



OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/> 26497

**To cite this version:**

Paumier, Romain . *Evaluation post mortem de l'encephale de dromadaire (Camelus Dromedarius) par imagerie par résonance magnétique*. Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse – ENVT, 2020, 134 p.

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# EVALUATION POST MORTEM DE L'ENCEPHALE DE DROMADAIRE (*CAMELUS DROMEDARIUS*) PAR IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE

---

THESE  
pour obtenir le grade de  
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement  
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

*par*

**Romain PAUMIER**

Né, le 03 Janvier 1995 à Saint-Martin-d'Hères (38)

---

**Directeur de thèse : M. Giovanni MOGICATO**

---

## JURY

PRESIDENT :  
**Mme Isabelle BERRY**

Professeure à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :  
**M. Giovanni MOGICATO**  
**Mme Alexandra DEVIERS**

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE  
Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE



**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation ECOLE  
NATIONALE VÉTÉRINAIRE DE TOULOUSE**

**Directeur**: Professeur Pierre SANS

**PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE**

- M. BERTAGNOLI Stéphane, *Pathologie infectieuse*
- M. BOUSQUET-MELOU Alain, *Pharmacologie - Thérapeutique*
- Mme CHASTANT-MAILLARD Sylvie, *Pathologie de la Reproduction*
- Mme CLAUW Martine, *Pharmacie-Toxicologie*
- M. CONCORDET Didier, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
- M DELVERDIER Maxence, *Anatomie Pathologique*
- M. ENJALBERT Francis, *Alimentation*
- Mme GAYRARD-TROY Véronique, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
- M. PETIT Claude, *Pharmacie et Toxicologie*
- M. SCHELCHER François, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*

**PROFESSEURS 1° CLASSE**

- M. BAILLY Jean-Denis, *Hygiène et Industrie des aliments*
- M. BERTHELOT Xavier, *Pathologie de la Reproduction*
- Mme BOURGES-ABELLA Nathalie, *Histologie, Anatomie pathologique*
- M. BRUGERE Hubert, *Hygiène et Industrie des aliments d'Origine animale*
- Mme CADIERGUES Marie-Christine, *Dermatologie Vétérinaire*
- M. DUCOS Alain, *Zootchnie*
- M. FOUCRAS Gilles, *Pathologie des ruminants*
- M GUERIN Jean-Luc, *Aviculture et pathologie aviaire*
- Mme HAGEN-PICARD, Nicole, *Pathologie de la reproduction*
- M. JACQUIET Philippe, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- M. LEFEBVRE Hervé, *Physiologie et Thérapeutique*
- M. MEYER Gilles, *Pathologie des ruminants*
- Mme TRUMEL Catherine, *Biologie Médicale Animale et Comparée*

**PROFESSEURS 2° CLASSE**

- Mme BOULLIER Séverine, *Immunologie générale et médicale*
- Mme DIQUELOU Armelle, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
- M. GUERRE Philippe, *Pharmacie et Toxicologie*
- Mme LACROUX Caroline, *Anatomie Pathologique, animaux d'élevage*
- Mme LETRON-RAYMOND Isabelle, *Anatomie pathologique*
- M. MAILLARD Renaud, *Pathologie des Ruminants*
- M. MOGICATO Giovanni, *Anatomie, Imagerie médicale*
- M. RABOISSON Didier, *Productions animales (ruminants)*

**PROFESSEURS CERTIFIÉS DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE**

- Mme MICHAUD Françoise, *Professeur d'Anglais*
- M SEVERAC Benoît, *Professeur d'Anglais*

**MAÎTRES DE CONFÉRENCES HORS CLASSE**

- M. BERGONIER Dominique, *Pathologie de la Reproduction*

Mme **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*  
M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*  
M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*  
M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*  
Mme **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation*  
Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*  
M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et Infectiologie*

#### **MAITRES DE CONFERENCES (classe normale)**

M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*  
Mme **BENNIS-BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*  
Mme **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*  
Mme **BOUHSIRA Emilie**, *Parasitologie, maladies parasitaires*  
M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*  
M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*  
Mme **DANIELS Hélène**, *Immunologie- Bactériologie-Pathologie infectieuse*  
Mme **DAVID Laure**, *Hygiène et Industrie des aliments*  
Mme **DEVIERS Alexandra**, *Anatomie-Imagerie*  
M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie vétérinaire et comparée*  
Mme **FERRAN Aude**, *Physiologie*  
Mme **GRANAT Fanny**, *Biologie médicale animale*  
Mme **JOURDAN Géraldine**, *Anesthésie - Analgésie*  
Mme **LALLEMAND Elodie**, *Chirurgie des Equidés*  
Mme **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*  
M. **LE LOC'H Guillaume**, *Médecine zoologique et santé de la faune sauvage*  
M. **LHERMIE Guillaume**, *Economie de la santé animale*  
M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*  
Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie Chirurgicale*  
Mme **MILA Hanna**, *Elevage des carnivores domestiques*  
M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*  
Mme **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*  
Mme **PAUL Mathilde**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles et porcins*  
M. **VERGNE Timothée**, *Santé publique vétérinaire – Maladies animales réglementées*  
Mme **WASET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*

#### **ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT CONTRACTUELS**

M. **DIDIMO IMAZAKI Pedro**, *Hygiène et Industrie des aliments*  
M. **LEYNAUD Vincent**, *Médecine interne*  
Mme **ROBIN Marie-Claire**, *Ophthalmologie*  
Mme **ROMANOS Lola**, *Pathologie des ruminants*

#### **ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS**

Mme **BLONDEL Margaux**, *Chirurgie des animaux de compagnie*  
M. **CARTIAUX Benjamin**, *Anatomie-Imagerie médicale*  
M. **COMBARROS-GARCIA Daniel**, *Dermatologie vétérinaire*  
M. **GAIDE Nicolas**, *Histologie, Anatomie Pathologique*  
M. **JOUSSERAND Nicolas**, *Médecine interne des animaux de compagnie*  
M. **LESUEUR Jérémy**, *Gestion de la santé des ruminants – Médecine collective de précision*  
M. **TOUITOU Florian**, *Alimentation animale*

# **REMERCIEMENTS**

## **AUX MEMBRES DU JURY**

### **A Madame Le Professeur Isabelle BERRY**

Professeur des Universités Paul Sabatier de Toulouse,  
Praticien hospitalier,  
Biophysique, Imagerie Médicale

De m'avoir fait l'honneur d'accepter le rôle de présidente de ce jury de thèse,  
*Hommages respectueux.*

### **A Monsieur le Professeur Giovanni MOGICATO**

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,  
Anatomie, Imagerie Médicale

De m'avoir fait l'honneur d'encadrer et de diriger ces travaux de thèse,  
De m'avoir soutenu tout au long de ces années,  
Pour sa générosité, sa bienveillance et son aide à tous égards,  
*Avec mes remerciements sincères.*

### **A Madame le Docteur Alexandra DEVIERS**

Maître de conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,  
Anatomie, Imagerie Médicale

Qui a accepté de faire partie de mon jury de thèse,  
*Sincères remerciements.*



## **TABLES DES MATIERES**

Tables des figures .....	12
Liste des abréviations .....	14
Introduction.....	15
Partie 1 : Principes de fonctionnement de l'IRM .....	17
I- HISTORIQUE.....	17
II- NOTIONS ELEMENTAIRES DE RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE .....	18
1. LE SPIN NUCLAIRE.....	18
2. PHENOMENE DE RESONANCE MAGNETIQUE .....	19
2.1. Modèle classique du phénomène de résonance magnétique .....	20
2.1.1. Champ magnétique principal $B_0$ : vecteur d'aimantation macroscopique $M$ à l'équilibre.....	20
2.1.2. Champ magnétique tournant $B_1$ ou onde RF: perturbation de l'état d'équilibre .....	22
2.2. Modèle quantique du phénomène de résonance magnétique .....	24
3. Le phénomènes de relaxation .....	27
3.1. La relaxation longitudinale ou $T_1$ = relaxation spin-réseau .....	27
3.2. La relaxation transversale ou $T_2$ = relaxation spin-spin .....	29
3.3. Signal FID et notion de $T_2^*$ .....	31
3.4. Mesure du signal RMN .....	31
III- INSTRUMENTATION DE L'IRM .....	32
1. L'aimant.....	32
2. Les bobines de gradient .....	33
3. Chaîne radiofréquence .....	35
4. Le système informatique.....	36
5. Salle d'examen et cage de Faraday .....	36
IV. Les différents paramètres caractérisant les multiples séquences IRM ainsi que leur modulation .....	36
1. La séquence de base et les paramètres fondamentaux.....	37
1.1. Séquence d'écho de spin.....	37
1.2. Définition des paramètres fondamentaux issus de la séquence de base .....	39
1.2.1. Temps d'écho (TE) .....	39
1.2.2. Temps de répétition (TR).....	39
1.2.3. Angle de bascule (flip angle).....	40
1.2.4. Temps d'inversion (TI) .....	40
2. Pondération en $T_1$ et $T_2$ .....	40
2.1. Temps de répétition (TR) et pondération en $T_1$ .....	40

2.1.1.	Temps de répétition long .....	41
2.1.2.	Temps de répétition court.....	41
2.2.	Temps d'écho (TE) et pondération en T2 .....	42
2.2.1.	Temps d'écho court.....	42
2.2.2.	Temps d'écho long .....	43
2.3.	Séquence densité de proton .....	43
2.4.	Résumé des paramètres à utiliser pour une pondération en T1 et T2 .....	44
3.	Quelques exemples d'autres séquences couramment utilisées.....	45
3.1.	Variations de l'angle de bascule et caractérisation d'une séquence : exemple de l'écho de gradient .....	45
3.2.	Variations du TI : exemple des séquences FLAIR et STIR .....	46
3.2.1.	Caractéristiques de la séquence FLAIR (Fluid Attenuated Inversion Recovery)....	47
3.2.2.	Caractéristiques de la séquence STIR (Short Time Inversion Recovery) .....	47
V.	Interprétations de l'image obtenue par résonance magnétique.....	47
1.	Aspect des tissus en pondération T1.....	48
2.	Aspect des tissus en pondération T2.....	48
3.	Cas particulier de la séquence T2* .....	49
4.	Aspect des tissus avec la séquence FLAIR .....	49
5.	Aspect des tissus avec la séquence STIR .....	49
6.	Utilisation de produit de contraste .....	50
6.1.	Agents de contraste paramagnétiques .....	50
6.2.	Agents de contraste super-paramagnétiques.....	50
VI.	Qualité de l'image et les artefacts en IRM .....	51
1.	Critères de qualité de l'image .....	51
1.1.	Le rapport signal sur bruit .....	51
1.1.1.	Définitions .....	51
1.1.2.	Facteurs modifiants le rapport signal sur bruit.....	52
1.1.2.1.	Facteurs non modifiables .....	52
1.1.2.2.	Facteur modifiable (lors du choix de la machine IRM).....	53
1.1.2.3.	Facteur modifiable (lors des réglages de la séquence) .....	53
1.2.	Le contraste .....	54
1.3.	La résolution spatiale .....	54
2.	Les artefacts .....	55
2.1.	Artéfact de susceptibilité magnétique .....	56
2.1.1.	Origine .....	56
2.1.2.	Méthodes de correction et d'atténuation.....	56

2.1.3.	Intérêt diagnostique de cet artefact.....	57
2.2.	Artefact métallique.....	57
2.3.	Artefact de repliement ou d'aliasing.....	57
2.4.	Artefact de mouvement ou « image fantôme ».....	58
2.4.1.	Origine .....	58
2.4.2.	Méthodes de correction et d'atténuation.....	59
2.5.	Artefact de troncature.....	59
2.6.	Artefacts de volume partiel.....	60
2.7.	Artefact de déplacement chimique.....	61
2.8.	Phénomène d'excitation croisée .....	62
2.9.	Le phénomène de l'angle magique .....	62
VII.	Avantages et inconvénients de l'IRM haute résolution 3 Tesla .....	63
1.	Particularités de l'image obtenue et de sa formation.....	63
2.	Utilisation particulière.....	66
VIII.	Imagerie de référence pour l'exploration du système nerveux.....	68
<b>PARTIE 2 : LE DROMADAIRE ET SON IMPORTANCE EN AFRIQUE .....</b>		<b>69</b>
I-	Généralités .....	69
1.	Taxonomie.....	69
2.	Effectifs camélins.....	70
2.1.	Distribution dans le monde .....	70
2.2.	Effectifs dans le monde .....	70
2.3.	Densité des dromadaires.....	72
2.3.1.	Densité très faible.....	73
2.3.2.	Densité faible.....	73
2.3.3.	Densité moyenne.....	73
2.3.4.	Densité forte.....	73
3.	Le dromadaire dans son milieu naturel.....	74
4.	Morphologie fonctionnelle du dromadaire.....	74
5.	Particularités de l'anatomie du dromadaire .....	75
6.	Une physiologie générale adaptée au milieu de vie .....	75
6.1.	Adaptation à la chaleur du milieu de vie.....	76
6.2.	Adaptation à la sous-alimentation des zones désertiques.....	77
6.3.	Physiologie de la reproduction.....	78
II-	IMPORTANCE DU DROMADAIRE ET SYSTEMES DE PRODUCTION .....	79
1.	Importance socio-économique du dromadaire .....	79
2.	Importance écologique du dromadaire.....	81

3.	Modes et systèmes d'élevage des dromadaires .....	81
3.1.	Systèmes migratoires .....	83
3.1.1.	Nomadisme .....	83
3.1.2.	Transhumance .....	83
3.2.	Systèmes sédentaires .....	84
4.	Etude des filières et leur évolution .....	85
4.1.	Performances reproductives .....	85
4.2.	Filière laitière.....	86
4.2.1.	La production laitière .....	86
4.2.2.	Caractéristiques du lait de chamelle .....	87
4.3.	Filière viande .....	88
4.3.1.	Production de viande .....	88
4.3.2.	Comprendre la croissance du dromadaire .....	89
4.4.	Potentiel émergeant à la course .....	89
5.	Les races de dromadaires.....	90
5.1.	La notion de race en élevage.....	90
5.2.	La caractérisation phénotypique.....	91
5.2.1.	Caractérisation primaire.....	91
5.2.2.	Caractérisation avancée .....	91
5.3.	Sélection chez le dromadaire .....	91
5.4.	Classification des dromadaires selon leur production .....	92
5.4.1.	Dromadaires de type lait .....	92
5.4.2.	Dromadaires de type viande .....	93
5.4.3.	Dromadaires de type mixte .....	93
III-	Apparition de maladie à prions chez le dromadaire .....	94
1.	Mise en évidence de la maladie .....	94
2.	Des signes cliniques caractéristiques .....	94
3.	Caractéristiques histologiques et immunohistochimique de l'ESD.....	95
4.	Implications et conséquences de la découverte de l'ESD .....	96
5.	Les potentielles différentes origines de cette ESD.....	96
6.	L'orientation des recherches sur l'ESD.....	97
	Conclusion partielle : importance de l'IRM et de la réalisation d'un atlas chez le dromadaire .....	98
	<b>Partie 3 : Etude expérimentale : Réalisation d'un atlas d'IRM haut champ 3 tesla de l'encéphale de dromadaire en pondération T2 .....</b>	<b>100</b>
I.	Objectifs de cet atlas .....	100
II.	Matériel et méthode : Acquisition des images .....	101

1. Les dromadaires .....	101
2. Réalisation des images IRM.....	101
3. Lecture des images IRM et validation du caractère sain de l'encéphale .....	102
4. Légendes.....	102
5. Résultats .....	103
5.1. Images pilotes.....	103
5.2. Coupes dans le plan dorsal.....	104
5.3. Coupes dans le plan transversal .....	108
5.4. Coupe dans le plan sagittal.....	114
III. Discussion .....	116
Conclusion.....	119
ANNEXES .....	120
Bibliographie.....	125

# Tables des figures

<b>Figure 1:</b> Moment magnétique et vecteur d'aimantation microscopique $\mu$ (2).....	18
<b>Figure 2:</b> Moment magnétique élémentaire (2) .....	19
<b>Figure 3:</b> Effet de l'application d'un champs magnétique externe $B_0$ (3).....	20
<b>Figure 4:</b> Mouvement de double cône d'un proton soumis au champ magnétique externe $B_0$ (3) .....	21
<b>Figure 5:</b> Notion de composante longitudinale $M_z$ et de composante transversale $M_{xy}$ du vecteur d'aimantation macroscopique $M$ (3).....	22
<b>Figure 6:</b> Mouvement de double précession du vecteur d'aimantation macroscopique $M$ (3) .....	23
<b>Figure 7:</b> Effets des impulsions RF sur le vecteur d'aimantation macroscopique $M$ (modèle classique).....	24
<b>Figure 8:</b> Rephasage des spins (3) .....	26
<b>Figure 9:</b> Les différents états des protons placés dans un champs $B_0$ (4).....	26
<b>Figure 10:</b> Courbe exponentielle de l'aimantation longitudinale en fonction du $T_1$ (4) .....	28
<b>Figure 11:</b> Courbe exponentielle de disparition de l'aimantation transversale en fonction du $T_2$ (4).....	30
<b>Figure 12:</b> Schéma d'un IRM à aimant supraconducteur (7) .....	33
<b>Figure 13:</b> Représentation des gradients selon les différents axes (8).....	34
<b>Figure 14:</b> Gradients de champ magnétique de l'IRM (5).....	34
<b>Figure 15:</b> Représentation schématique de différentes antennes (7).....	35
<b>Figure 16(droite):</b> Chronologie du phénomène de l'écho de spin (9) .....	38
<b>Figure 17 (gauche):</b> Evènement lors du phénomène de l'écho de spin (9).....	38
<b>Figure 18:</b> Courbe en $T_2$ "vrai" (9) .....	39
<b>Figure 19:</b> Schéma du TE et TR (1) .....	40
<b>Figure 20:</b> Influence du TR sur la pondération en $T_1$ d'une séquence (10).....	42
<b>Figure 21:</b> Influence du TE sur la pondération $T_2$ d'une séquence (10) .....	43
<b>Figure 22:</b> Exemple de valeurs du $T_1$ et du $T_2$ selon la nature du tissu (5) .....	44
<b>Figure 23:</b> Séquence STIR et FLAIR (1) .....	46
<b>Figure 24:</b> Influence du rapport signal/bruit sur l'image IRM (5) .....	52
<b>Figure 25:</b> Notion de pixel, voxel, matrice, plan de coupe et champ de vue (15).....	55
<b>Figure 26:</b> Exemple artefact de repliement (5).....	58
<b>Figure 27:</b> Mécanisme de l'artefact de troncature (14).....	60
<b>Figure 28:</b> Artefact de déplacement chimique de type I (5).....	61
<b>Figure 29:</b> Artefact de déplacement chimique de type II (5).....	62
<b>Figure 30:</b> Exemple d'images d'imagerie de diffusion (tractographie) chez un patient humain (Wikipedia) .....	66
<b>Figure 31:</b> Taxonomie des Camélidés et place du dromadaire (20) .....	69
<b>Figure 32:</b> Effectifs des camélidés dans le monde (18).....	70
<b>Figure 33:</b> Evolution effectif mondial des Camélidés (18) .....	71
<b>Figure 34:</b> Croissance de la population cameline mondiale (1963-2009) (22) .....	72
<b>Figure 35:</b> Profil de croissance des effectifs camelins en Afrique du Nord (1961-2011) (21) .	72

<b>Figure 36:</b> Morphologie générale du dromadaire (24) .....	74
<b>Figure 37:</b> Paramètres de la reproduction chez le dromadaire (20) .....	78
<b>Figure 38:</b> Croissance de la population mondiale des herbivores domestiques (22).....	80
<b>Figure 39:</b> Evolution des effectifs de la population cameline en Afrique du Nord (21) .....	85
<b>Figure 40:</b> Exemple de race de dromadaire laitier (36) .....	92
<b>Figure 41:</b> Exemple de races de dromadaire à viande (36) .....	93
<b>Figure 42:</b> Exemples de races de dromadaire mixte (36) .....	93
<b>Figure 43:</b> Paramètres de la séquence utilisée pour l'obtention des images de l'atlas .....	102
<b>Figure 44:</b> Coupes pilotes.....	103
<b>Figure 45:</b> Niveau A - Coupe dorsale pondérée en T2 .....	104
<b>Figure 46:</b> Niveau B - Coupe dorsale en pondération T2 .....	105
<b>Figure 47:</b> Niveau C - Coupe dorsale pondérée en T2 .....	106
<b>Figure 48:</b> Niveau D - Coupe dorsale pondérée en T2 .....	107
<b>Figure 49:</b> Niveau E - Coupe transversale en pondération T2 .....	108
<b>Figure 50:</b> Niveau F - Coupe transversale en pondération T2 .....	109
<b>Figure 51:</b> Niveau G - Coupe transversale en pondération T2.....	109
<b>Figure 52:</b> Niveau H - Coupe transversale en pondération T2.....	110
<b>Figure 53:</b> Niveau I - Coupe transversale en pondération T2 .....	110
<b>Figure 54:</b> Niveau J - Coupe transversale en pondération T2 .....	111
<b>Figure 55:</b> Niveau K - Coupe transversale en pondération T2 .....	112
<b>Figure 56:</b> Niveau L - Coupe transversale en pondération T2.....	112
<b>Figure 57:</b> Niveau M - Coupe transversale en pondération T2.....	113
<b>Figure 58:</b> Niveau N - Coupe transversale en pondération T2.....	113
<b>Figure 59:</b> Coupe sagittale dans le plan médian en pondération T2 .....	115

# Liste des abréviations

BHD	Biomasse des Herbivores Domestiques
ESB	Encéphalopathie Spongiforme Bovine
ESD	Encéphalopathie Spongiforme du Dromadaire
EST	Encéphalopathie Spongiforme Transmissible
FID	Free induction decay
FLAIR	Fluid-Attenuated Inversion Recovery
FOV	Champ de vue, « Field of View »
FVO	Farine de viandes et d'os
GMQ	Gain moyen quotidien
GPI	Glycosylphosphatidylinositol
GRE	Echo de gradient
IR	Inversion – récupération
IRM	Imagerie par Résonance Magnétique
LCS	Liquide cérébro-spinal
LH	Hormone lutéotrope
MCJ	Maladie de Creutzfeldt Jacob
MDCC	Maladie de dépérissement chronique des cervidés
PrPc	Protéine prion cellulaire
PrPres	Protéine prion résistante
PrPsc	Protéine prion scrapie
RF	Radio fréquence
RMN	Résonance Magnétique Nucléaire
SE	Echo de Spin
STIR	Short Time Inversion Recovery
T	Tesla
T1	Relaxation longitudinale
T2	Relaxation transversale
TE	Temps d'écho
TI	Temps d'inversion
TR	Temps de répétition
TSE	Echo de Spin rapide
SNC	Système nerveux central

# Introduction

Le dromadaire est l'un des rares animaux domestiques adapté à l'environnement des régions arides. Ses productions (viande, lait et cuir) et son utilisation dans les transports caravaniers ont permis aux populations de ces zones de s'adapter aux contraintes du milieu et de savoir en tirer profit pour y vivre. Ce rôle capital qu'occupe le dromadaire dans ces sociétés a longtemps été négligé par les acteurs politiques, économiques et scientifiques. Même si un intérêt croissant s'est dessiné depuis une trentaine d'années, force est de constater qu'un retard a été pris dans les connaissances sur cette espèce. A l'heure de l'intensification des élevages de dromadaires pour la production de viande, de lait et d'animaux de course les intérêts économiques et sociaux ne sont plus à démontrer et nécessitent des connaissances toujours plus pointues. Sur certains points le dromadaire peut être rapproché des ruminants (vaches, chèvres), tandis que sur d'autres il est comparable au cheval.

L'imagerie médicale ne cesse de progresser de façon spectaculaire depuis quelques décennies chez l'Homme et parallèlement chez l'animal. À l'avènement de la radiographie, puis de l'échographie, a succédé celui du scanner et de l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM). Cette technique d'imagerie de pointe a considérablement fait évoluer l'investigation des lésions locomotrices et notamment cérébrales. Ainsi, l'IRM n'est plus, de nos jours, en médecine des petits animaux de compagnie et en équine, un examen complémentaire exceptionnel.

L'encéphale du dromadaire désigne l'ensemble du système nerveux contenu dans la boîte crânienne. Il comprend le cerveau, le cervelet et le tronc cérébral. L'IRM constitue l'examen de choix pour évaluer une lésion neurologique ayant pour siège l'encéphale. En effet, il s'agit du seul examen permettant de différencier la substance blanche de la substance grise, et de localiser avec précision les tissus impliqués dans une affection cérébrale. Si l'on compare avec le cheval il serait possible de diagnostiquer des encéphalites, des malformations congénitales, ou encore des masses tumorales intracrâniennes notamment chez les dromadaires ayant beaucoup de valeur, c'est-à-dire ceux destinés à la course.

Néanmoins, l'utilisation de l'IRM en médecine des camélidés présuppose une bonne connaissance des images IRM de l'encéphale sain. Or, ce sujet est peu documenté dans la littérature scientifique (Arencibia et al. 2004 et 2005 ; Abedellaah et al. de 2015) surtout avec un IRM haut champ.

L'objectif de cette thèse est de réaliser un atlas d'images IRM d'encéphale de dromadaire, afin de faciliter l'interprétation des images d'examens et pour avoir une référence d'images pour les études futures.

Dans une première partie, nous définirons les principes fondamentaux de l'IRM afin de comprendre l'origine des images obtenues, la signification des séquences utilisées et l'intérêt d'utiliser des machines de plus en plus puissantes. Puis dans une seconde partie, nous nous intéresserons à présenter cet animal peu connu qu'est le dromadaire et à montrer son importance économique et sociale en Afrique et Asie ainsi que l'apport de l'IRM chez les camélidés à travers l'exemple d'une pathologie nerveuse émergente chez le dromadaire. Une troisième partie sera consacrée à la présentation d'un atlas d'images IRM haut champ d'encéphale de dromadaire obtenues au plateau technique IRM de l'UMR 1214 ToNIC basé au Centre Hospitalier Universitaire de Purpan (pavillon Baudot).

# Partie 1 : Principes de fonctionnement de l'IRM

L'imagerie à résonance magnétique est une technique diagnostic d'acquisition d'image qui est complexe et qui nécessite des connaissances théoriques relativement poussées pour comprendre les images obtenues.

L'IRM utilise un champ magnétique intense pour établir des images sectionnelles de l'organisme placé dans ce dernier, qui assemblées, donnent une image tridimensionnelle. Son principe physique repose sur l'analyse des propriétés électromagnétiques des noyaux d'hydrogène (protons), éléments extrêmement abondants dans l'organisme notamment sous forme de molécules d'eau et dont la densité varie avec le type de tissu.

Dans cette partie nous détaillerons les principes physiques qui sont à la base de l'acquisition des images de l'IRM. Cependant, des spécialistes sont spécifiquement formés pour assister le praticien dans la lecture des images.

## I- HISTORIQUE

La résonance magnétique nucléaire (RMN) est une technique en développement depuis une cinquantaine d'années. Le phénomène physique a été conceptualisé en 1946 par Bloch et Purcell, prix Nobel de physique en 1952. Puis, au court des années 70, Paul Christian Lauterbur a acquis pour la première fois une image provenant d'un appareil IRM. Les nombreux intérêts présentés par ce nouvel outil l'inciteront à le développer avec l'aide de son collègue Peter Mansfield. Ces travaux de perfectionnement aboutiront à deux prix Nobel et à la démocratisation des premières machines IRM pour la médecine humaine à compter du début des années 80. De nos jours et après trente ans d'évolution, l'IRM est devenue l'une des techniques majeures de l'imagerie médicale moderne, potentiellement appelée à des développements importants. (1)

## II- NOTIONS ELEMENTAIRES DE RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE

### 1. LE SPIN NUCLEAIRE (2,3)

Tout atome est composé d'un nuage électronique et d'un noyau constitué de nucléons. Ces derniers c'est-à-dire les protons et les neutrons, sont animés d'un mouvement individuel de rotation autour d'un axe passant par leur centre. Une particule qui tourne engendre un moment cinétique autour d'elle (aussi appelé "spin" signifiant "tourner sur soi-même" en anglais), aligné sur son axe de rotation et représenté par le vecteur  $\vec{S}$ . De même une charge qui tourne engendre un champ magnétique qui est lié au moment cinétique, et également aligné sur son axe de rotation. Ce champ magnétique est appelé moment magnétique et est représenté par un vecteur d'aimantation microscopique  $\vec{\mu}$ . (Figure 1)

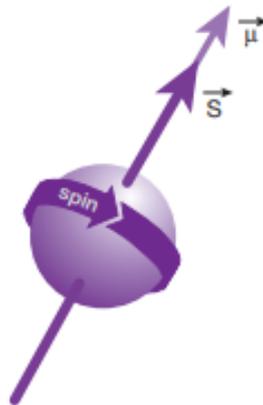


Figure 1: Moment magnétique et vecteur d'aimantation microscopique  $\vec{\mu}$  (2)

Le neutron possède aussi un moment magnétique bien qu'il soit électriquement neutre. Cela s'explique par le fait que les nucléons sont constitués de trois quarks qui sont des sous-molécules positives ou négatives en rotation mais dont les charges électriques ne sont pas équivalentes. La répartition en quarks positifs ou négatifs détermine le moment magnétique global du nucléon (celui du neutron représente environ 2/3 de celui du proton), et induit une résultante de charges électriques positive pour le proton, nulle pour le neutron. Le nucléon est alors semblable à un dipôle magnétique, autrement dit à un petit aimant avec un pôle positif et un pôle négatif, animé d'un mouvement de rotation.

Au cœur du noyau de l'atome, les nucléons sont répartis sur différentes couches d'énergie. Sur ces couches les protons s'apparient tels des aimants et leurs moments magnétiques s'annulent deux par deux, dans le but de maintenir un niveau d'énergie nucléaire peu élevé et le plus stable possible. Il en est de même pour les neutrons. De ce fait, seuls les atomes avec un nombre impair de nucléons possèdent un moment magnétique global qu'on qualifie d'intrinsèque ou élémentaire. (Figure 2)

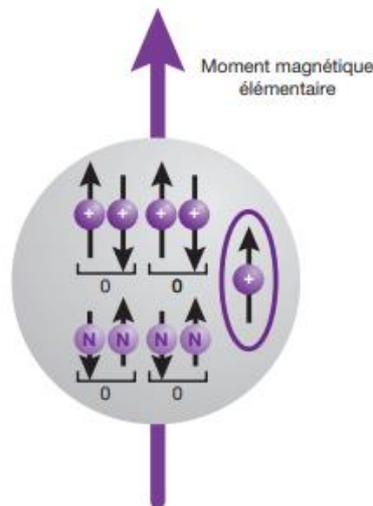


Figure 2: Moment magnétique élémentaire (2)

De ce fait, les principaux noyaux d'intérêt biologique possédant des propriétés magnétiques sont ceux de l'atome d'hydrogène ( $^1\text{H}$ ), de l'isotope du carbone ( $^{13}\text{C}$ ), du fluor ( $^{19}\text{F}$ ), du phosphore ( $^{31}\text{P}$ ) et du sodium ( $^{23}\text{Na}$ ). Seul le noyau d'hydrogène joue un rôle important en imagerie médicale car il représente les deux tiers des atomes de l'organisme et il possède un moment magnétique intrinsèque élevé donnant lieu à un phénomène de résonance très net.

## 2. PHENOMENE DE RESONANCE MAGNETIQUE (3)

Les protons d'un prélèvement tissulaire, de vecteur d'aimantation microscopique  $\vec{\mu}$ , sont orientés dans toutes les directions de l'espace de façon aléatoire lorsque qu'aucun champ magnétique externe n'est exercé. Le vecteur d'aimantation macroscopique  $\vec{M}$  correspondant à la somme des vecteurs d'aimantation microscopique ( $\sum \vec{\mu}$ ), il est donc nul.

La résonance magnétique nucléaire (RMN) consiste à étudier les modifications d'aimantation des noyaux d'un élément (organisme, substance, échantillon) sous l'action de deux champs magnétiques :

- $B_0$  : champ magnétique statique fixe élevé
- $B_1$  : champ électromagnétique tournant = onde électromagnétique ou de radiofréquence (onde RF)

## 2.1. Modèle classique du phénomène de résonance magnétique

### 2.1.1. Champ magnétique principal $\vec{B}_0$ : vecteur d'aimantation macroscopique $\vec{M}$ à l'équilibre

Lorsque les protons sont placés dans un champ magnétique externe  $\vec{B}_0$  ils s'orientent selon la direction de ce dernier. Ils peuvent soit être dans le même sens que le champ, ce sens est dit parallèle ou de niveau de basse énergie E1, soit être dans le sens contraire, ce sens est dit antiparallèle ou de niveau de haute énergie E2. Les protons parallèles à  $\vec{B}_0$  sont plus nombreux que les protons antiparallèles. Cette petite différence est liée à la température et surtout à la force du champ magnétique. En effet, à température corporelle dans un champ de 0,5 Tesla, cette différence est de 2 par million (500002 protons parallèles et 500000 protons antiparallèles). Cette différence suffit à produire un signal RMN à l'échelle tissulaire et être à l'origine de l'apparition d'un vecteur d'aimantation macroscopique  $\vec{M}$ . (Figure 3)

NB : Par convention  $\vec{B}_0$  correspond à l'axe vertical Oz du système de référence orthonormé

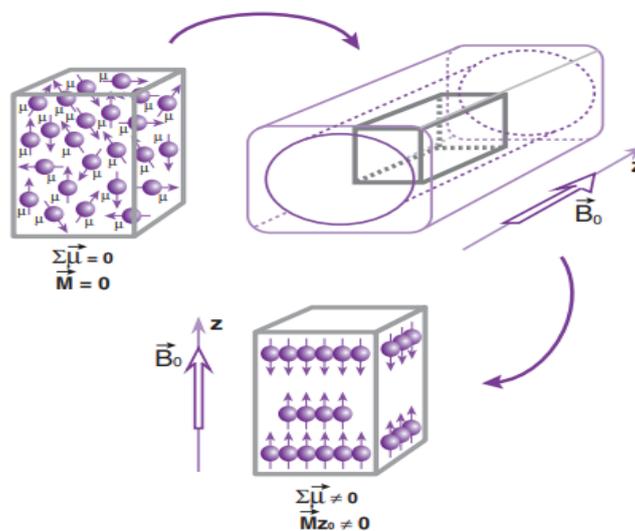


Figure 3: Effet de l'application d'un champs magnétique externe  $\vec{B}_0$  (3)

Les protons ne sont pas réellement alignés selon  $\vec{B}_0$ , mais ils décrivent un double cône autour de l'axe  $\vec{B}_0$  : c'est le mouvement de précession (Figure 4). La vitesse de précession est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique. On la caractérise par la fréquence angulaire de précession (ou fréquence angulaire de Larmor), soit par le nombre de rotation par seconde :

$\omega_0 = \gamma B_0$ , équation de Larmor, avec  $\gamma$  le rapport gyromagnétique spécifique à chaque noyau.

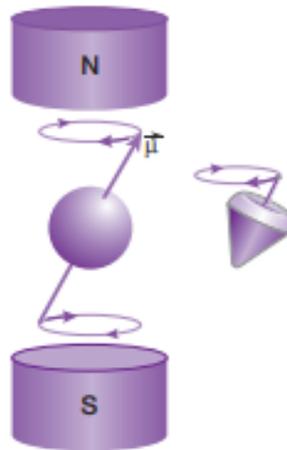


Figure 4: Mouvement de double cône d'un proton soumis au champ magnétique externe  $\vec{B}_0$  (3)

Le moment magnétique d'un proton peut être décomposé en une composante transversale et une composante longitudinale. Le mouvement de précession se traduit ainsi par une rotation de la composante transversale autour de l'axe longitudinal.

Lorsqu'on considère un groupe de spins, il y a une aimantation longitudinale résultante (notée  $\vec{M}_{z0}$ ) dans la même direction et le même sens que  $\vec{B}_0$ , mais les mouvements de précession des spins ne sont pas en phase : les composantes transversales de chaque proton s'annulent et il n'y a donc pas d'aimantation transversale résultante dans le plan xOy ( $\vec{M}_{xy}=0$ )(Figure 5).

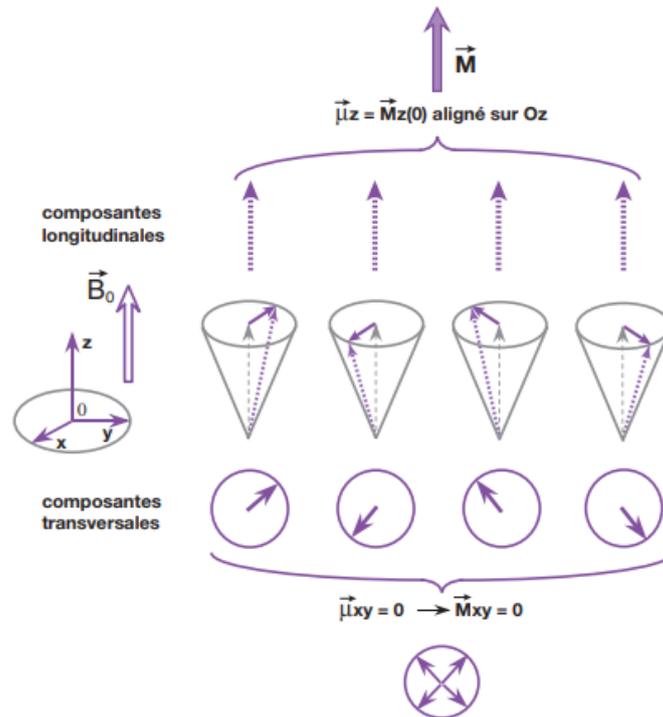


Figure 5: Notion de composante longitudinale  $\vec{M}_z$  et de composante transversale  $\vec{M}_{xy}$  du vecteur d'aimantation macroscopique  $\vec{M}$  (3)

$\vec{M}$  n'est pas mesurable directement à l'équilibre (selon Oz) car il est très petit par rapport à  $B_0$ . Pour pouvoir le mesurer, il faut le basculer dans le plan xOy (hors de sa position d'équilibre), grâce à un deuxième champ magnétique, soit l'onde de radiofréquence (RF).

### 2.1.2. Champ magnétique tournant $\vec{B}_1$ ou onde RF: perturbation de l'état d'équilibre

Nous venons de décrire un état d'équilibre, mais ce dernier peut être perturbé par l'apport d'énergie d'un champ magnétique tournant  $\vec{B}_1$ , appliqué selon Ox dans le plan xOy. Pour qu'il y ait transfert d'énergie, il faut que la fréquence de rotation  $\omega_r$  du champ magnétique tournant soit égale à la fréquence de Larmor  $\omega_0$ , spécifique des protons dans le champ  $\vec{B}_0$ : on dit que les deux systèmes sont en résonances. Le phénomène de résonance entre deux systèmes est commun, on peut citer deux exemples: dans le domaine mécanique, des rafales de vent peuvent entraîner des oscillations de torsion d'un pont suspendu entraînant sa rupture (Pont de Tacoma le 7 novembre 1940); dans le domaine acoustique, des sons de fréquence adaptée peuvent entraîner la vibration d'un verre de cristal jusqu'à sa rupture.

Le vecteur macroscopique  $\vec{M}$ , tout en continuant à précesser autour de  $\vec{B}_0$  (Oz) à la fréquence angulaire  $\omega_0 = \gamma B_0$ , va aussi se mettre à précesser autour de  $\vec{B}_1$  (Ox) à la fréquence angulaire  $\omega_1 = \gamma B_1$ . Lors de ce mouvement de double précession, il y a diminution de la composante longitudinale  $\vec{M}_z$  de l'aimantation et augmentation de la composante transversale  $\vec{M}_{xy}$ . (Figure 6)

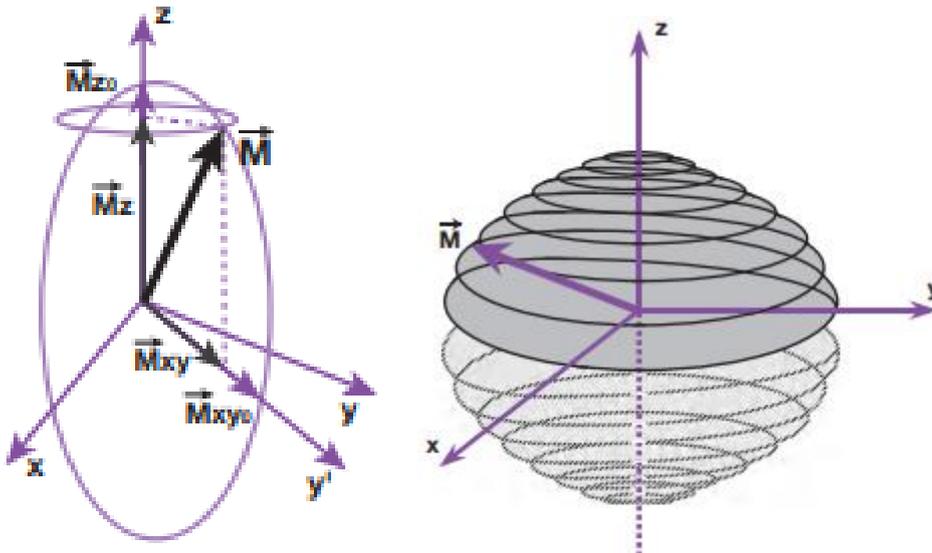


Figure 6: Mouvement de double précession du vecteur d'aimantation macroscopique  $\vec{M}$  (3)

En pratique, le champ magnétique  $\vec{B}_1$  ou onde RF n'est appliqué que pendant des lapses de temps très courts, de l'ordre de quelques millisecondes : on parle d'excitation de RF ou d'impulsion de RF. La valeur de l'angle de basculement  $\theta$  est fonction de la durée de l'impulsion de RF et de l'intensité de  $\vec{B}_1$ . On utilise généralement des impulsions de  $90^\circ$  ou  $180^\circ$ . Une impulsion de  $90^\circ$  fait basculer  $\vec{M}$  dans le plan xOy (Figure 7(a)). Tandis qu'une impulsion de  $180^\circ$  provoque une inversion de  $\vec{M}$  (Figure 7(b)).

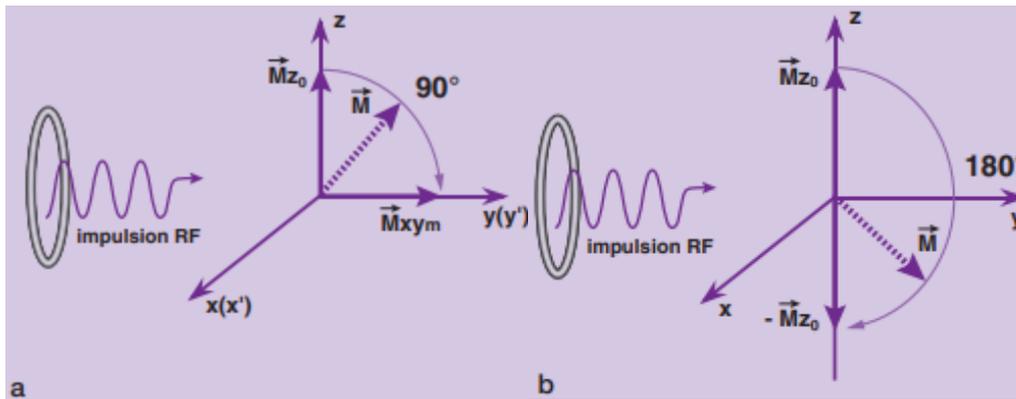


Figure 7: Effets des impulsions RF sur le vecteur d'aimantation macroscopique  $\vec{M}$  (modèle classique)

Lorsque l'émission de radiofréquence est interrompue, soit à la fin de l'impulsion, le vecteur  $\vec{M}$  va retourner à l'état d'équilibre avec une diminution rapide de la composante transversale  $M_{xy}$  et une repousse progressive de la composante longitudinale  $M_z$  : ce sont les phénomènes de relaxation. Ces deux phénomènes de relaxation font intervenir des mécanismes différents (détaillés par la suite).

## 2.2. Modèle quantique du phénomène de résonance magnétique

Précédemment nous avons vu que lorsqu'un proton est placé dans un champ magnétique  $\vec{B}_0$ , son moment cinétique s'oriente uniquement de deux manières qui correspondent en fait à deux niveaux d'énergie :

- Dans le sens  $B_0$  : état parallèle, aussi dit « up » qui correspond au niveau de basse énergie  $E_1$ . Il s'agit du niveau fondamental, de meilleure stabilité, avec  $E_1 = -\gamma h B_0 / 4\pi$
- Dans le sens contraire de  $B_0$  : état antiparallèle, aussi dit « down » qui correspond au niveau de haute énergie  $E_2$ . Il s'agit du niveau excité, de moindre stabilité, avec  $E_2 = \gamma h B_0 / 4\pi$

NB :  $h$  correspond à la constante de Planck

Rappelons que le vecteur d'aimantation macroscopique  $\vec{M}$  est liée à la très légère supériorité numérique des protons parallèles à  $\vec{B}_0$  par rapport aux protons antiparallèles. A

l'équilibre, les protons s'alignent selon  $\vec{B}_0$ , precessant autour de  $\vec{B}_0$  avec un angle donné, faisant apparaître une composante longitudinale  $\vec{M}_z$ , notée  $\vec{M}_{z_0}$  à l'équilibre. A cela s'ajoute la « dispersion » des composantes transversales élémentaires dans différentes directions car les protons sont déphasés : il n'y a pas de composante transversale  $\vec{M}_{xy}$  résultante. Cet état d'équilibre, avec ses deux populations de protons, correspond à un équilibre thermique qui maintient en permanence une transition entre les deux niveaux d'énergie, tout en conservant le même nombre de protons parallèles en excès à champ magnétique constant.

La différence d'énergie entre les deux niveaux est égale à  $\Delta E = E_1 - E_2$ . L'application d'un champ magnétique fournissant une quantité d'énergie exactement égale à  $\Delta E$  permet d'induire des transitions du niveau  $E_1$  vers un niveau  $E_2$  ce qui modifie ainsi l'orientation de  $\vec{M}$ . Une onde électromagnétique possède une énergie  $E$  et cette dernière est proportionnelle à sa fréquence notée  $\nu$  :  $E = h\nu$ . Or pour que  $E = \Delta E$ , on montre que  $\nu$  doit être égal à  $\nu_0$  (ou  $\omega_r = \omega_0$ ). Il y a ainsi une cohérence entre l'approche classique et quantique dans la condition de résonance.

Lorsqu'une impulsion RF est appliquée, il y aura une transition de protons du niveau  $E_1$  c'est-à-dire de basse énergie vers le niveau de haute énergie  $E_2$ . Ainsi lorsque la moitié des protons surnuméraires est passée de  $E_1$  à  $E_2$  le nombre de protons parallèles et antiparallèles sont égaux. Cela entraîne la disparition de la composante longitudinale  $\vec{M}_z = 0$ , ce qui correspond à une impulsion de  $90^\circ$ . Lorsque tous les protons surnuméraires sont passés de  $E_1$  à  $E_2$ , c'est-à-dire qu'ils sont devenus antiparallèles, il y a inversion de la composante longitudinale  $\vec{M} = -\vec{M}_{z_0}$ , ce qui correspond à une impulsion de  $180^\circ$ .

Lorsque les protons changent de niveau d'énergie, c'est-à-dire qu'ils s'orientent en antiparallèles, ils le font en se mettant en phase les uns par rapport aux autres ce qui fait apparaître une composante transversale de l'aimantation : il y a rephasage des spins. (Figure 8)

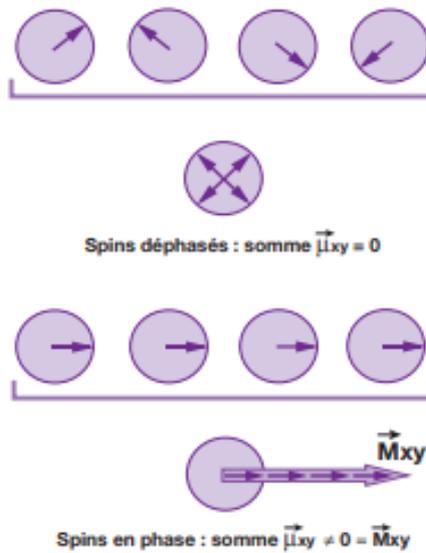


Figure 8: Rephasage des spins (3)

Ainsi, l'impulsion RF, par deux mécanismes bien distincts mais simultanés, va jouer sur la composante longitudinale et la composante transversale de  $\vec{M}$ . A la fin de l'excitation on observe un retour à l'état d'équilibre car il s'agit d'un état instable, il s'agit des phénomènes de relaxation (Figure 9) :

- Déphasage rapide des spins : décroissance rapide de la composante transversale  $\vec{M}_{xy}$  ( $\vec{M}_T$ )
- Transitions progressives inverses de E2 vers E1 : repousse progressive de la composante longitudinale  $\vec{M}_z$  ( $\vec{M}_L$ )

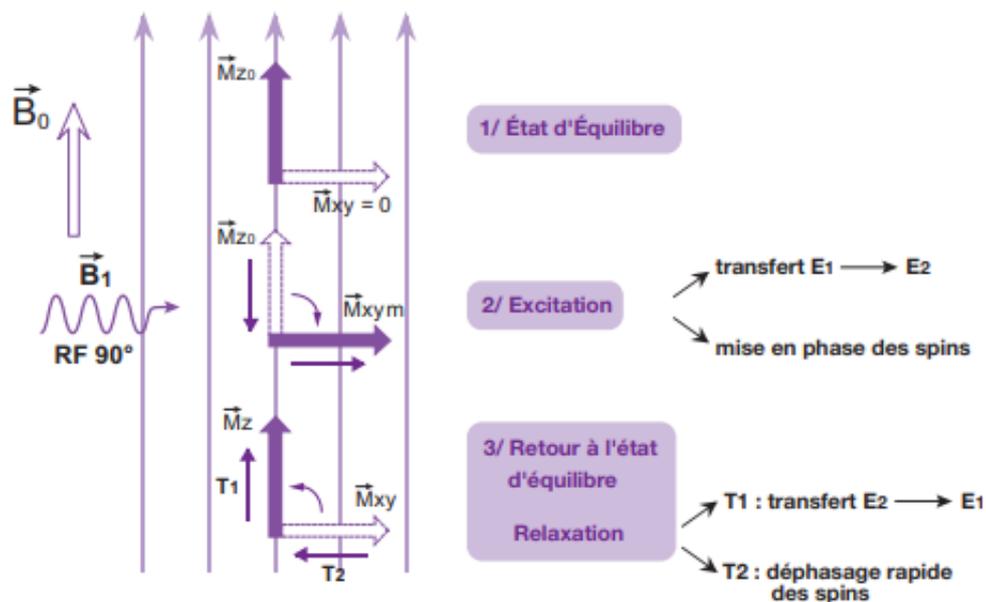


Figure 9: Les différents états des protons placés dans un champs B0 (4)

### 3. Le phénomènes de relaxation (4)

Lorsqu'on arrête d'appliquer l'onde RF, l'aimantation nucléaire retourne à sa position d'équilibre : la repousse progressive de l'aimantation longitudinale ( $\vec{M}_L$ ) correspond à la relaxation T1 et la décroissance rapide de l'aimantation transversale ( $\vec{M}_T$ ) correspond à la relaxation T2.

#### 3.1. La relaxation longitudinale ou T1 = relaxation spin-réseau

L'excitation par impulsion RF de 90° a pour conséquence de faire disparaître la composante longitudinale  $\vec{M}_z$  du vecteur d'aimantation tissulaire  $\vec{M}$  par égalisation des spins sur les deux niveaux d'énergie. Dès l'arrêt de l'impulsion RF, il va y avoir retour à l'état d'équilibre. L'aimantation longitudinale  $\vec{M}_z$  repousse progressivement : c'est la relaxation longitudinale.

On l'appelle également relaxation spin-réseau car ce phénomène s'accompagne, lors du retour des protons du niveau de haute énergie E2 sur le niveau de basse énergie E1, d'une émission d'énergie (restitution de l'énergie absorbée lors de l'excitation) par échange thermique avec le milieu moléculaire environnant, aussi appelé réseau.

Elle est aussi communément appelée relaxation T1 car la repousse de l'aimantation longitudinale se fait selon une exponentielle croissante où la constante de temps T1 (en millisecondes) est caractéristique d'un tissu donné. T1 correspond à 63% de la repousse de la composante longitudinale, c'est-à-dire au temps mis par  $\vec{M}_L$  pour atteindre 63% de sa valeur d'équilibre après l'arrêt d'une impulsion de 90°. La relaxation longitudinale est donc d'autant plus rapide que T1 est court. (Figure 10)

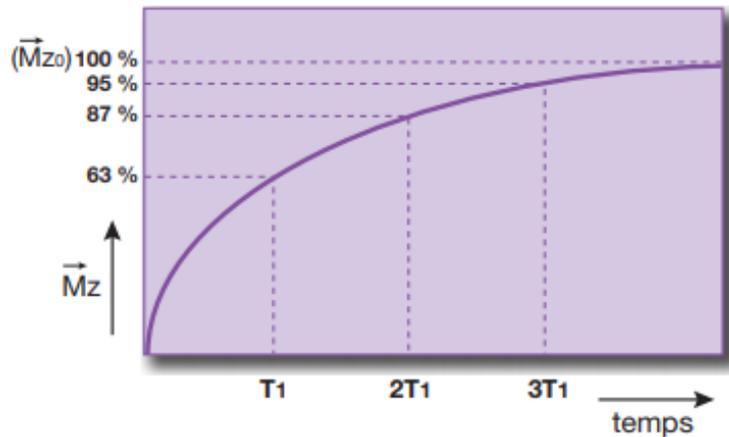


Figure 10: Courbe exponentielle de l'aimantation longitudinale en fonction du T1 (4)

Pour les tissus biologiques, l'ordre de grandeur de T1 est de 500 à 1000 ms. Dans les milieux biologiques, les molécules sont soumises en permanence à des mouvements de collision, translation, rotation (mouvements browniens) caractérisés par la fréquence des collisions moléculaires  $\nu_c$ . Pour que les protons cèdent leur énergie au milieu biologique environnant, c'est-à-dire pour qu'ils restituent au réseau l'énergie absorbée lors de l'excitation, il faut que la fréquence spontanée  $\nu_0$  (fréquence de Larmor) des protons dans le champ  $\vec{B}_0$  soit proche de la fréquence des collisions moléculaires  $\nu_c$ , c'est la condition de résonance. Ainsi, plusieurs paramètres influencent la valeur de T1 :

- L'état liquide ou solide de la matière :

Dans un liquide, d'autant plus qu'il est pur (LCS, eau), les petites molécules ont des mouvements moléculaires très rapides et la fréquence des collisions moléculaires est donc beaucoup plus élevée que la fréquence de Larmor,  $\nu_c > \nu_0$ . Il y a donc peu d'échanges d'énergie.

→ T1 est plus long dans les liquides par rapport aux solides

→ L'augmentation de liquide au sein d'un tissu (œdème, tumeur et infarctus) allonge le T1.

→ Par contre la présence de grosses molécules dans un liquide comme les protéines raccourcit le T1 ( $\nu_c$  se rapproche de  $\nu_0$ )

- La présence de substances paramagnétiques comme les produits de contraste entraîne une diminution de T1.
- T1 diminue avec la viscosité du milieu et la température de l'échantillon.
- La structure moléculaire du tissu :
  - Les mouvements des molécules sont lents dans un milieu contenant de grosses molécules tels que les lipides ainsi on a  $\nu_c \approx \nu_0$ . Cela signifie que les échanges d'énergie avec le réseau sont maximaux et T1 est court. T1 des tissus adipeux est court.
  - Dans les structures cristallines, les mouvements sont extrêmement lents,  $\nu_c < \nu_0$ . Il y a donc peu d'échanges d'énergie. T1 des structures cristallines est long.
- T1 est proportionnel à  $\overline{B_0}$  et donc dépendant de l'appareil IRM utilisé :  
Lorsque l'intensité de  $\overline{B_0}$  augmente, il y a augmentation de  $\nu_0$ , or  $\nu_c$  ne change pas donc le nombre de protons en condition de résonance diminue, ce qui augmente T1.

### 3.2. La relaxation transversale ou T2 = relaxation spin-spin

L'excitation par impulsion RF de  $90^\circ$  a pour conséquence de faire apparaître une composante transversale  $\vec{M}_{xy}$  du vecteur d'aimantation tissulaire  $\vec{M}$  par rephasage des protons (ou spins). Dès l'arrêt de l'impulsion RF, le phénomène inverse a lieu, c'est-à-dire un rapide déphasage des protons. L'aimantation transversale  $\vec{M}_{xy}$  décroît rapidement : c'est la relaxation transversale. On peut noter que  $\vec{M}_T$  décroît plus rapidement que ne repousse  $\vec{M}_L$  : les tissus ont toujours un T2 inférieur ou égal au T1.

On l'appelle également relaxation spin-spin car ce phénomène est la conséquence d'une interaction des spins entre eux. En effet, les protons évoluent dans des environnements moléculaires différents, où de petits champs magnétiques locaux vont se superposer au champ magnétique principal  $\overline{B_0}$ , on parle d'hétérogénéité de champ d'origine moléculaire. Les protons précessent donc spontanément à des vitesses angulaires légèrement différentes par rapport à  $\omega_0$  : c'est la raison pour laquelle les protons ne sont pas spontanément en phase avant l'application de l'impulsion RF et qu'ils ne le restent pas longtemps après la fin de l'impulsion.

La relaxation transversale est aussi appelée relaxation T2 car la décroissance rapide de l'aimantation transversale se fait selon une exponentielle décroissante où la constante de temps T2 (ms) est caractéristique d'un tissu donné. T2 correspond à 63% de la décroissance de  $\vec{M}_T$ . La relaxation transversale est donc d'autant plus rapide que T2 est court(Figure 11).

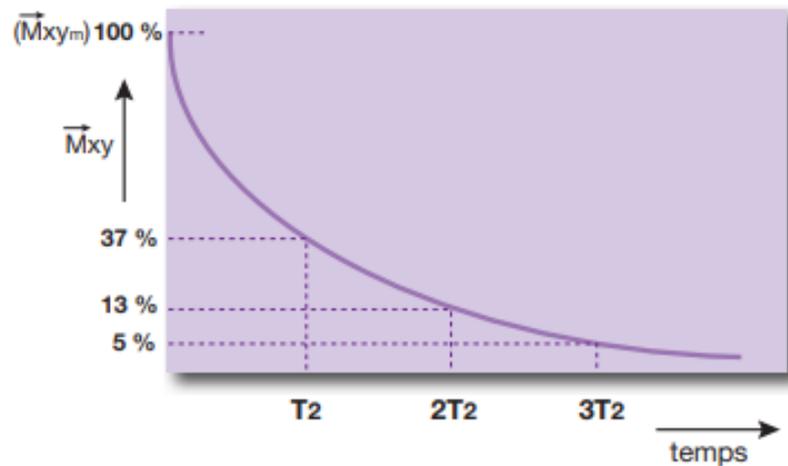


Figure 11: Courbe exponentielle de disparition de l'aimantation transversale en fonction du T2 (4)

L'ordre de grandeur de T2 des tissus biologiques est de 50 à 100 ms. Plusieurs paramètres influencent la valeur de T2 :

- L'état solide ou liquide de la matière : l'agitation moléculaire dans les liquides annule les champs magnétiques locaux, or ceux-ci favorisent normalement le déphasage.
  - T2 est plus long dans les liquides par rapport aux solides
  - L'augmentation de liquide au sein d'un tissu (œdème, tumeur, infarctus) allonge le T2.
- La structure moléculaire : les champs magnétiques locaux se maintiennent dans les grosses molécules, donc T2 est plus court.

### 3.3. Signal FID et notion de T2\*

Si l'on projette  $\vec{M}$  dans le plan xOy, sa composante transversale  $\vec{M}_{xy}$  décrit une spirale. Cette rotation dans le plan xOy induit un champ magnétique ou onde de radiofréquence. Ce signal, appelé signal d'induction libre ou free induction decay (FID). Le signal est alors transformé en signal électrique mesurable qui donne une sinusoïde amortie par une exponentielle de temps T2 (en réalité T2\* < T2)

La décroissance du signal FID est directement reliée au T2 si le champ magnétique  $B_0$  est uniforme. Cependant, certains facteurs physiques peuvent provoquer une décroissance plus rapide du signal.

Si à l'échelle macroscopique le champ magnétique  $\vec{B}_0$  de l'aimant peut être considéré comme homogène, à l'échelle microscopique il ne l'est pas ce qui entraîne un déphasage plus rapide des spins. Les fréquences de résonance des protons de cet échantillon ne seront, par conséquent, pas tout à fait identiques. Ainsi, le signal FID observé est lié aux hétérogénéités du champ  $B_0$  d'origine moléculaire (qui lorsqu'il est seul est responsable de la décroissance transversale T2) est, et aux hétérogénéités propres du champ magnétique externe  $B_0$  à l'échelle microscopique qui accélèrent la décroissance transversale, dite T2\*. On utilise le symbole T2\* pour représenter la conjonction de ces deux effets. Le signal FID décroît donc plus rapidement qu'en théorie (T2) selon une exponentielle en T2\* (Fig.37).

Il est possible de s'affranchir des hétérogénéités propres du champ magnétique  $\vec{B}_0$  et d'accéder par la séquence d'écho de spin au T2 vrai du tissu examiné.

### 3.4. Mesure du signal RMN

Lors de la phase de relaxation la composante transversale du vecteur d'aimantation macroscopique  $\vec{M}$  diminue plus rapidement que la composante longitudinale. Lors de la relaxation,  $\vec{M}$  continue de précesser autour de  $\vec{B}_0$  et décrit une forme de spirale dans le plan xOy. Cette rotation induit un champ magnétique ou onde de radiofréquence. Comme nous l'avons vu précédemment, ce signal est le FID. Ce dernier est enregistrable et traduit la décroissance de l'aimantation transversale des protons (signal de précession libre). C'est

ensuite le rôle de l'antenne de réception placée dans le plan xOy, parallèle à  $\vec{B}_0$  d'enregistrer ce signal et de le convertir en signal électrique mesurable.

Or les signaux émis par les protons sont spécifiques des caractéristiques anatomiques et physiologiques des tissus au sein de la région étudiée. Il s'ensuit donc une phase d'amplification et de numérisation qui permet au système IRM de produire des images représentatives de l'anatomie normale et pathologique. L'ordinateur attribuant à chaque signal reçu une localisation anatomique et une tonalité de gris.

### III- INSTRUMENTATION DE L'IRM (5,6)

#### 1. L'aimant

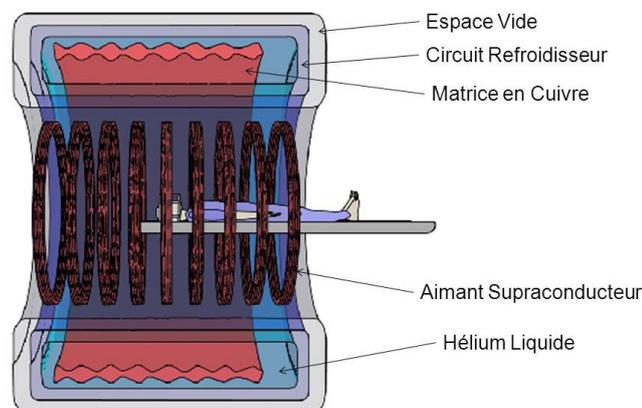
L'aimant est la pièce maîtresse car c'est lui qui permet de produire le champ magnétique principal  $\vec{B}_0$ , d'intensité élevée, d'une bonne stabilité temporelle et d'une bonne homogénéité, à l'origine d'une aimantation macroscopique mesurable. A titre de comparaison, Le champ magnétique généré en permanence par l'appareil IRM représente 4 000 à 60 000 fois celui de la Terre, il est mesuré en Tesla (T). L'homogénéité de champ est assurée par des bobines additionnelles de correction, appelées bobines de Shim car des hétérogénéités de champ peuvent conduire à des artefacts.

Il existe deux types d'IRM utilisés en médecine vétérinaire. Il s'agit des appareils « bas champ » et de « haut champ », avec des aimants ouverts (forme de U) ou fermés (type tunnel)

- Les IRM bas champ (<0,3 Tesla), avec des aimants permanents ou électro-aimants résistifs. Ils sont moins coûteux que les IRM haut champ qui contiennent des aimants supraconducteurs. De même, ils fournissent une image de moins bonne résolution avec des temps d'acquisition plus longs.
- Les IRM haut champs sont munis d'électro-aimants supraconducteurs (Figure 12). Ils sont constitués d'une bobine rendue supraconductrice grâce à un refroidissement par hélium liquide. La maintenance de ces systèmes est très onéreuse en raison de la présence d'hélium liquide pour refroidir l'aimant (recharge de la cuve). Ils disposent

de systèmes de sécurité en cas de perte de la supraconductivité, associée à un échauffement et une évaporation rapide de l'hélium liquide qui se transforme en un très grand volume d'Hélium gazeux (Quench) : conduite d'évacuation des gaz, surveillance du pourcentage d'oxygène et de la température dans l'enceinte de l'IRM, ouverture de la porte vers l'extérieur (surpression à l'intérieur de la salle).

- La machine peut être fermée en tunnel, ou ouverte en forme de U. Ces dernières sont notamment destinées aux patients humains claustrophobes ou obèses, mais l'uniformité du champ magnétique est alors inférieure, le rapport signal sur bruit des images obtenues est donc inférieur.



NB : L'augmentation de la puissance du champ magnétique diminue le contraste en T1 et majore certains artéfacts.

## 2. Les bobines de gradient

Elles permettent de générer un gradient de champ magnétique, c'est-à-dire une variation linéaire de l'intensité du champ le long d'une direction de l'espace, nécessaire au codage du signal. Cette variation d'intensité de champ magnétique s'ajoute ou se retranche au champ magnétique principal qui est bien plus puissant.

Deux bobines sont nécessaire, au minimum, pour produire un gradient de champ magnétique. Il faut en produire un dans chaque direction de l'espace :

- Selon l'axe z, qui est aussi l'axe de  $\vec{B}_0$ , deux bobines sont placées face à face, dans lesquelles le courant électrique circule en sens inverse, ce qui permet de produire un gradient linéaire de champ magnétique : le gradient  $G_z$  (Figure 13, droite).
- Selon les axes x et y, quatre bobines sont utilisées respectivement, face à face deux par deux. Dans ce cas, ce sont les quatre arcs se faisant directement face (Figure 13, centre et gauche) qui contribuent à la production du gradient. Leur action est homogène sur un plan qui est perpendiculaire à la direction d'application.

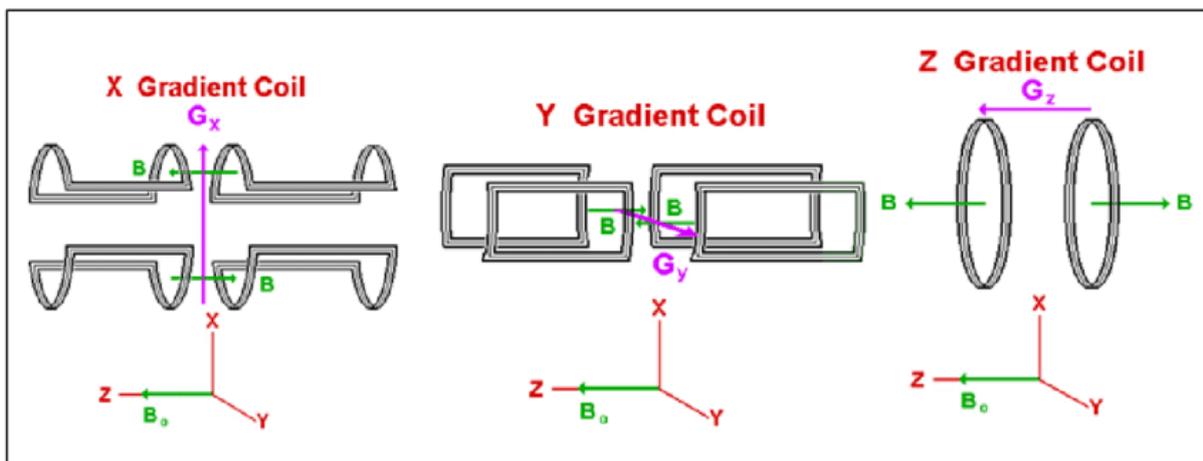


Figure 13: Représentation des gradients selon les différents axes (8)

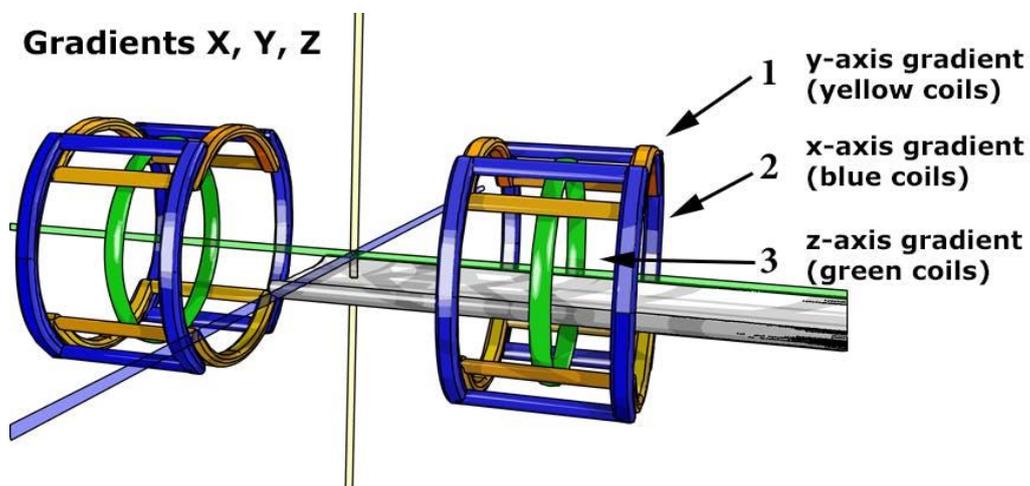


Figure 14: Gradients de champ magnétique de l'IRM (5)

Lorsqu'on alimente les bobines, on injecte du courant électrique dans celles-ci, les forces générées se manifestent sous forme de vibration, bruit caractéristique du fonctionnement de l'IRM (Figure 14). Le bruit émis est proportionnel à l'intensité du courant injecté et à l'intensité du champ magnétique, d'où un bruit plus élevé sur les appareils 3 de haut champ.

### 3. Chaîne radiofréquence

La chaîne radiofréquence regroupe les antennes, les convertisseurs analogique-digital et le spectromètre pour le recueil et l'analyse du signal. Elle comprend l'ensemble des éléments permettant l'émission et la réception des ondes radiofréquences, qui interviennent dans l'excitation des noyaux, la sélection des coupes, lors de l'application des gradients et pour l'acquisition du signal.

Les antennes sont très importantes. Elles sont constituées d'un ou plusieurs anneaux de cuivre et possèdent un rôle dans l'émission d'ondes radiofréquence et la réception du signal. Durant la phase d'émission, l'objectif est de délivrer une excitation uniforme dans tout le volume que l'on souhaite analyser. Pendant la phase de réception, les antennes doivent être sensibles et avoir le meilleur rapport signal sur bruit possible. Le signal de résonance magnétique étant faible, elles doivent être placées au plus près de la partie anatomique explorée. Les antennes sont classées selon leur géométrie (volumique ou surfacique), leur mode de fonctionnement (émettrice-réceptrice ou réceptrice seule), ou encore selon leur configuration (linéaire, en quadrature de phase ou en réseau phasé).

Un appareil IRM contient en général une antenne « corps entier » (Figure 15(1)), située dans la coque de la machine et couvrant l'ensemble du volume de façon homogène. Les antennes de surface (Figure 15(2,3,4,5)) sont uniquement réceptrices du signal, elles sont plus petites, possèdent une plus faible profondeur mais offrent des possibilités d'imagerie à plus haute résolution car elles sont placées au contact de la zone d'intérêt.

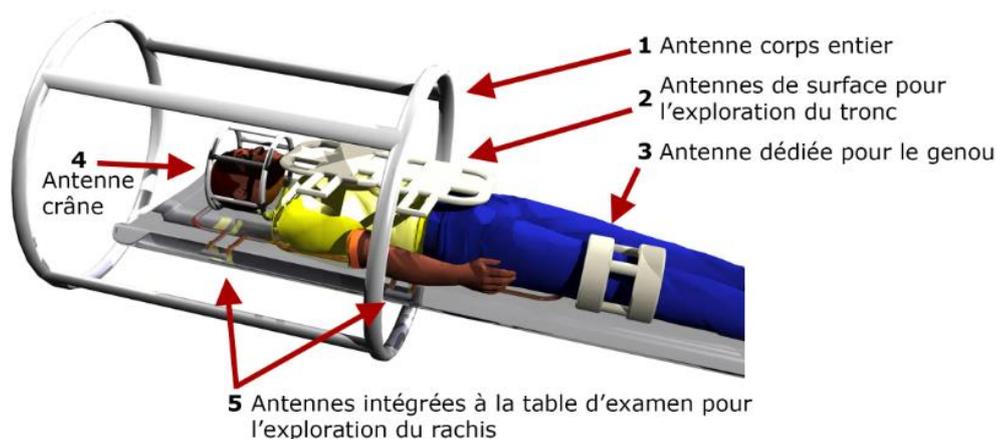


Figure 15: Représentation schématique de différentes antennes (7)

#### 4. Le système informatique

La coordination des différentes étapes de l'examen et des séquences, le spectromètre, la reconstruction des images et leur post-traitement sont contrôlés par un système informatique interne et par les consoles d'acquisition et de post-traitement.

#### 5. Salle d'examen et cage de Faraday

L'enveloppe de la machine et surtout, de l'aimant, est constituée d'une cage de Faraday qui est le principal moyen de blindage destinée au confinement des champs magnétiques produits par la machine et à l'isolement de celui-ci des champs magnétiques extérieurs. Elle permet d'effectuer ces mesures précises en évitant les pollutions électromagnétiques extérieures. En effet les ondes de la radiophonie publique sont susceptibles d'interférer.

La salle doit être climatisée pour réguler la température. L'objectif est d'éviter tout artefact ou dysfonction dans l'acquisition des images afin d'obtenir une qualité d'image optimale. L'écart autour de la température moyenne à laquelle la machine est paramétrée est de plus ou moins 2°C. En dehors de cette plage, les images sont déformées : comprimées sur une face et tendues sur l'autre.

NB : L'appareil IMR est placé dans une pièce amagnétique. La présence de l'aimant rend la salle IRM interdite à toute personne portant des objets métalliques, un pacemaker ou un implant chirurgical.

### IV. Les différents paramètres caractérisant les multiples séquences IRM ainsi que leur modulation

Une séquence IRM est définie par les paramètres spécifiques programmés dans le système IRM indiquant la façon dont le signal doit être recueilli. Lorsque l'opérateur les modifie on dit qu'il « pondère » la séquence. Généralement l'image est pondérée en T1 ou

en T2. Dans un protocole d'imagerie plusieurs séquences sont associées. En fonction de ce que l'on cherche à mettre en évidence, certaines séquences sont préférables.

## 1. La séquence de base et les paramètres fondamentaux (5,9)

### 1.1. Séquence d'écho de spin

L'application à un instant précis d'onde radiofréquence va inverser l'ordre des déphasages. Les protons les plus rapides vont se retrouver derrière plus lents. Ainsi, en appliquant l'impulsion de  $180^\circ$  à un temps correspondant à la moitié du temps d'écho, les protons seront à nouveau en phase au temps d'écho.

Cela peut être découpé en quatre étapes que nous allons voir avec quatre spins (Figure 16 et Figure 17) :

a) Au temps  $t=0$ , les quatre spins sont en phase, le vecteur  $\vec{M}_T$  est maximal : immédiatement après l'impulsion de  $90^\circ$ ,  $\vec{M}_{Tm}$  est égal en longueur au vecteur d'aimantation longitudinale  $\vec{M}_{L0}$ .

b) Ensuite, les spins se déphasent rapidement à cause des hétérogénéités de champ d'origine moléculaire et des hétérogénéités propres de  $\vec{B}_0$ . Les plus rapides  $\mu_3$  et  $\mu_4$  sont en avant et les plus lents  $\mu_1$  et  $\mu_2$  en arrière : ils s'écartent et le vecteur  $\vec{M}_T$  résultant diminue ainsi en T2\*.

c) Au temps  $t=TE/2$  (demi-temps d'écho), une impulsion RF de  $180^\circ$  est appliquée. Elle inverse les déphasages sans modifier le sens de rotation. Les spins  $\mu_3$  et  $\mu_4$  qui précèdent le plus rapidement se retrouvent derrière les plus lents  $\mu_1$  et  $\mu_2$ . On obtient une image en miroir par rapport à l'axe Ox.

d) Comme les vitesses de précession sont inchangées, les spins se rephasent, les vecteurs se rapprochent, le vecteur  $\vec{M}_T$  résultant croît. Au bout du temps d'écho TE ( $2TE/2$ ), les spins seront de nouveau presque en phase :  $\vec{M}_T$  est maximal engendrant un signal, mesuré au temps d'écho selon l'axe Ox, nommé écho de spin.

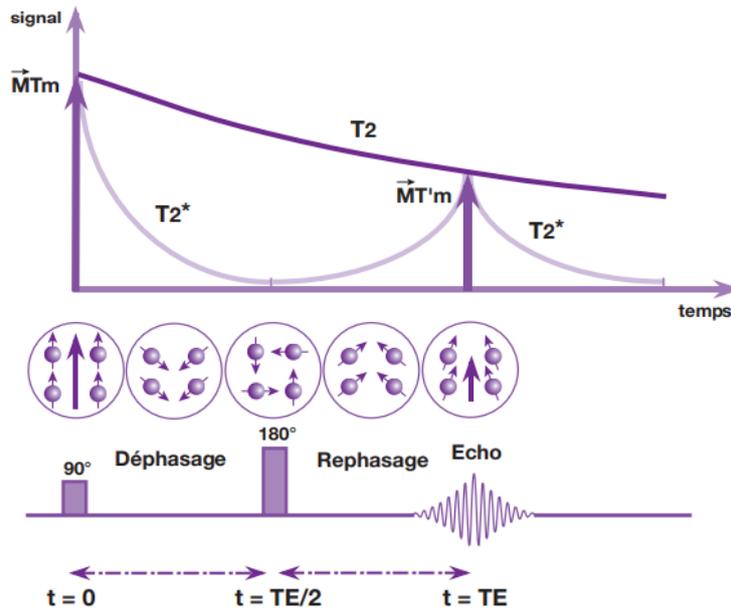


Figure 16(droite):Chronologie du phénomène de l'écho de spin (9)

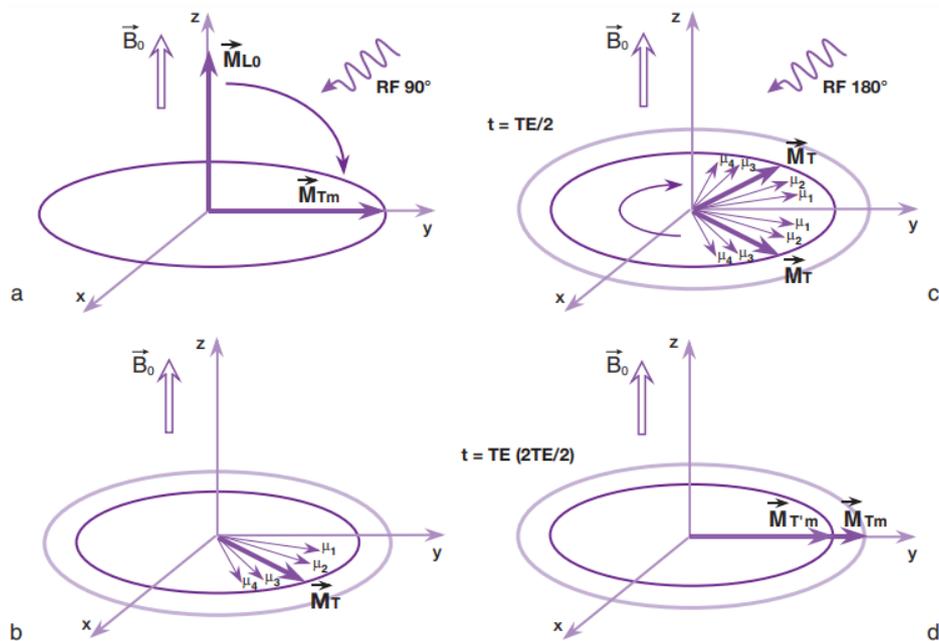


Figure 17 (gauche):Evènement lors du phénomène de l'écho de spin (9)

En effet, le terme « presque » s'explique par le fait que l'impulsion de  $180^\circ$  ne permet de s'affranchir que des déphasages dus aux hétérogénéités du champ  $B_0$ , qui sont constants, et non pas des déphasages aléatoires dus aux hétérogénéités de champ d'origine moléculaire qui sont irréversibles (relaxation spin-spin).

En réalité, le déphasage lié à la relaxation spin-spin n'est pas corrigé par l'impulsion de  $180^\circ$  : le vecteur  $\overrightarrow{M_{Tm}}$  est donc légèrement plus petit que  $\overrightarrow{M_{Tm}}$ . Il en est de même pour le signal mesuré. Tous deux passent par un maximum qui cette fois-ci, a diminué en  $T_2$ . Il est possible d'appliquer une deuxième impulsion de  $180^\circ$ , on obtient un signal au deuxième écho, et ainsi de suite jusqu'à disparition totale du signal en  $T_2$ . Les impulsions RF de  $180^\circ$  successives permettent d'accéder à la décroissance du signal en  $T_2$  vrai (Figure 18).

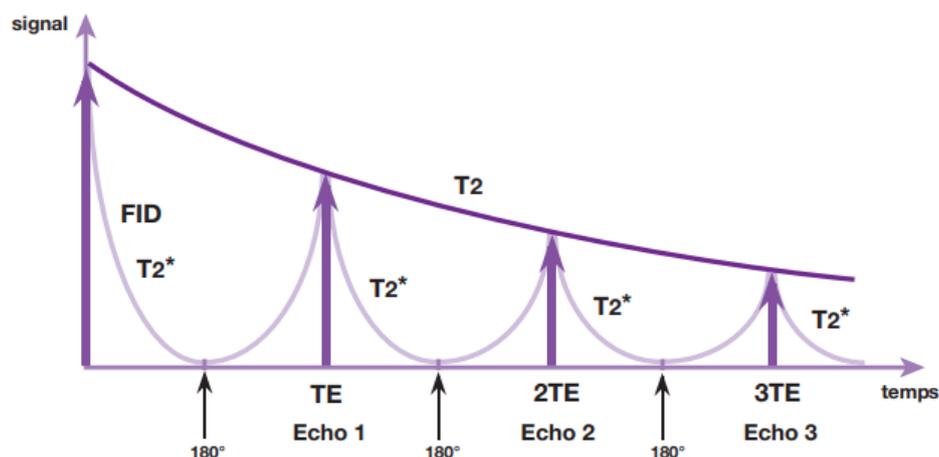


Figure 18: Courbe en  $T_2$  "vrai" (9)

## 1.2. Définition des paramètres fondamentaux issus de la séquence de base

### 1.2.1. Temps d'écho (TE)

Le temps d'écho correspond à l'intervalle entre l'impulsion de  $90^\circ$  et le recueil de l'écho de spin (Figure 19). Il correspond au temps pendant lequel on laisse décroître le signal en  $T_2$  avant de le mesurer.

### 1.2.2. Temps de répétition (TR)

Il s'agit du temps écoulé entre deux impulsions de  $90^\circ$ , c'est-à-dire le temps séparant deux excitations successives (Figure 19). Ainsi le TR est toujours supérieur au TE.

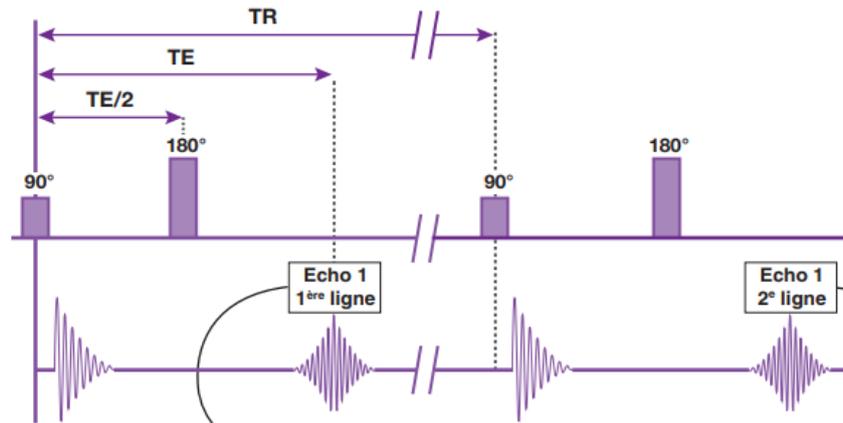


Figure 19: Schéma du TE et TR (1)

### 1.2.3. Angle de bascule (flip angle)

L'impulsion de radiofréquence fait basculer le vecteur d'aimantation des protons par rapport à l'axe de champs magnétique statique de l'aimant. L'angle décrit par ce vecteur d'aimantation correspond à l'angle de bascule. Classiquement en écho de spin, l'angle de bascule est de  $90^\circ$ .

### 1.2.4. Temps d'inversion (TI)

Le temps d'inversion est le délai entre une impulsion de  $180^\circ$  d'inversion et l'impulsion d'excitation de  $90^\circ$  qui la suit.

## 2. Pondération en T1 et T2 (5,10)

Chaque tissu a des comportements différents selon la pondération T1 ou T2 d'un signal.

### 2.1. Temps de répétition (TR) et pondération en T1

Comme nous l'avons vu plus haut, les antennes, parallèles à  $\vec{B}_0$ , ne sont capable d'enregistrer uniquement le vecteur magnétique transversal en mouvement. Ainsi, on ne peut pas enregistrer directement la repousse de l'aimantation longitudinale, c'est pourquoi on répète l'impulsion RF de  $90^\circ$ .

Durant chaque intervalle TR, l'aimantation longitudinale  $\vec{M}_L$  des différents tissus repousse en fonction de leurs T1 respectifs, c'est-à-dire plus ou moins rapidement. Le temps de répétition est également appelé temps de repousse ou temps de récupération de l'aimantation longitudinale. En effet, l'aimantation longitudinale  $\vec{M}_L$  repousse jusqu'à un certain niveau en fonction de la longueur du TR avant d'être de nouveau basculée dans le plan transversal par une nouvelle impulsion de 90° qui amorce le cycle suivant.

Considérons deux tissus distincts  $T_A$  et  $T_B$  avec un T1 plus long pour le tissu A :

### 2.1.1. Temps de répétition long

Si le TR est long (2s), l'aimantation longitudinale a le temps de repousser entièrement, pour les deux tissus, avant une autre impulsion RF de 90°. En effet la décroissance de la composante transversale du vecteur d'aimantation globale est identique pour  $T_A$  et  $T_B$  car leur aimantation longitudinale basculée est identique (Figure 20).

Plus le temps de répétition est long, plus le contraste en T1 est faible car les différences de T1 des tissus ne sont pas perçus. On dit que la séquence est dépendrée en T1. Attention toutefois à la durée du TR, si elle est trop importante il n'y a pas signal enregistré.

### 2.1.2. Temps de répétition court

A l'inverse, si le TR est court (<0,5s), les ondes RF 90° sont répétées rapidement. Ainsi la repousse de l'aimantation longitudinale est incomplète et différente entre  $T_A$  et  $T_B$  lorsqu'une nouvelle impulsion RF de 90° est générée pour faire basculer de nouveau le vecteur d'aimantation globale. La composante transversale du vecteur d'aimantation globale est plus importante pour  $T_B$  au début de la deuxième relaxation (Figure 20).

Plus le temps de répétition est court, plus le contraste en T1 est fort car les différences de T1 des tissus sont bien perçus. On dit que la séquence est pondérée en T1.

L'image est dite « pondérée T1 » et non pas « T1 » car la différence de signal est due majoritairement à la différence d'aimantation longitudinale mais également à la différence de relaxation de l'aimantation transversale entre  $T_A$  et  $T_B$ , qui elle dépend du T2. Le tissu avec le

T1 le plus court génère un signal plus fort (apparaîtra blanc), tandis que le tissu avec le T1 le plus long donne un signal plus faible (apparaîtra noir).

Un TR court est de l'ordre du T1 le plus court du tissu considéré, si le TR est en dessous, il se produit une saturation de l'aimantation longitudinale et il n'y a donc pas de contraste. En effet, si la deuxième impulsion 90° est lancée immédiatement après la première, les vecteurs d'aimantation longitudinale n'ont pas eu le temps de repousser, il n'y a donc plus de signal disponible.

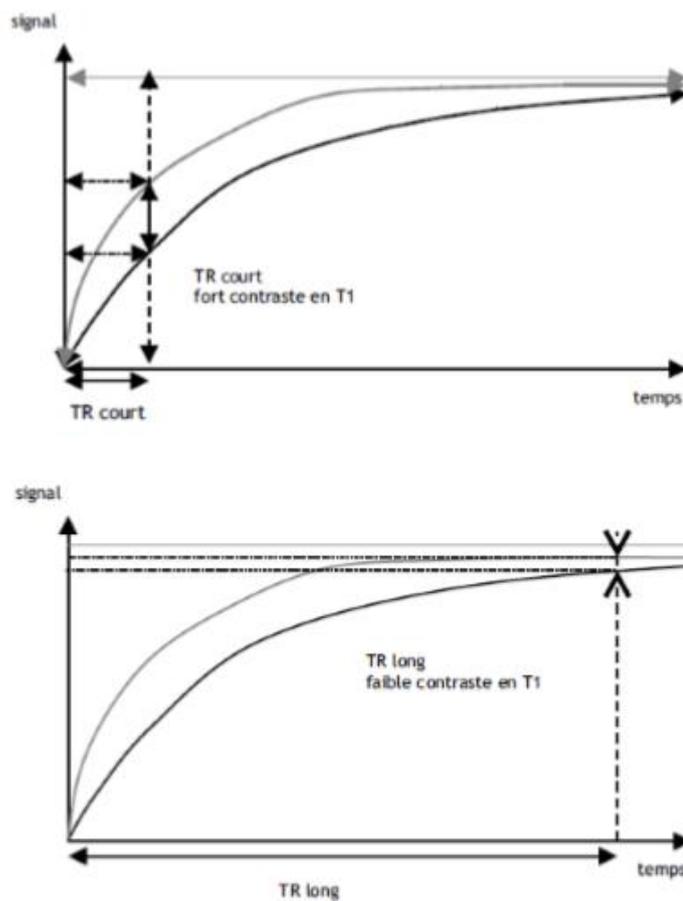


Figure 20: Influence du TR sur la pondération en T1 d'une séquence (10)

## 2.2. Temps d'écho (TE) et pondération en T2

### 2.2.1. Temps d'écho court

Si le TE est court (< 20-30ms), les différences en vitesse de décroissance n'ont pas le temps de s'exprimer et on ne peut pas distinguer les deux tissus par leur T2 (Figure 21). On dit que la séquence est dépondérée en T2.

### 2.2.2. Temps d'écho long

Si le  $T_e$  est long (>80-100ms), on peut distinguer les deux tissus par leur  $T_2$  (Figure 21). On dit que la séquence est pondérée en  $T_2$ . Le signal le plus élevé est généré par le tissu possédant le  $T_2$  le plus long, son image sera plus blanche.

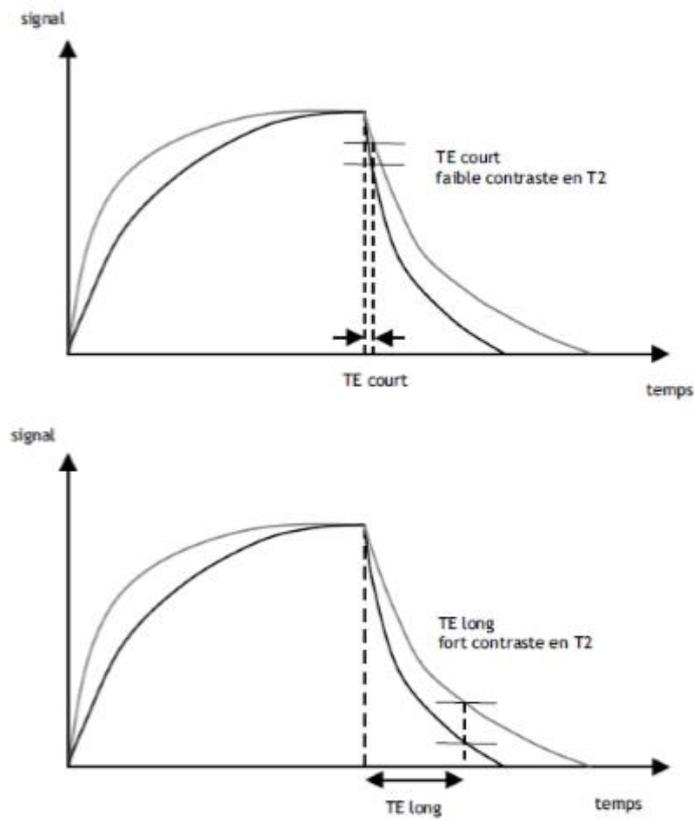


Figure 21: Influence du TE sur la pondération  $T_2$  d'une séquence (10)

### 2.3. Séquence densité de proton

La séquence densité de proton est très utilisée en IRM pour tout ce qui est musculosquelettique mais ne sera pas détaillé dans cette thèse car cette dernière présente peu davantage pour explorer l'encéphale.

## 2.4. Résumé des paramètres à utiliser pour une pondération en T1 et T2

Pour une séquence pondérée en T1 il faut :

- Un TR court (400-600 ms) pour favoriser le contraste en T1 (pondération en T1).
- Un TE court (15 ms) pour minimiser le contraste en T2 (dépondération en T2).

Le tissu avec le T1 le plus court fournira le signal le élevé (blanc) (Figure 22)

Pour une séquence pondérée en T2 il faut :

- Un TE long (120 ms) pour favoriser le contraste en T2 (pondération en T2).
- Un TR long (2000 ms) pour minimiser le contraste en T1 (dépondération en T1).

Le tissu avec le T2 le plus long donnera le signal le plus élevé (blanc).

Les séquences en T2 ont un meilleur contraste (par rapport aux séquences en T1) mais le rapport signal sur bruit est plus faible car les mesures sont réalisées plus tardivement sur la courbe d'atténuation du signal en T2 : le signal est donc plus faible.

NB : Il y a une inversion de contraste de la séquence en T1 par rapport à la séquence en T2 : un tissu ayant un T1 court (hypersignal : blanc en T1), a généralement un T2 court (hyposignal : noir en T2) et inversement.

	T1 en ms	T2 en ms
Eau	3000	3000
Substance grise	810	100
Substance blanche	680	90
Foie	420	45
Graisse	240	85
Gadolinium	Raccourcit le T1 et le T2 des tissus à proximité.	

Figure 22: Exemple de valeurs du T1 et du T2 selon la nature du tissu (5)

### 3. Quelques exemples d'autres séquences couramment utilisées (1,5)

#### 3.1. Variations de l'angle de bascule et caractérisation d'une séquence : exemple de l'écho de gradient

La succession d'angles de bascule auxquels sont soumis les protons et la notion de temps d'inversion (TI) vont établir s'il s'agit d'une séquence en écho de spin (SE), écho de gradient (GRE), écho de spin rapide (TSE), inversion-récupération (IR) ou suppression de signal de la graisse (STIR).

La séquence est très rapide avec un TE très court, elle se distingue par :

- Un angle de bascule faible (entre 20 et 60°)
- Impulsion RF de 90° suivie d'une absence d'impulsion RF de 180° de rephasage

L'angle de bascule petit diminue la quantité d'aimantation basculée. Le retour à l'état d'équilibre s'effectue donc plus rapidement, cela permet de diminuer le TR entre chaque impulsion. Le principal intérêt de l'écho de gradient est le gain de temps non négligeable. Ce type de séquence est à privilégier lors de reconstruction en 3D de l'image (11).

Cette séquence est très sensible aux inhomogénéités de champ magnétique car les hétérogénéités ne sont pas compensées par une impulsion RF de 180°.

Le contraste est variable en fonction du choix du TR et TE, mais la résolution est beaucoup moins bonne qu'avec l'écho de spin. La pondération (en T1, T2) dépend de TE, TR et de l'angle de bascule. L'inconvénient du faible angle de bascule et du TR très court est une mauvaise pondération en T1.

Ainsi, la séquence GRE, ayant un court TE (augmente l'effet T2\*), un angle de bascule réduit et un long TR (réduisant l'influence de T1), sera pondérée en T2\* (cf. paragraphe II.3.3.)

### 3.2. Variations du TI : exemple des séquences FLAIR et STIR

Ces deux séquences sont des applications de la séquence d'inversion récupération (IR).

La séquence IR permet de modifier le contraste naturel obtenu par les différences de temps de relaxation T1 des tissus. Elle est composée d'une impulsion initiale de 180° (onde d'inversion) qui va faire basculer l'aimantation longitudinale dans la direction opposée. Du fait de la relaxation longitudinale, l'aimantation longitudinale va croître pour revenir à sa valeur initiale, en passant par la valeur nulle. Comme pour les autres séquences, il faut appliquer une onde RF de 90° d'excitation ensuite pour enregistrer le signal.

Ainsi dans cette séquence tous les tissus passent par 0 lors de la repousse (à  $t=0,69 \times T1$  du tissu considéré). Ce passage à zéro permet de supprimer de l'image une structure donnée, comme par exemple la graisse (Figure 23). Il suffit pour cela de choisir un temps d'inversion (TI) tel que l'aimantation longitudinale du tissu donnée soit nulle. Ce dernier ne pourra alors pas donner de signal par absence d'aimantation transverse. La technique d'IR permet ainsi de supprimer le signal d'un tissu donné en sélectionnant un TI adapté au T1 de ce tissu, par exemple pour la graisse : RF de 90° au temps  $TI = 0,69 \times T1$  graisse (1)

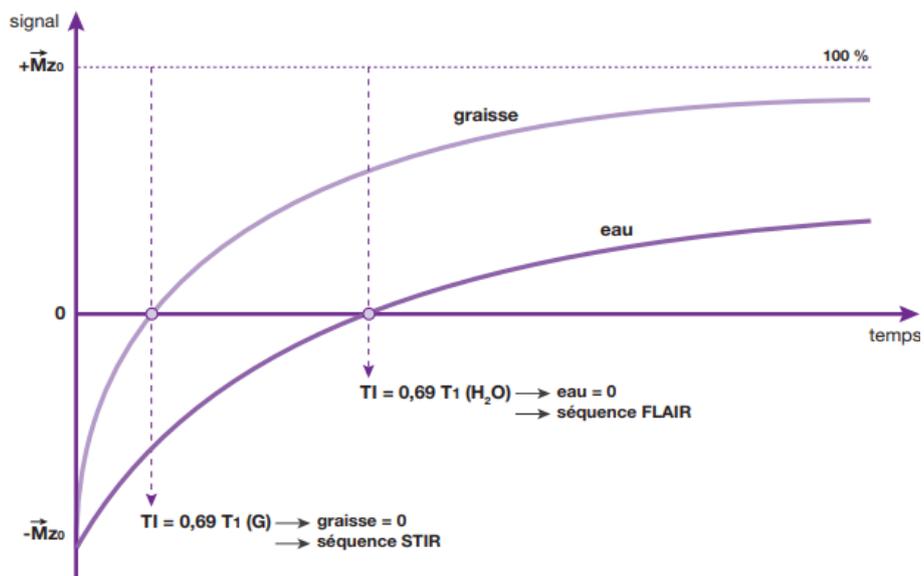


Figure 23: Séquence STIR et FLAIR (1)

### 3.2.1. Caractéristiques de la séquence FLAIR (Fluid Attenuated Inversion Recovery)

L'objectif de cette séquence est de supprimer le signal des liquides par une inversion-récupération à un temps d'inversion adapté.

L'eau présente un T1 long. En choisissant un TI de 2 000 millisecondes, on peut s'affranchir du signal de l'eau libre. Le signal provenant du LCR est supprimé et un long TE est utilisé afin de donner à cette séquence une forte pondération en T2.

Elle est bien adaptée à l'imagerie du cerveau car améliore la détection du parenchyme cérébral, particulièrement celles localisées à l'interface parenchyme cérébral et LCR, et permet de bien détecter les œdèmes.

### 3.2.2. Caractéristiques de la séquence STIR (Short Time Inversion Recovery)

Dans la séquence STIR, une impulsion préalable de 180° d'inversion complète la séquence écho de spin.

La graisse présente un T1 court. Ainsi en choisissant un temps d'inversion (TI) court de 140 millisecondes, on peut supprimer le signal de la graisse. Elles peuvent être employées en pondération T1 ou T2.

NB : Attention lors de l'utilisation de principe actif type gadolinium (produit de contraste, cf paragraphe V.6.) , les tissus réhaussés par ce dernier voient leur T1 raccourci et peuvent donc être effacés en même temps que la suppression du signal de la graisse.

## V. Interprétations de l'image obtenue par résonance magnétique (10,12)

En analysant les images obtenues en T1 et T2, il est possible de reconnaître la nature normale ou pathologique des tissus observés.

Avant d'aborder l'aspect des tissus selon la pondération choisie il est important de noter que certaines structures anatomiques comme la corticale osseuse, les calcifications, les cavités aériques (sinus, trachée, bronches) n'engendrent qu'un faible signal. De ce fait, elles apparaissent plutôt sombre quelle que soit la pondération.

## 1. Aspect des tissus en pondération T1

On dit du contraste en pondération T1 qu'il est anatomique. Il permet d'observer l'anatomie et de rechercher d'éventuelles prises de contraste après injection. Nous allons nous concentrer sur l'aspect des tissus qui composent le système nerveux.

- La substance blanche apparaît blanche
- La substance grise apparaît grise, car elle contient naturellement beaucoup d'eau
- Le liquide cébrospinal (LCS) est noir, appuyant le contour du système nerveux central (SNC).

Les tissus graisseux apparaissent en blanc car ils génèrent le signal le plus élevé. Les muscles et la moelle osseuse vertébrale apparaissent avec un signal intermédiaire. Enfin les disques intervertébraux émettent eux aussi un signal intermédiaire, cependant plus proche de l'hypersignal que de l'hyposignal.

Le plus souvent les lésions apparaîtront sombres, c'est-à-dire en hyposignal en pondération T1.

## 2. Aspect des tissus en pondération T2

Lors de l'utilisation de l'IRM pour l'exploration du système nerveux central, les séquences pondérées en T2 sont dites myélographiques.

- La substance blanche apparaît plus foncée que la substance grise, mais attention T1 et T2 sont complémentaires mais l'un ne représente pas le négatif de l'autre.
- Le LCS, quant à lui, apparaît en hypersignal (blanc).

Les tissus graisseux apparaissent souvent en hyposignal ; néanmoins, la graisse présente un hypersignal sur les séquences T2 hyper rapides. Les muscles et la moelle osseuse vertébrale donnent un signal intermédiaire, néanmoins toujours hypo-intense par rapport à la moelle épinière. Les disques intervertébraux émettent un double signal : le noyau pulpeux apparaît en hypersignal alors que l'anneau fibreux est en hyposignal. Le plus souvent les lésions apparaîtront claires, c'est-à-dire en hypersignal en pondération T2.

### 3. Cas particulier de la séquence T2\*

La séquence T2\* (cf. paragraphe II.3.3) est très sensible à certains produits de dégradation de l'hémoglobine (désoxyhémoglobine et l'hémosidérine). En effet, ces substances engendrent des perturbations locales du champ magnétique (artefact de susceptibilité magnétique). De ce fait, cette séquence met en évidence l'hémosidérine présente après une hémorragie par un hyposignal en couronne autour de l'hématome. Ces hyposignaux sont le témoin de microhémorragies anciennes, la séquence permet d'objectiver une hémorragie des mois après la survenue de celle-ci, alors que les autres séquences se sont normalisées.

### 4. Aspect des tissus avec la séquence FLAIR

Cette séquence est très utilisée pour l'exploration de l'encéphale. Il s'agit d'une séquence T2 sur laquelle on supprime le signal du LCS qui apparaît donc noir. Les pathologies de la substance blanche (ramollissements, processus de démyélinisation, etc.) donnent un hypersignal.

En imagerie humaine, un accident ischémique devient visible en FLAIR au bout d'environ 5 heures. Combinée à la diffusion (cf. paragraphe VII.2.), cette séquence permet de dater très précisément le début de l'ischémie.

### 5. Aspect des tissus avec la séquence STIR

Cette séquence permet une suppression non sélective du signal de la graisse. Le STIR est particulièrement adapté à l'étude de l'appareil locomoteur plus que neurologique. Cette séquence permet de mettre en évidence une infiltration métastatique ou un œdème médullaire.

## 6. Utilisation de produit de contraste (5)

Les produits de contraste sont des substances artificielles administrées, généralement par voie intraveineuse et qui permettent une modification du contraste des tissus. Ils sont considérés comme des médicaments, ainsi les mêmes règles s'appliquent à ces derniers.

Les produits de contrastes en IRM ne sont pas visibles eux-mêmes à l'image : le raccourcissement des temps de relaxations qu'ils entraînent sur les noyaux d'hydrogène adjacents permet la modification des contrastes.

Les produits de contraste en IRM sont choisis en fonction de leurs propriétés magnétiques.

### 6.1. Agents de contraste paramagnétiques

Dans les agents de contraste paramagnétique, le principe actif est le Gadolinium. Il possède sept électrons célibataires non appariés, ce qui va réduire le T1 des tissus où il se localise, ce qui engendre un hypersignal en pondération T1 de ces structures. On parle de rehaussement de ces structures. Il permet le marquage des vaisseaux et tissus richement vascularisés ainsi que les zones d'altération de la barrière hémato-méningée.

L'utilisation du gadolinium est particulièrement indiquée pour repérer les lésions de petite taille ou celles n'engendrant que peu de modifications de signal spontanément, ou encore pour augmenter le contraste entre une lésion et l'œdème qui l'entoure. Elle permet de plus de renseigner sur la néovascularisation tumorale et donc de donner des arguments diagnostiques.

### 6.2. Agents de contraste super-paramagnétiques

Les agents de contraste super-paramagnétiques sont constitués de particules de ferrite, ce qui va réduire le T2 des tissus où il se localise, ce qui engendre un hyposignal en pondération T2 et T2\* de ces structures. Cet hyposignal est retrouvé au niveau des tissus normaux qui captent les particules d'oxyde de fer, contrairement aux zones avec envahissement métastatique.

## VI. Qualité de l'image et les artefacts en IRM (5,13,14)

### 1. Critères de qualité de l'image

La qualité d'une image IRM dépend principalement de trois paramètres :

- le rapport signal sur bruit,
- le contraste
- la résolution spatiale

Selon l'organe exploré, la pathologie recherchée, et les préférences des imageurs, on privilégiera l'un ou l'autre de ces paramètres, qui sont interdépendants. Par ailleurs, ils sont liés au temps d'acquisition de l'image, qu'il faut minimiser afin d'obtenir une durée d'examen acceptable. En effet cela conditionne la durée de l'anesthésie de l'animal et les dangers liés.

La présence d'artefacts détériore également la qualité de l'image, ils peuvent donc être considérés comme un critère de qualité.

#### 1.1. Le rapport signal sur bruit

Le facteur qui conditionne le plus la qualité de l'image est le rapport signal sur bruit car il influence les deux autres critères de qualités que sont le contraste et la résolution spatiale. Le but est d'obtenir le meilleur rapport avec la meilleure résolution spatiale, en prenant en considération que ces deux facteurs sont opposés. Le signal augmente à peu près proportionnellement à l'intensité du champ magnétique utilisé.

##### 1.1.1. Définitions

Il représente la quantité d'informations recueillies correspondant véritablement aux structures anatomiques de l'individu (signal) vis-à-vis de l'information « parasite » produite par l'animal ou par le système IRM (bruit) que l'on peut encore appeler signaux indésirables. Le bruit peut provenir de l'animal lui-même (agitation thermique des protons à l'origine d'émissions parasites), du système électronique (fluctuations électroniques dans l'antenne),

ou encore d'artefacts. Quand le rapport signal sur bruit est faible, l'image apparaît granuleuse (Figure 24).

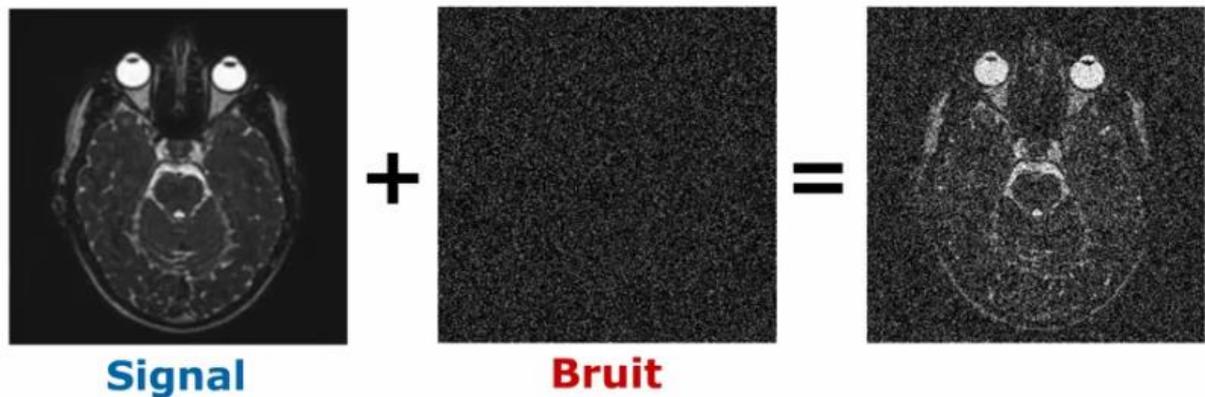


Figure 24: Influence du rapport signal/bruit sur l'image IRM (5)

#### 1.1.2. Facteurs modifiant le rapport signal sur bruit

Le rapport signal sur bruit dépend de plusieurs facteurs dont certains sont modifiables et d'autres non.

##### 1.1.2.1. Facteurs non modifiables

Le rapport signal sur bruit dépend de facteurs non modifiables tels que :

L'intensité du champ magnétique principal : le signal de la coupe sélectionnée est émis par les protons excités. La différence de population entre spins parallèles et antiparallèles est d'autant plus grande que l'intensité du champ magnétique est élevée. Ainsi, on peut considérer approximativement que le signal augmente proportionnellement à l'intensité du champ employé.

##### L'impulsion RF

Les caractéristiques tissulaires : T1, T2 et densité protonique qui sont propres à chaque tissu.

#### 1.1.2.2. Facteur modifiable (lors du choix de la machine IRM)

Le rapport signal sur bruit dépend de facteurs modifiables dont le choix de l'antenne. En effet, plus le volume de réception de l'antenne est restreint autour de la zone d'intérêt, moins il y aura de bruit enregistré en provenance des structures environnantes, et meilleur est le rapport signal sur bruit. Les antennes de surface ont un meilleur rapport signal/bruit que l'antenne corps entier.

#### 1.1.2.3. Facteur modifiable (lors des réglages de la séquence)

Le rapport signal sur bruit dépend des facteurs modifiables que sont les paramètres de la séquence tels que :

La taille du voxel : Il s'agit du volume élémentaire d'échantillonnage dont l'intensité du signal correspond à la moyenne des différents protons qui le constitue. Ainsi plus le voxel mesuré sera grand, plus le nombre de spins qu'il contient sera élevé, et plus le signal qu'il émettra sera élevé, il y a donc une relation proportionnelle entre volume du voxel et quantité de signal.

NB : Dans l'exemple de taille du voxel, on considère que la répartition des protons est uniforme.

Le nombre d'excitations : En réalisant plusieurs mesures pour une même coupe, le signal est identique à chaque mesure, mais le bruit sera différent car il est aléatoire. En augmentant le nombre d'excitations, on favorise l'intensité du signal et diminue la variabilité du bruit, mais accumuler des mesures pour une même coupe peut mener à une anesthésie trop longue.

La bande passante de réception : une bande passante correspond à l'ensemble des fréquences contenues dans un signal et enregistrées par le récepteur. Le bruit ayant un niveau constant quel que soit les fréquences, le choix d'une bande passante de réception large diminue le temps de lecture du signal mais favorise une proportion élevée de bruit à cause d'un gradient de lecture élevé. A l'inverse, le passage à une bande passante, dite étroite, entraîne une augmentation du rapport signal sur bruit mais aussi du risques d'artefact de déplacement chimique.

## 1.2. Le contraste

Le contraste correspond à la variation d'intensité de signal entre deux structures adjacentes. En IRM, ce sont les paramètres choisis par l'opérateur qui influencent majoritairement le contraste, c'est-à-dire : TR, TE, angle de bascule de la séquence d'acquisition. Il dépend aussi des paramètres qui sont propres à chaque tissu : T1, T2, mouvements moléculaire. Le contraste est, de plus, influencé par le rapport signal sur bruit. Le contraste est à optimiser afin de répondre aux objectifs de la séquence : étude anatomique, caractérisation tissulaire, recherche d'un œdème, de sang, de graisse ou de liquide, étude de flux vasculaire.

## 1.3. La résolution spatiale (15)

La résolution spatiale correspond à la taille du plus petit détail que l'on peut identifier, c'est-à-dire la capacité du système à reconnaître et à différencier les plus petites structures anatomiques.

**Le champ de vue** représente les dimensions du plan de coupe. Ce dernier est découpé en x colonnes et y rangées qui forme une **matrice** : chaque case correspond à un pixel. Si maintenant on se positionne en trois dimension en rajoutant **une épaisseur z** à ce plan de coupe on obtient les voxels de côté x et y et de profondeur z (Figure 25). La moyenne de l'information recueillie dans chaque voxel est affichée sur le pixel correspondant. Ainsi, plus les voxels sont petits, plus la résolution spatiale sera élevée.

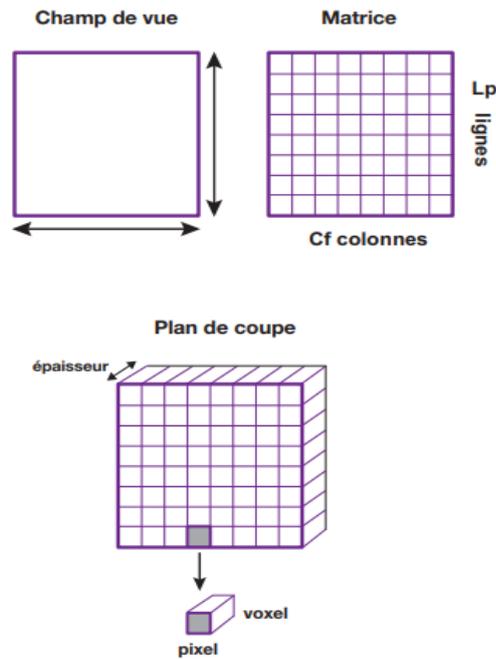


Figure 25: Notion de pixel, voxel, matrice, plan de coupe et champ de vue (15)

Le problème étant de trouver le meilleur compromis entre le rapport signal sur bruit et la résolution spatiale, car ces deux facteurs sont totalement opposés et prolongent le temps d'acquisition. En effet, si la résolution spatiale augmente, le rapport signal sur bruit diminue car il est proportionnel au volume du voxel. En pratique cela peut se traduire par le souhait d'avoir une très grande résolution spatiale qui peut entraîner une image trop bruitée du fait de voxel trop petit.

Pour contrecarrer la baisse du rapport signal sur bruit, il faut réduire les hétérogénéités magnétiques et augmenter l'intensité du gradient. Ceci est possible avec un appareil d'IRM haut champ car le signal est plus fort, il est alors possible d'augmenter la taille de la matrice et de diminuer l'épaisseur de coupe pour améliorer la résolution spatiale.

## 2. Les artefacts

Les artefacts sont des zones d'erreur de signal qui modifient l'image des structures anatomiques étudiées. Ils correspondent à une augmentation de l'intensité du signal dans une zone qui n'est pas censée en produire, ou inversement.

L'origine de ces artefacts peut être le patient lui-même ou le système IRM. Chaque type d'artefact peut être favorisé par certains équipements IRM, certaines séquences ou certains contextes pathologiques. Il est donc important de les connaître pour les éviter, les corriger, les minimiser, les réorienter et ne pas se tromper lors de l'interprétation de l'image.

## 2.1. Artefact de susceptibilité magnétique

### 2.1.1. Origine

La susceptibilité magnétique d'un tissu correspond à l'aimantation interne de ce dernier lorsqu'il est placé dans un champ magnétique. Soient deux structures ayant des susceptibilités magnétiques très différentes (par exemple air/os au niveau des sinus, du nasopharynx, des poumons) il existe un gradient de champ magnétique au niveau de leur interface. Ce gradient induit un déphasage accéléré des spins responsables d'un signal hypo-intense et d'une distorsion de l'image au niveau de la zone d'artefact. Lorsque l'intensité du champ magnétique principal augmente, il en est de même pour cet artefact. Il est donc majoré avec un appareil IRM haut champ.

### 2.1.2. Méthodes de correction et d'atténuation

Pour atténuer ou modifier les artefacts de susceptibilité magnétique il est possible de choisir :

- Des temps d'écho (TE) courts peuvent réduire la perte de signal en laissant moins de temps au déphasage de se produire.
- Les séquences en écho de spin qui y sont moins sensibles que les séquences en écho de gradient. Grâce à l'impulsion de rephasage de 180°, l'écho de spin permet de corriger les hétérogénéités de champ.
- De diminuer les inhomogénéités de champ grâce à des bobines réglables appelées bobines de Shim. En ajustant ces bobines, les variations de champ induites par l'échantillon peuvent être, en partie, compensées. Si cela n'est pas suffisant, une augmentation de l'amplitude des gradients peut être envisagée.

### 2.1.3. Intérêt diagnostic de cet artefact

Cet artefact peut cependant se révéler intéressant d'un point de vue diagnostics, notamment pour la mise en évidence des métastases de mélanome, de lésions calcifiées et des hématomes. En effet, dans ces derniers, les produits de dégradation du sang (désoxyhémoglobine et hémossidérine) ont des susceptibilités magnétiques élevées. Les séquences en écho de gradient avec une pondération en T2\* permettent de mettre en évidence de petits hématomes sous la forme de vides de signal.

## 2.2. Artefact métallique

La présence de corps ferromagnétiques s'accompagne de distorsions locales du champ. Il se présente sous la forme d'un vide de signal, entouré d'un arc en hypersignal, la déformation de l'image est caractéristique.

Cet artefact s'accroît, et détériore ainsi la qualité de l'image, avec la taille du corps ferromagnétique et l'intensité du champ magnétique.

Pour éviter cet artefact il est important de n'introduire aucun objet ferromagnétique dans la salle. Pour le corriger il est préférable d'utiliser une séquence écho de spin plutôt qu'une séquence écho de gradient qui est plus sensible aux hétérogénéités de champ et préférer un champ magnétique bas.

## 2.3. Artefact de repliement ou d'aliasing

Cet artefact est visible lorsque la taille de la structure à visualiser n'est pas centrée ou alors qu'elle est plus grande que le champ de vue. Il se manifeste par le repliement des structures hors champ du côté controlatéral de l'image (Figure 26). Il est dû à une ambiguïté de codage spatial qui attribue à l'objet hors champ le même codage que celui des structures du côté opposé du champ de vue. Cette erreur de codage spatial peut survenir dans la direction du codage de phase ou celui du codage de fréquence. Il est facile de s'en affranchir dans la direction de ce dernier grâce à des filtres. Cela est plus compliqué pour le codage de phase.

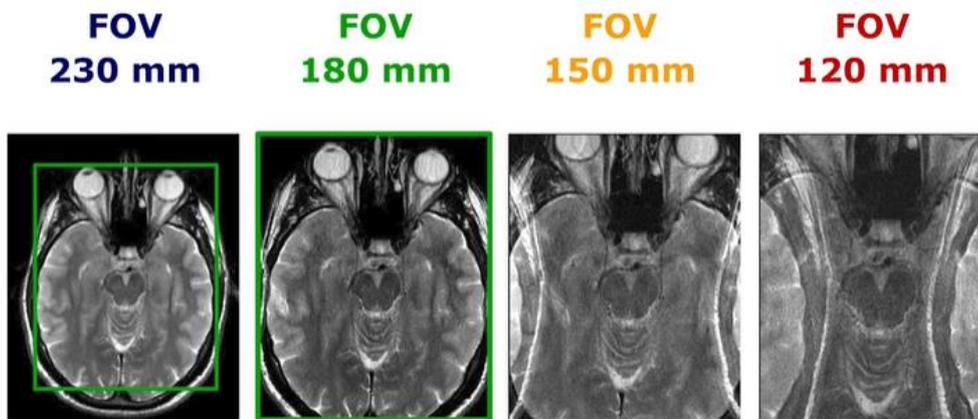


Figure 26: Exemple artefact de repliement (5)

Pour éviter cet artefact, il faut bien sûr choisir un champ de vue qui englobe toute la région anatomique dans la direction du codage de phase, au détriment de la résolution spatiale. Cependant pour conserver cette dernière sur la région d'intérêt, il faut alors augmenter le nombre d'incrément de décalage de phase (dimension de la matrice), ce qui augmente la durée d'acquisition totale de la séquence. Pour atténuer ce problème, les directions des codages de phase et de fréquence peuvent être choisies de telle façon que la direction du codage de phase corresponde à la plus petite dimension de la région anatomique à étudier, ce qui conduit à utiliser des matrices asymétriques et évite d'avoir à trop augmenter le nombre de pas de codage de phase. L'utilisation d'antennes de surface permet également de réduire le risque d'artefact de repliement : en effet, comme le signal ne provient que d'une profondeur réduite, les structures éloignées de l'antenne ne participent pas au repliement.

#### 2.4. Artefact de mouvement ou « image fantôme »

##### 2.4.1. Origine

Les artefacts de mouvements peuvent être d'origine volontaires, physiologiques (péristaltisme digestif), ou encore liquidienne (sang dans les vaisseaux sanguins). Ils sont plus prononcés lors d'IRM haut champ et dans les longues séquences. On distingue :

- Les mouvements aléatoires qui sont à l'origine d'un flou de l'image avec un bruit diffus propagé selon la direction du codage de phase.
- Les mouvements périodiques qui produisent des images fantômes propagées selon la direction du codage de phase.

NB : Par contre, l'échantillonnage dans la direction du gradient de fréquence est effectué si rapidement (quelques millisecondes) que les déplacements liés aux mouvements physiologiques sont trop limités pour altérer le codage spatial ou être responsables d'un flou dans cette direction.

Une images fantôme correspond à une alternance de bandes de signal intense et faible. Elles sont d'intensité croissante avec l'amplitude du mouvement et l'intensité du signal de la structure mobile. L'espacement entre les images fantômes lors d'une acquisition augmente avec le TR.

#### *2.4.2. Méthodes de correction et d'atténuation*

Différentes méthodes sont mises en œuvre pour éviter ces artefacts de mouvement, en voici quelques exemples :

- Pour les mouvements physiologiques périodiques comme la respiration: synchronisation de l'acquisition des données au mouvement pour cela le TR est réglé sur la périodicité du mouvement. Ainsi la mesure du signal se fait pour la même position. Toutefois cette méthode augmente le temps d'acquisition.
- Pour les mouvements non périodiques : immobilisation maximale de la zone d'étude, augmenter le TR pour augmenter l'espacement des images fantômes et les « chasser » en dehors de la zone d'intérêt, inversion des directions des codages de phase et de fréquence de telle sorte que l'examen du rachis ne soit plus impacté par les mouvements respiratoires.

#### *2.5. Artefact de troncature*

Il se traduit par des striations d'hypo- ou d'hypersignal parallèles une interface de variation brutale du signal (par exemple absence de signal de la corticale osseuse et hypersignal de la graisse sous-cutanée). Il s'agit d'un artefact de reconstruction d'image.

Une image contient un éventail infini de fréquences spatiales qui sont échantillonnées en utilisant un nombre fini de fréquences. Toutefois, il est difficile de représenter une zone où il existe une transition brutale de signal par une série de Fourier tronquée, c'est-à-dire

comportant un nombre fini de fonctions sinusoïdales. En principe, pour reconstituer cette zone de transition il faudrait un nombre infini d'ondes sinusoïdales, de fréquences, phases et amplitudes différentes. En pratique ce nombre est fini, d'où ces anomalies de reconstruction (Figure 27).

Ils se manifestent principalement dans la direction du codage de phase mais aussi dans celle du codage de fréquence, ce qui permet de les différencier d'un artefact de mouvement qui ne se produit que dans le sens du codage de phase.

La périodicité des striations est liée à la taille de la matrice. Pour diminuer leur intensité, il faut augmenter la taille de la matrice et réduire le champ de vue ce qui favorise le bruit.

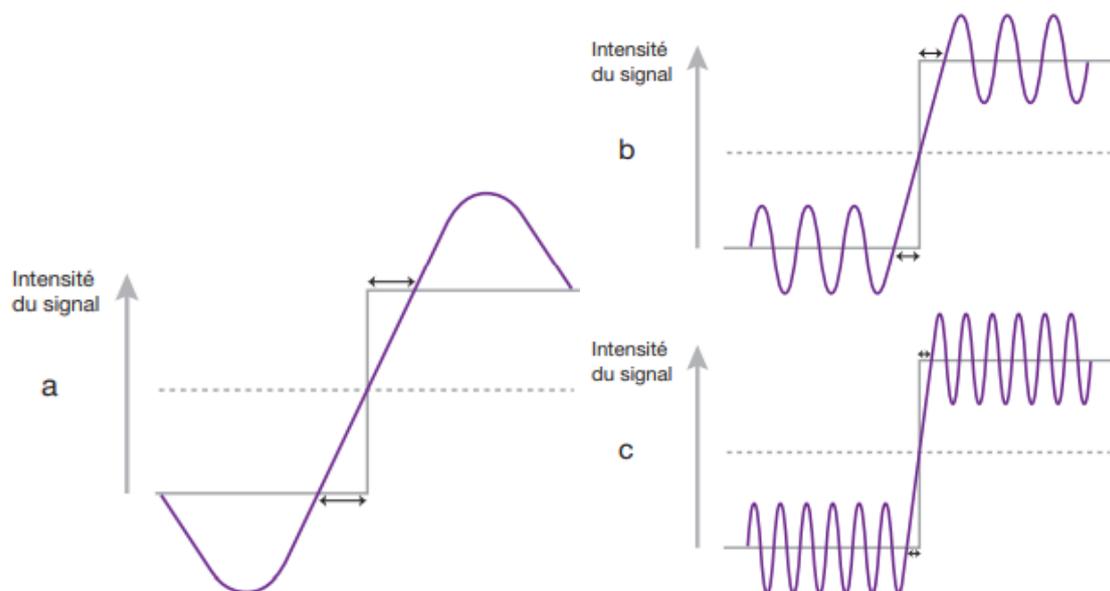


Figure 27: Mécanisme de l'artefact de troncature (14)

## 2.6. Artefacts de volume partiel

Lorsqu'il existe des tissus de nature différente dans un même voxel, l'intensité du pixel correspondant sur l'image est erronée. On l'observe surtout au niveau des marges des structures qui sont alors moins bien définies, ou pour les toutes petites structures qui peuvent ne pas être visualisées.

Pour les éviter, il faut réduire l'épaisseur des coupes, augmenter la résolution spatiale, et acquérir les images perpendiculairement aux structures à risque.

## 2.7. Artefact de déplacement chimique

Le déplacement chimique correspond à la modification de la fréquence de résonance des protons au sein de molécules d'environnements différents (ex : graisse / tissu principalement aqueux). On distingue deux types d'artefact de déplacement chimique :

- Le type I s'observe uniquement dans la direction du codage de fréquence et pour dans champs magnétiques supérieurs à 1 Tesla. Il est dû à un décalage de positionnement des voxels contenant de la graisse. Dans la direction du codage de fréquence, la position est codée par une variation de fréquence de résonance induite par le gradient de lecture. A cause du déplacement chimique, à l'interface graisse/eau, des protons de la graisse situés au même niveau que des protons de l'eau ne vont pas résonner à la même fréquence. Ainsi, les protons de la graisse vont donc être translatés lors de la reconstruction de l'image et seront à l'origine d'un artefact à l'interface eau/graisse, sous la forme d'une bande noire ou blanche (Figure 28).

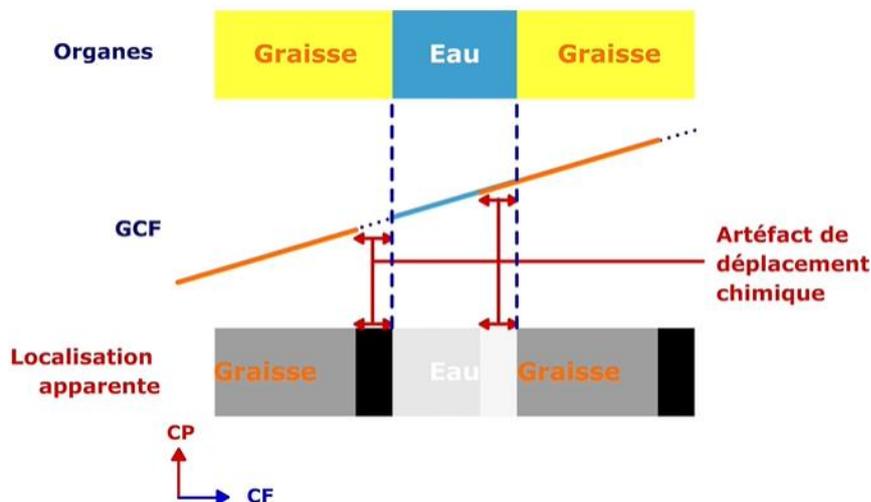


Figure 28:Artefact de déplacement chimique de type I (5)

- Le type II s'observe uniquement avec les séquences écho de gradient et pour des TE particuliers en fonction du champ magnétique. Lors d'une séquence en écho de spin, l'impulsion de 180° rephase les spins. Avec une séquence écho de gradient, l'absence d'impulsion de 180° est à l'origine d'une différence entre les phases des spins de la graisse et de l'eau au moment de l'écho de gradient. Les protons des différents milieux n'ont pas la même fréquence de précession. Pour certains TE ( $TE=X$ ) les spins

des protons de l'eau et de la graisse sont en phase : leurs signaux s'additionnent. Pour d'autres TE (notamment  $TE=X/2$ ) les spins des protons de l'eau et des graisses seront en opposition de phase : leurs signaux se soustraient. Pour ces  $TE=X/2$ , à l'interface eau/graisse, les signaux vont se soustraire dans un même voxel créant ainsi un liseré d'hyposignal à l'interface (Figure 29).

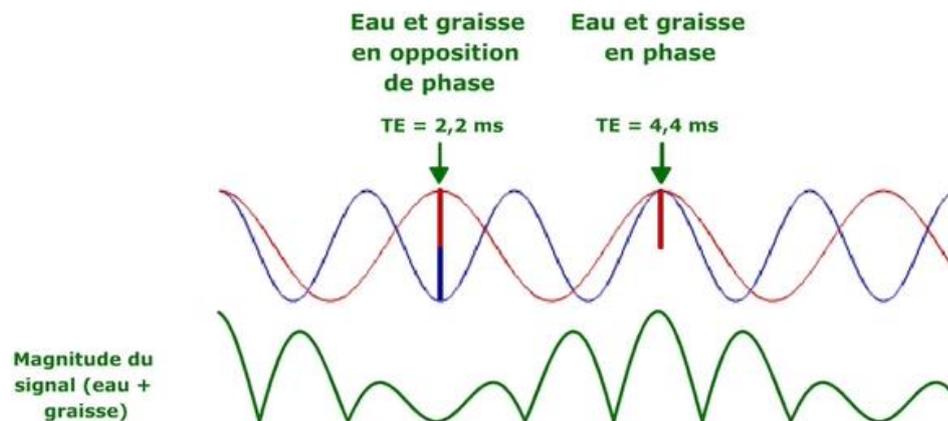


Figure 29: Artefact de déplacement chimique de type II (5)

Pour les diminuer, on peut augmenter la largeur de la bande passante, au détriment du rapport signal sur bruit, ou utiliser des méthodes de suppression de graisse.

## 2.8. Phénomène d'excitation croisée

C'est l'excitation de coupes adjacentes d'une coupe donnée par une impulsion RF destinée normalement uniquement à cette coupe. Cet artefact réduit le rapport signal sur bruit et modifie le contraste. Il est surtout marqué pour les séquences d'écho de spin à TR et TE longs.

L'espacement entre les coupes (minimum 1 mm) permet de l'éviter.

## 2.9. Le phénomène de l'angle magique

L'artefact de l'angle magique peut avoir lieu lorsque les fibres de collagène forment avec l'axe du champ magnétique principal un angle de  $54,7^\circ (\pm 10^\circ)$  : le T2 est rallongé et le signal augmenté, en particulier dans les séquences à TE court.

Pour vérifier qu'il s'agit bien d'une fausse image, on peut orienter différemment la structure à visualiser, ou simplement comparer ces images à celles obtenues en TE long qui est moins sensible.

## VII. Avantages et inconvénients de l'IRM haute résolution 3 Tesla (6,16,17)

### 1. Particularités de l'image obtenue et de sa formation

Généralement avec un IRM haut champ on obtient des images de meilleure qualité en un temps réduit, ce qui explique qu'il soit plus onéreux et plus rare en médecine vétérinaire.

Avec un IRM haut champ :

Le rapport signal sur bruit augmente quasiment linéairement avec la force du champ, ce qui permet une augmentation de la résolution spatiale et de la résolution en contraste.

- De ce fait, l'anatomie est mieux définie et des modifications subtiles peuvent être détectés, ce qui est un atout considérable pour interpréter les images IRM, et dans le cadre de cette thèse décrire plus précisément l'anatomie. Au contraire en IRM bas champ, pour maintenir un bon rapport signal sur bruit, il faut augmenter la taille du pixel ou augmenter l'épaisseur des coupes, mais ceci limite la résolution. De plus, des coupes plus épaisses et une plus faible résolution augmentent le risque d'artefact de volume partiel, ainsi les contours de certaines structures sont moins bien définis et des petites lésions peuvent ne pas être détectés contrairement à un IRM haut champ.
- Par ailleurs, grâce à l'amélioration de la résolution spatiale en IRM haut champ, il est possible de réaliser des acquisitions 3D en haute résolution dans des délais très courts. Cela permet d'observer de manière très fine l'hippocampe, l'oreille interne et détecter de façon très précise les petites lésions de sclérose en plaques chez l'humain, notamment dans les localisations juxta-ventriculaires (16)

- Cependant, l'utilisation d'IRM haut champ entraîne une diminution du contraste en T1. Les valeurs de T1 des différents tissus augmentent avec  $\vec{B}_0$ , le TR doit donc être allongé pour maintenir un contraste suffisant. D'une manière générale, les séquences écho de gradient sont plus efficaces que les séquences écho de spin en termes de contraste T1.

La taille de l'aimant en IRM haut champ implique un champ de vue plus large et plus homogène.

- Ainsi il est possible de capter plus de structures anatomiques en moins d'études qu'avec un IRM bas champs ce qui impacte directement le temps d'acquisition.
- De plus, les images produites en périphérie de champ de vue en IRM haut champ présentent un rapport signal sur bruit plus élevé, avec plus de détails car les hétérogénéités de champ sont plus faibles, et sont moins enclins aux artefacts (artefact de repliement).
- Cependant, l'utilisation d'IRM haut champ implique des hétérogénéités de  $\vec{B}_1$ . Les caractéristiques de conductivité des tissus étant différentes, on peut observer des hétérogénéités d'excitation de l'impulsion RF. Ce phénomène existe déjà à 1,5T mais est plus prononcé à 3T, car la longueur d'onde de l'impulsion RF est proche de la taille des organes, ce qui conduit à des interférences appelées « résonances diélectriques ». Ce champ  $\vec{B}_1$  hétérogène se manifeste alors par un signal non uniforme ainsi que des chutes de signal localisées.

L'IRM haut champ présente des effets sur les artefacts : les artefacts sont moins présents ou moins visibles.

- Les artefacts de mouvements sont moins fréquents du fait de la diminution du temps d'acquisition des coupes.
- Les artefacts de déplacement chimique sont exacerbés à haut champ car la différence de signal entre l'eau et la graisse est la plus importante (220 Hz contre 25 Hz à bas champ), mais ceci rend la suppression de graisse plus facile grâce à l'utilisation de

séquences de saturation de graisse. La saturation de graisse est d'ailleurs une solution pour réduire les artefacts de déplacement chimiques en IRM haut champ sans dégrader la qualité de l'image. En effet, une autre solution serait d'augmenter la bande passante de signal, mais ceci réduit le rapport signal sur bruit et la résolution spatiale, qui pourrait être optimisée entre autres par une diminution de l'épaisseur des coupes, mais cela réduirait encore plus le rapport signal sur bruit. L'utilisation d'IRM haut champ nécessite donc d'être prudent afin de ne pas abaisser le rapport signal sur bruit au même niveau voire plus bas que celui de l'IRM bas champ. (31)

- Les artefacts d'hétérogénéité de champ sont moindres.
- La susceptibilité magnétique augmente avec B<sub>0</sub>, mais ceci peut être compensée par une diminution du temps d'écho, et cela permet aussi une meilleure détection des séquelles hémorragiques ou des calcifications en écho de gradient.
- Les artefacts de volume partiel sont quant à eux palliés en haut champ par le fait que l'épaisseur des coupes peut être diminuée sans perdre trop de signal.

Moins de traitement d'image post-acquisition sont nécessaires avec l'IRM haut champ. En effet, les traitements additionnels permettent une meilleure lecture de l'image mais engendre une perte d'information, c'est le cas de l'IRM bas champ.

Le gain de temps des examens avec des protocoles d'acquisition optimisés, ainsi que la qualité des images et des informations apportées, justifie la place croissante de l'IRM 3 Tesla, notamment en neuro-imagerie et ainsi de l'utilisation de ce dernier dans cette thèse. Les principaux freins sont les contraintes techniques : L'appareillage et donc l'examen en lui-même sont plus onéreux, l'installation nécessite une salle plus spacieuse et un renforcement de la cage de Faraday.

## 2. Utilisation particulière

Les avantages de l'IRM haut champ ont permis de développer certaines utilisations spécifiques de l'IRM :

### - L'imagerie de diffusion

Elle permet d'obtenir des images quantitatives du déplacement microscopique des molécules (principalement de l'eau) dans les tissus. Le mouvement de diffusion des molécules d'eau nous renseigne sur les obstacles qu'elles rencontrent. Dans l'axone, les molécules d'eau voient leur mouvements restreints dans le sens perpendiculaires à l'axe de l'axone, à cause de la gaine de myéline, contrairement au sens parallèle à l'axe de l'axone. Ainsi grâce au coefficient de diffusion de l'eau il est possible de construire le trajet des faisceaux axonaux (tractographie) en attribuant à chaque point de l'encéphale un direction principale de diffusion. On observe alors l'intégrité de ces fibres (Figure 30). On peut ainsi étudier à 3T la structure cérébrale avec une haute résolution spatiale grâce à l'augmentation du rapport signal sur bruit et à l'utilisation des techniques d'imagerie parallèle qui diminuent les artefacts de distorsion. Cela fait l'objet d'une autre thèse expérimentale chez le dromadaire (Imagerie de tenseur de diffusion de l'encéphale de dromadaire (*Camelus dromedarius*), Pailloux, 2020).

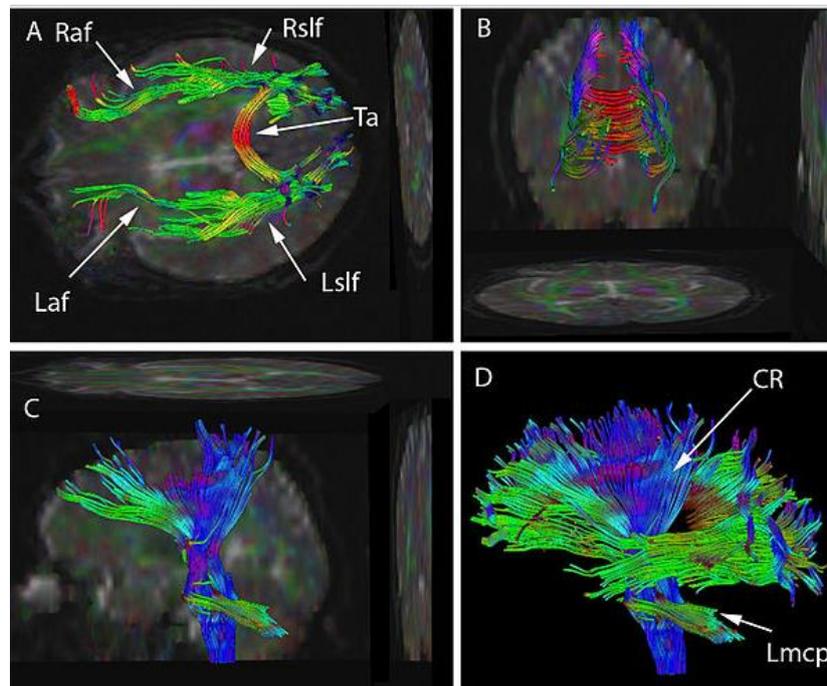


Figure 30: Exemple d'images d'imagerie de diffusion (tractographie) chez un patient humain (Wikipedia)

- **Angiographie cérébrale**

L'augmentation du champ magnétique entraîne un allongement du T1 du tissu cérébral et améliore ainsi le contraste entre les structures vasculaires et le tissu adjacent. Ceci a pour effet d'optimiser considérablement l'angiographie cérébrale avec ou sans injection de produit de contraste. On peut ainsi explorer les structures vasculaires distales et réaliser de manière plus performante les séquences dynamiques.

- **Spectroscopie**

Cette dernière technique a pour but de visualiser les différentes molécules, ainsi que leur concentration, contenues dans un tissu biologique, grâce au déplacement chimique de ces différentes substances. La variation de concentration de ces métabolites permet de caractériser certaines pathologies

- **Imagerie fonctionnelle**

Lorsqu'une zone cérébrale est activée par une stimulation extérieure, elle est enrichie en oxygène. L'apport d'oxygène en grande quantité via l'oxyhémoglobine entraîne un réhaussement du signal. On peut de cette manière voir le cerveau fonctionner en temps réel. Elle commence seulement à s'installer dans les consultations de neuroradiologie notamment en tant qu'outil de planification des interventions chirurgicales, par exemple en localisant les zones fonctionnelles à préserver lors d'exérèse tumorale. Elle trouve aussi des applications dans l'évaluation des pathologies responsables des troubles cognitifs tels que la maladie d'Alzheimer et la sclérose en plaques.

## VIII. Imagerie de référence pour l'exploration du système nerveux

L'exploration des pathologies neurologiques nécessite des méthodes d'imagerie. Outre la myélographie, les deux modalités d'imagerie utilisables sont la tomodensitométrie (scanner) et l'IRM. Ce dernier est le gold standard pour l'exploration de l'encéphale.

L'IRM donne la meilleure résolution en contraste des tissus nerveux. Comme vu précédemment, les différentes séquences d'acquisition permettent de distinguer, sans difficulté, au sein du parenchyme cérébral, les espaces sous-arachnoïdiens et la substance blanche de la substance grise. Il est possible de séparer plus spécifiquement deux tissus différents contrairement aux autres techniques d'imagerie.

L'IRM offre la possibilité d'acquérir des images dans les trois plans de l'espace, à l'inverse de la radiographie classique et du scanner qui ne permettent que l'obtention de coupes transversales. Cela permet une précision de la taille et la localisation de la lésion.

NB :Le système informatique du scanner permet une reconstruction en trois dimension grâce aux coupes obtenues. Cela implique une perte de résolution et donc une altération de l'interprétation des images.

La tomodensitométrie permet une excellente visualisation des structures osseuses. C'est une technique rapide permettant de limiter la durée d'anesthésie. Le scanner ne présente pas, contrairement à l'IRM d'artefacts liés aux implants ferromagnétiques. Elle permet de détecter avec une grande sensibilité les éléments minéralisés de petite taille et de mettre en évidence précocement les hémorragies. En revanche, la technique présente de nombreux artefacts, notamment de bord d'os, lors de l'exploration de la fosse postérieure, rendant difficile l'examen du cervelet et du tronc cérébral.

Un avantage sur la myélographie est la possibilité d'orienter le diagnostic lors de myélopathies cervicales. Lors de compression médullaire, la myélographie permet d'objectiver et de localiser la compression, et de déterminer une éventuelle origine osseuse, alors que l'IRM donne souvent un diagnostic plus fin en permettant la visualisation du tissu à l'origine de cette compression. Elle permet aussi de donner un pronostic.

De plus, comme nous l'avons vu au paragraphe VII.2. l'IRM de diffusion et fonctionnelle permettent d'aller beaucoup plus loin en neuro-imagerie.

# PARTIE 2 : LE DROMADAIRE ET SON IMPORTANCE EN AFRIQUE

## I- Généralités (18)

### 1. Taxonomie

Le dromadaire, *Camelus dromedarius* est un ruminant qui appartient à la famille des Camélidés, qui est incluse dans l'ordre des Artiodactyles (pieds à deux doigts). Les Artiodactyles se décomposent en trois groupes, dont celui des Tylopodes, auquel appartiennent les Camélidés (Figure 31).

Génétiquement, il n'y a pas de différence entre les camélidés, ils possèdent tous 37 paires de chromosomes ( $2n = 74$ ). Les différences entre ces espèces se situent au niveau des formes de ces chromosomes, avec trois groupes de formes chez les dromadaires. Cette proximité génétique a entraîné une compatibilité reproductive entre les différents camélidés. L'hybridation entre le chameau Bactriane et le dromadaire est possible et fréquente dans certaines régions d'Asie centrale (19).

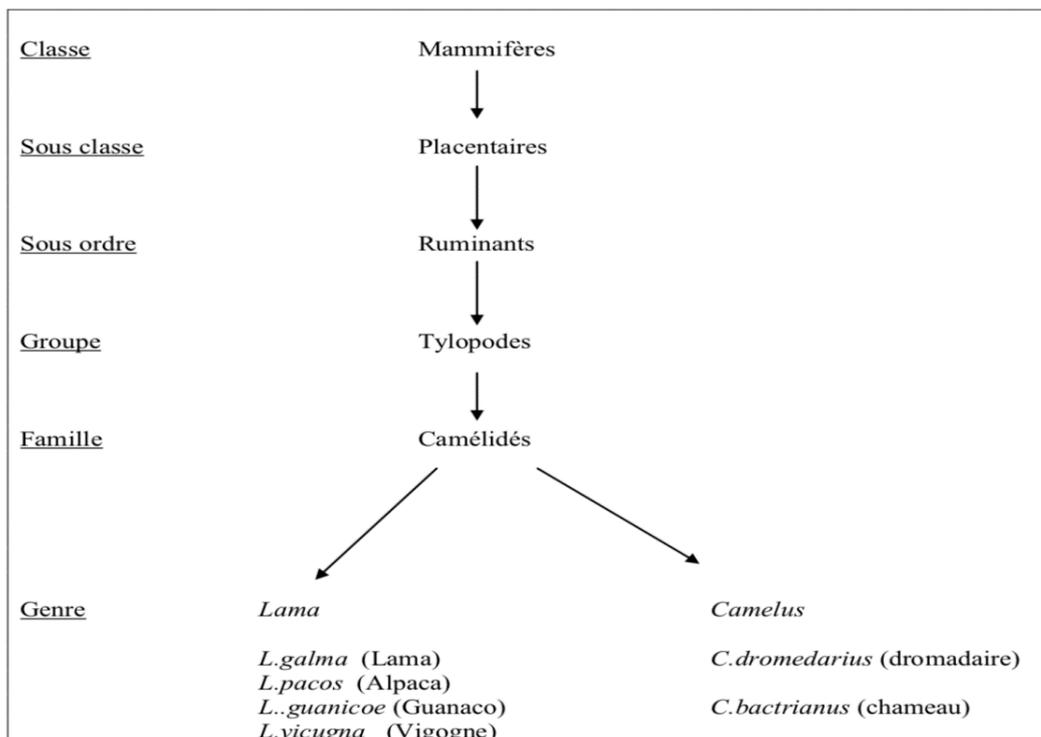


Figure 31: Taxonomie des Camélidés et place du dromadaire (20)

## 2. Effectifs camélins

### 2.1. Distribution dans le monde

Le dromadaire se distingue du chameau de Bactriane au niveau de son anatomie mais aussi par son aire de répartition géographique. Le premier est l'animal des déserts chauds d'Afrique, du Proche et du Moyen-Orient jusqu'au désert du Thar en Inde, le second est celui des déserts froids d'Asie Centrale jusqu'aux confins de la Mandchourie en Chine. Les deux espèces peuvent néanmoins cohabiter en quelques rares endroits (20).

### 2.2. Effectifs dans le monde

La réalisation d'un recensement précis des camélins dans le monde est compliqué, car il s'agit principalement d'animaux élevés par des populations nomades, qui se déplacent fréquemment, et parce qu'il n'existe aucune vaccination obligatoire. Dans le monde arabe le nombre total de têtes camelines est estimé à 25 millions (18). Cela représente moins de 1% des herbivores domestiques total du monde. Plus de 60% de ces effectifs, sont localisés dans la Corne de l'Afrique (Somalie, Ethiopie, Djibouti, Kenya, Soudan), et 80% sur le continent africain (Figure 32). En 2011, la population cameline en Tunisie était de 237 000 têtes (21).

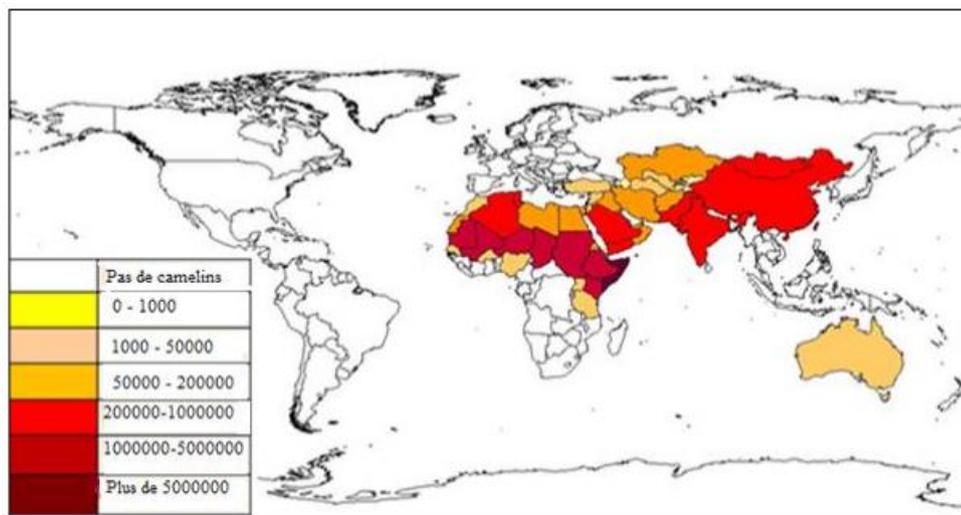


Figure 32: Effectifs des camélidés dans le monde (2012) (18)

Le nombre de dromadaires dans le monde est en hausse avec un taux de croissance annuel de 3,4%. Leur nombre a plus que doublé depuis le premier recensement en 1961 (Figure 33).



Figure 33: Evolution effectif mondial des Camélidés (18)

En observant les différentes régions, la croissance des effectifs des camélidés n'est pas uniforme. Il est possible de distinguer cinq types de tendances (22) (Figure 34 et Figure 35) :

- Pays à forte croissance récente (Algérie, Tchad, Mali, Mauritanie, Oman, Qatar, Syrie, Émirats arabes unis, Yémen, Ethiopie et Erythrée)
- les pays à croissance régulière (Bahreïn, Burkina Faso, Djibouti, Egypte, Iran, Kenya, Niger, Nigéria, Pakistan, Arabie saoudite, Somalie, Soudan, Tunisie et Sahara occidental)
- pays avec un nombre stable (Liban, Libye et Sénégal)
- pays avec une diminution du nombre de dromadaires (Afghanistan, Chine, Inde, Jordanie, Mongolie et ex-URSS)
- pays à haut déclin du nombre de dromadaires (Irak, Maroc et Turquie)

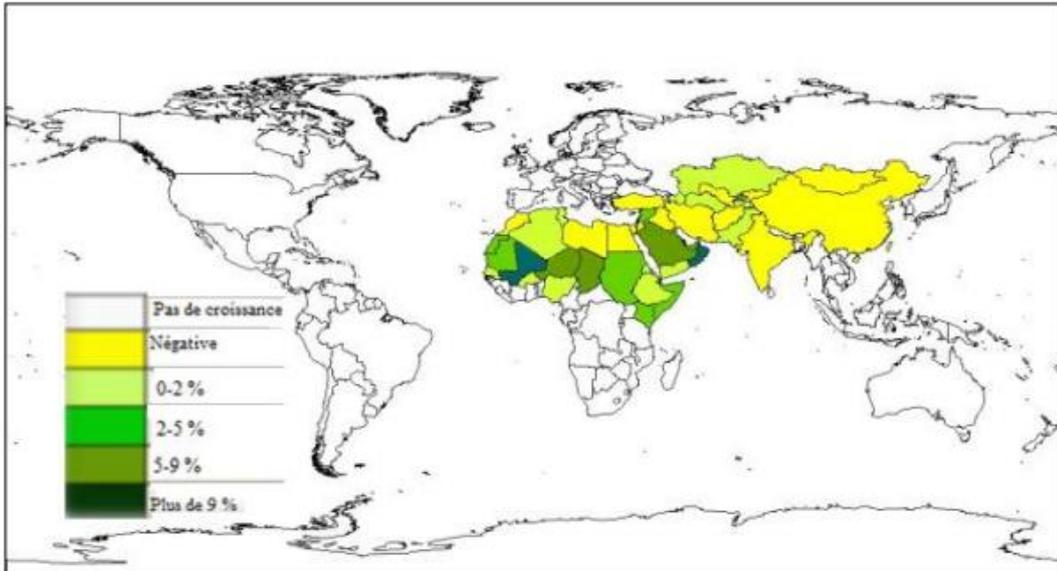


Figure 34: Croissance de la population cameline mondiale (1963-2009) (22)

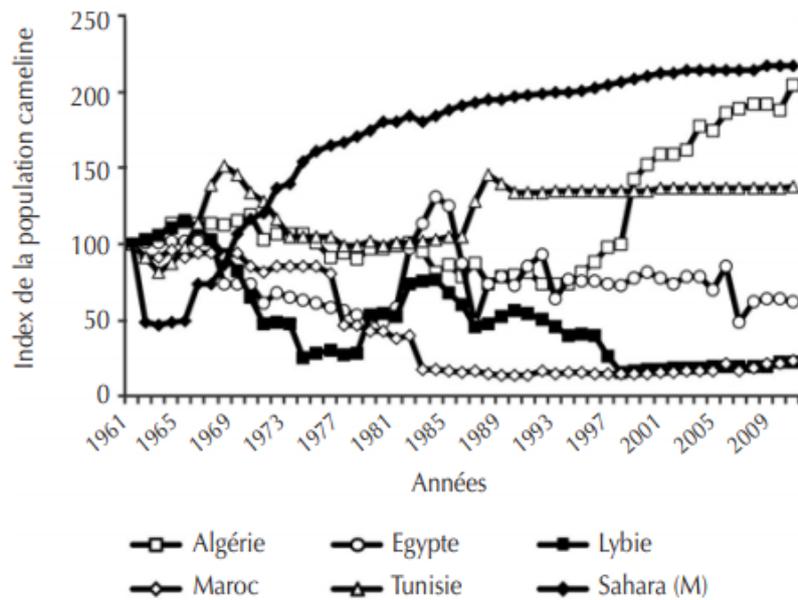


Figure 35: Profil de croissance des effectifs camelins en Afrique du Nord (1961-2011) (21)

### 2.3. Densité des dromadaires

Il est possible de distinguer quatre catégories en fonction de l'effectif de dromadaires par rapport à la Biomasse des Herbivores Domestiques (BHD) (20).

#### *2.3.1. Densité très faible*

Cette catégorie concerne les pays qui ont une population caméline peu nombreuse (effectif < 1% de la BHD) et dans lesquels l'élevage camelin représente une activité mineure. En Afrique, on peut citer le Sénégal, le Nigeria et le Burkina-Faso. En Asie, il s'agit de la Turquie, de la Syrie, de l'Iran et du Liban, pays dans lesquels l'élevage des petits ruminants (surtout ovins) s'avère prépondérant.

#### *2.3.2. Densité faible*

Cette catégorie concerne les pays où l'effectif est compris entre 1 et 8 % de la BHD et dans lesquels l'élevage camelin représente une part importante de l'activité économique pour une partie de la population. En Afrique, cela concerne tous les pays d'Afrique du Nord, à l'exception de la Tunisie, c'est-à-dire le Maroc hors Sahara, l'Algérie, la Libye et l'Egypte, mais aussi le Mali, l'Ethiopie et le Kenya. En Asie, les pays de cette catégorie sont le Pakistan, l'Afghanistan, l'Irak et l'Oman.

#### *2.3.3. Densité moyenne*

Cette catégorie se compose des pays dans lesquels l'élevage camelin constitue une part importante de l'économie agricole et l'effectif est compris entre 8 et 20% de la BHD. La Tunisie est le seul pays de l'Afrique du Nord concerné. Mais on y retrouve surtout les pays sahéliens : Niger, Tchad et Soudan. En Asie, cela concerne les pays de la péninsule arabique, berceau de l'espèce, comme l'Arabie Saoudite, la Jordanie, la Bahreïn, le Koweït et le Yémen.

#### *2.3.4. Densité forte*

Cela concerne peu de pays, au sein desquels la place culturelle du dromadaire est centrale et l'effectif est supérieur à 20% de la BHD. En Afrique, on trouve la Somalie, la Mauritanie et dans les provinces sahariennes du Maroc et Djibouti. En Asie, ce sont les Emirats Arabes et Qatar. Dans ces Etats, l'économie caméline est dérisoire comparée à l'extraction pétrolière, mais le dromadaire est culturellement indétrônable en dépit des évolutions sociologiques liées à l'enrichissement de la population.

### 3. Le dromadaire dans son milieu naturel

De tous les animaux, le dromadaire est le plus adapté aux régions chaudes à climat subdésertique et désertique des domaines méditerranéens, tropical et subtropical. La rareté de ressources hydriques et une végétation spontanée dépendante des aléas climatiques caractérisent ces régions. Ce milieu désertique rend l'agriculture presque impossible ainsi l'exploitation pastorale est d'autant plus exclusive. Les climats de l'aire de répartition du dromadaire sont caractérisés par une longue saison sèche, une faible pluviosité très variable et une importante amplitude thermique saisonnière et nycthémérale (23).

### 4. Morphologie fonctionnelle du dromadaire

L'anatomie générale du dromadaire est particulière et intrigante (Figure 36). Ces particularités font de lui le plus grand animal adapté à la vie désertique. Le dromadaire est adapté aux milieux arides avec des températures très élevées, contrairement au chameau qui est adapté aux milieux arides froids (d'où sa localisation préférentielle en Asie Centrale). Le dromadaire est plus élancé, grand et longiligne que le chameau. Il a de longues pattes qui éloignent son corps du sol chaud et qui lui permettent de parcourir de longues distances. Il possède aussi un poil plus court et moins abondant que son cousin à deux bosses. Il peut aller de 1,8 à 2,2 mètres au garrot et peut atteindre 2,4 mètres au sommet de la bosse.

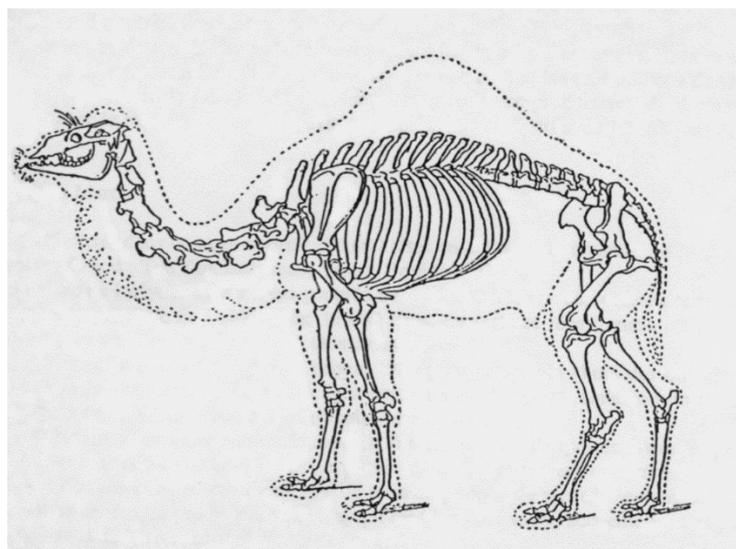


Figure 36: Morphologie générale du dromadaire (24)

Chez les Camélidés, seul l'avant du sabot touche le sol. Ils possèdent des doigts élargis et un coussinet plantaire charnu. C'est grâce à ces caractéristiques que le dromadaire se déplace aisément sur le sable mou du désert. Le dromadaire, le chameau et la girafe sont les seuls animaux qui avancent en levant les deux pattes d'un même côté : on dit qu'ils marchent à l'amble.

Son long cou lui permet de se nourrir d'une végétation peu consommée par les autres ruminants (feuilles d'arbres). Sa bosse située sur son dos est composée uniquement de tissus adipeux et constitue une réserve d'énergie importante dont le volume peut être modifié selon son état nutritionnel. La longévité du dromadaire est d'environ 30 ans.(25)

## 5. Particularités de l'anatomie du dromadaire

Les Camélidés possèdent des caractéristiques qui les distinguent des ruminants domestiques :

- Au niveau de la dentition on trouve une paire d'incisives à la mâchoire supérieure, une paire de canine sur chaque mâchoire, trois prémolaires à la mâchoire supérieure et deux à la mâchoire inférieure.
- Le foie est lobé de façon importante et est dépourvu de vésicule biliaire.
- Les pré-estomacs présentent des différences dans leur structure et leur fonction (26). Les Camélidés possèdent des sacs glandulaires accolés au rumen qui participent à la digestion du contenu ruminal.
- Le dromadaire est dépourvu de sabot, il est ainsi digitigrade et non onguligrade. La marche dans des zones rocheuses peut ainsi être traumatique.

## 6. Une physiologie générale adaptée au milieu de vie

Les camélidés, font partis des ruminants, et pourtant ils présentent certaines analogies avérées avec les équidés et les porcins ainsi que des particularités spécifiques à cette espèce. Certaines de ces particularités ont permis l'explication de phénomènes physiologiques d'adaptation chez les dromadaires (27).

## 6.1. Adaptation à la chaleur du milieu de vie

Contrairement à l'idée reçue la bosse du dromadaire n'est pas une réserve d'eau, mais d'énergie. Il s'agit d'un amas de tissus adipeux blanchâtre pouvant atteindre les 90 kg pour un animal engraisé (20). La teneur de la bosse en matière grasse varie de 53 à 68 g pour 100g (28). Cette accumulation localisée évite au gras de se répandre en région sous-cutanée dans les autres parties du corps. Le dromadaire se refroidit alors mieux. Ce regroupement localisé des graisses sur le dos de l'animal joue ainsi un rôle dans sa thermorégulation. En effet l'absence de gras sous-cutané facilite la dissipation de la chaleur. De plus grâce à cette importante réserve lipidique, il produit une grande quantité d'eau métabolique par des réactions physiologiques d'oxydation des graisses.

En saison chaude, il peut rester sans boire 2 à 3 semaines et en saison plus douce 4 à 5 semaines. Après une longue période de privation le dromadaire est capable de consommer 200 litres d'eau en quelques minutes, ce qui fait de lui le seul mammifère capable de boire autant d'eau aussi rapidement. En effet, chez les autres animaux, l'absorption d'une trop grande quantité d'eau entraîne l'éclatement des globules rouges, ce qui peut conduire à la mort de l'animal (29).

Le dromadaire a la capacité de faire varier sa température interne en fonction de la chaleur externe dans une proportion importante de l'ordre de 8°C (34-42°C) ce qui autorise à considérer que cet animal n'est pas un strict homéotherme (27). Lorsque la température ambiante décroît, la température interne du dromadaire peut descendre à 34°C. Cependant, durant les heures les plus chaudes, la température peut atteindre une valeur maximale de 42°C (29,30). Pour la plupart des mammifères un écart de température corporelle aussi important entraîne la mort.

## 6.2. Adaptation à la sous-alimentation des zones désertiques

En milieu désertique les ressources alimentaires sont faibles, dispersées et très variables dans le temps. Le dromadaire présente une meilleure capacité à digérer les fourrages pauvres d'un point de vue nutritionnel par rapport aux autres ruminants domestiques. Cette supériorité s'explique par une plus grande rétention des particules solides dans les pré-estomacs, se traduisant par un temps de contact plus long des aliments avec les micro-organismes qui les digèrent (26).

Dans toutes les espèces de mammifères, les lipides constituent la forme de stockage d'énergie la plus importante dans l'organisme, chez le dromadaire elle est concentrée dans sa bosse. Contrairement aux autres ruminants qui assurent l'essentiel de leurs besoins énergétiques à partir de la production d'acides gras volatiles et génèrent ainsi une faible quantité de glucose, le dromadaire présente une glycémie comparable à celle de l'homme (20,29). Il présente une glucogénèse très active au niveau du foie et du rein, ce qui lui permet de maintenir une glycémie presque normale en cas de privation de nourriture, sans céto-genèse.

De plus l'urine du dromadaire est très concentrée, ce qui lui permet d'économiser un maximum d'eau, notamment en cas de déshydratation (29). Le foie est aussi un organe qui diminue les rejets liquides en recyclant son urine soit en protéines soit en eau. Lorsque le dromadaire dispose d'une ration déficitaire en protéines, la quantité d'urée excrétée devient très faible. En situation de déficit protéique, il excrète 1% seulement de son urée, contre 23% chez le mouton. Ainsi, le dromadaire a la capacité de recycler de façon importante l'urée, ce qui permet de répondre aux déficits protéiques d'origine alimentaire et de maintenir la protéosynthèse ruminale.

En ce qui concerne les minéraux, le métabolisme du dromadaire est orienté vers une anticipation des périodes de sous-nutrition minérale. Il signe son adaptation à ces périodes de restriction alimentaire par divers mécanismes tels que l'augmentation des capacités d'absorption en cas de pénurie, une plus grande capacité de stockage de certains éléments minéraux, une plus grande tolérance à certains électrolytes et le maintien des activités enzymatiques de base en dépit des situations déficitaires (26,29,31).

### 6.3. Physiologie de la reproduction

La femelle dromadaire présente des particularités de la physiologie de la reproduction qui se caractérise par une puberté et un âge de mise à la reproduction tardifs. La gestation dure en moyenne une année avec un intervalle entre les mises bas qui peut dépasser deux années (Figure 37). L'activité sexuelle se déroule généralement durant la période où les températures sont basses et les pluies abondantes, et où l'herbe est de qualité. La saison sexuelle s'étend alors du mois de novembre au mois d'avril en Arabie Saoudite et en Tunisie par exemple. Le cycle des camélidés est à ovulation provoquée en réponse à un coït (pic de LH déclenché par l'accouplement). Ainsi à la fin de la croissance folliculaire, s'il n'y a pas de coït, l'ovulation n'est pas induite et donc le follicule régresse (32,33).

L'ovulation chez les camélidés se produit 24-48 h après l'accouplement. Il est bien établi maintenant que l'accouplement avec un mâle complet ou vasectomisé induit l'ovulation chez les camélidés, mais le mécanisme précis n'est pas encore bien connu. Chez la femelle dromadaire, le déterminisme de l'ovulation est une combinaison de stimulus incluant des facteurs chimiques du plasma séminal, des réponses neuro-hormonales liées au coït et des effets des phéromones mâles.

Age de la puberté	2 à 4 ans
Age de la première mise-bas	3,5 à 7 ans
Durée de la gestation	370 à 390 jours
Intervalle entre 2 mises-bas	15 à 36 mois
Nombre de naissances par carrière	3 à 7
Durée de la carrière de reproduction	10 à 15 ans
Taux de fécondité annuel d'un troupeau extensif	30-35%

Figure 37: Paramètres de la reproduction chez le dromadaire (20)

## II- IMPORTANCE DU DROMADAIRE ET SYSTEMES DE PRODUCTION

Les zones sèches et les déserts couvrent 41% de la superficie mondiale, elles sont souvent consacrées principalement à des activités pastorales. L'élevage des herbivores domestiques, dans des systèmes pastoraux extensifs, y joue en effet un rôle essentiel pour exploiter des ressources naturelles limitées et pour subvenir aux besoins des populations grandissantes qui habitent ces régions. Cela explique l'importance économique de ce type d'élevage. Cette partie est consacrée à montrer l'importance du dromadaire et des systèmes d'élevage camelin.

### 1. Importance socio-économique du dromadaire

En Tunisie, le secteur de l'élevage est un pilier de l'économie nationale, à travers la création d'emplois et surtout la satisfaction des besoins en produits animaux des populations rurales et urbaines. L'élevage représente la part la plus importante de la production agricole . Il a contribué en 2001 pour 37,5% de la valeur de la production agricole totale selon le Ministère de l'agriculture tunisien (34).

L'élevage du dromadaire a joué un rôle important dans la vie sociale et économique des populations des zones sèches d'Afrique et d'Asie Centrale. Le dromadaire fait partis de l'histoire culturelle des grandes civilisations nomades des régions chaudes et sèches qui sont caractérisées par une période défavorable dont la durée est régulièrement supérieure à huit mois et par des précipitations rares comprises entre 50 et 550 mm par an. Le dromadaire représente la réussite sociale pour son propriétaire (35).

Au début, l'élevage camelin a connu un essor important avec le transport caravanier qui lui a valu le nom de "vaisseau du désert". Cependant, en raison des progrès réalisés dans la mécanisation, l'urbanisation associée à une sédentarisation et la sélection génétique chez les autres ruminants, l'élevage camelin a été mis de côté pour cause de non rentabilité. Toutefois, durant ces dernières décennies, avec l'avancée du désert, l'élevage du dromadaire ne cesse de progresser et les effectifs augmentent régulièrement (Figure 38).

Pour se rendre compte de l'importance du cheptel camelin, il faut le rapporter à l'ensemble du cheptel d'herbivores domestiques (bovins, ovins, caprins, et camélins). Ainsi, si on considère le poids total des herbivores domestiques aussi appelé Biomasse d'Herbivores Domestiques (BHD), la part représentée par les dromadaires est de (36) :

- 42 % de la BHD en Somalie
- 37 % aux Emirats Arabes Unis
- 26 % en Mauritanie,
- 16 % au Royaume de l'Arabie Saoudite
- 11 % au Soudan
- 10 % au Niger et < 10% dans les autres pays dont la Tunisie (9%)

En Somalie et en Mauritanie, les dromadaires ont maintenu leur rôle socio-économique important et constituent une grande part des exportations animales. Alors qu'aux Emirats Arabes Unis, le dromadaire est devenu insignifiant économiquement comparé au secteur pétrolier, mais restent important en terme social (courses de dromadaires). Sur le plan socioéconomique, le dromadaire est irremplaçable dans les régions sèches où il a participé à l'histoire de ces dernières. Cet animal joue aussi un rôle d'équilibre écologique important dans les écosystèmes arides.

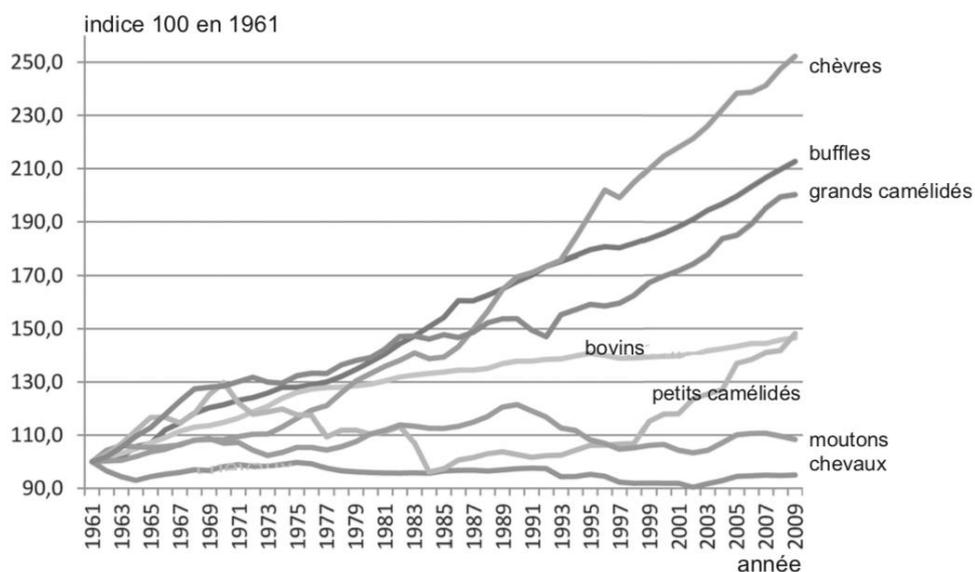


Figure 38: Croissance de la population mondiale des herbivores domestiques (22)

## 2. Importance écologique du dromadaire

La présence des dromadaires est nécessaire au maintien de l'équilibre écologique des zones pastorales arides et au maintien des écosystèmes:

Le dromadaire, étant digitigrade, ses pieds mous et charnus préservent la structure des sols et leur piétinement a une faible incidence sur le couvert végétal contrairement aux autres ruminants onguligrades. Ainsi, il contribue à maintenir les écosystèmes fragiles que sont les déserts. Le dromadaire se contente des ressources alimentaires de faible valeur pastorale et permet ainsi leur mise en valeur. En effet, il peut valoriser des plantes ligneuses et épineuses rejetées par les autres herbivores. Il ménage également la végétation grâce à son broutage rationnel : prélèvements sélectifs des espèces et quantité faible. Ceci permet le maintien de certaines espèces végétales capables de stabiliser les dunes et de lutter ainsi contre l'ensablement.

De plus, une étude a montré la présence de pousses de plantes sur les crottes de dromadaire. Ainsi, il dissémine des graines de certaines espèces pastorales en transportant les semences plus loin que leur lieu d'origine (37). Le dromadaire est un acteur majeur sur le plan écologique contrairement aux bovins, ovins et caprins.

Le dromadaire peut rester de longues périodes sans boire et peut de ce fait pâturer à des endroits où les points d'eau sont absents. Cela permet au dromadaire de se déplacer sur un rayon de plus de 80 km autour d'un point d'eau contrairement aux bovins qui sont contraints de se tenir au maximum à 40 km d'un point d'eau du fait de leurs abreuvements rapprochés (environ tous les 2 jours au maximum). Cette aptitude évite la concentration des troupeaux autour des puits d'où une meilleure répartition de l'habitat en dehors de la saison sèche qui entraîne un effet bénéfique sur la végétation des zones non pâturées.

## 3. Modes et systèmes d'élevage des dromadaires

La Tunisie est un pays de tradition pastoralisme qui était prédominé par le système d'élevage extensif. Cela impliquait une importante mobilité, nécessitant des mouvements qui dépendaient des ressources limitées. Ce système a connu quelques modifications depuis quelques années, amenant à de nouveaux systèmes d'élevage. Du système pastoral nomade,

on a assisté à la mise en place de systèmes pastoraux transhumants, semi sédentaires ou des systèmes agropastoraux associant l'agriculture à un élevage sédentaire, et des systèmes intensifs ou semi-intensifs (38). La classification des systèmes de production animale se fait souvent selon la quantité d'intrants, la consommation de ces derniers et par le matériel génétique utilisé (systèmes extensif, semi-intensif et intensif). Mais dans cette thèse nous aborderons une caractérisation qui est établie selon le mode de surveillance, la mobilité et les niveaux de performances.

En Afrique, suivant le mode de contrôle des troupeaux il est possible de distinguer :

- Le système libre où les troupeaux restent une longue période sans gardiennage. Les éleveurs attendent leurs troupeaux à des points d'eau fixes, durant des périodes spéciales de l'année comme la saison des naissances ou pour le contrôle sanitaire. Ce mode est souvent adopté lorsque l'année est jugée défavorable sur le plan pluviométrique. De cette manière le propriétaire peut vivre et pratiquer une autre activité dans la cité. Les dromadaires pouvant être géolocalisés. (39)
- Le système contrôlé où le troupeau est gardé et assisté par un chamelier. Ce dernier contrôle les déplacements, l'abreuvement et assiste les pratiques de naissance et les traitements sanitaires. Dans le système contrôlé la moyenne de taille du troupeau varie d'un pays à l'autre (20 à 100 têtes par troupeau en Afrique). Ce système d'élevage est mis en place dans les pays où l'élevage joue un rôle intéressant d'un point de vue économique. L'exemple de ce système est celui existant en Afrique du Nord (Tunisie, Libye et Maroc). Ce mode se développe aussi dans les pays les plus riches, permettant aux propriétaires fortunés de ne s'occuper de ses bêtes uniquement en fin de semaine (39).

Les dromadaires peuvent être élevés selon les trois systèmes d'élevage existants tel que nomade, transhumant et sédentaire. Malgré une augmentation de la sédentarité, les deux premiers sont les plus utilisés avec toutefois une prédominance de la transhumance. Cela s'explique par les fortes contraintes liées au milieu aride : écosystèmes variables, faible disponibilité des pâtures et des points d'eau répartis sur de longues distances. Ces contraintes imposent aux éleveurs la mise en place de systèmes d'élevage extensifs avec un haut degré de mobilité, au gré des ressources.

### 3.1. Systèmes migratoires

Le terme "pastoralisme" fait référence au mode d'exploitation agricole fondé sur l'élevage en pâturages naturels, et donc dépendant des ressources naturelles. On parle de systèmes où l'élevage est l'activité principale, et est pratiqué de manière extensive avec une faible quantité d'intrant, sans pratiques de cultures fourragères ce qui génère de nombreux déplacements, parfois sur de longues distances. Il s'agit d'une forme d'élevage en troupeaux, composés de différentes espèces (ovins, ânes, caprins, chevaux, camelins, bovins), mélangées ou non. En général dans ces systèmes l'éleveur maintient les habitudes transmises par ses ancêtres aux dépens des nouvelles techniques. Tandis que le terme "agro-pastoralisme" désigne la coexistence entre activités agricoles et activités pastorales.

Les systèmes d'élevage mobiles se caractérisent par des déplacements annuels ou saisonniers vers de nouveaux pâturages selon les disponibilités en eau et les ressources alimentaires. On distingue le nomadisme et la transhumance.

#### 3.1.1. *Nomadisme*

Les éleveurs nomades n'ont pas d'habitat fixe permanent et toute la famille suit les déplacements du troupeau, parfois sur de longues distances. Cette importante mobilité, entraîne une faible pratique de l'activité agricole, voire aucune. Le nomadisme est défini comme un ensemble de déplacements irréguliers anarchiques entrepris par un groupe d'effectif variable dans des directions imprévisibles. On peut qualifier cette pratique d'opportuniste, dans les régions les plus sèches et chaudes. Il y a une régression de ce type de mobilité, mais parallèlement, une transformation de la nature de ces déplacements qui demeurent indispensables dans bien des systèmes (38).

#### 3.1.2. *Transhumance*

La pratique de la transhumance correspond à un déplacement des troupeaux, saisonnier, pendulaire, selon des parcours précis, répétés chaque année (20). Ces routes de transhumance peuvent être modifiées chaque année, en fonction de la disponibilité en pâturage et des conditions d'accès aux ressources. Il s'agit d'un système extensif basé sur l'utilisation quasi exclusive des ressources situées sur les parcours et les troupeaux sont

souvent confiés à des chameliers. Le savoir-faire de ce dernier repose sur les traditions, ce qui est un atout en terme de connaissance et d'utilisation du milieu naturel, mais qui est insuffisant en terme de zootechnie. Les problèmes sont donc liés à l'insuffisance ou à la baisse de qualité saisonnière des disponibilités fourragères, ou au défaut de suivi de la santé du troupeau, de son l'alimentation, et de la reproduction.

### 3.2. Systèmes sédentaires

La "sédentarisation" peut décrire un processus d'évolution résultant de l'adaptation des populations nomades qui réduisent l'ampleur de leurs déplacements et incluent des pratiques agricoles dans leurs activités (40). Ce terme peut aussi signifier que les troupeaux se déplacent toujours sur de longues distances, mais chaque soir ils reviennent au village (41).

Depuis quelques années, dans la zone saharienne et subsaharienne, les grandes agglomérations ont assisté au développement d'un système camelin laitier péri-urbain basé sur l'intensification de la production tel qu'on peut la retrouver dans les élevages sédentaires : une complémentarité alimentaire importante et une intégration économique du dromadaire (20,42).

Suite à cela, on assiste à des échanges importants entre les systèmes pastoraux et péri-urbains. Par exemple il est possible d'observer des élevages dits mixtes : les femelles laitières et les chamelons de l'année sont sédentarisés autour des villes tandis que le reste du troupeau (mâles, femelles tarées, et jeunes impubères) continue d'exploiter les vastes étendues désertiques de l'intérieur.

On peut intégrer dans les systèmes sédentaires intensifs, les élevages d'animaux de course. Le dromadaire est capable de céder aux exigences de la "modernité" en élevage et de subir une intensification de sa production pour satisfaire aux demandes croissantes des populations urbaines.

#### 4. Etude des filières et leur évolution

Suite aux demandes d'indépendances en Afrique du Nord, l'élevage camelin a connu une période de déclin qui connaît un regain d'intérêt aujourd'hui. Ce dernier est caractérisé par une remontée des effectifs nationaux (Figure 39) à quelques exceptions près, une plus grande intégration du lait de chamelle dans l'économie, un développement important de la filière viande de dromadaire pour laquelle les pays du Maghreb sont des importateurs majeurs, une récente valorisation des sous-produits comme la laine ou le cuir et d'activité comme les courses de dromadaires. Dans les zones touristiques, les activités de loisir et de tourisme représentent également une source de revenus pour les familles d'éleveurs. Au final, en dépit d'une certaine marginalité de cet élevage, sa place dans les économies nationales est grandissante et mérite le soutien des différents gouvernements.



Figure 39: Evolution des effectifs de la population cameline en Afrique du Nord (21)

##### 4.1. Performances reproductives (43)

Pour la réussite de tout élevage il faut maîtriser correctement la reproduction. Les femelles atteignent la puberté vers 2 ans et sont rarement mises à la reproduction avant l'âge de 3 ans, voire parfois 7 ans. Toutefois les jeunes femelles âgées de 2 ans et ayant un poids supérieur à 280 kg (70 % du poids de la chamelle adulte) peuvent être saillies et mettre-bas (44). Les chammelles peuvent reproduire jusqu'à l'âge de 20-30 ans. Chez le mâle les premières saillies

peuvent être assurées à partir de 3 ans d'âge mais la pleine maturité n'est atteinte que vers l'âge de 6 ans.

L'amélioration de connaissance de base concernant les paramètres de reproduction ainsi qu'une meilleure maîtrise de l'alimentation et de pratiques permettent sensiblement de diminuer l'âge à la mise à la reproduction. Ainsi nous pouvons citer l'exemple de la région de Bikaner en Inde entre 1961-1990 où l'âge moyen de mise à la reproduction est passé de 3,8 à 3 ans et l'âge de la première mise bas est passé de 5,2 ans à 4 ans (45).

La gestation dure environ 13 mois (20). Dans des conditions traditionnelles, la majorité des mise bas s'espacent d'un intervalle supérieur à 24 mois (45). En revanche, pour diminuer cet intervalle la technique de l'allaitement artificiel est efficace, en séparant le chamelon de sa mère on obtient un intervalle entre mise bas plus réduit (403 jours) (44). Les performances reproductives du dromadaire restent encore faibles avec un taux de fécondité faibles ne dépassant que rarement 40%. Les raisons sont multiples et sont essentiellement d'ordre physiologiques et nutritionnelles (44).

## 4.2. Filière laitière

### 4.2.1. *La production laitière*

Les zones désertiques de la planète représentent l'écosystème qui subit la plus forte pression liée à l'urbanisation. A titre d'exemple, le taux d'urbanisation est de 100% au Qatar ; en Arabie Saoudite il était de 20% en 1970, il est de 87% aujourd'hui ; En Algérie la population urbaine augmente de 2% tous les ans. Ces évolutions ne sont pas sans impact sur les activités d'élevage (46).

L'urbanisation de ces régions entraîne une augmentation de l'exigence en terme de qualité et de quantité en protéines animales (viande et lait). En effet, la croissance économique stimule les demandes de ce type.

On assiste à des modifications dans l'organisation des systèmes d'approvisionnement locaux : on peut noter notamment la petite révolution qu'a été la marchandisation du lait de chamelle. Nous pouvons citer comme exemple Agadez, petite ville du Niger, pour ses habitants le lait est un cadeau envoyé par Dieu pour nourrir l'Homme, sa commercialisation

est ainsi mal vue (47). Suite à l'urbanisation et à la demande des acteurs locaux on a pu assister à la construction de laiteries. Ainsi le lait de chamelle qui était principalement utilisé pour l'autoconsommation est devenu un produit marchand.

Il est important de noter que le lait de chamelle ne peut encore se substituer complètement au lait de vache pour satisfaire la demande, mais sa consommation par la population ne cesse d'augmenter depuis 50 ans.

Le potentiel laitier moyen est de l'ordre de 6 à 10 litres de lait par jour et par animal (47), il existe ainsi une réelle offre de ce produit. La production mondiale de lait de chamelle est estimée à 1,3 million de tonnes en 2002 (42). La courbe de lactation est comparable à celle des bovins avec une meilleure persistance (42). Les facteurs alimentaires et saisonniers influent évidemment sur ces performances. Rapportée au poids vif de l'animal, la productivité laitière des chameaux (250 kg/Unité Bétail Tropical/an) est supérieure à celle des petits ruminants (220 kg)

La durée moyenne de lactation est de 10 mois avec un pic de lactation entre le deuxième et le troisième mois (20). La production laitière est dépendante de multiples facteurs tel que le type génétique, l'âge, le stade de lactation, la saison, et la fréquence d'abreuvement. Les chameaux qui mettent bas durant la saison douce donnent un meilleur rendement laitier que celles mettant bas durant la saison sèche.

Selon une étude la fréquence de la traite entraîne une augmentation de la production laitière. Le passage de deux traites (5,24 kg/jour) à trois traites (7,12 kg/jour) augmente la production journalière de 28,5 % et celui de trois traites à quatre traites (8,19 kg /jour) augmente la production de 12,5 % (48).

#### *4.2.2. Caractéristiques du lait de chamelle*

Le lait de dromadaire aussi appelé lait de chamelle, est moins dense et plus acide que le lait de vache. La composition physicochimique de ce lait est quasiment la même que celle du lait de bovin en ce qui concerne les protéines, la matière grasse et le lactose. Cependant, le lait de chamelle contient davantage de vitamines : vitamines C, vitamine B3, vitamine D et vitamine A (49). Il semble mieux digéré par les personnes qui ne tolèrent pas le lactose.

La littérature montre que le lait de bovin représente 85% du lait consommé dans le monde entier, puis viennent le lait de caprin et d'ovin (35,47).

Le lait de chamelle est aussi connu pour ses vertus médicinales. Il est ainsi considéré comme anticancéreux (50), antidiabétique (49), hypoallergique et bon pour le système immunitaire et le cerveau (51).

#### 4.3. Filière viande

##### 4.3.1. *Production de viande*

Un processus semblable à celui du lait est observé pour la filière viande cameline. Historiquement la viande cameline est consommée occasionnellement lors de certaines fêtes (mariage et baptême). Mais contrairement à la filière lait qui reste locale principalement, la viande est en grande partie tournée vers l'exportation régionale (52). Une très faible partie est abattue pour la consommation locale.

Comme nous l'avons vu précédemment, en Afrique la majorité des élevages sont en milieu extensif. Pourtant, bien qu'encore peu développés, des systèmes de type feed-lots apparaissent dans les oasis du Sud de la Tunisie. Des ateliers d'engraissement de jeunes animaux y sont encouragés pour fournir au marché des animaux de 250 kg en moins de deux ans, ceci pour satisfaire une demande urbaine croissante (47). Si dans de nombreux cas la viande de chameau est considérée comme un sous-produit des systèmes laitiers, la demande croissante en termes de qualité et de quantité favorise l'émergence de systèmes mieux organisés, comme dans l'exemple tunisien. Malgré cela il est important de noter que la productivité bouchère est deux fois inférieure à celle des bovins et cinq fois à celle des petits ruminants (52). Son coût de production reste toutefois très inférieur à celle des autres espèces.

#### 4.3.2. *Comprendre la croissance du dromadaire*

La croissance pondérale correspond à l'accroissement global du poids vif de l'animal par unité de temps. La croissance de l'animal peut être divisée en deux périodes, la période fœtale et la période post-natale :

- Au cours de la première période, la croissance pondérale est similaire à celle des bovins c'est-à-dire d'abord faible jusqu'au deux tiers de la gestation. Dans le dernier tiers, la croissance s'intensifie faisant passer le poids du fœtus de 7 kg à 35 kg à la naissance (53).
- En ce qui concerne la deuxième période, elle démarre avec le poids de naissance qui est en moyenne de 31,1 kg en Tunisie (34). Ce dernier dépend principalement du génotype, de l'âge de la mère, de la saison, et de l'alimentation de la mère (53). Les mâles semblent légèrement plus lourds à la naissance (48).

La courbe de croissance comprend une phase initiale accélérée allant de la naissance jusqu'à un poids voisin de 380 kg pour les mâles et 350 kg pour les femelles, suivie d'une phase lente qui progressivement tend vers un poids adulte de 650 kg pour les mâles et 550 kg pour les femelles. Le rendement en carcasse varie de 55 à 70 %. Il diminue avec l'âge et l'état d'engraissement. Il est un peu plus faible pour les femelles, la carcasse contient en moyenne 57 % de viande, 25,5 % d'os et 16,9 % de gras (53).

#### 4.4. *Potentiel émergent à la course*

Abordons maintenant le dromadaire destinée à la course dans les pays du Golf : Koweït, Arabie saoudite, Qatar, Oman et notamment les Emirats Arabes. La course de dromadaires est une véritable institution de façon similaire aux chevaux Pur-sang destinés à la même activité en Occident. Les courses de dromadaires sont presque exclusivement réservées à des hommes fortunés qui sont prêts à investir des sommes colossales dans ce loisir de luxe. En effet, on trouve aux Emirats Arabes de prestigieuses écuries de course. Ce secteur représente parfaitement l'intensification de l'élevage du dromadaire, visant à optimiser les capacités de production : développement des biotechnologies modernes comme l'insémination artificielle ou encore le transfert d'embryons (54). Ce secteur subit une pression de sélection pour élever les meilleures montures.

Il s'agit d'un réel hobby pour des hommes d'affaires. Les animaux courent, dans leur catégories, dans un hippodrome à dromadaire. Les distances peuvent aller jusqu'à 8 kilomètres avec une vitesse de pointe de 55 km/h. Les paris sont interdits, ainsi lorsqu'un dromadaire remporte une course, les sponsors offrent des lots. A noter que les dromadaires champions peuvent atteindre 4 à 5 millions de dirhams soit 1 million d'euros. Le secteur des courses épiques a été réellement transposé aux dromadaires à l'exception que le jockey est remplacé par des robots pilotés du bord de la piste. L'importance de cet animal dans ces pays, tant sur le plan économique que social explique la présence d'un hôpital exclusivement dédié à la médecine des camélidés à Dubaï (55,56).

## 5. Les races de dromadaires

### 5.1. La notion de race en élevage

Dès le début de la domestication, l'homme a essayé d'identifier et de conserver les animaux présentant des capacités supérieures, notamment les plus adaptés aux besoins humains et de les faire reproduire entre eux. La diversité des secteurs (viande, lait, travail, course), ont conduit les espèces d'élevage à des voies d'évolution multiples. La sélection naturelle a été le principal moteur de l'évolution des populations pendant longtemps, mais aujourd'hui les connaissances et les moyens de l'Homme ont permis d'orienter cette évolution à son avantage (57).

La notion de race correspondait alors à « une population locale ou régionale adaptée à une production donnée et présentant un certain nombre de caractères communs ». En règle générale, chaque race d'élevage est définie par un standard, c'est-à-dire un ensemble de critères qui définissent l'individu idéal. Ces sous-ensembles d'espèce ou "races" se fondent notamment sur des critères telles que la taille de l'animal, la conformation, la couleur, la longueur et la texture du poil, ses aptitudes à produire, son adaptation à des conditions climatiques et d'autres encore (57).

## 5.2. La caractérisation phénotypique

Le terme «caractérisation phénotypique des ressources zoo génétiques» désigne généralement l'identification de races distinctes et la description de leurs caractéristiques externes et productives dans un milieu de production donné (58). Le terme «milieu de production» est utilisé ici pour inclure non seulement le milieu «naturel», mais aussi les pratiques de gestion et les différentes utilisations des animaux et de leurs produits, prenant aussi en compte les facteurs économiques et sociaux. L'identification sur la base génétique correspond à la caractérisation génétique moléculaire. On distingue deux niveaux de caractérisation :

### 5.2.1. *Caractérisation primaire*

La caractérisation primaire est utilisée pour désigner les activités qui peuvent être réalisées en une seule visite sur le terrain, tel que les mesures des caractéristiques morphologiques des animaux, les entretiens avec les éleveurs, l'observation et la mesure de certains aspects du milieu de production, la cartographie de la répartition géographique.

### 5.2.2. *Caractérisation avancée*

La caractérisation avancée est utilisée pour décrire les activités qui nécessitent des visites répétées. Ces activités incluent la mesure des aptitudes de production (par exemple le taux de croissance, la production laitière) et les aptitudes d'adaptation (par exemple la résistance ou la tolérance à des maladies spécifiques) des races dans des milieux de production spécifiques.

## 5.3. Sélection chez le dromadaire

La sélection est primordial pour améliorer la productivité dans un élevage. Cependant, l'amélioration génétique du dromadaire reste problématique parce que peu exploitée contrairement à d'autres espèces. Les producteurs distinguent bien des "races" mais les critères sont purement phénotypiques (allure, taille, couleur de la robe) et la sélection a rarement été poussée, sauf pour les dromadaires de course dans les Emirats Arabes et

probablement dans les pays d'Asie centrale pour la production laitière (20). Avec l'intensification des élevages camelins, les aires de sélection vont s'étendre.

Les éleveurs en Afrique du Nord réalisent une sélection pour les mâles. La sélection du mâle géniteur est le premier facteur d'amélioration génétique du troupeau, les éleveurs arrivent à différencier ceux qui transmettent leur conformation aux produits (20). Ils accordent une grande attention aux caractéristiques des ancêtres des animaux sélectionnés, c'est pourquoi la sélection des futurs pères se fait juste après le sevrage.

#### 5.4. Classification des dromadaires selon leur production

Il existe plusieurs classifications des dromadaires, nous présenterons celle qui catégorise les dromadaires suivant le type de production (lait, viande, mixte et course) (35)

##### 5.4.1. Dromadaires de type lait

En général, les chameilles destinées à la production laitière sont caractérisées par une production laitière supérieure à 2500 litres/lactation. Dans certains pays du Golf les chameilles sont uniquement utilisées pour la production de lait. La figure 40 présente quelques races laitières.

<b>Race</b>	<b>Pays d'élevage</b>	<b>Production en (Kg)</b>
<i>Hoor</i>	Somalie	800-2800 par lactation
<i>Rachaida</i>	Soudan	2000-3000 par lactation
<i>Challageea</i>	Soudan	15-18 par jour
<i>Sirtawi</i>	Libye	3000-4000 par 305 jours
<i>Ouled Sidi Cheikh</i>	Algérie, Maroc et Mauritanie	2000-3500 par 305 jours
<i>Fakhreya</i>	Libye	3500 par lactation

Figure 40: Exemple de race de dromadaire laitier (36)

#### 5.4.2. Dromadaires de type viande

Ces dromadaire sont caractérisés par un long cou, une large bosse, des muscles volumineux et un GMQ important. Les jeunes chamelons produisent la meilleure viande. La viande cameline commence à prendre une place de plus en plus importante avec l'industrialisation dans certains pays comme ceux du Golf (52). La figure 41 présente quelques races à viande.

Race	Pays d'élevage	Caractéristiques
<i>El jandawel</i>	Mauritanie	-Grande taille -Poids lourds -Couleurs foncées
<i>Delta</i>	Egypte	-Grande taille -Muscles développés -Supporte les charges lourdes
<i>El fellahi</i>	Egypte	-Grande taille -Squelette lourde -Pas lent

Figure 41: Exemple de races de dromadaire à viande (36)

#### 5.4.3. Dromadaires de type mixte

Ces dromadaires peuvent être de taille moyenne ou de grande taille. Ils possèdent un GMQ relativement élevé et sont capable de produire une quantité importante de lait d'environ 1000-1500 kg/lactation. La figure 42 présente quelques races mixtes.

Race	Pays d'élevage	Caractéristiques
<i>Maghrebi</i>	Egypte, Maroc, Algérie, Libye et Tunisie	-Taille variable -Couleur variée
<i>Tibisti</i>	Libye et Tchad	-Petite taille -coureur
<i>El majaheem</i>	Arabie Saoudite	-Grande taille -Couleur noire -Production laitière élevée
<i>El khawar</i>	Syrie et l'Iraq	-Poids adulte 665Kg pour le mâle et 540 kg pour la femelle. -Production du lait : 1800-2000 par 15-18 mois.

Figure 42: Exemples de races de dromadaire mixte (36)

### III- Apparition de maladie à prions chez le dromadaire

Les maladies à prions provoquent une dégénérescence du système nerveux qui mènent irrémédiablement à la mort. Elle peut être transmise à l'Homme. Elle est due à une protéine présente normalement dans les cellules : PrPc (Protéine prion cellulaire). Cette dernière peut devenir pathogène en s'accumulant suite à une résistance, acquise, à la protéinase K suite à un repliement anormal : PrPres (Protéine prion résistante). Les détails de la protéine prion et sa pathogénie sont détaillés dans l'Annexe 2. La maladie à prions la plus récente a été mise en évidence chez le dromadaire.

#### 1. Mise en évidence de la maladie

Lorsque les Encéphalopathies Spongiformes transmissibles (EST) touchent des espèces consommées par l'Homme, cela devient préoccupant, et cela est davantage inquiétant lorsque la transmission zoonotique est possible et avec de lourdes conséquences économiques et sanitaires comme l'ont été les différentes crises de l'Encéphalopathie spongiforme bovine (ESB).

En 2018, en Algérie, une nouvelle EST a été mise en évidence chez le dromadaire *Camelus dromedarius* (59). Elle est communément appelée la maladie du dromadaire fou, ou encéphalopathie spongiforme du dromadaire (ESD). Entre 2015 et 2016, 3,1% des dromadaires abattus dans l'abattoir de Ouargla, dans le Sud-Est de l'Algérie, présentaient des signes cliniques semblables à une maladie à prions. D'après l'enquête épidémiologique, la maladie était décrite par les éleveurs et le personnel d'abattoir depuis 1980. Pourtant la suspicion n'a été confirmée qu'en 2018 grâce à des analyses histologiques et la mise en évidence de la PrPres dans l'encéphale de trois dromadaires cliniquement suspects (59).

#### 2. Des signes cliniques caractéristiques

Les signes cliniques ne sont en aucun cas pathognomoniques mais seulement évocateurs d'une EST. Les dromadaires qui présentaient des signes cliniques apparentés à une maladie à prion étaient des individus d'âge moyen, tous les cas répertoriés ayant plus de 8 ans. Les

éleveurs rapportaient que les premiers signes cliniques étaient comportementaux : bruxisme, perte d'appétit et agressivité. Les signes cliniques vus en abattoir lors de l'examen ante mortem comportaient un mauvais état corporel, des signes neurologiques et des anomalies comportementales. Les signes neurologiques rapportés étaient des tremblements, des mouvements verticaux de la tête, une hyper réactivité, ainsi que des signes d'agressivité. La démarche était également modifiée, les dromadaires montraient des signes d'ataxie, ils n'étaient pas stables, trébuchaient et éprouvaient des difficultés à se lever. Tous ces signes font partie du tableau clinique classique des EST. D'après les observations, la maladie évolue en 3 à 8 mois vers la mort.

NB : Il est important de noter que le comportement agressif est assez courant chez le dromadaire sain.

### 3. Caractéristiques histologiques et immunohistochimique de l'ESD

Des coupes histologiques sur les cerveaux de trois dromadaires symptomatiques ont été comparées avec celles réalisées sur un animal sain : les animaux malades présentaient des lésions histopathologiques telles qu'une dégénérescence spongiforme, une gliose et une perte neuronale. L'aspect spongiforme du tissu cérébral est dû à la présence de vacuoles décrites dans le neuropile. L'ensemble de ces lésions correspond au tableau histopathologique classique des EST. Ces lésions étaient localisées dans l'ensemble de la matière grise cérébrale sous-corticale (le striatum, le thalamus, le cerveau moyen et les pons sont cités).

L'immunohistochimie a permis de mettre en évidence la PrPres dans les cerveaux des trois animaux atteints cliniquement. Les dépôts semblaient importants à proximité des lésions histologiques mais également présents dans des zones avec peu voire pas de lésions apparentes (59). La PrPsc semble pouvoir s'accumuler dans différentes structures, notamment les neurones et les cellules gliales. Outre dans le cerveau, la PrPres a également été mise en évidence dans des nœuds lymphatiques périphériques tels que les ganglions cervicaux, pré scapulaires, aortiques et lombaires. Toutefois l'analyse des nœuds lymphatiques n'a été réalisée que sur un seul dromadaire présentant des signes cliniques.

Grâce à la méthode Western Blot, les caractéristiques de la protéine pathogène du dromadaire ont été comparées à celles des agents responsables de la tremblante et de l'ESB.

Sa nature biochimique s'est avérée différente (59). L'agent est donc différent de ceux de la tremblante et de l'ESB.

#### 4. Implications et conséquences de la découverte de l'ESD

Comme nous avons pu le voir au début de cette partie, le dromadaire est très répandu dans une vaste partie du monde, notamment en Afrique, au Moyen-Orient et en Asie Centrale et l'effectif de cette espèce croît de façon importante en Afrique du Nord depuis quelques années (21). De plus il est au centre de nombreuses activités commerciales importantes avec la viande, le lait, ainsi que des sous-produits tels que le cuir ou la laine et les courses. Dans ce contexte, la découverte de l'ESD est inquiétante, notamment pour les produits consommés par l'Homme. Après les épisodes de la maladie de la « vache folle », il est important de tenir compte du risque zoonotique de cette maladie émergente du « dromadaire fou ».

L'incidence de la maladie observée cliniquement en abattoir en 2015 était de 3,1%. Les animaux sont généralement abattus avant l'âge de cinq ans, ce qui est inférieur à l'âge minimum observé pour l'initiation de la phase clinique. Il y a donc une potentielle sous-estimation concernant l'incidence réelle des cas infectés en phase d'incubation.

#### 5. Les potentielles différentes origines de cette ESD

L'origine de l'encéphalopathie spongiforme transmissible du dromadaire est incertaine. Les conditions d'élevage, jusque-là très traditionnelles s'orientent de plus en plus vers une intensification ce qui permet de proposer des hypothèses.

La tremblante pourrait être à l'origine de l'ESD. En effet, les ovins sont fréquemment en pâture avec les camélidés. Toutefois cela semble peu probable car la tremblante classique ne semble pas être présente dans ces régions. De plus, les caractéristiques biochimiques distinctes entre les souches de l'ESD, de l'ESB et de la tremblante ne sont pas en faveur d'une origine commune (59).

Depuis quelques années, l'élevage camelin, s'ouvre sur un commerce d'envergure grandissante, ce qui le rend susceptible d'utiliser des produits alimentaires commerciaux. Il ne

peut donc être exclu qu'une contamination par des farines de viandes et d'os (FVO) soit à l'origine de la maladie. Il est important de noter que suite de l'interdiction d'alimenter les cheptels bovins avec des produits à base de FVO de ruminants en 1988, l'Angleterre en a exporté jusqu'à 30 000 tonnes dans les pays en voie de développement en 1991 (59). L'hypothèse que l'apparition de la maladie chez les dromadaires soit due à la présence d'agent de l'ESB dans les FVO peut donc être avancée. Cependant, dans ces pays importateurs dont l'Algérie faisait partie, aucun cas n'a été observé chez les bovins, qui est pourtant l'espèce susceptible d'être touchée en premier.

L'hypothèse d'une maladie spontanée est à prendre en compte ainsi que celle d'une contamination possible via les déchets humains dans les décharges ouvertes lors de pâturage en liberté.

## 6. L'orientation des recherches sur l'ESD

Il est important de connaître les modalités de transmission de l'agent pathogène. Il faudrait notamment déterminer si l'ESD peut se maintenir seule ou si elle est provoquée par l'Homme comme dans le cas de l'ESB. La mise en évidence de la PrPres dans les ganglions périphériques d'un dromadaire atteint cliniquement oriente vers une contagiosité de la maladie comme la tremblante classique ou la MDCC (59). A contrario les tissus lymphoïdes ne sont pas touchés dans les maladies non contagieuses comme la tremblante atypique et l'ESB. Il serait aussi intéressant de réaliser des études épidémiologiques à grande échelle pour déterminer l'incidence de cette maladie le plus finement possible.

Afin d'évaluer le risque pour la consommation humaine, il faut déterminer la prévalence d'infection, déterminer la distribution de l'agent infectieux dans les tissus périphériques (lait et muscle) et qualifier son potentiel pouvoir zoonotique. Par la suite la mise en place de dépistage dans les abattoirs peut être nécessaire.

## Conclusion partielle : importance de l'IRM et de la réalisation d'un atlas chez le dromadaire

Par cette présentation du dromadaire nous venons de montrer que sa place est importante au sein de nombreuses sociétés d'Afrique et d'Asie. Cette importance aussi bien économique que sociale, ne cesse de croître. L'augmentation des effectifs et l'intensification des différents secteurs de production en témoignent : viande, lait et dromadaire de course en sont les principaux. L'utilisation de l'IRM trouve notamment sa place dans la recherche sur les dromadaires destinés à la production de viande et de lait, ainsi que dans le diagnostic de pathologies nerveuses chez les animaux de course.

Dans un tel contexte la réalisation d'un atlas d'images d'encéphale obtenues par résonance magnétique chez un dromadaire sain est nécessaire pour obtenir une référence avant toute interprétation. De plus, cela permet de comparer les structures entre les différentes espèces animales.

En 2018, une maladie à prion a été mise en évidence chez le dromadaire. D'après le personnel en abattoirs, les premiers animaux symptomatiques ont été vus plusieurs décennies auparavant. Pourtant une seule étude sur cette maladie est parue (59), des expérimentations restent encore à faire pour caractériser parfaitement cette pathologie. Le diagnostic de la maladie de Creutzfeldt-Jakob (MCJ), maladie à prion chez l'Homme, se base sur l'association de signes cliniques (myoclonies, démence), la présence de la protéine 14.3.3 dans le liquide cébrospinal et sur l'observation de complexes périodiques à l'électroencéphalogramme (60). Toutefois, ces signes ne sont présents que dans 45 à 85 % des cas (61). Le diagnostic de certitude repose toujours sur l'anatomopathologie. De 2004 à 2019 des travaux sur des cas sporadiques rapportent un intérêt majeur de l'IRM, notamment de l'imagerie de diffusion pour le diagnostic de la MCJ : hypersignaux T2 et FLAIR des noyaux gris centraux, lenticulaire, du thalamus, du cortex et une restriction de la diffusion (62–64). Ainsi de la même manière, l'IRM peut aider au diagnostic de l'encéphalopathie spongiforme du dromadaire. Une forme contagieuse est suspectée chez ce dernier, ainsi l'IRM peut être nécessaire dans toutes les filières de production du dromadaire. L'intensification de la production risque d'augmenter la prévalence de cette affection.

Pour les dromadaires destinés à la course, certains sont comparés à des chevaux Pures Sangs comme on en trouve dans le monde occidental. En effet, dans ce secteur la sélection des animaux est grande (insémination artificielle), leur prix peut atteindre plusieurs millions d'euros. Les propriétaires fortunés en font de vraies bêtes de compétition qui sont le témoin de leur réussite sociale et économique. Ils sont prêts à débours des sommes importantes pour ces dromadaires : la demande est telle que le Camel Hospital à Dubai oriente exclusivement sa pratique aux camélidés. L'IRM trouve entièrement sa place, dans ce contexte, pour diagnostiquer des pathologies nerveuses comme les tumeurs cérébrales.

# Partie 3 : Etude expérimentale : Réalisation d'un atlas d'IRM haut champ 3 tesla de l'encéphale de dromadaire en pondération T2

Cette thèse est incluse dans un projet des unités pédagogiques d'anatomie et d'imagerie médicale de l'ENVT : celui de créer une plateforme internet gratuite avec des atlas en ligne tomodensitométrie et IRM de différentes espèces et de différentes parties du corps.

## I. Objectifs de cet atlas

Le but de cette étude est d'obtenir des images IRM de haute résolution dans l'optique d'établir un atlas intelligible et complet de l'encéphale du dromadaire adulte sain.

En neurosciences, les atlas sont des outils indispensables aux imageurs, cliniciens et étudiants pour interpréter des images IRM cérébrales. Malgré le fait que l'anatomie de l'encéphale varie d'un individu à l'autre, elle présente suffisamment de régularités au sein d'une espèce pour réaliser un atlas. Or, jusqu'à présent, dans la littérature scientifique, peu d'études se sont penchées sur le détail des structures cérébrales de l'encéphale de dromadaire (*Camelus dromedarius*). Les quelques études répertoriées ont légendé moins d'une dizaine d'images et cela avec un IRM 1,5 Tesla (65,66). Dans ce contexte, il est intéressant de réaliser un atlas complet de l'encéphale de dromadaire.

## II. Matériel et méthode : Acquisition des images

### 1. Les dromadaires

Les deux dromadaires utilisés étaient destinés à la filière viande en Tunisie. Leur dissection et l'extraction de l'encéphale ont été réalisées à la faculté vétérinaire de Sidi Thabet, au Nord-Ouest de Tunis. Tout d'abord la tête a été désarticulée au niveau de l'articulation atlanto-occipitale, puis après retrait de tous les tissus mous de la tête, l'encéphale a été extrait de la boîte crânienne. Quelques images de ces étapes sont présentées en Annexe 3. Les deux encéphales ont été placés immédiatement dans une solution de formol à 10% pour être fixés et conservés. La réglementation concernant le bien-être animal a été respectée.

### 2. Réalisation des images IRM

Les images obtenues par résonance magnétique ont été réalisées au plateau technique IRM de l'UMR 1214 ToNIC basé au Centre Hospitalier Universitaire de Purpan (pavillon Baudot). La machine utilisée est une IRM haut champ 3.0 Tesla (Achieva ; Philips, France) à aimant court, dédiée aux activités de recherche en Neurosciences.

L'examen IRM a été réalisé quelques mois après la réception des deux encéphales. Les acquisitions ont eu lieu en novembre et décembre 2018. Durant ce temps les deux encéphales ont été conservés dans une solution de formol à 10%.

Lors de l'examen, les deux encéphales sont recouverts de compresses imbibées de sérum physiologique pour éviter la dessiccation. Ensuite chaque encéphale est placé ventralement dans une boîte en plastique en repérant la partie rostrale de l'encéphale. Chacune des boîtes est disposée à l'endroit, horizontalement dans une antenne de type tête.

Concernant le protocole opératoire, le choix des paramètres d'acquisition des images (Figure 43), de l'antenne et des pondérations a été réalisé par le personnel de l'hôpital de Purpan à Toulouse. L'équipe était composée d'une ingénieure de recherche Inserm, Mme GROS-DAGNAC, et d'un manipulateur en Radiologie, Mr. DESIRAT. Les images ont été obtenues grâce à une séquence Turbo Spin Echo 3D dénommée VISTA selon la spécificité des

machines IRM Philips. Cela correspond à une séquence en trois dimensions isotropique, en pondération T1, T2. On a ajouté une séquence DTi pour chaque encéphale pour réaliser des travaux sur la tractographie de l'encéphale du dromadaire (Thèse expérimentale de Ninon Pailloux 2020).

Plan	Séquence	TR (msec)	TE (msec)	Section/épaisseur (mm)	Temps (min)
3D	T2W, Vista (TSE)	1500	286	0,6	52

Figure 43: Paramètres de la séquence utilisée pour l'obtention des images de l'atlas

### 3. Lecture des images IRM et validation du caractère sain de l'encéphale

L'intégralité des images obtenues par l'examen IRM sont enregistrées sous le format DICOM (Digital Imaging and Communication in Medecine) et sont visualisées à l'aide du logiciel OsiriX.

Les images ont été lues par le Professeur en Anatomie et Imagerie Giovanni Mogenicato et aucune anomalie majeure n'a été mise en évidence, ainsi ces encéphales ont été jugés sains.

Cette étude devait comporter les images légendées des séquences en pondération T1 et T2 des deux encéphales disponibles. Les acquisitions réalisées, un des encéphales était dégradé empêchant les images associées d'être légendées correctement. A cela s'est ajoutée une anomalie sur l'ensemble des images pondérées en T1 empêchant la reconnaissance des différentes structures. Ainsi, dans cette thèse uniquement les images d'un seul encéphale en pondération T2 ont été légendées.

### 4. Légendes

Les différentes structures anatomiques ont été identifiées en s'appuyant sur des images IRM de cerveaux de chevaux (Murray, 2001 et de la thèse expérimentale de Monteil, 2015), puis légendées selon la nomenclature anatomique officielle de Sack W.O. et présentée par le Comité International de Nomenclature d'Anatomie Vétérinaire revue en 2012 (5e édition). Les

images ont été légendées avec le logiciel Microsoft PowerPoint. Elles sont inscrites directement en anglais car intégrées dans la rédaction d'un article scientifique, puis retranscrites dans un lexique en anglais classé par ordre alphabétique, et traduit en français ainsi qu'en latin. Ce lexique est disponible en annexe 1.

## 5. Résultats

Quinze coupes en pondération T2 composent cet atlas : 4 coupes dorsales, 10 coupes transversales et une coupe sagittale correspondant au plan médiane

### 5.1. Images pilotes

Les images pilotes sont nécessaires pour définir les plans coupes choisis :

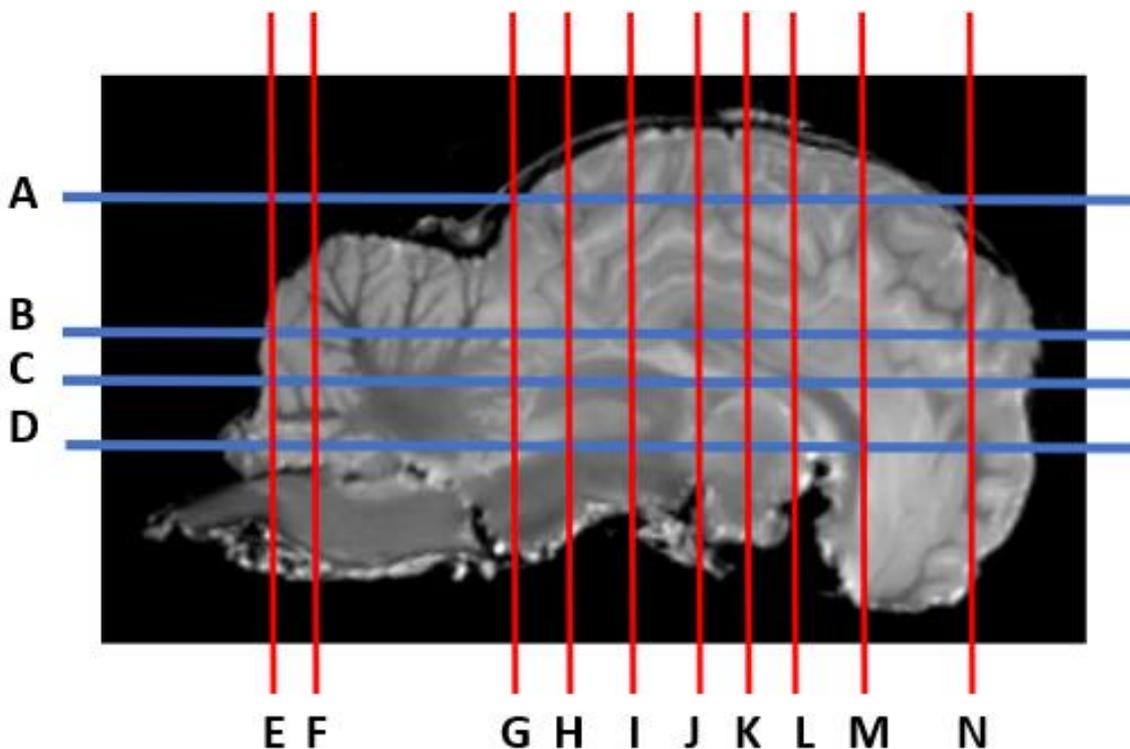


Figure 44: Coupes pilotes

## 5.2. Coupes dans le plan dorsal

Les coupes dorsales sont réalisées en pondération T2 suite aux anomalies des images en pondération T1 citées plus haut.

Quatre coupes sont choisies, de la position dorsale à la position ventrale, débutant en regard de la portion dorsale du gyrus et s'étendant jusqu'au plancher du tronc cérébral. Ces coupes correspondent aux lignes de référence A, B, C et D tracées sur l'image pilote.

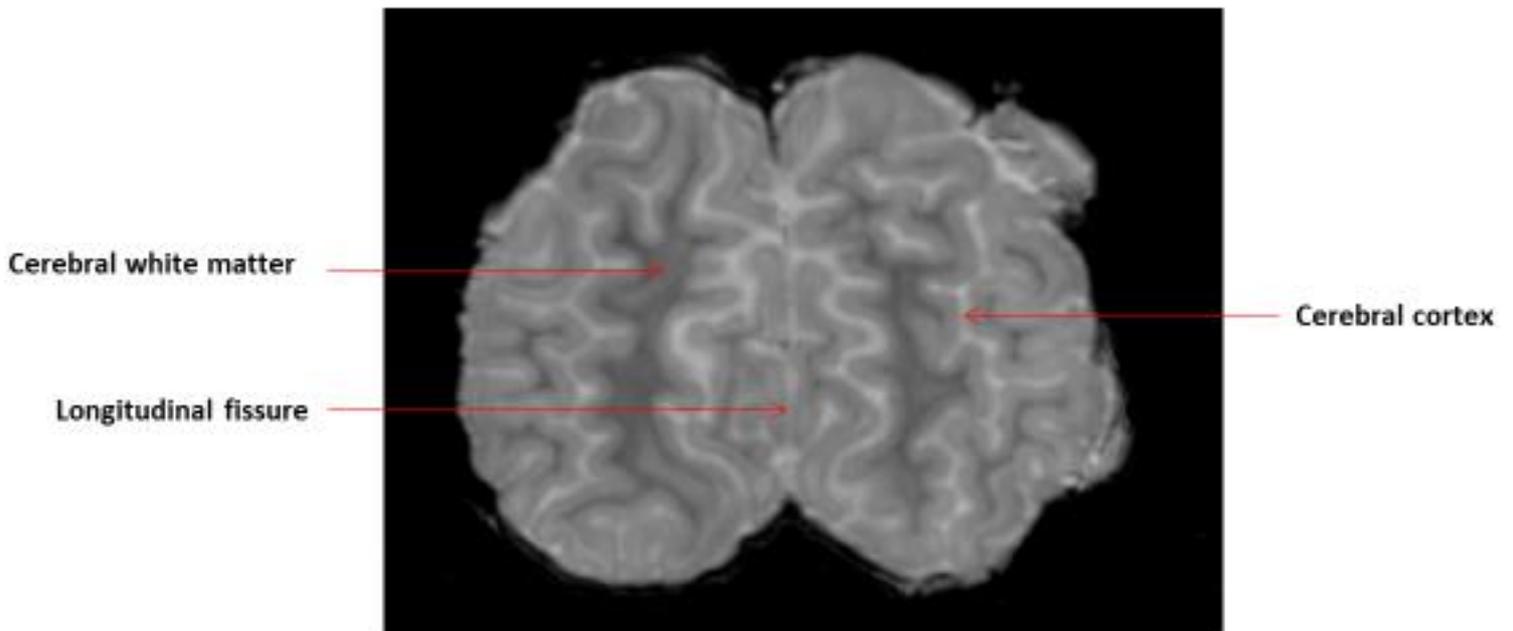


Figure 45: Niveau A - Coupe dorsale pondérée en T2

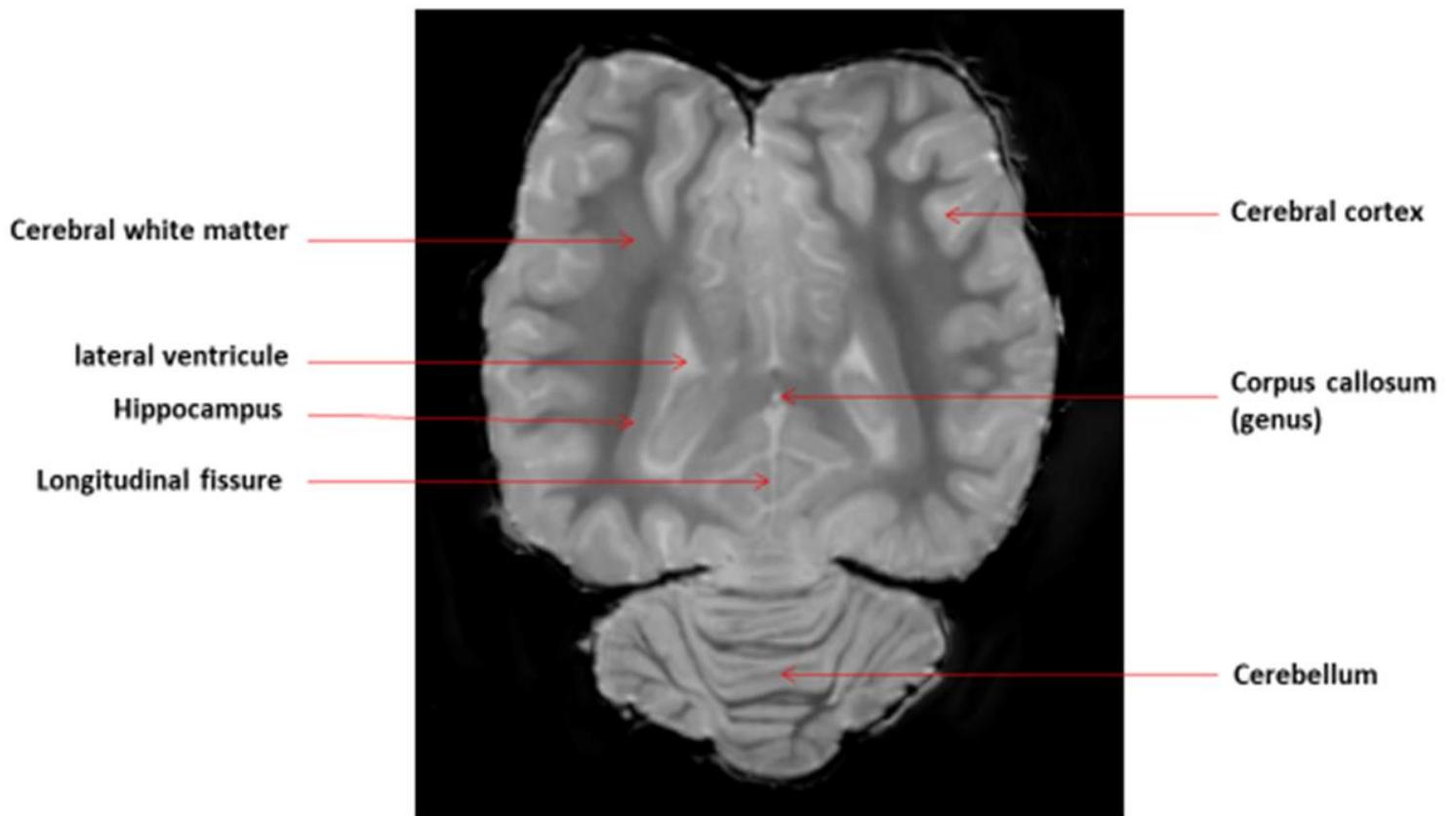


Figure 46: Niveau B - Coupe dorsale en pondération T2

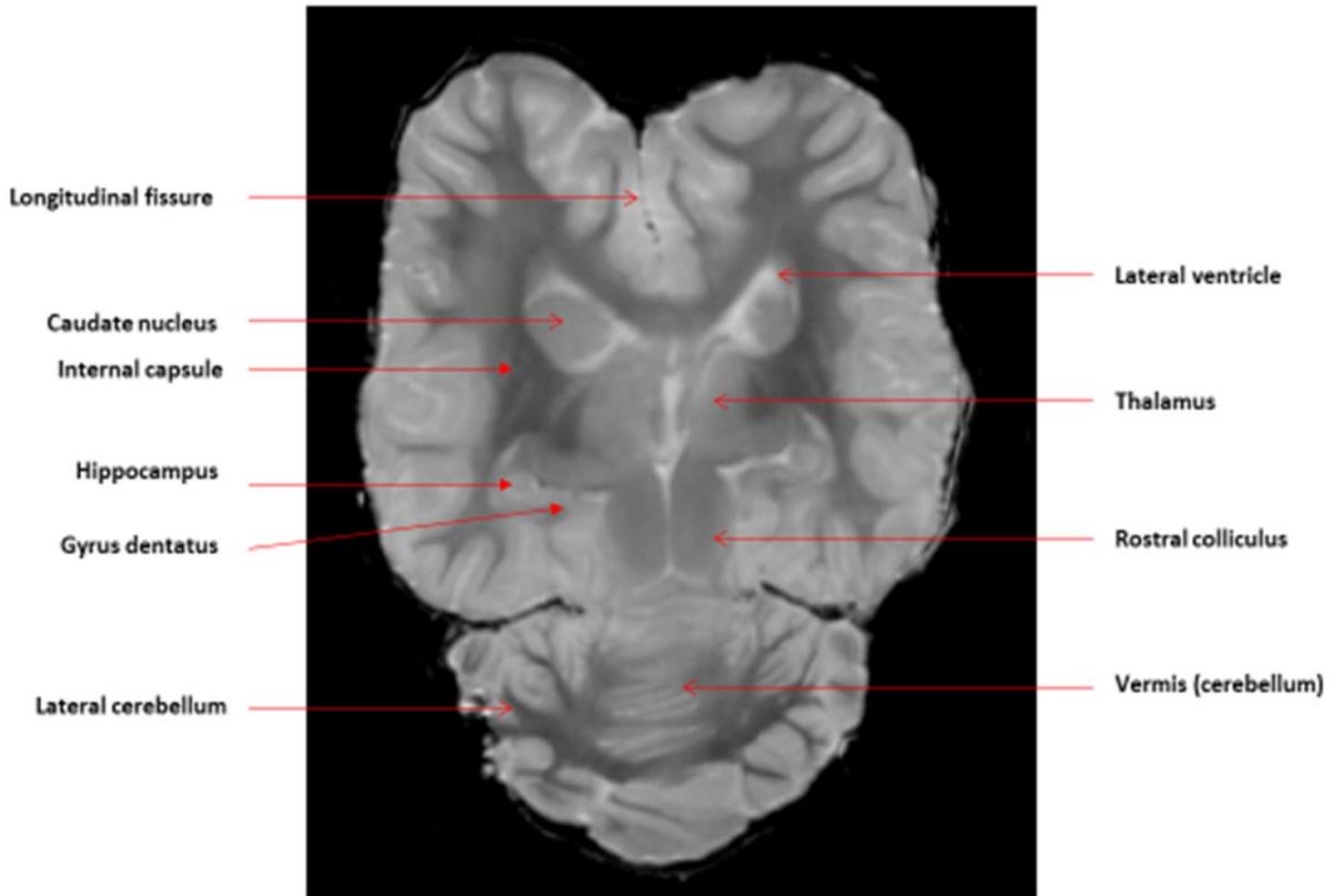


Figure 47: Niveau C - Coupe dorsale pondérée en T2

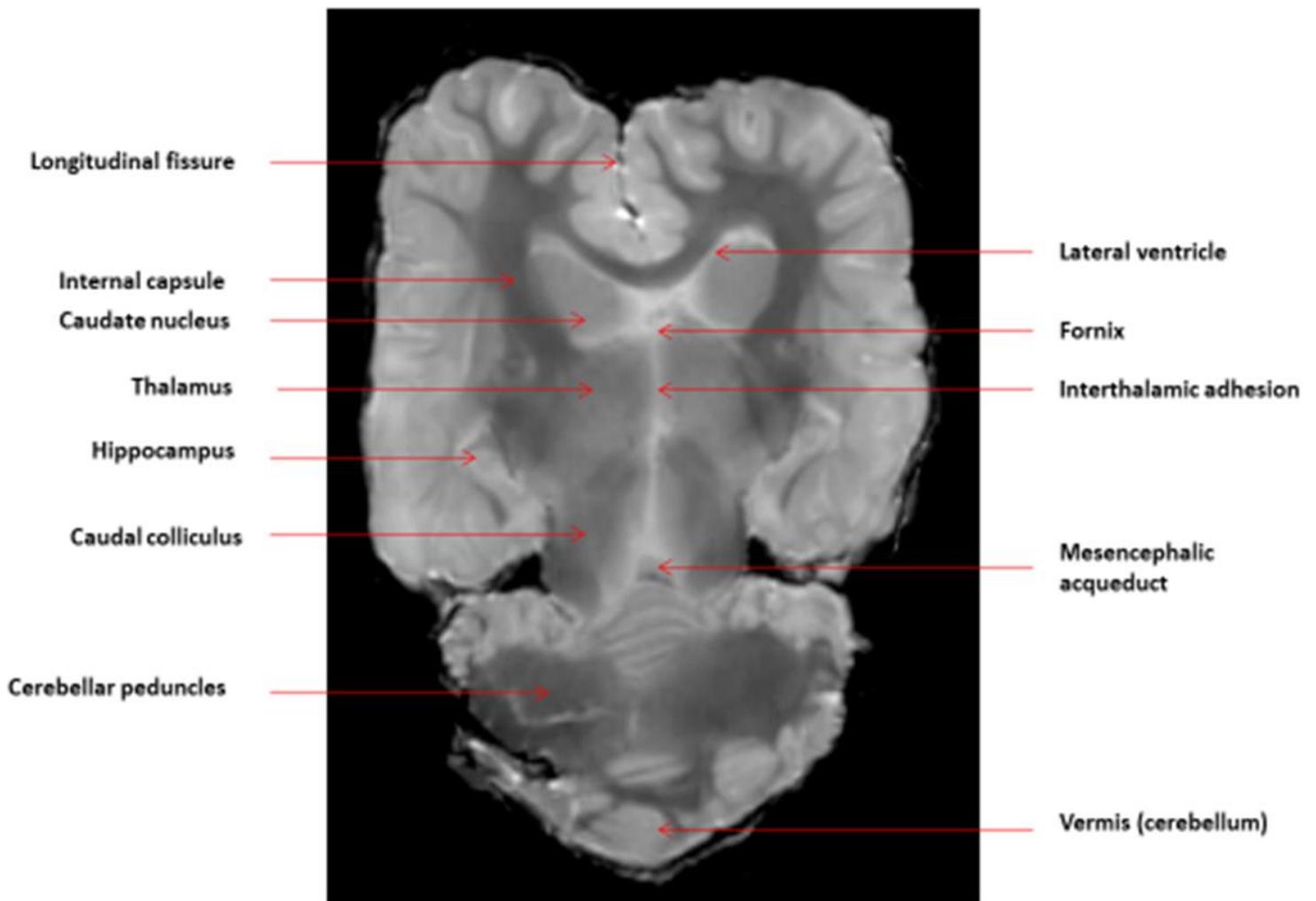


Figure 48: Niveau D - Coupe dorsale pondérée en T2

### 5.3. Coupes dans le plan transversal

Les coupes transversales sont réalisées en pondération T2. Dix coupes sont sélectionnées, de la position caudale à la position rostrale, débutant au niveau de la partie la plus caudale du cervelet jusqu'à la partie rostrale du lobe frontal. Ces coupes correspondent aux coupes de E à N tracées sur l'image pilote.

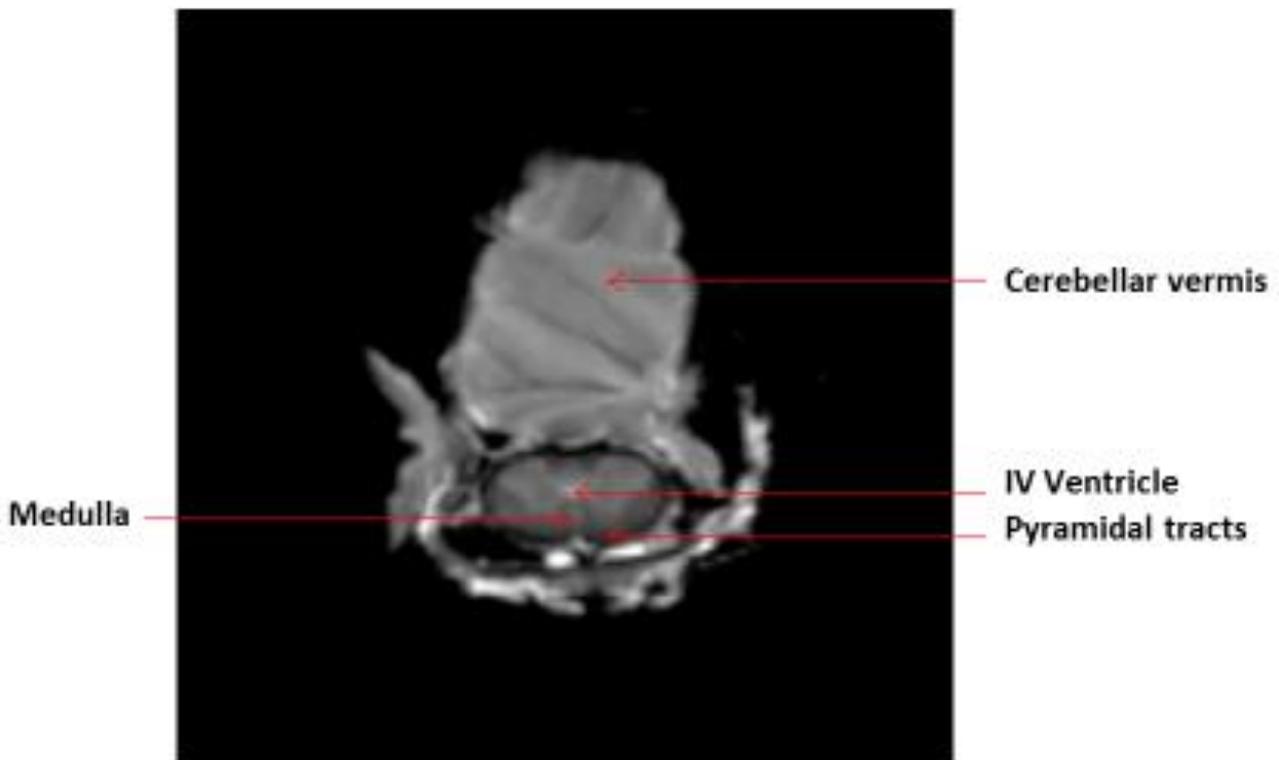


Figure 49: Niveau E - Coupe transversale en pondération T2

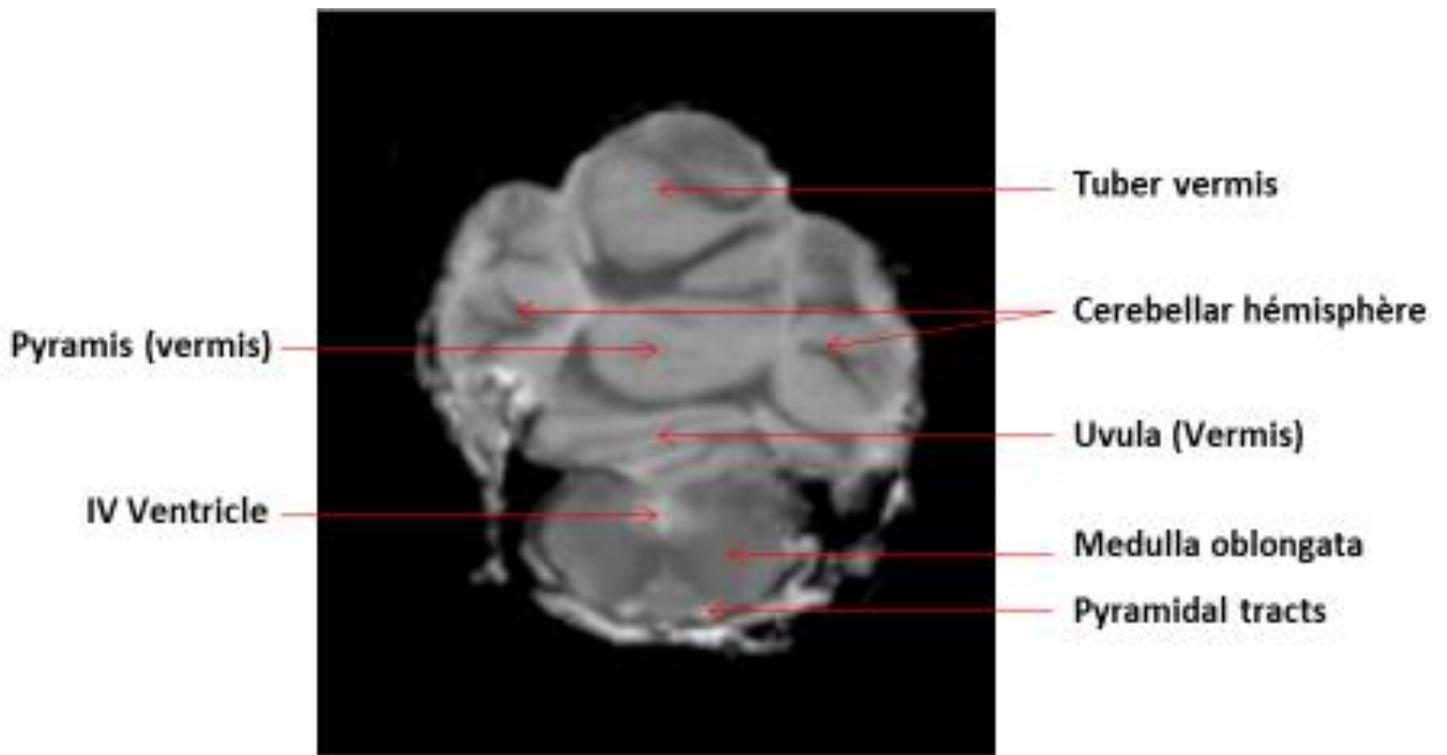


Figure 50: Niveau F - Coupe transversale en pondération T2

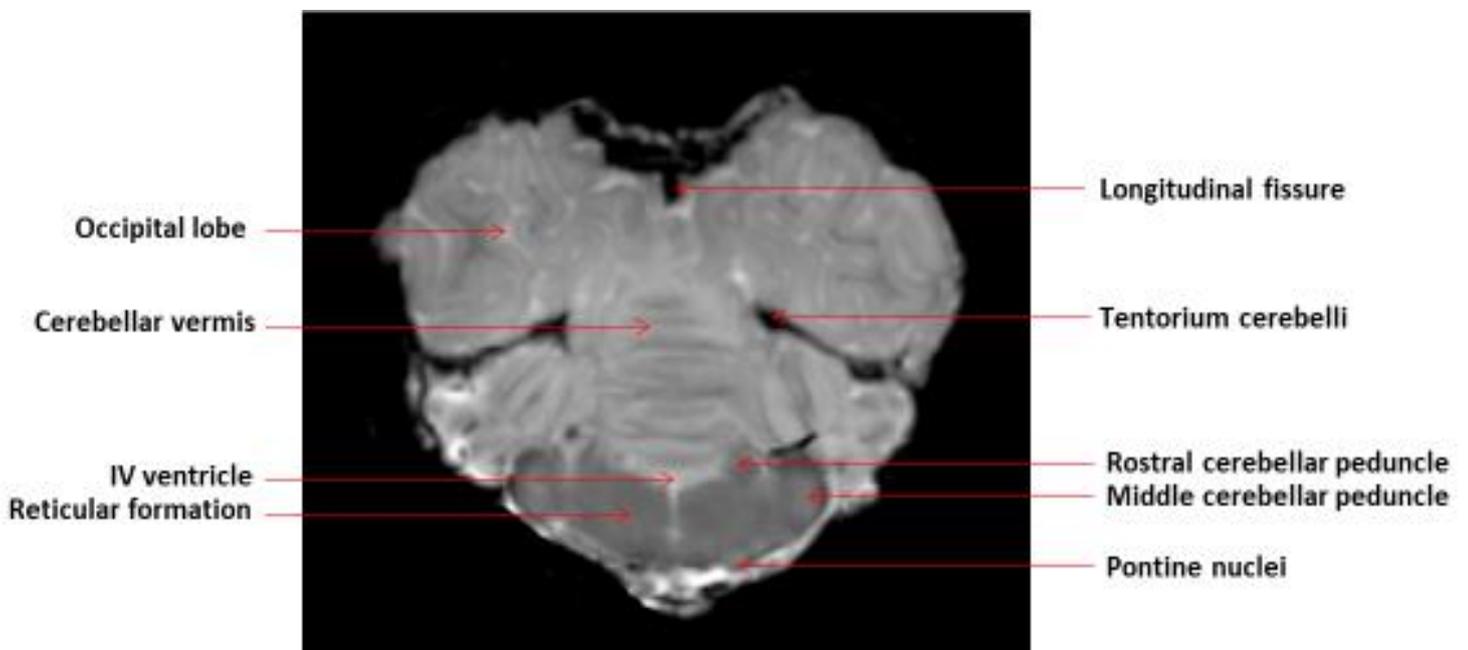


Figure 51: Niveau G - Coupe transversale en pondération T2

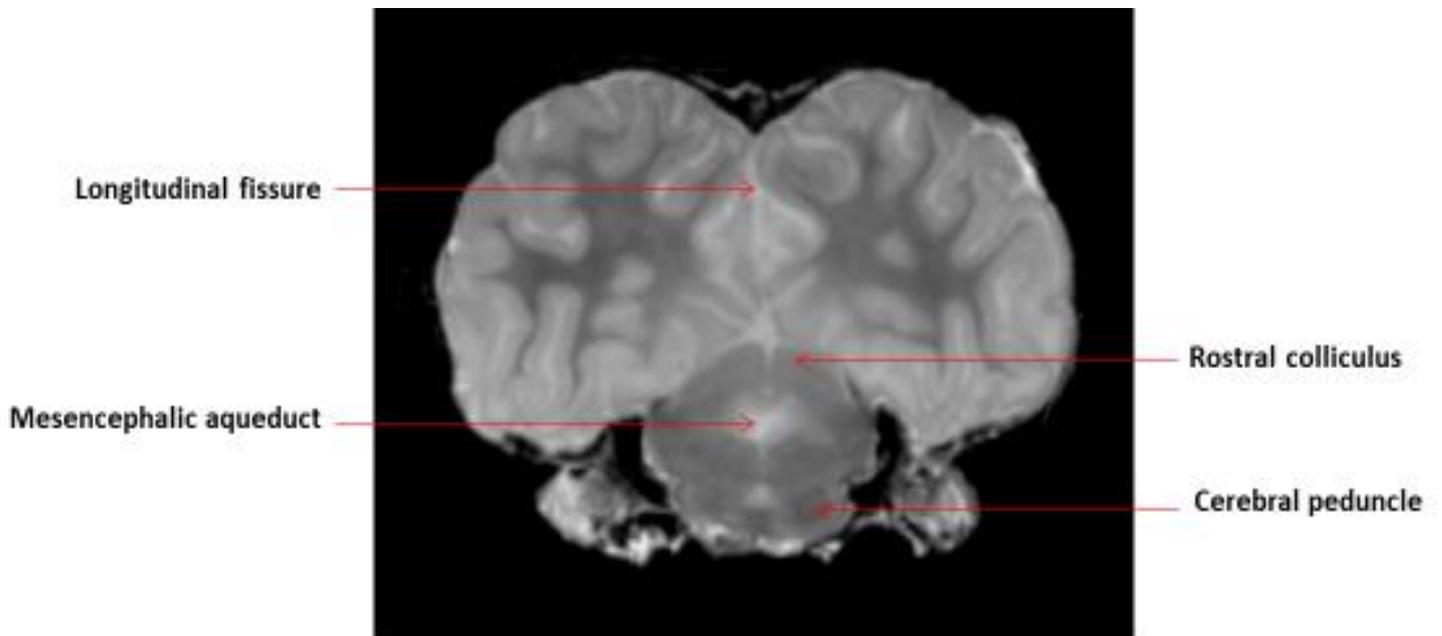


Figure 52: Niveau H - Coupe transversale en pondération T2

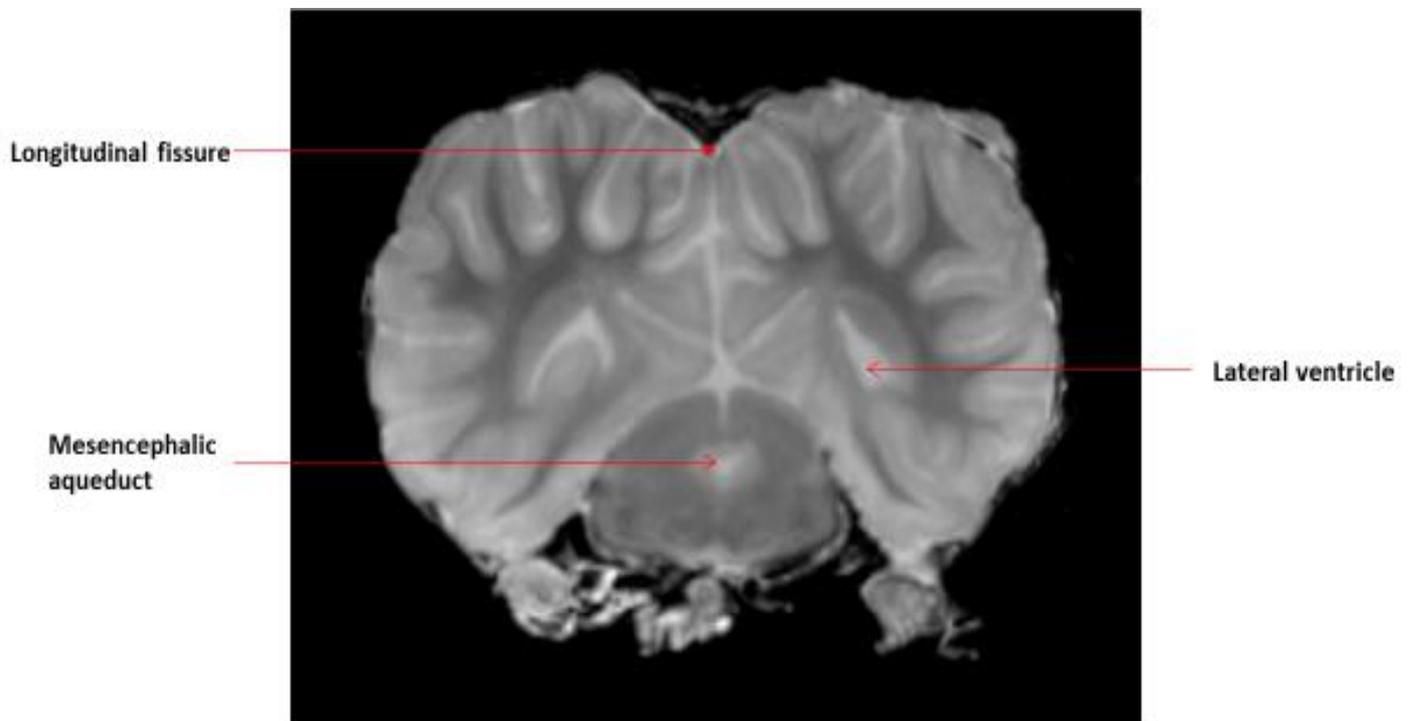


Figure 53: Niveau I - Coupe transversale en pondération T2

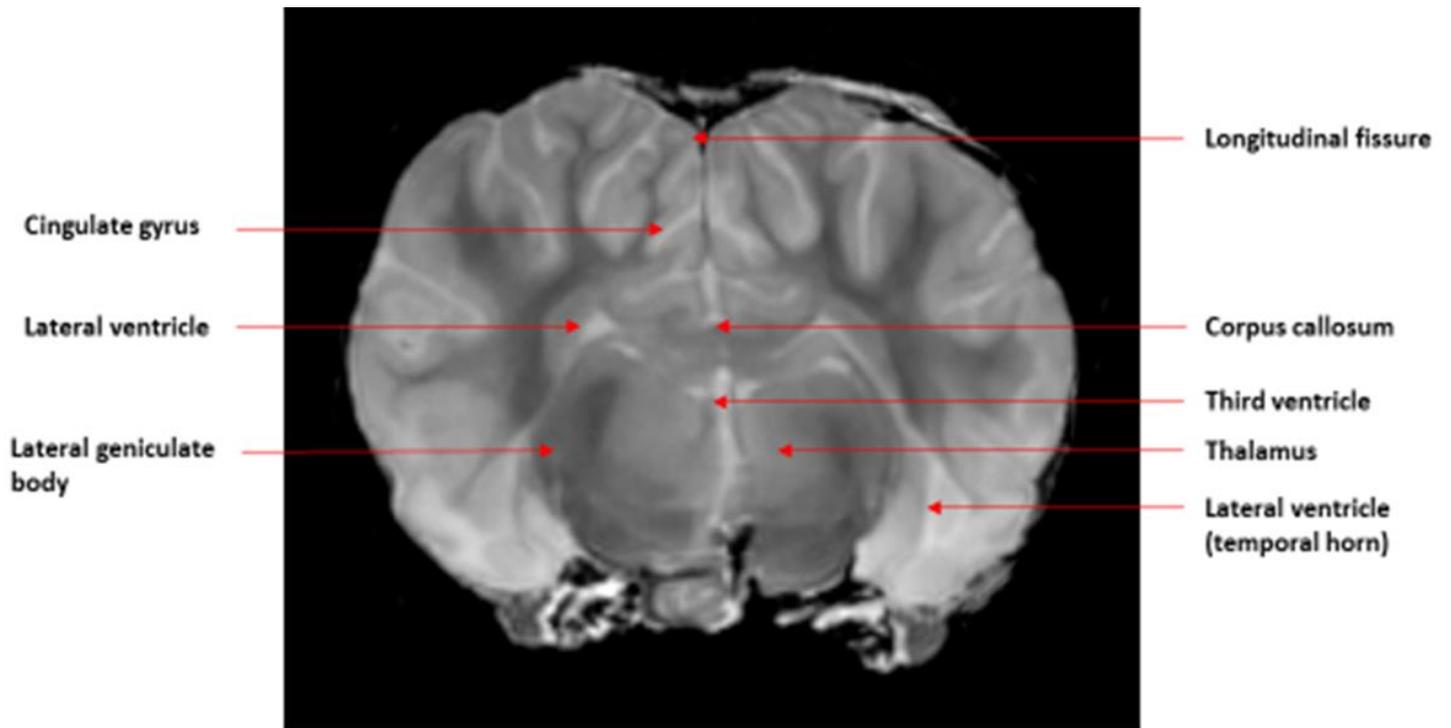


Figure 54: Niveau J - Coupe transversale en pondération T2

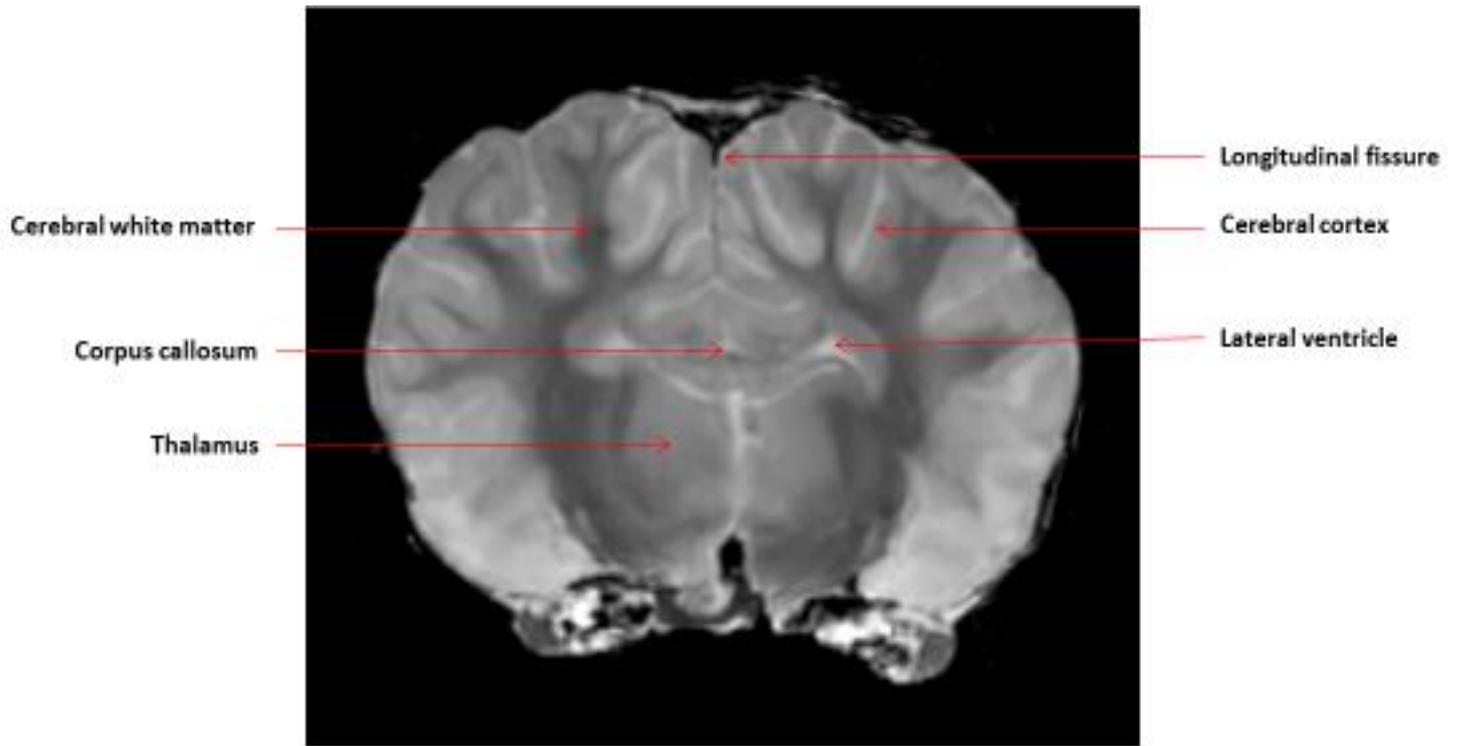


Figure 55: Niveau K - Coupe transversale en pondération T2

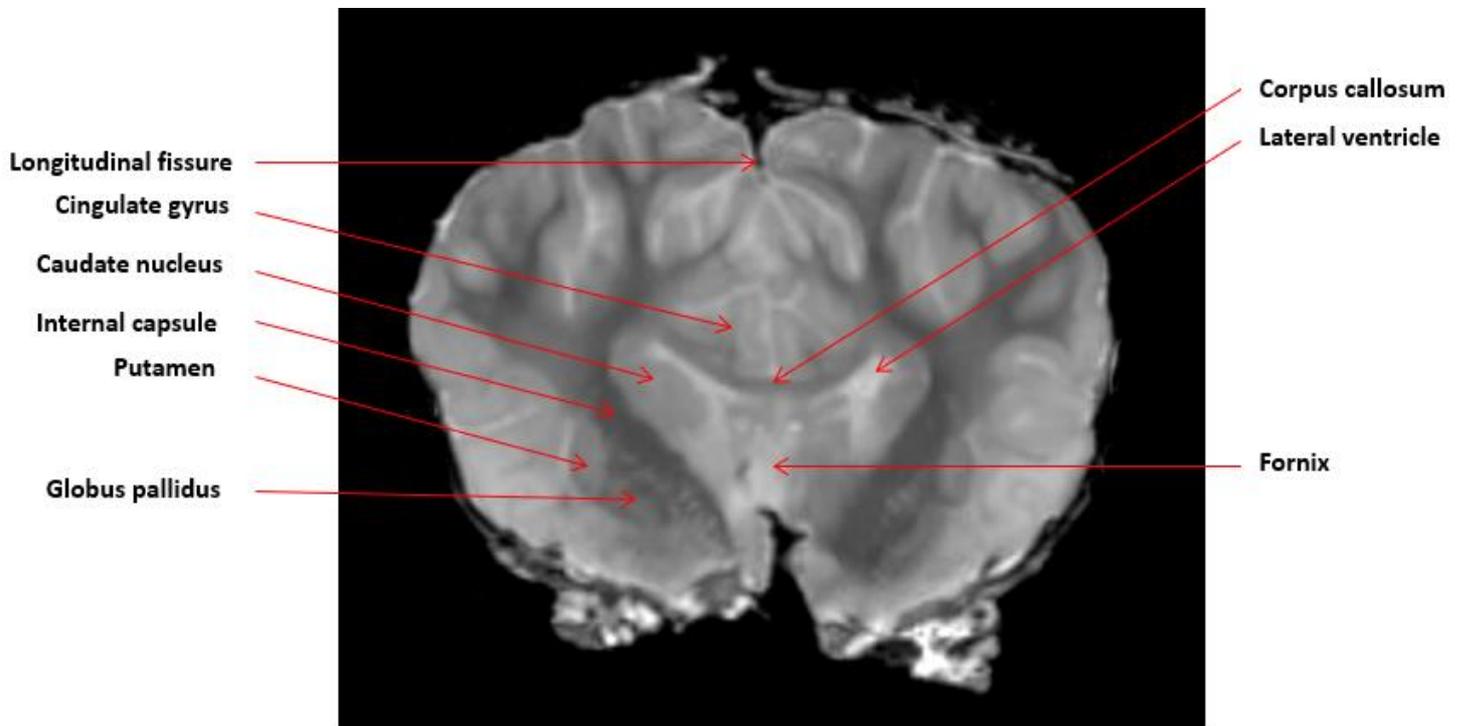


Figure 56: Niveau L - Coupe transversale en pondération T2

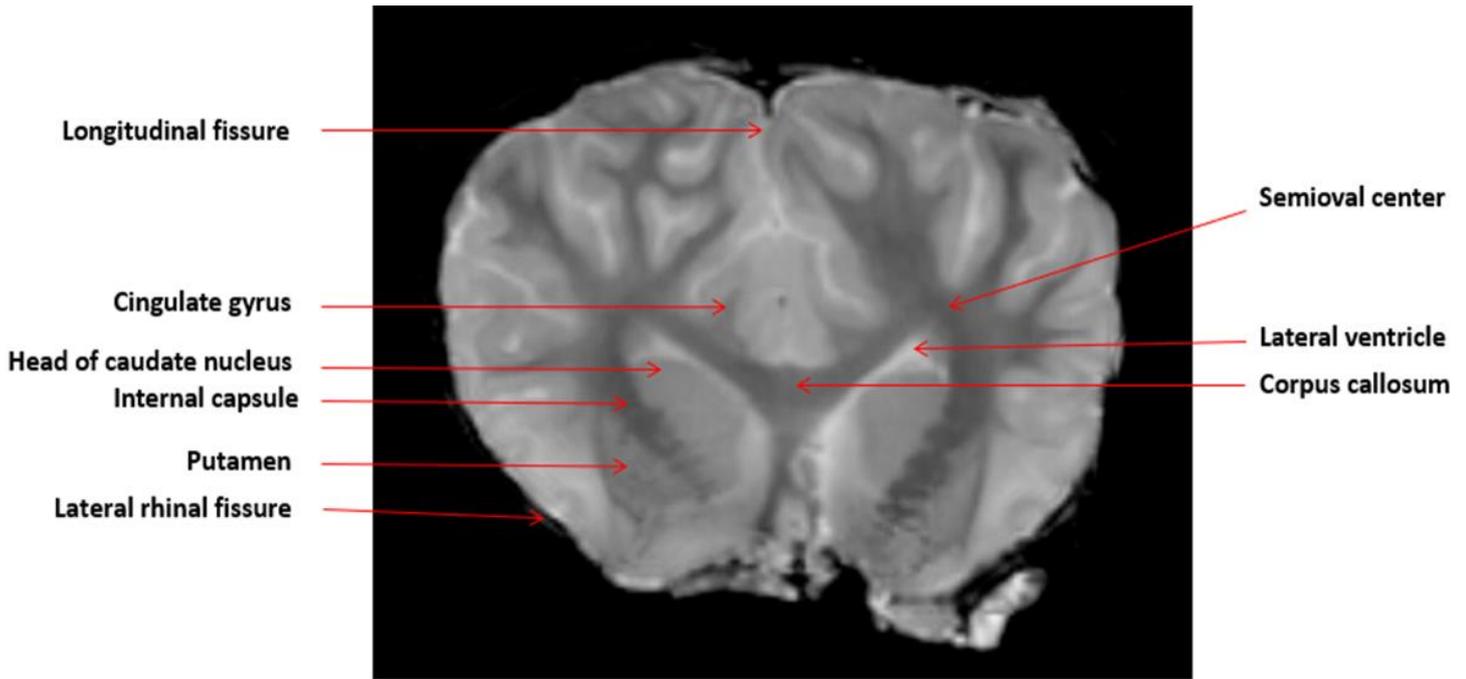


Figure 57: Niveau M - Coupe transversale en pondération T2

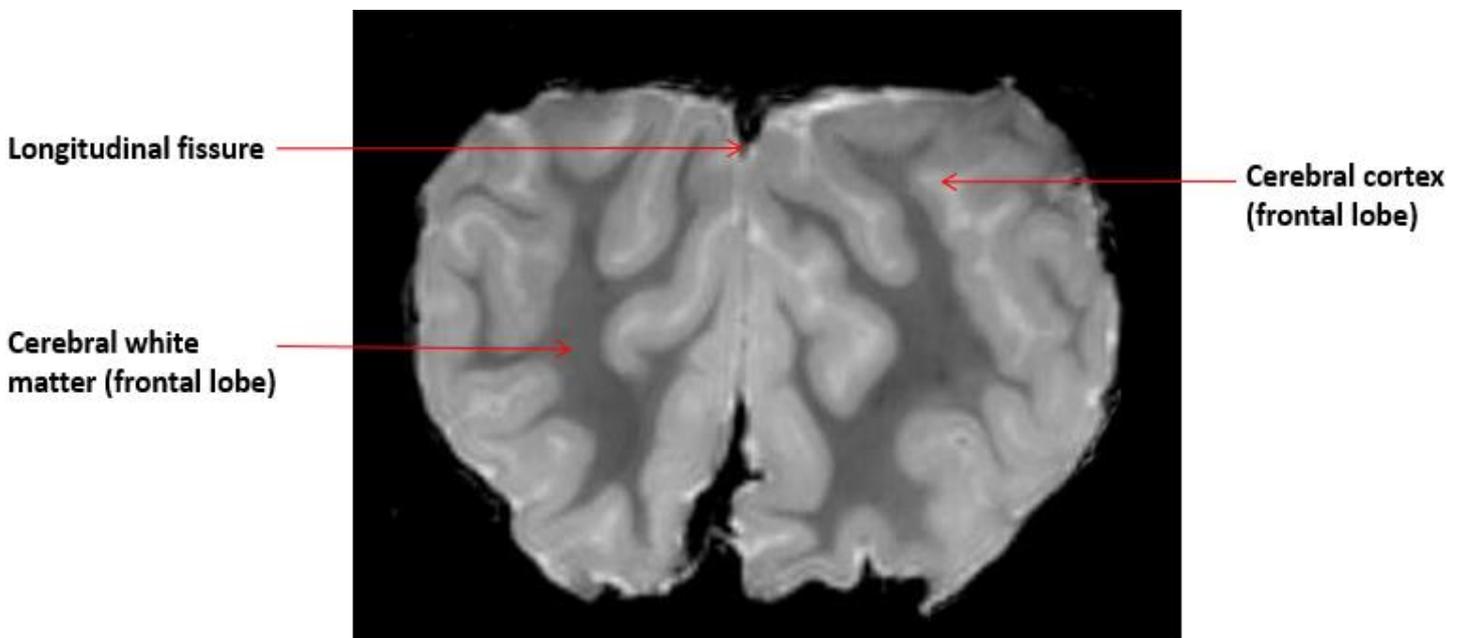


Figure 58: Niveau N - Coupe transversale en pondération T2

#### 5.4. Coupe dans le plan sagittal

La coupe sagittale présentée est réalisée en pondération T2. Seule une coupe a été sélectionnée, correspondant à la coupe médiane, car les coupes sagittales n'apportent pas de structure anatomique d'intérêt en plus des transverses et dorsales. Cette coupe se trouve sur la page suivante.

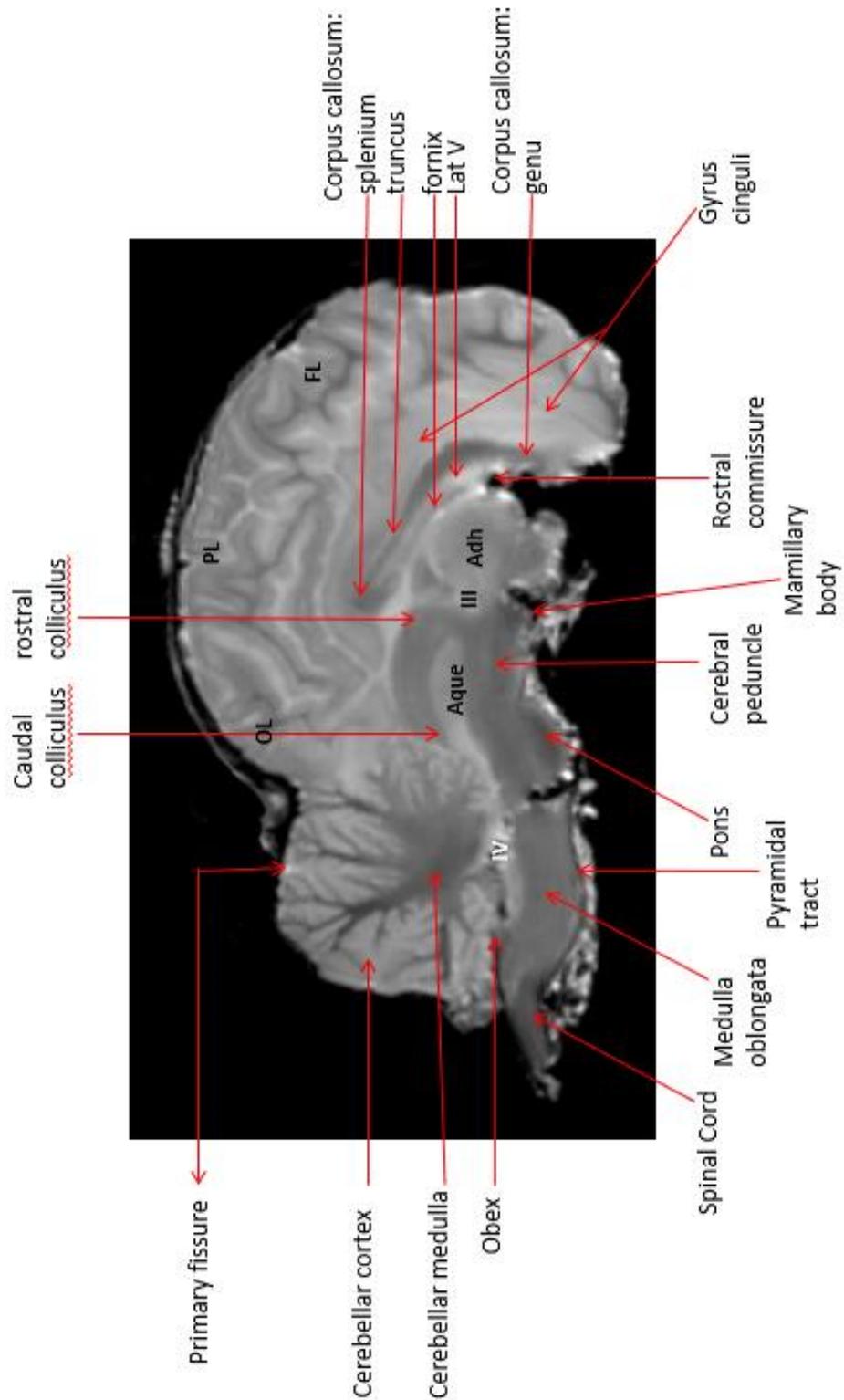


Figure 59: Coupe sagittale dans le plan médian en pondération T2

FL: Frontal Lobe ; PL: Parietal lobe ; OL: Occipital lobe ; Adh: interthalamic adhesion ; Aque: Aqueduc mesencephalic aqueduct ; III: third ventricle ; IV: fourth ventricle ; Lat V: lateral Ventricle

### III. Discussion

Depuis la première utilisation de l'IRM en médecine vétérinaire en 1980, son utilité pour l'examen de l'appareil locomoteur et surtout de l'encéphale n'est plus à démontrer. Malgré cela elle n'est pas aussi répandue que sa réputation notamment à cause d'un prix à l'achat ainsi que de l'examen en lui-même assez élevés. En médecine des grands animaux, l'utilisation de l'IRM est encore limitée. Dans ce contexte, l'étude de l'encéphale de dromadaire par résonance magnétique peut paraître absurde car c'est un animal dont l'effectif est faible en comparaison des autres grands animaux domestiques. De plus on étudie son cerveau à l'aide de l'appareil d'imagerie médicale le plus sophistiqué à ce jour, le plus coûteux et donc le moins fréquent dans les centres vétérinaires.

Pourtant, cette étude trouve parfaitement sa place dans le monde actuel, pour plusieurs raisons citées tout le long de cette thèse : avoir une référence d'un cerveau sain pour cette espèce, dont la place en Asie et Afrique est plus importante chaque année, est essentiel pour optimiser les interprétations d'imagerie. De plus l'IRM peut apporter une aide au diagnostic et à la recherche sur cette maladie émergente qu'est l'encéphalopathie spongiforme du dromadaire notamment grâce à l'imagerie de diffusion. Certains dromadaires ont de la valeur, c'est le cas des animaux destinés à la course et ceux présents dans les parcs et refuges animaliers : développer les connaissances sur le dromadaire devient alors nécessaire, nous avons fait le choix d'approfondir celles concernant le système nerveux. L'exigence des clients tend à augmenter, en témoigne l'hôpital spécialisé en camélidés à Dubaï. Il est alors primordial d'être apte à répondre à cette demande grandissante. En effet, nous allons retrouver les mêmes anomalies que les chevaux de courses, l'IRM a alors sa place dans le diagnostic in vivo des pathologies cérébrales (tumeurs, congénitales) mais aussi locomotrices.

C'est dans cette démarche qu'a débuté ce travail de thèse. En créant cet atlas IRM haut champ d'encéphale de dromadaire avec les machines les plus puissantes actuellement utilisées en cliniques humaines, nous espérons apporter une contribution au développement des neurosciences chez les camélidés parallèlement à l'expansion de cette espèce.

Notre étude vient donc s'ajouter à la littérature scientifique et s'inscrit dans une démarche de progression en imagerie des camélidés. Comme vu précédemment, il n'y a, à notre

connaissance, seulement trois études qui présentent l'anatomie de l'encéphale du dromadaire sain par résonance magnétique:

- L'article d' Arencibia et al. de 2004 présente trois coupes 1,5 T en pondération T1 et T2 dans le plan transverse avec des sections anatomiques comparatives chez un chameleon nouveau-né.
- L'article d'Arencibia et al. de 2005 présente trois coupes transversales, une dorsale et une sagittale en pondération T1 et T2 avec des sections anatomiques comparatives chez le dromadaire. Dans cet article l'auteur utilise un IRM 1,5 T.
- L'article d'Abdellaah et al. de 2015 présente deux coupes transversales, deux dorsales en pondération T1 et T2 et séquence STIR avec douze sections anatomiques comparatives chez le dromadaire. Dans cet article l'auteur utilise un IRM 1,5 T.

Notre étude est complémentaire de ces trois premières, en effet on apporte une meilleure résolution spatiale grâce à une puissance de 3 Tesla, il s'agit d'une première ce qui contribue à un enrichissement de la littérature sur le dromadaire. Le but de notre étude était principalement d'identifier le maximum de structure anatomiques de l'encéphale du dromadaire pour cela un nombre plus important de coupe a été légendé (15 au total).

L'étude présentée dans cette thèse porte sur une tête imagée ex-vivo, en effet la réalisation d'examen in vivo était compliquée d'un point de vue logistique. Elle possède donc les inconvénients liés à l'utilisation d'encéphales post-mortem (perte de contraste entre la substance blanche et la substance grise en pondération T1, difficulté à visualiser le LCS en pondération T2, difficulté à visualiser les grands vaisseaux sanguins en pondération T2). Le délai entre l'acquisition des images et l'euthanasie des dromadaires a été de plusieurs mois, malgré une conservation dans le formol 10%, entraînant une possible dégradation des tissus. En diminuant ces inconvénients logistiques il est possible d'obtenir des encéphales plus intacts et des images en pondération T1 interprétables. Une autre limite à cette étude est l'acquisition des images sur un unique animal.

Malgré les inconvénients d'un examen réalisé en *post-mortem* , il est important de noter que nous avons choisi des temps d'acquisition compatibles avec un examen in vivo (52 minutes). En effet, dans les études ex vivo, les temps d'acquisition sont généralement très

longs (de 5 à 12 heures) pour obtenir une image plus fine car l'examen est affranchi d'une anesthésie et des risques de mouvements de l'animal.

L'ensemble de nos images ont été réalisées en s'appuyant sur les articles déjà publiés et en comparant avec la littérature scientifique équine.

# Conclusion

La compréhension du phénomène physique de résonance magnétique, des différentes séquences disponibles ainsi que l'aspect des tissus nerveux selon ces dernières nous a permis de mieux appréhender l'utilisation et l'interprétation de ces images IRM haute résolution.

L'acquisition d'images d'IRM haute résolution a permis la réalisation de cet atlas détaillé de l'encéphale de dromadaire en pondération T2. En appliquant les progrès de la médecine humaine à la médecine des camélidés nous essayons de rattraper le retard sur les connaissances du dromadaire, dont l'importance économique ne cesse de grandir. Ces images de référence sont les premières obtenues avec une machine 3 Tesla. Disposer d'images de référence de qualité des différentes formations anatomiques est un outil indispensable pour l'interprétation des images d'IRM, autant pour les vétérinaires que pour les étudiants.

L'IRM cérébrale est l'examen complémentaire de référence dans l'exploration du système nerveux central. Cette technologie a l'avantage d'être non invasive et de n'émettre aucune radiation dangereuse. Il s'agit cependant d'un examen onéreux et dont l'application à l'encéphale nécessite une anesthésie générale, ce qui en limite l'usage. L'examen IRM cérébral du dromadaire est pour le moment peu réalisé et uniquement en post-mortem pour la recherche.

Avec l'intensification des secteurs d'activités camelins (lait, viande et course), la grande valeur économique de certaines bêtes et l'émergence de l'ESD, la suite logique serait de compléter cet atlas avec d'autres séquences, utiliser l'IRM à des fins diagnostiques du vivant de l'animal.

# ANNEXES

## Annexe 1 : Lexique des images légendées

Nom anglais – Nom français – Nom latin

Caudal culliculus – Colliculus caudal – Colliculus caudalis

Cerebellar peduncle – Pédoncule cérébelleux - Pedunculus cerebellaris

Caudate nucleus – Noyau caudé – Nucleus caudatus (Corpus striatum)

Cerebellar hemisphere – Hemisphere cerebral – Hemispherium cerebelli

Cerebellar tentorium – Tente du cervelet – Tentorium cerebelli

Cerebral cortex – Cortex cérébral – Cortex cerebrum

Cerebral peduncle – Pédoncule cérébral – Pedunculus cerebrum (Sectiones ponti)

Cerebral white matter – Substance blanche – Substantia alba

Cerebellum – Cervelet - Cerebellum

Cingulate gyrus – Gyrus cingulaire – Gyrus cinguli (Neopallium)

Corpus callosum – Corps calleux – Corpus callosi

Fornix – Fornix - Fornix

Fourth ventricle – Quatrième ventricule – Ventricularis quartus

Frontal lobe – Lobe frontal – Lobus frontalis

Geniculate body – Corps géniculé – Corpus geniculatum

Genu of corpus callosum – Genou du corps calleux – Genu corporis callosi (Corpus callosum)

Globus pallidus - Globus pallidus - Globus pallidus (Pallidum - Corpus striatum)

Gyrus dentatus – Gyrus denté – Gyrus dentatus (Pars limbica rhinencephali)

Hippocampus – Hippocampe – Hippocampus (Pars limbica rhinencephali)

Internal capsule – Capsule interne – Capsula interna (Corpus striatum)

Interthalamic adhesion – Adhésion interthalamique – Adhesio interthalamica (Diencephalon)

Lateral geniculate body – Corps géniculé latéral – Corpus geniculatum laterale

Lateral ventricle – Ventricule latéral – Ventriculus lateralis

Lateral rhinal fissure – Fissure rhinale latérale – Sulcus rhinalis lateralis

Longitudinal fissure – Fissure longitudinal - Fissure longitudinalis

Mamillary body – Corps mamillaire - Corpus mamillare (Hypothalamus)

Medulla oblongata – Moelle allongée – Medulla oblongata

Mesencephalic aqueduct – Aqueduc mésencéphalique - Aqueductus mesencephali

Obex – Obex – Obex

Occipital lobe – Lobe occipital – Lobus occipitalis

Parietal lobe – Lobe pariétal – Lobus parietalis

Pons – Pont – Pons (Cerecellum)

Primary fissure – Fissure primaire – Fissura prima

Putamen – Putamen – Putamen (Corpus striatum)

Pyramidal tract – Tractus pyramidal – Tractus pyramidalis (sectiones mesencephali)

Reticular formation – formation réticulaire – formatio reticularis

Rostral colliculus – Colliculus rostral - Colliculus rostralis

Rostral commissure – Commissure antérieure - Commissura rostralis

Semioval center – Centre semi-ovale – Centrum semiovale (sectiones neopallii)

Spinal cord – Moelle épinière – Medulla spinalis

Splenium corpus callosum – Splenium du corps calleux – Splenium corporis callosi (Corpus callosum)

Substantia nigra – Substance noire - Substantia nigra

Thalamus – Thalamus - Thalamus

Third ventricle – Troisième ventricule – Ventricularis tertius

Truncus corpus callosum – Tronc du corps calleux - Truncus corporis callosi (Corpus callosum)

Vermis – Vermis - Vermis

## **Annexe 2** : La protéine prion et sa pathogénie

En 1982, Stanley Prusiner démontre la nature protéique de l'agent pathogène responsable de la tremblante chez le mouton, il l'appelle : « PRION », signifiant « PROteinaceous INfectious particle » ou « PRoteinaceous Infectious ONly » selon d'autres sources (que l'on peut traduire par particule infectieuse protéique uniquement).

Ainsi le prion est une protéine pathogène. Dans cette annexe nous abordons les modalités moléculaires propres aux prions essentielles à la compréhension des Encéphalopathies Spongiformes Transmissibles. Soit PrPc (protéine prion cellulaire) correspondant à la molécule prion non pathogène, elle est majoritairement composée d'hélices  $\alpha$ , sensibles aux détergents et à la protéinase K (67). La PrPc est une protéine du système nerveux, notamment du cerveau. Elle est synthétisée en grande quantité, par les neurones et les cellules gliales. En périphérie, elle est également exprimée par des cellules telles que les cellules immunitaires (68). Elle a différents rôles dont le principal est celui anti-apoptotique.

Après synthèse protéique, on peut diviser le monomère en trois parties:

- La séquence allant du 1er au 22ème acide aminé correspond à la séquence signal et sera éliminée.

- La séquence partant du 232ème acide aminé au 254ème acide aminé est la partie destinée à l'ancre glycosylphosphatidylinositol (GPI) qui est un glycolipide permettant l'ancrage de la PrPc au sein de la membrane plasmique des cellules cérébrales.

- La partie qui nous intéresse le plus est la partie fonctionnelle de la PrPc qui se situe entre le 23ème et le 231ème acide aminé. La résonance magnétique nucléaire a permis de distinguer une région N-terminale des acides aminés 23 à 121 et une partie C-terminale qui s'étend du 122ème au 231<sup>ème</sup> acide aminé. La structure en trois dimensions est déterminée par la structure secondaire de la protéine qui se trouve dans la partie globulaire de la région C-terminale : trois hélices  $\alpha$ , un feuillet  $\beta$  formé de deux brins antiparallèles et un pont disulfure. La région N-terminale considérée comme désordonnée possède toutefois des régions stables: une région avec une répétition imparfaite d'un octapeptide (5 fois) riche en proline, glycine et histidine qui permet à la PrPc de se lier avec le cuivre. La figure 1 montre la structure de la PrPc, composée de 3 hélices  $\alpha$  (69,70)

La protéine prion pathogène se distingue de la protéine prion normale sur différents aspects notamment sa capacité de résistance à la digestion par les protéases par rapport à son homologue normale. C'est pourquoi on l'appelle PrPres pour « protéine prion résistante » ou encore PrPsc pour « scrapie » appellation anglaise de la tremblante du mouton.

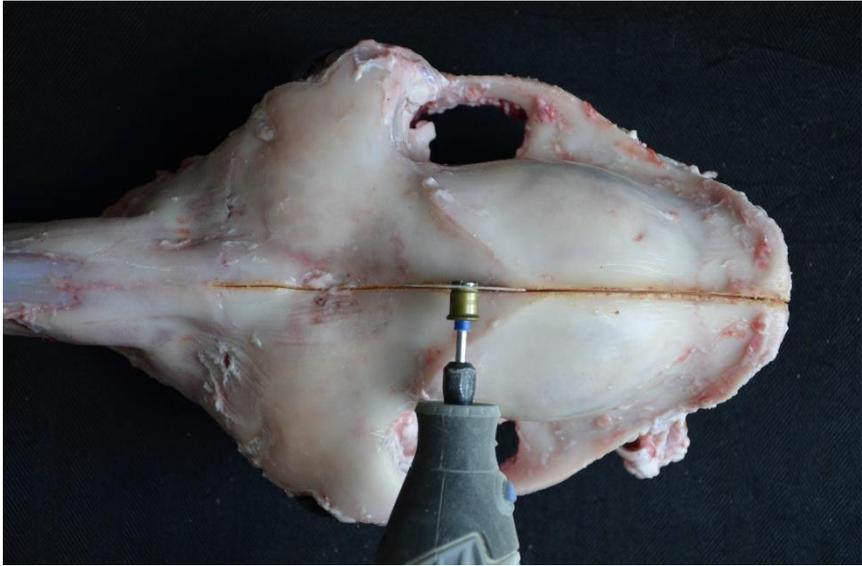
La PrPsc est difficile à analyser car elle n'est pas soluble dans les détergents, résiste partiellement à l'action des protéases et se trouve souvent sous la forme d'agrégats d'amyloïdes. L'analyse électrophorétique bidimensionnelle de cette dernière est intéressante. En effet elle fournit des informations sur les poids moléculaire des peptides issus de la dégradation partielle par la protéinase K (71). Cette dernière est une enzyme naturellement présente dans les cellules, elle a pour fonction de dégrader complètement des protéines comme la PrPc, et ainsi d'éviter leur accumulation. Quant à la PrPsc, une résistance à la protéinase K est observée. Ainsi la PrPsc n'est hydrolysée que partiellement ce qui produit un fragment de peptide de poids moléculaire de 27 à 30 kDa, appelé PrP 27-30 (69,72).

La protéine normale possède une structure primaire identique à celle de la protéine pathologique. Toutefois elles se distinguent au niveau de leur structure tridimensionnelle par un repliement différent (Stahl et al., 1993). Des études portent sur la proportion en feuillets  $\beta$  et en hélices  $\alpha$  avant et après le changement de conformation. Les publications montrent une augmentation en feuillets  $\beta$  passant de 3% à 45% associée à une diminution en hélice  $\alpha$  passant de 40% à 30% (69,70,73).

Une étude récente remet en cause ces données et propose comme structure de la PrPsc, une protéine composée à 53% de feuillets  $\beta$  et à 47% de boucles libres. Aucune hélice  $\alpha$  ne constitue la protéine sous ses formes pathologiques (73).

La PrPres peut se lier et convertir en cascade la PrPc en variant anormal. Ces dernières s'agrègent entre elles en dépôt amyloïde qui aboutit à la mort neuronale par apoptose.

**Annexe 3 : Images de dissection de la tête et de l'extraction de l'encéphale de dromadaire**



# Bibliographie

1. Kastler B, Vetter D. Comprendre l'IRM: Manuel d'auto-apprentissage. Elsevier Masson; 2011. 390 p.
2. Kastler B, Vetter D, Patay Z, Germain P. Chapitre 1: Magnétisme nucléaire. In: Comprendre l'IRM: Manuel d'auto-apprentissage. Elsevier Masson. 2011.
3. Kastler B, Vetter D, Patay Z, Germain P. Chapitre 2: Le phénomène de résonance magnétique. In: Comprendre l'IRM: Manuel d'auto-apprentissage. Elsevier Masson. 2011.
4. Kastler B, Vetter D, Patay Z, Germain P. Chapitre 3: Les phénomènes de relaxation. In: Comprendre l'IRM: Manuel d'auto-apprentissage. Elsevier Masson. 2011.
5. Cours d'IRM (Imagerie par résonance magnétique) en ligne [Internet]. IMAIOS. [cité 1 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.imaios.com/fr/e-Cours/e-MRI>
6. Kastler B, Vetter D, Patay Z, Germain P. Chapitre 13: Instrumentation IRM et modalités pratiques des explorations. In: Comprendre l'IRM: Manuel d'auto-apprentissage. Elsevier Masson. 2011.
7. Hoa D, Micheau G. L'IRM pas à pas. Editions Sauramps Medical. 2008.
8. Figure I.23 : Exemple des bobines de gradients. [Internet]. ResearchGate. [cité 2 mai 2020]. Disponible sur: [https://www.researchgate.net/figure/Exemple-des-bobines-de-gradients\\_fig15\\_273001570](https://www.researchgate.net/figure/Exemple-des-bobines-de-gradients_fig15_273001570)
9. Kastler B, Vetter D, Patay Z, Germain P. Chapitre 4: La séquence de base: séquence d'écho de spin. In: Comprendre l'IRM: Manuel d'auto-apprentissage. Elsevier Masson. 2011.
10. Kastler B, Vetter D, Patay Z, Germain P. Chapitre 5: Contraste en T1, T2, et densité protonique. In: Comprendre l'IRM: Manuel d'auto-apprentissage. Elsevier Masson. 2011.
11. Werpy NM. Magnetic Resonance Imaging of the Equine Patient: A Comparison of High- and Low-Field Systems. Clin Tech Equine Pract. 1 janv 2007;6(1):37-45.
12. De Kerviler E, Leroy-Willig A. Interprétation du signal et du contraste en IRM. IRM Prat - Journ Fr Radiol. 2001;3-13.
13. Kastler B, Vetter D, Patay Z, Germain P. Chapitre 8: Facteurs de qualité de l'image en IRM. In: Comprendre l'IRM: Manuel d'auto-apprentissage. Elsevier Masson. 2011.
14. Kastler B, Vetter D, Patay Z, Germain P. Chapitre 11: Artefacts en imagerie par résonance magnétique. In: Comprendre l'IRM: Manuel d'auto-apprentissage. Elsevier Masson. 2011.

15. Kastler B, Vetter D, Patay Z, Germain P. Chapitre 6: Codage spatial du signal et mise en place des évènements d'une séquence IRM. In: Comprendre l'IRM: Manuel d'auto-apprentissage. Elsevier Masson. 2011.
16. Pattany PM. 3T MR imaging: the pros and cons. *AJNR Am J Neuroradiol.* oct 2004;25(9):1455-6.
17. J A-L. 3T MRI: advances in brain imaging. *European Journal of Radiology.* 2008;
18. Les camélidés ( dromadaires et chameaux ) [Internet]. [cité 2 mai 2020]. Disponible sur: <http://camelides.cirad.fr/index.html>
19. Konuspayeva G. Variabilité physico-chimique et biochimique du lait des grands camélidés (*Camelus bactrianus*, *Camelus dromedarius* et hybrides) au Kazakhstan. Université Montpellier; 2007.
20. Faye B. Guide de l'élevage du dromadaire. Première édition. Montpellier; 1997. 126 p.
21. Faye B, Jaouad M, Bhrawi K, Senoussi A, Bengoumi M. Elevage camelin en Afrique du Nord : état des lieux et perspectives. *Rev D'élevage Médecine Vét Pays Trop.* 2 oct 2015;67(4):213.
22. Faye B, Vias-Franck G, Chaibou M. Le dromadaire profite-t-il du changement climatique ? *Courrier de l'environnement de l'INRA.* août 2013;(63):131-40.
23. Peyre De Fabrègues B. Le dromadaire dans son milieu naturel. *Rev Elev Médecine Vét Pays Trop.* 1989;
24. Scaramella D, Cianci D, Macchioni G. *Il Camelo.* Edizioni Agricole; 1989.
25. Wilson RT. The one-humped camel in the world. Séminaire sur la digestion, la nutrition et l'alimentation du dromadaire (Options Méditerranéennes: Série A, Séminaires Méditerranéens; n 2). 1989;15-7.
26. Longo-Hammouda F-H. Comparaison de l'anatomie, la physiologie de la digestion et le métabolisme des camélidés par rapport aux ruminants. Fatma Hasna LONGO-HAMMOUDA et Aziz MOUATS. *Journal Algérien des Régions Arides. Revue scientifique annuelle No.07 ; 2008 ; pp :-18-25. J Algér Régions Arid Rev Sci Annu No07 2008 Pp 25-18. 1 janv 2008;18-25.*
27. Faye B, Jouany JP, Chacornac JP, RATOVOANAHARY M. L'élevage des grands camélidés. Analyse des initiatives réalisées en France. *INRA Prod Anim.* 1995;8(1):3-17.
28. Bengoumi M, Faulconnier Y, Tabarani A, Sghiri A, Faye B. Effects of feeding level on body weight, hump size, lipid content and adipocyte volume in the dromedary camel. *Anim Res EDP Sci.* 2005;54(5):383-93.
29. Bengoumi M, Faye B. Adaptation du dromadaire à la déshydratation. *Sci Chang Planétaires Sécher.* 5 août 2002;13(2):121-9.

30. Pond WG, Bell AW, éditeurs. Encyclopedia of animal science. New York, NY: Marcel Dekker; 2005. 926 p.
31. Faye B, Bengoumi M. Le dromadaire face à la sous-nutrition minérale : un aspect méconnu de son adaptabilité aux conditions désertiques. *Sécheresse*. 2000;11(3):155-61.
32. Zarrouk A, Souilem O, Beckers JF. Actualités sur la reproduction chez la femelle dromadaire (*Camelus dromedarius*). *Rev D'élevage Médecine Vét Pays Trop*. 1 janv 2003;56(1-2):95.
33. Wilson RT. Reproductive performance of the one-humped camel. The empirical base. *Rev D'élevage Médecine Vét Pays Trop*. 1 janv 1989;42(1):117-25.
34. Memoire Online - Caractérisation de la population des dromadaires (*camelus dromedarius*) en Tunisie - Mohamed OULD AHMED [Internet]. Memoire Online. 2009 [cité 3 mai 2020]. Disponible sur: [https://www.memoireonline.com/09/10/3877/m\\_Caracterisation-de-la-population-des-dromadaires-camelus-dromedarius-en-Tunisie15.html](https://www.memoireonline.com/09/10/3877/m_Caracterisation-de-la-population-des-dromadaires-camelus-dromedarius-en-Tunisie15.html)
35. Ramet JP. La technologie des fromages au lait de dromadaire (*Camelus dromedarius*) [Internet]. 1993 [cité 3 mai 2020]. Disponible sur: <http://www.fao.org/3/T0755F/T0755F00.htm>
36. Wardeh AF. Classification of the dromedary camels. *Journal Camel Science*. 2004;1 (1) : 1-7.
37. Ould Taleb MEH. Généralités sur l'élevage du dromadaire en Mauritanie. 1999;
38. Abaab A, Bédrani S, Chiche J. Les politiques agricoles et la dynamique des systèmes agropastoraux au Maghreb. In: In: Allaya M (ed) *Les agricultures maghrebines à l'aube de l'an 2000*. Montpellier (France): CIHEAM-IAMM. 1995. p. 139-65. (Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches).
39. Faye B, Senoussi H, Jaouad M. Le dromadaire et l'oasis : du caravansérail à l'élevage périurbain. *Cah Agric*. janv 2017;26(1):14001.
40. Kaufmann B. Analysis of Pastoral Camel Husbandry in Northern Kenya. Margraf; 1998. 194 p.
41. Bourbouze A. Systèmes d'élevage et production animale dans les steppes du nord de l'Afrique : une relecture de la société pastorale du Maghreb. In 2006.
42. Faye B, Grech S, Korchani T. Le dromadaire, entre féralisation et intensification. *Anthropozoological*. 2004;39(2):7-14.
43. Meyer C. La reproduction des grands et petits camélidés domestiques. :18.

44. Moslah M. L'amélioration de la productivité du dromadaire en Tunisie par la séparation précoce du chamelon et l'allaitement artificiel. Allocution d'ouverture. Atelier peut-on améliorer les performances de reproduction des camelins . 10 sept 1990;
45. Khanna ND, Rai AK, Tandon SN. Camel Breeds of India. *J Camel Science*. 2004;1:8-15.
46. Qiao B, Fang C, Ban M. Investigation of the Interactive, Intimidating Relation Between Urbanization and the Environment in an Arid Area Based on Grey System Theory. *J China Univ Min Technol*. 1 déc 2006;16(4):452-6.
47. Faye B, Esenov P. Desertification Combat and Food Safety: The Added Value of Camel Producers. IOS Press; 2005. 241 p.
48. Kamoun M. Le lait de dromadaire : production, aspects qualitatifs et aptitude à la transformation. In: In: Tisserand J-L (ed) *Elevage et alimentation du dromadaire*. Zaragoza: CIHEAM. 1995. p. 81-103. (Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches).
49. Sboui A, Djegham M, Belhadj O, Khorchani T. Le lait de chamelle : qualités nutritives et effet sur les variations de la glycémie. In: In: Napoléone M (ed), Ben Salem H (ed), Boutonnet JP (ed), Lopez-Francos A (ed), Gabina D (ed) *The value chains of Mediterranean sheep and goat products Organisation of the industry, marketing strategies, feeding and production systems*. Zaragoza: CIHEAM. 2016. p. 487-92. (Options Méditerranéennes: Series A, Séminaires Méditerranéen Seminars).
50. Magjeed NA. Corrective effect of milk camel on some cancer biomarkers in blood of rats intoxicated with aflatoxin B1. *Journal of the Saudi Chemical society* 9 (2). 2005;253-63.
51. Shabo Y, Yagil R. Etiology of autism and camel milk as therapy. *Int J Disabil Hum Dev*. 1 avr 2005;4.
52. Faye B, Abdelhadi O, Raiymbek G, Kadim I, Hocquette JF. La production de viande de chameau : état des connaissances, situation actuelle et perspectives. *INRAE Prod Anim*. 18 juin 2013;26(3):289-300.
53. Kamoun M, Girard P, Bergaoui R. Alimentation et croissance du dromadaire. Effet d'un aliment concentré sur l'ingestion de matière sèche et la croissance du chamelon en Tunisie. *Rev Elev Médecine Vét Pays Trop*. 1989;42(1):89-94.
54. Skidmore JA, Billah AM, Allen WR. Using modern reproductive technologies such as embryo transfer and artificial insemination to improve the reproductive potential of dromedary camels. *Rev Elev Méd Vét Pays trop* 53. 2000;97-100.
55. Dubaï, royaume de la course de dromadaires [Internet]. 2016 [cité 4 mai 2020]. Disponible sur: <https://voyages.michelin.fr/proche-et-moyen-orient/emirats-arabes-unis/dubai/reportage/dubai-royaume-de-la-course-de-dromadaires>

56. Gasmi M. Le dromadaire de course : dressage, entraînement, hématologie et alimentation (Emirats Arabes Unis) [Internet] [thesis]. [Montpellier]: UM2; 2003 [cité 4 mai 2020]. Disponible sur: <https://agritrop.cirad.fr/517570/>
57. Pellegrini P. De l'idée de race animale et de son évolution dans le milieu de l'élevage. *Rural Sci Soc Mondes Ruraux Contemp* [Internet]. 1999 [cité 8 mai 2020];(05). Disponible sur: <http://journals.openedition.org/ruralia/112>
58. FAO. Caractérisation phénotypique des ressources génétiques animales. Directives FAO sur la production et la santé animale No 11. 2013;
59. Babelhadj B, Bari MAD, Pirisinu L, Chiappini B, Gaouar SBS, Riccardi G, et al. Prion Disease in Dromedary Camels, Algeria. *Emerg Infect Dis J.* juin 2018;24(6).
60. Nougaret S, Brunel H, Bourbotte G, Bonafé A. Imagerie de diffusion et maladie de Creutzfeldt-Jakob sporadique. *J Neuroradiol.* 30 mars 2008;34(4):260-6.
61. Tyler KL. Creutzfeldt–Jakob Disease. *The New England Journal of Medicine.* 2003;
62. Alaoui A, Alami B, Habibi H, Haloua M, Lamrani YA, Boubbou M, et al. Apport de l'IRM dans la maladie de Creutzfeldt-Jakob: à propos d'un cas. *Pan Afr Med J.* 28 févr 2019;32.
63. Ukisu R, Kushihashi T, Tanaka E, Baba M, Usui N, Fujisawa H, et al. Diffusion-weighted MR imaging of early-stage Creutzfeldt-Jakob disease: typical and atypical manifestations. *Radiogr Rev Publ Radiol Soc N Am Inc.* oct 2006;26 Suppl 1:S191-204.
64. Saddiki FZ, Hassani R, Benabdeljlil M, Aidi S, Moussaoui A. Imagerie de la maladie de Creutzfeldt-Jakob (MCJ) sporadique. *Rev Neurol (Paris).* avr 2007;163(SUP4):74.
65. Abedellaah BEA, Awaad AS, Elhawari S, Sharshar A. Normal brain of one-humped camel: A study with magnetic resonance imaging and gross dissection anatomy. *Indian J Vet Surg.* 2015;36(1):46-50.
66. Arencibia A, Rivero MA, Gil F, Ramirez JA, Corbera JA, Ramírez G, et al. Anatomy of the cranioencephalic structures of the camel (*Camelus dromedarius* L.) by imaging techniques: a magnetic resonance imaging study. *Anat Histol Embryol.* 2005;
67. Acquatella-Tran Van Ba I, Imberdis T, Perrier V. From prion diseases to prion-like propagation mechanisms of neurodegenerative diseases. *Int J Cell Biol.* 2013;2013:975832.
68. Cazaubon S, Viegas P, Couraud P-O. Fonctions de la protéine prion PrPc. *Médecine Sci.* 2007;23(8-9):741-5.
69. Tian C, Dong X. The structure of prion: is it enough for interpreting the diverse phenotypes of prion diseases? *Acta Biochim Biophys Sin.* juin 2013;45(6):429-34.
70. Malevanets A, Chong P, Hansen D, Rizk P, Sun Y, Lin H, et al. Interplay of buried histidine protonation and protein stability in prion misfolding. *Sci Rep.* 1 déc 2017;7.

71. Fiorini M, Bongianni M, Monaco S, Zanusso G. Biochemical Characterization of Prions. *Prog Mol Biol Transl Sci.* 2017;150:389-407.
72. Pan KM, Baldwin M, Nguyen J, Gasset M, Serban A, Groth D, et al. Conversion of alpha-helices into beta-sheets features in the formation of the scrapie prion proteins. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 1 déc 1993;90(23):10962-6.
73. Wille H, Requena JR. The Structure of PrP<sup>Sc</sup> Prions. *Pathog Basel Switz.* 7 févr 2018;7(1).





**AGREMENT SCIENTIFIQUE**

**En vue de l'obtention du permis d'imprimer de la thèse de doctorat vétérinaire**

Je soussigné, Giovanni MOGICATO, Enseignant-chercheur, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, directeur de thèse, certifie avoir examiné la thèse de **Romain PAUMIER** intitulée « **Evaluation post mortem de l'encéphale de dromadaire (*Camelus dromadarius*) par imagerie par résonance magnétique** » et que cette dernière peut être imprimée en vue de sa soutenance.

Fait à Toulouse, le 04 Juin 2020  
Enseignant-chercheur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse  
Professeur Giovanni MOGICATO



Vu :  
Le Directeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse  
M. Pierre SANS

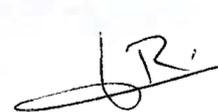


Vu :  
La Présidente du jury  
Professeure Isabelle BERRY



Faculté de Médecine Ranguet  
Géophysique Médicale - CHU Ranguet  
1, avenue Jean Poulhes TSA 50032  
31059 TOULOUSE Cedex

Vu et autorisation de l'impression :  
Le Président de l'Université Paul Sabatier  
M. Jean-Marc BROTO



M. Romain PAUMIER  
a été admis(e) sur concours en : 2015  
a obtenu son diplôme d'études fondamentales vétérinaires le : 09/07/2019  
a validé son année d'approfondissement le 04/06/2020  
n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.

Toulouse, 2020

NOM : **PAUMIER** PRENOM : **Romain**

**TITRE : Evaluation post mortem de l'encéphale de dromadaire (*Camelus dromedarius*) par imagerie par résonance magnétique**

RESUME : Aujourd'hui l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) est la technique d'imagerie de référence pour l'examen de l'encéphale chez les humains comme chez les animaux. L'objectif de cette thèse est de proposer un atlas de l'anatomie de l'encéphale de dromadaire adulte sain à l'aide de coupes IRM haut champ en pondération T2. Dans une première partie, les principes physiques à l'origine du signal de résonance magnétique nucléaire (RMN) sont définis, puis dans une seconde partie, la physiologie ainsi que l'importance économique et sociale du dromadaire dans les pays où il est présent sont développées. Cette seconde partie montre aussi l'intérêt diagnostique croissant de l'IRM chez le dromadaire. Enfin, la troisième partie est consacrée à la présentation du protocole expérimental ainsi que l'atlas des images IRM, et pour finir par une discussion sur cette étude. Les images d'encéphale de dromadaire adulte sain ont été obtenues à l'aide d'un appareil IRM 3 Tesla qualifié de haut champ. Quinze coupes pertinentes d'IRM ont été sélectionnées et légendées avec précision en utilisant des ouvrages d'anatomie et des études déjà publiées. L'atlas est disponible en anglais et contient un lexique en anglais, français et latin.

MOTS-CLES : Dromadaire ; Encéphale ; IRM ; Atlas

---

**TITLE : Post-mortem assessment of the dromedary brain (*Camelus dromedarius*) by magnetic resonance imaging**

ABSTRACT : Nowadays Magnetic Resonance Imaging (MRI) is the referential imaging technique for investigating the central nervous system (CNS) in humans as well as in animals. The purpose of this thesis is from submit an atlas of the anatomy of the brain of healthy adult dromedary using cuts of High field MRI in T2-weighted. In first part, the physical principles at the origin of the nuclear magnetic resonance (NMR) signal are defined. Then, in a second part, the physiology as well as the economical and social importance of dromedary in the countries where it lives are developed. This second part also highlights the growing diagnostic interest in MRI for dromedaries. Finally, the third part is devoted to the presentation of experimental protocol as well as the atlas of MRI images with the legends of the slices, ending with a discussion on this study. Images of the adult healthy dromedary's brain have been obtained with a high field 3 Tesla MRI. Fifteen relevant MRI slices were selected and captioned with precision using anatomic works and studies already published. The atlas is available in English and contains a glossary in English French and Latin.

KEY WORDS : Dromedary ; Brain ; MRI ; Atlas