



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/26669>

To cite this version:

Roche, Sébastien. Mise en place d'un atlas d'images radiographiques et échographiques pathologiques du rat domestique. Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse – ENVT, 2020, 91 p.

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

MISE EN PLACE D'UN ATLAS D'IMAGES RADIOGRAPHIQUES ET ECHOGRAPHIQUES PATHOLOGIQUES DU RAT DOMESTIQUE

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

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

par

ROCHE Sébastien
Né(e), le 22/09/1994 à ANNECY (74)

Directeur de thèse : M. Fabrice CONCHOU

JURY

PRESIDENTE :
Mme Isabelle BERRY

Professeure à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :
M. Fabrice CONCHOU
Mme Géraldine JOURDAN

Maître de Conférences 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
ÉCOLE 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. **SHELCHER 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**, *Zootechne*
- 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 règlementées*
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

A notre présidente du jury de thèse,

Madame le Professeur Isabelle Berry

Professeur à la Faculté de Médecine de Rangueil

Praticien hospitalier

Biophysique médicale

Qui nous fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury de thèse,

Hommages respectueux.

A notre jury de thèse,

Monsieur le Docteur Fabrice Conchou

Maître de conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Anatomie, Imagerie médicale

Qui a accepté de superviser mon travail et m'a fait confiance dans sa réalisation,

Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance sincère et de mon respect.

Madame le Docteur Géraldine Jourdan

Maître de conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Anesthésie, Analgésie

Qui a accepté de participer au jury de thèse,

Remerciements chaleureux.

Table des matières

Remerciements	1
Table des matières	2
Table des figures	4
Introduction	7
I. Principes physiques de la radiographie et de l'échographie.....	9
A. La radiographie.....	9
1. Rayon X et dualité onde-corpuscule	9
2. Production des rayons X	10
3. Interaction des rayons X avec la matière	12
5. Radiographie analogique.....	15
6. Radiographie numérique	18
7. Radioprotection.....	19
B. L'échographie.....	22
1. Introduction.....	22
2. Propriétés du son.....	22
3. Interaction des ultrasons avec la matière	25
4. Modes de l'échographe	29
5. Artefacts.....	31
II. Le rat domestique : Taxonomie, biologie et anatomie	37
A. Taxonomie et histoire.....	37
B. Biologie	38
1. Alimentation	38
2. Vie de reproduction.....	39
3. Comportement.....	40
4. Vie en captivité	41
C. Anatomie et aspect échographique normal	42
1. Système cardio-respiratoire.....	43
2. Système digestif et glandes annexes	45
3. Système urinaire.....	52
4. Système génital	55
5. Squelette.....	60
6. Système endocrinien	62
7. Organes lymphoïdes.....	63
8. Autres.....	65

D.	Radioanatomie.....	65
1.	Généralités	65
2.	Thorax	67
3.	Abdomen.....	69
4.	Membre thoracique	72
5.	Membre pelvien	74
6.	Crâne	76
III.	Atlas d'images radiographiques et échographiques pathologiques.....	79
A.	Matériel et méthode.....	79
B.	Cas n°1	80
C.	Cas n°2	82
D.	Cas n°3	83
	Conclusion.....	87
	Bibliographie.....	89

Table des figures

Figure 1. Diffusion Rayleigh.....	12
Figure 2. Effet Compton.....	13
Figure 3. Effet photoélectrique.....	14
Figure 4. Valeurs limite d'exposition.....	21
Figure 5. Onde sonore et graphique de pression	23
Figure 6. Exemples de vitesse du son selon le milieu traversé	24
Figure 7. Impédances acoustiques de différents milieux	25
Figure 8. Réflexion et réfraction	27
Figure 9. Diffraction VS réflexion	28
Figure 10. Mode Doppler	31
Figure 11. En mode Doppler, les vaisseaux s'éloignant de la sonde sont colorés en bleu, ceux qui s'en rapprochent sont colorés en rouge	31
Figure 12. Artéfacts de cône d'ombre et de renforcement postérieur	32
Figure 13. Artéfact de réverbération	33
Figure 14. Artéfact de mauvais positionnement.....	34
Figure 15. Image en miroir.....	34
Figure 16. Exemple de cage pour rats	41
Figure 17. Valeurs échocardiographiques de référence chez le rat.....	44
Figure 18. Anatomie des poumons. (a) Vue dorsale (b) Vue ventrale.....	45
Figure 19. Glandes salivaires du rat	46
Figure 20. Aspect échographique de l'estomac.....	47
Figure 21. Aspect échographique du duodénum.....	48
Figure 22. Anatomie du système digestif du rat.....	49
Figure 23. Mesures de référence du système digestif.	50
Figure 24. Aspect échographique du foie.....	51
Figure 25. Mesures de référence des vaisseaux hépatiques.	51
Figure 26. Système urogénital du rat femelle.....	53
Figure 27. Echographie du rein	54
Figure 28. Aspect échographique de la vessie.	54
Figure 29. Mesures de référence du système urinaire.....	55
Figure 30. Aspect échographique de l'utérus droit et de l'ovaire gauche.....	56

Figure 31. Système urogénital du rat mâle.....	57
Figure 32. Aspect échographique du testicule.....	58
Figure 33. Evolution des structures fœtales au cours d'une gestation.	59
Figure 34. Squelette du rat	61
Figure 35. Aspect échographique de la surrénale gauche	62
Figure 36. Mesures de référence des glandes surrénaliennes.....	63
Figure 37. Mesures de référence de la rate.....	64
Figure 38. Aspect échographique de la rate	64
Figure 39 : Mesures de référence du nœud lymphatique hypogastrique.....	65
Figure 40. Radioanatomie du thorax, vue de profil.....	67
Figure 41. Radioanatomie du thorax, vue de face.....	68
Figure 42. Radioanatomie de l'abdomen, vue de profil.....	69
Figure 43. Radioanatomie de l'abdomen, vue de face, exemple 1.....	70
Figure 44. Radioanatomie de l'abdomen, vue de face, exemple 2.....	71
Figure 45. Radioanatomie du membre thoracique gauche, vue de profil.....	72
Figure 46. Radioanatomie du membre thoracique droit, vue de face de l'extrémité distale....	73
Figure 47. Radioanatomie du membre pelvien droit, vue de profil	74
Figure 48. Radioanatomie du membre pelvien gauche, vue de face	75
Figure 49. Radioanatomie du crâne, vue de profil	76
Figure 50. Radioanatomie du crane, vue de face	77
Figure 51. Cas clinique n°1 : Epanchement pleural	81
Figure 52. Cas clinique n°2 : Fractures multiples radius/ulna	82
Figure 53. Cas clinique n°3 : Adénomégalie mésentérique	83
Figure 54. Cas clinique n°3 : Dilatation focale de la paroi intestinale avec suspicion de solution de continuité avec l'abdomen, ascite.....	84

Introduction

Les nouveaux animaux de compagnie, dont fait partie le rat domestique, sont de plus en plus courants dans nos maisons, et de mieux en mieux médicalisés. En 2018, les petits mammifères de compagnie étaient 3.7 millions en France, et présents dans 5.1% des foyers (Facco, 2018).

Les connaissances sur ces espèces s'accumulent, et la qualité des soins évolue dans le même sens. Pour atteindre une telle qualité, le recours aux examens complémentaires, dont font partie la radiographie et l'échographie, est nécessaire. Leur utilisation est restée confidentielle pendant des années mais elle s'est développée dans le monde vétérinaire, ceux-ci étant mieux formés aux spécificités de ces espèces et de mieux en mieux équipés.

Bien que se développant, les ressources disponibles pour la médecine des NAC sont limitées, d'autant plus dans le domaine de l'imagerie, où l'on utilise beaucoup les connaissances acquises sur les carnivores domestiques. Cependant, les NAC sont des espèces bien différentes du point de vue anatomique et physiologique, et il semble donc logique que cela ait un impact sur les examens d'imagerie réalisés.

Peu de documents sont disponibles pour l'interprétation des images radiographiques et échographiques du rat domestique. Quelques articles et thèses font état des connaissances sur l'anatomie radiographique et échographique physiologique de cette espèce, mais il n'existe aucune ressource établissant des images pathologiques de référence. Le but de ce travail est de réaliser un tel atlas, à but pédagogique pour les étudiants et les vétérinaires s'intéressant à cette espèce, afin de pouvoir comparer leurs images à des images de référence.

Dans une première partie, nous rappellerons les principes physiques des examens radiographiques et échographiques. Dans une deuxième partie, nous réaliserons un état des lieux des connaissances sur l'anatomie radiographique et échographique physiologique du rat domestique. Enfin, dans une troisième partie, le projet d'atlas radiographique et échographique pathologique sera présenté.

I. Principes physiques de la radiographie et de l'échographie

A. La radiographie (Bushberg, 2012)

La radiographie est la première technique d'imagerie médicale à avoir été utilisée, rendue possible par la découverte des rayons X par Wilhelm Roentgen en 1895. Il réalisa dans le même temps les premiers clichés radiographiques d'anatomie humaine. La radiographie fonctionne avec une source de rayons X placée d'un côté du patient, et un détecteur de l'autre côté. Les rayons X sont émis pendant une courte période par la source, une partie de ces rayons interagissent avec la matière et d'autres traversent le patient pour atteindre le détecteur. Les différences d'interaction entre les différents tissus et les rayons X permettent de former une image radiographique de la région traversée.

1. Rayon X et dualité onde-corpuscule

Le rayon X est un rayonnement électromagnétique, comme la lumière visible. Bien qu'il puisse traverser des milieux matériels, il ne requiert pas de matière pour se propager et peut ainsi également se propager dans le vide, où il atteint sa vitesse maximale (environ 300 000 km/s). Le rayonnement électromagnétique se propage généralement en ligne droite, mais peut être dévié par son interaction avec la matière.

Un rayonnement électromagnétique est caractérisé par une longueur d'onde λ , une fréquence ν et une énergie E . Les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques de longueur d'onde comprise entre 10^{-8} et 10^{-11} m. Ils se situent entre les ultraviolets et les rayons γ sur le spectre électromagnétique.

Il existe deux façons équivalentes de décrire un rayonnement électromagnétique : comme une onde électromagnétique ou comme une particule (ou corpuscule), le photon. C'est la dualité onde-corpuscule.

Dans le modèle ondulatoire, l'onde est caractérisée par son amplitude, sa longueur d'onde λ , sa fréquence ν et sa période τ . L'amplitude est l'intensité de l'onde. La longueur d'onde est la longueur séparant deux points identiques du cycle ondulatoire. Le temps nécessaire pour l'onde de réaliser un cycle (donc d'avancer d'une longueur d'onde) est la période. La

fréquence est le nombre de cycle par seconde, donc l'inverse de la période. La vitesse c de l'onde électromagnétique dépend de la longueur d'onde et la fréquence, selon la formule :

$$c = \lambda\nu$$

La vitesse de l'onde électromagnétique étant constante dans un milieu donné, la fréquence et la longueur d'onde évoluent en sens inverse. Ainsi, une onde électromagnétique de faible longueur d'onde aura une fréquence élevée.

L'onde électromagnétique est plus précisément constituée d'un champ électronique et d'un champ magnétique se propageant dans la direction de propagation et orthogonalement l'un à l'autre.

Dans le modèle corpusculaire, le rayonnement électromagnétique est constitué de particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la formule :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

où h est la constante de Planck égale à 6.626×10^{-34} J.s = 4.136×10^{-18} keV.s. L'énergie des photons est généralement exprimée en electron-volts. Un électron-volt est défini comme l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré depuis le repos par une différence de potentiel d'un volt.

2. Production des rayons X

Les rayons X sont produits quand des électrons hautement énergétiques interagissent avec de la matière, en convertissant une partie de leur énergie cinétique en rayonnement électromagnétique. Un générateur de rayons X est généralement constitué d'une source d'électrons (la cathode), d'un tube pour accélérer ces électrons, d'une cible permettant de produire les rayons X (l'anode), tous ces éléments étant placés sous vide et contenus dans une enceinte hermétique, et d'un générateur haute tension pour produire la puissance nécessaire pour accélérer les électrons.

La cathode est chauffée à très haute température et émet des électrons par émission thermoionique. Pendant le trajet de la cathode vers l'anode, les électrons sont accélérés par la différence de potentiel et obtiennent une énergie cinétique conséquente. Au moment de l'impact avec l'anode cible (généralement constituée de tungstène), l'énergie cinétique des

électrons est convertie en d'autres formes. La majorité de l'énergie est transformée en chaleur, par la collision des électrons avec la cible, ce qui augmente considérablement la température de celle-ci. Une petite portion des électrons interagit avec le noyau des atomes de l'anode cible, et sont notamment décélérés par ceux-ci à cause de la force électromagnétique, entraînant une perte d'énergie cinétique convertie sous forme de rayons X.

La proportion de l'énergie perdue sous forme de chaleur et convertie en rayon X dépend de l'énergie de l'électron incident et du numéro atomique de la cible. Pour du tungstène ($Z=74$) et un électron possédant une énergie de 100keV, environ 99% de l'énergie est perdue sous forme de chaleur et seulement 1% est convertie en rayons X. Le tungstène est généralement utilisé car il a un numéro atomique élevé et un point de fusion également élevé. L'anode peut être stationnaire, auquel cas le faisceau d'électrons incident frappera toujours la même zone, et détériorera l'anode au fur et à mesure. Elle peut sinon être placée sur une plaque rotative, permettant de répartir la chaleur sur une plus grande surface, et donc de prolonger la durée de vie de l'anode.

La probabilité d'interaction entre l'électron et le noyau est proportionnelle à la distance entre ces deux éléments. Plus l'électron est proche du noyau, moins il a de chance de produire des rayons X. Par contre, l'énergie du rayon X émis est inversement proportionnelle à cette distance : plus l'électron est proche du noyau, plus il émettra un rayon X de haute énergie (car il sera fortement décéléré), le maximum étant atteint quand l'électron est décéléré totalement, auquel cas toute l'énergie cinétique est transformée en rayon X. Un corolaire de ce phénomène est que plus la vitesse (et donc l'énergie) de l'électron est importante, plus les rayons X émis pourront être énergétiques. En moyenne, les rayons X émis possèdent entre le tiers et la moitié de l'énergie de l'électron incident.

Ensuite, le faisceau de rayon X émis passe à travers un collimateur, qui permet de focaliser le faisceau, d'ajuster la taille et la forme du champ, et d'éliminer une partie des rayons, notamment les rayons diffusés, qui diminueraient le contraste et entraîneraient un flou sur l'image radiographique.

3. Interaction des rayons X avec la matière

Quand les rayons X traversent la matière, ils peuvent être absorbés, diffusés ou ne pas interagir.

a. Diffusion Rayleigh

Lorsqu'un rayon X rencontre un atome, son champ électrique peut déformer le nuage d'électrons autour de l'atome. Les électrons vont alors osciller en phase, puis se stabiliser en émettant un rayon X de même longueur d'onde que l'onde incidente, mais dans une direction légèrement différente (figure 1).

La détection des rayons X diffusés va altérer la qualité de l'image radiographique. Cependant, la diffusion Rayleigh ne représente que 5 à 10% des interactions avec les tissus mous, et est de moins en moins fréquente avec l'augmentation de l'énergie des rayons incidents (10% pour des rayons de 30keV, 5% pour des rayons de 70keV et au-delà).

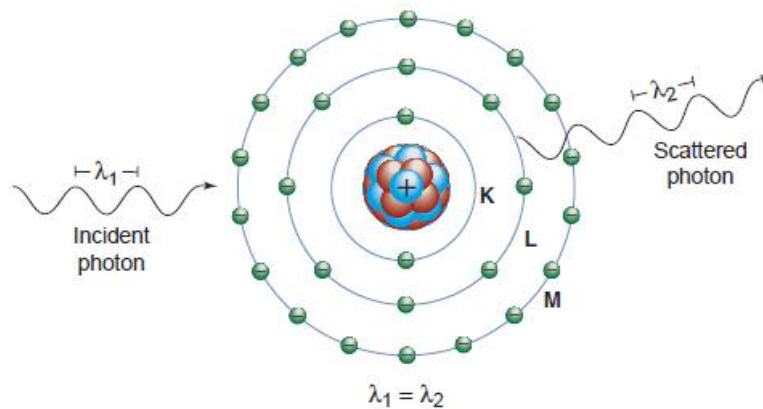


Figure 1. Diffusion Rayleigh (Bushberg, 2012)

b. Effet Compton

L'effet Compton (ou diffusion Compton) est une interaction essentielle entre les tissus mous et les rayons X utilisés en imagerie médicale.

Lorsque le rayon X rencontre un atome, il peut éjecter un électron de la couche périphérique. Une partie de l'énergie du rayon X incident sera convertie en énergie cinétique de l'électron, l'autre partie sera diffusé sous la forme d'un rayon X de moindre intensité (figure 2).

De ce fait, l'effet Compton entraîne l'ionisation de l'atome. Le rayon X est donc un rayonnement ionisant par ce biais. L'électron éjecté va perdre son énergie en ionisant à son tour des atomes proches (en l'occurrence, les atomes du patient ou du manipulateur), ce qui est délétère. Il faut donc s'en protéger.

Le rayon X diffusé peut quant à lui traverser la matière sans interaction, ou à son tour interagir avec la matière selon la diffusion Rayleigh, l'effet Compton ou l'effet photoélectrique.

Plus le rayon X incident est énergétique, plus l'électron et le rayon X diffusés sont émis dans une direction proche de la direction incidente, et de ce fait être détectée par le récepteur radiographique, ce qui va altérer la qualité de l'image radiographique, notamment son contraste, en ajoutant un flou.

L'effet Compton augmente avec l'énergie du rayon incident et la densité de la matière traversée.

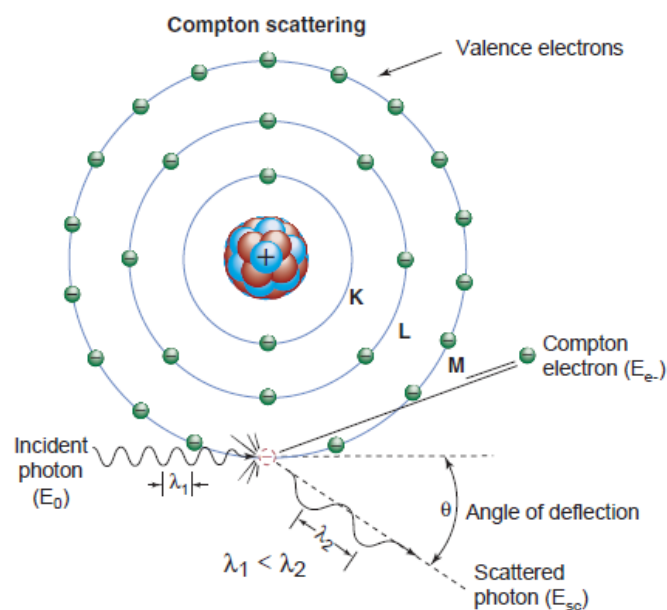


Figure 2. Effet Compton (Bushberg, 2012)

c. Effet photoélectrique

Avec l'effet photoélectrique, lorsqu'un rayon X incident arrive sur un atome, c'est un électron de la couche la plus interne qui est éjecté. L'électron ayant absorbé l'énergie du photon, on parle de photoélectron. Le rayon X est donc aussi un rayonnement ionisant par ce mécanisme. La place vacante occupée par le photoélectron émis sera prise par un électron de la couche supérieure, et ainsi de suite jusqu'à la couche la plus périphérique. On parle de « cascade d'électrons ». A chaque mouvement d'électron, un rayon X est émis, correspondant à la dissipation de l'énergie nécessaire à passer d'une couche à l'autre (figure 3). Ces rayons X émis possèdent une énergie beaucoup plus faible que le rayon X incident.

Avec ce mécanisme, aucun rayonnement diffusé n'est émis, puisque les rayons X émis sont de très faible énergie et sont rapidement absorbés par l'organisme. On parle donc parfois d'« absorption photoélectrique ».

L'effet photoélectrique est responsable de la formation de l'image radiographique et permet de distinguer les différents organes traversés en fonction du degré d'absorption. Il augmente avec le numéro atomique du milieu, et diminue quand l'énergie du rayon X incident augmente.

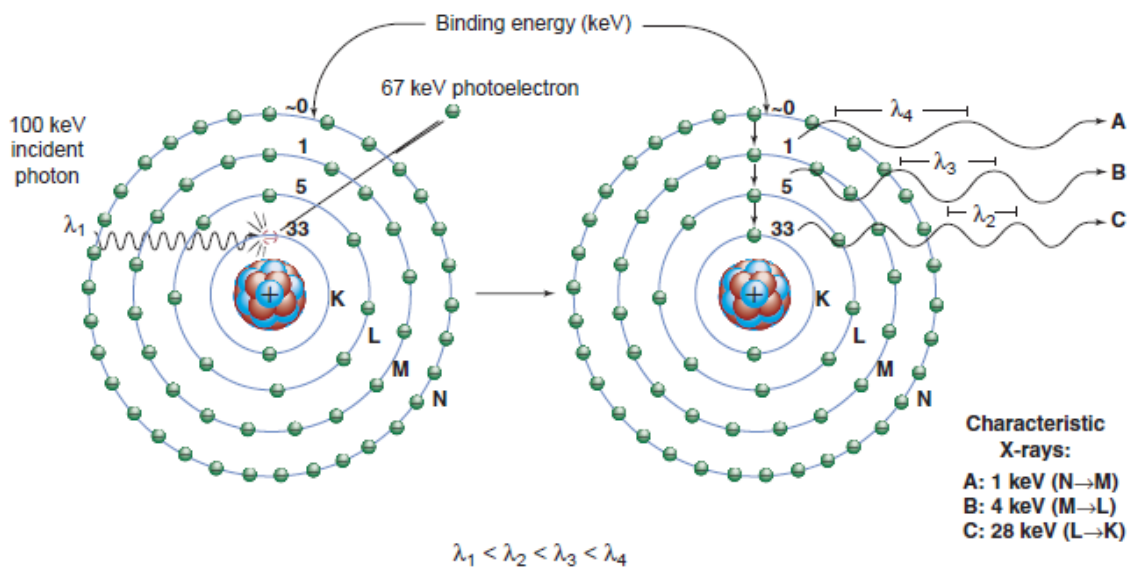


Figure 3. Effet photoélectrique (Bushberg, 2012)

4. Paramétrage de la radiographie

Trois paramètres sont importants, et doivent être réglés selon le patient et l'image désirée :

- La différence de potentiel entre la cathode et l'anode, en kilovolt, permettant d'accélérer les électrons. Plus les électrons sont énergétiques, plus les rayons X produits le seront. Plus la tension est élevée, plus le contraste est faible, car l'effet Compton augmente et l'effet photoélectrique diminue. Plus la tension est élevée, plus le degré de noircissement est important.

- L'intensité, en milliampère, traduisant la quantité de charges électriques (donc d'électrons) voyageant de la cathode à l'anode par seconde.

- Le temps d'exposition en seconde

Souvent, les deux derniers paramètres sont réunis en un seul, qui s'exprime alors en milliampère-seconde. Il traduit la quantité de charge utilisée pendant toute la durée d'exposition. Les mAs sont liés à la densité radiographique et à la netteté du cliché.

En pratique, une tension augmentée de 10% entraîne un doublement du degré de noircissement, des mAs multipliés par deux doublent également le degré de noircissement.

5. Radiographie analogique

Les films argentiques sont aujourd'hui peu utilisés, au profit du développement numérique des images. Ils restent cependant présents dans certaines structures.

a. Grille anti-diffusante

La base de la formation de l'image repose sur le fait que les rayons X voyagent en ligne droite, afin d'obtenir une image nette et contrastée. Malheureusement, quand les rayons X rencontrent et interagissent avec le patient, une partie d'entre eux sont diffusés, donc émis dans une autre direction. Plus l'épaisseur de la zone à radiographier est importante, plus le rayonnement diffusé sera important. Plus le champ de vue sera grand, plus le rayonnement diffusé sera important.

Les rayons diffusés qui ne frappent ensuite pas le détecteur ne posent pas problème pour l'image puisqu'ils n'altèrent pas celle-ci. Ils doivent cependant être pris en compte par les

manipulateurs radio pour leur protection. Par contre, si les rayons diffusés atteignent le détecteur, elles dégraderont la qualité de l'image en apportant un flou et une perte de contraste général.

Pour pallier à cela, il est courant d'utiliser une grille anti-diffusante. Celle-ci est placée entre le patient et le détecteur. Elle est composée d'une plaque alternant zones en plomb absorbant les rayons et zones ouvertes permettant le passage des rayons. De ce fait, seuls les rayons X parallèles aux trous dans la grille peuvent passer jusqu'au détecteur. Les rayons diffusés, qui auront une trajectoire plus oblique, seront arrêtés. Avec les grilles modernes, les trous ne sont pas tout à fait parallèles entre eux, mais orientés vers le point focal d'émission des rayons X, au niveau de l'anode. En effet, les rayons X sont émis à partir d'un seul point, et sont donc dirigés sous forme de cône vers le patient. Les grilles actuelles arrêtent entre 80 et 95% du rayonnement diffusé.

Cependant, la grille anti-diffusante arrête aussi une partie du rayonnement « utile », si celui-ci vient frapper les zones en plomb. En pratique, elle arrête entre 25 et 50% des rayons utiles. De ce fait, la grille sera visible sur l'image radiographique si celle-ci est d'assez bonne résolution. Le système Bucky vient pallier à cela. Il utilise une grille anti-diffusante qui oscillera pendant la durée du cliché radio. Les trous présents sur la grille ne seront alors pas tout le temps au même endroit pendant la durée du cliché, ce qui permet de ne plus voir la grille sur l'image.

De plus, et comme dit précédemment, la grille arrête la majorité des rayonnements diffusés et une partie du rayonnement utile, donc entraîne une perte de degré de noircissement sur l'image. En utilisant une grille anti-diffusante, il faudra donc penser à augmenter l'intensité des rayons, donc les mAs. La grille n'est cependant pas nécessaire pour radiographier des structures assez fines, puisque le rayonnement diffusé sera peu important.

b. Ecran renforçateur

Dans la cassette radiographique, le film radiographique sensible à la lumière est pris en sandwich entre deux écrans renforçateurs. Un écran renforçateur est constitué de cristaux qui convertissent les rayons X incidents en lumière visible, celle-ci réagissant ensuite avec le film radiographique. Il est important que l'écran renforçateur soit le plus près possible du film, pour éviter que la lumière ne se propage trop latéralement et ne vienne flouter l'image.

Les cristaux peuvent être de différentes natures. Celle-ci détermine l'efficacité de la conversion des rayons X en lumière visible, et le spectre de lumière émis. Par exemple, les cristaux de tungstate de calcium émettent de la lumière bleue. Les cristaux d'oxysulfure de gadolinium ont un meilleur rendement mais émettent une lumière jaune-verte, ce qui nécessite d'adapter en conséquence le film radiographique.

L'épaisseur de l'écran renforçateur intervient dans la qualité de l'image radiographique. Plus l'écran est épais, plus le rayon X a de probabilité d'être transformé en lumière visible par un cristal. Ainsi, un écran renforçateur épais nécessite une dose moins importante de rayons X pour former l'image qu'un écran fin, mais, du fait d'une plus grande diffusion de la lumière à cause de l'épaisseur, produira une image de moins bonne qualité.

c. Film radiographique et formation de l'image latente

Le film radiographique est composé d'une fine couche de plastique recouverte de cristaux d'argent (bromure d'argent AgBr, iodure d'argent AgI) en émulsion. Quand un cristal d'argent est exposé à la lumière, certains ions Ag^+ sont réduits en Ag métallique, ce qui permet la formation d'une image latente.

d. Développement de l'image radiographique

Le film radiographique est ensuite passé dans différents bains permettant d'obtenir l'image finale. Le premier bain contient un réducteur, dont la réaction est catalysée par les atomes d'argent métallique. Tous les autres ions Ag^+ des cristaux contenant déjà des atomes métalliques vont donc être réduits. Un cristal d'argent réduit apparaît alors noir sur l'image.

Le film passe ensuite dans un deuxième bain contenant un oxydant, appelé fixateur, qui va dissoudre les cristaux qui n'ont pas été réduits précédemment, donc qui n'ont pas été exposés ou été sous-exposés à la lumière. Le film est ensuite rincé à l'eau puis séché.

Ainsi, lorsque l'on regarde ensuite le film à la lumière, les zones noires correspondent aux zones où les rayons X sont passés au travers, tandis que les zones blanches sont des endroits où les rayons X ont été absorbés et n'ont pas atteint le film radiographique. Les images

radiographiques sont donc des images en négatif : une surexposition entraîne un noircissement plus important de l'image.

6. Radiographie numérique

La radiographie numérique utilise un système de détection spécifique : le couple « écran-film » est abandonnée au profit d'un système de détection propre au système numérique : il existe le système CR (« Computed Radiography ») et le système DR (« Digital Radiography »), encore appelé Capteur plan.

a. Radiographie CR (« Computed Radiography »)

La radiographie numérique s'est développée à partir des années 70 en médecine humaine, et est devenue largement utilisée à partir des années 2000.

La radiographie CR repose sur un système de détection particulier appelé « plaque phosphore » ou écrans ERLM (= écran radioluminescent). La plaque contribue à la formation d'une image latente, comme pour la radiographie analogique, mais les cristaux composant la plaque phosphore sont constitués de BaFBr:Eu. Lorsqu'un rayon X frappe le cristal, les ions Eu^{2+} sont oxydés en Eu^{3+} . L'électron excité émis permet la réduction d'un ion F^+ en atome F, métastable. L'ensemble des atomes de fluor forment l'image latente, qui sera ensuite révélée. Pour cela, la cassette est placée dans un lecteur de plaque. Un laser rouge vient stimuler les atomes de fluor métastables, ce qui permet de les réoxyder en ion F^+ . L'électron émis réduit l'ion Eu^{3+} en Eu^{2+} , l'énergie stockée étant alors émise sous forme de lumière bleue-verte. Cette lumière est collectée à travers une fibre optique puis frappe un tube photomultiplicateur qui produit un signal électrique. Chaque zone de l'image latente se voit donc attribuer un pixel de niveau de gris correspondant à l'exposition aux rayons X.

La cassette est ensuite exposée à une vive lumière blanche permettant de réinitialiser complètement les cristaux.

L'intérêt de la radiographie CR réside dans sa rapidité et sa facilité d'utilisation, la cassette pouvant être immédiatement réutilisée après la lecture.

b. Radiographie DR (« Digital Radiography ») ou Capteur Plan (Centravet, 2010)

La radiographie numérisée permet d'obtenir une image directement sur l'écran d'ordinateur sans avoir à passer par un lecteur spécifique. Il en existe deux types : la radiographie numérisée directe ou indirecte, selon si l'image est formée directement à partir des rayons X ou si ceux-ci doivent d'abord être convertis en lumière visible pour être interprétés.

Dans la radiographie numérisée indirecte, le rayonnement X est d'abord converti en lumière visible par un scintillateur composé généralement d'iodure de césium. La lumière émise est collectée à travers un système optique, et transmise à des caméras CCD (pour « charges couples devices ») ou des matrices de diodes et de transistors, qui convertissent alors le signal lumineux en signal électrique.

Avec la radiographie numérisée directe, les rayons X sont directement convertis en signal électrique. La plaque utilisée dans ce système est composée de sélénium amorphe sur lequel repose une matrice de photodiodes et de TFT (pour « thin field transistor » ou transistor à effet de champ). Sous l'action des rayons X, le sélénium produit des charges qui sont transmises aux matrices TFT, qui amplifient le signal avant de le transmettre au logiciel de reconstruction de l'image.

7. Radioprotection

a. Dose absorbée, équivalente et effective

La dose absorbée D (en Gray = Gy) est la quantité d'énergie de radiation ionisante E (en J) reçue par un matériau de masse m (en kg) :

$$D = \frac{E}{m}$$

Cependant, tous les rayonnements ionisants n'ont pas le même effet sur l'organisme, même à dose absorbée équivalente. Pour prendre en compte tous les types de radiations dans le même calcul, un facteur de pondération w est associé à chaque type, et la dose équivalente est calculée en additionnant la dose absorbée de chaque type de rayonnement pondérée par son facteur :

$$H = \sum D * w$$

où H est la dose équivalente en sievert (Sv) reçue par un organisme. Pour les rayons X, $w=1$, donc si l'organisme n'est exposé qu'à des rayons X, $E=D$.

Cependant, l'effet biologique des rayonnements ionisants dépend aussi de du tissu touché. Ainsi, on peut assigner à chaque tissu un facteur de pondération w_T correspondant à la sensibilité du tissu aux rayonnements ionisants.

$$E = \sum_T w_T * H_T$$

où E est la dose efficace en Sv et H_T la dose équivalente reçue par le tissu T.

La dose efficace E correspond à la dose fictive qui, administrée de façon homogène au corps entier, entrainerait les mêmes dommages tardifs que l'ensemble des doses reçues par le même individu au niveau des différents tissus et à des moments différents. Elle est la base de la réglementation de la radioprotection.

b. Effet des rayonnements ionisants

Les manipulateurs radio peuvent être exposés aux rayons X de plusieurs manières : si une partie de leur corps se trouvent dans le faisceau primaire, à cause du rayonnement diffusé ou s'il y a une fuite au niveau du générateur.

Les rayons X ont des effets directs sur l'ADN, et des effets indirects par radiolyse de l'eau, créant des radicaux libres qui lèsent l'ADN. L'effet indirect prédomine.

Les rayons X ont un effet sur les structures membranaires en oxydant les acides gras insaturés des phospholipides, entrainant des troubles de perméabilité. Les radicaux libres produits peuvent aussi attaquer les structures enzymatiques et ainsi les inactiver.

On a ensuite des effets tissulaires : plus les tissus se divisent et sont peu différenciés, plus la sensibilité est forte. Par exemple, les cellules intestinales ou de la moelle osseuse sont très sensibles.

Tous ces effets surviennent selon deux modalités : on a des effets déterministes, qui surviennent toujours si on reçoit une dose supérieure à un seuil, et des effets stochastiques, qui interviennent tardivement, qui ne dépendent pas de la dose reçue.

Les effets déterministes sont toujours accidentels. Les effets stochastiques sont plus fréquents quand on augmente la dose, mais peuvent ne pas survenir.

c. Réglementation française

La réglementation française définit des catégories de travailleurs exposés aux rayonnements ionisants. Est classé en catégorie A « tout travailleur susceptible de recevoir au cours de 12 mois consécutifs une dose efficace supérieure à 6 mSv ou une dose équivalente supérieure à 150 mSv pour la peau et les extrémités »; est classé en catégorie B « tout autre travailleur susceptible de recevoir une dose efficace supérieure à 1 mSv, une dose équivalente supérieure à 15 mSv pour le cristallin ou à 50 mSv pour la peau et les extrémités » (Legifrance, 2018b).

Les articles R4451-6 à R4451-9 présentent les limites d'exposition pour chaque catégorie de travailleur, qui sont résumées dans la figure 4 (Legifrance, 2018a)

Limite (en mSv)		Catégorie A	Catégorie B/ Personne de 15 à 18 ans	Femme enceinte
Dose efficace		20	6	1
Dose équivalente	Extrémités et peau	500	150	
	Cristallin	100*	15	

Figure 4. Valeurs limite d'exposition. NB : *20mSv à partir du 1^{er} juillet 2023

d. Moyens de protection

Plusieurs moyens sont possibles pour réduire au maximum la quantité de rayons ionisants reçue par le manipulateur.

Le premier est le principe ALARA (« As Low As Reasonably Achievable »). Toute radiographie doit être justifiée. Elle doit aider au diagnostic. La radiographie doit être optimisée : par la conception des installations, par la réalisation de clichés de qualité du premier coup, et par l'exposition minimale du personnel, par exemple en le faisant tourner. Il faut réduire au maximum les doses et éloigner le personnel de la source principale, ainsi qu'utiliser des équipements de protection (gants, lunettes, tablier, protège thyroïde plombés).

Le dernier paramètre est la preuve du non-dépassement des doses, en portant des dosimètres individuels, et en contrôlant le générateur périodiquement.

B. L'échographie (Bushberg, 2012)

1. Introduction

L'échographie consiste à utiliser des ondes sonores de hautes fréquences, non-audibles par l'oreille humaine, et à les propager dans un milieu pour obtenir une image de celui-ci. Elle utilise l'énergie des ondes sonores et les propriétés acoustiques du corps pour produire une image des organes et tissus. En effet, lors d'une séance d'échographie, une onde sonore est délivrée au tissu et voyage à la vitesse du son. En fonction des propriétés acoustiques des différents tissus traversés, une fraction de l'onde sonore est réfléchi et retourne à la source. La mesure du temps nécessaire à l'enregistrement de l'écho et de sa puissance permet d'obtenir des informations sur les tissus traversés.

L'échographie est historiquement dérivée de l'utilisation des sonars sous-marins. Les premières applications en médecine s'opèrent au début des années 60. Les avancées technologiques en équipement, en acquisition de données et en traitements de données ont permis son développement très important dans le milieu médical, en en faisant un examen complémentaire de choix dans de nombreuses affections.

2. Propriétés du son

a. *Propagation du son*

Le son est une onde mécanique transportant de l'énergie qui se propage en comprimant et dilatant un milieu élastique. La compression est causée par une déformation mécanique induite par une force extérieure, ce qui se traduit par l'augmentation de la pression du milieu. La dilatation a lieu immédiatement après la compression. Les particules comprimées transfèrent leur énergie aux particules voisines, ce qui entraîne la propagation de l'onde sonore. L'alternance des compressions et des dilatations peut être représentée par un graphique montrant l'évolution de la pression en fonction du temps (figure 5).

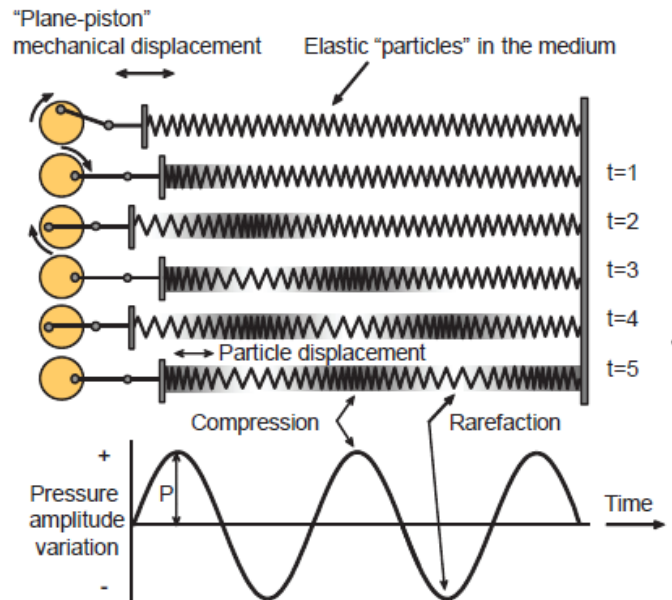


Figure 5. Onde sonore et graphique de pression (Bushberg, 2012)

b. Longueur d'onde, fréquence et vitesse

La longueur d'onde λ (m) de l'onde sonore est la distance entre deux compressions ou, plus généralement, la distance entre deux points de même amplitude sur le graphique de pression. La fréquence f ($\text{Hz}=\text{s}^{-1}$) est le nombre de fois que l'onde oscille en une seconde. Les sons de moins de 15Hz (15 cycles par seconde) sont appelés infrasons, les sons entre 15Hz et 20kHz composent le spectre audible par l'Homme, et les sons supérieurs à 20kHz sont les ultrasons. Les ondes sonores utilisées en médecine pour l'échographie sont de l'ordre de 2 à 20 MHz, donc dans les ultrasons. La période (s) de l'onde est le temps que l'onde met pour faire un cycle complet, donc à parcourir une distance égale à la longueur d'onde. Elle est donc égale à l'inverse de la fréquence. La vitesse du son c (m/s) est la distance traversée par l'onde sonore par unité de temps, et est donc égale à la longueur d'onde multipliée par la fréquence.

$$c = \lambda f$$

La vitesse du son dépend du milieu de propagation, et notamment de son élasticité et de sa densité. Par exemple, l'air est très compressible et possède donc une vitesse de propagation du son plutôt lente. Au contraire, les os, denses et peu compressibles, ont une vitesse de propagation du son plus élevée. Des exemples de vitesse de propagation en fonction du milieu sont donnés dans la figure 6. La différence de vitesse du son entre deux milieux est une

propriété importante pour l'échographie, puisqu'elle génère un écho qui pourra être interprété par l'échographe.

TABLE 14-1 DENSITY AND SPEED OF SOUND IN TISSUES AND MATERIALS FOR MEDICAL ULTRASOUND

MATERIAL	DENSITY (kg/m ³)	c (m/s)	c (mm/μs)
Air	1.2	330	0.33
Lung	300	600	0.60
Fat	924	1,450	1.45
Water	1,000	1,480	1.48
"Soft Tissue"	1,050	1,540	1.54
Kidney	1,041	1,565	1.57
Blood	1,058	1,560	1.56
Liver	1,061	1,555	1.55
Muscle	1,068	1,600	1.60
Skull bone	1,912	4,080	4.08
PZT	7,500	4,000	4.00

Figure 6. Exemples de vitesse du son selon le milieu traversé (Bushberg, 2012)

La fréquence de l'onde sonore n'est pas affectée par la vitesse de propagation, c'est la longueur d'onde qui est modifiée.

L'échographe utilise une vitesse moyenne de propagation de 1540m/s pour déterminer la localisation des échos et former l'image.

La résolution spatiale de l'image et l'atténuation de l'onde sonore dépendent respectivement de la longueur d'onde et de la fréquence. Ainsi, une onde de haute fréquence (mais de faible longueur d'onde) produit une image de haute résolution, mais la distance de pénétration est faible. Il faut donc adapter les paramètres en fonction des structures à échographier. Pour des échographies abdominales, où une grande profondeur est nécessaire, les fréquences utilisées sont basses (entre 3.5 et 5MHz généralement). Pour des organes situés sous la peau, les fréquences utilisées sont plus grandes (entre 7.5 et 10MHz) et permettent d'avoir une bonne résolution.

3. Interaction des ultrasons avec la matière

Les interactions sont déterminées par les propriétés acoustiques des milieux traversés. Plusieurs interactions coexistent : la réflexion, la réfraction, le diffusion et l'absorption.

a. Impédance acoustique

L'impédance acoustique Z (en rayl= $\text{kg/m}^2\text{s}$) d'un milieu est définie par :

$$Z = \rho c$$

où ρ est la densité du milieu en kg/m^3 et c la vitesse du son en m/s . La figure 7 présente les impédances acoustiques de différents milieux rencontrés couramment en médecine.

L'impédance acoustique caractérise la résistance d'un milieu à la propagation de l'onde sonore. Une différence importante entre les impédances acoustiques de deux milieux adjacents (par exemple, entre les poumons et les tissus mous) se traduit par une réflexion plus forte de l'onde sonore au niveau de l'interface entre les deux milieux. Une différence faible entre les impédances acoustiques de deux milieux adjacents (par exemple, entre deux organes mous) résulte en la propagation de l'onde sonore avec peu de réflexion au niveau de l'interface.

TISSUE	Z (RAYLS)
Air	0.0004×10^6
Lung	0.18×10^6
Fat	1.34×10^6
Water	1.48×10^6
Kidney	1.63×10^6
Blood	1.65×10^6
Liver	1.65×10^6
Muscle	1.71×10^6
Skull bone	7.8×10^6

Figure 7. Impédances acoustiques de différents milieux (Bushberg, 2012)

b. Réflexion

La réflexion de l'onde sonore a lieu au niveau de l'interface entre deux milieux d'impédance acoustique différente. Plus la différence d'impédance acoustique est élevée, plus la réflexion est importante. Le coefficient de réflexion R traduit le pourcentage de l'onde sonore réfléchi au niveau de l'interface pour une incidence perpendiculaire :

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

où Z_1 et Z_2 sont les impédances électriques des deux milieux.

Le coefficient de transmission T représente le pourcentage de l'onde sonore transmise au second milieu, et est égal à $T = 1 - R$.

Ainsi, au niveau d'une interface muscle/graisse, environ 99% de l'onde sonore est transmise. Pour une interface muscle/air, quasiment 100% de l'onde est réfléchi, rendant impossible l'observation des structures plus profondes. C'est aussi pourquoi il est important d'utiliser du gel échographique au niveau de la sonde, pour éliminer les éventuelles poches d'air entre la sonde et la peau qui empêcheraient la visualisation des structures.

Lorsque l'onde incidente est perpendiculaire à l'interface entre les milieux, elle est réfléchi dans la même direction. Lorsque l'onde incidente fait un angle θ_i avec l'interface, elle est réfléchi selon un angle θ_r égal à θ_i (figure 8.B et C). Les angles θ_i et θ_r sont définis par rapport à la normale de la surface de contact entre les deux milieux.

c. Réfraction

Lorsque que l'onde sonore incidente est perpendiculaire à l'interface entre deux milieux, elle est réfléchi et transmise (selon les coefficients décrits ci-dessous) dans la même direction (figure 8.A).

Par ailleurs, lorsque l'onde incidente n'est pas perpendiculaire à l'interface, la direction de la fraction transmise est modifiée, selon un angle θ_t dépendant des vitesses de propagation du son des deux milieux (c_1 et c_2) et de l'angle d'incidence θ_i (loi de Snell-Descartes) :

$$\frac{\sin(\theta_t)}{\sin(\theta_i)} = \frac{c_2}{c_1}$$

La fréquence de l'onde sonore n'est cependant pas modifiée.

Pour des angles d'incidence et de transmission proches de zéro, la loi de Snell-Descartes peut être approximée par :

$$\frac{\theta_t}{\theta_i} \cong \frac{c_2}{c_1}$$

Ainsi, quand $c_2 > c_1$, l'angle de transmission est plus important que l'angle d'incidence (figure 8.B). A l'opposé, quand $c_2 < c_1$, l'angle de transmission est plus faible (figure 8.C). Quand la vitesse du son est identique dans les deux milieux, ou que l'angle d'incidence est nul, l'onde n'est pas réfractée et continue dans la direction de l'onde incidente.

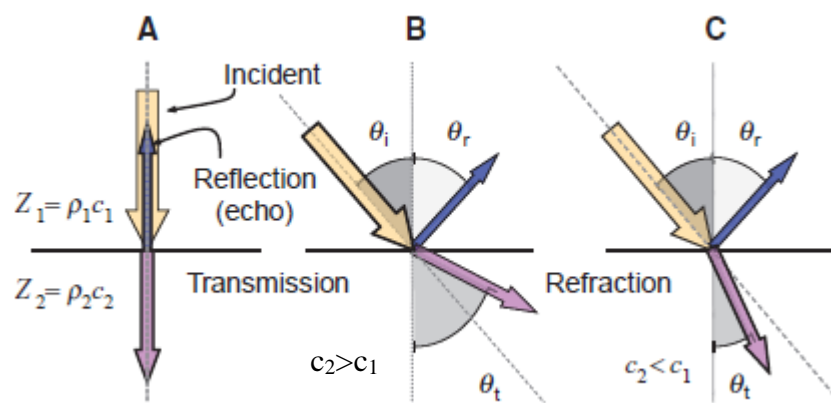


Figure 8. Réflexion et réfraction (Bushberg, 2012)

L'échographe suppose que les ondes se propagent en ligne droite dans les milieux traversés (donc sans réfraction) pour former les images. Ainsi, si de la diffraction a effectivement lieu, cela conduira à un mauvais positionnement des structures anatomiques sur l'image.

Lorsque $c_2 > c_1$ et que l'angle d'incidence θ_i excède un angle critique, il se produit un phénomène de réflexion totale. Dans ce cas, l'onde sonore ne pénètre pas dans le second milieu et est réfléchiée en totalité. L'angle critique peut être facilement calculé en imposant $\theta_t = 90^\circ$ dans la loi de Snell-Descartes.

d. Diffraction

La diffraction a lieu quand l'onde sonore traverse un milieu composé de particules très fines de l'ordre de la longueur d'onde ou plus petites, ce qui pourrait être représenté par la présence de multiples interfaces non lisses (figure 9).

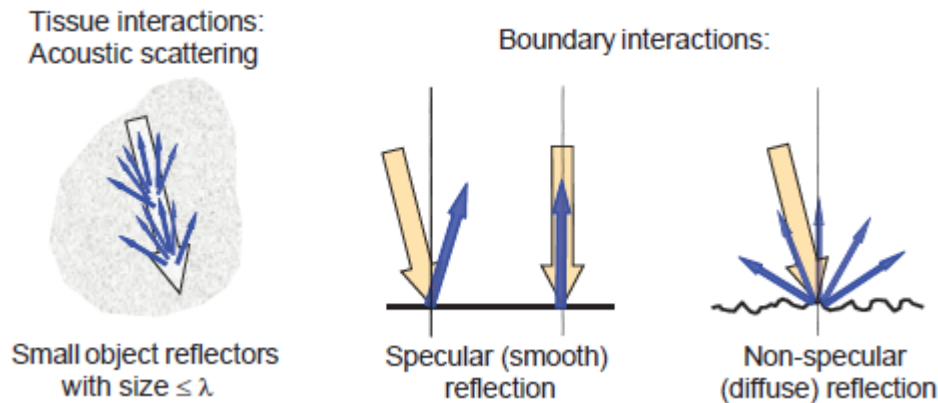


Figure 9. Diffraction VS réflexion (Bushberg, 2012)

La plupart des organes ont une structure propre qui donne naissance à une image caractéristique permettant d'affiner le diagnostic. La diffraction est en fait une réflexion mais dans toutes les directions, et de faible intensité. Elle est peu affectée par l'angle de l'onde incidente, contrairement à la réflexion sur une interface spéculaire.

L'aspect de l'organe échographié dépendra donc de l'importance de la diffraction de l'onde sonore traversant cet organe. Si la diffraction est importante, l'organe sera dit hyperéchogène, et apparaîtra plus blanc par rapport aux tissus voisins sur l'image. Au contraire, il sera qualifié d'hypoéchogène quand la diffraction est faible, et apparaîtra plus noir sur l'image.

Contrairement à la réflexion, la diffraction est augmentée si la fréquence de l'onde utilisée est plus importante.

e. Atténuation

L'atténuation de l'onde sonore a lieu quand de l'énergie sonore est perdue le long du trajet. Cela est dû principalement à la diffraction, et à l'absorption d'une partie de l'énergie du rayon incident par le tissu, qui la convertit en chaleur. L'atténuation est approximativement proportionnelle à la fréquence de l'onde. Ainsi, plus la fréquence utilisée est élevée, plus l'atténuation est importante. Si on veut pouvoir observer des organes en profondeur, il faut donc utiliser une onde de petite fréquence.

4. Modes de l'échographe

Trois modes d'affichage sont couramment utilisés en médecine vétérinaire : le mode bi-dimensionnel, le mode temps mouvement et le mode Doppler.

a. Mode bi-dimensionnel

La formation de l'image repose sur le temps que met l'onde sonore à revenir au niveau de la sonde après avoir été réfléchi sur une interface. L'échographe suppose que le trajet de l'onde est rectiligne et que l'onde se déplace à vitesse constante (généralement 0.154cm/μs). Ainsi, grâce à la formule :

$$d = \frac{c * t}{2}$$

où d est la distance entre la sonde et l'interface en cm, c la vitesse de l'onde sonore en cm/μs et t le temps que l'onde met pour revenir à la sonde en μs, l'échographe peut déterminer à quelle profondeur se situe l'interface sur laquelle l'onde a été réfléchi. Le facteur 2 modélise le fait que l'onde sonore réalise un aller-retour avant de rejoindre la sonde.

L'onde sonore n'est pas continue mais pulsée. Entre les pulsations, la sonde reçoit les échos. Le nombre pulsation est de l'ordre de 2000 à 4000 par secondes. On ne peut pas augmenter indéfiniment la fréquence des pulsations, car si une pulsation est émise avant que le dernier écho de la pulsation précédente ne soit revenu, celui-ci peut être confondu avec un écho revenant rapidement de la deuxième pulsation. Ainsi, la profondeur maximale atteignable dépend aussi de la fréquence de pulsations.

L'analyse de toutes les ondes reçues par la sonde permet de former une image en deux dimensions des tissus traversés.

Dans ce mode, il est possible de mesurer des distances et des surfaces, de flécher des endroits particuliers de l'image et de l'annoter.

b. Mode temps-mouvement

Le mode temps-mouvement permet une meilleure appréciation des organes en mouvement et dont la taille est modifiée au cours du temps, comme le cœur. Ce mode permet de visualiser une direction en fonction du temps, donc par exemple de mesurer très précisément l'épaisseur

des parois et les cavités du cœur au cours de la révolution cardiaque. Il faut pour cela que la sonde soit statique et le patient immobile, et sélectionner la direction voulue sur l'affichage bi-dimensionnel.

c. Mode Doppler

Le mode Doppler est basé sur le fait que la fréquence de l'onde sonore est modifiée si la surface sur laquelle elle est réfléchi est en mouvement, comme par exemple du sang dans un vaisseau sanguin. C'est le même phénomène qui explique qu'une sirène d'ambulance a un son plus aigu quand elle s'approche de nous et plus grave quand elle s'éloigne. Dans notre cas, en comparant les fréquences de l'onde émise et de l'onde réfléchi, il est possible de déterminer si la surface réfléchissante est en mouvement, et dans quelle direction elle va par rapport à la sonde.

Le glissement de fréquence ou « Doppler shift » Δf est la différence de fréquence entre l'onde réfléchi f_r et l'onde incidente f_i .

$$\Delta f = f_r - f_i = \frac{2f_i * v * \cos(\theta)}{c}$$

où θ est l'angle formé entre la sonde et la surface en mouvement, c est la vitesse de l'onde sonore et v la vitesse de la structure en mouvement (Figure 10).

On peut donc calculer la vitesse v de la structure en mouvement en réarrangeant l'équation précédente :

$$v = \frac{\Delta f * c}{2f_i \cos(\theta)}$$

On peut remarquer que si $\theta=90^\circ$, le glissement de fréquence est égal à 0 et il est donc impossible de déterminer la vitesse de la structure en mouvement. Il faut donc toujours que la sonde ne soit pas perpendiculaire au mouvement.

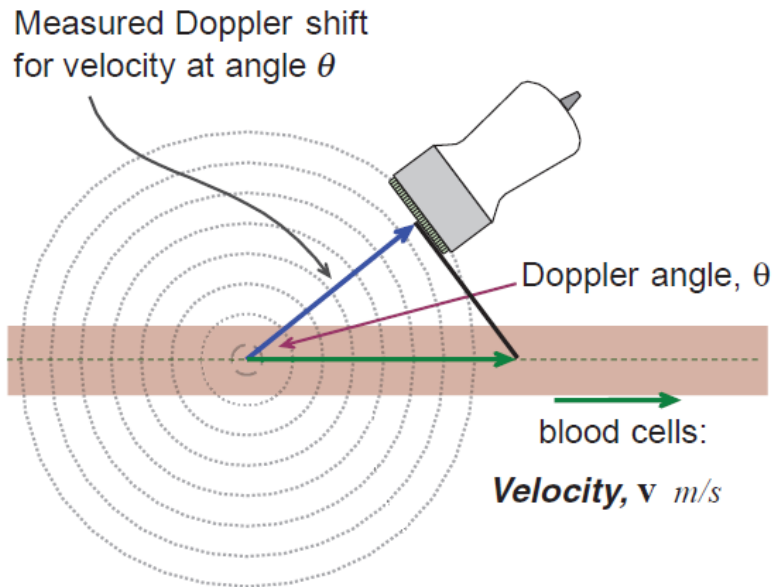


Figure 10. Mode Doppler (Bushberg, 2012)

Cette méthode permet entre autres de connaître le sens dans lequel se déplace la structure en mouvement par rapport à la sonde. En mode Doppler, il est possible d'assigner des couleurs sur l'image pour les structures en mouvement. Une structure sera colorée en rouge quand elle se déplace en direction de la sonde, en bleu quand elle s'en éloigne (figure 11).

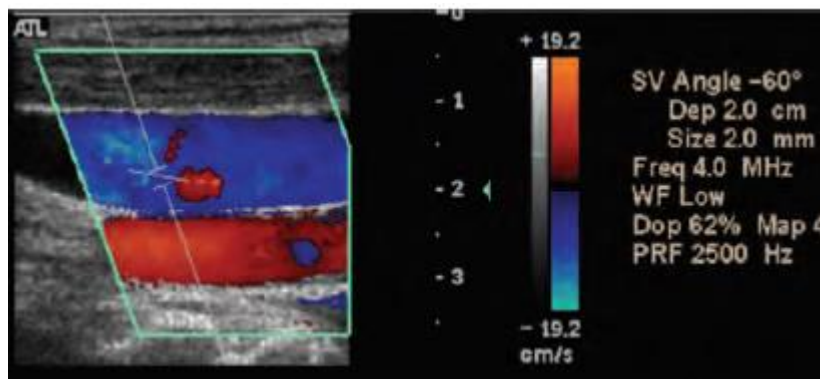


Figure 11. En mode Doppler, les vaisseaux s'éloignant de la sonde sont colorés en bleu, ceux qui s'en rapprochent sont colorés en rouge (Bushberg, 2012)

5. Artefacts

Les artefacts sont des images particulières qui semblent « anormales » mais qui proviennent des propriétés physiques intrinsèques de la méthode échographique.

a. Cône d'ombre

Le cône d'ombre est un signal hypoéchogène situé derrière un objet ou une surface engendrant une forte atténuation ou réflexion, comme par exemple un os ou un calcul, qui ont une impédance acoustique très élevée par rapport aux tissus mous environnants. En effet, la majeure partie de l'onde incidente est réfléchi ce qui empêche de visualiser correctement les tissus situés en dessous (figure 12). Ce phénomène peut aussi se voir derrière une interface courbée, qui entrainera la réfraction d'une partie de l'onde sonore et donc l'atténuation du signal dans la direction de l'onde incidente.

Le cône d'ombre accompagne la plupart des éléments minéralisés et des corps étrangers.

b. Renforcement postérieur

Le renforcement postérieur est l'exact inverse du cône d'ombre : quand l'onde sonore traverse un milieu qui réfléchit ou atténue très peu le signal, comme une cavité liquidienne, les tissus situés juste dessous semblent hyperéchogènes par rapport aux tissus voisins (figure 12).

Le renforcement postérieur est un signe fort de la présence de liquide juste au-dessus. De manière physiologique, il s'observe par exemple lors de l'examen de la vésicule biliaire.

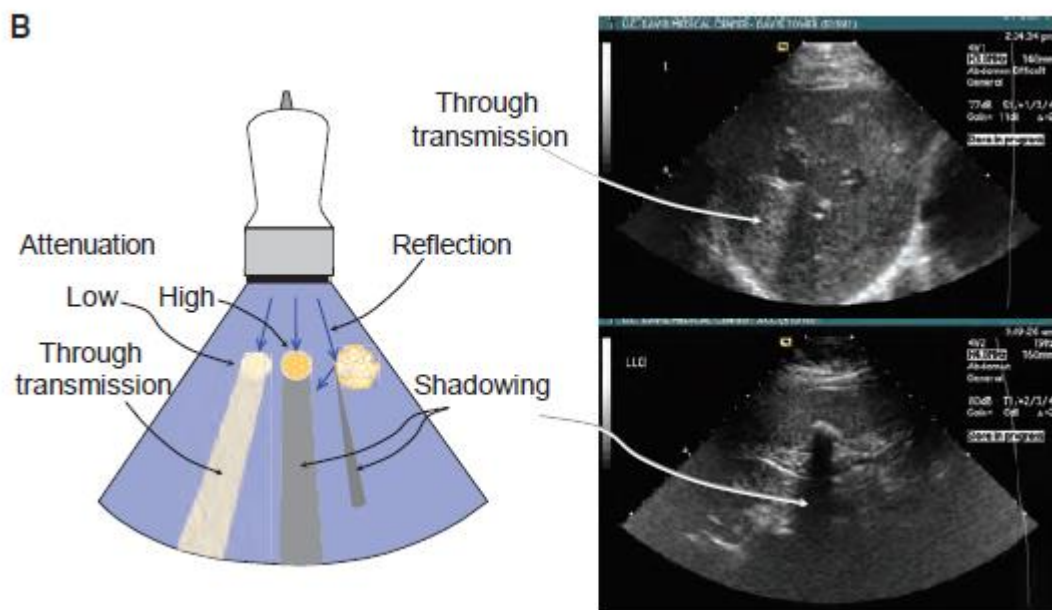


Figure 12. Artéfacts de cône d'ombre (en bas) et de renforcement postérieur (en haut) (Bushberg, 2012)

c. Réverbération

La réverbération a lieu quand de multiples échos sont générés entre deux surfaces réfléchissantes très proches l'une de l'autre, comme des bulles d'air, des tissus calcifiés ou des objets métalliques (ex : fragments de balle). Cela se manifeste par de multiples lignes parallèles espacées régulièrement et dont l'échogénicité diminue avec la profondeur (figure 13). La forme la plus classique est la queue de comète, ou le signal sonore est réfléchi de multiples fois dans une bulle d'air. A chaque réflexion, une partie du signal est renvoyée à la sonde et, vu que cet écho aura mis plus de temps à revenir, l'échographe l'interprète comme une surface située plus en profondeur, ce qui provoque l'apparition de lignes parallèles hyperéchogènes en dessous de la bulle d'air. De manière physiologique, cet artefact est vu lors de l'examen du tube digestif, avec de l'air pouvant s'y trouver.

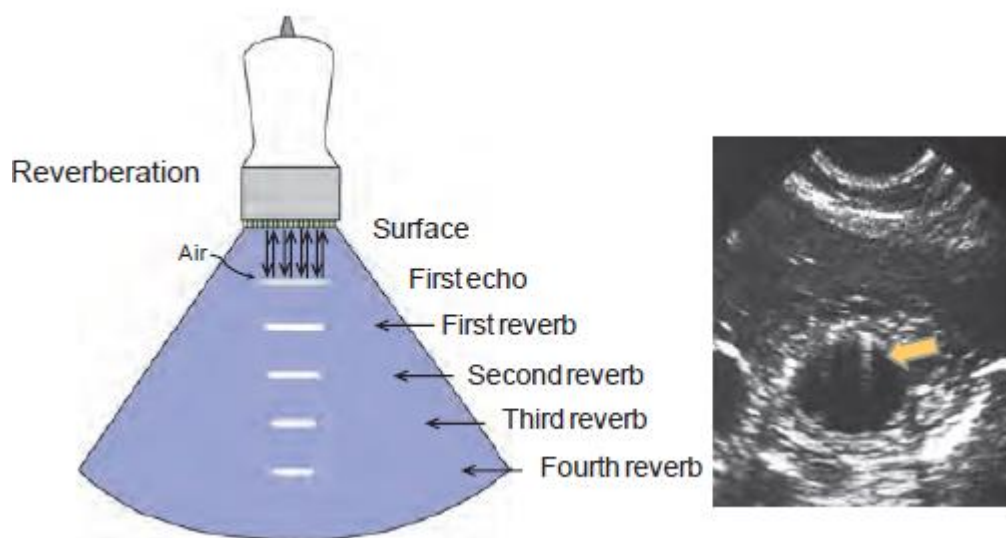


Figure 13. Artéfact de réverbération (Bushberg, 2012)

d. Mauvais placement

Il peut arriver qu'un organe ou une partie d'organe soit mal placé sur l'image du fait de la différence de vitesse de propagation du son dans des milieux différents. En particulier, le son se déplace plus lentement dans le gras que dans la majorité des autres tissus mous, ce qui provoque des discontinuités dans les limites d'organes situés en partie en dessous de tissu adipeux (figure 14).

En effet, en temps normal, le signal sonore est réfléchi sur le bord d'un organe et permet de former l'image. Si le signal traverse une poche de gras avant l'organe en question, le signal mettra plus de temps à retourner à la sonde et la bordure de l'organe sera placée plus profondément.

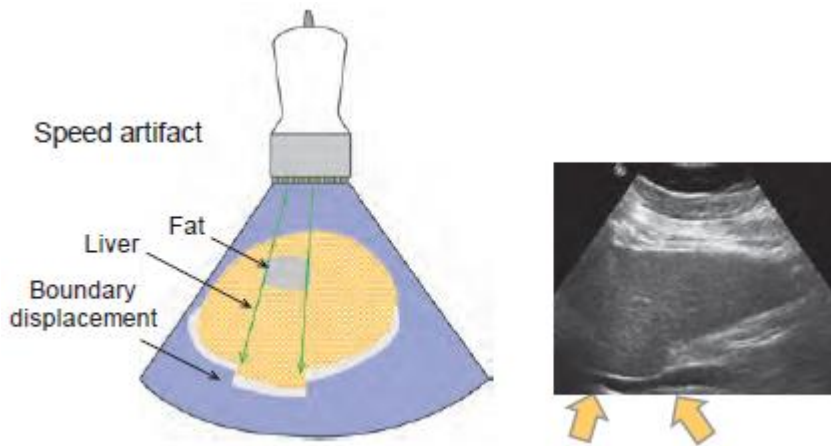


Figure 14. Artéfact de mauvais positionnement (Bushberg, 2012)

e. Image en miroir

Lorsqu'un organe est situé au-dessus d'une interface très réfléchissante, il peut arriver que l'écho provenant de cette surface réfléchissante soit réfléchi par l'organe situé au-dessus, et que l'onde ainsi générée soit elle-même réfléchi une fois de plus sur l'interface avant de revenir à la sonde. L'onde ainsi reçue par la sonde est interprétée comme la présence de l'organe en dessous de l'interface réfléchissante, en miroir par rapport celle-ci, puisque l'onde aura mis plus de temps à revenir (figure 15). De manière physiologique, cet artefact peut se voir sur des animaux de petits formats lors de l'examen du foie, où celui-ci apparaît devant et derrière l'interface diaphragmatique, mimant ainsi une rupture diaphragmatique.

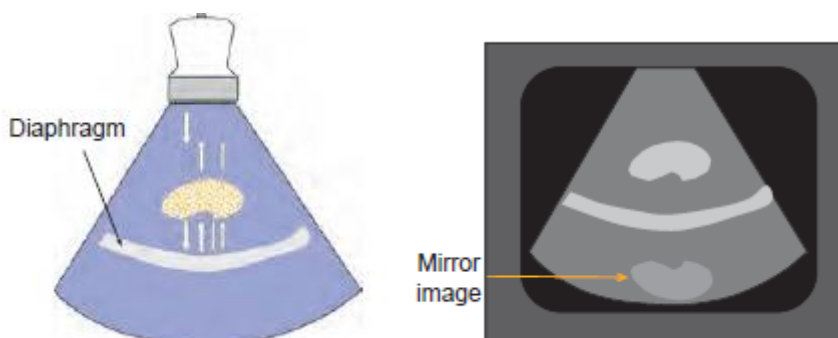


Figure 15. Image en miroir (Bushberg, 2012)

II. Le rat domestique : Taxonomie, biologie et anatomie

A. Taxonomie et histoire

Le rat domestique est issu de la sélection en élevage du rat brun ou surmulot *Rattus norvegicus*. C'est un mammifère de l'ordre des rongeurs (GBIF, 2020), caractérisés par leur paire d'incisives en forme de biseau à croissance continue sur chaque mâchoire.

Le rat domestique appartient au sous-ordre des myomorphes (GBIF, 2020), qui regroupent certains rongeurs en fonction de la position de leurs muscles masséters.

Le rat brun est présent sur tous les continents sauf l'Antarctique. L'étude des fossiles indique qu'il serait originaire d'Asie, et qu'il se serait répandu en Europe et en Amérique au cours du 18^e siècle (Keeble, Meredith, 2009).

Comme d'autres espèces, l'histoire de la domestication du rat brun est parcellaire. Au milieu du 19^e siècle, les rats, considérés comme nuisibles et pourchassés, ont commencé à être utilisés dans des fosses de combat pour des paris. Les paris consistaient à deviner le temps que mettait un chien à tuer un certain nombre de rats présents dans la fosse. Les premiers élevages de rats sembleraient dater de cette période (NFRS, 2020).

Les rongeurs ont aussi été associés à de nombreuses maladies (notamment la peste noire) au cours de l'histoire et continuent d'en constituer des réservoirs pour d'autres (par exemple, la leptospirose).

Dès la fin du 19^e siècle, les rongeurs sont devenus des modèles de choix pour la recherche scientifique, puisqu'ils sont facilement manipulables, de petite taille et prolifiques. La première lignée créée spécialement pour la recherche est la lignée « King Albino », conçue au tout début du 20^e siècle et nommée en référence à la Dr Helen King qui participa à l'élevage (NFRS, 2020). Le rat est notamment utilisé pour les recherches en cancérologie, dans ou encore dans les études sur la cognition ou les méthodes d'apprentissage.

Le rat brun ne jouit généralement pas d'une bonne image auprès du grand public, étant associé à la nuit, aux pillages de provisions et aux maladies (Le Provost, 2013). Malgré tout, plus récemment, le rat domestique est de plus en plus en vogue dans les foyers en tant que NAC (« Nouveaux Animaux de Compagnie »). C'est un compagnon très intelligent,

facilement manipulable, sociable et avec lequel il est possible de communiquer. Il existe une soixantaine de variétés reconnues par la National Fancy Rat Society, au Royaume-Uni (Sandford, 2018). En 2007, suite à la sortie du film « Ratatouille », où le héros est incarné par un rat sympathique, celui-ci a connu un gain de popularité (La dépêche, 2007)

B. Biologie

1. Alimentation

Le rat brun est à la base une espèce omnivore opportuniste. Les besoins nutritionnels du rat domestique sont assez bien connus, et la majorité des problèmes peuvent être évités en leur fournissant leur alimentation sous forme de granulés ou d'extrudés complets. Beaucoup de propriétaires nourrissent cependant leurs rats avec des mélanges de graines qui, s'ils sont en général théoriquement équilibrés, sont triés par les rats qui ne sélectionnent que les graines qu'ils préfèrent, les exposant ainsi à des carences et à de l'obésité. Un extrudé de qualité contient classiquement 14-16% de protéines (Quesenberry, Carpenter, 2012) et 5% de matières grasses. Les rats sont généralement néophobes, cela signifie qu'ils ont une appréhension à tester un aliment inconnu. Cependant, la présentation répétée d'un aliment nouveau les incitera à terme à le tester.

La nourriture peut être dispersée dans l'environnement pour favoriser la recherche, le comportement de fouissage et l'activité sportive. Elle est généralement distribuée *ad libitum*, mais une restriction peut être nécessaire chez les animaux obèses.

Il est tout à fait possible de compléter cette alimentation par des friandises, pour leur apprendre des tours, les récompenser, enrichir l'environnement ou leur faire plaisir, l'éventail étant large au vu du régime alimentaire du rat. Il faut cependant éviter les aliments trop riches en gras ou en sucre. Certains aliments sont aussi toxiques pour le rat (chocolat, alcool, agrumes, pépins, oignon...).

La coprophagie est occasionnelle chez le rat, permettant de récupérer des nutriments essentiels produits par les bactéries coliques, comme les vitamines B ou les glucides issus de la dégradation des fibres (Quesenberry, Carpenter, 2012).

Une eau fraîche doit être disponible en permanence pour l'animal, dans une gamelle ou dans un biberon, et renouvelée très régulièrement. La prise de boisson quotidienne est d'environ 10mL pour 100g de poids vif (Keeble, Meredith, 2009).

2. Vie de reproduction

Les rongeurs femelles ont l'orifice urétral externe séparé du vagin. Elles ont un cycle œstral à ovulation spontanée. Les myomorphes sont des espèces très prolifiques, et présentant un œstrus post-partum dans les 24 heures suivant la parturition, pouvant conduire à des gestations successives si le mâle n'est pas mis à l'écart. Les dystocies sont assez rares (Keeble, Meredith, 2009).

Le cycle œstral dure 4 à 5 jours, l'œstrus en lui-même durant 10 à 20 heures. La femelle est généralement réceptive quelques heures pendant la nuit suivant la fin du pro-œstrus, 4 à 6 heures avant l'ovulation. Lorsque la femelle est réceptive, elle présente une position caractéristique de lordose, en mettant sa poitrine au sol, relevant le coccyx et écartant la queue pour faciliter la pénétration. Celle-ci ne dure que quelques secondes. Le mâle présente ensuite un période réfractaire de 4 à 5 minutes, après laquelle il cherchera de nouveau à s'accoupler si des femelles réceptives se trouvent à proximité (Le Provost, 2013). Si l'accouplement est un succès, un bouchon gélatineux se met en place dans le vagin de la femelle, constitué de sécrétions des glandes sexuelles annexes du mâle. Le rôle de ce bouchon est mal connu.

La gestation dure entre 21 et 23 jours, et la portée peut aller de 6 à 18 ratons. C'est donc une espèce extrêmement prolifique si les contacts entre les mâles et les femelles ne sont pas correctement surveillés. La femelle commence à construire son nid 2 à 3 jours avant la mise-bas. Le sevrage a lieu vers 17-21 jours et la puberté autour de 6 à 8 semaines (Keeble, Meredith, 2009). On peut observer un abandon des petits ou du cannibalisme en cas de sous-nutrition, de conditions environnementales inadaptées ou si les animaux sont dérangés trop souvent. C'est pourquoi il est conseillé de laisser la mère et ses petits dans un endroit calme et de ne pas trop manipuler les petits (Le Provost, 2013).

3. Comportement

Le rat vit en moyenne entre 2 et 3.5ans (Quesenberry, Carpenter, 2012)

C'est une espèce sociale pouvant vivre en groupe, intéressée par les interactions avec les humains, facilement manipulable et rarement agressive, en faisant une espèce domestique de choix (Quesenberry, Carpenter, 2012)

Les rats ont une vision assez peu développée, surtout les races albinos. Ils se reposent principalement sur leur odorat et leurs vibrisses pour se déplacer. Comme beaucoup d'espèces proies, les yeux sont placés latéralement, ce qui leur offre un large champ de vision mais une vision binoculaire réduite. Ainsi, ils évaluent assez mal la profondeur mais peuvent se servir de petits mouvements de tête pour l'apprécier en utilisant l'effet de parallaxe (Le Provost, 2013).

C'est une espèce plutôt crépusculaire à nocturne, grégaire, et dont le système social est hautement organisé. Il est donc vivement conseillé d'en posséder plusieurs. L'introduction d'un nouvel arrivant doit se faire progressivement, sous surveillance et dans l'idéal sur un terrain neutre. Les conflits sont rares au sein d'un groupe stable.

Le rat est une espèce intelligente, et qui aime explorer son environnement. Il mord rarement, est vite apprivoisé et peut répondre à son nom ou à l'arrivée de son propriétaire. Les mâles sont généralement plus dociles et câlins, les femelles plus exploratrices.

Les rats communiquent beaucoup par l'olfaction. Ils déposent régulièrement des petites gouttes d'urines sur leur territoire et leurs trajets ou sur leurs congénères, ce qui informent des individus en présence et de leur état. Ils communiquent également vocalement, par des sons en partie audibles par l'Homme, en partie ultrasonores.

Le rat peut présenter du bruxisme en situation de plaisir, de stress ou de douleur.

Les rats passent une grande partie de leur temps à se toiletter. Ils peuvent le faire individuellement ou mutuellement. Ils commencent par la tête et les oreilles, puis passent à l'abdomen, aux flancs, pour finir par la queue. Un pelage de mauvaise qualité est signe de stress ou de maladie, bien que les poils jaunissent naturellement avec l'âge.

4. Vie en captivité

Le rat est une espèce qui vit très bien en captivité si de bonnes conditions sont respectées. La cage doit être de taille adaptée et régulièrement nettoyée (figure 16). Attention, le rat a tendance à ronger ce qu'il a sous les dents, la cage doit donc être faite dans un matériau résistant. L'espacement entre les barreaux doit être faible, car les rats s'échappent facilement. Un trou d'un centimètre et demi peut suffire pour qu'un rat puisse passer au travers (Keeble, Meredith, 2009). Les rats sont assez vifs et adorent grimper. Ainsi, une cage haute avec des barreaux horizontaux est conseillée (Tully, 2009).

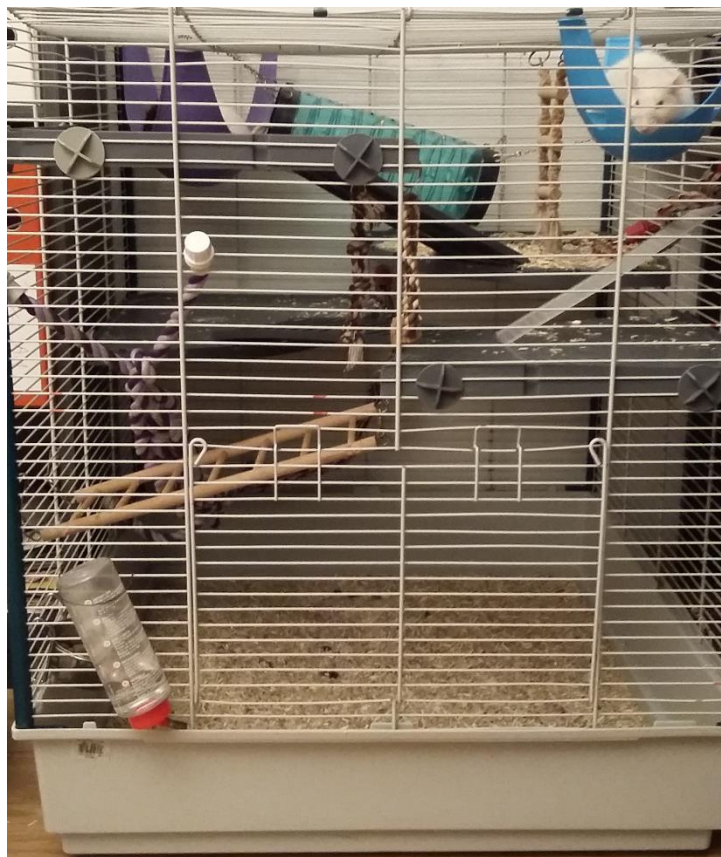


Figure 16. Exemple de cage pour rats

Cinq paramètres d'ambiance doivent être absolument maîtrisés : la température, l'humidité, la ventilation, la luminosité et le bruit. La température doit être comprise entre 18 et 26°C, bien que des variations plus importantes puissent être tolérées si elles sont de courte durée. Le rat supporte mieux le froid que le chaud, ayant du mal à perdre de la chaleur. L'humidité doit être comprise entre 40 et 70%. Une humidité trop basse peut entraîner des problèmes dermatologiques ainsi qu'une striction de la queue appelée « ringtail ». Une humidité trop

élevée peut favoriser la survenue de maladies respiratoires. Le lieu de vie doit être correctement ventilé, sans pour autant créer de courant d'air, car le rat y est très sensible. Le rat étant un animal nocturne, il est plus actif en période d'obscurité, et se repose en période lumineuse. Il faut respecter un rythme circadien d'environ 12 heures de jour et 12 heures de nuit. Le bruit est un facteur de stress important (Le Provost, 2013).

La litière doit présenter plusieurs qualités : elle doit idéalement être absorbante, retenir les odeurs, ne pas être poussiéreuse et ne pas être traumatisante pour les pattes des animaux. Il est difficile de trouver une litière qui satisfait toutes ces propriétés. Ainsi, la litière de chanvre est absorbante mais peut être assez poussiéreuse. La litière de lin absorbe mal les odeurs mais possède toutes les autres qualités. La litière de maïs n'est pas poussiéreuse mais assez traumatisante. Les copeaux de bois de résineux doivent être évités car ils contiendraient des hydrocarbures aromatiques toxiques pour le rat (Keeble, Meredith, 2009), mais ce point est débattu. Dans tous les cas, elle doit être changée au moins une à deux fois par semaine.

Le rat est une espèce interactive et vive. Il faut absolument que son environnement soit enrichi, comme par exemple avec des cordes, des ponts, des étages, des tunnels, des boîtes, des hamacs, des endroits où grimper etc. Il est important de disposer des endroits couverts dans la cage, où le rat se sentira en sécurité pour se reposer. Le rat adore se faire un nid avec les objets qu'il trouve. Ainsi, on peut lui proposer des bouts de papier ou des mouchoirs qu'il sera heureux de découper pour s'en faire un nid douillet.

C. Anatomie et aspect échographique normal

Les rats étant des mammifères, ils partagent de nombreuses caractéristiques anatomiques avec les autres animaux domestiques. L'accent est porté sur les différences anatomiques du rat par rapport aux carnivores domestiques et leurs conséquences sur l'aspect radiographique et échographique.

1. Système cardio-respiratoire

La fréquence cardiaque est d'environ 300-500 battements par minute.

La fréquence respiratoire est comprise entre 70 et 150 mouvements par minute (Quesenberry, Carpenter, 2012).

L'anatomie de l'oropharynx ne leur permet pas de respirer par la bouche. La trachée débute ventralement à l'œsophage et se poursuit dans le thorax pour se diviser en deux bronches souches. Elle est soutenue par une vingtaine (18-24) d'anneaux cartilagineux en forme de C (Sharp, Villano, 2012). La taille de la cavité thoracique du rat est relativement petite proportionnellement à son abdomen, comparativement à celle des carnivores domestiques.

Le cœur se situe au milieu de la cavité thoracique. Son apex est situé proche du diaphragme, pointe vers la gauche et est entouré par les poumons. Il est constitué de quatre cavités : l'oreillette et le ventricule gauches, et l'oreillette et le ventricule droits.

Sur une vue latérale, l'aspect crânial du cœur est constitué de sa moitié droite, avec l'oreillette dorsalement et le ventricule ventralement, et l'aspect caudal est formé par la partie gauche du cœur.

A l'échographie, le cœur est mieux vu en plaçant la sonde sous le diaphragme, à travers le foie (Silverman, 1993).

Il existe quelques valeurs de référence des dimensions cardiaques mises au point par Brás et al. en 2007, et par Watson et al. en 2004. Une autre étude s'intéresse à l'évolution des dimensions cardiaques avant et après induction d'un infarctus du myocarde chez le rat (Galrinho et al., 2015). Les mesures concernent les dimensions du ventricule gauche et de la paroi antérieure du ventricule gauche, le volume du ventricule gauche, le tout en fin de diastole et de systole (respectivement VGd et VGs, PAVGd et PAVGs, VGd volume et VGs volume), l'épaisseur du septum interventriculaire, de l'oreillette gauche (OG), le pourcentage de contraction, la fraction d'éjection, le temps de relaxation isovolumétrique (TRI) et le débit cardiaque. Ces données sont résumées dans la figure 17. Cependant, cet examen se réalise parfois sous sédation voire sous anesthésie générale, et (Stein et al., 2007) ont démontré que les molécules utilisées influencent les mesures des paramètres cardiaques.

Paramètre	Galrinho et al, 2015	Brás et al, 2007	Watson et al, 2014
VGd (mm)	5.85 ± 0.54	4.7 ± 0.82	5.46 ± 0.81
VGs (mm)	2.67 ± 0.52	2.5 ± 0.82	2.80 ± 0.80
PAVGd (mm)	1.72 ± 0.19	NE	NE
PAVGs (mm)	2.99 ± 0.36	NE	NE
VGd volume (cm ³)	0.20 ± 0.04	NE	NE
OG (mm)	NE	NE	3.25 ± 0.45
Septum (mm)	NE	NE	1.37 ± 0.12
VGs volume (cm ³)	0.06 ± 0.02	NE	NE
% de contraction	54 ± 7%	48.36 ± 4.19%	49 ± 10.4%
Fraction d'éjection	72 ± 9%	NE	64 ± 6.9%
Débit cardiaque	76 ± 15 mL/min	NE	NE
TRI (ms)	NE	NE	25.5 ± 6.3

Figure 17. Valeurs échocardiographiques de référence chez le rat.

Moyenne ± standard deviation. NE : non évalué. D'après (Brás et al., 2007), (Galrinho et al., 2015), (Watson et al., 2004). Des mesures plus complètes sont disponibles dans les articles mentionnés.

Le poumon droit est constitué de quatre lobes : crânial, moyen, accessoire, caudal ; le poumon gauche est formé d'un seul lobe, et est plus petit que le droit (figure 18) (Sharp, Villano, 2012).

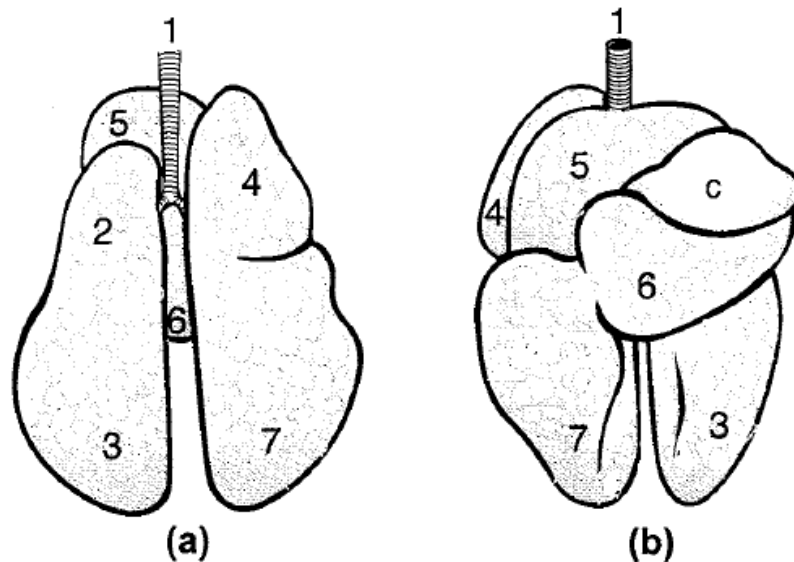


Figure 18. Anatomie des poumons. (a) Vue dorsale (b) Vue ventrale (Krinke, 2000)

1. Trachée 2. Partie craniale du poumon gauche 3. Partie caudale du poumon gauche
 4. Lobe cranial du poumon droit 5. Lobe moyen du poumon droit 6. Lobe accessoire du poumon droit
 7. Lobe caudal du poumon droit C. Cœur

2. Système digestif et glandes annexes

a. Bouche

La caractéristique principale des rongeurs est leur dentition. Chez le rat, elle est composée d'une incisive éلودonte (à croissance continue) sur chaque hémimâchoire et de trois molaires. La formule dentaire est donc $I1/1 C0/0 PM0/0 M3/3$, le rat possédant 16 dents. Les incisives sortent à partir du 8^e-10^e jour de vie, tandis que les molaires apparaissent selon un ordre rostrocaudal, respectivement autour du 18^e, 21^e et 35^e jour (Welsh, 2011). Les dents labiales et jugales sont séparées par un diastème. La surface labiale des incisives est généralement jaune à orangée (Keeble, Meredith, 2009).

La couronne des incisives mandibulaires est environ 3 fois plus grande que celle des incisives supérieures. La base des incisives maxillaires s'étend jusqu'aux deux-tiers du diastème environ. Celle des incisives mandibulaires s'étend jusqu'à la dernière molaire. Les molaires maxillaires possèdent deux racines. La première molaire maxillaire a 4 à 5 racines, la deuxième quatre, la troisième trois (Keeble, Meredith, 2009).

Le rat possède 3 paires de glandes salivaires : les glandes parotides, constituées de 3 à 4 lobes et s'étendant de la base de l'oreille à la clavicule de chaque côté ; les glandes submaxillaires, situées au niveau de l'angle de la mandibule ; et les glandes sublinguales, placées rostralement aux précédentes (figure 19). Il possède également des glandes mineures, ne possédant pas de conduit, et dont les sécrétions se déversent en continu dans la bouche (Le Provost, 2013).

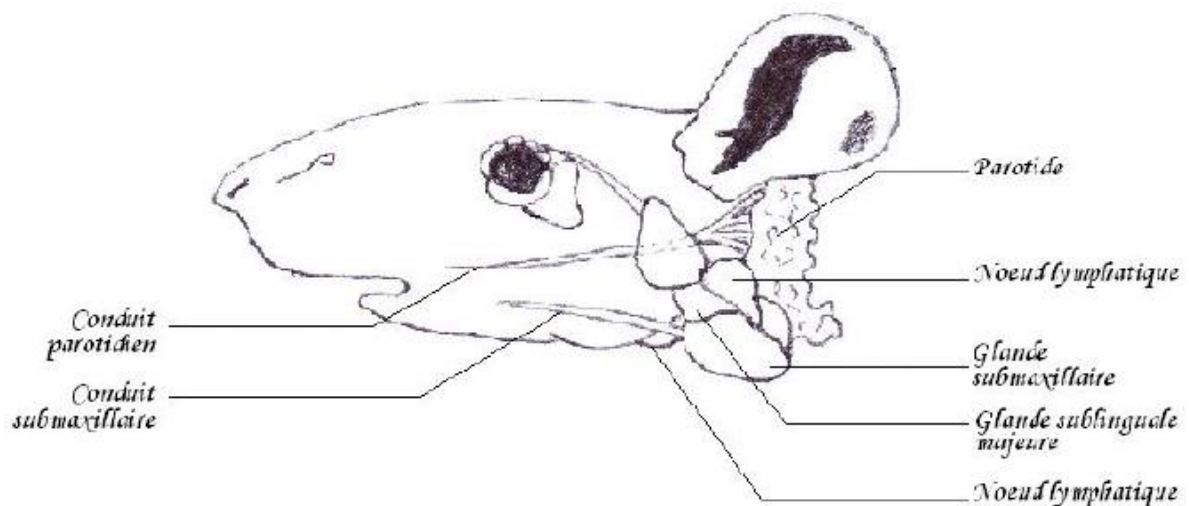


Figure 19. Glandes salivaires du rat (Hofstetter et al., 2006)

b. Œsophage

L'œsophage débute juste en arrière de la glotte, dorsalement à la trachée, puis part légèrement sur la gauche dans le thorax. Il entre dans l'estomac au niveau de sa petite courbure (Le Provost, 2013).

c. Estomac

Les rongeurs sont des monogastriques. L'estomac du rat est situé transversalement dans la partie crâniale gauche de l'abdomen, et est composé de deux parties : une partie non-glandulaire proche de l'œsophage et une partie glandulaire proche du pylore, délimitées par une ligne à hauteur du cardia : la *margo plicatus* (Thiriet, Hegelen, 2012). Le rat ne peut pas vomir à cause de la conformation de son cardia et l'innervation de son diaphragme (Quesenberry, Carpenter, 2012). Pour cette raison, et parce que les petites espèces ont un métabolisme assez rapide, le jeûne préanesthésique n'est pas recommandé.

Il est possible de visualiser le fundus, le corps et la région pylorique à l'échographie, en coupe transverse. Suivant l'état de de réplétion gastrique, on peut distinguer les plis de la muqueuse (figure 20). Le contenu gastrique, lorsqu'il est présent en quantité abondante, apparait hyperéchogène et entraine la formation d'un cône d'ombre caractéristique.



Figure 20. Aspect échographique de l'estomac (flèche blanche).

On aperçoit une paroi hypoéchogène correspondant à la muqueuse, et un contenu hyperéchogène.

d. Intestins

La taille de l'intestin grêle, le temps de transit et l'aspect histologique varient avec l'âge de l'animal. Chez l'adulte, le duodénum mesure environ 10 centimètres, le jéjunum 100 et l'iléon 3 (Sharp, Villano, 2012). Le duodénum est divisé, comme chez les carnivores domestiques, en duodénum descendant, transverse et ascendant. Dans le duodénum descendant, on trouve la papille duodénale qui constitue l'abouchement du canal cholédoque.

Les rats possèdent un caecum large, en forme de virgule, avec une paroi fine, situé généralement sur la droite de l'abdomen, mais dont la position peut varier selon les individus. Une constriction interne permet de le séparer en deux parties : l'apex et la base. Au niveau de l'apex, on trouve un tissu lymphoïde important, équivalent de l'appendice humaine.

Le colon est relativement long, et est séparé en 3 parties : ascendant, transverse et descendant (Sharp, Villano, 2012). Dans ce colon, on trouve également des territoires lymphoïdes, qui forment le GALT (Gut-Associated Lymphoid Tissue).

Le transit alimentaire dure en moyenne 12 à 24 heures.

Le duodénum est facilement identifiable à l'échographie. Il apparait comme une structure tubulaire dont le diamètre varie avec les ondes péristaltiques (figure 21). Les différentes couches sont visualisables, comme chez les carnivores domestiques, et sont les mêmes pour l'estomac : lumière hyperéchogène, muqueuse hypoéchogène, sous-muqueuse hyperéchogène, musculuse hypoéchogène, séreuse hyperéchogène. La muqueuse est toujours la couche la plus épaisse. Cependant, les 3 couches les plus externes sont parfois confondues, dépendant de la qualité de définition de l'échographe (Courtiade, 2011).

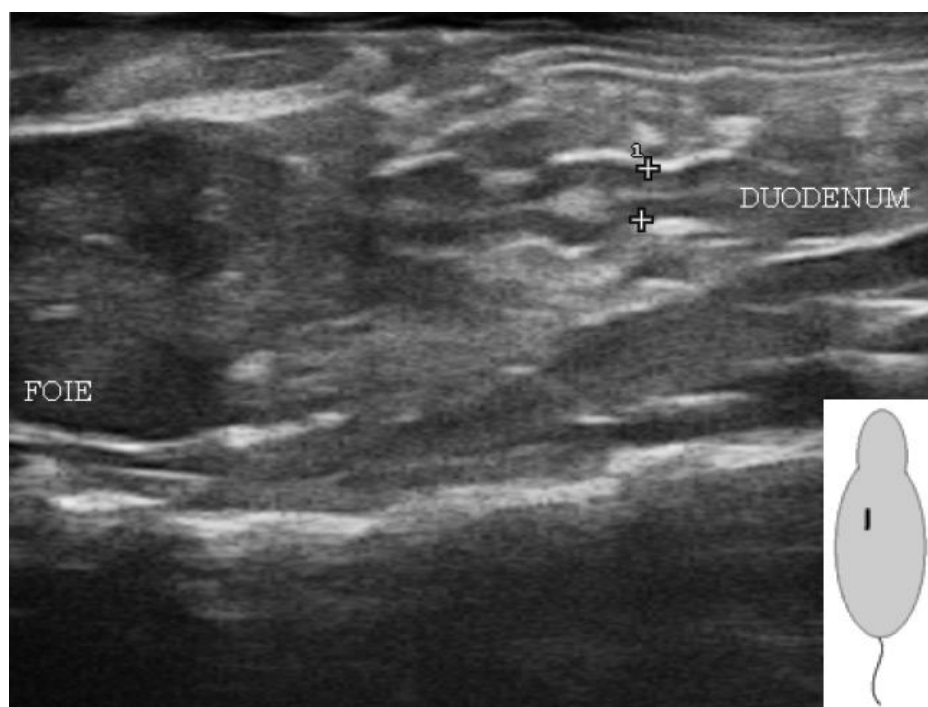


Figure 21. Aspect échographique du duodénum. D'après Courtiade, 2011.

Il est difficile de distinguer jéjunum, iléon et colon. Le caecum, quant à lui, est gros, partiellement rempli de gaz, et situé caudalement et latéralement à droite, mais peut également être retrouvé à gauche. Sa paroi est fine et difficilement visualisable. Quand elle est visible, les couches sont les mêmes qu'ailleurs sur les intestins, mais les elles apparaissent alors de la même taille (Banzato et al., 2014).

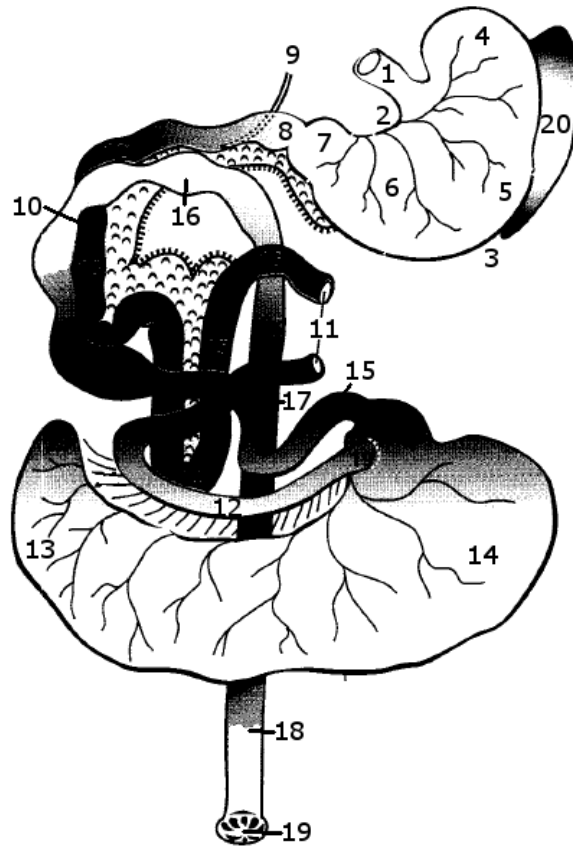


Figure 22. Anatomie du système digestif du rat (Krinke, 2000)

- | | | | | |
|------------------------|----------------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|
| 1. Oesophage et cardia | 2. Petite courbure | 3. Grande courbure | 4. Saccus cecus | 5. Fundus de l'estomac |
| 6. Corps de l'estomac | 7. Partie pylorique de l'estomac | 8. Pylore | 9. Canal cholédoque | 10. Duodénum descendant |
| 11. Jejunum | 12. Iléon | 13. Apex du caecum | 14. Base du caecum | 15. Colon ascendant |
| 16. Colon transverse | 17. Colon descendant | 18. Rectum | 19. Anus | |

Les mesures gastro-intestinales sont résumées dans la figure 23.

Paramètre (mm)	Banzato et al, 2014			Courtiade, 2011	
	Moyenne (\pm SD)	Mâle (moyenne \pm SE)	Femelle (moyenne \pm SE)	Mâle (moyenne \pm SD)	Femelle (moyenne \pm SD)
Corps de l'estomac	1.09 \pm 0.20	1.04 \pm 0.05	1.15 \pm 0.05	NE	NE
Paroi du fundus	1.07 \pm 0.25	0.97 – 1.06*	1.09 – 1.19*	NE	NE
Paroi du pylore	2.20 \pm 0.41	2.15 \pm 0.10	2.25 \pm 0.10	NE	NE
Duodenum	NE	NE	NE	2.8 \pm 0.3	2.7 \pm 0.5
Paroi du duodénum	1.54 \pm 0.21	1.43 – 1.54*	1.54 - 1.64*	1.3 \pm 0.2	1.3 \pm 0.3
Paroi du caecum	0.89 \pm 0.13	0.89 \pm 0.03	0.89 \pm 0.03	NE	NE

Figure 23. Mesures de référence du système digestif. SD=standard deviation. SE=standard error. NE : non évalué

* : Intervalle de confiance à 95%. D'après (Banzato et al., 2014) et (Courtiade, 2011)

e. Glandes annexes

Le foie est constitué de 4 lobes : le médian, qui présente une fissure profonde, le latéral droit, partiellement divisé en partie crâniale et caudale, le gauche, et le caudé. Cependant, la description des lobes varie selon les auteurs (Krinke, 2000). Le bord crânial du foie est en contact direct avec le diaphragme, la face viscérale est en contact avec l'estomac, le duodénum descendant, le colon transverse, le jéjunum et la rate, et dépasse du cercle de l'hypochondre de façon physiologique.

Les rats n'ont pas de vésicule biliaire. La bile s'écoule constamment, sans capacité de rétention, et se déverse dans le duodénum par le canal cholédoque à environ 25mm distalement au pylore.

A l'échographie, le foie présente une structure homogène, discrètement granuleuse, et il n'est pas possible d'individualiser les lobes (figure 24).

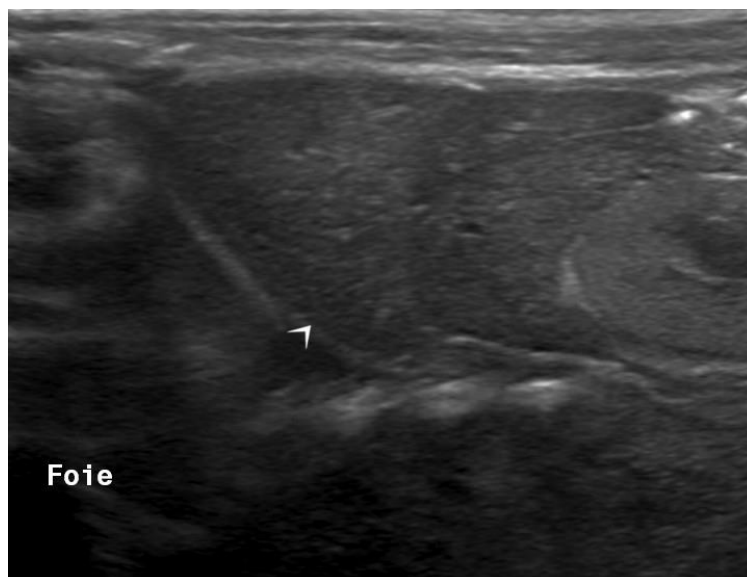


Figure 24. Aspect échographique du foie (flèche blanche).

L'aorte, la veine cave caudale et la veine porte sont visibles. La veine porte est ventrale à la veine cave caudale et sa paroi est hyperéchogène. Son diamètre varie avec les phases de la respiration : il diminue à l'expiration et augmente à l'inspiration. Le diamètre est également sensible à la pression exercée par la sonde échographique. L'aorte est le vaisseau le plus dorsal, et plus médial que la veine cave caudale. Les mesures des vaisseaux sont résumées dans la figure 25.

Le parenchyme est aussi parcouru d'autres structures tubulaires anéchogènes correspondant aux ramifications portes et aux veines hépatiques. Le pôle crânial du rein droit est en contact direct avec le foie et le cortex rénal est hyperéchogène par rapport au parenchyme hépatique. Le canal cholédoque n'est pas identifiable chez tous les individus. Il apparaît comme une structure tubulaire anéchogène avec une paroi hyperéchogène, ventralement à la veine porte.

Paramètre (mm)	Mâle (moyenne \pm SD)	Femelle (moyenne \pm SD)
Veine porte	1.9 \pm 0.2	1.7 \pm 0.2
Veine cave caudale	4.7 \pm 0.7	3.9 \pm 0.6
Aorte	2.1 \pm 0.2	1.8 \pm 0.2

Figure 25. Mesures de référence des vaisseaux hépatiques. SD : standard deviation. D'après (Courtiade, 2011)

La description du pancréas varie selon les auteurs. Il peut être divisé en lobe gauche, corps et lobe droit. Le corps et le lobe droit sont localisés le long du duodénum, dans le mésoduodénum et s'étendent jusqu'au début du mésojejunum. Le lobe gauche s'étire sur l'aspect dorsal de l'estomac (Krinke, 2000). Il a une couleur plus foncée et une consistance plus ferme que la graisse environnante. Le nombre de canaux pancréatiques est variable (2-8), ils s'abouchent généralement au canal cholédoque mais certains peuvent se terminer directement dans le duodénum (Thiriet, Hegelen, 2012).

A l'échographie, le corps et les lobes droit et gauche sont visibles chez tous les individus. Le lobe gauche est vaguement triangulaire et s'étire ventralement au rein gauche. Le lobe droit est de forme irrégulière et est localisé entre l'aspect médial du rein droit et le lobe droit du foie. Le pancréas est plus hyperéchogène que le foie et le cortex rénal (Banzato et al., 2014).

3. Système urinaire

Les reins sont situés dans l'espace rétropéritonéal. Ils sont entourés d'une capsule. Le rein droit est plus crânial que le gauche, tout comme la glande surrénalienne. Le rein droit est situé au niveau de T12-T13-L1, le rein gauche au niveau de T13-L1-L2.

La description interne des reins du rat est assez aléatoire entre les sources, il en résulte une description échographique très variable.

Les reins du rat sont unilobés. Ils sont constitués d'un cortex en périphérie et d'une médulla composée de deux parties : une médulla externe en périphérie et une médulla interne au centre, dont les papilles fusionnées forment la crête rénale (Seely, Brix, 2014).

L'urine s'écoule dans les uretères jusqu'à la vessie, localisée en région caudale de l'abdomen, d'où part ensuite l'urètre (figure 26). L'orifice urétral externe est séparé du vagin chez la femelle, et est situé à la base du clitoris.

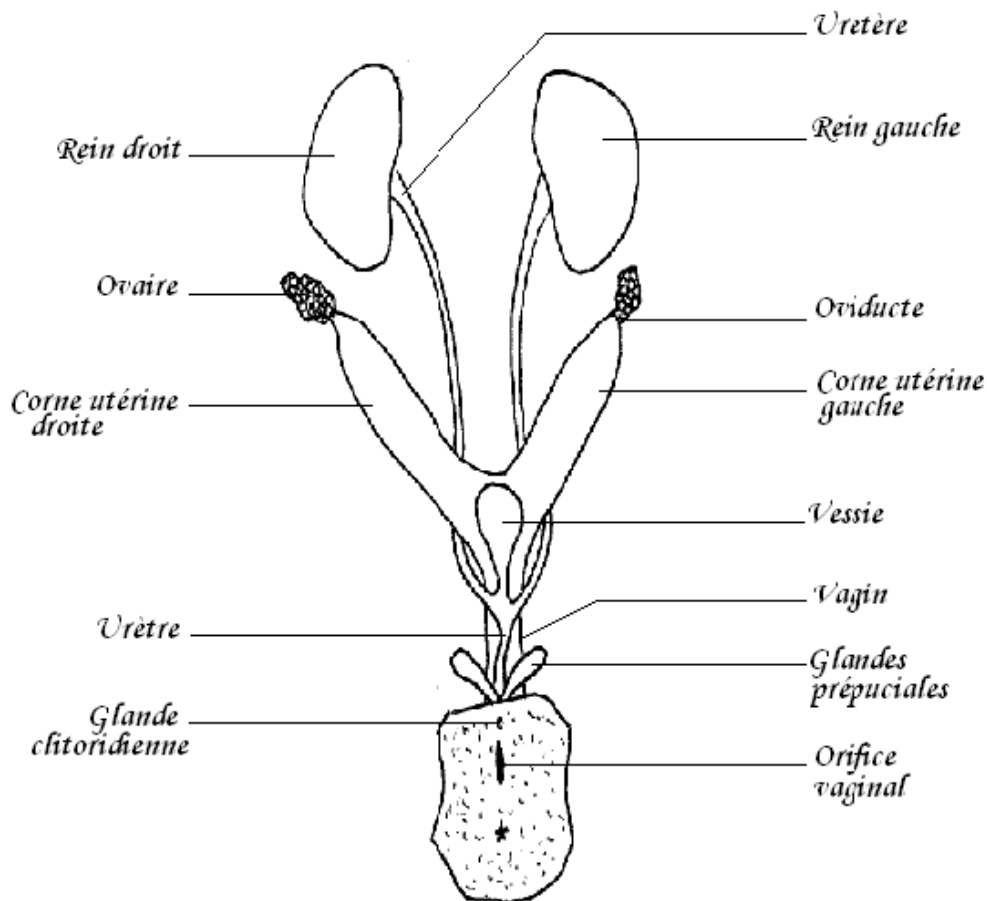


Figure 26. Système urogénital du rat femelle (Hofstetter et al., 2006)

A l'échographie, les reins sont bien visibles, la distinction cortico-médullaire est réalisable mais l'échogénicité des différentes structures semblent varier selon le type de sonde et la fréquence utilisée (donc la définition), modifiant donc l'interprétation (Courtiade, 2011 ; Banzato et al., 2014). On peut retenir que l'on peut distinguer une corticale hypoéchogène, une médulla externe hyperéchogène et une médulla interne hypoéchogène (figure 27). Parfois, il est possible de distinguer le bassinet et les vaisseaux du hile.

Ils sont plus facilement observables en vue latérale que ventrale. Les dimensions du rein semblent corrélées au poids de l'animal, et le bassinet du rein droit, selon une étude, est plus gros chez le mâle que chez la femelle (Banzato et al., 2014). Une autre étude rapporte que le reins des mâles est plus gros que celui des femelles (Courtiade, 2011), mais il est possible que ce ne soit que l'influence du poids (les mâles étant plus lourds que les femelles).

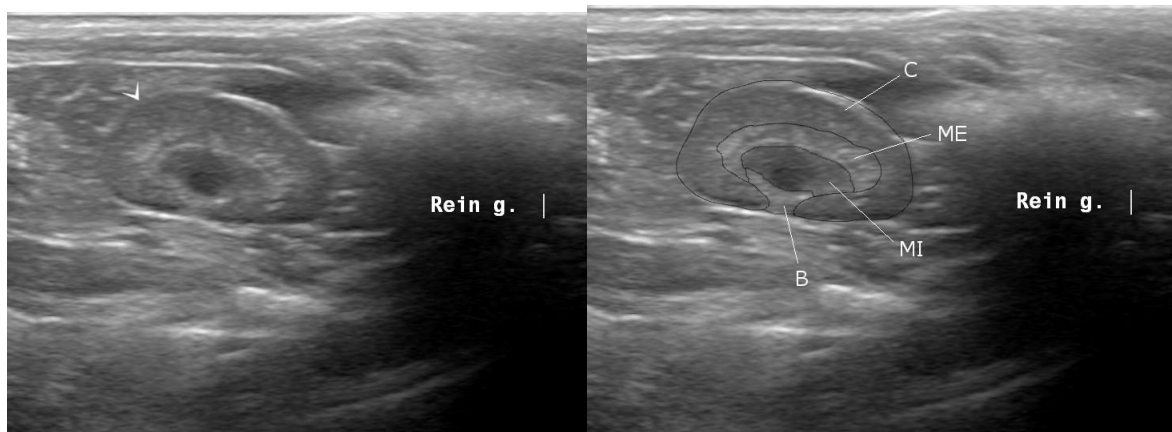


Figure 27. Echographie du rein (flèche blanche). C : cortex. ME : médulla externe. MI : médulla interne. B : bassinet.

La vessie est petite et peut ne pas être observée si elle est vide. Quand elle est visible, la paroi est bien identifiable, hyperéchogène, et le contenu est hypoéchogène à anéchogène (figure 28). Elle est de forme ronde à oblongue. La taille de la vessie varie fortement selon son état de réplétion.



Figure 28. Aspect échographique de la vessie (flèche blanche).

Les différentes mesures de référence sont présentées dans la figure 29.

Paramètre (mm)	Banzato et al, 2014			Courtiade, 2011	
	Moyenne (\pm SD)	Mâle (moyenne \pm SE)	Femelle (moyenne \pm SE)	Mâle (moyenne \pm SD)	Femelle (moyenne \pm SD)
Longueur rein gauche	19.47 \pm 2.3	19.87 \pm 0.44	19.08 \pm 0.44	19.9 \pm 1.0	15.9 \pm 0.6
Largeur rein gauche	10.74 \pm 1.1	10.91 \pm 0.22	10.57 \pm 0.22	11.4 \pm 1.3	9.3 \pm 0.9
Epaisseur rein gauche	10.96 \pm 1.2	11.02 \pm 0.29	10.91 \pm 0.25	9.9 \pm 0.6	8.4 \pm 0.6
Bassinets rein gauche	0.87 \pm 0.24	0.802 – 0.905*	0.784 – 0.896*	NE	NE
Longueur rein droit	19.45 \pm 2.18	19.81 \pm 0.39	19.06 \pm 0.40	19.2 \pm 0.8	16.0 \pm 1.0
Largeur rein droit	10.75 \pm 2.18	10.78 \pm 0.16	10.71 \pm 0.17	12.3 \pm 1.3	9.4 \pm 0.7
Epaisseur rein droit	11.04 \pm 1.00	11.05 \pm 0.25	11.02 \pm 0.22	9.8 \pm 0.7	8.4 \pm 0.5
Bassinets rein droit	0.84 \pm 0.21	0.815 – 0.892*	0.711 – 0.783*	NE	NE
Paroi vessie	0.73 \pm 0.13	0.76 \pm 0.03	0.71 \pm 0.03	NE	NE

Figure 29. Mesures de référence du système urinaire.

SD=standard deviation. SE=standard error. * : Intervalle de confiance à 95%. NE : non évalué. D'après (Banzato et al., 2014) et (Courtiade, 2011). Dans l'étude de Banzato et al, les moyennes des mâles et des femelles sont ajustées au poids.

4. Système génital

Les femelles possèdent deux ovaires, deux utérus et deux cols, reliés à un vagin. On parle donc de système *uterus duplex bicollis, vagina simplex* (Bertram et al., 2019).

L'utérus repose dans l'abdomen caudal, entre le rectum dorsalement et la vessie ventralement.

Les ovaires sont situés caudalement aux reins. Ils sont entourés par la bourse ovarique et reliés aux utérus par les oviductes. Les follicules mesurent entre 0.025 et 0.7mm, les corps jaunes entre 0.7 et 1.1mm (Krinke, 2000).

A l'échographie, les cols utérins et les portions caudales des utérus sont facilement identifiables comme des structures tubulaires hypoéchogènes (figure 30). La partie crâniale des utérus est difficile à identifier chez les femelles non gestantes à cause des structures

intestinales, mais facilement identifiable chez les gestantes. Les parois ventrale et dorsale de l'utérus, quand elles sont visibles, apparaissent comme des lignes hyperéchogènes (Ypsilantis et al., 2009).

L'ovaire est ovale, hypoéchogène, retrouvé caudalement au rein, et avec un contour parfois irrégulier (Figure 30). Des follicules sont parfois visibles : ils présentent une structure ronde, anéchogène et sont situés au sein du parenchyme (Banzato et al., 2014).

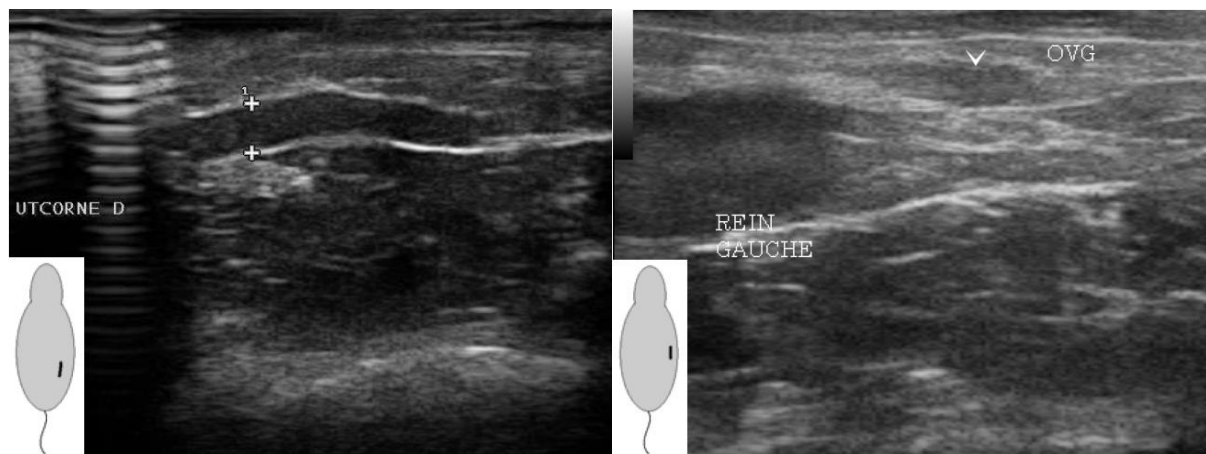


Figure 30. Aspect échographique de l'utérus droit (délimité par les croix) et de l'ovaire gauche (flèche blanche). D'après Courtiade, 2011.

Les mâles ont une distance ano-génitale plus élevée que les femelles, ce qui permet d'aider à les sexer. Le scrotum est très développé, et le canal inguinal est ouvert, permettant aux testicules de se déplacer librement entre le scrotum et l'abdomen (Quesenberry, Carpenter, 2012). Ceux-ci descendent dans le scrotum dès 3-4 semaines de vie, et sont recouverts d'une tunique albuginée épaisse et d'une vaginale fine.

L'épididyme est formé de 3 parties : la tête, attachée sur le pôle crânial du testicule, le corps médialement et la queue au niveau du bord caudal, de laquelle part le canal déférent qui rejoint l'urètre par son aspect dorsal.

Le mâle possède un os pénien. Il possède également 6 types de glandes annexes : les glandes ampullaires, les vésicules séminales, la prostate, les glandes bulbo-urétrales, les glandes coagulantes et les glandes préputiales (figure 31).

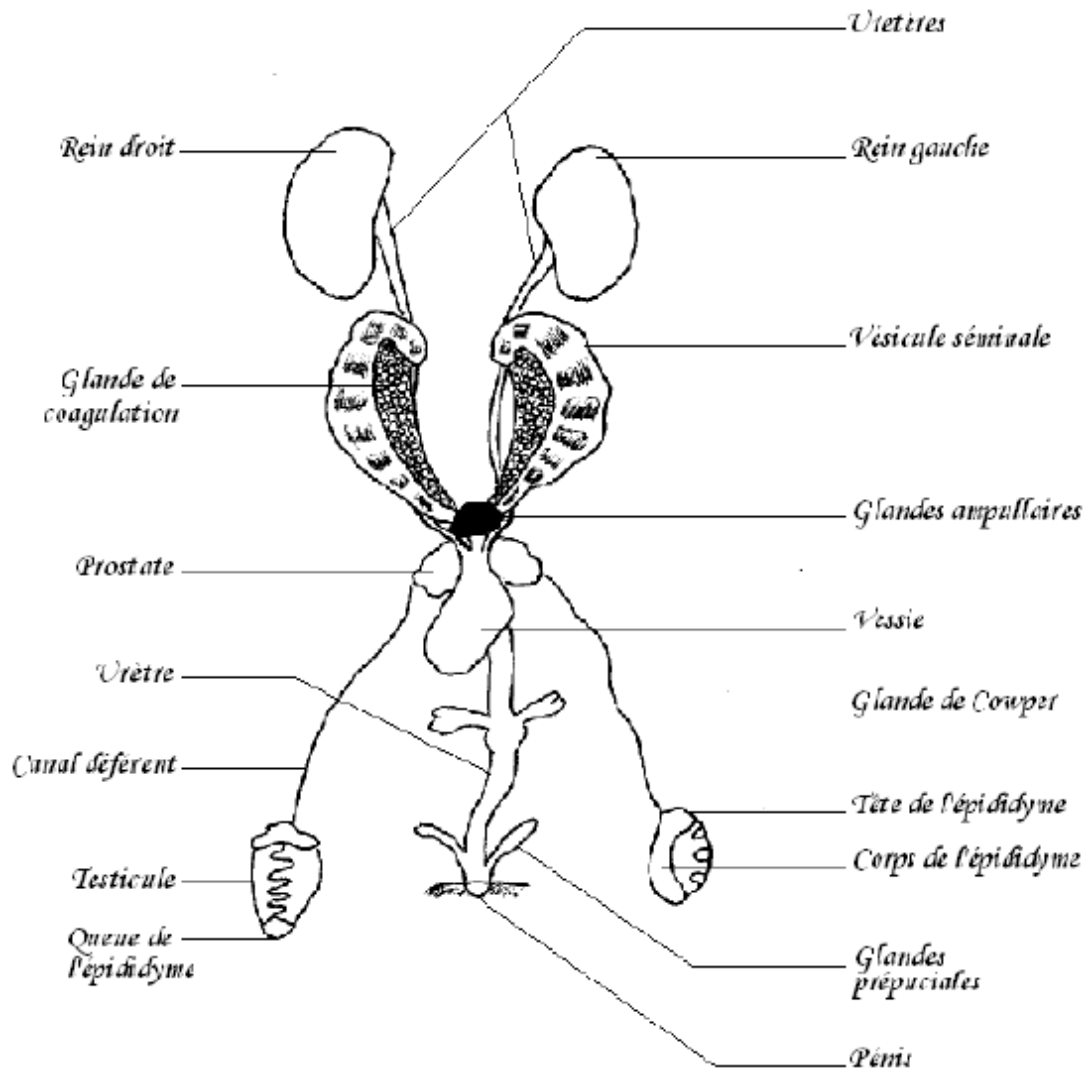


Figure 31. Système urogénital du rat mâle (Hofstetter et al., 2006)

A l'échographie, le testicule apparaît hétérogène de façon physiologique. La description varie selon les auteurs, mais il semblerait qu'il y ait une zone hypoéchogène en périphérie et une zone hyperéchogène au centre (Banzato et al., 2014 ; Courtiade, 2011) (figure 32). Le médiastin n'est pas visible. La tête, le corps et la queue de l'épididyme sont visibles dans le même plan longitudinal, la tête étant crâniale et isoéchogène au testicule.



Figure 32. Aspect échographique du testicule (flèche blanche). D'après Courtiade, 2011.

Les vésicules séminales et les glandes coagulantes sont des structures ovoïdes, symétriques, identifiables dorso-latéralement à la vessie. Cependant, la distinction entre les deux types de glandes n'est pas possible, elles sont en continuité. Elles apparaissent comme une structure plurilobée et hypoéchogène. La prostate, selon l'étude de Courtiade, apparaît caudale à la vessie, isoéchogène au foie en entourée d'un contour hyperéchogène. Les autres glandes annexes sont difficilement visualisables.

Le tissu mammaire est extrêmement étendu chez les deux sexes, s'étendant du cou à la région périnéale, avec 6 paires de mamelles (3 thoraciques, 1 abdominale, 2 inguinales). Seules les femelles présentent des mamelons (Banks et al., 2016).

Certains auteurs ont mis au point des méthodes d'estimation du volume des tumeurs mammaires, très fréquentes chez le rat, sur la base des dimensions mesurées à l'échographie. Le volume de la tumeur est donné par la formule :

$$V = \frac{4}{3} * \pi * \left(\frac{L}{2}\right)^2 * \frac{P}{2}$$

où V est le volume de la tumeur en cm³, L la longueur en cm et P la profondeur en cm (Faustino-Rocha et al., 2013).

D'autres auteurs (Kirberger et al., 2019) ont formalisé les dates d'apparition des différents structures fœtales au cours de la gestation, ainsi que l'évolution de la taille du sac amniotique

(SA) et de la longueur tête-croupe (TC), sur des rats d'environ 2 mois. Une étude plus ancienne avait déjà réalisé quelques mesures sur des rats de 6-8 mois (Ypsilantis et al., 2009).

Jour de gestation	Structure visible	Taille du SA (mm)		Longueur TC (mm)	
		Kirberger et al., 2019	Ypsilantis et al., 2009	Kirberger et al., 2019	Ypsilantis et al., 2009
J7	Sac amniotique	2.9 - 3.55	NE	NE	NE
J8		3.35 (3.16-3.62)	NE	NE	NE
J9		4.18 (4.04-4.39)	4.5 ± 0.5	NE	NE
J10		4.86 (4.72-5.17)	5.1 ± 0.6	NE	NE
J11	Cœur	5.36 (5.13-5.84)	6.1 ± 0.6	1.6	NE
J12		5.68 (4.71-6.29)	6.7 ± 0.2	3.35 (2.9-3.98)	4.3 ± 0.8
J13	Placenta	6.68 (6.03-7.24)	7.1 ± 0.6	4.7 (4.04-5.05)	4.5 ± 0.9
J14	Colonne vertébrale	7.98 (7.48-9.05)	8.2 ± 0.6	7.45 (5.8-8.5)	5.0 ± 0.9
J15		10.2 (9.68-10.88)	9.8 ± 1.4	10.3 (9.5-10.75)	8.2 ± 0.6
J16	Côtes, pieds Poumons et foie de même échogénicité	12.05 (11.38-12.40)	12.1 ± 0.8	12.7 (12.24-13.25)	11.1 ± 1.1
J17		12.83 (12.55-13.28)	NE	14 (13.5-14.55)	NE
J18	Queue en mandibule	14.4 (13.55-15.03)	NE	16.95 (15.8-17.5)	NE
J19	Aorte, veine cave caudale, vessie Poumons hyperéchogènes par rapport au foie	16.48 (15.33-17.35)	NE	20.15 (19.75-22.3)	NE
J20		18.06 (16.23-22.11)	NE	26.25 (23.35-31.2)	NE

Figure 33. Evolution des structures fœtales au cours d'une gestation, selon Kirberger et al., 2019 (médiane et écart interquartile) et Ypsilantis et al., 2009 (moyenne ± SD); SA=sac amniotique. TC=tête-croupe. NE=non évalué.

Les données sont résumées dans la figure 33. A partir du 11^e jour de gestation, la sensibilité pour la détection d'une gestation est de 100% (75% à J9). Il est compliqué de compter le nombre d'embryons du fait de la proximité et de la petite taille des vésicules amniotiques.

5. Squelette

La surface dorsale du crane est relativement plate et est surmontée d'une crête sagittale s'étendant des orbites à l'occiput. Les arcades zygomatiques sont longues et fines et relient le crâne de l'os maxillaire à l'os temporal. Les bulles tympaniques sont ventrales et très caudales.

Les incisives sont longues mais la mâchoire est courte, avec les mandibules plus courtes que les maxillaires, conduisant à un anisognathisme physiologique (Thiriet, Hegelen, 2012).

La colonne vertébrale comporte 7 vertèbres cervicales, 13 thoraciques, 6 lombaires, 4 sacrées, et 27-31 vertèbres coccygiennes. 13 paires de côtes sont associées aux 13 vertèbres thoraciques. Les 10 premières sont rattachées au sternum, les 3 dernières forment l'arc costal (Thiriet, Hegelen, 2012). Les côtes sont entièrement constituées d'os chez le rat (Welsh, 2011). Les 4 vertèbres sacrées sont fusionnées.

La ceinture scapulaire est constituée de deux scapulas triangulaires, possédant une fosse supra-épineuse plus large que la fosse infra-épineuse. Le rat possède également deux clavicules en forme de tige aplatie, qui sont à croissance continue.

Le membre thoracique est formé d'un humérus, avec la tête humérale proximale et les condyles en partie distale. Une tubérosité deltoïdienne est présente, comme chez les carnivores domestiques. Le radius et l'ulna sont inclinés médialement. L'ulna présente un olécrane proéminent en région proximale, associé à un processus anconé, qui vient se loger dans la fosse olécranienne de l'humérus en position d'extension.

Le carpe est formé de 7 os répartis en 2 rangées : la rangée proximale contient l'os intermédiaire radial, l'os ulnaire et l'os accessoire ; la rangée distale est constituée de 4 os carpaux I, II, III, et IV.

Le métacarpe est constitué de 5 os, correspondant au nombre de doigt. Les métacarpes 3 et 4 sont les plus longs. Les rats possèdent cinq doigts sur leur membre thoracique, constitués de trois phalanges sauf pour le doigt 1 qui n'en possède que deux.

La ceinture pelvienne est constituée par l'os coxal, rattachée au membre pelvien par l'articulation coxo-fémorale.

Le fémur possède une tête large, prolongée par un col et un grand trochanter volumineux. Il est terminé par des condyles latéral et médial volumineux. Crânialement au grasset, on trouve une patella ovoïde.

Le tibia est l'os le plus long du membre pelvien et est associée à la fibula caudalement, avec laquelle il fusionne en portion distale.

Le tarse est composé de sept os : deux os proximaux, talus et calcanéus, un os central et quatre os distaux (I, II, III, IV). Le rat possède cinq métatarses et cinq doigts, et est plantigrade.

Ils possèdent également une queue, servant à l'équilibration et la thermorégulation, qui est plus grande que le reste du corps (Quesenberry, Carpenter, 2012).

Les cartilages de croissance ne sont pas toujours résorbés à l'âge adulte (Krinke, 2000).

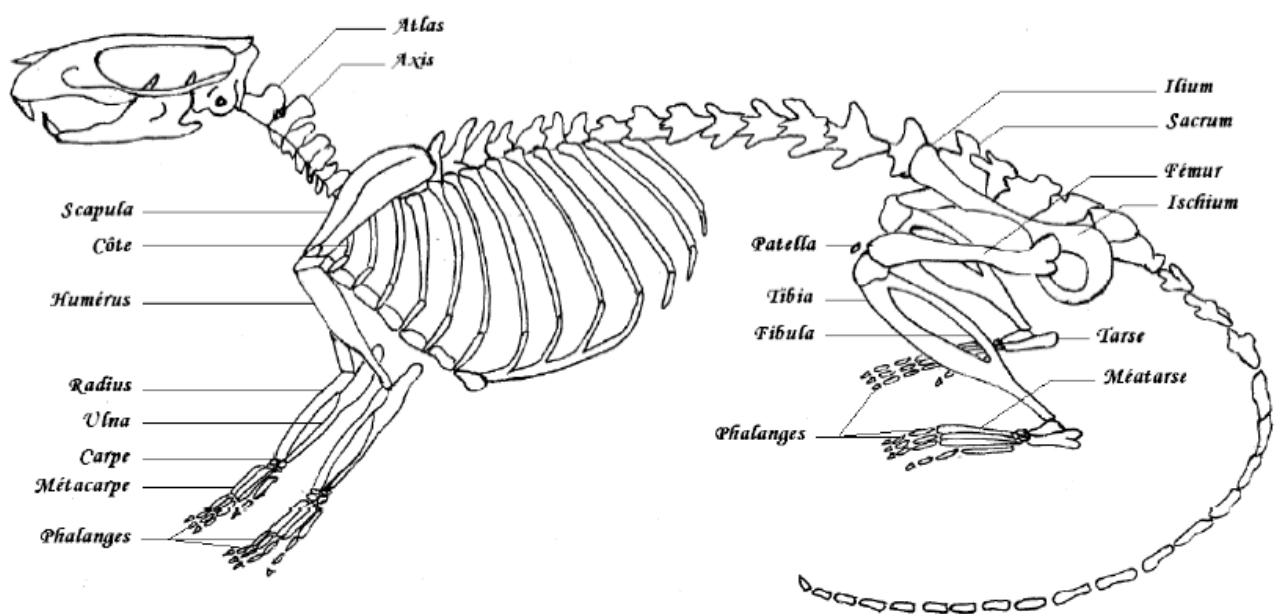


Figure 34. Squelette du rat (Popesko et al., 1992)

6. Système endocrinien

Les glandes surrénales sont situées dans l'espace rétropéritonéal, crânialement aux reins. Les surrénales des femelles semblent plus grosses que celles les males (Krinke, 2000 ; Banzato et al., 2014). L'organe est constitué de deux types de tissus : le cortex en périphérie, et la médulla au centre. Le cortex est divisé en trois parties selon l'arrangement et le rôle des cellules : la zone glomérulée à l'extérieur, la zone fasciculée au milieu et la zone réticulée à l'intérieur.

A l'échographie, les surrénales se retrouvent crânialement et médialement au pôle crânial de chaque rein. La surrénale gauche est parfois masquée par l'estomac. Les deux surrénales sont ovoïdes, d'échogénicité moyenne voire hypoéchogène (figure 35). Occasionnellement, il est possible de distinguer un cortex hypoéchogène et une médulla hyperéchogène.

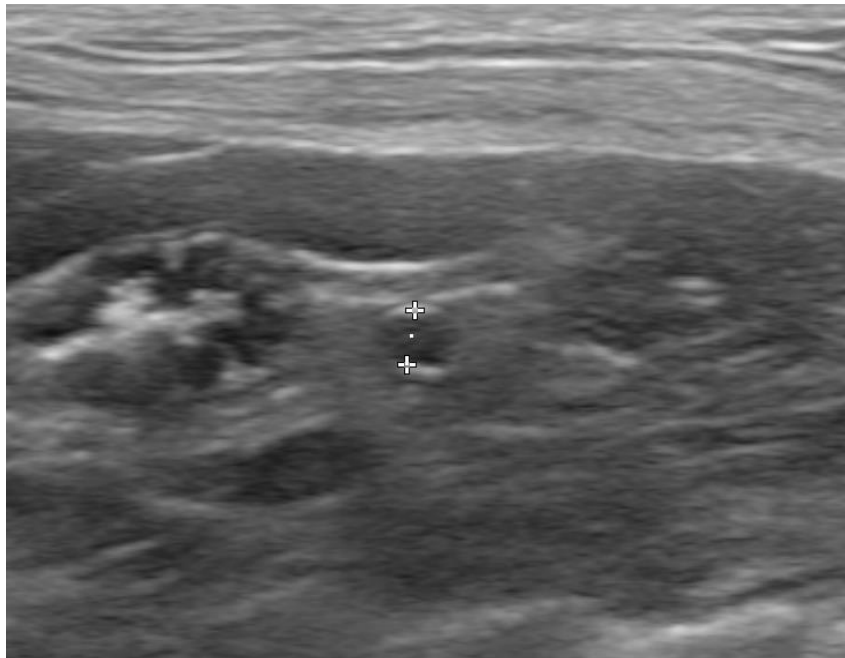


Figure 35. Aspect échographique de la surrénale gauche (délimitée par les pointillés)

Paramètre (mm)	Banzato et al, 2014			Courtiade, 2011	
	Moyenne (±SD)	Mâle (moyenne ± SE)	Femelle (moyenne ± SE)	Mâle (moyenne ± SD)	Femelle (moyenne ± SD)
Longueur surrénale droite	NE	NE	NE	3.1 ± 0.05	3.2 ± 0.5
Largeur surrénale droite	NE	NE	NE	3.4 ± 0.4	3.6 ± 0.4
Epaisseur surrénale droite	3.41 ± 0.41	3.2 ± 0.11	3.6 ± 0.11	2.8 ± 0.3	3.0 ± 0.2
Longueur surrénale gauche	NE	NE	NE	3.4 ± 0.4	3.4 ± 0.4
Largeur surrénale gauche	NE	NE	NE	3.4 ± 0.5	3.5 ± 0.4
Epaisseur surrénale gauche	3.07 ± 0.63	3.0 ± 0.08	3.1 ± 0.09	3.0 ± 0.3	3.2 ± 0.3

Figure 36. Mesures de référence des glandes surrénaliennes. Longueur : coupe longitudinale. Largeur : coupe transversale. SD=standard deviation. SE=standard error. NE : non évalué. D'après (Banzato et al., 2014) et (Courtiade, 2011)

La glande thyroïde repose ventrolatéralement, de chaque côté de la trachée, au niveau des 4^e et 5^e anneaux trachéaux. Elle est constituée de deux lobes reliés par un isthme. Le parenchyme est constitué de follicules de taille variable (Krinke, 2000).

Le rat possède deux parathyroïdes localisées antéro-latéralement à chaque lobe thyroïdien. Il est fréquent d'observer des glandes parathyroïdes accessoires autour. Le volume total des parathyroïdes est deux fois plus élevé chez les femelles que chez les mâles (Krinke, 2000).

7. Organes lymphoïdes

La rate est située dorsalement dans la partie gauche de l'abdomen. Elle est en contact avec le foie, s'étend entre l'estomac et le rein gauche en direction de la paroi abdominale ventrale. Elle est entourée par deux couches d'omentum et recouverte d'une capsule. Le parenchyme est constitué de pulpe rouge et de pulpe blanche.

A l'échographie, la rate présente une structure homogène avec une granulosité fine (figure 38). Elle est physiologiquement hyperéchogène par rapport au foie, mais hypoéchogène par

rapport au cortex rénal (Banzato et al., 2014), mais cette description varie selon les auteurs. Dans l'étude citée, les rats sont sédatisés pour la réalisation de l'échographie, et il est connu que les molécules anesthésiques peuvent modifier la taille, l'aspect et l'échogénicité de la rate chez d'autres espèces, bien que les drogues concernées (O'Brien et al., 2004) n'aient pas été utilisées ici. Aucune donnée n'est disponible à propos du rat à ce sujet. Parfois, la rate n'est pas visualisable si la réplétion gastrique est trop importante (Courtiade, 2011).

Paramètre (mm)	Mâle (moyenne \pm SD)	Femelle (moyenne \pm SD)
Epaisseur rate	5.9 \pm 1.1	4.7 \pm 0.5

Figure 37. Mesures de référence de la rate. SD : standard deviation. D'après (Courtiade, 2011)

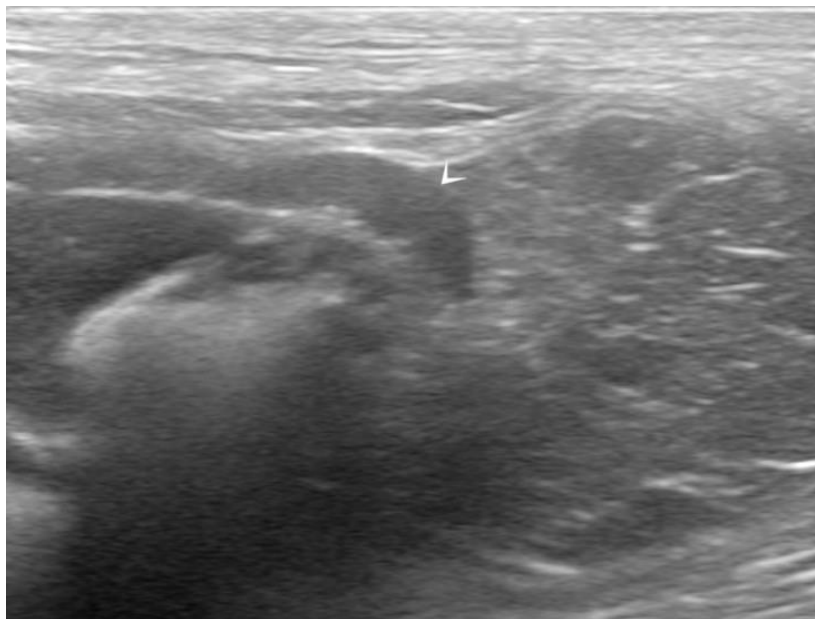


Figure 38. Aspect échographique de la rate (flèche blanche)

Le thymus est constitué de deux lobes. Il est localisé dans le médiastin crânial ventral et s'étend partiellement en région cervicale. Il atteint presque le larynx en crânial et le cœur en caudal (Krinke, 2000). Son parenchyme est constitué de multiples lobules, organisés en cortex-médulla. Le thymus s'atrophie à partir de la puberté, mais la perte de tissu fonctionnel est remplacée par du tissu interlobulaire et adipeux (Sharp, Villano, 2012).

A l'échographie, les nœuds lymphatiques sont ovoïdes, hypoéchogènes. On trouve par exemple le nœud lymphatique hypogastrique caudalement à la bifurcation aortique, entre les

deux artères iliaques internes (Banzato et al., 2014). Ses mesures de référence sont présentées dans la figure 39.

Paramètre (mm)	Moyenne (\pm SD)	Mâle (IC95%)	Femelle (IC95%)
Longueur	4.19 \pm 1.26	3.71 – 4.34	3.73 – 4.35
Largeur	1.53 \pm 0.75	1.19 – 1.47	1.33 – 1.63

Figure 39 : Mesures de référence du nœud lymphatique hypogastrique. SD=standard deviation. IC95%: Intervalle de confiance à 95%. D'après (Banzato et al., 2014).

8. Autres

Les rats possèdent une glande derrière chaque œil, la glande de Harder, qui sécrète un liquide riche en lipides en en porphyrine aidant à la lubrification de l'œil et jouant un rôle dans l'émission de phéromones. Cette sécrétion, de couleur rouge à cause de la porphyrine, est souvent confondue avec du sang (Quesenberry, Carpenter, 2012).

Les rats possèdent de la graisse brune, distribuée en zone interscapulaire et autour du cou, qui joue un rôle dans la thermorégulation pendant une exposition au froid (Banks et al., 2016). Elle ne doit pas être confondue avec une glande salivaire ou un nœud lymphatique.

Ils ne possèdent que très peu de glandes sudorales et ne peuvent pas haleter, les rendant très sensibles à la chaleur. L'essentiel de la thermorégulation se fait à travers les oreilles et la queue, en jouant sur la vasodilatation des vaisseaux (Banks et al., 2016).

D. Radioanatomie (Welsh, 2011 ; Silverman et al., 2005)

1. Généralités

La sédation ou l'anesthésie générale est souvent recommandée pour obtenir des clichés de qualité suffisante tout en maintenant un niveau de radioprotection correct, puisque les rats sont généralement peu coopératifs et la contention difficile avec des gants de protection. Le positionnement des patients est sensiblement le même que pour les carnivores domestiques. On préfère parfois la vue dorsoventrale que la ventrodorsale car il est plus facile

de maintenir l'animal en position symétrique. Il est possible d'utiliser du ruban adhésif médical pour maintenir les membres lorsque l'animal est anesthésié (Keeble, Meredith, 2009).

Les constantes radiographiques doivent être adaptées à la taille du patient. Il est conseillé d'utiliser un temps de pose très court pour éviter au mieux les effets de la respiration très rapide des rongeurs sur la netteté, et des kVs bas du fait du faible contraste naturel de cette espèce.

Les signes radiographiques utilisés pour le diagnostic différentiel sont globalement les mêmes que pour les carnivores domestiques, mais, par exemple, du fait de la petite taille des patients, il est souvent difficile de distinguer les différents patterns d'opacification pulmonaire comme chez le chien ou le chat (alvéolaire, interstitiel, bronchique, vasculaire), surtout quand les lésions sont de petite taille. On parlera donc plus volontiers « d'opacité augmentée » pour toutes ces anomalies, bien qu'il soit parfois possible de les distinguer. Le cœur peut présenter des variations de forme, de position et de graisse rendant difficile l'utilisation de mesures cardiaques, d'autant plus que son aspect crânial est souvent masqué par la présence du thymus, persistant chez les adultes.

L'interprétation de l'abdomen souffre aussi de la petite taille de patients. Le contraste est généralement assez faible, sauf chez les animaux en surpoids. Le tractus digestif est très développé et se superpose souvent aux autres organes.

Les radiographies osseuses s'interprètent de la même manière que les carnivores domestiques. Il est courant d'observer de la spondylose vertébrale chez les patients âgés.

2. Thorax

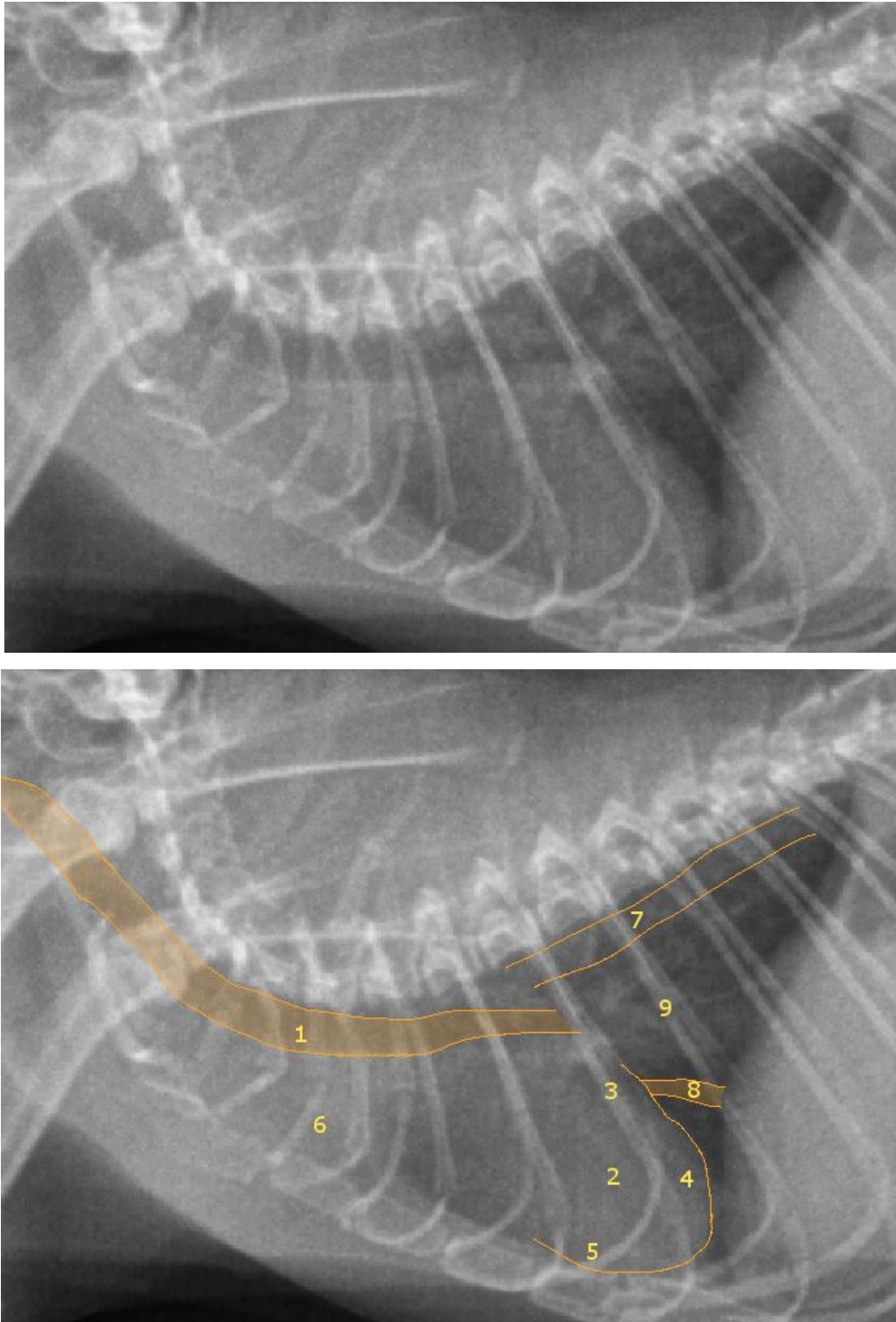


Figure 40. Radioanatomie du thorax, vue de profil

1. Trachée 2. Cœur 3. Oreillette gauche 4. Ventricule gauche 5. Ventricule droit
6. Médiastin crânial 7. Aorte 8. Veine cave caudale 9. Aire pulmonaire et vaisseaux

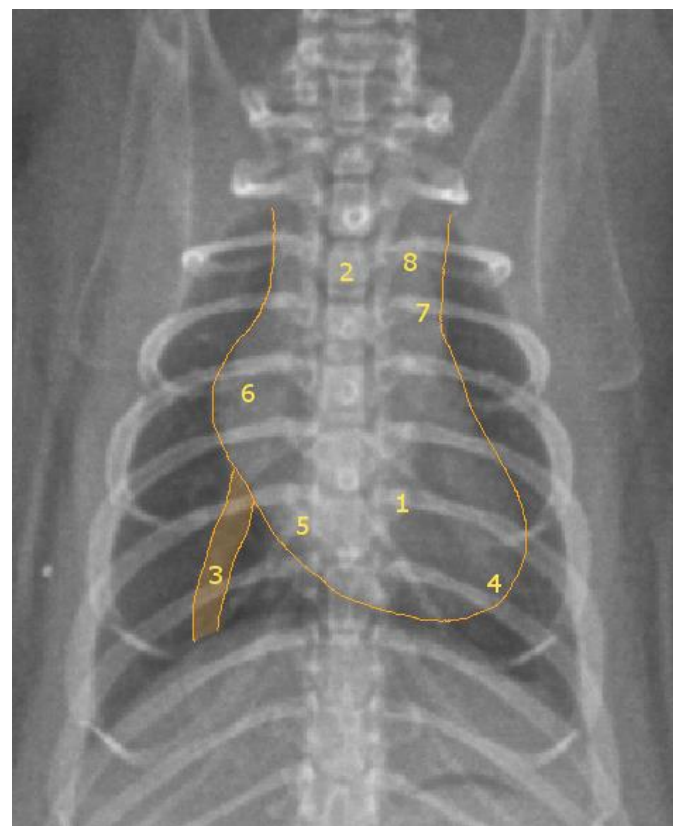


Figure 41. Radioanatomie du thorax, vue de face.

1. Cœur 2. Médiastin crânial 3. Veine cave caudale 4. Ventricule gauche 5. Ventricule droit
6. Oreillette droite 7. Tronc pulmonaire 8. Aorte

3. Abdomen

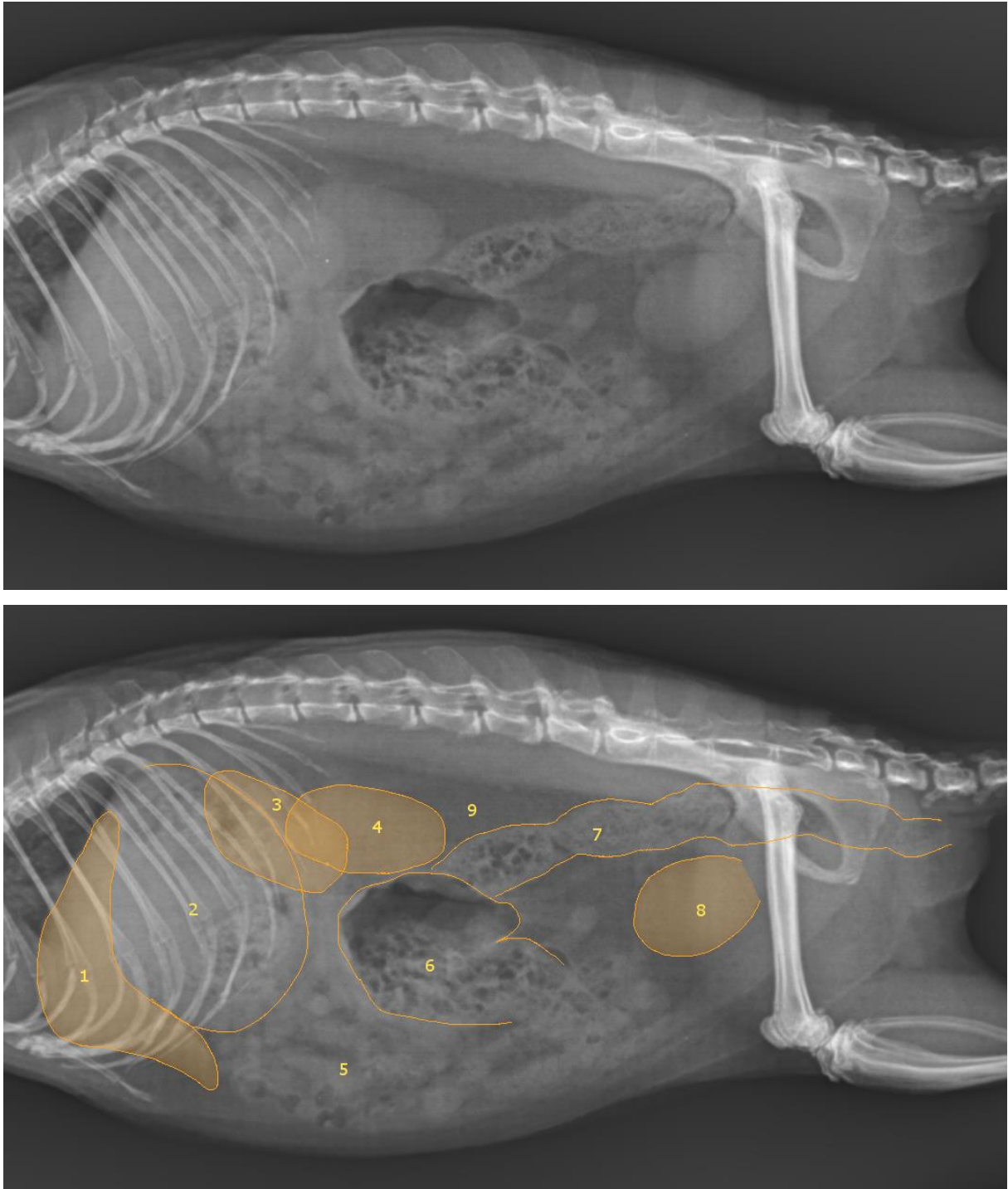


Figure 42. Radioanatomie de l'abdomen, vue de profil.

1. Foie 2. Estomac 3. Rein droit 4. Rein gauche 5. Anses intestinales 6. Caecum
7. Colon descendant 8. Vessie 9. Graisse sous-lombaire

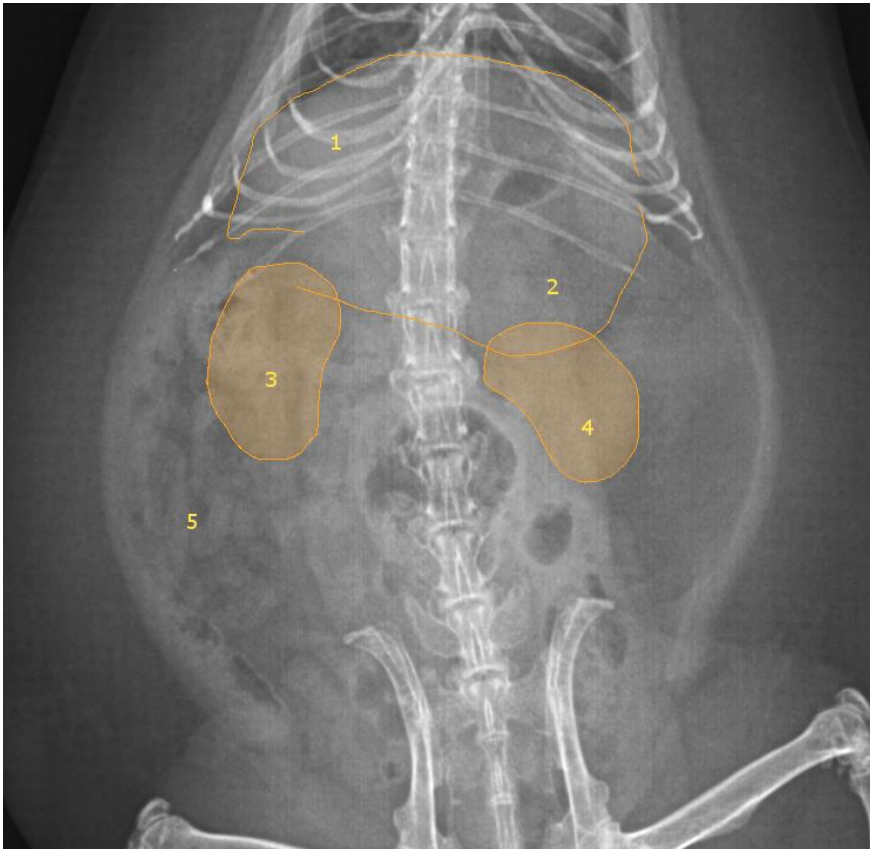


Figure 43. Radioanatomie de l'abdomen, vue de face, exemple 1.

1. Foie 2. Estomac 3. Rein droit 4. Rein gauche 5. Anses intestinales

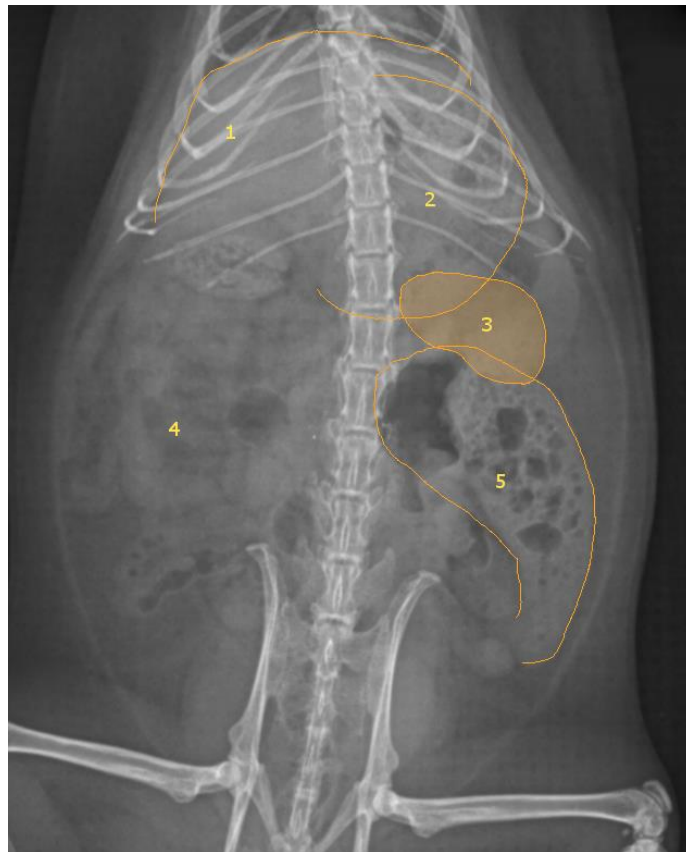


Figure 44. Radioanatomie de l'abdomen, vue de face, exemple 2.

1. Foie 2. Estomac 3. Rein gauche 4. Anses intestinales 5. Caecum

4. Membre thoracique



Figure 45. Radioanatomie du membre thoracique gauche, vue de profil.

1. Scapula 2. Clavicules 3. Humérus 4. Radius 5. Ulna 6. Carpe
7. Doigt 1 8. Doigt 2 9. Doigt 3 10. Doigt 4 11. Doigt 5

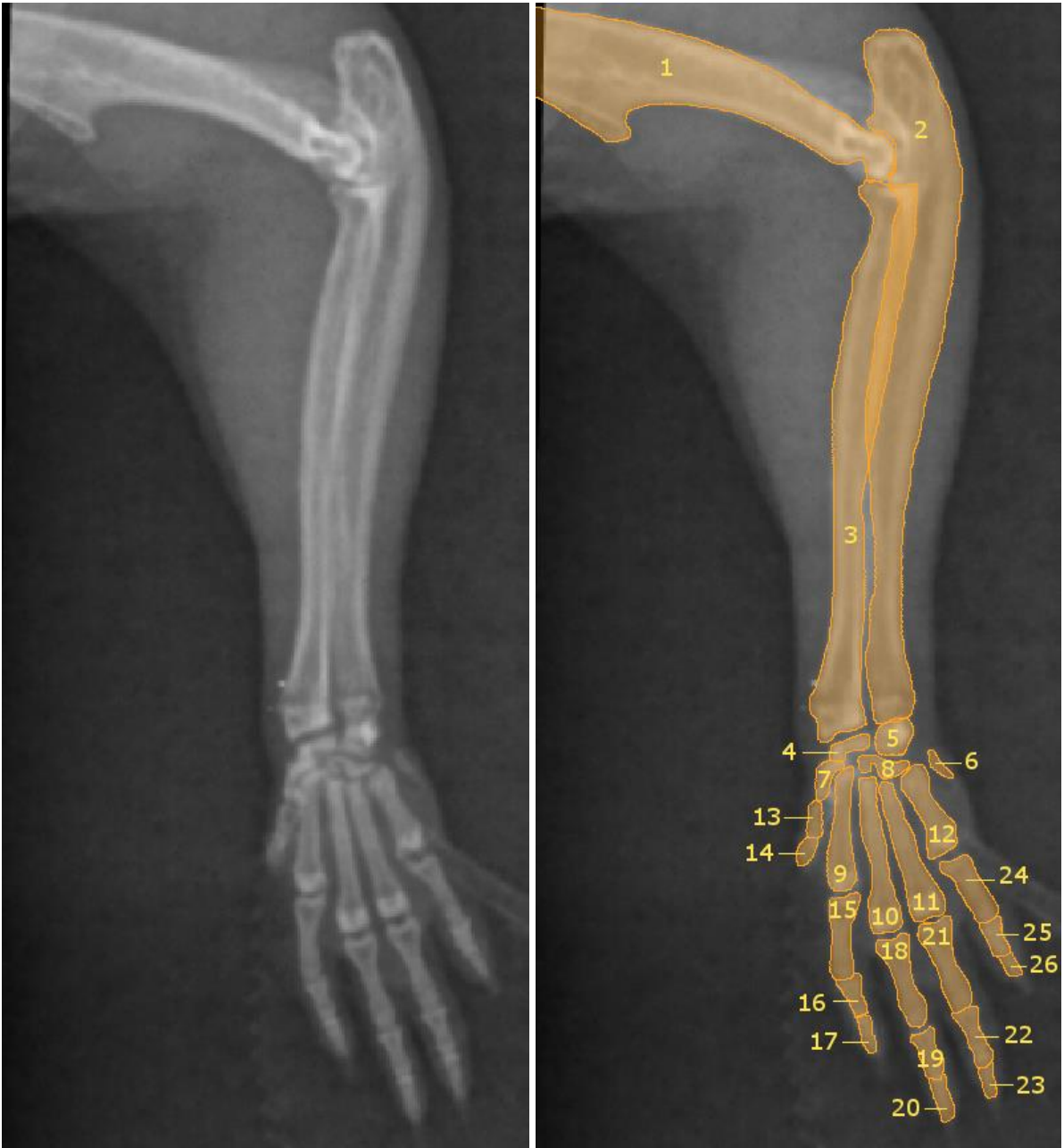


Figure 46. Radioanatomie du membre thoracique droit, vue de face de l'extrémité distale.

- | | | | |
|--|--|--|--|
| | 1. Humérus | 2. Ulna | 3. Radius |
| 4. Intermédioradial | 5. Ulnaire | 6. Accessoire | 7. Métacarpe I |
| 8. Os carpeaux | 9. Métacarpe II | 10. Métacarpe III | 11. Métacarpe IV |
| 12. Métacarpe V | 13 et 14. Phalanges 1 et 2 du doigt 1 | 15, 16 et 17. Phalanges 1, 2 et 3 du doigt 2 | 18, 19 et 20. Phalanges 1, 2 et 3 du doigt 3 |
| 21, 22 et 23. Phalanges 1, 2 et 3 du doigt 4 | 24, 25 et 26. Phalanges 1, 2 et 3 du doigt 5 | | |

5. Membre pelvien

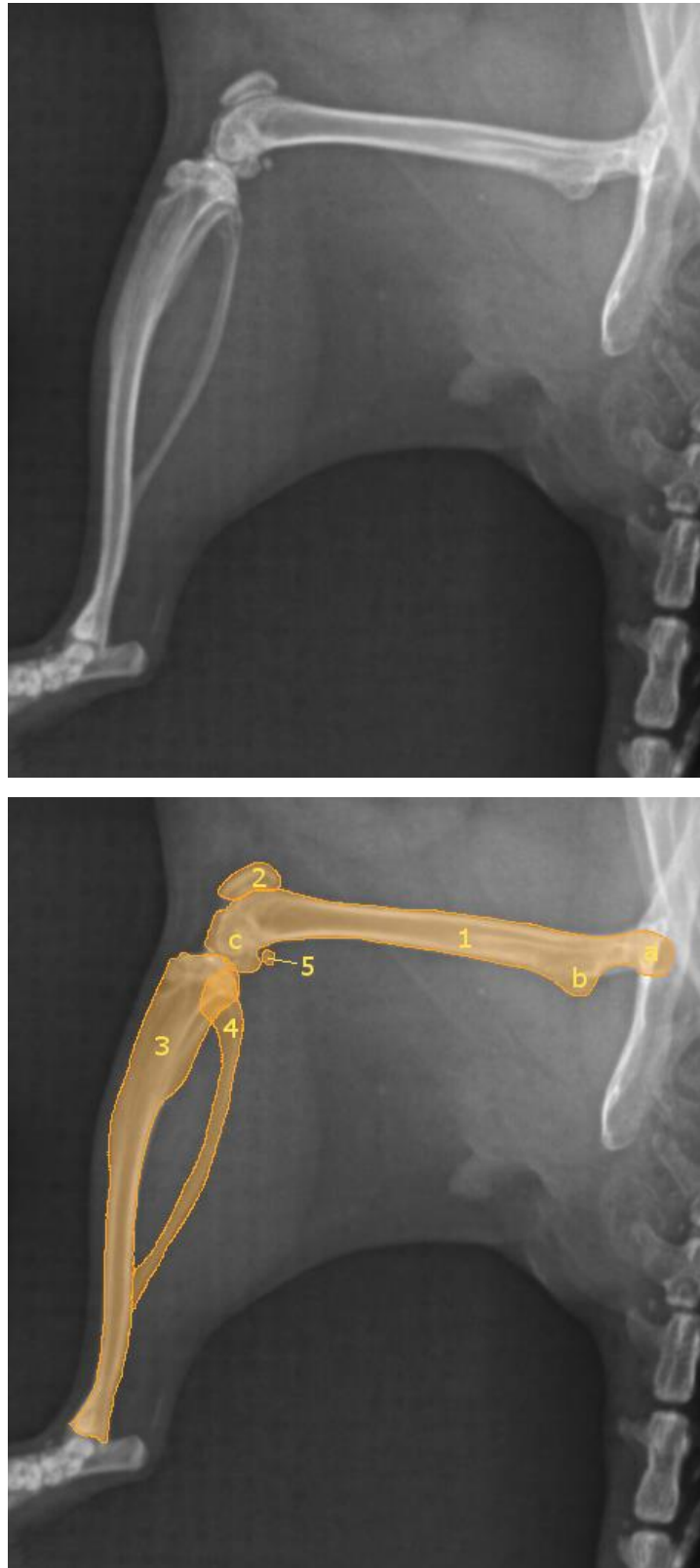


Figure 47. Radioanatomie du membre pelvien droit, vue de profil

- | | | | | |
|------------------|---------------------|----------------------|-----------|----------------------------------|
| 1. Fémur | 2. Patelle | 3. Tibia | 4. Fibula | 5. Os sésamoïde du gastrocnémien |
| a. Tête fémorale | b. Petit trochanter | c. Condyles fémoraux | | |

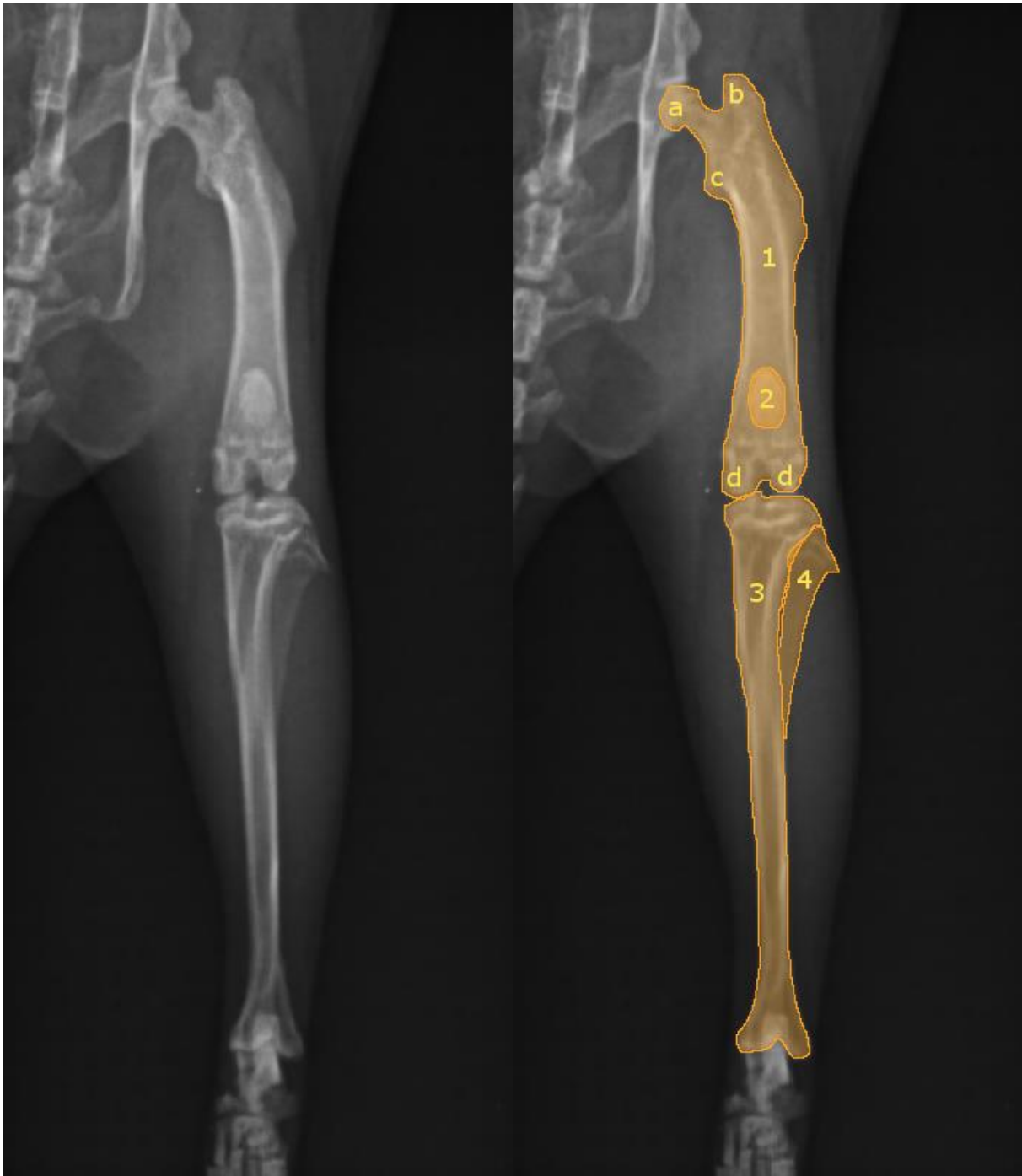


Figure 48. Radioanatomie du membre pelvien gauche, vue de face

1. *Fémur* 2. *Patelle* 3. *Tibia* 4. *Fibula*

a. Tête fémorale b. Grand trochanter c. Petit trochanter d. Condyles fémoraux.

6. Crâne

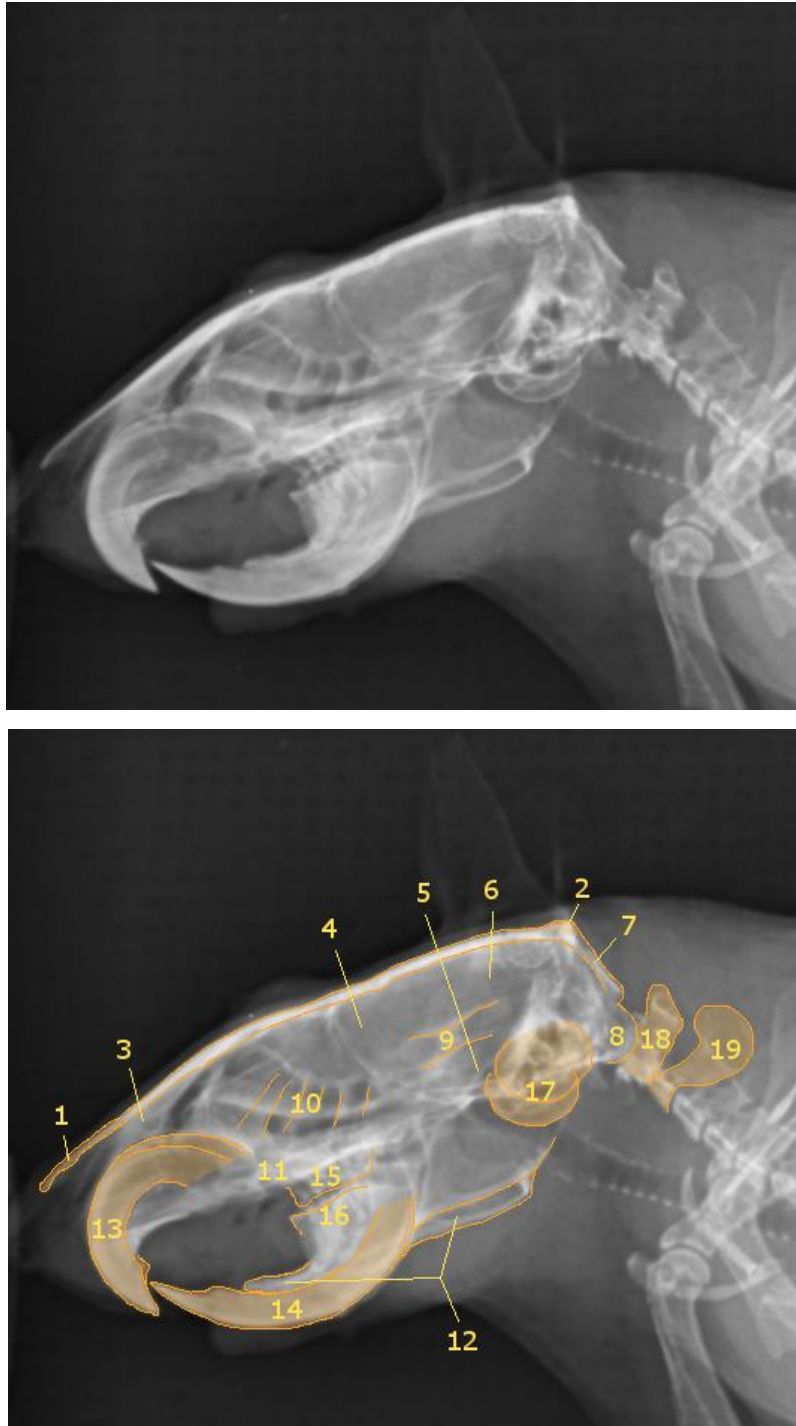


Figure 49. Radioanatomie du crâne, vue de profil

1. Os nasal 2. Protubérance occipitale 3. Os incisif 4. Os frontal 5. Os temporal
6. Os pariétal 7. Os occipital 8. Condyle occipital 9. Processus zygomatique de l'os temporal
10. Volutes de l'ethmoïde 11. Os maxillaire 12. Os mandibulaire 13. Incisives maxillaires
14. Incisives mandibulaires 15. Molaires maxillaires 16. Molaires mandibulaires
17. Bulles tympaniques 18. Atlas 19. Axis

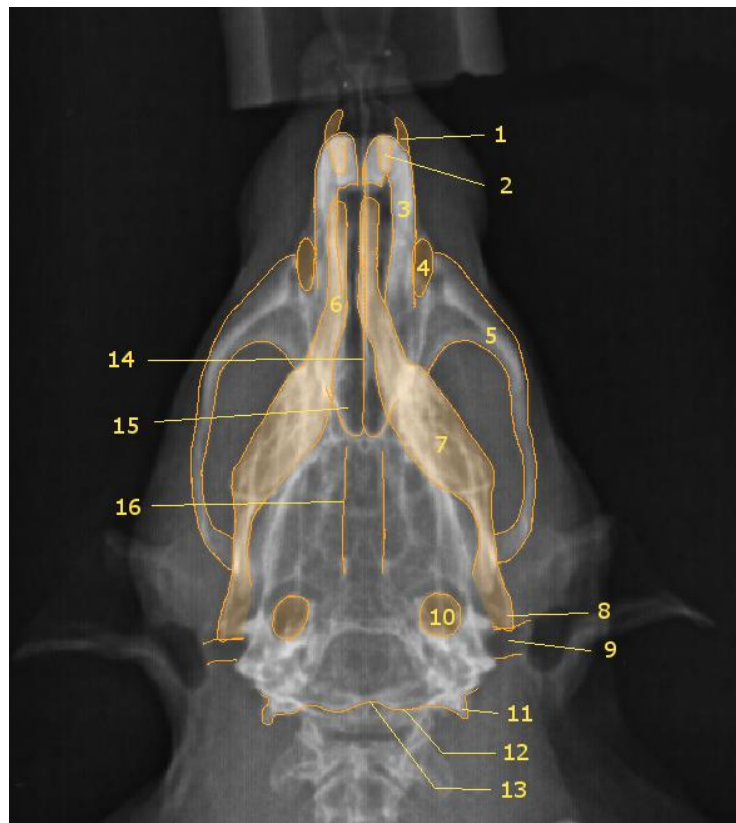


Figure 50. Radioanatomie du crane, vue de face

- | | | | | |
|--------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------|
| 1. Os nasal | 2. Incisive maxillaire | 3. Maxillaire | 4. Hiatus infraorbitaire | 5. Os zygomatique |
| 6. Incisive mandibulaire | 7. Mandibule | 8. Angle de la mandibule | 9. Conduit auditif externe | |
| 10. Bulle tympanique | 11. Processus paracondylaire | 12. Condyle occipital | 13. Foramen magnum | |
| | 14. Os vomer | 15. Os palatin | 16. Os ptérygoïde | |

III. Atlas d'images radiographiques et échographiques pathologiques

A. Matériel et méthode

117 cas cliniques de rats ayant été présentés entre 2007 et 2020 et ayant reçu un examen d'imagerie ont été analysés. Ces 117 cas ont conduit à 138 études d'imagerie, dont 115 radiographies et 23 échographies. 61 études concernent le thorax, 36 l'abdomen, 18 le squelette, 9 le crâne, et 14 sont des études combinant plusieurs régions.

Les radiographies ont été réalisées par les étudiants de l'école nationale vétérinaire de Toulouse avec l'aide d'une manipulatrice en radiologie. L'appareil de radiographie est constitué d'un générateur Sedecal® et d'un système capteur plan Philips®. Les échographies sont réalisées par les docteurs vétérinaires du service d'imagerie de l'école, avec un échographe EPIQ7 de marque Philips®, et, la plupart du temps, d'une sonde linéaire de 8-12MHz.

Les examens sont réalisés sur animaux vigiles, sédatés ou anesthésiés selon leur niveau de coopération, et avec un protocole adapté à l'état de l'animal.

L'analyse des images radiographiques a été faite par les assistants hospitaliers du service des nouveaux animaux de compagnie et de la faune sauvage de l'école. Les images échographiques sont interprétées en direct par le service d'imagerie lors de l'examen. Les annotations sur les images sont réalisées à l'aide du logiciel gratuit GIMP®.

Parmi les 138 études réalisées, 48 ne présentent aucune anomalie discernable ou ne sont pas de qualité suffisante pour être interprétées. 90 présentent des anomalies d'intérêt diagnostique.

L'ensemble des images radiographiques et échographiques sont disponibles sur le site :

www.anatimagerie-envt.fr

Ce site a été créé par l'unité pédagogique d'anatomie et d'imagerie de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse. Il a pour but de consister un atlas d'images des animaux de compagnie conventionnels (chien, chat) mais aussi des nouveaux animaux de compagnie. Quelques exemples sont présentés ci-dessous.

B. Cas n°1

Grishnaak est un rat mâle entier de 2 ans présenté au service des nouveaux animaux de compagnie pour un problème respiratoire évoluant depuis quelques jours.

Depuis 4 jours, Grishnaak s'est mis à tousser légèrement, avec production d'un jetage nasal séreux, et présente une dyspnée ainsi qu'un abattement. La prise de nourriture et de boisson est normale.

Il vit seul dans une cage d'environ 1 mètre de long avec une litière de copeaux de bois, mais vit la plupart du temps en liberté chez son propriétaire. La ration est composée d'un mélange de graines, de salade et d'un moins une friandise par jour.

A l'examen clinique, l'animal est en moyen état général, son score corporel est évalué à 8/9.

A l'auscultation respiratoire, il présente une dyspnée avec discordance, ainsi qu'une arythmie se traduisant sous la forme de pauses puis de reprises avec allongement du temps inspiratoire.

A l'auscultation cardiaque, on remarque un bruit de galop. La palpation abdominale est souple et non douloureuse.

Il est réalisé une radiographie de thorax :

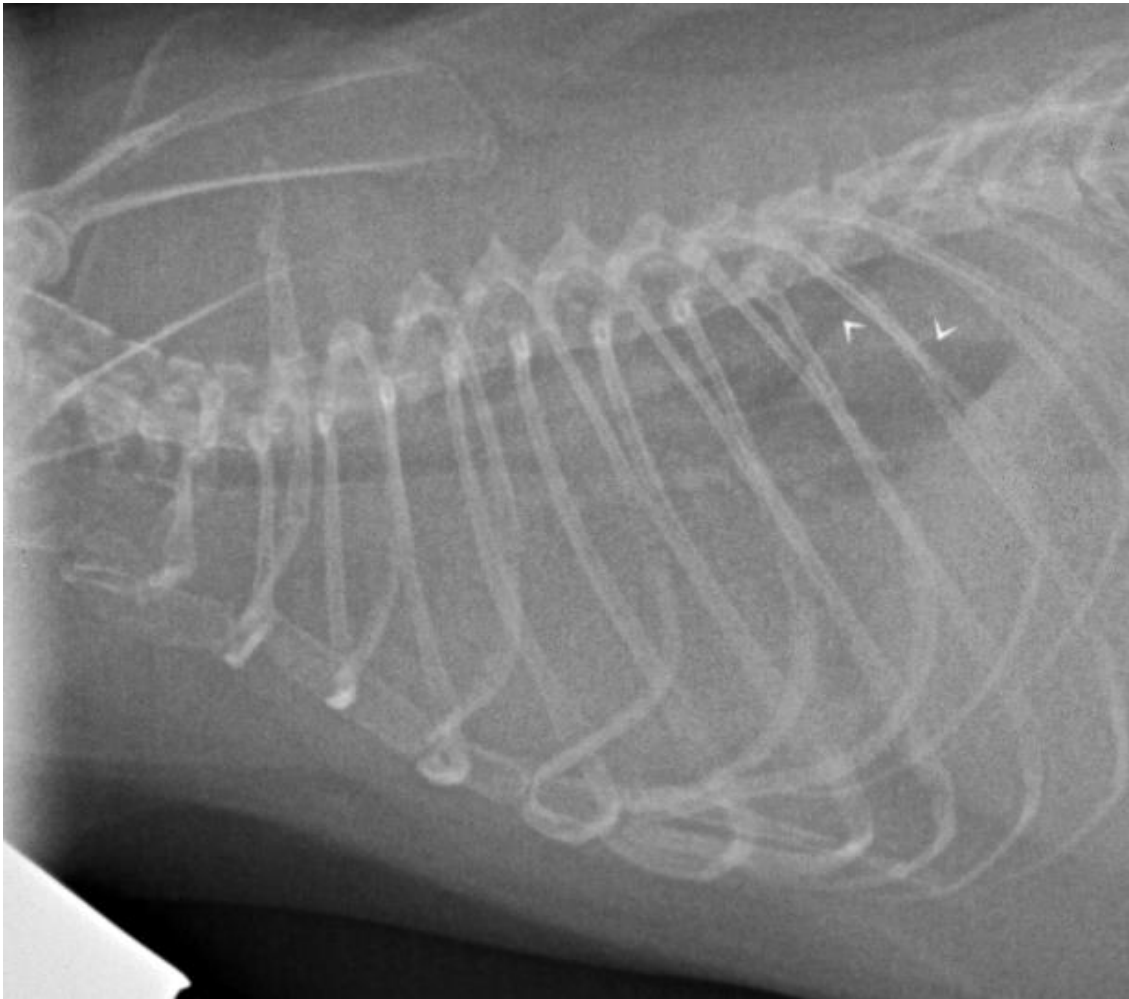


Figure 51. Cas clinique n°1 : Epanchement pleural

On remarque sur cette radiographie une augmentation généralisée de l'opacité ainsi qu'une perte de contraste majeure dans le thorax. Le cœur et l'aspect crânial du diaphragme sont masqué. En région caudo-dorsale, on observe que les poumons sont largement décollés des vertèbres et semblent de taille réduite (figure 51, flèches blanches).

La vue de face n'apporte pas plus d'éléments, elle n'est pas présentée ici.

L'ensemble de ces anomalies sont compatibles avec un épanchement pleural majeur en 1^e hypothèse, qui sera confirmé à l'échographie ainsi qu'une insuffisance cardiaque gauche à l'origine de l'épanchement.

Grishnaak sera stabilisé médicalement pendant quelques semaines.

C. Cas n°2

Effy est un rat femelle entier de 1.5 ans présenté en consultation car elle est tombée de sa cage il y a une heure et depuis, elle ne pose plus la patte avant droite.

A l'examen clinique, elle présente une tuméfaction au niveau de l'avant-bras et une instabilité du radius/ulna à la manipulation. L'état général est conservé.

Des radiographies de son membre sont réalisées :

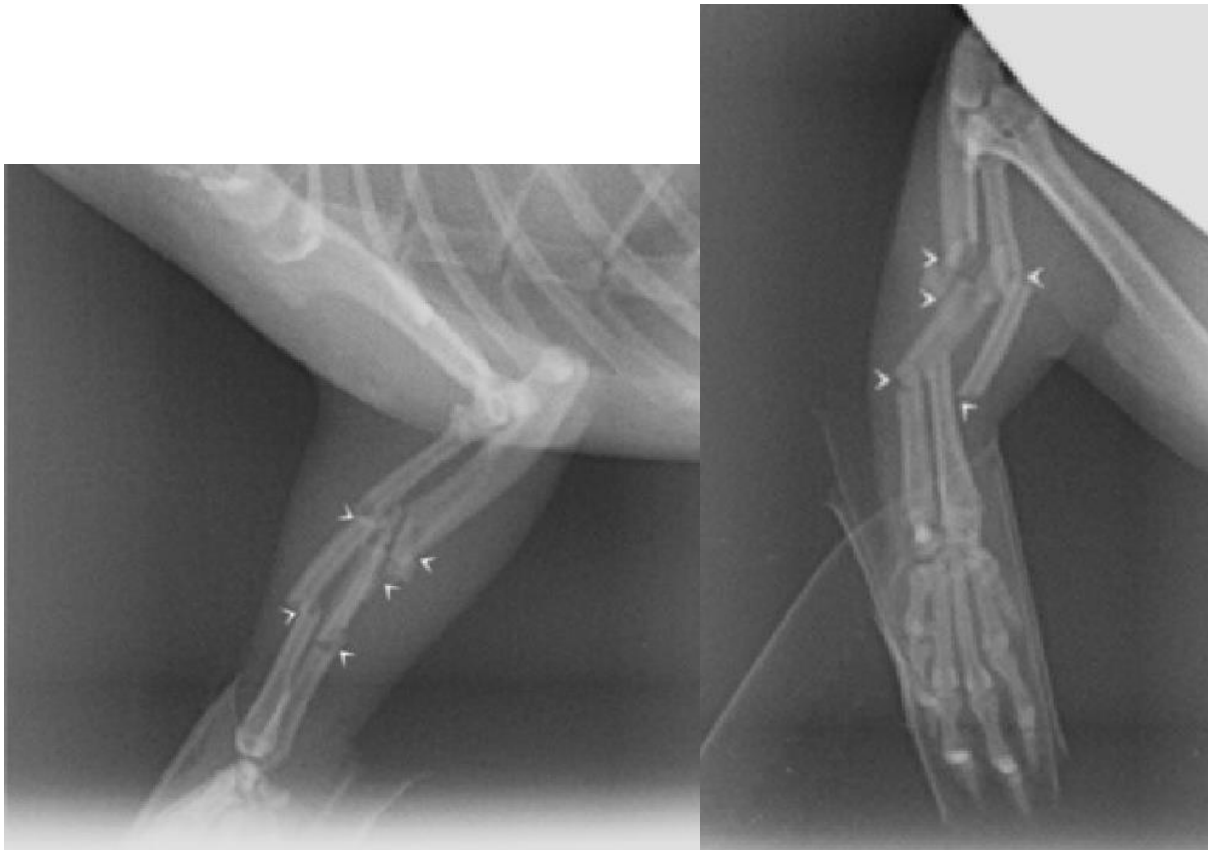


Figure 52. Cas clinique n°2 : Fractures multiples radius/ulna

Effy présente une fracture multiple de l'ulna, médiodiaphysaire, comminutive, oblique, déplacée latérocaudalement et proximale ; une fracture multiple du radius, médiodiaphysaire, oblique, déplacée latérocranialement et proximale ; ainsi qu'une tuméfaction des tissus mous en regard des fractures.

Les fractures seront stabilisées avec un pansement de Robert-Jones.

D. Cas n°3

Echo est un rat femelle entière de 1.5 ans présentée en consultation pour masse abdominale présente depuis 3 jours (remarquée par sa propriétaire), apparue en quelques heures et ayant légèrement diminué de taille depuis. Echo reste en bon état général, l'appétit est bon et l'émission des selles et des urines est normale.

Echo vit dans une cage haute d'environ 40x70cm sur une litière de chanvre. Elle est nourrie avec des extrudés complets pour rat ainsi que quelques à-côtés.

A l'examen clinique, l'animal est vif et en bon état général. L'auscultation ne révèle aucune anomalie. La palpation abdominale montre une masse médiane et caudale, de consistance tissulaire. Le reste de l'examen clinique est sans anomalie.

Une échographie abdominale est réalisée. Les séreuses péritonéales à gauche sont hyperéchogènes. Les nœuds lymphatiques mésentériques sont homogènes, de taille modérément augmentée et hypoéchogènes (figure 53). Aucune masse n'est observée à ce moment à l'échographie abdominale, en particulier dans l'abdomen caudal.

L'examen des autres structures abdominales est dans les limites de la normale.

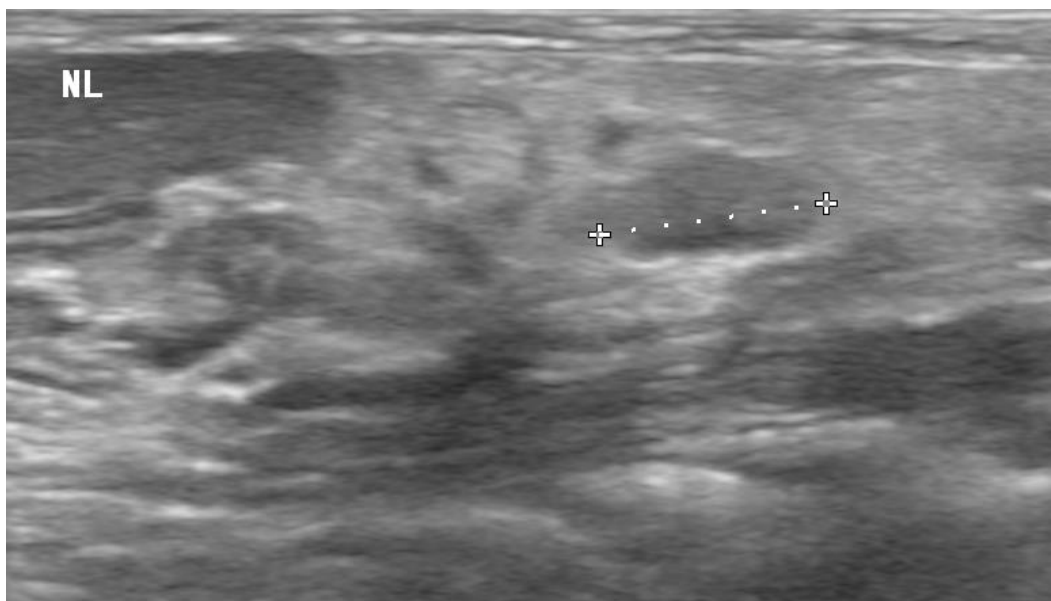


Figure 53. Cas clinique n°3 : Adénomégalie mésentérique

Un contrôle échographique est proposé quelques jours plus tard pour apprécier l'évolution des anomalies, ainsi que pour réaliser des cytoponctions à l'aiguille fine des nœuds lymphatiques hypertrophiés et de la rate.

Lors de l'échographie, on note une dilatation excessive d'une portion d'anse jéjunale par un contenu mixte alimentaire, ainsi qu'une absence de motilité intestinale. La structure en couche n'est plus clairement identifiable sur cette même portion et une solution de continuité entre le bol alimentaire et la cavité abdominale est suspectée (figure 54). On met en évidence une péritonite majeure dans l'abdomen associée à la présence d'un épanchement modéré et d'une lymphadénomégalie jéjuno-mésentérique modérée. La rate est de taille légèrement augmentée avec un parenchyme homogène à tendance hypoéchogène.

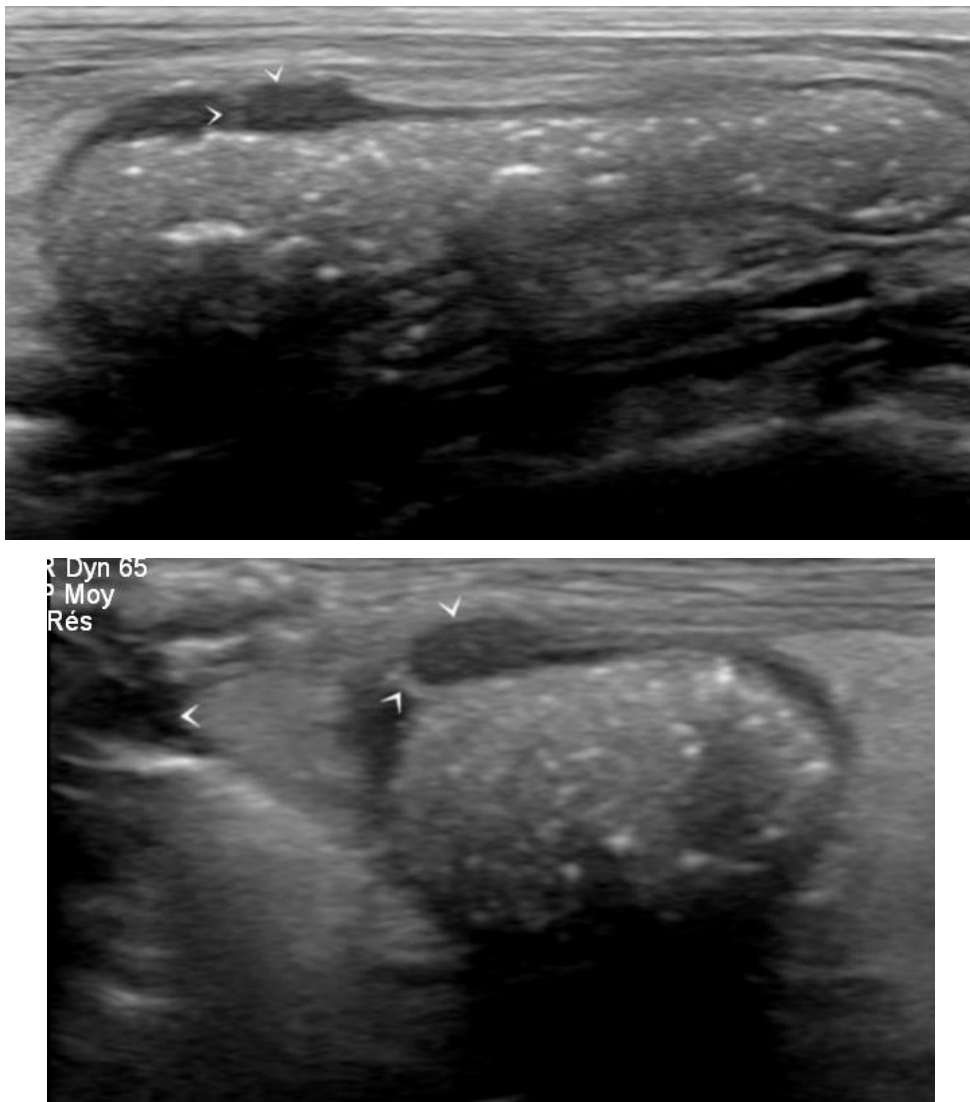


Figure 54. Cas clinique n°3 : Dilatation focale de la paroi intestinale avec suspicion de solution de continuité avec l'abdomen, ascite (flèches blanches)

Ces anomalies sont compatibles avec un processus infiltratif de la paroi jéjunale en première hypothèse. Une rupture digestive n'est pas complètement exclue. La cytologie des nœuds lymphatiques est revenue en faveur hyperplasie plasmocytaire compatible avec une stimulation antigénique chronique (tumeur, inflammation...). Celle de l'épanchement est revenue en faveur d'un exsudat neutrophilique septique.

Echo est placée sous traitement palliatif. Quelques jours plus tard, devant l'aggravation de son état général, il est décidé de l'euthanasier.

Conclusion

Le rat, souffrant auparavant d'une image de nuisible, s'est imposé dans les foyers comme un animal de compagnie intelligent, attachant, et dont il est facile de s'occuper. Cependant, comme tout être vivant, il arrive que ces animaux tombent malades et nécessitent des soins en accord avec la maladie.

L'intérêt des examens radiographiques et échographiques en médecine vétérinaire n'est plus à prouver. La sensibilité et les avantages de ces techniques en font des incontournables pour le diagnostic, même pour les nouveaux animaux de compagnie comme le rat domestique. De plus, les animaux de compagnie atypiques sont en plein essor, les propriétaires y sont plus attachés et sont plus enclins à réaliser des examens complémentaires parfois coûteux.

L'interprétation des images nécessite tout de même des notions à propos de l'anatomie particulière de cette espèce et du fonctionnement de ces appareils. Le praticant trouvera dans le travail présenté ci-dessus des images de référence qui, nous l'espérons, l'aideront à interpréter ses propres images. Le site internet, étant par nature facilement modifiable, sera probablement amené à évoluer, en s'enrichissant au fur et à mesure de nouvelles données et images concernant le rat domestiques, et d'autres espèces.

AGREMENT SCIENTIFIQUE

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

Je soussigné(e), Fabrice CONCHOU, Enseignant-chercheur, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, directeur de thèse, certifie avoir examiné la thèse de Sébastien ROCHE intitulée « **Mise en place d'un atlas d'images radiographiques et échographiques pathologiques du rat domestique** » et que cette dernière peut être imprimée en vue de sa soutenance.

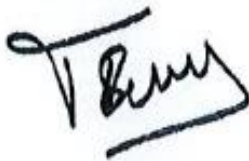
Fait à Toulouse, le 16/07/2020
Enseignant-chercheur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Docteur Fabrice CONCHOU



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



Vu :
La Présidente du jury
Professeure Isabelle BERRY



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



Faculté de Médecine Ranguell
Biophysique Médicale - CHU Ranguell
1, avenue Jean Poulhès - TSA 50032
31059 TOULOUSE Cedex

M. Sébastien ROCHE
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 : 16/07/2020
n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.

Bibliographie

BANKS, Ron E., SHARP, Julie M., DOSS, Sonia D. et VANDERFORD, Deborah A., 2016. Rats. In : *Exotic Small Mammals Care and Husbandry* [en ligne]. Ames, Iowa, USA : John Wiley & Sons, Inc. p. 81-92. [Consulté le 10 avril 2020]. ISBN 978-1-119-26540-5. Disponible à l'adresse : <http://doi.wiley.com/10.1002/9781119265405.ch7>.

BANZATO, Tommaso, BELLINI, Luca, CONTIERO, Barbara, MARTIN, Andrea, BALIKÇI, Sema et ZOTTI, Alessandro, 2014. Abdominal anatomic features and reference values determined by use of ultrasonography in healthy common rats (*Rattus norvegicus*). In : *American Journal of Veterinary Research*. janvier 2014. Vol. 75, n° 1, p. 67-76. DOI 10.2460/ajvr.75.1.67.

BERTRAM, Christof A., KLOPFLEISCH, Robert, ERICKSON, Nancy A. et MÜLLER, Kerstin, 2019. Uterus duplex bicollis, Vagina simplex in laboratory Guinea pigs (*Cavia porcellus*), rats (*Rattus norvegicus* forma domestica) and mice (*Mus musculus* forma domestica). In : *Anatomia, Histologia, Embryologia*. 2019. Vol. 48, n° 4, p. 388-393. DOI 10.1111/ahe.12444.

BRÁS, Cristina, ROQUE, Heliodoro et SOUZA, Ivone, 2007. Echocardiographic Evaluation in Experimental Pathology. In : *Exp Pathol Health Sci*. 1 janvier 2007. Vol. 1.

BUSHBERG, Jerrold T. (éd.), 2012. *The essential physics of medical imaging*. 3rd ed. Philadelphia : Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins. ISBN 978-0-7817-8057-5.

CENTRAVET, 2010. *Radiographie numérique*. S.l. Les dossiers techniques.

COURTIADÉ, Aurélie, 2011. *Echographie abdominale chez le rat: images normales et mesures de référence sur une population de rats Fischer*. Thèse d'exercice. France : École nationale vétérinaire d'Alfort.

FACCO, 2018. Les chiffres pour tout savoir sur le marché du petfood. In : *Facco* [en ligne]. 2018. [Consulté le 22 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.facco.fr/les-chiffres/>.

FAUSTINO-ROCHA, Ana, OLIVEIRA, Paula A., PINHO-OLIVEIRA, Jacinta, TEIXEIRA-GUEDES, Catarina, SOARES-MAIA, Ruben, DA COSTA, Rui Gil, COLAÇO, Bruno, PIRES, Maria João, COLAÇO, Jorge, FERREIRA, Rita et GINJA, Mário, 2013. Estimation of rat mammary tumor volume using caliper and ultrasonography measurements. In : *Lab Animal*. juin 2013. Vol. 42, n° 6, p. 217-224. DOI 10.1038/labam.254.

GALRINHO, Ruxandra DRAGOI, CIOBANU, Andrea Olivia, RIMBAS, Roxana Cristina, MANOLE, Catalin Gabriel, MARINESCU, Bogdan, VINERANU, Dragos et DAVILA, Carol, 2015. New Echocardiographic Protocol for the Assessment of Experimental Myocardial Infarction in Rats. In : . 2015. p. 6.

GBIF, 2020. Global Biodiversity Information Facility - *Rattus norvegicus*. In : [en ligne]. 2020. [Consulté le 10 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.gbif.org/species/2439261/treatments>.

HOFSTETTER, John, SUCKOW, Mark A. et HICKMAN, Debra L., 2006. Morphophysiology. In : *The Laboratory Rat*. 1 décembre 2006. p. 93-125. DOI 10.1016/B978-012074903-4/50007-8.

KEEBLE, Emma et MEREDITH, Anna (éd.), 2009. *BSAVA manual of rodents and ferrets*. Quedgeley, Gloucs : BSAVA. ISBN 978-1-905319-08-4.

KIRBERGER, R. M., BESTER, E. G., SCHULMAN, M. L., JANSE VAN RENSBURG, I. et HARTMAN, M. J., 2019. Ultrasonographic evaluation of fetal development in the rat. In : *Theriogenology*. 1 février 2019. Vol. 125, p. 24-29. DOI 10.1016/j.theriogenology.2018.10.017.

KRINKE, George, 2000. *The Laboratory Rat*. S.l. : Academic Press. The handbook of experimental animals. ISBN 978-0-12-426400-7.

LA DÉPÊCHE, 2007. Le succès du film Ratatouille fait bondir les ventes de rats au Royaume-Uni. In : *ladepeche.fr* [en ligne]. 2007. [Consulté le 16 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.ladepeche.fr/article/2007/10/25/112867-succes-film-ratatouille-fait-bondir-ventes-rats-royaume-uni.html>.

LE PROVOST, Marie, 2013. *Le bien-être du rat en animalerie de vente.pdf*. Thèse de doctorat vétérinaire. Lyon : Claude-Bernard.

LEGIFRANCE, 2018a. Code du travail | Article R4451-6 | Legifrance. In : [en ligne]. 2018. [Consulté le 2 avril 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?sessionId=92344F9EA2EA67F1073701E47A04DB92.tplgfr38s_1?idSectionTA=LEGISCTA000037024998&cidTexte=LEGITEXT000006072050&dateTexte=20200402.

LEGIFRANCE, 2018b. Code du travail | Article R4451-57 | Legifrance. In : [en ligne]. 2018. [Consulté le 2 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000037024611&cidTexte=LEGITEXT000006072050&dateTexte=20180701>.

NFRS, 2020. National Fancy Rat Society. In : [en ligne]. 2020. [Consulté le 15 avril 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.nfrs.org/articles_domestication.html#.

O'BRIEN, Robert T., WALLER, Kenneth R. et OSGOOD, Teresa L., 2004. Sonographic features of drug-induced splenic congestion. In : *Veterinary Radiology & Ultrasound*. mai 2004. Vol. 45, n° 3, p. 225-227. DOI 10.1111/j.1740-8261.2004.04039.x.

POPESKO, Peter, RAJTOVA, Viera et HORAK, Jindrich, 1992. *A Colour Atlas of the Anatomy of Small Laboratory Animals: Rat, Mouse, Golden Hamster*. London : Mosby. ISBN 978-0-7234-1823-8.

QUESENBERRY, Katherine E. et CARPENTER, James W. (éd.), 2012. *Ferrets, rabbits, and rodents: clinical medicine and surgery*. 3rd ed. St. Louis, Mo : Elsevier/Saunders. ISBN 978-1-4160-6621-7. SF997.5.F47 F47 2012

SANDFORD, Estelle, 2018. NFRS Standards of Excellence. In : . 2018. p. 17.

SEELY, John Curtis et BRIX, Amy, 2014. Kidney - Introduction. In : *National Toxicology Program, Non-néoplastic lesion atlas*. 2014. p. 10.

SHARP, Patrick et VILLANO, Jason, 2012. *The Laboratory Rat*. 2nd edition. S.l. : CRC Press. ISBN 978-1-4398-2987-5.

SILVERMAN, Sam, 1993. Diagnostic Imaging of Exotic Pets. In : *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*. novembre 1993. Vol. 23, n° 6, p. 1287-1299. DOI 10.1016/S0195-5616(93)50156-0.

SILVERMAN, Sam, TELL, Lisa A., NUGENT-DEAL, Jody et PALMER-HOLTRY, Kristina, 2005. *Radiology of rodents, rabbits, and ferrets: an atlas of normal anatomy and positioning*. St. Louis, Mo : Elsevier Saunders. ISBN 978-0-7216-9789-5.

STEIN, A. B., TIWARI, S., THOMAS, P., HUNT, G., LEVENT, C., STODDARD, M. F., TANG, X.-L., BOLLI, R. et DAWN, B., 2007. Effects of anesthesia on echocardiographic assessment of left ventricular structure and function in rats. In : *Basic Research in Cardiology*. janvier 2007. Vol. 102, n° 1, p. 28-41. DOI 10.1007/s00395-006-0627-y.

THIRIET, Alizée et HEGELEN, Marine, 2012. *Atlas photographique de l'anatomie clinique des NAC (petits mammifères à l'exception du furet)*. Thèse de doctorat vétérinaire. S.l. : Faculté de médecine de Créteil.

TULLY, Thomas N., 2009. MICE AND RATS. In : *Manual of Exotic Pet Practice* [en ligne]. S.l. : Elsevier. p. 326-344. [Consulté le 28 avril 2020]. ISBN 978-1-4160-0119-5. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781416001195500159>.

WATSON, Linley E, SHETH, Milan, DENYER, Robert F et DOSTAL, David E, 2004. Baseline echocardiographic values for adult male rats. In : *Journal of the American Society of Echocardiography*. février 2004. Vol. 17, n° 2, p. 161-167. DOI 10.1016/j.echo.2003.10.010.

WELSH, M, 2011. Diagnostic imaging of exotic pets: birds, small mammals, reptiles. In : *Australian Veterinary Journal*. octobre 2011. Vol. 89, n° 10, p. 408-408. DOI 10.1111/j.1751-0813.2011.00824.x.

YPSILANTIS, Petros, DEFTEREOS, Savvas, PRASSOPOULOS, Panagiotis et SIMOPOULOS, Constantinos, 2009. Ultrasonographic Diagnosis of Pregnancy in Rats. In : *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science*. 2009. Vol. 48, n° 6, p. 6.

Toulouse, 2020

NOM : ROCHE PRÉNOM : SÉBASTIEN

TITRE : MISE EN LIGNE D'UN ATLAS D'IMAGES RADIOGRAPHIQUES ET ÉCHOGRAPHIQUES PATHOLOGIQUES DU RAT DOMESTIQUE (*Rattus norvegicus*)

RÉSUMÉ : Les examens complémentaires, notamment les examens d'imagerie, se démocratisent en médecine des NAC, mais peu de ressources existent pour l'analyse et l'interprétation des images. Il s'agit pourtant d'outils modernes qui sont d'une grande utilité pour le diagnostic chez les animaux de compagnie. L'objectif de ce travail est de rappeler le fonctionnement des appareils de radiographie et d'échographie, de présenter l'anatomie particulière du rat domestique *Rattus norvegicus* et ses conséquences sur l'imagerie physiologique de cette espèce, et de fournir un atlas en ligne d'images radiographiques et échographiques pathologiques du rat domestique, comme support pratique et pédagogique à destination des praticiens et des étudiants vétérinaires comme support pour leur formation.

MOTS-CLÉS : RADIOGRAPHIE, ÉCHOGRAPHIE, RAT, ATLAS, WEB

TITLE: ONLINE ATLAS OF PATHOLOGICAL RADIOGRAPHIC AND ULTRASOUND IMAGES OF THE DOMESTIC RAT (*Rattus norvegicus*)

ABSTRACT: Complementary exams, and notably imaging techniques, are becoming more accessible in exotic pet medicine, but few resources are available for image analysis and interpretation. However, these are modern tools that are very useful for diagnosis in pets. The purpose of this work is to summon up the functioning of x-ray and ultrasound devices, to present the specific anatomy of the domestic rat *Rattus norvegicus* and its consequences on the physiological imaging of this species, and to provide an online radiographic and ultrasound atlas of the domestic rat, as a practical and educational support for veterinary practitioners also meant to be used by students as an educational resource.

KEYWORDS: X-RAYS, ULTRASOUND, RAT, ATLAS, WEB