
1.4.2. Rôle du rayonnement diffusé . . . . .	41
1.5. Conséquences des modes d'interaction sur la détection . . . . .	42
1.5.1. Le signal, les bruits . . . . .	43
1.5.1.1. Absorption . . . . .	44
1.5.1.2. Echappement . . . . .	45
1.5.1.3. Le matériau détecteur . . . . .	45
1.5.2. Comptage, intégration . . . . .	48
1.5.3. Les problèmes spécifiques de l'imagerie . . . . .	49
1.5.3.1. Résolution spatiale et dose . . . . .	50
1.5.3.2. Echantillonnage . . . . .	51
1.5.3.3. Taille du volume d'interaction. Parallaxe . . . . .	53
1.6. Conclusion . . . . .	53
1.7. Bibliographie . . . . .	54

## **Chapitre 2. Les détecteurs pour l'imagerie médicale . . . . .** 55

Hervé FANET

2.1. Interaction rayonnement matière et formation du signal . . . . .	56
2.1.1. Cas simple d'un détecteur plan : explication phénoménologique . . . . .	56
2.1.2. Cas général du détecteur multi-électrodes et champs de pondération . . . . .	60
2.1.3. Cas d'un détecteur réel . . . . .	67
2.1.4. Exemples du détecteur silicium et du détecteur à pistes ou pixels . . . . .	71
2.1.4.1. Détecteur plan . . . . .	71
2.1.4.2. Détecteur à pistes ou à pixels . . . . .	74
2.1.5. Influence de la taille du détecteur . . . . .	75
2.1.6. Comment le problème peut se compliquer . . . . .	79
2.1.7. Utilisations des impulsions de courant à des fins de mesure . . . . .	80
2.2. Les mesures de flux, d'énergie, de temps et de position . . . . .	86
2.2.1. Les mesures de flux . . . . .	86
2.2.2. Les mesures d'énergie . . . . .	91
2.2.3. Le bruit électronique . . . . .	95
2.2.4. Mesures de temps . . . . .	104
2.2.5. Mesures de position . . . . .	107
2.3. Les détecteurs semi-conducteurs . . . . .	110
2.3.1. La chambre d'ionisation solide . . . . .	110
2.3.2. Les détecteurs semi-conducteurs à jonction . . . . .	112
2.3.2.1. Explication phénoménologique . . . . .	112
2.3.2.2. Modélisation de la détection par diode . . . . .	113

2.3.3. La photoconduction . . . . .	116
2.3.4. Matériaux semi-conducteurs pour la détection . . . . .	119
2.3.5. Détecteurs silicium . . . . .	122
2.3.5.1. Détecteurs implantés et barrière de surface . . . . .	122
2.3.5.2. Détecteurs silicium-lithium . . . . .	123
2.3.6. Détecteurs germanium . . . . .	124
2.3.7. Détecteurs tellurure de cadmium . . . . .	126
2.4. Mécanisme de la scintillation et chaîne de mesure . . . . .	128
2.4.1. Chaîne de mesure à base de scintillateur . . . . .	128
2.4.2. Mécanismes de la scintillation . . . . .	129
2.4.3. Matériaux inorganiques . . . . .	131
2.4.4. Matériaux organiques . . . . .	132
2.4.5. Qualité des mesures de temps et d'énergie . . . . .	133
2.4.6. Fonctionnement et utilisation des photomultiplicateurs . . . . .	137
2.4.7. Technologie des photocathodes . . . . .	138
2.4.8. Couplage du scintillateur et du photomultiplicateur . . . . .	139
2.4.9. Les photodiodes . . . . .	140
2.5. Les imageurs . . . . .	143
2.5.1. Caractéristiques principales . . . . .	143
2.5.2. Les technologies d'imageurs . . . . .	145
2.5.2.1. Le couple film écran . . . . .	145
2.5.2.2. L'intensificateur d'images . . . . .	145
2.5.2.3. Les écrans photo-stimulables . . . . .	146
2.5.2.4. Les panneaux plats . . . . .	146
2.5.2.5. Les détecteurs pour gamma caméra . . . . .	147
2.5.2.6. Les détecteurs pour caméras positons . . . . .	148
2.6. Bibliographie . . . . .	148

### **Chapitre 3. Traitement des images de radiographie numérique pour la quantification . . . . .**

Jean RINKEL et Jean-Marc DINTEN

3.1. Introduction aux capteurs plans . . . . .	149
3.1.1. Techniques de détection des rayons X . . . . .	150
3.1.1.1. Détection indirecte . . . . .	150
3.1.1.2. Détection directe . . . . .	151
3.1.2. Evaluation des performances . . . . .	152
3.1.2.1. Grandeurs caractéristiques . . . . .	152
3.1.2.2. Comparaison de différents systèmes . . . . .	153
3.1.3. Applications cliniques . . . . .	154

3.2. Relation entre les grandeurs physiques et l'acquisition radiographique	155
3.2.1. Loi d'atténuation	155
3.2.2. Poly-chromaticité	156
3.2.3. Rayonnement diffusé	157
3.2.4. Réponse du capteur	158
3.2.5. Synthèse	159
3.3. Accès aux coefficients d'atténuation linéaire à partir de l'image d'atténuation	160
3.3.1. Traitements liés aux effets du capteur	160
3.3.1.1. Modélisation de la fonction de réponse d'un pixel $\mathcal{F}_{i,j}$	160
3.3.1.2. Correction de gain	162
3.3.1.3. Une méthode de correction de la non-linéarité	163
3.3.1.4. Une méthode de correction de la PSF du capteur par déconvolution	164
3.3.2. Traitement du rayonnement diffusé par le patient	167
3.3.2.1. Revue des principales approches de correction du rayonnement diffusé	167
3.3.2.2. Méthode de correction du rayonnement diffusé couplant modélisation analytique et calibrage	169
3.4. Accès à des grandeurs physiques en combinant plusieurs radiographies d'un capteur plan	176
3.4.1. L'imagerie bi-énergies	176
3.4.2. CT avec capteur plan	181
3.4.2.1. Vers la tomographie avec capteur plan	181
3.4.2.2. Adaptation de la méthode de correction du diffusé	183
3.4.2.3. Résultats	184
3.5. Conclusion	186
3.6. Bibliographie	187

## **Chapitre 4. La tomographie par rayons X** . . . . . 189

Françoise PEYRIN et Philippe DOUEK

4.1. Introduction	189
4.2. Principe des premiers systèmes d'acquisition	190
4.2.1. Systèmes translation-rotation : 1 <sup>e</sup> et 2 <sup>e</sup> générations	191
4.2.2. Systèmes à faisceau éventail : 3 <sup>e</sup> et 4 <sup>e</sup> générations	193
4.3. Aspects physiques et problème direct	193
4.3.1. Nature de l'image tomographique	194
4.3.2. Modélisation du phénomène physique	195
4.3.3. Modélisation des données	197

4.4. Principe de la reconstruction d'images tomographiques . . . . .	198
4.4.1. Position du problème . . . . .	198
4.4.2. Méthodes analytiques . . . . .	199
4.4.2.1. Théorème coupe-projection. . . . .	199
4.4.2.2. Algorithme par rétroprojection filtré . . . . .	200
4.4.2.3. Qualité de l'image et artefacts . . . . .	203
4.4.3. Méthodes discrètes . . . . .	206
4.4.3.1. Expression du problème. . . . .	206
4.4.3.2. Méthodes itératives : ART, SIRT . . . . .	208
4.4.4.3. Autres méthodes . . . . .	210
4.4. Conclusion . . . . .	211
4.5. Evolution des scanners X et des algorithmes de reconstruction . . . . .	212
4.5.1. Systèmes spiralés ou hélicoïdaux. . . . .	212
4.5.2. Systèmes réellement 3D : parallèle ou divergents . . . . .	215
4.5.3. Systèmes divergents hélicoïdaux . . . . .	218
4.5.4. Systèmes <i>dual source</i> . . . . .	219
4.5.5. Notions de dosimétrie . . . . .	219
4.6. Exemples d'applications cliniques . . . . .	220
4.6.1. Introduction . . . . .	220
4.6.2. Scanner cardiaque : synchronisation à l'ECG . . . . .	221
4.6.2.1. Mode séquentiel prospectif . . . . .	222
4.6.2.2. Mode hélicoïdal rétrospectif . . . . .	223
4.6.2.3. Indications cliniques . . . . .	225
4.6.3. Imagerie de perfusion . . . . .	227
4.6.3.1. Acquisition dynamique avec détecteurs à large couverture . . . . .	228
4.6.3.2. Application à la perfusion cérébrale. . . . .	228
4.7. De la tomographie à la micro-tomographie . . . . .	230
4.7.1. Applications ostéo-articulaires . . . . .	230
4.7.2. Systèmes de tomographie périphérique . . . . .	231
4.7.3. Systèmes de micro-tomographie . . . . .	231
4.8. Conclusion . . . . .	233
4.9. Bibliographie . . . . .	234

**Chapitre 5. La tomographie par émission de positons : principes et applications.** . . . . . 239

Régine TREBOSSEN

5.1. Introduction. . . . .	240
5.1.1. Définition. . . . .	240
5.1.2. La TEP par rapport aux autres techniques d'imagerie moléculaire . . . . .	241

5.2. La TEP : principe et performances . . . . .	242
5.2.1. Les radio-pharmaceutiques . . . . .	242
5.2.2. Le principe physique de la TEP. . . . .	244
5.2.2.1. Événements détectés . . . . .	244
5.2.2.2. Acquisition des événements . . . . .	245
5.2.3. Traitement des données acquises. . . . .	247
5.2.3.1. Organisation des événements acquis . . . . .	247
5.2.3.2. Reconstruction d'images à partir des événements acquis . . . . .	247
5.2.3.3. Normalisation des données acquises . . . . .	249
5.2.4. Reconstruction des images . . . . .	249
5.2.4.1. Reconstructions analytiques . . . . .	249
5.2.4.2. Reconstructions itératives. . . . .	250
5.2.5. Principales performances des TEP . . . . .	250
5.2.5.1. Résolution spatiale . . . . .	250
5.2.5.2. La sensibilité . . . . .	251
5.2.5.3. Les taux de coïncidences et le NECR. . . . .	251
5.3. Les tomographes. . . . .	252
5.3.1. Détecteur . . . . .	252
5.3.1.1. Les cristaux scintillants . . . . .	253
5.3.1.2. Le convertisseur lumière-signal électrique. . . . .	253
5.3.1.3. Le couplage des cristaux aux convertisseurs. . . . .	254
5.3.1.4. Les convertisseurs directs. . . . .	254
5.3.2. Les systèmes TEP. . . . .	255
5.3.3. Arrangement des détecteurs. . . . .	255
5.3.4. Uniformité de la résolution spatiale sur le champ de vue des systèmes : la mesure de la profondeur d'interaction . . . . .	256
5.3.5. La mesure du temps de vol . . . . .	256
5.4. Application clinique de la TEP bilan d'extension des cancers . . . . .	257
5.4.1. Bases physiologiques. . . . .	257
5.4.2. Protocole d'acquisition et de reconstruction . . . . .	258
5.4.3. Interprétation des images : sensibilité-spécificité de cette modalité d'imagerie médicale . . . . .	258
5.5. Conclusion . . . . .	259
5.6. Bibliographie. . . . .	260

## **Chapitre 6. L'imagerie mono-photonique . . . . .** 263

Irène BUVAT

6.1. Introduction. . . . .	263
6.2. Principe général de l'imagerie mono-photonique . . . . .	264
6.2.1. Radiotraceurs . . . . .	264

6.2.2. Détecteurs . . . . .	265
6.2.3. Traitement du signal . . . . .	266
6.3. Système de détection classique en imagerie mono-photonique : la gamma- caméra à scintillations . . . . .	267
6.3.1. Principe général d'une gamma-caméra à scintillations classique . . . . .	267
6.3.2. Variantes dans les composantes de la caméra à scintillations . . . . .	269
6.3.2.1. Collimateur . . . . .	269
6.3.2.2. Scintillateur . . . . .	270
6.3.2.3. Tubes photomultiplicateurs . . . . .	272
6.3.3. Performances et utilisation des caméras à scintillations classiques . . . . .	273
6.4. Systèmes innovants : détecteurs à semi-conducteurs . . . . .	275
6.5. Reconstruction tomographique et corrections. . . . .	276
6.5.1. Reconstruction tomographique . . . . .	276
6.5.1.1. Reconstruction analytique par rétroprojection filtrée. . . . .	278
6.5.1.2. Reconstruction itérative . . . . .	281
6.5.1.3. Reconstruction 3D . . . . .	284
6.5.2. Corrections . . . . .	285
6.5.2.1. Atténuation . . . . .	286
6.5.2.2. Diffusion. . . . .	288
6.5.2.3. Résolution spatiale non stationnaire. . . . .	289
6.5.2.4. Effet de volume partiel . . . . .	291
6.5.2.5. Mouvement . . . . .	292
6.6. Détecteurs hybrides . . . . .	294
6.7. Applications . . . . .	296
6.8. Développements futurs. . . . .	297
6.9. Conclusion . . . . .	298
6.10. Bibliographie . . . . .	299

## **Chapitre 7. L'imagerie optique. . . . .** 303

Anabela DA SILVA

7.1. Introduction. . . . .	303
7.2. Physique de la propagation lumineuse dans les tissus biologiques . . . . .	305
7.2.1. Echelles de mesure et résolution : différentes techniques d'imagerie . . . . .	305
7.2.2. Interaction lumière-matière . . . . .	307
7.2.2.1. L'indice de réfraction . . . . .	307
7.2.2.2. L'absorption. . . . .	308
7.2.2.3. La diffusion . . . . .	311
7.2.3. Du problème direct au problème inverse . . . . .	315

7.2.3.1. Les modèles de propagation de la lumière dans les milieux diffusants : résolution du problème direct . . . . .	317
7.2.3.2. Problème inverse du diagnostic à l'imagerie 3D . . . . .	326
7.3. Différentes techniques d'imagerie optique pour différentes applications	328
7.3.1. Sélection des photons balistiques ou serpentiles . . . . .	329
7.3.1.1. Sélection spatiale . . . . .	329
7.3.1.2. Sélection temporelle . . . . .	330
7.3.1.3. Sélection par cohérence temporelle . . . . .	331
7.3.2. Photons multi-diffusés . . . . .	332
7.3.2.1. Imagerie du petit animal. . . . .	334
7.3.2.2. Imagerie du corps humain. . . . .	340
7.3.2.3. Les techniques alternatives . . . . .	349
7.4. Conclusion . . . . .	353
7.5. Bibliographie . . . . .	354