




Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

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/> 24007

To cite this version:

Lerch, Carole . *Mise en ligne d'un atlas tomodensitométrique d'images normales de la grue demoiselle (Arthropodes virgo)*. Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse – ENVT, 2018, 60 p.

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

MISE EN LIGNE D'UN ATLAS TOMODENSITOMETRIQUE D'IMAGES NORMALES DE LA GRUE DEMOISELLE (ANTHROPOIDES VIRGO)

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

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

par

LERCH Carole

Née, le 26 Février 1993 à STRASBOURG (67)

Directeur de thèse : M. Guillaume LE LOC'H

JURY

PRESIDENT :

M. Isabelle BERRY

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :

M. Guillaume LE LOC'H

M. Fabrice CONCHOU

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

REPARTITION DES ENSEIGNANTS PAR GRADE

(Mise à jour : 07/09/2018)

DIRECTRICE : ISABELLE CHMITELIN

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE (6)

Mme	CLAUW Martine	SECTION C.N.E.C.A. N° 8	
M.	CONCORDET Didier		3
M.	DELVERDIER Maxence		7
M.	ENJALBERT Francis		6
M.	PETIT Claude		1
M.	SHELCHER François		8

PROFESSEURS 1° CLASSE (17)

M	BAILLY Jean-Denis		4
M.	BERTAGNOLI Stéphane		1
M.	BERTHELOT Xavier		6
M.	BOUSQUET-MELOU Alain		7
M.	BRUGERE Hubert		10
Mme	CADIERGUES Marie-Christine		8
Mme	CHASTANT-MAILLARD Sylvie		6
M.	DUCOS Alain		6
M.	FOUCRAS Gilles		8
Mme	GAYRARD-TROY Véronique		7
M	GUERIN Jean-Luc		6
Mme	HAGEN-PICARD Nicole		6
M.	JACQUIET Philippe		8
M.	LEFEBVRE Hervé		7
M.	MEYER Gilles		8
M.	SANS Pierre		6
Mme	TRUMEL Catherine		7

PROFESSEURS 2° CLASSE (7)

Mme	BOULLIER Séverine		1
Mme	BOURGES-ABELLA Nathalie		7
M.	GUERRE Philippe		7
Mme	LACROUX Caroline		7
M.	MAILLARD Renaud		8
M	MOGICATO Giovanni		7
Mme	LETRON-RAYMOND Isabelle		7

PROFESSEUR CERTIFIE (P.C.E.A.)

Mme	MICHAUD Françoise, Professeur d'Anglais
M.	SEVERAC Benoît, Professeur d'Anglais

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE (11)

M.	BERGONIER Dominique		6
Mme	DIQUELOU Armelle		8

M.	JAEG Jean-Philippe		7
M.	JOUGLAR Jean-Yves		8
M.	LYAZRHI Faouzi		3
M.	MATHON Didier		8
Mme	MEYNADIER Annabelle		6
Mme	PRIYMENKO Nathalie		6
M.	RABOISSON Didier		6
M	VERWAERDE Patrick		8
M.	VOLMER Romain		1

MAITRES DE CONFERENCES classe normale (24)

M.	ASIMUS Erik		8
Mme	BENNIS-BRET Lydie		7
Mme	BIBBAL Delphine		4
Mme	BOUCLAINVILLE-CAMUS Christelle		1
Mme	BOUHSIRA Emilie		8
M	CONCHOU Fabrice		8
M	CORBIERE Fabien		8
M.	CUEVAS RAMOS Gabriel		8
Mme	DANIELS Hélène		1
Mme	DAVID Laure		4
Mlle	DEVIERS Alexandra		7
M.	DOUET Jean-Yves		8
Mme	FERRAN Aude		7
Mme	LALLEMAND Elodie		8
Mme	LAVOUE Rachel		8
M.	LE LOC'H Guillaume		8
M	LIENARD Emmanuel		8
Mme	MILA Hanna		6
Mme	MEYNAUD-COLLARD Patricia		8
M.	NOUVEL Laurent		6
Mme	PALIERNE Sophie		8
Mme	PAUL Mathilde		6
M.	VERGNE Timothée		7
Mme	WASET-SZKUTA Agnès		6

A.E.R.C. (6)

Mme	BLONDEL Margaux		8
M.	CARTIAUX Benjamin		7
M.	COMBARROS-GARCIA Daniel		8
Mme	COSTES Laura		4
M.	GAIDE Nicolas		7
M.	JOUSSERAND Nicolas		8

MAITRES DE CONFERENCES CONTRACTUEL (2)

Mme	DORE-BORDE Laura		8
M.	LEYNAUD Vincent		8

Remerciements

A notre présidente du jury de thèse :

Madame le Professeur Isabelle Berry

Professeur de 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 Guillaume Le Loc'h

Maître de conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, *Nouveaux Animaux de Compagnie, Faune sauvage*

Qui a accepté de superviser mon travail et m'a fait confiance et accompagné au cours de sa réalisation

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

Monsieur le Docteur Fabrice Conchou

Maître de conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, *Anatomie, Imagerie médicale*

Qui a accepté de participer au jury de thèse

Sincères remerciements.

A Monsieur le Docteur Riccardo Mancini,

Docteur vétérinaire du zoo des 3 vallées de Montredon-Labessionnié, qui a accepté de me confier une Grue demoiselle

Remerciements chaleureux.

Table des matières

Introduction	11
1 ^{ère} partie : PRINCIPES PHYSIQUES ET REALISATION PRATIQUE DE LA TOMODENSITOMETRIE	13
I. Principe de base de la tomodensitométrie	14
A. Introduction	14
B. Bases physiques de la tomodensitométrie	16
a. Définition du rayonnement X	16
b. Formation des rayons X	17
C. Interaction des rayons X avec la matière	18
a. Effet photoélectrique	18
b. Effet Compton	18
c. Effet Thomson	19
II. Fonctionnement du scanner	19
A. L'appareil et ses réglages	19
B. Les éléments de la chaîne scanographique	20
2 ^{ème} partie : LE MODELE BIOLOGIQUE, <i>Anthropoides virgo</i>	21
I. Classification et conservation de la grue demoiselle	22
A. Taxonomie	22
B. Conservation	23
a. Statut de la population	23
b. Moyens de conservation	23
II. Biologie	24
A. Description	24
B. Distribution et habitat	25
C. Mœurs	26
D. Alimentation	27
E. Reproduction	27
F. Longévité	28
G. Captivité	28
III. Anatomie des <i>Gruinae</i>	30
A. Système orthopédique	30
a. Le crâne	30
b. Le squelette axial	31
c. Les ailes	32
d. Les membres pelviens	33
B. Cavité coelomique	34

a.	<i>Système respiratoire</i>	35
b.	<i>Système cardiovasculaire</i>	37
c.	<i>Système digestif</i>	39
d.	<i>Système immunitaire</i>	40
e.	<i>Système reproducteur</i>	40
f.	<i>Système urinaire</i>	42
C.	Système nerveux	43
D.	Système endocrinien	43
E.	Organes sensoriels.....	44
a.	<i>Vue</i>	44
b.	<i>Ouïe</i>	45
c.	<i>Olfaction</i>	45
d.	<i>Toucher</i>	45
e.	<i>Goût</i>	45
f.	<i>Sens migrateur</i>	46
F.	Tégument.....	46
a.	<i>La peau</i>	46
b.	<i>Les glandes cutanées</i>	47
G.	Les plumes	47
3 ^{ème}	partie : LE PROJET, L'ATLAS TOMODENSITOMETRIQUE DE LA GRUE DEMOISELLE	49
I.	Présentation du site internet.....	50
II.	Réalisation de l'atlas tomodensitométrique de la grue demoiselle	50
A.	Examen clinique de la grue	50
B.	Anesthésie	51
C.	Scanner utilisé et choix du protocole d'acquisition	52
D.	Reconstitution des images dans le mode de visualisation MPR	52
III.	L'atlas tomodensitométrique.....	53
A.	Mise en forme des planches de l'atlas	53
B.	Exemples d'images mises en ligne	53
a.	<i>Exemples d'images en fenêtre tissu osseux</i>	53
b.	<i>Exemples d'images en fenêtre tissu mou</i>	55
c.	<i>Exemple d'images en fenêtre pulmonaire</i>	56
	Conclusion	57
	Bibliographie	589

Table des illustrations

<i>Figure 1 : Atténuation des rayons X par la matière</i>	14
<i>Figure 2 : Mouvement du couple source-détecteur autour du patient</i>	15
<i>Figure 3 : Echelle Hounsfield (19)</i>	15
<i>Figure 4 : Exemple de 3 fenêtres pour une même coupe (19)</i>	16
<i>Figure 5: Tête de grue demoiselle (17)</i>	24
<i>Figure 6 : Grue demoiselle adulte (17)</i>	25
<i>Figure 7 : Carte de la distribution des populations de Grues demoiselles (14)</i>	26
<i>Figure 8 : grue demoiselle devenue un animal de compagnie, capturée au Pakistan lors de sa migration (12)</i>	28
<i>Figure 9 : Anatomie du squelette d'une grue de la sous-famille Gruinae (15)</i>	30
<i>Figure 10 : Anatomie du crâne des Gruidae en vue de profil (15)</i>	31
<i>Figure 11 : Squelette d'une aile d'oiseau (23)</i>	32
<i>Figure 12 : Squelette du membre pelvien d'oiseau (23)</i>	34
<i>Figure 13 : Vue ventrale de la cavité cœlomique d'un oiseau (23)</i>	35
<i>Figure 14 : Vue dorsale de la trachée d'Anthropoides virgo (9)</i>	36
<i>Figure 15 : Localisation des sacs aériens chez les oiseaux (23)</i>	37
<i>Figure 16 : Système artériel à gauche et veineux à droite des oiseaux (23)</i>	38
<i>Figure 17 : Schéma du tractus urogénital mâle en vue ventrale et de sa position par rapport aux reins (26)</i>	41
<i>Figure 18 : Vue ventrale de l'appareil génital femelle des oiseaux (23)</i>	42
<i>Figure 19: Vue ventrale d'une aile d'oiseau montrant l'insertion des rémiges (23)</i>	48
<i>Figure 20 : Scores corporels en fonction de l'état d'embonpoint : coupe transversale du sternum et des pectoraux (12)</i>	50
<i>Figure 21 : Grue demoiselle anesthésiée et placée en décubitus ventral sur la table du scanner.</i>	52
<i>Figure 22 : planche 8/21, fenêtre tissu osseux</i>	53
<i>Figure 23 : planche 13/21, fenêtre tissu osseux</i>	54
<i>Figure 24 : planche 3/13, fenêtre tissu mou</i>	55
<i>Figure 25 : planche 7/13, fenêtre tissus mous</i>	55
<i>Figure 26 : planche 2/10, fenêtre tissu pulmonaire</i>	56
<i>Figure 27 : planche 6/10, fenêtre tissu pulmonaire</i>	56

Introduction

L'imagerie médicale est un domaine en constante progression depuis ces dernières décennies. Le recours à cette discipline tend à s'intensifier en médecine vétérinaire. Bien que la radiographie et l'échographie se soient fortement démocratisées en pratique vétérinaire, le recours au scanner et à l'imagerie par résonance magnétique est moins répandu mais de plus en plus accessible. Ce phénomène suit parallèlement l'évolution de la profession allant vers une spécialisation plus importante et donc l'augmentation significative du nombre de professionnels capables de réaliser et d'interpréter ces examens.

A ses débuts, réservé uniquement à la médecine humaine et à la recherche, l'examen tomodensitométrique a su, ces dernières années, investir le monde vétérinaire. Son utilisation restait très confidentielle en raison de son coût et du manque de connaissances à son sujet. Il a su récemment s'imposer comme un examen complémentaire couramment proposé pour son intérêt en termes diagnostiques et sa finesse dans certains contextes.

Depuis l'élaboration de son principe il y a près de 50 ans, les techniques scanographiques n'ont cessé de progresser, tant sur le mode d'acquisition que sur la qualité des images obtenues. Cependant, l'enseignement de ces techniques et de la lecture de ces images est récent et peu développé. Le nombre de personnes capables de lire et d'interpréter les résultats de l'examen est limité. Etant donné l'importance diagnostique de cet examen, il semble pertinent de rendre sa compréhension accessible à un plus grand nombre de praticiens mais aussi de développer son apprentissage aux étudiants vétérinaires.

Ce projet d'atlas tomodensitométrique a pour but d'apporter une base de données gratuite, contenant des images tomodensitométriques normales légendées pour les animaux de compagnie courants (chien et chat), les nouveaux animaux de compagnie et les animaux de zoos, dont fait partie la grue demoiselle. Celle-ci est couramment présente dans les zoos et peut servir de modèle pour l'ensemble de la famille des Gruidés, à condition de connaître les différences anatomiques entre les espèces.

L'objectif de cet atlas est de servir de support d'apprentissage aux étudiants et vétérinaires praticiens désireux d'approfondir leurs connaissances ainsi que de permettre une comparaison entre des images normales et un examen complémentaire réalisé dans le contexte d'une démarche diagnostique.

Ainsi, une première partie présentera le principe de la tomodensitométrie et la réalisation pratique d'un examen scanner. La deuxième partie sera consacrée à la présentation du modèle biologique, la grue demoiselle. Enfin, la troisième partie sera axée autour de la présentation du projet d'atlas tomodensitométrique en ligne.

1^{ère} partie : PRINCIPES PHYSIQUES ET REALISATION
PRATIQUE DE LA TOMODENSITOMETRIE

I. Principe de base de la tomodensitométrie

A. Introduction

La tomodensitométrie se définit comme une méthode de mesure de la densité radiologique des volumes élémentaires d'une coupe. Cette technique repose sur le même principe physique (figure 1) que la radiographie conventionnelle, c'est à dire la différence d'atténuation d'un faisceau de rayons X passant dans des tissus organiques. L'atténuation de ces rayonnements électromagnétiques dépend de l'épaisseur et de la densité électronique de la structure traversée ainsi que de l'énergie des rayons X. Elle est mesurée physiquement par le coefficient d'atténuation du faisceau de rayons X μ . L'atténuation le long d'un rayon est déterminée par la moyenne des coefficients d'atténuation linéique le long de celui-ci.

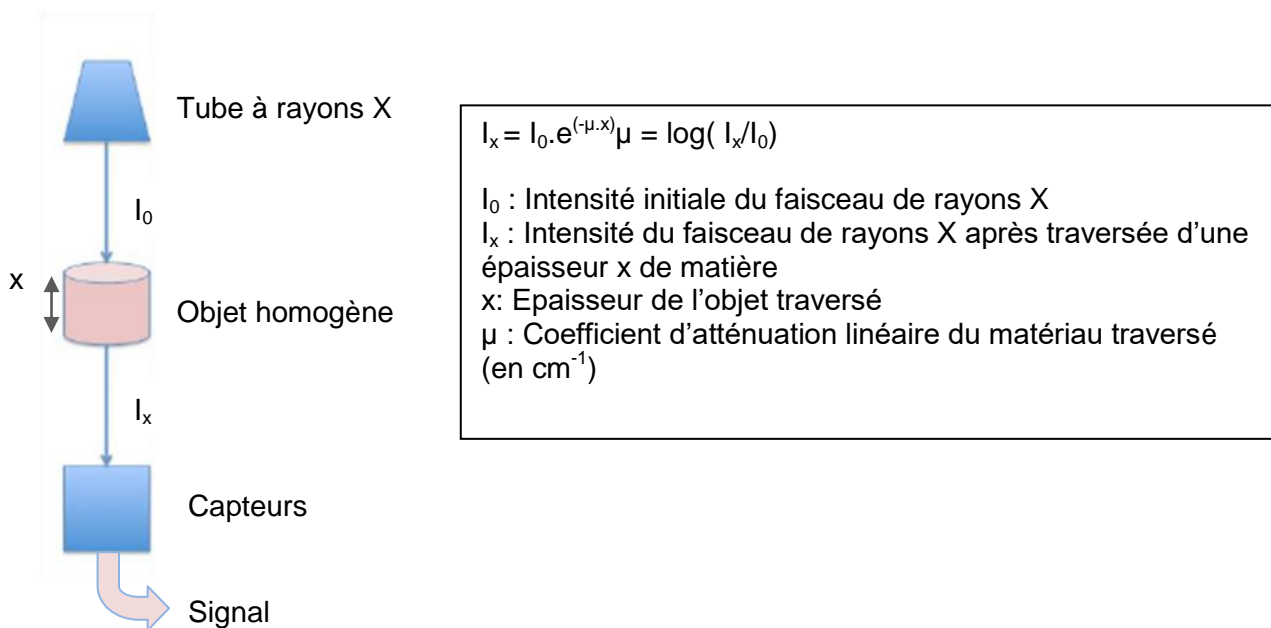


Figure 1 : Atténuation des rayons X par la matière

Le scanner est composé d'un arceau, constitué d'un tube à rayons X faisant face à des rangées de détecteurs (figure 2). Cet arceau effectue un mouvement de rotation-translation autour du corps à étudier. Cela permet de déterminer μ selon diverses incidences et de distinguer les composantes tissulaires macroscopiques jusqu'alors confondues en radiologie conventionnelle.

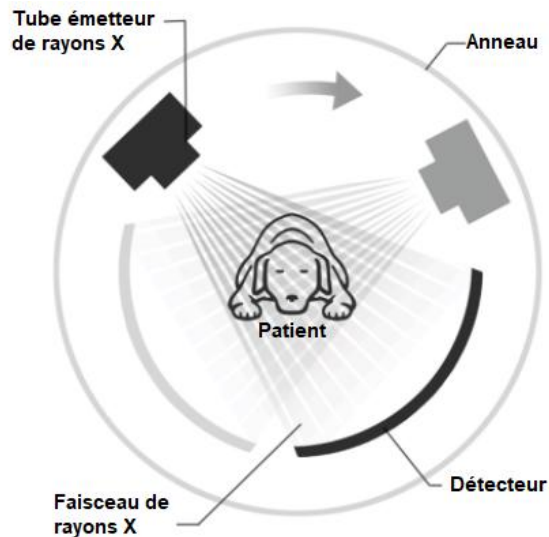


Figure 2 : Mouvement du couple source-détecteur autour du patient

L'ordinateur convertit ensuite les données brutes en une série d'images en 2D, généralement des coupes axiales. Ces images sont constituées d'un certain nombre de pixels qui représentent une unité de volume élémentaire appelé voxel. En tomodynamométrie, à chaque voxel de la matrice de reconstruction correspond un coefficient d'atténuation, mesuré en unités Hounsfield (UH). Une UH est définie par :

$$UH(x,y,z) = 1000 \times (\mu(x,y,z) - \mu_{\text{eau}}) / \mu_{\text{eau}}$$

$\mu(x,y,z)$ correspond au coefficient d'atténuation du voxel du tissu du patient localisé en (x,y,z) . L'échelle Hounsfield s'étend de -1000 pour l'air à +3000, le 0 correspondant à la densité de l'eau et +1000 correspondant à la densité de l'os compact (figure 3).

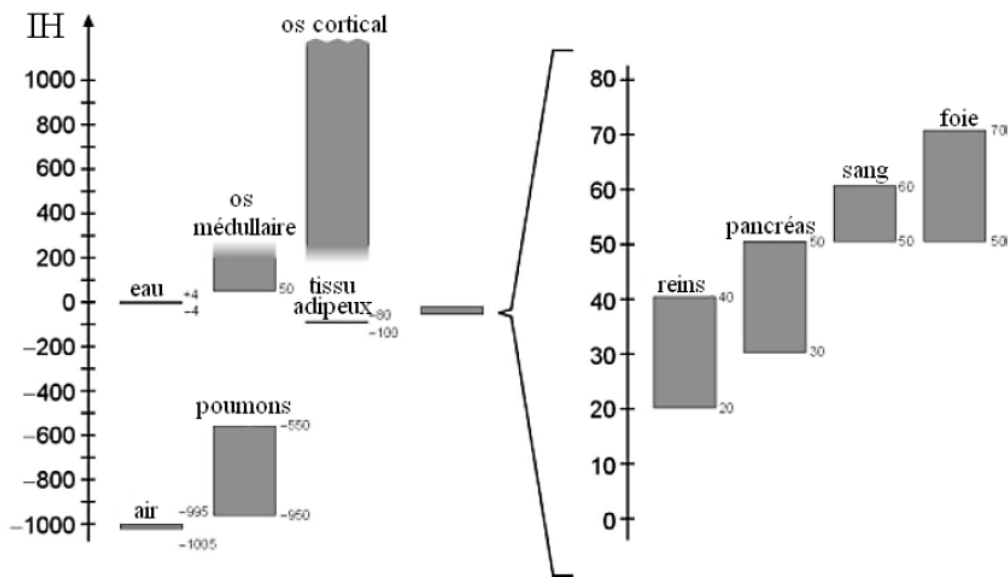


Figure 3 : Echelle Hounsfield (19)

Les densités d'un corps d'un être vivant vont de -1000 à +1000 cependant l'œil humain ne distingue que 15 à 20 niveaux de gris. Si l'on affecte 15 nuances aux 2000 densités discernables, une seule nuance regroupe alors de nombreuses densités et l'image perd en précision. On procède alors à un fenêtrage de l'image, c'est-à-dire à un ajustement de l'échelle des niveaux de gris aux structures d'intérêts. Cette fenêtre est centrée sur un niveau et est étendue sur une certaine largeur (figure 4). Le niveau détermine la brillance de l'image et la largeur caractérise le contraste.

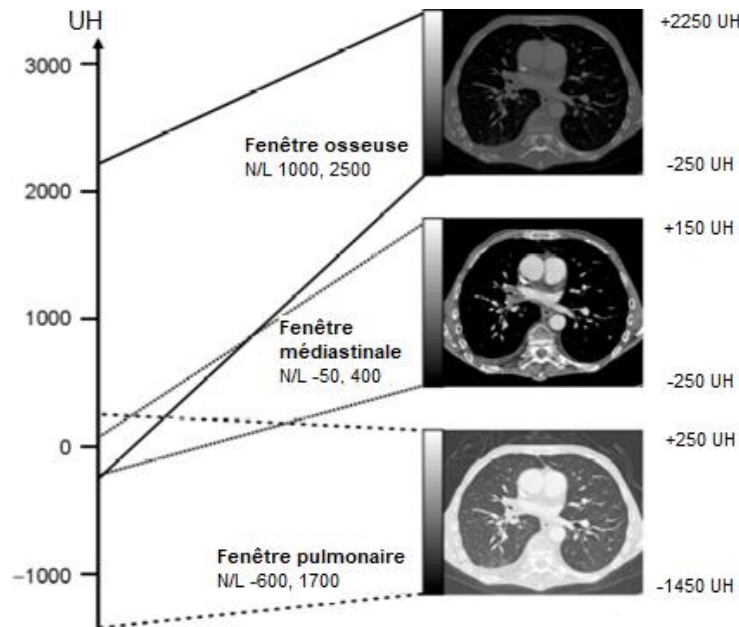


Figure 4 : Exemple de 3 fenêtres pour une même coupe (19)

On distingue en général deux types de fenêtres : les fenêtres de type « os » qui permettent de repérer les reliefs et la structure du tissu osseux (toute la largeur de l'échelle de Hounsfield est généralement choisie) et les fenêtres de type « tissus mous » destinées comme leur nom l'indique aux organes peu calcifiés. Ces dernières sont des fenêtres assez étroites que l'on centre autour du coefficient d'absorption du tissu choisi (1, 5, 6, 16, 19).

B. Bases physiques de la tomodensitométrie

a. Définition du rayonnement X

Les rayons X ont été découverts de manière fortuite en 1895 par Röntgen qui produisit la première radiographie de l'histoire. Au début de l'année 1896, Josef Eder réalisa les premiers clichés d'animaux en utilisant des cadavres de petite taille. Ces rayons font partis de la famille des ondes électromagnétiques.

L'onde électromagnétique est une quantité d'énergie combinant une onde magnétique et une onde électrique, toutes deux sinusoïdales et perpendiculaires l'une à l'autre. Elle se déplace dans le vide ou la matière en ligne droite avec une vitesse constante dans un même lieu : $c =$

$3.0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$. Elle est caractérisée par une longueur d'onde λ (en mètre) et une fréquence ν (en Hertz) liées par l'équation $c = \lambda.\nu$. La longueur d'onde est donc inversement proportionnelle à la fréquence. Les rayons X, tout comme les rayons gamma, sont des ondes électromagnétiques à haute fréquence. Celle-ci est comprise entre 10^{16} et 10^{20} Hz et leur longueur d'onde est donc courte, comprise entre 10^{-11} et 10^{-8} m.

La quantité d'énergie transportée par l'onde électromagnétique est proportionnelle à la fréquence telle que $E = h.\nu$ avec h la constante de Planck ($h = 6.62.10^{-34}$ J.s). Plus la longueur d'onde est courte, plus la fréquence est élevée et donc plus la quantité d'énergie transportée est grande. Les rayons X ont une énergie de l'ordre de 10^4 eV et font partie des radiations de haute énergie, ionisantes car capables d'éjecter un électron et de transformer un atome en ion. Dans la matière organique, cette ionisation peut entraîner des dommages moléculaires à l'origine de mutation ou de mort cellulaire, rendant les rayons X dangereux pour la santé humaine. (1, 6, 16)

b. Formation des rayons X

Les rayons X sont créés par un flux d'électrons à grande vitesse lancés sur une cible formée d'atomes de numéro atomique élevé. La cathode, formée d'un filament généralement de tungstène porté à incandescence, est la source des électrons et l'anode, chargée positivement et formée de métaux lourds, est la cible des électrons. Un champ électrique crée une différence de potentiel entre 20 et 150 kilovolts permettant d'accélérer les électrons. Les interactions entre l'anode et la cathode permettent l'émission des rayons X composés de deux spectres, un spectre continu et un spectre de raies.

Le spectre continu est émis lorsqu'un électron, chargé négativement, arrive à proximité d'un noyau atomique, chargé positivement. Il subit une force d'attraction Coulombiennes qui va le faire décélérer et changer de direction entraînant une perte d'énergie cinétique. Cette énergie est émise sous forme d'un photon de même énergie. C'est ce qu'on appelle le rayonnement de freinage ou le spectre de Bremsstrahlung. Plus l'électron passe près du noyau, plus le photon émis, et donc le rayon X émis, est de haute énergie.

Le spectre de raie peut aussi être présent, dépendant de la composition de l'anode et du voltage du tube à rayons X. La collision entre un électron incident dont l'énergie est supérieure à l'énergie de liaison d'un électron d'une couche d'un atome de la cible va entraîner l'éjection de ce dernier. L'espace libre va être immédiatement rempli par un électron d'une couche supérieure ayant une énergie de liaison plus faible. Cette transition va émettre des photons dont l'énergie est égale à la différence entre les énergies de liaison des deux couches des électrons. On parle de rayonnement de fluorescence ou émission caractéristique.

Le flux total Ω de rayonnements émis est tel que $\Omega = k.i.Z.V^2$ avec k constante, i l'intensité du courant en Ampères, Z le numéro atomique du noyau de la cible et V la différence de potentiels en Volts. (1, 6, 16)

C. Interaction des rayons X avec la matière

Il existe quatre grands types d'interactions des rayons X avec la matière : l'effet photoélectrique, l'effet Compton, l'effet Thomson et la création de paires. Ces quatre interactions peuvent être à l'origine de l'atténuation de rayons X, c'est-à-dire l'absorption ou la dispersion d'un photon incident. Seuls les trois premiers jouent un rôle en imagerie médicale et la dernière interaction ne sera donc pas développée.

a. Effet photoélectrique

Lors de l'effet photoélectrique, toute l'énergie du photon incident est transmise à un électron qui est alors éjecté de sa couche de l'atome et le rayon X est absorbé. Pour cela, le photon incident doit posséder une énergie au moins égale à l'énergie de liaison de la couche électronique. L'électron expulsé possède alors une énergie égale à celle du photon incident moins son énergie de liaison. L'atome est ionisé et la place laissée par l'électron éjecté est prise par un électron d'une couche supérieure, qui lui-même laisse une place remplie par un électron d'une couche encore supérieure et ainsi de suite, laissant échapper un rayon X caractéristique de faible énergie.

Lors d'effet photoélectrique, aucun photon n'est émis après l'interaction entre l'atome et le photon incident et il n'y a donc pas de dégradation de l'image. La probabilité d'apparition de cet effet est proportionnelle à Z^3/E^3 avec Z le numéro atomique du matériau traversé et E l'énergie du photon incident. Pour un même numéro atomique, si on augmente l'énergie des rayons X, on diminue la probabilité d'apparition d'effet photoélectrique.

Cet effet prédomine lorsque des photons de faible énergie interagissent avec de la matière avec un Z élevé. C'est le premier mode d'interaction avec les produits de contraste, l'équipement de radioprotection et les différents récepteurs de l'image pour les énergies de rayons X utilisés en médecine. L'effet photoélectrique est utilisé pour augmenter le contraste en amplifiant les différences d'atténuation entre les tissus possédant des différences de numéros atomiques. (1, 6, 16)

b. Effet Compton

C'est l'effet qui prédomine lorsqu'on utilise une énergie de rayons X pour visualiser les tissus mous. Le photon incident va interagir et entraîner l'éjection d'un électron d'une couche externe de l'atome, émettant un nouveau photon d'une énergie inférieure. L'atome est alors ionisé et le nouveau photon est appelé photon Compton. L'électron éjecté va progressivement perdre son énergie cinétique en excitant et ionisant les atomes à proximité.

Ce rayonnement va soit traverser la matière, soit interagir selon un effet photoélectrique, un effet Compton ou un effet Thomson. Le photon émerge en moyenne avec un angle de 30 à 45 degrés mais peut dans certains cas partir en sens inverse comparé au photon incident. Plus l'énergie du photon incident est grande, plus elle sera transmise à l'électron éjecté et non pas au photon Compton. Cependant, aux valeurs qu'on utilise en imagerie (15 à 150 keV), la majorité de l'énergie est transmise au photon Compton lui permettant d'avoir une

bonne pénétration tissulaire. Par exemple, avec un photon incident dont l'énergie est de 80 keV, le photon Compton aura une énergie de 61 keV.

La probabilité d'apparition d'un effet Compton est indépendante du numéro atomique Z mais est proportionnelle à la densité de la matière traversée. Contrairement à l'effet photoélectrique, l'effet Compton altère la qualité de l'image en dégradant les contrastes et en augmentant le bruit d'image. De plus, la diffusion de photon dans toutes les directions rend indispensable la mise en place des mesures de radioprotection. (1, 6, 16)

c. Effet Thomson

L'effet Thomson correspond à l'interaction d'un photon incident avec un atome entier. L'énergie du photon incident fait osciller en phase tous les électrons de l'atome. Le nuage d'électron élimine cette énergie en émettant un photon de même énergie mais dans une direction différente. Il n'y a pas d'éjection d'électron et donc pas d'ionisation. Cette interaction a lieu avec des rayons X de basses énergies, peu utilisés en médecine vétérinaire mais utilisés en médecine humaine lors de mammographie. Elle a un effet délétère car elle va altérer la qualité de l'image. Cependant elle correspond à moins de 5% des interactions lorsque l'énergie est supérieure à 70keV. (1, 6, 16)

II. Fonctionnement du scanner

A. L'appareil et ses réglages

Le patient, généralement anesthésié en médecine vétérinaire, est placé sur une table qui va se déplacer pour entrer dans un anneau. Celui-ci contient un tube à rayon X qui génère un faisceau d'une épaisseur de 1 à 10 millimètres et qui va tourner autour du patient. En face du tube sont disposés des milliers de détecteurs qui vont mesurer l'intensité résiduelle du faisceau qui a traversé le corps du patient. L'appareil multiplie les mesures sur un angle de 360 degrés afin d'obtenir des coupes transversales les plus précises possibles.

Dans l'arceau, un premier détecteur électronique mesure l'intensité de rayons X émis par le tube radiogène avant qu'il ne balaie point par point la tranche du corps à examiner. Pour explorer cette coupe, le tube effectue une rotation complète degré par degré. Une partie du rayonnement incident est absorbé par les tissus traversés. Le rayonnement émergent est capté par un détecteur électronique qui tourne de façon synchrone avec le tube. Au cours de la rotation, rayons X incidents et rayons X émergents captés sont comparés et convertis en signaux électriques.

L'ordinateur calcule l'absorption du rayonnement en chaque point de la coupe. Le scanner utilise l'absorption des rayons X en relation directe avec la densité des tissus que les rayons ont rencontrés. Les résultats sont alors mis en mémoire.

Un traitement informatique complexe permet ensuite de faire apparaître sur l'écran l'image reconstituée d'une coupe axiale de 1 à 10 millimètres d'épaisseur. Cette image traduit les

variations d'absorption des tissus traversés auxquelles sont associées des variations de nuances (noir, gris, blanc) ou des couleurs conventionnelles.

Avant tout examen tomодensitométrique, plusieurs paramètres doivent être réglés :

- La tension en kilovolts (kV) qui est responsable du contraste, c'est-à-dire de la pénétration des rayons X.
- Le temps d'exposition en secondes (s) qui doit être réduit au maximum selon les principes de la radioprotection.
- L'intensité du courant en milliampères (mA) qui module le nombre d'électrons et donc le noircissement de l'image finale.
- Le nombre de coupes et leur espacement. Concrètement, les coupes peuvent être séparées par une zone aveugle si la distance entre deux coupes est supérieure à la largeur de la coupe, jointives si l'espacement est égal à la largeur des coupes, ou chevauchantes (Overlap) si l'espacement est inférieur à la largeur des coupes.
- L'épaisseur des coupes.
- La direction des coupes.
- Le champ qui correspond au diamètre de la tranche anatomique visualisée sur l'image. Plus le champ est limité, meilleur sera la définition de l'image. (5, 6, 16, 19)

B. Les éléments de la chaîne scanographique

La chaîne scanographique comprend trois éléments principaux.

Le système de mesure réalise la réception du rayonnement résiduel par les couples « tube radiogène-détecteurs ». Il convertit ce rayon en signal électrique puis l'intègre en signal numérique qui sera par la suite exploitable par l'ordinateur. Chaque mesure correspond à un profil d'absorption. La quantité d'information brute est proportionnelle au nombre de mesures (rotation de 360 degrés, degré par degré) et au nombre de récepteur. C'est le premier élément de la qualité de l'image radiographique.

Le système de reconstruction de l'image qui va confronter le rayonnement résiduel capté par les détecteurs au rayonnement témoin. Cela permet de mesurer l'atténuation des rayons X. Ces signaux électriques sont convertis en nombres binaires qui vont être amplifiés et numérisés par l'ordinateur. Celui-ci traduit en image par des niveaux de gris les différences d'atténuation des rayons X dans les divers volumes élémentaires (voxels) du sujet examiné. La durée de la reconstitution de l'image varie de 3 à 8 secondes.

Enfin, la console de visualisation de l'image convertie chaque donnée numérique en un point lumineux sur un écran d'ordinateur, dont l'intensité (blanc, gris, noir) est proportionnelle à l'absorption des rayons X. On obtient alors une image écran classique. En scanographie, 10 millions d'images intermédiaires sont utilisées pour produire une seule image. (5, 6, 16, 19)

2^{ème} partie : LE MODELE BIOLOGIQUE, *Anthropoides virgo*

I. Classification et conservation de la grue demoiselle

A. Taxonomie

La Grue demoiselle, ou Demoiselle de Numidie, est un oiseau appartenant à l'ordre des Gruiformes. Comme les autres oiseaux de cet ordre, elle possède un long bec et ne possède pas de jabot. Elle fait partie de la famille des Gruidés, qui contient quinze espèces de grues. On peut les définir comme étant de grands oiseaux, avec de longues pattes et un long cou, un pouce court inséré à l'opposé et au-dessus des autres doigts, un bec allongé et effilé souvent plus long que la tête et avec des narines ovales à linéaires.

Le nombre de genres appartenant à la famille des Gruidés est variable selon les auteurs. Peter (1934) classe les grues en quatre genres, *Balearica*, *Anthropoides*, *Buggeranus* et *Grus* alors que Blaauw (1897) ne reconnaissait pas le genre *Buggeranus* et Blyth et Tegetmoier (1881) ne les classaient qu'en deux genres, *Grus* et *Balearica*. Plus récemment, Del Hoyo (2014) classe aussi les grues en quatre genres : *Balearica* (deux espèces), *Anthropoides* (deux espèces), *Buggeranus* (une espèce) et *Grus* (dix espèces).

Ces quatre genres appartiennent à deux sous-famille, les grues couronnées (*Balearicinae*) contenant le genre *Balearica* et les grues typiques (*Gruinae*) contenant les trois autres genres. Des fossiles de grues couronnées de l'air de l'Eocène (37-54 millions d'années) ont été retrouvés alors que les premiers fossiles de grues typiques sont bien plus récents, datant du Miocène (5-24 millions d'années). Les grues couronnées se différencient des grues typiques par l'absence d'enroulement de la trachée, par leur plumage lâche et par leur incapacité à supporter les grands froids.

La grue demoiselle, *Anthropoides virgo*, fait partie des grues typiques et du genre *Anthropoides*. On peut la retrouver dans la littérature sous le nom *Grus virgo*. (3, 11, 15, 20)

Règne : <i>Animalia</i>
Embranchement : <i>Chordata</i>
Sous-embranchement : <i>Vertebrata</i>
Classe : <i>Aves</i>
Ordre : <i>Gruiforme</i>
Famille : <i>Gruidae</i>
Sous-famille : <i>Gruinae</i>
Genre : <i>Anthropoides</i>
Espèce : <i>virgo</i>

B. Conservation

a. Statut de la population

La grue demoiselle est la deuxième espèce de grue la plus abondante du monde, après la Grue du Canada. Sa population compte entre 230 000 et 261 000 individus et est en croissance. Son aire de répartition est très vaste, s'étendant de l'Asie de l'Est à l'Europe de l'Est et occupant une partie de l'Inde, de la Turquie, du Soudan et du Tchad. La grue demoiselle s'est donc vu attribuer le statut de « préoccupation mineure » par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (IUCN). Elle est inscrite à l'annexe II de la Convention sur le commerce international des espèces de la faune et de la flore sauvage menacées d'extinction (CITES). Elle est donc considérée comme une espèce non menacée d'extinction actuellement mais qui pourrait le devenir si le commerce des spécimens n'est pas étroitement contrôlé. (3, 8, 20)

b. Moyens de conservation

Le futur de la grue demoiselle est bien moins incertain que celui d'autres grues étant donné sa grande population, sa facilité de reproduction, sa capacité d'adaptation et l'abondance et la diversité de ses habitats. Cependant, plusieurs menaces pèsent sur elle. La plus sérieuse d'entre elles est la dégradation de son habitat par l'agriculture, notamment les steppes. Les autres menaces incluent l'utilisation intensive de pesticides, la chasse (Pakistan et Afghanistan), l'empoisonnement pour éviter les dégâts qu'elles causent aux cultures, le drainage et la construction de barrages sur les territoires humides se trouvant sur leur chemin migratoire.

Des mesures de conservations ont été mises en place pour la grue demoiselle. Elles concernent la mise en place d'aires protégées, la surveillance de routes migratoires, des échanges d'informations internationaux et des programmes d'éducation en Inde et au Pakistan. Les populations de la mer noire et de la Turquie étant menacées, elles bénéficient de plus de mesures de conservation. Par exemple, en Ukraine et en Russie, l'espèce est légalement protégée. Cependant, on la retrouve plus en dehors des zones protégées qu'en dedans. Les programmes de conservation en Ukraine essaient surtout de déterminer les facteurs agricoles affectant l'espèce et de trouver des méthodes pour en diminuer l'impact négatif. Depuis 1992, le «Virgo Programm » a pour but de déterminer la distribution, la taille de la population et le taux de reproduction de l'espèce. De plus des programmes d'éducation ont été initiés. (3, 20)

II. Biologie

A. Description

La grue demoiselle est la plus petite des grues, mesurant environ 90 centimètres de haut pour une envergure de 150 à 180 centimètres. Elle pèse entre 2 et 2,7 kilogrammes. Comme toutes les grues, elle est monomorphe, c'est-à-dire qu'on ne peut pas différencier physiquement les mâles des femelles.

La tête de la grue demoiselle est entièrement couverte de plumes (figure 5). Elle possède une bande grise claire sur son sommet, de la base du bec jusqu'à la nuque. Une ligne blanche recouvrant les oreilles et terminant en panache de plumes à l'arrière de la tête débute au cantus externe des deux yeux. Le reste de la tête est noir. Ses iris sont oranges à rouges et son bec est verdâtre à sa base et rosâtre à rougeâtre au bout. Ses joues, sa gorge et sa longue bavette pectorale sont noires.



Figure 5: Tête de grue demoiselle (17)

Son corps est entièrement gris-bleu pâle (figure 6). Ses ailes sont en majorité grises mais les rémiges primaires, l'extrémité des rémiges secondaires, l'alula et la grande couverture sont noires. Sa queue est grise avec l'extrémité des plumes noires. Ses longues pattes sont noires avec des doigts courts. (14, 15)



Figure 6 : Grue demoiselle adulte (17)

B. Distribution et habitat

Il existe cinq principales populations de grues demoiselles, occupant quarante-sept pays. Les trois populations les plus à l'est sont les plus grandes, comptant chacune plusieurs dizaines de milliers de grues. Une population se reproduit en Asie de l'est, une au Kazakhstan et en Asie centrale et la dernière en république de Kalmoukie, en Russie (figure 7). Les deux autres populations sont beaucoup plus restreintes. Une se reproduit en Turquie et compte moins d'une centaine d'individus. L'autre se reproduit à la mer Noire (Ukraine, Moldavie et Roumanie) et compte environ cinq cents individus mais est en déclin. Il existait une sixième population ne comptant plus qu'une dizaine d'individus dans les années 1990 au nord de l'Afrique, dans l'Atlas mais celle-ci n'existerait plus de nos jours.

Les grues demoiselles vivent préférentiellement dans les étendues herbeuses type savanes, steppes et semi-déserts. On peut aussi les retrouver dans les champs cultivés et les steppes plus humides. Ces grues restent toujours à proximité de points d'eau comme des rivières ou des lacs peu profonds. Elles peuvent aussi se retrouver en altitude, jusqu'à 3000 mètres au-dessus du niveau de la mer pour le Kirghizstan. Les grues demoiselles nichent au sol, dans des zones dont la végétation est peu dense et suffisamment haute pour les cacher, mais pas trop pour qu'elles puissent surveiller les alentours pendant qu'elles couvent leurs œufs.

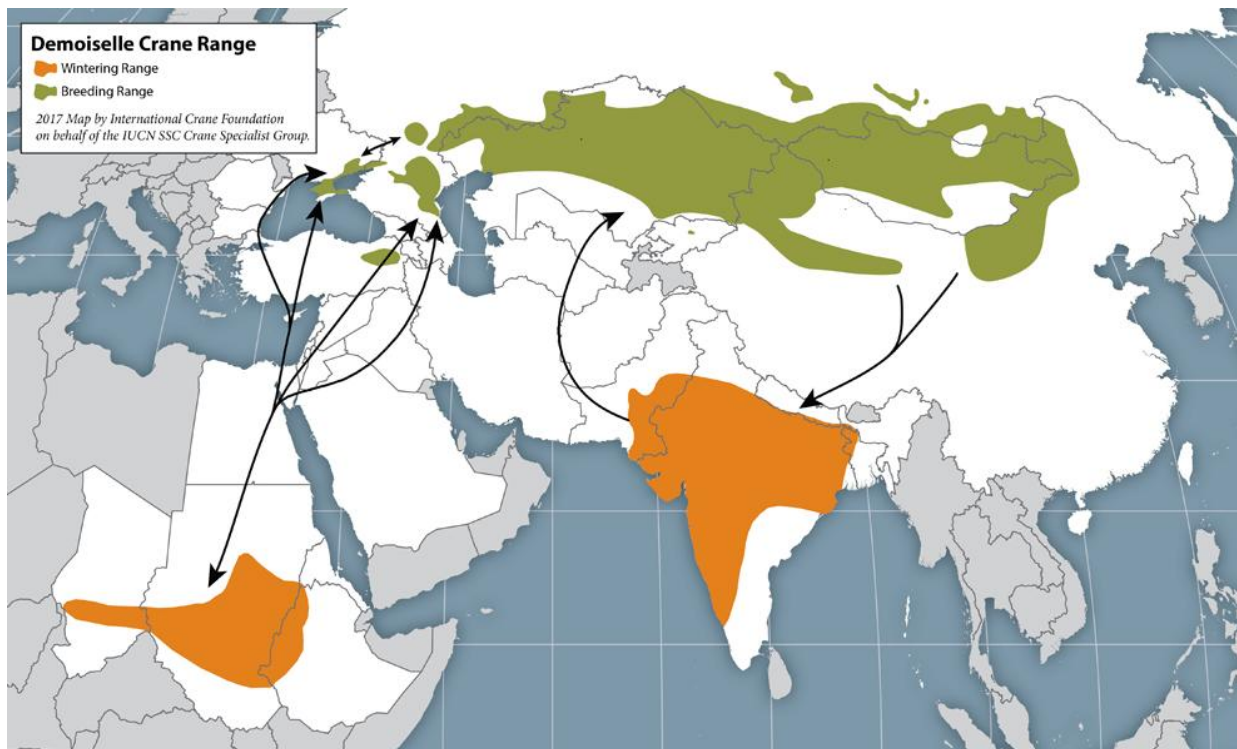


Figure 7 : Carte de la distribution des populations de Grues demoiselles (14)

Les grues demoiselles sont des oiseaux migrateurs. Les populations de la Turquie, de la Mer Noire et de Kalmoukie migrent jusqu'à leur zone d'hivernage en Ethiopie, au Soudan et en Afrique de l'est. Les grues choisissent préférentiellement des champs cultivés, des savanes d'acacias, des prairies et des zones riveraines. Les individus du Kazakhstan, de l'Asie centrale et de l'Est se rejoignent pour l'hiver en Inde de l'ouest. Les zones d'hivernage les plus importantes sont en premier l'état indien du Gujarat, puis les états du Maharashtra et Karnataka. Quelques unes d'entre elles passent l'hiver à l'est de l'Inde ou au Népal. Les grues utilisent une multitude d'habitats en Inde. Elles cherchent leur nourriture dans les champs cultivés, les champs de chaumes, les marécages et les lits de rivières. Elles se reposent dans les eaux peu profondes, sur les bancs de boue ou de sable au milieu de l'eau, sur les toits ou dans les déserts chauds si de l'eau est disponible. (3, 5, 14, 15, 20)

C. Mœurs

Les grues ont un comportement social. Elles migrent et passent leur hiver en groupe, elles font des danses à plusieurs et elles communiquent beaucoup entre elles. Cependant elles possèdent aussi un comportement solitaire pour certaines activités comme la prise de bain, la toilette et les moments de détente.

La communication, vocale ou visuelle, possède un rôle important dans les relations sociales d'*A. virgo*. Leur voix est grave et rauque et elles possèdent tout un répertoire de cris pour différentes situations : pour prendre contact, lors de stress, pour se localiser, avant de s'envoler, pour se reproduire, pour sonner l'alarme, pour chercher à manger et enfin le cri à l'unisson d'un couple. La communication visuelle est également très développée : danse,

postures de menaces, battement de la queue, démarches fières, piétinement, accroupissement... Ces comportements semblent être génétiquement transmis et non appris. En effet, des grues nées aveugles en captivité adoptent cette même communication visuelle alors qu'elles n'ont jamais pu l'apprendre.

A la fin de l'été, les grues demoiselles se rassemblent en volées pouvant atteindre 400 individus pour entamer leur migration d'automne et rejoindre les territoires où elles passent l'hiver. Lorsqu'elles volent, les grues étendent leur cou vers l'avant et leurs pattes vers l'arrière. Leur vol est puissant et lent et le groupe forme un V. Un individu prend la tête et permute avec un autre lorsqu'il est fatigué. Elles migrent à basse altitude, entre 330 et 1330 mètres mais peuvent atteindre 5000 à 8000 mètres à certains endroits, notamment lorsqu'elles passent au-dessus de l'Himalaya. Dans leur zone d'hivernage, les groupes peuvent atteindre plusieurs milliers de grues. Le retour aux zones de reproduction se fait vers mars-avril avec des plus petits groupes, d'une dizaine d'individus. Les grues restent alors grégaires quelques semaines avant de se séparer par couple et rejoindre leur nid. (3, 12, 15, 21)

D. Alimentation

A. virgo possède un régime omnivore. Son alimentation est cependant principalement composée de matières végétales. Cet oiseau consomme des graines, des céréales mûres, des cacahuètes, des haricots et d'autres produits de culture lors de leur migration. En Inde, les grues consomment des pois chiches, du blé et de la luzerne. En été, ce régime est complété par des lézards, des invertébrés comme des scarabées et des vers.

La grue demoiselle se nourrit en marchant lentement et en picorant mais est capable de faire des mouvements très rapides et de courir pour chasser. La recherche de nourriture se fait généralement le matin et en début d'après-midi. (3, 15, 21)

E. Reproduction

Les grues demoiselles ont une maturité sexuelle assez tardive, vers quatre à huit ans. La période de reproduction s'étend de fin avril à fin juin.

Comme pour toutes les grues, cette espèce est monogame et le mâle et la femelle forment un couple pour leur vie entière, sauf si la reproduction entre elles ne fonctionne pas. La formation du couple se fait soit dans les groupes d'oiseaux non reproducteurs soit dans les groupes d'oiseaux reproducteurs mais en dehors de la période de reproduction. Le mâle et la femelle vocalisent à l'unisson, les ailes fermées, la femelle tenant son bec vers le haut, le mâle le tenant à l'horizontal. La parade nuptiale avant la reproduction est différente. Elle peut être initiée par les deux sexes. Cette danse est composée de sauts, de révérences, de courses, de petits vols et de lancers d'objets dans les airs. Les oiseaux spectateurs de la parade forment souvent un cercle autour du couple et prennent part à la danse et aux vols.

Les nids sont très simples et au sol. Ils sont distants d'au moins deux cents à trois cents mètres chacun car les grues deviennent plus territoriales durant cette période. Les grues ne

cherchent pas à creuser leur nid. Elles y ramènent quelques petites pierres et les œufs, en général au nombre de deux, sont déposés à même le sol. Ces derniers sont jaunes-verts avec des tâches plus sombres. Les deux parents s'occupent de l'incubation qui dure 27 à 29 jours, mais la femelle a un rôle plus important. Une fois éclos, les oisillons apprennent à voler en 55 à 60 jours. Ils restent avec leurs parents 8 à 10 mois jusqu'à la saison de reproduction suivante. Les jeunes grues rejoignent alors un groupe de grues non reproductrices et vivent une vie nomade toute l'année, jusqu'à ce qu'elles atteignent l'âge de se reproduire. Elles adoptent un comportement reproducteur dès l'âge de 18 mois. (12, 15, 21)

F. Longévité

L'espérance de vie des grues demoiselles sauvages est inconnue. Le marquage des animaux pour les identifier n'a été initié que récemment. En captivité, leur espérance de vie est d'au moins 27 ans bien que le record atteigne les 67 ans. (12, 21)

G. Captivité

Les grues ont toujours été très appréciées et gardées en captivité. Elles sont représentées sur des murs de temples égyptiens et elles étaient élevées par la royauté chinoise il y a plus de 2 200 ans. Les australiens et les africains utilisent encore des grues comme animaux de compagnie. Des grues demoiselles et cendrées sont capturées durant leur migration dans les montagnes Hindou Kouch du Pakistan pour être mangées ou vendues comme animaux de compagnie (figure 8). Les grues sont aussi très appréciées dans les zoos européens et orientaux.



Figure 8 : grue demoiselle devenue un animal de compagnie, capturée au Pakistan lors de sa migration (12)

La population de grues demoiselles est la deuxième plus grande en nombre en captivité, à égalité avec celle de la grue du paradis, derrière celle de la grue royale. En 1995, le nombre de grues demoiselles captives était estimé à 1000 individus et en 2007, au moins 375

individus étaient répertoriés dans l'*International Species Information System* (ISIS) dans les zoos partenaires.

Les grues sont des animaux stressables. Lorsqu'elles sont gardées en captivités, tout doit être effectué pour limiter les perturbations au niveau de l'environnement et des interactions avec elles. Une surveillance de celles-ci doit être effectuée afin de pouvoir détecter rapidement des changements de comportement, pouvant être le signe de mal-être ou de maladie. L'enclos peut se trouver à l'extérieur ou à l'intérieur. Celui-ci doit être désinfecté au moins une fois par an pour éliminer les parasites et bactéries pathogènes. Les enclos extérieurs peuvent ne pas être désinfectés si une rotation est effectuée chaque année et qu'il n'y a pas plus d'une grue pour 50m². Les substrats naturels comme l'herbe sont de bons choix de revêtement. Une piscine peut être mise à disposition pour le bain des grues mais celle-ci doit être nettoyée tous les trois à cinq jours ou avoir un flux d'eau continu. Les barrières doivent être hautes et sans saillies pour éviter les blessures. Des barrières pleines peuvent être utilisées sur certains côtés pour limiter les contacts visuels avec des animaux d'autres enclos ou pour donner un peu d'intimité aux grues.

Plusieurs méthodes existent afin d'empêcher une grue de s'enfuir en volant quand on veut la maintenir en captivité. Tout d'abord, un filet peut être installé sur l'enclos afin de maintenir une barrière physique. Sinon, différentes opérations sur la grue directement peuvent être effectuées comme l'éjointage (amputation de la main et des doigts) ou la coupe des rémiges. (12, 29)

III. Anatomie des *Gruinae*

A. Système orthopédique

Le squelette des oiseaux (figure 9) est adapté pour le vol et les os sont très légers avec une corticale fine et une médulla renforcée par une structure interne. Les membres antérieurs sont modifiés en ailes et de nombreux os de la colonne vertébrale et de la cage thoracique sont fusionnés pour apporter de la résistance au vol.

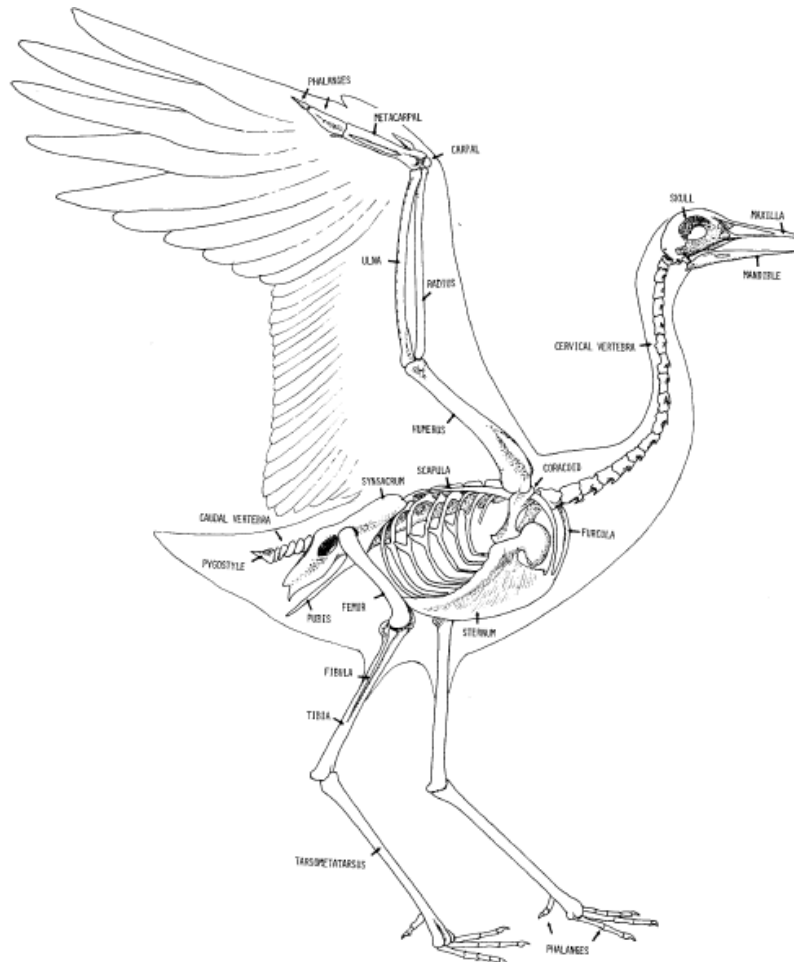


Figure 9 : Anatomie du squelette d'une grue de la sous-famille Gruinae (15)

a. Le crâne

Le crâne de ces oiseaux possède deux grandes orbites séparées par un septum inter-orbitaire fin et osseux, ouvert par une large fenêtre chez les *Gruinae*. La partie rostrale de la tête est allégée par la présence de sinus et d'alvéoles remplis d'air. Les os de la région occipitale des *Gruinae* possèdent la particularité d'être séparés par des espaces membraneux, des fontanelles. C'est aussi à cet endroit que la tête s'articule à l'atlas par un seul condyle, permettant aux oiseaux de tourner leur tête à 180°.

La mâchoire supérieure est composée de l'os prémaxillaire, de l'os nasal et d'une petite partie de l'os maxillaire. Elle contient le diverticule du sinus infraorbitaire et est très légère. Les oiseaux ont la particularité de pouvoir bouger leur mâchoire maxillaire grâce à une charnière élastique entre le bec supérieur et la partie rostrale du crâne, et grâce à l'os carré qui s'articule au crâne ainsi qu'à l'os prémaxillaire par l'arche jugale et par l'arche ptérygo-palatine. Lorsque la mâchoire inférieure se baisse, l'os carré subit une rotation transmettant une force horizontale aux arches permettant le pivotement dorsal du bec supérieur par la charnière élastique. Les *Gruinae* possèdent une mâchoire rynchokinestique, ce qui signifie que la charnière ne se trouve pas entre le bec et le crâne mais plus rostralement sur le bec. Ainsi, seul la portion la plus rostrale est mobile et non pas tout le bec supérieur.

La mandibule est constituée de cinq os : l'os dentaire, l'os angulaire, l'os surangulaire, l'os splénial et l'os préarticulaire. Ces os sont fusionnés caudalement avec l'os articulaire. (2, 9, 15, 23)

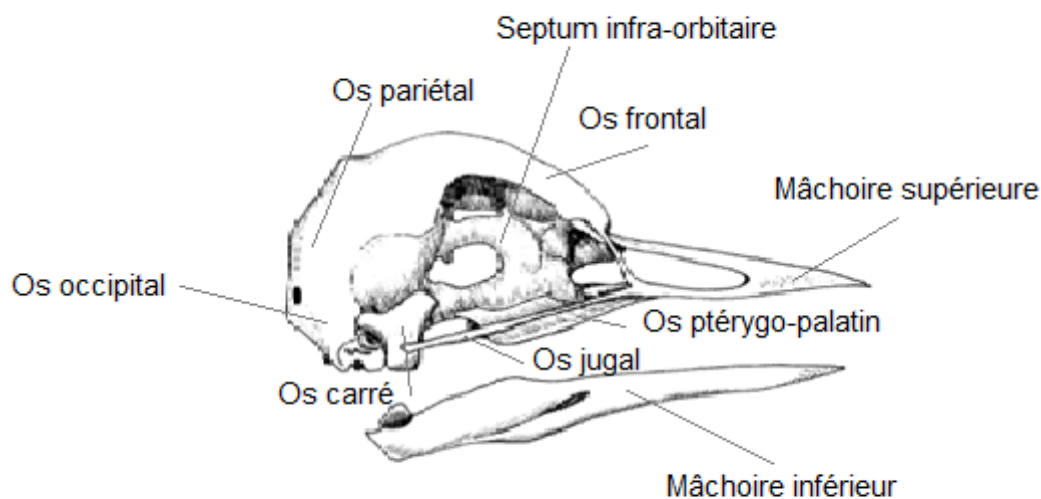


Figure 10 : Anatomie du crâne des Gruidae en vue de profil (15)

b. Le squelette axial

La colonne vertébrale des *Gruinae* est composée de dix-sept à vingt vertèbres cervicales. Celles-ci sont longues, en forme de sablier et capables d'une grande mobilité. Cranialement, l'atlas s'articule avec le condyle de l'os occipital et caudalement, les vertèbres cervicales possèdent des côtes rudimentaires où s'insèrent les muscles cervicaux.

Les vertèbres thoraciques sont au nombre de six à sept et possèdent toutes des côtes s'articulant avec le sternum. Entre chaque côte se trouvent des muscles intercostaux internes et externes. Le processus unciné est une particularité des côtes des oiseaux. Celui-ci s'étend caudo-dorsalement à chaque côte et est le lieu d'attache de muscles ventro-caudaux.

Le synsacrum est une particularité propre aux oiseaux. Il résulte de la fusion entre dix à vingt-trois vertèbres thoraciques, lombaires, sacrées et caudales. Il supporte la ceinture pelvienne et toute la masse de l'oiseau. Caudalement à celui-ci, se trouve la queue, courte, composée du pygostyle. Il résulte de la fusion des vertèbres caudales et supporte les plumes de la queue.

Le dernier os du squelette appendiculaire est le sternum, qui est beaucoup plus développé que chez les mammifères. Celui-ci est plat ventralement et possède un bréchet, encore appelé quille ou carène sternale, très développé chez les oiseaux volants et donc chez les *Gruidae*. En effet, le bréchet est la zone d'attache des muscles pectoraux et des muscles supracoracoïdes, importants pour le vol. Il est creusé crânialement afin d'y accueillir l'involution de la longue trachée des grues. (2, 9, 15, 23)

c. Les ailes

L'aile (figure 11) est une adaptation au vol du membre thoracique. Elle est rattachée au corps par la ceinture scapulaire, composée de la clavicule, la scapula et le coracoïde. Les deux clavicules sont fusionnées au niveau du processus furculaire, lié à l'apex de la carène sternale par un ligament. Elles permettent de maintenir les deux épaules écartées lorsqu'elles sont mobilisées. Le coracoïde est un os court et épais qui s'appuie sur le sternum. Il empêche les muscles de faire pression sur la cage thoracique lorsque l'aile descend en vol. La scapula est très différente des scapulas de mammifères. Elle est longue et fine, parallèle à la colonne vertébrale. Ces trois os sont réunis par des ligaments fibreux et délimitent une ouverture située dorsalement, appelée foramen tri-osseux dans lequel passe le tendon du muscle supracoracoïde.

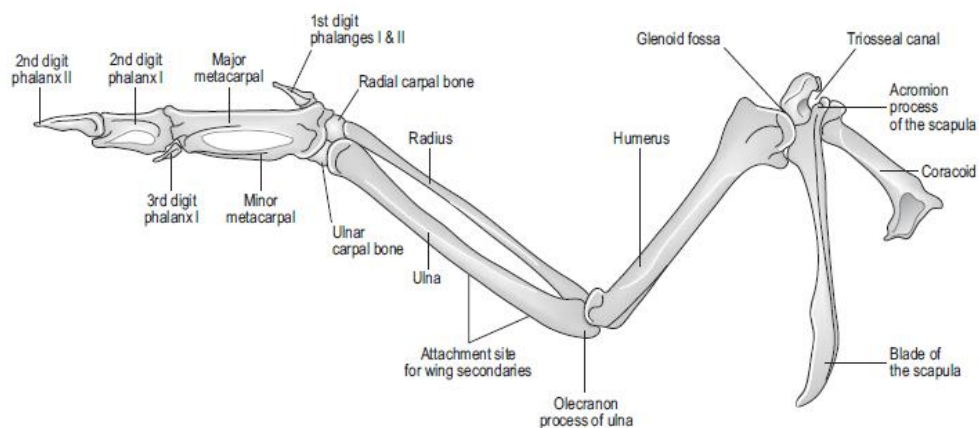


Figure 11 : Squelette d'une aile d'oiseau (23)

L'humérus est un os pneumatique dans lequel s'étend le sac aérien claviculaire. C'est un os court avec une crête pectorale développée pour l'insertion des muscles pectoraux. Deux muscles importants s'étendent contre cet os : crânialement le biceps brachial permettant la flexion de l'aile et caudalement le triceps brachial permettant l'extension de l'aile. Le radius et l'ulna sont ensuite articulés à l'humérus par le coude. L'ulna est plus gros et caudal au

radius et ces deux os ne peuvent effectuer des mouvements de pronation-supination. La main est le lieu d'insertion des rémiges primaires. Elle est composée du carpe ulnaire, du carpe radial, du carpométacarpe (métacarpe majeur et métacarpe mineur) et des trois doigts. Le doigt numéro un est appelé l'alula. Elle est composée d'une à deux phalange et permet de redresser les plumes qui y sont attachées et d'empêcher l'oiseau de chuter lorsqu'il vole doucement. Le doigt numéro deux est composé de deux phalanges et s'articule avec le métacarpe majeur alors que le troisième s'articule avec le mineur.

Les muscles du vol sont les muscles pectoraux et le muscle supracoracoïde. Ils représentent 20% de la masse totale de l'oiseau. Les muscles pectoraux, le profond et le superficiel, permettent d'abaisser l'aile tandis que le muscle supracoracoïde permet de relever l'aile. Le ligament protapagiale, s'étendant de la crête deltopectorale de l'humérus au processus extenseur du carpométacarpe permet de bloquer la main lorsque l'aile est en extension et de tendre la peau, indispensable pour la portance. (2, 9, 15, 23)

d. Les membres pelviens

Les membres pelviens (figure 12) sont rattachés au corps par la ceinture pelvienne qui est composée de la fusion de l'ischium, du pubis et de l'ilium. Ce dernier est fusionné au synsacrum. Chez les *Gruinae* comme chez la plupart des oiseaux, la ceinture est incomplète ventralement, probablement pour permettre le passage des œufs. Le fémur s'articule via l'acétabulum ainsi que via son trochanter et l'antitrochanter de l'ilium. Distalement au fémur se trouve le genou, similaire à celui des mammifères avec une patelle, deux ménisques, un ligament crânial et un caudal, et deux ligaments collatéraux. Le muscle fémorotibial est équivalent au quadriceps des mammifères et permet l'extension du genou.

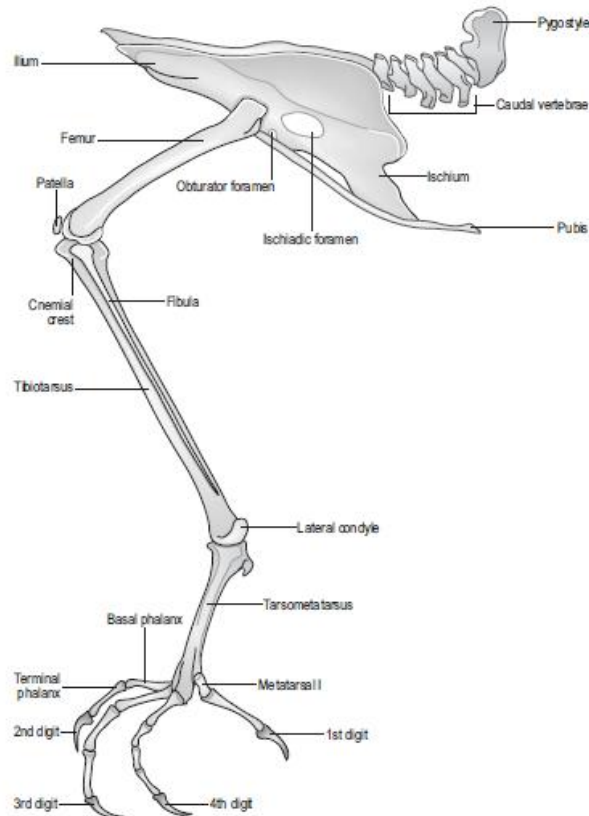


Figure 12 : Squelette du membre pelvien d'oiseau (23)

L'os suivant est le tibiotarse, qui résulte de la fusion du tibia et des tarse proximaux. C'est l'os le plus gros du membre pelvien. La fibula est très peu développée mais est présente latéralement au tibiotarse. Distalement se trouve le tarsométatarse composée des tarse 2, 3 et 4 et de leurs métatarses correspondants. Les doigts sont ensuite au nombre de quatre avec deux phalanges pour le doigt un, trois pour le doigt deux, quatre pour le doigt trois et cinq pour le doigt quatre. Les *Gruinae* sont anisodactyles et le doigt un est donc à l'opposé des trois autres doigts, caudalement. Cependant, contrairement à la plupart des anisodactyles, elles sont incapables de se percher. De plus, le doigt un est court et surélevé, permettant aux grues de pouvoir courir. (2, 9, 15, 23)

B. Cavité cœlomique

Les oiseaux possèdent une cavité cœlomique, comme les reptiles, qui n'est pas séparée par un diaphragme, au contraire des mammifères. On peut cependant distinguer 16 cavités distinctes et séparées chez les oiseaux adultes. Huit cavités sont les huit sacs aériens. Les huit autres cavités sont les cavités pleurales droite et gauche, la cavité péricardique, les quatre cavités hépatiques péritonéales droites et gauches, ventrales et dorsales ainsi que la cavité péritonéale intestinale (25).

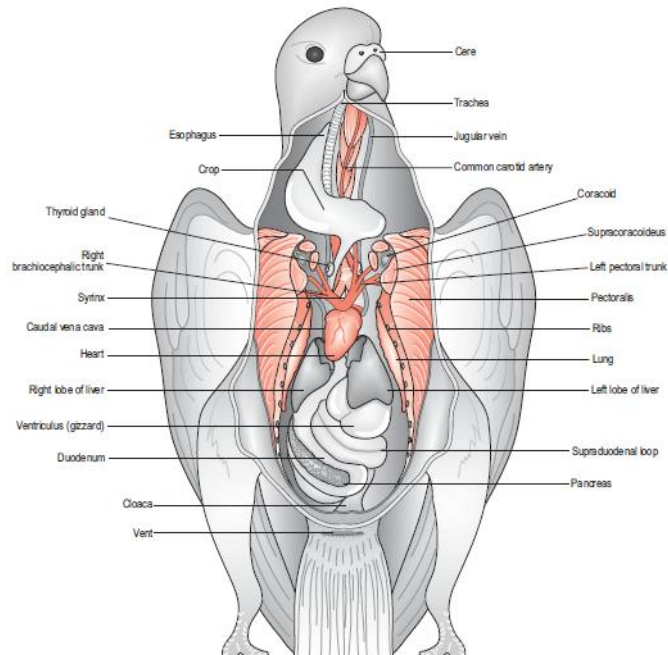


Figure 13 : Vue ventrale de la cavité coelomique d'un oiseau (23)

a. Système respiratoire

Le système respiratoire des oiseaux est très efficace afin de répondre à la demande importante en oxygène pour le vol. Les sacs aériens participent à la ventilation alors que les poumons sont le lieu d'échange des gaz. Cette ségrégation permet d'avoir un flux continu d'air dans les poumons et d'avoir une capacité d'absorption d'oxygène jusqu'à dix fois supérieure à celle des mammifères.

Le système respiratoire des Gruiformes débute par deux narines allongées, situées à mi-chemin sur le bec et traversant celui-ci de part et d'autre. Leur cavité nasale est séparée par un septum et est composée de trois cornets : les cornets nasaux rostral, moyen et caudal. Ces cornets sont cartilagineux et le plus grand est le moyen. Leur principal rôle est la thermorégulation de l'air, la filtration et l'olfaction. L'air passe ensuite par les choanes pour rejoindre l'oropharynx. Les oiseaux possèdent un sinus infraorbitaire situé ventromédialement aux orbites. Ce sinus possède des diverticules s'étendant dans l'os prémaxillaire, autour des oreilles, rostralement à l'orbite, et dans le bec inférieur. De plus il communique avec les cornets nasaux moyens et caudaux ainsi qu'avec les sacs aériens cervicocéphaliques.

Le larynx est situé à la base de la langue et est composé de quatre cartilages en grande partie ossifiés. Il n'est pas recouvert par l'épiglotte et la rima glottis, ouverture du larynx, empêche le passage de la nourriture via des muscles permettant la contraction ou la dilatation. Il n'a aucun rôle dans la phonation. La trachée des oiseaux est très longue et plus large proportionnellement que chez les mammifères. Elle est composée d'anneaux trachéaux complets et effectue une boucle à l'entrée du thorax chez les *Gruinae*. Chez la grue demoiselle, la trachée prend la forme d'un S en vue de profil (Figure 14). Ces boucles auraient un rôle dans la phonation en abaissant le ton de la voix. A la bifurcation

trachéobronchique se trouve la syrinx. C'est l'organe de phonation des oiseaux. Elle est composée de cartilages, parfois ossifiés, de muscles et de membranes. Le son est produit par la vibration de ces membranes lors de l'expiration.



Figure 14 : Vue dorsale de la trachée d'Anthropoides virgo (9)

La trachée se divise ensuite en deux bronches primaires qui traversent les poumons sur toute leur longueur et se terminent dans les sacs aériens caudaux. Chaque bronche donne naissance à quatre bronches secondaires : la médiadorsale, la médioventrale, la latérodorsale et la latéroventrale. Ces bronches secondaires donnent naissance aux parabronches qui possèdent des extensions appelées atria, lieu d'échange des gaz. Il existe deux types de parabronches : les bronches paléopulmoniques qui sont parallèles et les bronches néopulmoniques, organisées de manières plus irrégulière. Dans les premières, l'air ne circule que dans une seule direction alors que dans les secondes, l'air peut circuler dans les deux sens en fonction de la phase de la respiration. Les grues font parties des oiseaux possédant très peu de bronches néopulmoniques au contraire d'autres, comme les Galliformes, les pigeons ou les Passeriformes.

Les poumons des oiseaux ont un aspect spongieux, roses, et sont fermement attachés aux côtes dorsalement. Ils sont plus rigides que ceux des mammifères car ils contiennent plus de cartilage et sont moins compressibles. Ventralement aux poumons se trouve le septum qui les sépare des viscères de manière passive.

Les sacs aériens ont un rôle dans la ventilation et créent un flux unidirectionnel dans les poumons. Il n'y a aucun échange gazeux à leur niveau. La paroi est composée d'un épithélium squameux simple, fin, étirable et transparent. La plupart des espèces possèdent neuf sacs aériens : les deux cervicaux, le claviculaire, les deux thoraciques crâniens, les deux thoraciques caudaux et les deux abdominaux (figure 15). Toutes les bronches et les parabronches sont connectées à ces sacs aériens.

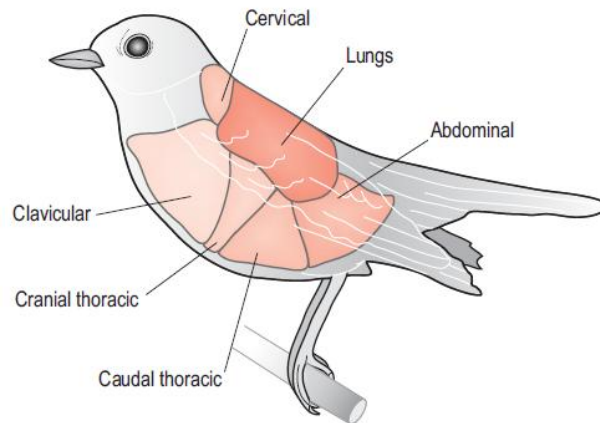


Figure 15 : Localisation des sacs aériens chez les oiseaux (23)

Les sacs aériens cervicaux se trouvent dorsalement à l'œsophage, entre les poumons. Ils possèdent des diverticules dans les vertèbres et communiquent avec le sinus infraorbitaire. Le sac claviculaire se situe à l'entrée du thorax. Il possède un diverticule autour du cœur et du sternum et un autre s'étend entre les os de la ceinture scapulaire et entre dans l'humérus proximal. Les sacs thoraciques sont situés dorso-latéralement à la cage thoracique. Enfin les sacs abdominaux s'étendent des poumons au cloaque. (9, 23, 25)

b. Système cardiovasculaire

Le cœur des oiseaux est situé cranialement dans la cavité coelomique, sur la ligne médiane, et ventralement aux poumons. Les lobes droit et gauche du foie englobent l'apex du cœur. Il possède, comme chez les mammifères, quatre chambres permettant de séparer le sang oxygéné du sang non oxygéné. La paroi musculaire du ventricule gauche est deux à trois fois plus épaisse que celle du ventricule droit. Comme chez les mammifères, le ventricule droit possède une forme de croissant. Une particularité du cœur des oiseaux est la valve atrioventriculaire droite. Elle ne possède pas de cordages tendineux et est constituée d'un épais volet musculaire. Les autres valves sont similaires à celles des mammifères, à la différence près de la valve atrioventriculaire gauche qui est tricuspide. Le système de conduction est lui aussi similaire à celui des mammifères avec un nœud sinoatrial, un nœud atrioventriculaire et un réseau de Purkinje. Le cœur est entouré d'un péricarde fin mais solide contenant une petite quantité de fluide.

Le système artériel des oiseaux débute par l'aorte (figure 16). La crosse aortique part sur la droite à la sortie du cœur et donne naissance à deux grands troncs brachiocéphaliques. Ils donnent naissance aux artères sous-clavières qui assurent l'approvisionnement sanguin aux ailes par l'artère brachiale et aux muscles du vol par l'artère pectorale. Les troncs brachiocéphaliques donnent aussi naissance aux carotides approvisionnant la tête. Celles-ci se logent dans des sillons des vertèbres cervicales. Les troncs brachiocéphaliques drainent 75% du volume sanguin aux ailes, à la tête et aux muscles pectoraux. Les membres pelviens sont approvisionnés en sang par les artères iliaques externes et les ischiatiques. Les reins

sont alimentés par l'artère rénale crâniale et par les artères rénales moyennes et caudales, provenant des artères ischiatiques.

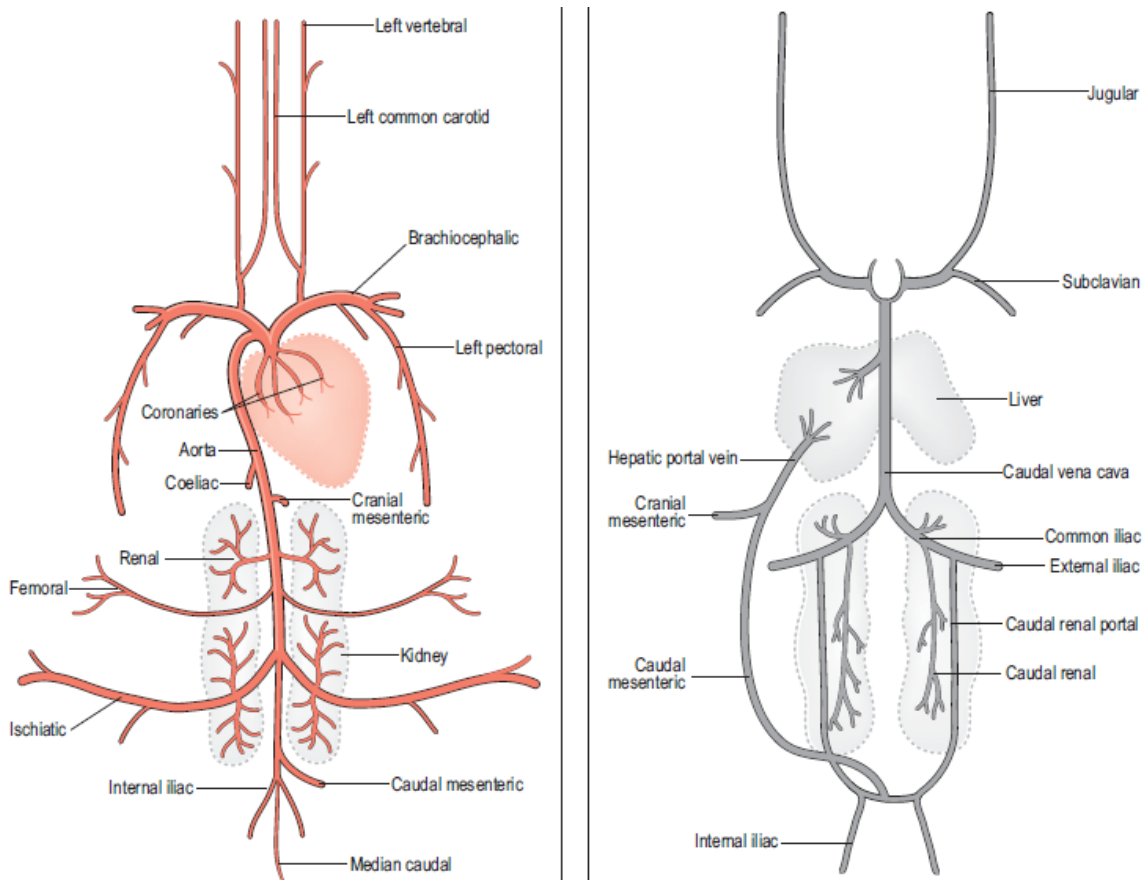


Figure 16 : Système artériel à gauche et veineux à droite des oiseaux (23)

Le système veineux des oiseaux (figure 16) possède aussi quelques particularités comme la présence de deux veines caves crânielles. Celles-ci drainent le sang des ailes et de la poitrine via les veines sous-clavières, et de la tête et le cou via les jugulaires. Les deux jugulaires possèdent des anastomoses à proximité de la mâchoire afin d'assurer le drainage sanguin même si l'une d'elle est comprimée par un mouvement du cou. La jugulaire droite est souvent plus grosse que la gauche. La majorité du volume sanguin du tractus gastro-intestinal, du pancréas et de la rate se déverse dans la veine porte hépatique et le foie. La veine mésentérique caudale est une particularité anatomique des oiseaux. Elle draine le sang du mésentère et du colon et est reliée à la veine porte hépatique ainsi qu'à la veine porte rénale. Le sang est capable de s'écouler dans les deux sens dans cette veine. Le système porte rénal draine le sang des membres pelviens, du colon et de tout le bas du corps avant de se jeter dans la veine cave caudale. Ce sang passe par les reins et y assure les deux tiers du flux rénal. En cas de stress, les valves des veines rénales et iliaques communes s'ouvrent pour éviter les reins et passer directement par la veine mésentérique caudale ou la veine cave caudale. (13, 23, 28)

c. Système digestif

Le système digestif des oiseaux (figure 13) est de faible volume et court pour ne pas alourdir l'oiseau lors du vol.

Le bec des oiseaux est le substitut des lèvres et des dents et constitue l'entrée de la cavité orale. Il est recouvert par une couche kératinisée appelée rhinothèque pour le bec supérieur et gnathothèque pour le bec inférieur. Le palais dur est incomplet avec une fissure centrale appelée choane connectant la cavité buccale avec la cavité nasale. Les oiseaux ne possèdent pas de palais mou. La forme de la langue est fortement variable en fonction de l'espèce et de l'alimentation de l'oiseau. Les glandes salivaires se trouvent sur le plafond, les côtés et le plancher de l'oropharynx. La salive est plus mucoïde que celle des mammifères pour aider à la lubrification lors du passage des aliments.

L'œsophage est un tube à paroi fine qui délivre les aliments de l'oropharynx au proventricule. Il possède des plis longitudinaux lui permettant d'être très extensible. On peut le diviser en deux parties : l'œsophage cervical et l'œsophage thoracique. Sur la partie cervicale distale, à l'entrée du thorax, se trouve une dilatation de l'œsophage appelée jabot. Il est généralement situé sur la droite et a une fonction de stockage des aliments. Il permet aussi de ramollir les aliments et de commencer légèrement la digestion grâce à la salive et à ses enzymes. Les Gruiformes ne possèdent pas de jabot.

L'estomac des oiseaux est constitué de deux parties distinctes. Le proventricule est la partie glandulaire et le ventricule, ou gésier, est la partie musculaire. Il n'y a pas de réel sphincter entre l'œsophage et le proventricule. Celui-ci est situé à gauche de la ligne médiane, en partie crâniodorsale du cœlome. Ses rôles sont la production du suc gastrique via un épithélium glandulaire et la propulsion des aliments dans le gésier via deux couches musculaires, une circulaire et une longitudinale. Une zone intermédiaire aglandulaire, ou isthme, fait la transition entre les deux parties de l'estomac. Le ventricule se situe à gauche de la ligne médiane, caudalement au sternum. C'est le lieu de la digestion par le suc gastrique et de la dégradation mécanique grâce à sa puissante musculature. Du gravier peut être ingéré et se retrouver dans le ventricule afin d'aider les muscles à la dégradation mécanique des aliments. Le pylore régule le passage de l'estomac au duodénum, comme chez les mammifères.

Les intestins possèdent une paroi fine composée d'une muqueuse, d'une sous-muqueuse, de deux couches musculaires et d'une séreuse. Le duodénum forme une boucle dans laquelle se trouve la plus grande partie du pancréas. C'est dans cette portion de l'intestin que se déversent les canaux pancréatiques et le conduit biliaire. Le duodénum aviaire a la particularité de posséder un péristaltisme normograde et rétrograde. Juste après la boucle ascendante débute le jéjunum. L'iléon commence au diverticule de Meckel, vestige du sac vitellin, jusqu'à la jonction recto-caecale. La majorité des oiseaux possèdent deux caeca, plus ou moins développés en fonction de l'espèce. Ils jouent un rôle dans la fermentation des matières végétales et dans l'équilibre hydrique. Entre la jonction iléo-caecale et le cloaque se trouve le colorectum dont le rôle principal est la réabsorption de l'eau. L'urine est remontée par des mouvements de rétropéristaltisme afin d'en réabsorber l'eau.

Le tube digestif se termine dans le cloaque. Il est constitué de trois compartiments séparés par des plis contractiles. Le coprodeum, dilaté en forme d'ampoule, stocke provisoirement

les fèces provenant du colorectum. Il est séparé par le pli corpro-urodeal de l'urodeum qui reçoit les uretères, les canaux déférents ou les oviductes. Le proctodeum, qui est le troisième compartiment, est le lieu de l'appareil copulateur mâle chez les espèces qui en possèdent un. Latéralement et ventralement, le cloaque est en rapport avec l'apex de la boucle duodénale, la terminaison de caeca et les anses jéjunales.

Le foie est l'organe le plus gros des oiseaux. Il est constitué de deux lobes séparés par une profonde incisure caudale et une incisure crâniale. Il repose sur le sternum sans le dépasser. Le ligament falciforme le relie au péricarde et à la surface du sternum. La vésicule biliaire repose dans une fosse à la surface dorsale du lobe droit. (9, 13, 23, 26)

d. Système immunitaire

Les organes lymphoïdes primaires des oiseaux sont le thymus, la moelle spinale et la bourse de Fabricius. Le thymus est présent chez l'oiseau adulte mais est de taille fortement réduite. Il est constitué de trois à huit lobes plats rosés, situé à proximité de la veine jugulaire dans le cou. La bourse de Fabricius est un diverticule du proctodeum qu'on ne trouve que chez les oiseaux. Elle possède sa taille maximale vers deux à trois mois puis commence à involuer et il ne reste qu'un vestige fibreux chez l'adulte.

Les organes lymphoïdes secondaires sont la rate, le tissu lymphoïde digestif et la moelle spinale. La rate est située entre le ventricule et le proventricule, dorsalement au lobe droit du foie. Elle est rose à rouge-brun et peut adopter différentes formes en fonction de l'espèce : rond, en forme de haricot, de virgule ou allongée et étroite. Les oiseaux ne possèdent pas de nœuds lymphatiques et possèdent deux vaisseaux lymphatiques thoraciques se déversant dans les veines jugulaires, à la base du cou. Les vaisseaux lymphatiques sont moins nombreux que chez les mammifères et suivent les vaisseaux sanguins. Le tissu lymphoïde digestif se trouve principalement dans l'oropharynx, les caeca et l'intestin grêle. (23, 27)

e. Système reproducteur

La taille des gonades des oiseaux est variable en fonction de la saison. En période de reproduction, leur taille augmente considérablement. Une fois la saison terminée, leur taille diminue afin de diminuer le poids des gonades.

L'appareil génital mâle est entièrement intra-abdominal. Les testicules ont une forme de haricots et sont situés latéralement à la veine cave caudale, caudalement aux glandes surrénales et aux poumons, et ventralement aux lobes crâniens des reins (figure 17). Chaque testicule est suspendu par le mesorchium, court repli péritonéal, et est partiellement entouré par le sac aérien abdominal. Leur couche externe est la tunique albuginée et ils ne sont pas lobulés, au contraire de ceux des mammifères. L'épididyme est situé dorsomédialement à la surface des testicules et n'est pas divisé en tête, corps et queue. Le canal déférent progresse parallèlement à l'uretère, en faisant de nombreux replis en zigzag (figure 17). Il se déverse dans l'urodeum, dorsalement. La plupart des espèces d'oiseau ne possède pas de

pénis et la reproduction se fait cloaque contre cloaque. Lorsqu'il est présent, le phallus se trouve ventralement dans le proctodeum.

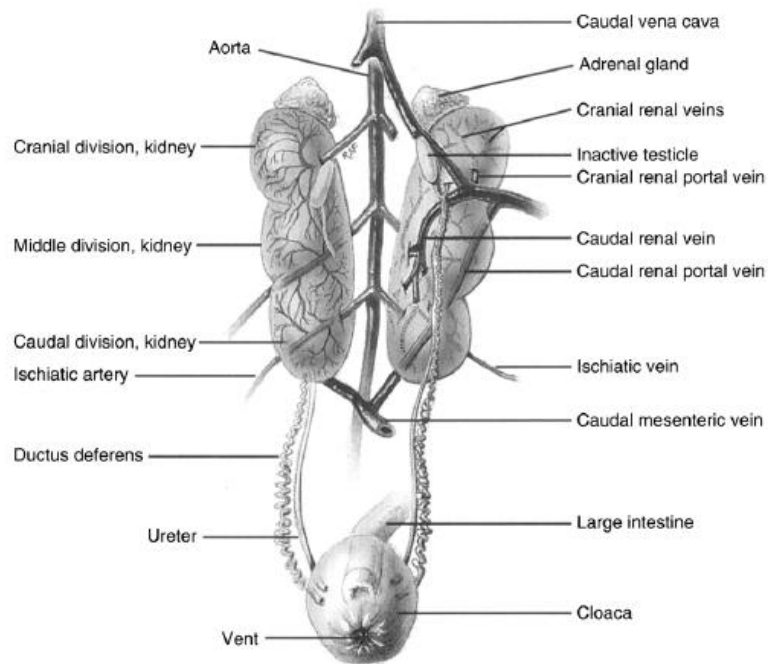


Figure 17 : Schéma du tractus urogénital mâle en vue ventrale et de sa position par rapport aux reins (26)

L'appareil génital femelle est asymétrique (figure 18). En effet, seul l'ovaire gauche et l'oviducte gauche sont fonctionnels. La partie droite est présente mais vestigiale et non-fonctionnelle, sauf chez quelques espèces n'appartenant pas aux Gruiformes. L'ovaire gauche se situe dans la partie crâniodorsale de la cavité coelomique et est en contact avec le pôle crânial du rein gauche, la partie caudale du poumon gauche, la glande surrénale gauche et parfois la droite. Son ligament suspenseur, le mesovarium, ne mesure que quelques millimètres. En phase de repos, l'ovaire a une structure ovale, allongée et aplatie alors qu'en période d'activité sexuelle, il ressemble à une grappe de raisin. Des follicules arrondis de tailles variées se projettent alors à partir de la surface ventrale de l'ovaire. L'apport sanguin est effectué à partir de l'artère rénale crâniale. L'oviducte assure la formation et le transport de l'œuf vers le cloaque. Il est situé dans le quart caudodorsal gauche de la cavité coelomique et est suspendu par un repli du péritoine, le mésosalpinx. Il est divisé en cinq parties, distinguables uniquement histologiquement : l'infundibulum, le magnum, l'isthme, l'utérus et le vagin. L'infundibulum est en forme de pavillon frangé à proximité de l'ovaire. C'est le lieu de réception et de fertilisation de l'œuf. Le magnum est la portion la plus longue de l'oviducte. Sa paroi est très épaisse car elle possède de nombreuses glandes qui sécrètent l'albumine. L'isthme sécrète aussi l'albumine et la membrane coquillière. L'utérus est le lieu de formation de la coquille et est séparé du vagin par un sphincter vaginal. Enfin, le vagin est le lieu de formation de la cuticule externe et s'ouvre dans l'urodeum. (9, 10, 13, 23, 26)

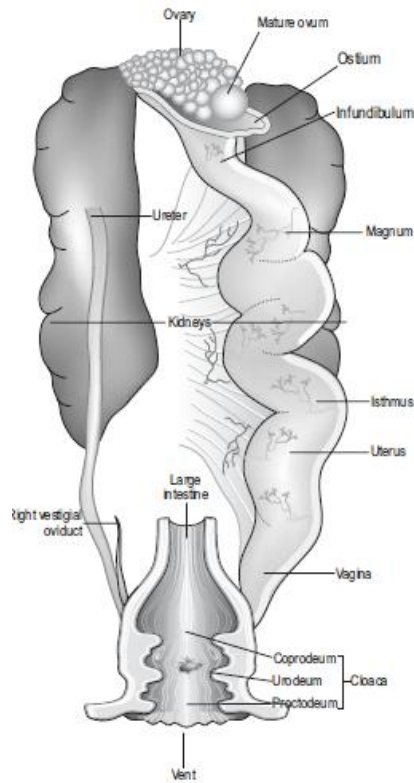


Figure 18 : Vue ventrale de l'appareil génital femelle des oiseaux (23)

f. Système urinaire

Le système rénal des oiseaux est composé d'une paire de reins et des uretères. Les reins sont relativement gros et représentent en général 1 à 2,6% du poids total de l'oiseau. Ils sont situés dans la fosse rénale de la partie ventrale du synsacrum. Ils s'étendent du pôle caudal des poumons jusqu'à l'extrémité caudal du synsacrum et sont entourés par les sacs aériens abdominaux et leurs diverticules. Les reins sont divisés en trois : le lobe crânial, le lobe moyen et le lobe caudal (figure 17). Chaque lobe est divisé en lobules et chaque lobule est composé d'un cortex et d'une médulla. Il existe deux types de néphrons chez les oiseaux, ceux avec et ceux sans anse de Henlé. Ceux avec anse de Henlé sont des néphrons de type mammifère et sont capables de concentrer l'urine. Ils ne représentent que 10 à 30% des néphrons. Ceux sans anse de Henlé sont de type reptilien et produisent de l'urine iso-osmotique.

Les uretères forment un réseau de branches secondaires se terminant dans les canaux collecteurs de chaque lobule. Ils débutent au pôle crânial de chaque rein puis cheminent en direction caudale le long de son bord ventromédial puis contre la paroi dorsale de l'abdomen. Ils s'abouchent à l'urodeum. Là, des mouvements de rétropéristaltisme remontent l'urine dans le coloproctum afin d'en réabsorber l'eau. L'urine est ensuite éliminée par le cloaque, mélangée aux fécès. (9, 13, 18, 23)

C. Système nerveux

Le système nerveux central est composé d'un petit cerveau, d'un cervelet bien développé pour la locomotion, d'une moelle épinière et de douze paires de nerfs crâniens identiques à ceux des mammifères. Le cerveau des oiseaux a évolué à partir du cerveau des reptiles. Le tronc cérébral est très similaire à celui des mammifères mais le prosencéphale a évolué différemment. Sa fonction reste identique. Par exemple, les cellules corticales traitant les informations sont à la surface chez les mammifères tandis qu'elles sont profondément ancrées dans le cortex chez les oiseaux et les reptiles. De plus, les oiseaux possèdent deux gros lobes optiques bien développés pour la vision. Les oiseaux sont lissencéphales.

La moelle épinière est entourée de trois méninges, la dure-mère, l'arachnoïde et la pie-mère, comme chez les mammifères. Cependant, la dure-mère se sépare de l'os formant un espace épidual en région thoracique et cervical. Cet espace est rempli de tissu gélatineux ayant probablement un rôle dans l'absorption des chocs. La moelle spinale possède la même longueur que la colonne et ne se termine donc pas en queue de cheval chez les oiseaux. Son plexus veineux vertébral interne est présent sur toute la longueur de la colonne et rejoint le système veineux rénal. Une autre particularité anatomique de la moelle spinale est la présence d'un corps à glycogène péri-épendymaire au niveau de la région lombosacrée.

Concernant le système nerveux périphérique, les *Gruinae* possèdent un plexus brachial plus gros que le plexus lombosacré. Les racines du plexus lombaire sont en contact direct avec la partie crâniale du rein, dorsalement, et le plexus sacré est incorporé dans la partie moyenne du rein. (9, 13, 23, 24)

D. Système endocrinien

Le système endocrinien est plutôt similaire à celui des mammifères. Il comporte notamment l'hypophyse, située ventralement au tronc cérébral et composée de l'adénohypophyse et de la neurohypophyse. La première est responsable de la sécrétion de nombreuses hormones agissant notamment sur le système reproducteur, sur la thyroïde et sur les surrénales. La neurohypophyse stocke la vasotocine et l'ocytocine produites par l'hypothalamus et agissant sur le rein, sur la contraction utérine et sur l'oviposition. Toujours dans la boîte crânienne, se trouve la glande pinéale, conique, située entre les hémisphères cérébraux et le cervelet. Elle est supposée avoir un effet sur les rythmes circadiens, sur le contrôle de la reproduction et sur la photoréception.

Les deux glandes thyroïdes se trouvent latéralement à la trachée juste cranialement à l'entrée du thorax et sont de forme ovoïde. Elles produisent la thyroxine (T4) et la triiodothyronine (T3) qui stimulent la croissance des plumes, contrôlent le métabolisme, régulent la chaleur, la croissance et les organes reproducteurs et augmentent la production d'œufs. Caudalement aux thyroïdes se trouvent les deux parathyroïdes. Elles sont petites, jaunes et souvent fusionnées aux thyroïdes. Elles sécrètent la PTH responsable du contrôle du métabolisme phosphocalcique. Caudalement aux parathyroïdes se trouvent les corps ultimobranchiaux qui sont des petites glandes roses et plates. Elles sécrètent la calcitonine dont le rôle est inconnu chez les oiseaux.

Les glandes surrénales sont petites, ovoïdes et se trouvent de part et d'autre de l'aorte et de la veine cave. Elles se situent cranialement aux reins et aux gonades. Le cortex et la médulla ne sont pas aussi bien délimités que chez les mammifères mais sécrètent les mêmes hormones : adrénaline et noradrénaline pour la médulla, corticostérone et aldostérone pour le cortex.

Le pancréas se situe dans le mésentère du duodénum et est souvent divisé en trois lobes. Il sécrète le glucagon, l'insuline, la somatostatine et le polypeptide pancréatique aviaire via respectivement les cellules alpha, beta, delta et PP. La somatostatine et le polypeptide pancréatique sont aussi sécrétés par les cellules gastrointestinales endocriniennes, situées dans l'épithélium du tractus digestif, surtout au niveau du pylore. Elles sécrètent aussi la sécrétine. (23)

E. Organes sensoriels

a. Vue

C'est le sens le plus important des oiseaux. Le diamètre de leur nerf optique est plus grand que celui de la moelle épinière cervicale. Ils discernent mieux les lumières et les couleurs que l'être humain. Ils sont aussi capables de voir des rayonnements ultraviolets ce qui leur permet de discerner la maturité des aliments, d'identifier des individus au sein de leur espèce ou de déterminer les sexes dans leur espèce, distinction que nous ne pourrions pas faire.

Les oiseaux possèdent une paupière supérieure, une paupière inférieure bien plus mobile et une membrane nictitante. Sur les paupières se trouvent les filoplumes, qui sont des plumes modifiées, agissant comme les cils des mammifères. Les mouvements oculaires de chaque œil sont indépendants et sont effectués par six muscles, comme chez les mammifères.

Le globe oculaire peut avoir plusieurs formes chez les oiseaux. Les *Gruinae* possèdent un œil de type aplati, le plus courant chez les oiseaux diurnes. Ils sont positionnés latéralement sur le crâne. L'œil de l'oiseau est composé de la même manière que celui de tous les vertébrés. La lumière passe par la cornée, l'humeur aqueuse, le cristallin, le corps vitreux et atteint enfin la rétine pour être transformée en signal nerveux. La particularité anatomique des oiseaux est la présence d'un anneau scléral osseux dans la partie antérieure du bulbe, permettant une protection supplémentaire, le globe n'étant que partiellement recouvert par l'orbite. L'iris des oiseaux peut se contracter et se dilater volontairement par la présence de deux muscles striés : le muscle sphincter irien et le muscle dilatateur de la pupille.

La rétine des oiseaux est avasculaire. Elle possède un peigne, structure plissée, pigmentée et richement vascularisée qui cache l'entrée du nerf optique. Les *Gruinae* étant diurnes, ils possèdent plus de cônes que de bâtonnets. Les cônes sont présents en plus grand nombre que chez les mammifères, permettant une acuité visuelle plus performante. Les oiseaux diurnes sont trichromates et perçoivent le bleu, le vert et le rouge. Des hypothèses de tétrachromatie ont été proposées se basant sur la présence de gouttelettes huileuses ayant un effet de filtre sur les cônes. La fovea des oiseaux est fortement concentrée en cône et est

profonde, permettant une grande acuité visuelle. Elle est centrale pour la plupart des espèces. (2, 9, 22, 23)

b. Ouïe

L'audition des oiseaux est la plus évoluée parmi les non-mammifères. Ils sont capables d'entendre des sons allant jusqu'à 20 kHz mais entendent mieux les sons entre 3 et 10 kHz. Le son entre par le méat acoustique externe, fait vibrer la membrane tympanique qui fait bouger l'unique osselet (la columelle). Celui-ci entraîne le mouvement de l'endolymphe au niveau de la fenêtre vestibulaire, détecté par les cellules ciliées de la membrane basilaire. Ces neurorécepteurs stimulent alors le nerf VIII qui transmet l'information au cerveau.

L'anatomie de l'oreille est fortement similaire à celle des mammifères avec une oreille externe, une moyenne et une interne. L'oreille externe est couverte par des plumes et ne possède pas de pavillon. Ces plumes sont dépourvues de barbules pour réduire les turbulences en vol qui pourraient diminuer la perception des sons. L'oreille moyenne ne possède qu'un seul osselet appelé la columelle qui transmet les vibrations du tympan à l'oreille interne. Elle est connectée à l'oropharynx par les trompes pharyngo-tympaniques. La cochlée, les canaux semi-circulaires, l'utricule et le saccule composent l'oreille interne. La cochlée est plus courte proportionnellement que chez les mammifères et ne s'enroule pas. Les canaux semi-circulaires sont plus grands et plus épais que chez les mammifères. (2, 9, 22, 23)

c. Olfaction

L'olfaction est bien moins développée chez les oiseaux que les deux précédents sens. Les odeurs sont détectées par la muqueuse nasale des cornets nasaux caudaux, siège des cellules de l'odorat. Elles sont connectées aux bulbes olfactifs du cerveau par le nerf crânial I. Les oiseaux ne possèdent pas d'organes voméronasal. (2, 9, 22, 23)

d. Toucher

Le sens du toucher est assuré, comme chez les mammifères, par des mécanorécepteurs, les corpuscules de Herbst, similaires aux corpuscules de Pacini. Ils se trouvent dans la peau recouverte de plume, sur les pattes, les pieds et le bec. Ces corpuscules permettent de détecter les changements dans les plumes et stimulent le toilettage. (2, 9, 22, 23)

e. Goût

Le goût prend naissance à la base de la langue, sur le plafond et le sol de l'oropharynx, au niveau de l'épithélium non-kératinisé. Les oiseaux possèdent beaucoup moins de bourgeons gustatifs que les autres vertébrés : 350 pour les perruches, 24 pour les pigeons, 9 000 à

10 000 pour l'Homme et 17 000 pour le lapin. En fonction de l'espèce, les oiseaux préfèrent les goûts salés ou sucrés et sont plus ou moins tolérant à l'acidité. (2, 9, 22, 23)

f.Sens migrateur

Certaines espèces de grues sont sédentaires et restent au même endroit toute l'année, alors que d'autres, comme la grue demoiselle, migrent chaque année au même lieu, en parcourant des milliers de kilomètres. Ces oiseaux ont un rythme circadien interne qui contrôle le départ de la migration. Celui-ci est influencé par la température extérieure, la durée du jour ainsi que la pression atmosphérique. Pour se diriger, les oiseaux utilisent de nombreux sens comme l'ouïe, l'olfaction, mais aussi la position des étoiles ou du soleil, les champs géomagnétiques, la polarisation de la lumière au lever et au coucher du soleil et les caractéristiques géographiques. Afin de détecter les champs magnétiques, les oiseaux semblent se reposer sur des microcristaux de magnétites situés près du bec ainsi que sur des cryptochromes de l'œil permettant de réaliser des réactions radicalaires en fonction de la couleur de la lumière. Les premiers semblent donner les informations sur la position de l'oiseau tandis que les seconds semblent donner les informations sur la direction à prendre. Les oiseaux ne se reposent pas que sur un seul sens pour s'orienter mais utilisent une combinaison de signaux afin de trouver leur chemin. (2, 9, 22, 23)

F. Tégument

a. La peau

La peau des oiseaux est très fine en comparaison à celle des mammifères afin d'en réduire le poids. Elle est faiblement attachée aux muscles sous-cutanés mais fortement attachée aux os. L'épiderme est composé d'une couche superficielle, le *stratum corneum*, et d'une couche profonde, le *stratum germinativum*. C'est une couche fine, exceptée au niveau des pieds et de la base du bec où elle n'est pas protégée par les plumes. Elle sécrète de manière holocrine un fin film lipidique qui aide à la maintenance des plumes. Le derme contient les follicules plumeux, les nerfs et les vaisseaux sanguins. Enfin, le tissu sous-cutané est composé de tissu conjonctif lâche et de tissu adipeux.

A partir de l'articulation intertarsale, la peau n'est plus recouverte par des plumes. On appelle cette partie de la peau le podotheca qui est recouvert d'écailles kératinisées. Les différentes couches de la peau sont plus épaisses et les phalanges distales sont kératinisées en ongles chez les Gruiformes. Les oiseaux possèdent de fins replis membraneux appelés patagia. Les plus importants pour le vol sont le patagium situé entre l'épaule et le carpe ainsi que le patagium situé entre le thorax et le coude (figure 19).

Une dernière particularité de la peau des oiseaux est la présence d'une plaque incubatrice lors de la saison de reproduction. Elle se situe entre la partie caudale du sternum et le pubis. Sous l'influence des œstrogènes, cette zone du corps perd ses plumes, s'épaissit et augmente sa vascularisation pour apporter de la chaleur aux œufs couvés. (9, 23)

b. Les glandes cutanées

Les oiseaux ne possèdent que trois glandes cutanées : la glande uropygienne, les glandes du conduit auditif externe et les glandes de la face ventrale de l'abdomen. La glande uropygienne est une glande holocrine bilobée située à la base de la queue en région dorsale. Elle est utilisée par l'oiseau lors de sa toilette et sécrète une solution huileuse. Celle-ci jouerait un rôle dans la maintenance de l'intégrité des plumes, aurait une fonction bactériostatique, antiparasitaire et imperméabilisante. Les glandes du conduit auditif externe sécrètent une substance cireuse tandis que les glandes de la face ventrale de l'abdomen sécrètent du mucus dont le rôle est encore inconnu.

En l'absence de glandes sudoripares, la perte de la chaleur se fait par la peau et par évaporation via le système respiratoire. (9, 23)

G. Les plumes

Le plumage d'un oiseau peut peser deux à trois fois plus que la totalité de ses os. Il joue un rôle vital dans la protection, l'isolation, l'imperméabilisation, le vol et est souvent utilisé pour faire la cour. C'est une structure tégumentaire avasculaire une fois mature mais contenant une artère et une veine lors de la croissance. On appelle alors ces plumes les « plumes de sang ».

La plume classique est constituée d'un tube central rigide divisé en un calamus proximal et un rachis distal. Le rachis porte des barbes qui s'étendent à 45° qui elles-mêmes portent des barbules, portant des barbicelles distalement. Ces deux dernières sont un système d'accrochage permettant la cohésion des barbes, importantes pour le vol. La partie proximale du calamus se termine dans le follicule plumeux. Ce dernier est une invagination de l'épiderme reliée aux follicules adjacents par des muscles lisses qui permettent de relever ou abaisser les plumes. (9, 15, 23)

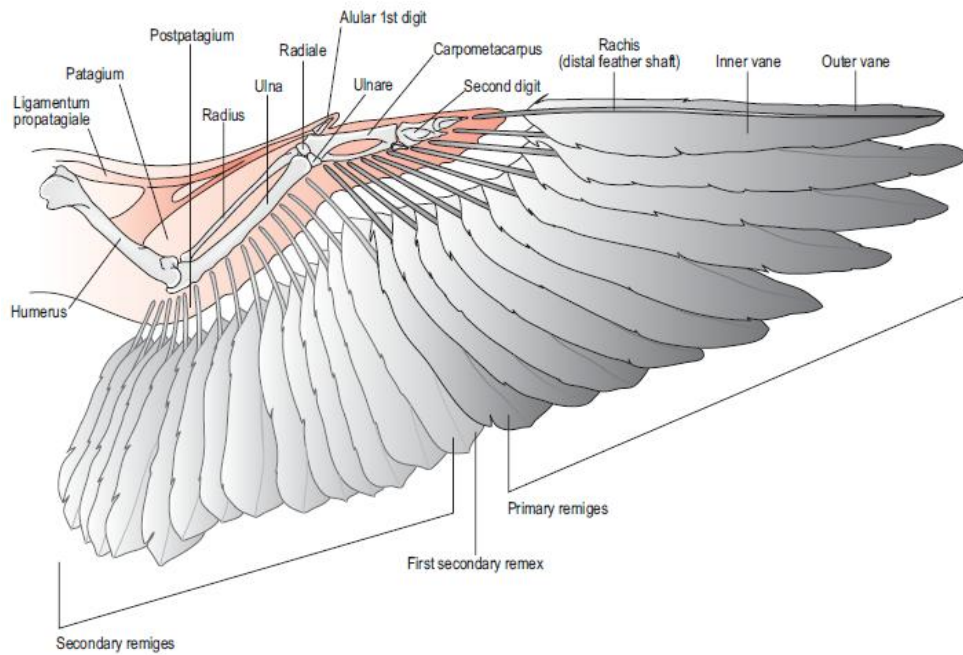


Figure 19: Vue ventrale d'une aile d'oiseau montrant l'insertion des rémiges (23)

On distingue différents types de plumes sur les oiseaux. Les plumes de contour sont des plumes présentes sur les ailes, la queue et le corps. Parmi ces plumes on distingue les rémiges (figure 19) et les rectrices. Les *Gruidae* possèdent dix rémiges primaires fonctionnelles et une onzième vestigiale. Elles sont fortement attachées à la face dorsale du carpe et aux phalanges. Elles possèdent 18 à 25 rémiges secondaires, les plus internes étant les plus longues. Elles sont attachées à la face postérieure de l'ulna. Les rectrices sont au nombre de six paires chez les grues et sont rattachées au pygostyle. Elles permettent à l'oiseau de contrôler la direction du vol et de freiner. Les autres plumes présentes chez les oiseaux sont le duvet permettant l'isolation thermique, les semi-plumes présentes sur les tarsi, les filoplumes et les vibrisses agissant comme un organe sensitif.

La longueur des os ainsi que le nombre et la longueur des rémiges définissent le type d'aile de l'oiseau. Chaque type d'aile donne à l'oiseau certaines capacités de vol. Les ailes des *Gruidae* sont longues et larges avec des interstices entre les rémiges des extrémités. Ces interstices permettent de diminuer les turbulences de l'air tout en augmentant la portance. Ce type d'aile permet aux oiseaux de s'élever dans les airs à des vitesses faibles.

3^{ème} partie : LE PROJET, L'ATLAS
TOMODENSITOMETRIQUE DE LA GRUE DEMOISELLE

I. Présentation du site internet

L'atlas scanner d'*Anthropoides virgo*, la grue demoiselle, est disponible à l'adresse suivante :

<http://www.anatimagerie-envt.fr/atlas/>

Ce site internet est gratuit et accessible à tous. Il a pour objectif de mettre à disposition des images tomodensitométriques légendées d'animaux sains. Il représente un outil simple pour les praticiens qui veulent se familiariser avec la lecture d'images tomodensitométriques. Il est tenu par l'Unité Pédagogique d'Anatomie et d'Imagerie de l'École Vétérinaire de Toulouse et regroupe des clichés concernant le chien, le chat et certains nouveaux animaux de compagnie, comme la tortue. L'atlas de la grue demoiselle est le premier d'un animal de faune sauvage exclusivement, concernant uniquement la médecine zoologique.

II. Réalisation de l'atlas tomodensitométrique de la grue demoiselle

A. Examen clinique de la grue

La grue demoiselle utilisée pour réaliser cet atlas est un oiseau adulte d'âge et de sexe inconnu provenant du zoo des 3 vallées, dans le Tarn. Cet oiseau a été choisi car il ne présente aucune affection et semble en bonne forme.

Un examen clinique a été effectué afin de pouvoir envisager l'anesthésie de l'oiseau, indispensable pour la réalisation du scanner. A l'examen à distance, la grue ne présentait aucune anomalie majeure. Son plumage était en bon état et la grue présentait des plaies superficielles cutanées en court de cicatrisation au niveau de la face crâniale des deux mains.

Étant un oiseau et un animal de zoo, une contention manuelle par une aide était indispensable pour la réalisation de l'examen rapproché. Celui-ci devait être rapide afin de limiter au maximum le stress de l'animal. Pour la contention, l'aide portait l'oiseau sous son bras, plaquant les ailes contre le corps avec son avant-bras et son thorax et tenant les longues pattes avec sa main. De son autre main, l'aide tenait la tête de l'oiseau afin d'en contrôler le bec. A l'examen rapproché, la grue présentait un bon état d'embonpoint avec un score corporel de 3 sur 5. Celui-ci se détermine en palpant la couche musculaire de part et d'autre du bréchet (figure 20), 1 étant un état de maigreur extrême et 5 étant l'obésité.

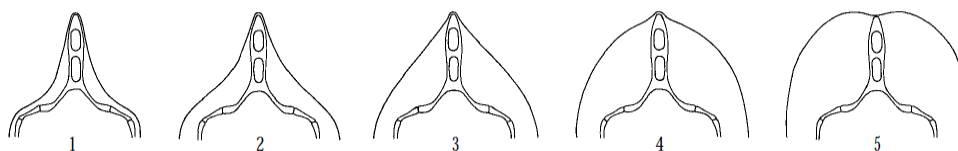


Figure 20 : Scores corporels en fonction de l'état d'embonpoint : coupe transversale du sternum et des pectoraux (12)

A l'ouverture du bec, la grue ne présentait pas d'anomalies ni de déshydratation. La palpation du cou, des pattes et des ailes était normale. La palpation cœlomique ne présentait aucune anomalie, était souple et non douloureuse. L'auscultation cardiaque ne présentait aucune anomalie. Il n'y avait pas de souffle et le rythme était régulier. La fréquence cardiaque était de 200 battements par minute. A l'auscultation des poumons et des sacs aériens, les bruits respiratoires étaient normaux. La fréquence était de 24 mouvements par minute. L'examen clinique ne montrant aucune anomalie, l'anesthésie de la grue a pu être effectuée. (12)

B. Anesthésie

L'acquisition des images scanner se fait via une procédure de très courte durée mais nécessite une immobilité parfaite de l'animal, d'où le besoin de les anesthésier.

La procédure n'est pas douloureuse et l'anesthésie ne nécessite donc pas de valence analgésique. De plus, étant un examen court, un anesthésique à effet rapide et rapidement éliminé peut être utilisé. Les objectifs de l'anesthésie dans ce cas sont la narcose et la myorelaxation. Le protocole choisi comportait une prémédication à base de butorphanol à 0,5 mg/kg en intramusculaire, dans les muscles pectoraux. Après dix minutes, l'induction a été réalisée au masque à l'isoflurane. La grue a ensuite été intubée à l'aide d'une sonde sans ballonnet. En effet, la trachée des oiseaux étant composée d'anneaux cartilagineux complets, elle est beaucoup moins distensible que la trachée des mammifères. Il ne faut donc pas utiliser de ballonnet, au risque de léser la trachée. La maintenance de l'anesthésie a été effectuée avec de l'isoflurane 2% porté à un débit de 1 L/min par un mélange gazeux à part égales d'oxygène (O₂) et de dioxyde d'azote (NO₂).

Une fois anesthésiée, la grue a été placée en décubitus ventral, la tête et les pattes allongées (figure 21).

Le monitoring de l'anesthésie s'est fait par surveillance de la fréquence respiratoire par visualisation des mouvements respiratoires et par mesure de la fréquence cardiaque par l'auscultation.

Une fois l'examen terminé, l'anesthésie a été arrêtée. Le réveil a été rapide et calme. Dès le retour des signes de conscience, l'oiseau a été placé dans un box isolé, au calme et à l'obscurité afin de diminuer son stress. Il a été replacé avec ses congénères au zoo dès le lendemain. (7, 12)



Figure 21 : Grue demoiselle anesthésiée et placée en décubitus ventral sur la table du scanner.

C. Scanner utilisé et choix du protocole d'acquisition

L'examen a été réalisé sur un modèle Brightspeed 16 coupes produit par General Electric, mis à disposition par le service d'Imagerie Médicale de L'École Nationale Vétérinaire de Toulouse.

D. Reconstitution des images dans le mode de visualisation MPR

Une fois l'examen effectué, un traitement informatique est nécessaire pour visualiser les images sous différents modes. Le mode MPR, pour MultiPlanar Reconstitution, a été choisi. Celui-ci rend possible la construction d'images multi-planaires. Il permet d'obtenir à partir des informations recueillies en coupe transversale des images reconstruites dans les plans sagittaux et dorsaux.

III. L'atlas tomodensitométrique

A. Mise en forme des planches de l'atlas

L'intégralité des images obtenues par l'examen tomodensitométrique a été visualisé via le logiciel RadiAnt DICOM Viewer afin d'identifier les structures anatomiques selon les différentes fenêtres (osseux, pulmonaire, tissus mous). Une fois la reconnaissance effectuée, les images en coupe transversale ainsi qu'une en coupe sagittale ont été sélectionnées. Chaque image est localisée sur le topogramme de face et de profil afin de faciliter la compréhension.

Les structures anatomiques ont ensuite été légendées en fenêtre osseuse pour le squelette, tissus mous pour les organes et pulmonaire pour l'arbre respiratoire. La mise en place des légendes a été effectuée grâce au logiciel PowerPoint.

B. Exemples d'images mises en ligne

a. Exemples d'images en fenêtre tissu osseux



Figure 22 : planche 8/21, fenêtre tissu osseux

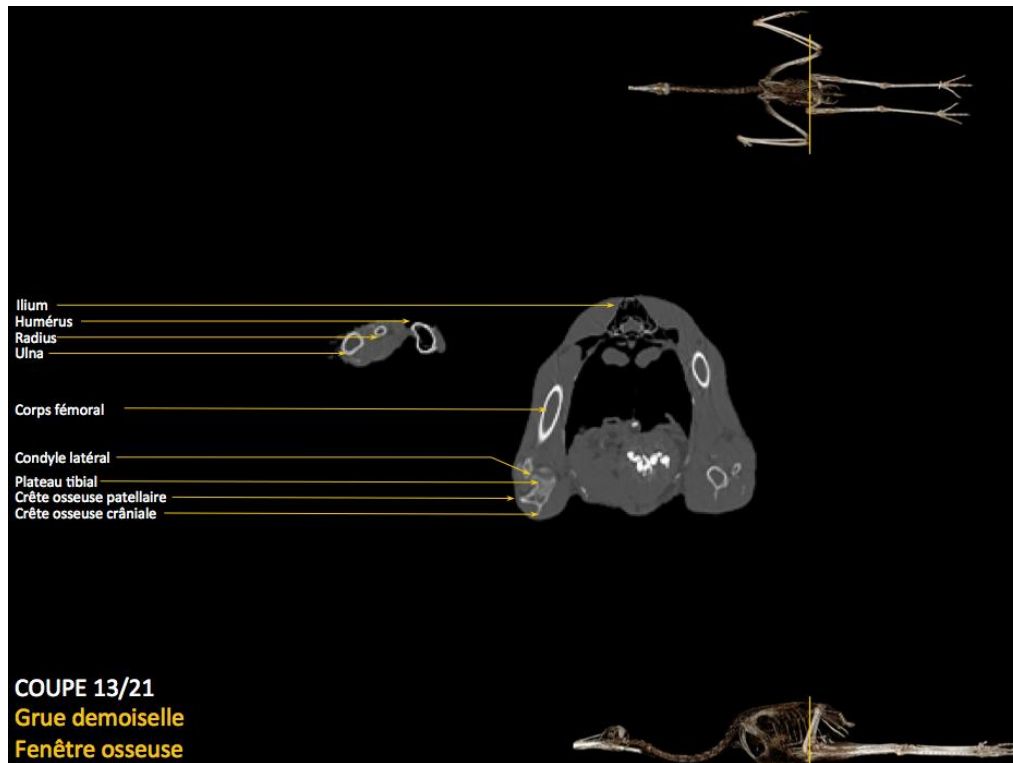


Figure 23 : planche 13/21, fenêtre tissu osseux

b. Exemples d'images en fenêtre tissu mou

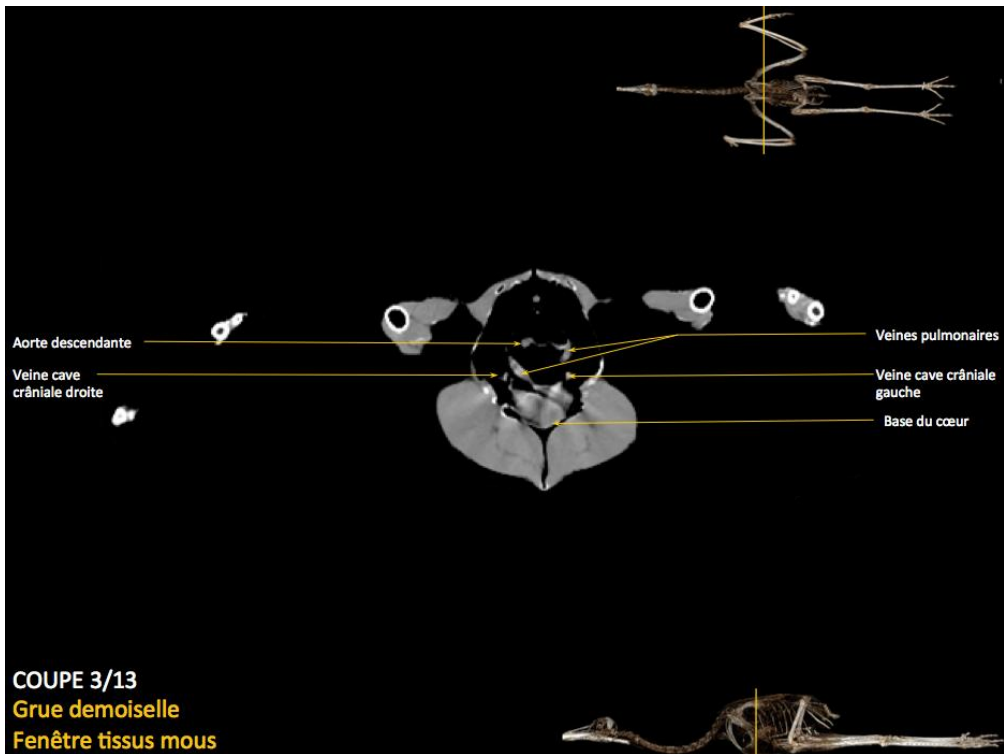


Figure 24 : planche 3/13, fenêtre tissu mou

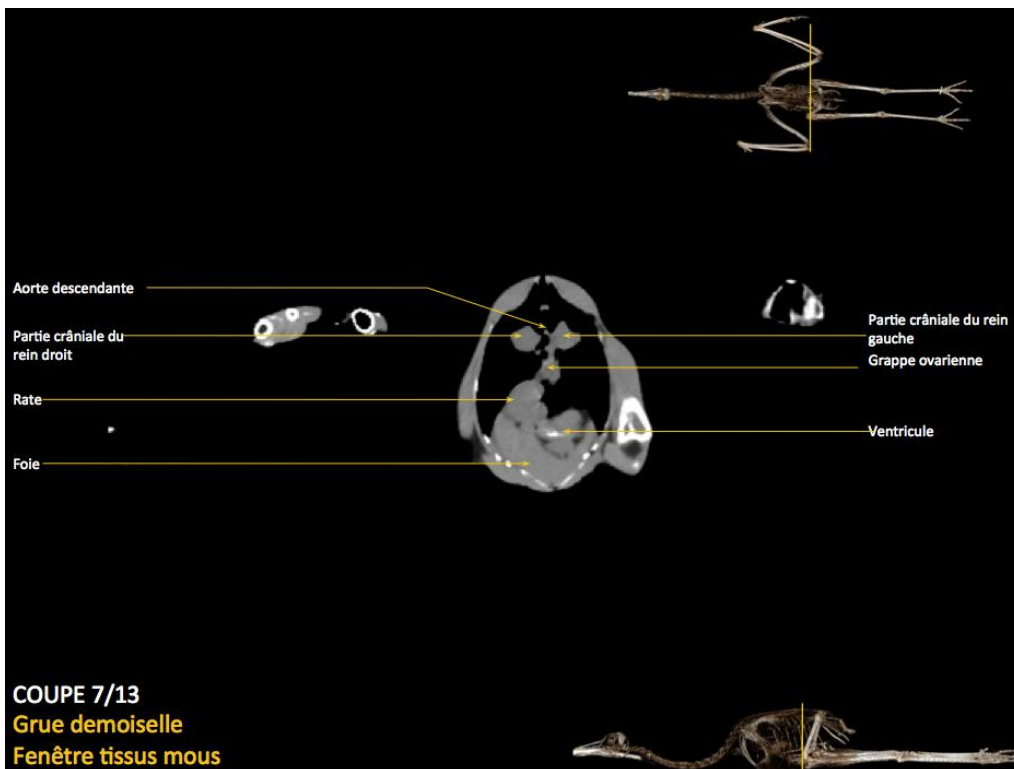


Figure 25 : planche 7/13, fenêtre tissu mou

c. Exemple d'images en fenêtre pulmonaire

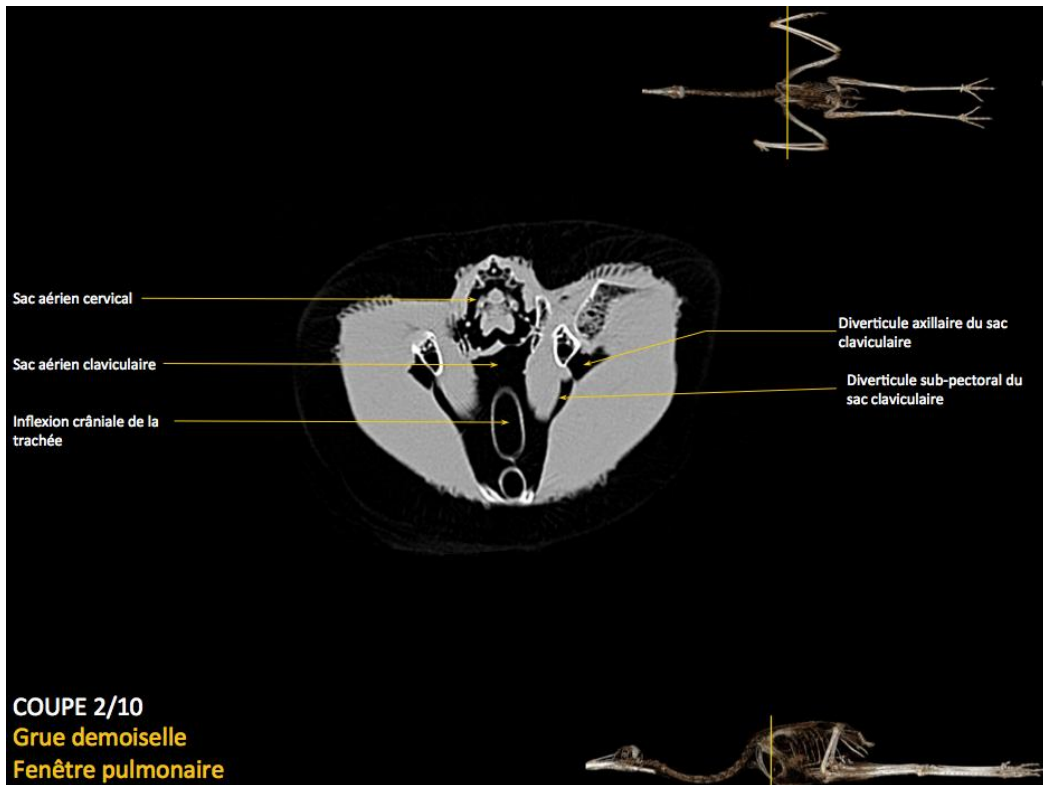


Figure 26 : planche 2/10, fenêtre tissu pulmonaire

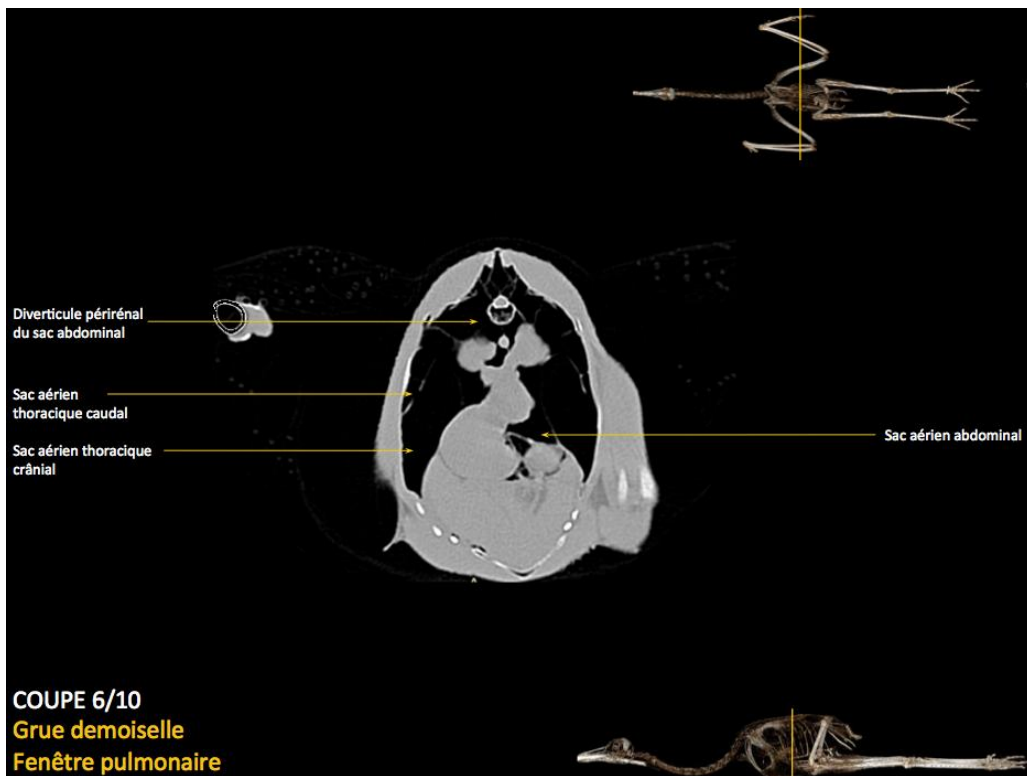


Figure 27 : planche 6/10, fenêtre tissu pulmonaire

Conclusion

Les grues sont des oiseaux très appréciés et courants dans les parcs zoologiques. Il est donc important pour les vétérinaires praticiens en médecine zoologique et des nouveaux animaux de compagnie de connaître ces espèces afin de pouvoir les soigner. Les examens complémentaires possibles sont nombreux sur ces oiseaux. L'imagerie médicale est un examen de choix étant donné leur grande taille. Cependant il est indispensable de bien connaître l'anatomie atypique des oiseaux, et plus particulièrement des grues, afin de pouvoir l'interpréter correctement.

L'examen tomodensitométrique est en constante progression. Les images obtenues sont de meilleure qualité et les tarifs des scanner sont désormais plus abordables pour la médecine vétérinaire. L'obtention d'images non superposées est un avantage considérable par rapport à la radiographie et est tout aussi rapide. De plus, l'anesthésie de ce type d'oiseau est indispensable pour la réalisation de ces deux examens. Cependant les vétérinaires praticiens ont souvent moins d'expérience pour la lecture des images scanners que pour les images radiographiques.

Cet atlas a pour but de familiariser les praticiens à la lecture de scanners d'oiseaux et de donner une base de référence pour la grue demoiselle. Il peut aussi servir de référence pour interpréter un scanner de grue autre que la grue demoiselle, à condition de bien connaître les différences anatomiques au sein des *Gruidae*, aussi subtiles soient-elles.

AGREMENT SCIENTIFIQUE

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

Je soussigné, **Guillaume LE LOC'H**, Enseignant-chercheur, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, directeur de thèse, certifie avoir examiné la thèse de **Carole LERCH** intitulée « **Mise en ligne d'un atlas tomодensitométrique d'images normales de la grue demoiselle (*Anthropoides virgo*)** » et que cette dernière peut être imprimée en vue de sa soutenance.

Fait à Toulouse, le 5 octobre 2018
Docteur **Guillaume LE LOC'H**
Maître de Conférences
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse



Vu :
La Directrice de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Isabelle CHMITELIN



Vu : **17/10/18** -
Le Président du jury :
Professeur **Isabelle BERRY**


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

Mlle Carole LERCH
a été admis(e) sur concours en : 2013
a obtenu son diplôme d'études fondamentales vétérinaires le : 04/07/2017
a validé son année d'approfondissement le : 06/09/2018
n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.

Vu et autorisation de l'impression :
Président de l'Université
Paul Sabatier
Monsieur **Jean-Pierre VINEL**


Le Président de l'Université Paul Sabatier
par délégation,
La Vice-Présidente de la CFVU

Régine ANDRE-OBRECHT

Bibliographie

1. BARTHEZ P (1997). *Technique et radiologie des petits animaux*. Paris : CNCSPA-PMCAC Editions. 179 p. ISBN 2-9508885-2-6.
2. BAUMEL J.J., KING A.S., BREAZILE J.E., EVANS H.E., VANDEN BERGE J.C. (1993). *Handbook of Avian Anatomy : Nomina anatomica avium*. 2^{ème} édition. Publication N°23, Publication de Nuttall Ornithological Club Cambridge, Mass. 779 p.
3. BirdLife International (2016). *Anthropoides virgo*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2016* [en ligne]. Disponible sur : <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-3.RLTS.T22692081A86179341.en> (consulté le 04/06/2018).
4. BirdLife International (2016). Demoiselle Crane *Anthropoides virgo* [en ligne]. Disponible sur <http://datazone.birdlife.org/species/factsheet/demoiselle-crane-anthropoides-virgo> (consulté le 12/06/2018).
5. BRICAULT I (2016). *Principes de la tomodensitométrie* [en ligne]. Disponible sur <http://cerf.radiologie.fr/principes-de-la-tomodensitom%C3%A9trie-technologie-actuelles> (consulté le 05/04/2018).
6. BUSHBERG J. T, SEIBERT J.A, LEIDHOLDT JR E.M, BOONE J.M (2012). *The Essential Physics of Medical Imaging*. 3^e édition. Philadelphia : Lippincott Williams & Wilkins. 1043p. ISBN 978-0-7817-8057-5.
7. CARPENTER J.W (2012). *Exotic Animal Formulary*. 4^{ème} édition. Saint Louis, Missouri : Elsevier Saunders. 744 p. ISBN 978-1437722642.
8. CITES. *La CITES à l'œuvre* [en ligne]. Disponible sur : <https://cites.org/fra/app/appendices.php> (consulté le 11/06/2018).
9. COLES B.H (2007). *Essentials of Avian Medicine and Surgery*. 3^{ème} édition. Publié par Blackwell Publishing Ltd. 406 p. ISBN 978-1-4051-5755-1.
10. CROSAT L, GERALCH H, BURCKLE M (2003). Physiology, diagnosis and diseases of the avian reproductive tract. *The Veterinary Clinics: Exotic Animal Practice*, **6**, 57-83.
11. DEL HOYO J., COLLAR N.J., ELLIOTT A., FISHPOOL L.D.C. (2014). *HBW and BirdLife International Illustrated Checklist of the Birds of the World*. Volume 1. Barcelona and Cambridge : Lynx Edicions and BirdLife International. 904p. ISBN 978-84-96553-94-1.
12. ELLIS D.H., GEE G.F., MIRANDE C.M (1996). *Cranes : Their Biology, Husbandry, and Conservation*. Etats-Unis : Hancock House Pub Ltd. 307p. ISBN 978-0888393852.
13. HARRISON G.J, LIGHTFOOT T.L (2006). *Clinical Avian Medicine*. Volume 1 et 2. Floride : Spix Publishing. 1008 p. ISBN 00-9754994-0-8.
14. International Crane Fondation. *Demoiselle Crane, Anthropoides virgo* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.savingcranes.org/species-field-guide/demoiselle-crane/> (consulté le 11/06/2018).

15. JOHNSGARD P.A (1983). *Cranes of the World*. Bloomington : Indiana University Press. 257 p. ISBN 0-253-11255-9.
16. LAVAUD A (2013). Mise au point d'un atlas en ligne tomодensitométrique et IRM de l'encéphale du chien sain. Thèse de doctorat vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, 66 p.
17. LE-DANTEC D (2004). *Grue demoiselle, Grus virgo, demoiselle crane* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.oiseaux.net/photos/john.gould/grue.demoiselle.0.html#espece> (consulté le 11/06/2018).
18. LIERZ M (2003). Avian renal disease : pathogenesis, diagnosis, and therapy. *Veterinary Clinics: Exotic Animal Practice*, **6**, 29-55.
19. LISBONA A (2002). *Le scanner : Principe - Technologie - Applications* [en ligne]. Nantes : Institut de cancérologie de l'Ouest - René Gauducheau. 72 p. Disponible sur : <http://e2phy.in2p3.fr/2002/presentations/lisbona.pdf> (consulté le 05/04/2018).
20. MEINE C.D., ARCHIBALD G.W. (1996). *The Cranes : Status Survey and Conservation Action Plan*. Gland et Cambridge : UICN. 294p. ISBN 2-8317-0326-3.
21. MERTAUGH M. (2004). *Anthropoides virgo* [en ligne]. Animal Diversity Web. Disponible sur http://animaldiversity.org/accounts/Anthropoides_virgo/ (consulté le 11/06/2018).
22. NOIRE N (2008). *Ophthalmologie des oiseaux de compagnie et des oiseaux sauvages*. Thèse de doctorat vétérinaire, Faculté de médecine de Nantes, 141 p.
23. O'MALLEY B. (2005). *Clinical Anatomy and Physiology of Exotic Pets*. 1^{ère} édition. Allemagne : Elsevier Saunders. 272 p. ISBN 0-7020-2782-0.
24. OROSZ S.E (1996). Principles of Avian Clinical Neuroanatomy. *Seminars in Avian and Exotic Pet Medicine*, **Volume 5**, Numéro 3, 127-139.
25. OROSZ S.E, LICHTENBERGER M (2011). Avian Respiratory Distress : Etiology, Diagnosis, and Treatment. *TheVeterinary Clinics: Exotic Animal Practice*, **14**, 241-255.
26. POLLOCK C.G, OROSZ S.E (002). Avian reproductive anatomy, physiology and endocrinology. *TheVeterinary Clinics : Exotic Animal Practice*, **5**, 441-474.
27. POWERS L.V (2000). The Avian Spleen : Anatomy, Physiology and Diagnostics. *Compendium on Continuing Education for the Practising Veterinarian*, **22**, 838-843.
28. STRUNK A, HEATHER WILSON G (2003). Avian cardiology. *TheVeterinary Clinics : Exotic Animal Practice*, **6**, 1-28.
29. World Association of Zoos and Aquariums WAZA. *Demoiselle crane : Grus virgo* [en ligne]. Disponible sur <http://www.waza.org/en/zoo/visit-the-zoo/storks-herons-flamingos-cranes-and-relatives/grus-virgo> (consulté le 14/06/2018).

Toulouse, 2018

NOM : LERCH

PRENOM : CAROLE

TITRE : MISE EN LIGNE D'UN ATLAS TOMODENSITOMETRIQUE D'IMAGES NORMALES DE GRUE DEMOISELLE (*Anthropoides virgo*)

RESUME : La réalisation d'examens tomodensitométriques est désormais courante en médecine vétérinaire, en particulier pour les animaux de compagnie. Cependant, ses principes théoriques et son interprétation sont encore limités du fait de son utilisation récente, en particulier pour les espèces aviaires. Or les oiseaux sont des animaux fréquemment présentés dans les parcs animaliers ou détenus en tant qu'animaux de compagnie. Cette thèse concerne uniquement la grue demoiselle, espèce fréquemment rencontrée en parc zoologique. Le but de l'auteur est de fournir un atlas légendé de coupes tomodensitométriques d'images saines d'une grue demoiselle. Cet atlas est présenté sous la forme de trois séries de coupes du corps dans trois fenêtres de lecture propres à l'interprétation d'un examen tomodensitométrique : une fenêtre tissus mous, une fenêtre pulmonaire et une fenêtre osseuse. Ces images seront mises en ligne, permettant aux vétérinaires praticiens, aux étudiants ainsi qu'à toute autre personne intéressée d'y accéder facilement. La première partie de cette étude reprend les principes physiques et la réalisation pratique de la tomodensitométrie. La seconde partie traite du modèle biologique et de ses particularités anatomiques. Enfin, la troisième partie détaille la création de l'atlas.

MOTS CLES : GRUE DEMOISELLE, TOMODENSITOMETRIE, ATLAS, WEB

TITLE : REALISATION OF AN ON-LINE CT-SCAN ATLAS OF AN HEALTHY DEMOISELLE CRANE (*Anthropoides virgo*)

ABSTRACT : CT-scans are now commonly used in veterinary medicine, especially for pets. However, the lack of reliable knowledge about its mechanisms and interpretation due to its recent use in pet medicine is especially relevant for avian species. Birds are frequently seen in animal parks or held as pets. This study only concerns the demoiselle crane, a species frequently encountered in zoological parks. The aim of the author is to provide a captioned atlas of cross-sectionnal tomodensitometric images of a Demoiselle crane. These images are at the same time collected with soft tissues, pulmonary and osseous levels. These images will be put online, allowing an easy access for veterinary practitioners, students and anyone else interested. The first part of this study is based on the physical principles of the computed tomography. The second part deals with the biological model and its anatomical particularities. Finally, the third part details the creation of the atlas.

KEYWORDS : DEMOISELLE CRANE, COMPUTED TOMOGRAPHY, ATLAS, WEB