

# Table des matières

Avant-propos	xi
<b>1 La Résonance Magnétique Nucléaire : concepts de base</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte historique	2
1.2 Spins nucléaires	3
1.3 Spins nucléaires et champ magnétique	4
1.4 Une assemblée de noyaux dans un champ magnétique	6
1.5 Mouvement de l'aimantation macroscopique dans un champ magnétique	8
1.5.1 Précession libre	8
1.5.2 Mouvement dans le repère tournant. Champ fictif	10
1.5.3 Mouvement en présence d'un champ tournant. Impulsions radiofréquence	10
1.6 Relaxation : description phénoménologique. Équations de Bloch	15
1.6.1 Relaxation spin réseau ou longitudinale	15
1.6.2 Relaxation spin-spin ou transversale	16
1.6.3 Équations de Bloch	17
1.6.4 Effet des inhomogénéités de champ : temps caractéristique $T_2^*$	19
1.6.5 Isochromats	20
1.7 Signal de précession libre	21
1.7.1 Caractéristiques générales du signal	21
1.7.2 Aspects quantitatifs : réciprocité	23
1.7.3 Le bruit	24
1.7.4 Rapport signal sur bruit	25
1.8 Gradients	27
1.8.1 Compensation des inhomogénéités de champ	28
1.8.2 Gradients uniformes de champ magnétique	31
1.8.3 Termes de Maxwell	32
1.9 Déplacement chimique	33
1.9.1 Constante d'écran	33
1.9.2 Déplacement chimique : présentation des spectres	35
1.9.3 Calculs des déplacements chimiques	36

1.9.4	Déplacement chimique et imagerie . . . . .	38
1.9.5	Références internes et externes . . . . .	38
1.10	Interactions spin-spin . . . . .	40
1.10.1	Interaction dipolaire . . . . .	40
1.10.2	Interaction scalaire . . . . .	42
1.10.3	Découplage . . . . .	44
1.10.4	Effet Overhauser . . . . .	44
1.11	Transfert d'aimantation . . . . .	47
1.12	Hyperpolarisation . . . . .	48
1.12.1	Accroître le champ. Abaisser la température . . . . .	49
1.12.2	Polarisation dynamique nucléaire . . . . .	49
1.12.3	Polarisation induite par l'hydrogène para . . . . .	51
1.12.4	Gaz rares hyperpolarisés. Pompage optique . . . . .	52
1.13	Écho de spin . . . . .	55
1.14	Sensibilité d'une expérience RMN à la diffusion translationnelle moléculaire . . . . .	56
1.14.1	L'équation de diffusion . . . . .	56
1.14.2	Introduction de la diffusion dans les équations de Bloch . . . . .	57
1.14.3	Gradients dépendant du temps et mesure du coefficient de diffusion . . . . .	58
1.14.4	Influence de la diffusion sur le signal produit par une séquence d'écho de spin . . . . .	59
1.15	Sensibilité d'une expérience RMN au mouvement cohérent . . . . .	61
1.16	L'expérience RMN . . . . .	62
1.17	Instrumentation . . . . .	63
1.17.1	Les aimants . . . . .	63
1.17.2	Systèmes de gradients pulsés . . . . .	66
1.17.3	Bobines rf . . . . .	69
1.17.4	Émetteur . . . . .	77
1.17.5	Récepteur . . . . .	79
	Références bibliographiques . . . . .	85
	Exercices . . . . .	90
<b>2</b>	<b>Les impulsions en spectroscopie et en imagerie</b>	<b>95</b>
2.1	Généralités . . . . .	96
2.1.1	Représentation d'une impulsion . . . . .	96
2.1.2	Énergie dissipée . . . . .	97
2.1.3	Trièdre d'émission, trièdre de réception . . . . .	99
2.1.4	Unités et conventions de signes . . . . .	99
2.2	Réponse d'un système de spins à une impulsion : approximation de la réponse linéaire . . . . .	100
2.2.1	Le système différentiel de Bloch en absence de relaxation . . . . .	100
2.2.2	L'approximation de la réponse linéaire . . . . .	101

2.3	Action d'une rotation sur un système de spins . . . . .	104
2.3.1	Approche classique . . . . .	104
2.3.2	Représentation des rotations dans un espace à deux dimensions . . . . .	105
2.3.3	Décomposition d'une impulsion en une suite d'impulsions élémentaires . . . . .	107
2.3.4	Impulsions symétriques . . . . .	109
2.3.5	Impulsions antisymétriques . . . . .	110
2.3.6	Évolution d'un système de spins sous l'action d'une impulsion . . . . .	111
2.4	Impulsions d'excitation . . . . .	115
2.4.1	Généralités . . . . .	115
2.4.2	L'impulsion rectangulaire . . . . .	116
2.4.3	Calcul de la réponse à une impulsion modulée en amplitude . . . . .	119
2.4.4	Impulsion gaussienne . . . . .	121
2.4.5	Impulsion sinc . . . . .	122
2.4.6	Impulsions sinc-cos et sinc-sin . . . . .	124
2.4.7	Apodisation . . . . .	127
2.4.8	Impulsions binomiales . . . . .	128
2.4.9	Trains d'impulsions DANTE . . . . .	130
2.4.10	Gradient de phase : conséquences en spectroscopie . . .	136
2.4.11	Problème inverse : algorithme de Shinnar et Le Roux . .	141
2.4.12	Impulsions auto-refocalisantes . . . . .	146
2.5	Impulsions de refocalisation : séquences d'écho de spin . . . . .	150
2.5.1	Le signal produit par une séquence d'écho de spin . . .	151
2.5.2	Utilisation de gradients de dispersion . . . . .	154
2.5.3	Cyclage de phase EXORCYCLE . . . . .	155
2.5.4	Profils de refocalisation sélective . . . . .	156
2.5.5	Pondération $T_1$ et $T_2$ . . . . .	158
2.5.6	Séquences multi-échos . . . . .	158
2.6	Impulsions de stockage : séquences d'écho stimulé . . . . .	159
2.6.1	La séquence d'écho stimulé . . . . .	159
2.6.2	L'écho stimulé . . . . .	160
2.6.3	Les divers signaux produits par une séquence d'écho stimulé . . . . .	162
2.6.4	Relaxation . . . . .	164
2.7	Impulsions d'inversion . . . . .	165
2.8	Impulsions adiabatiques . . . . .	167
2.8.1	Passage adiabatique rapide . . . . .	167
2.8.2	Impulsions adiabatiques d'inversion modulées en amplitude et en phase . . . . .	169
2.8.3	Impulsions de type secante hyperbolique . . . . .	171
2.8.4	Impulsions adiabatiques d'excitation et de refocalisation	177

Références bibliographiques . . . . .	184
Exercices . . . . .	186
<b>3 Impulsions spatialement sélectives</b>	<b>191</b>
3.1 Gradients de champ . . . . .	192
3.2 Excitation d'un système de spins en présence d'un gradient constant . . . . .	193
3.2.1 Épaisseur de coupe – Position de la coupe . . . . .	193
3.2.2 Le signal à l'issue d'une excitation spatialement sélective . . . . .	195
3.2.3 Réversion de gradient – Écho de gradient . . . . .	196
3.2.4 Perturbation de l'aimantation longitudinale . . . . .	200
3.2.5 Ordres de grandeurs . . . . .	200
3.2.6 Coupes obliques . . . . .	201
3.3 Séquences d'écho de spin . . . . .	202
3.3.1 Écho de spin et réversion du gradient de sélection de coupe . . . . .	202
3.3.2 Impulsions de refocalisation spatialement sélectives . . . . .	204
3.3.3 Influence du profil spectral de l'impulsion de refocalisation sur le profil de coupe . . . . .	205
3.3.4 Importance des gradients de dispersion . . . . .	207
3.3.5 Détermination des aires des gradients de dispersion . . . . .	208
3.3.6 Impact de la séquence sur l'aimantation longitudinale . . . . .	209
3.4 Impulsions de stockage spatialement sélectives. Échos stimulés . . . . .	210
3.5 Impulsions d'inversion spatialement sélectives . . . . .	213
3.6 Détermination expérimentale du profil de coupe . . . . .	213
3.7 Artefact de déplacement chimique . . . . .	215
3.8 Distorsions associées à la procédure de sélection de coupe . . . . .	217
3.8.1 Inhomogénéités du champ statique . . . . .	218
3.8.2 Imperfections du système de gradients . . . . .	220
3.8.3 Distorsions dues à la présence des termes de Maxwell . . . . .	221
3.9 VERSE : excitation en présence d'un gradient variable dans le temps . . . . .	222
3.10 Impulsions spatialement sélectives multidimensionnelles : espace réciproque d'excitation . . . . .	224
3.10.1 Excitation 1D . . . . .	226
3.10.2 Excitation 2D . . . . .	230
3.10.3 Excitation 2D : balayage en cercles concentriques . . . . .	232
3.10.4 Excitation 2D : balayage en spirale . . . . .	236
3.10.5 Excitation 2D : balayage EPI . . . . .	242
3.10.6 Impulsions 3D . . . . .	245
3.10.7 Impulsions d'angle quelconque : refocalisation intrinsèque . . . . .	246
3.10.8 Impulsions 2D de refocalisation . . . . .	249

3.10.9	Utilisation des impulsions multidimensionnelles . . . . .	251
3.11	Impulsions à sélectivités spectrale et spatiale . . . . .	252
3.11.1	Principe . . . . .	252
3.11.2	Analogie entre impulsions spectrales-spatiales et impulsions spatialement sélectives 2D . . . . .	255
3.11.3	Impulsions spectrales-spatiales de type II . . . . .	256
3.11.4	À propos de la durée des impulsions spectrales-spatiales	259
3.11.5	Applications : imagerie eau-graisse . . . . .	259
	Références bibliographiques . . . . .	260
	Exercices . . . . .	263
<b>4</b>	<b>Espace image - espace réciproque...</b>	<b>267</b>
4.1	Voxel, pixel, échelle de gris . . . . .	268
4.2	Grandeur imagée . . . . .	268
4.3	L'espace réciproque . . . . .	270
4.4	Échantillonnage et répétition périodique de l'image . . . . .	272
4.5	Repléments . . . . .	275
4.6	Troncature . . . . .	276
4.6.1	Fenêtres de troncature . . . . .	277
4.6.2	Repléments associés à la troncature . . . . .	278
4.6.3	Symétrie des fenêtres de troncature . . . . .	279
4.7	Résolution spatiale : fonction de dispersion d'un point, fonction de réponse spatiale . . . . .	280
4.7.1	Fonction de dispersion du point et repléments associés à la troncature . . . . .	281
4.7.2	Résolution spatiale numérique . . . . .	282
4.7.3	Apodisation . . . . .	284
4.8	L'image numérique en pratique . . . . .	285
4.8.1	Choix des paramètres . . . . .	285
4.8.2	Symétrie de l'échantillonnage des fréquences spatiales	286
4.8.3	Symétrie de l'exploration des coordonnées spatiales . . .	287
4.8.4	Accroissement du nombre de points calculés dans l'espace image . . . . .	287
4.9	Contraste et luminosité . . . . .	290
4.10	Projection d'un objet sur une direction de l'espace : théorème de la coupe centrale . . . . .	292
4.10.1	Projection sur un axe de coordonnées . . . . .	292
4.10.2	Projection sur une direction quelconque de l'espace . . .	293
4.11	Reconstruction à partir d'un ensemble de projections . . . . .	294
4.11.1	Principe . . . . .	294
4.11.2	Projection filtrée, rétroprojection . . . . .	295
4.11.3	Échantillonnage . . . . .	296
4.11.4	Échantillonnage radial : fonction de dispersion du point	299

4.12	Méthodes générales de traitement de données échantillonnées sur une grille non cartésiennes . . . . .	300
4.12.1	Introduction . . . . .	300
4.12.2	Évaluation de la fonction compensatrice de densité d'échantillonnage . . . . .	302
4.12.3	Gridding . . . . .	303
4.12.4	Calcul direct . . . . .	307
	Références bibliographiques . . . . .	309
	Exercices . . . . .	312
<b>5</b>	<b>Principales méthodes d'imagerie RMN</b>	<b>315</b>
5.1	Introduction . . . . .	316
5.2	Espace réciproque et signal de précession libre en présence de gradients . . . . .	317
5.2.1	Fréquences spatiales . . . . .	317
5.2.2	Trajectoires dans l'espace réciproque . . . . .	319
5.2.3	Hermiticité de l'espace réciproque . . . . .	320
5.3	Contraste . . . . .	321
5.4	Imagerie 2DFT d'écho de gradient . . . . .	322
5.4.1	Principe : codage de phase, codage de fréquence . . . . .	322
5.4.2	Choix des paramètres . . . . .	324
5.4.3	Effets d'off-résonance . . . . .	325
5.4.4	Bande passante par pixel . . . . .	328
5.4.5	Enchaînement des séquences : imagerie multi-coupes . . . . .	329
5.4.6	Contraste . . . . .	330
5.4.7	Imagerie 3DFT . . . . .	333
5.4.8	Couverture incomplète du plan de Fourier . . . . .	335
5.4.9	Cartographie du champ magnétique . . . . .	339
5.5	Techniques d'écho de gradient rapides : SSFP . . . . .	340
5.5.1	État stationnaire : introduction aux séquences SSFP . . . . .	341
5.5.2	Séquences SSFP équilibrées . . . . .	344
5.5.3	Séquences SSFP non équilibrées (présence de gradients de dispersion) . . . . .	348
5.5.4	Élimination de la contribution de l'aimantation transversale à la construction de l'état stationnaire . . . . .	355
5.5.5	Comparaison des diverses méthodes d'écho de gradient rapides . . . . .	359
5.5.6	Préparation de l'aimantation . . . . .	361
5.6	Imagerie 2DFT d'écho de spin . . . . .	362
5.6.1	Principe . . . . .	362
5.6.2	Enchaînement des séquences : contraste . . . . .	364
5.7	Techniques d'écho de spin rapides : multi-échocs . . . . .	365
5.7.1	Principe . . . . .	365

5.7.2	Codage de phase et contraste . . . . .	367
5.7.3	Imagerie d'écho de spin à une seule excitation . . . . .	368
5.7.4	Suite d'impulsions de refocalisation d'angle inférieur à $180^\circ$ . . . . .	369
5.8	Techniques radiales . . . . .	376
5.8.1	Acquisition de rayons de l'espace réciproque . . . . .	376
5.8.2	Écho de gradient, acquisition de diamètres de l'espace réciproque . . . . .	379
5.8.3	Méthodes radiales et effets d'off-résonance . . . . .	380
5.8.4	Applications des méthodes radiales . . . . .	381
5.9	Écho-planar . . . . .	383
5.9.1	Images écho-planar obtenues en une seule excitation (single-shot EPI) . . . . .	384
5.9.2	Écho-Planar segmenté . . . . .	386
5.9.3	Ordres de grandeurs . . . . .	387
5.9.4	Autres types de balayage EPI . . . . .	388
5.9.5	Difficultés et artefacts de la séquence EPI . . . . .	390
5.10	Imagerie spirale . . . . .	400
5.10.1	Trajectoire spirale et gradients associés . . . . .	400
5.10.2	Vitesse de parcours de la trajectoire . . . . .	401
5.10.3	Séquences . . . . .	409
5.10.4	Caractéristiques générales . . . . .	410
5.11	Mesure des trajectoires dans l'espace réciproque . . . . .	413
5.12	Imagerie parallèle . . . . .	415
5.12.1	Le signal en imagerie parallèle . . . . .	416
5.12.2	Moindres carrés . . . . .	417
5.12.3	Bobines en réseau : combinaison des images . . . . .	419
5.12.4	Détermination expérimentale des profils de sensibilité et de la matrice de covariance . . . . .	420
5.12.5	SENSE . . . . .	421
5.12.6	PILS . . . . .	427
5.12.7	Méthodes travaillant dans l'espace réciproque . . . . .	428
5.12.8	Utilisation des méthodes d'imagerie parallèle . . . . .	438
	Références bibliographiques . . . . .	440
	Exercices . . . . .	446
<b>6</b>	<b>Spectroscopie Localisée</b> . . . . .	<b>451</b>
6.1	Introduction . . . . .	452
6.2	Principaux noyaux cibles de la spectroscopie localisée . . . . .	453
6.2.1	Phosphore 31 . . . . .	453
6.2.2	Hydrogène . . . . .	455
6.2.3	Carbone 13 . . . . .	457
6.3	Rapport signal sur bruit et résolution spatiale . . . . .	457
6.4	Largeur de bande et résolution fréquentielle . . . . .	458

6.5	La technique la plus simple : sélection de volume à l'aide de bobines de surface . . . . .	459
6.5.1	Excitation en champ rf homogène. Bobines de surface utilisées en réception . . . . .	460
6.5.2	Bobines de surface utilisées en émission et en réception . . . . .	461
6.6	Méthodes basées sur une excitation sélective en présence de gradient . . . . .	464
6.6.1	ISIS . . . . .	464
6.6.2	Excitation directe des spins intérieurs au volume d'intérêt . . . . .	469
6.6.3	Destruction de l'aimantation à l'extérieur du volume sensible . . . . .	475
6.6.4	Erreur de position associée au déplacement chimique . . . . .	478
6.7	Imagerie spectroscopique . . . . .	480
6.7.1	Principe . . . . .	480
6.7.2	Séquences produisant un écho . . . . .	482
6.7.3	Présentation des images spectroscopiques . . . . .	483
6.7.4	Conséquences de la faible résolution spatiale en imagerie spectroscopique . . . . .	485
6.7.5	Position de la grille spectroscopique . . . . .	489
6.7.6	Imagerie spectroscopique rapide . . . . .	490
6.7.7	Autres méthode utilisant un codage de phase . . . . .	496
6.8	Particularités de la spectroscopie du proton . . . . .	498
6.8.1	Suppression du signal de l'eau . . . . .	498
6.8.2	Suppression du signal des lipides . . . . .	500
6.8.3	Spectroscopie à temps d'écho court . . . . .	500
6.9	Conclusion . . . . .	502
	Références bibliographiques . . . . .	502
	Exercices . . . . .	506
	<b>Appendice : Propriétés de la Transformation de Fourier</b>	<b>509</b>
	<b>Index</b>	<b>515</b>