



HAL
open science

Mise au point de prototypes d'attelles en impression 3D chez les oiseaux

Séréna Vidé

► **To cite this version:**

Séréna Vidé. Mise au point de prototypes d'attelles en impression 3D chez les oiseaux. Médecine vétérinaire et santé animale. 2024. dumas-04760145

HAL Id: dumas-04760145

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04760145v1>

Submitted on 30 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ANNEE 2024 THESE : 2024 – TOU 3 – 4070

MISE AU POINT DE PROTOTYPES D'ATTELLES EN IMPRESSION 3D CHEZ LES OISEAUX

THESE D'EXERCICE

pour obtenir le titre de
DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

DIPLOME D'ÉTAT

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

VIDÉ Séréna

Directeur de thèse : M. Benjamin CARTIAUX

JURY

PRESIDENT :
M. Giovanni MOGICATO

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

ASSESEURS :
M. Benjamin CARTIAUX
M. Guillaume LE LOC'H

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

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation
ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE DE TOULOUSE

Liste des directeurs/assesseurs de thèse de doctorat vétérinaire

Directeur : Professeur Pierre SANS

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et industrie des aliments*
- M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
- M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Pharmacologie, thérapeutique*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et industrie des aliments d'origine animale*
- M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, statistiques, modélisation*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie pathologique*
- Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la reproduction, endocrinologie*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Aviculture et pathologie aviaire*
- Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **SCHELCHER François**, *Pathologie médicale du bétail et des animaux de basse-cour*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Biologie médicale animale et comparée*

PROFESSEURS 1^{ère} CLASSE

- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, anatomie pathologique*
- Mme **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie vétérinaire*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootéchnie*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et toxicologie*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **LACROUX Caroline**, *Anatomie pathologique, animaux d'élevage*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et thérapeutique*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation animale*

PROFESSEURS 2^{ème} CLASSE

- Mme **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
- Mme **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
- M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des équidés et des carnivores*
- M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
- M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, imagerie médicale*
- M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*
- Mme **PAUL Mathilde**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles*
- M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et infectiologie*

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

- M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la reproduction*
- Mme **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et industrie des denrées alimentaires d'origine animale*
- M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et toxicologie*
- M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et mathématiques*
- Mme **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
- Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*

MAITRES DE CONFERENCES CLASSE NORMALE

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **BRET Lydie**, *Physique et chimie biologiques et médicales*
- Mme **BOUHSIRA Emilie**, *Parasitologie, maladies parasitaires*
- M. **CARTIAUX Benjamin**, *Anatomie, imagerie médicale*
- M. **COMBARROS Daniel**, *Dermatologie vétérinaire*
- M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*
- Mme **DANIELS Héléne**, *Immunologie, bactériologie, pathologie infectieuse*
- Mme **DAVID Laure**, *Hygiène et industrie des aliments*
- M. **DIDIMO IMAZAKI Pedro**, *Hygiène et industrie des aliments*
- M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie vétérinaire et comparée*
- Mme **FERRAN Aude**, *Physiologie*
- M. **FUSADE-BOYER**, *Microbiologie et infectiologie*
- Mme **GRANAT Fanny**, *Biologie médicale animale*
- Mme **JOURDAN Géraldine**, *Anesthésie, analgésie*
- M. **JOUSSERAND Nicolas**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
- Mme **LALLEMAND Elodie**, *Chirurgie des équidés*
- Mme **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*
- M. **LE LOC'H Guillaume**, *Médecine zoologique et santé de la faune sauvage*
- M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **MILA Hanna**, *Elevage des carnivores domestiques*
- M. **VERGNE Timothée**, *Santé publique vétérinaire, maladies animales règlementées*
- Mme **WASET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*

INGENIEURS DE RECHERCHE

- M. **AUMANN Marcel**, *Urgences, soins intensifs*
- M. **AUVRAY Frédéric**, *Santé digestive, pathogénie et commensalisme des entérobactéries*
- M. **CASSARD Hervé**, *Pathologie des ruminants*
- M. **CROVILLE Guillaume**, *Virologie et génomique cliniques*
- Mme **DIDIER Caroline**, *Anesthésie, analgésie*
- M. **DELPONT Mattias**, *Clinique Aviaire*
- Mme **DUPOUY GUIRAUTE Véronique**, *Innovations thérapeutiques et résistances*
- Mme **GAILLARD Elodie**, *Urgences, soins intensifs*
- Mme **GEFFRE Anne**, *Biologie médicale animale et comparée*
- Mme **GRISEZ Christelle**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **JEUNESSE Elisabeth**, *Bonnes pratiques de laboratoire*
- Mme **LAYSSOL-LAMOUR Catherine**, *Imagerie Médicale*
- Mme **POUJADE Agnès**, *Anatomie pathologique Vétérinaire*
- Mme **PRESSANTI Charline**, *Dermatologie vétérinaire*
- M. **RAMON PORTUGAL Felipe**, *Innovations thérapeutiques et résistances*
- M. **REYNOLDS Brice**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
- Mme **ROUCH BUCK Pétra**, *Médecine préventive*
- Mme **SAADA Chloé**, *Gestion intégrée de la santé des ruminants*

Remerciements

À Monsieur le Professeur Giovanni MOGICATO,

Professeur de l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse
Anatomie – Imagerie médicale

*Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury de thèse.
Hommages respectueux.*

À Monsieur le Docteur Benjamin CARTIAUX

Maître de conférences à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse
Anatomie – Imagerie médicale

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être mon directeur de thèse et pour m'avoir guidée dans ce travail avec bienveillance. Sincères remerciements.

À Monsieur le Docteur Guillaume Le LOC'H

Maître de conférences à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse
Médecine zoologique et santé de la faune sauvage

Pour avoir accepté d'être assesseur de ma thèse, pour votre temps, vos précieux conseils et votre engagement dans ce travail. Sincères remerciements.

À Adrien CORSI

Responsable soigneur, capacitaire et médiateur faune sauvage à la Ligue pour la
Protection des Oiseaux d'Auvergne-Rhône-Alpes

Pour m'avoir accueillie en stage, m'avoir montré, expliqué et partagé votre utilisation de l'impression 3D pour les oiseaux sauvages. Sincères remerciements.

Table des matières

Table des abréviations	9
Table des illustrations.....	10
Introduction	19
PARTIE 1 : PRÉREQUIS SUR L'IMPRESSION 3D ET UTILISATION DANS LE MONDE VÉTÉRINAIRE	21
I - Etapes de la conception d'un objet en 3D.....	21
A) Modélisation de l'objet	21
B) Choix des paramètres d'impression.....	23
C) Impression de l'objet.....	28
D) Finitions de l'objet.....	29
E) Conclusion.....	29
II – Exemples d'applications actuelles à la médecine	30
A) Application en médecine humaine	30
B) Application en médecine vétérinaire	31
PARTIE 2 : ESSAIS CLINIQUES ET APPLICATION À PLUSIEURS PATHOLOGIES AVIAIRES	36
I – Essai clinique d'une attelle dite « en J » conçue pour la cicatrisation des fractures des métacarpes chez les oiseaux de centre de soin	36
A) Fracture des métacarpes chez les oiseaux	36
B) Conception de l'attelle	42
C) Discussion et perspectives	53
II – Conception d'une attelle permettant la réduction des fractures du tibiotarse chez les oiseaux sauvages de centre de soin	55
A) Fracture du tibiotarse chez les oiseaux	55
B) Conception de l'attelle	61
C) Discussion et perspectives	77

IV – Conception d’une « chaussure » pour le traitement des pododermatites : exemple chez les poules de compagnie.....	79
A) Pododermatites chez les oiseaux	79
B) Epidémiologie des pododermatites.....	80
C) Traitements actuels	80
D) Conception de l’attelle pour les poules de compagnie.....	82
E) Discussion et perspectives	87
Conclusion	90
Agrément scientifique.....	93
Bibliographie	95
ANNEXES	100
ANNEXE I : Tableau présentant les durées d’impression, les quantités de matériau utilisées et les coûts estimés pour chaque attelle imprimée.....	100
ANNEXE II : Données du centre de soins de la faune sauvage de l’Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse récoltées entre le 1er janvier 2016 et le 31 décembre 2022	101
Annexe II.A : Tableau présentant les critères d’inclusion utilisés dans le tri des données brutes du centre de soin	101
Annexe II.B : Tableau présentant le nombre de fractures par région anatomique	102
Annexe II.C : Tableau présentant la proportion de fractures ouvertes, fermées ou indéterminées en fonction des segments osseux de l’aile	102
Annexe II.D : Tableau présentant la proportion de fractures ouvertes, fermées ou indéterminées en fonction des segments osseux de la patte	102
Annexe II.E : Tableau présentant le nombre de fractures par segment osseux pour les espèces d’oiseaux les plus représentées au centre de soins (N > 100)	103
Résumé.....	104

Table des abréviations

3D : Trois Dimensions

CAO : Conception assistée par Ordinateur

DFF : Dépôt de Fil Fondu (ou FDM : *Fused Deposit Modelling*)

ENVT : Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

FSL : Frittage Sélectif par Laser

LPO : Ligue pour la Protection des Oiseaux

MPa : Mégapascal

PLA : *Polyactic Acid*

SL : Stéréolithographie

SMP : (*Shape memory polymers*)

TPA : *Thermoplastic polyamide*

TPC : *Thermoplastic co-polyester*

TPE : *Thermoplastic Elastomers*

TPU : *Thermoplastic Polyurethane*

UV : Ultra Violets

Table des illustrations

Figure 1. Schéma des deux méthodes principales de scan 3D.....	22
Figure 2. Schéma du principe de l'impression 3D par extrusion de matériau (Huang et al. 2020).....	24
Figure 3. Photographie de modèles d'impression 3D montrant les différents modes de remplissage (à gauche) et les pourcentages de remplissage (à droite) possibles d'un objet imprimé en 3D.	28
Figure 4. Applications de l'impression 3D à plusieurs domaines de médecine humaine (Liaw et Guvendiren 2017).....	30
Figure 5. Modèle 3D (gauche) et prothèse imprimée (droite) chez un perroquet Amazone à lores rouges (<i>Amazona autumnalis</i>). (Galicia et al. 2018)	32
Figure 6. Conception pré-opératoire d'une prothèse de bassin chez un chat angora turc de 5 ans. (a) Segmentation et reconstruction 3D du bassin avec la tumeur. (b) Modélisation 3D du bassin physiologique. (c-e) Conception de la prothèse 3D. (f) Pose de la prothèse sur un modèle 3D d'os lors d'un entraînement avant la chirurgie.	32
Figure 7. Conception d'un guide de réduction chez un chat présentant une fracture comminutive médio-diaphysaire de l'humérus. Conception du modèle 3D en deux parties (A). Impression du modèle en résine (B). Mise en place du guide (C). (Oxley 2018).....	33
Figure 8. Choix de la plaque nécessaire à la stabilisation d'une fracture du bassin grâce au modèle sain imprimé, et contournement préopératoire de la plaque. Plusieurs modèles de plaque sont essayés (A et B) et la plaque est positionnée sur l'impression (C). (Caron 2024).....	34
Figure 9. Modèle 3D du cœur et des principaux vaisseaux thoraciques d'un chiot de 10 mois souffrant d'anomalies vasculaires congénitales. A : Dilatation anévrysmale de l'aorte. PDA : Persistance du canal artériel. S : Artère subclavière gauche aberrante. PA : Artère pulmonaire gauche. Ao : Arc aortique à droite. VC : Veine cave.....	34
Figure 10. Modèles 3D d'os hyoïdes de différentes espèces domestiques (Bakici, Akgün, et Oto 2019)	35

Figure 11. Images obtenues par tomodensitométrie de la partie distale d'une aile de buse à queue rousse (<i>Buteo jamaicensis</i>) : vue dorsale (A), vue crâniale (B), vue ventrale (C), vue caudale (D). (Orosz, Echols, et Redig 2023).....	36
Figure 12. Histogramme représentant le nombre de fractures pour chaque zone anatomique, recensées au centre de soin de la Faune sauvage de l'ENVT entre le 01/01/2016 et le 31/12/2022.....	37
Figure 13. Graphique représentant la proportion de fractures touchant les différents segments osseux de l'aile d'après les données du centre de soin de la Faune sauvage de l'ENVT entre le 01/01/2016 et le 31/12/2022.....	38
Figure 14. Histogramme représentant le type de fractures pour chaque segment osseux de l'aile, d'après les données centre de soin de la Faune sauvage de l'ENVT entre le 01/01/2016 et le 31/12/2022.....	39
Figure 15. Histogramme représentant la proportion des fractures des métacarpes chez les espèces d'oiseaux les plus fréquentes au centre de soin (N>100), d'après les données centre de soin de la Faune sauvage de l'ENVT entre le 01/01/2016 et le 31/12/2022.....	39
Figure 16. Schéma présentant les structures internes sur la face ventrale en portion distale de l'aile d'un oiseau.....	40
Figure 17. « <i>Curved-edge splint</i> » formé à l'aide de plastique thermoformable et appliqué à un faucon émerillon (<i>Falco columbarius</i>). Une pièce de plastique thermoformable est coupée à la longueur du métacarpe et modelée sur la face ventrale de l'os (A). Vue dorsale du modelage de l'attelle (B). L'attelle est fixée à l'aide de scotch adhésif appliqué ventralement (C) et dorsalement (D)(Orosz, Echols, et Redig 2023).....	41
Figure 18. Schémas de la mise en place de fixateurs externes de type I sur des fractures respectivement comminutive diaphysaire, métaphysaire proximale et métaphysaire distale (de gauche à droite) (Orosz, Echols, et Redig 2023).....	42
Figure 19. Schéma simplifié d'une aile d'oiseau au repos représentant les mesures à réaliser pour la conception d'une attelle en J.....	43
Figure 20. Modèles d'attelle en J en trois dimensions pour différentes espèces d'oiseaux.....	44
Figure 21. Photographies d'attelles en J imprimées en PLU pour différentes espèces d'oiseaux.....	46

Figure 22. Radiographies centrées sur le carpométacarpe de l'aile droite d'un élanion blanc (<i>Elanus caeruleus</i>) le jour de son admission, présentant une fracture du métacarpe majeur droit. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).....	47
Figure 23. Photographies de la mise en place d'une attelle en J sur un élanion blanc (<i>Elanus caeruleus</i>). Attelle seule (A). Positionnement de l'attelle (B). Stabilisation de l'attelle par un bandage en huit (C).....	48
Figure 24. Radiographies centrées sur le carpométacarpe de l'aile gauche d'une buse variable (<i>Buteo buteo</i>) à son admission présentant une fracture du métacarpe majeur gauche. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).	49
Figure 25. Photographies de la mise en place d'une attelle en J sur une buse (<i>Buteo buteo</i>). Positionnement de l'attelle : vue de la face dorsale (A), vue de la face palmaire (B). Stabilisation de l'attelle par un bandage en huit (C).	49
Figure 26. Radiographies centrées sur le carpométacarpe de l'aile gauche d'une buse variable (<i>Buteo buteo</i>) trois semaines après son admission présentant une fracture du métacarpe majeur gauche. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).	50
Figure 27. Radiographies centrées sur le carpométacarpe de l'aile gauche d'une buse variable (<i>Buteo buteo</i>) six semaines après son admission présentant une fracture du métacarpe majeur gauche. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).	50
Figure 28. Photographies de la mise en place d'une attelle en J sur l'aile gauche d'un milan noir (<i>Milvus migrans</i>). Mise en place de l'attelle (à gauche) et stabilisation de celle-ci par un bandage en huit (à droite).	51
Figure 29. Radiographies centrées sur la main gauche d'un milan noir (<i>Milvus migrans</i>) le lendemain de son admission présentant une luxation du doigt. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).....	52
Figure 30. Radiographies centrées sur la main gauche d'un milan noir (<i>Milvus migrans</i>) quatre semaines après son admission montrant un meilleur alignement du doigt gauche. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).	52
Figure 31. Modèle d'attelle en J en trois dimensions présentant une fente au niveau de la branche courte afin de libérer le patagium.	54

Figure 32. Images obtenues par tomodensitométrie de la patte d'un pigeon biset (<i>Columba livia</i>) : vue dorsale (à gauche) et vue latérale (à droite). (Orosz, Echols, et Redig 2023)	55
Figure 33. Schéma de la musculature au niveau du tibiotarse d'une poule : vue médiale (à gauche) et vue latérale (à droite). (König, Korbel, et Liebich 2016)	56
Figure 34. Schéma de l'innervation (à gauche) et de la vascularisation (à droite) de la patte d'une poule. (König, Korbel, et Liebich 2016)	56
Figure 35. Graphique représentant la proportion de fractures touchant les différents segments osseux de la patte d'après les données du centre de soin de la Faune sauvage de l'ENVVT entre le 01/01/2016 et le 31/12/2022.....	57
Figure 36. Histogramme représentant le type de fractures pour chaque segment osseux de la patte, d'après les données centre de soin de la Faune sauvage de l'ENVVT entre le 01/01/2016 et le 31/12/2022.	58
Figure 37. Histogramme représentant la proportion des fractures du tibiotarse chez les espèces d'oiseaux les plus fréquentes au centre de soin (N>100), d'après les données centre de soin de la Faune sauvage de l'ENVVT entre le 01/01/2016 et le 31/12/2022.....	58
Figure 38. Schéma de la prise en charge chirurgicale d'une fracture du tibiotarse.	60
Figure 39. Photographies des étapes de mise en place d'un " <i>tape splint</i> " : positionnement des bandes de ruban adhésif médical (A) ; fixation des bandes entre elles au plus près du membre à l'aide d'un clamp (B) ; découpage des excédents de bandes (C) ; <i>tape splint</i> en place (D). (Palazzolo, s. d.).....	60
Figure 40. Schéma des étapes de fabrication (A) et de mise en place (B, C, D) d'une attelle de Schroeder-Thomas modifiée. (Higbie 2016).....	61
Figure 41. Modèle 3D du premier prototype d'attelle de patte avec une pièce principale (à gauche) et une pièce de soutien (à droite).	63
Figure 42. Photographies du premier prototype imprimé en PLA avec la pièce principale (à gauche) et la pièce de soutien vue de dessus et de profil (à droite). ...	64
Figure 43. Mise en place du premier prototype d'attelle pour les fractures du tibiotarse sur un pigeon ramier décédé du centre de soin de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse : vue latérale de la pièce principale (A) ; vue latérale de la pièce de soutien sur la patte controlatérale (B) ; vue ventrale montrant la face	

médiale de la pièce principale et la sangle ventrale (C) ; vue dorsale montrant la sangle dorsale (D).	65
Figure 44. Modèle 3D de la pièce principale du second prototype d'attelle de patte avec une vue assemblée (à gauche) et une vue éclatée (à droite).	66
Figure 45. Photographies du second prototype d'attelle de patte imprimé en PLA. Le modèle a été imprimé en taille 100% avec la pièce de soutien, la pièce principale réglée à sa taille minimale (A) et à sa taille maximale (B). Le modèle a été imprimé en taille 150% avec la pièce de soutien et la pièce principale (C).	67
Figure 46. Mise en place du second prototype d'attelle pour les fractures du tibiotarse sur plusieurs oiseaux décédés et provenant du centre de soin de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse.	68
Figure 47. Photographie de la patte gauche d'un pigeon ramier (<i>Columba palumbus</i>) montrant un hématome et un œdème important au niveau du tibiotarse. Face latérale (gauche), face médiale (droite).	69
Figure 48. Radiographies de la patte gauche d'un pigeon ramier (<i>Columba palumbus</i>) après son admission présentant une fracture du tibiotarse gauche. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).	70
Figure 49. Photographie de la préparation de la deuxième version de l'attelle avant sa mise en place.	70
Figure 50. Photographies de la mise en place de la deuxième version de l'attelle imprimée en 3D sur un pigeon ramier (<i>Columba palumbus</i>) atteint d'une fracture du tibiotarse gauche. Vue de la face latérale (A), vue de la face ventrale (B) vue de la face médiale (C). Aspect final de l'attelle et de la patte protégés (D)	71
Figure 51. Images issues d'une vidéo montrant un pigeon ramier (<i>Columba palumbus</i>) portant une attelle imprimée en 3D au niveau du postérieur gauche se tenant accroupi (à gauche) et debout (à droite).	71
Figure 52. Radiographies de la patte gauche d'un pigeon ramier (<i>Columba palumbus</i>) présentant une fracture du tibiotarse gauche, sept jours après la mise en place de l'attelle. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).	72
Figure 53. Photographie du genou gauche d'un pigeon ramier (<i>Columba palumbus</i>) présentant une fracture du tibiotarse gauche montrant une lésion de dermatite de contact sur la face médiale du genou en regard de l'attelle.	73

Figure 54. Photographie de la face palmaire de la patte droite, chez un pigeon ramier (<i>Columba palumba</i>) atteint d'une fracture du tibiotarse gauche, montrant l'absence de lésion de pododermatite.	74
Figure 55. Modèles 3D de la pièce principale du troisième prototype d'attelle de patte avec une angulation de 45°.	74
Figure 56. Photographies de la pièce principale du troisième prototype d'attelle de patte avec une angulation de 45°, imprimée en PLA.	75
Figure 57. Mise en place du troisième prototype d'attelle pour les fractures du tibiotarse sur un hibou moyen-duc (<i>Asio otus</i>) décédé du centre de soin de l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse : vue latérale de la pièce principale (A) ; vue latérale de la pièce de soutien sur la patte controlatérale (B) ; vue ventrale montrant la face médiale de la pièce principale et la sangle ventrale (C) ; vue dorsale montrant la sangle dorsale (D).	76
Figure 58. Photographie d'une tige coulissante de l'attelle conçue pour les fractures du tibiotarse montrant un morceau manquant à l'extrémité de la tige.....	78
Figure 59. Photographies de différents bandages post-opératoires possibles suite à un débridage de plaie de pododermatite. A : Bandage dit « en donut » (Samour 2015) ; B : Bandage dit « en balle » (Samour 2015) ; C : Bandage sur mesure en silicone (Remple 2006).	82
Figure 60. Photographie prise lors de l'acquisition des images tomodensitométriques d'une patte de poule, à l'aide du scanner Optima CT540 (GE Medical Systems) de l'ENVV.	83
Figure 61. Capture d'écran du logiciel InVesalius 1.3 Ink. © montrant les pixels sélectionnés (Seuil : -280 à 2616) sur les trois plans de coupe et le modèle 3D obtenu à partir des images tomodensitométriques d'une patte de poule.....	84
Figure 62. Modélisations 3D des différentes étapes de conception de l'attelle de patte de poule, avec d'abord la modélisation de la patte de poule avant traitement (A.1) et après traitement (A.2), puis la modélisation de l'attelle vue de dessus (B.1) et vue de dessous (B.2), et enfin l'assemblage de la patte et de l'attelle vue de dessus (C.1) et vue de dessous (C.2).	85
Figure 63. Photographie de la version droite de l'attelle de patte de poule imprimée en TPU. Vue de dessus (à gauche) et de dessous (à droite).	86

Figure 64. Photographies montrant une pododermatite bilatérale de grade III chez une poule avec la patte droite (à gauche) et la patte gauche (à droite). 86

Figure 65. Photographies de la mise en place de l'attelle sur une poule présentant une pododermatite. Protection de la patte avec des compresses (A). Mise en place de l'attelle : vue de la face dorsale (B) et vue de la face palmaire (C). Fixation de l'attelle avec des bandes de sparadrap (D). 87

Figure 66. Modèle 3D et photographies de la mise en place de l'attelle de patte de poule. L'attelle est constituée de deux parties : la partie haute (A) et la partie basse (B). Vue de la mise en place de la partie du bas (C), vue dorsale de l'attelle en place (D), vue palmaire de l'attelle en place (E), vue de l'espace inter digité (F). 89

Figure 67. Attelle en silicone conçue pour le traitement des pododermatites à l'aide de moules imprimés en 3D (Konicek 2024): modèle 3D présentant des fentes pour la fixation (A) ; modèle en silicone avec le système de fixation (B) ; modèle en place sur des pattes de poule (C). 89

Introduction

L'impression en trois dimensions est une technologie apparue il y a une cinquantaine d'années et qui tend à se démocratiser depuis les années 2010. Cette technologie, qui consiste à construire un objet couche par couche, est aujourd'hui utilisée dans de très nombreux domaines comme l'aéronautique, l'industrie textile ou même le domaine médical. Cette diversité de domaines est liée à une grande diversité de techniques d'impression 3D mais également de matériaux : aujourd'hui il est possible d'imprimer des matériaux de base comme le plastique, mais également des matériaux plus complexes comme le bois, le métal et même des tissus organiques.

Dans le domaine vétérinaire, l'impression 3D est un outil tout nouveau. Utilisée principalement pour la planification chirurgicale ou pour la conception de modèles pédagogiques, elle est également ponctuellement utilisée pour concevoir des prothèses (destinées à remplacer un membre) ou des orthèses (destinées à soutenir un membre).

C'est une technologie qui est aujourd'hui à la portée de tous principalement avec la technologie de dépôt de fil fondu, et qui permet à des particuliers de produire facilement et rapidement des petites pièces, sur mesures et à faible coût. Ainsi, c'est une technologie avantageuse pour des associations en manque de moyens financiers ou lorsque les espèces sont variées et que le sur-mesure est indispensable. C'est le cas par exemple du domaine de la faune sauvage où de nombreuses espèces de formats variés sont traitées, et pour lesquels les revenus et le temps sont parfois limités. Cela peut également être une solution pour des propriétaires d'animaux qui ont peu de moyens.

Cette thèse qui se restreint aux oiseaux sauvages et domestiques, s'intéresse particulièrement à la conception de trois attelles dont les objectifs sont d'apporter des solutions thérapeutiques, mais également ergonomiques et financières à des pathologies ou des affections fréquentes chez les oiseaux.

Ainsi, après une première partie qui s'intéressera à des généralités sur l'impression 3D et ses applications dans le monde vétérinaire, la conception, l'impression et plusieurs essais cliniques de trois attelles seront présentés. La

première attelle est une attelle conçue pour le traitement des pathologies de la main et particulièrement les fractures des métacarpes. La deuxième attelle a quant-à-elle pour objectif le traitement des fractures du tibiotalarse. Enfin, la dernière attelle cherche à proposer une alternative dans le traitement de la pododermatite chez la poule de compagnie.

PARTIE 1 : PRÉREQUIS SUR L'IMPRESSION 3D ET UTILISATION DANS LE MONDE VÉTÉRINAIRE

L'impression 3D est une technologie récente, née avec trois techniques principales brevetées dans les années 1980. La première technique brevetée, fut la stéréolithographie (SL), suivie du frittage sélectif par laser (FSL) puis du dépôt de fil fondu (FDM). Ces techniques d'impression se sont accompagnées dans les années 1990 de l'émergence de la conception assistée par ordinateur (CAO) mais sont restées des techniques industrielles. A la fin des années 1990, le domaine médical se tourne vers l'impression 3D et commence à concevoir des prothèses imprimées en 3D puis se lance dans la recherche pour l'impression d'organes. Ce n'est que dans les années 2010, avec l'expiration des brevets de la technique de dépôt de fil fondu, que l'impression 3D s'est démocratisée et est devenue une technologie à la portée de tous.

I - Etapes de la conception d'un objet en 3D

Bien que l'impression 3D soit de nos jours un outil accessible à tous, cela nécessite d'une part des compétences dans la manipulation d'outils de modélisation 3D et d'autre part de suivre une démarche précise.

A) Modélisation de l'objet

Avant de pouvoir imprimer un objet en trois dimensions, il est tout d'abord indispensable de le modéliser numériquement. Parfois, l'objectif est de créer intégralement un objet et il est alors uniquement nécessaire de le concevoir à l'aide d'un logiciel de modélisation 3D. Mais parfois l'objet est créé pour remplacer un objet réel ou bien pour se fixer sur un élément déjà existant physiquement et il faut dans ce cas qu'il soit adapté.

a. Scan 3D

Un outil assez récent pour adapter un objet à un élément physique est d'opter pour l'utilisation d'un scanner 3D. Il existe de multiples technologies pour scanner un objet à courte distance mais les plus courantes sont la triangulation laser qui nécessite un appareil adapté, et la photogrammétrie qui peut quant à elle être réalisée avec n'importe quel outil de capture d'images (Figure 1).

Les scanners à triangulation laser utilisent soit une ligne soit un point laser unique pour balayer un objet. Un capteur capte la lumière laser réfléchiée par l'objet et le système calcule la distance entre l'objet et le scanner par triangulation trigonométrique. Les appareils utilisant cette technologie sont coûteux et nécessitent un opérateur expérimenté mais permettent d'obtenir une grande quantité de données avec précision et rapidement. Les données récoltées doivent ensuite être compilées par un logiciel adapté à l'appareil (Remondino, Guarnieri, et Vettore 2005).

La photogrammétrie consiste quant à elle à déterminer la forme, les dimensions et la situation d'un objet dans l'espace à partir de plusieurs prises de vues photographiques de cet objet. L'acquisition des images peut être automatique ce qui la rend plus précise mais nécessite alors des appareils coûteux. Elle peut également être manuelle et donc réalisée avec n'importe quel outil de capture ce qui la rend peu coûteuse et accessible au grand public mais la précision est alors parfois limitée. Les images acquises doivent ensuite être traitées par un logiciel. Il existe de nombreux logiciels de photogrammétrie et nombreux sont gratuits mais la qualité du modèle 3D obtenu dépend à la fois de la qualité des photographies et des performances du logiciel. Aujourd'hui il existe des applications de photogrammétrie pour smartphone de plus en plus performantes (Dabove, Grasso, et Piras 2019)(Stark, Haffner, et Kučera 2022).

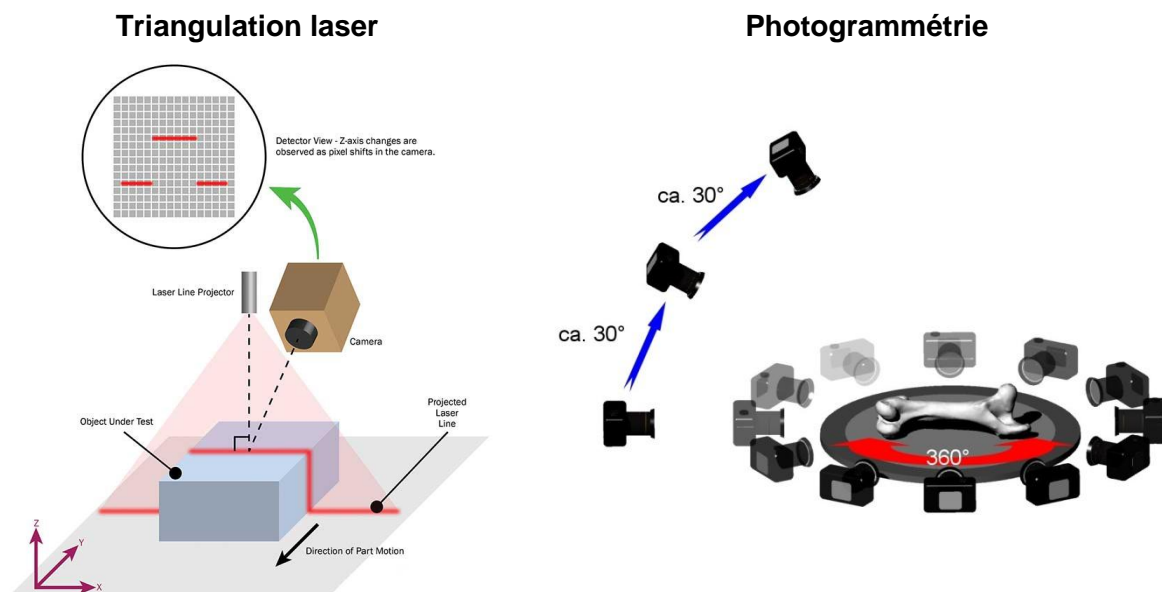


Figure 1. Schéma des deux méthodes principales de scan 3D.

Enfin, dans le milieu médical, la tomodensitométrie (scanner) peut permettre l'obtention d'un modèle en trois dimensions. La première étape est celle de la segmentation qui consiste à ne sélectionner qu'une tranche de niveau de gris parmi les deux cent cinquante-six générées lors d'un scanner. On peut alors obtenir une image en trois dimensions d'une structure anatomique comme le squelette. Il faut ensuite éventuellement nettoyer le modèle 3D obtenu pour ne garder que la structure d'intérêt (par exemple un os en particulier) (Caron 2024).

b. Le monde de l'impression 3D, un monde open-source : plateformes de partage

Il existe de nombreuses machines d'impression 3D à des prix très variés si bien que beaucoup d'amateurs en possèdent. Ceci a engendré une vaste communauté autour de l'impression 3D qui partage beaucoup d'informations, de conseils et de modèles 3D. Ainsi, se sont développées des plateformes de partage comme Thingiverse© (2023MakerBot Industries, LLC) où de nombreux modèles 3D sont accessibles.

Lorsqu'on se penche par exemple sur le domaine vétérinaire, on peut trouver des outils pour la construction de charriots pour chiens paralysés, une botte pour un canard dont les tendons ont été endommagés, des « prothèses » pour chien ou encore de nombreux modèles anatomiques.

Ces plateformes permettent non seulement de partager gratuitement des modèles et des connaissances mais contribuent également à innover et à améliorer certaines créations (Baik et al. 2022).

B) Choix des paramètres d'impression

c. Choix du processus d'impression

Les différents types d'impression 3D sont basés sur différents processus de traitement des matériaux entraînant leur fusion ou leur solidification. Les principaux types d'impression sont la fusion sur lit de poudre, la photopolymérisation, la stratification de matériau en feuilles, et l'extrusion de matériau. La fusion sur lit de poudre consiste à fritter ou fusionner ensemble des particules de poudre atomisées, couche par couche, à l'aide d'une source de chaleur (laser, électrons). La photopolymérisation utilise quant à elle un photopolymère liquide contenu dans une

cuve qui est durci de façon sélective et couche après couche par une source de chaleur (UV). Dans la stratification de matériau en feuilles, des feuilles de matière sont collées ensemble et coupées couche par couche (Ntousia et Fudos 2019).

La technologie la plus utilisée par le grand public est celle par extrusion de matériau aussi appelée dépôt de fil fondu (DFF) ou *Fused deposition modeling* (FDM). Elle utilise un filament continu de matière comme matériau de base, qui est chauffé et déposé par couches successives par une tête d'extrusion sur une plaque mobile (Figure 2). Ce procédé nécessite un logiciel de découpe qui va découper numériquement le modèle 3D en fines couches pour préparer l'impression. La qualité de l'impression est conditionnée par de nombreux paramètres réglables lors de l'impression. Ces paramètres sont à adapter en fonction du matériau, et de l'utilisation future de l'objet imprimé (Huang et al. 2020).

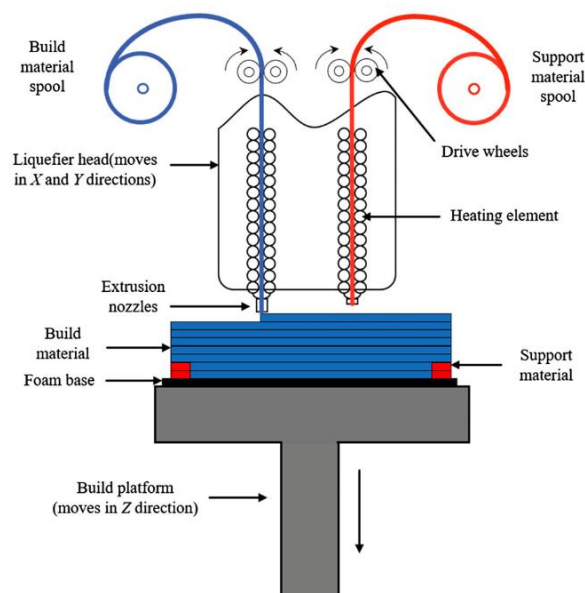


Figure 2. Schéma du principe de l'impression 3D par extrusion de matériau (Huang et al. 2020)

C'est une technologie assez simple d'accès qui permet une impression rapide et l'utilisation de matériaux variés et peu coûteux. Un des inconvénients principal est le rendu final de l'objet qui, selon l'épaisseur des couches, peut avoir une surface irrégulière.

d. Choix du matériau d'impression

Une grande diversité de matériaux aux propriétés variées

Il existe aujourd'hui de nombreux matériaux pour imprimer des objets en 3D. En ce qui concerne l'impression par extrusion de matériau, voici un tableau récapitulant les principaux matériaux et leurs caractéristiques principales :

Tableau 1 Principaux matériaux utilisés en impression 3D par extrusion de matériau et leurs caractéristiques principales (« Guide des matériaux d'impression 3D : types, applications et propriétés » 2022)

Matériau	Caractéristiques
ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène)	<ul style="list-style-type: none">• Robuste et durable• Résistant à la chaleur et aux impacts• Nécessite le chauffage du lit d'impression• Besoin de ventilation
PLA (Acide Polylactique)	<ul style="list-style-type: none">• Le matériau le plus facile à imprimer• Rigide, solide, mais friable• Moins résistant à la chaleur et aux produits chimiques• Biodégradable• Sans odeur
PETP (Polytéréphtalate d'éthylène-glycol)	<ul style="list-style-type: none">• Compatible avec une impression à température plus faible pour une production plus rapide• Résistant à l'humidité et aux produits chimiques• Grande transparence• De qualité alimentaire
Nylon	<ul style="list-style-type: none">• Solide, durable et léger• Robuste et partiellement softible• Résistant à la chaleur et aux impacts• Très complexe à imprimer en FDM
TPU (Polyuréthane thermoplastique)	<ul style="list-style-type: none">• Flexible et élastique• Résistant aux impacts• Excellent amortissement des vibrations
PVA (Alcool polyvinylique)	<ul style="list-style-type: none">• Matériau de support soluble• Se dissout dans l'eau
HIPS (Polystyrène à impact élevé)	<ul style="list-style-type: none">• Matériau de support soluble le plus souvent utilisé avec l'ABS• Se dissout dans le limonène chimique
Composites (fibre de carbone, kevlar, fibre de verre)	<ul style="list-style-type: none">• Rigide, solide ou extrêmement robuste• Compatibilité limitée à certaines imprimantes 3D FDM industrielles très onéreuses

Les matériaux les plus connus parmi les matériaux rigides sont l'ABS et le PLA. L'ABS est un matériau très solide et résistant mais présente comme inconvénient

majeur de générer des gaz toxiques lorsqu'il est chauffé ce qui nécessite une ventilation pendant l'impression. Le PLA est également solide mais plus friable et présente un avantage important qui est d'être biodégradable car produit à partir de maïs essentiellement.

Le TPU est le matériau flexible le plus connu. Il permet la production d'objets souples et élastiques et trouve des applications dans le milieu du textile avec la conception de chaussures, ou encore dans l'industrie automobile avec la fabrication de filtres ou de gaines.

Le choix des matériaux d'impression est complexe car il en existe beaucoup et chaque matériau nécessite des types d'impression et des paramètres d'impression différents.

Le PLA, un matériau peu cher et très courant

Le PLA est un bioplastique dérivé de l'acide lactique très couramment utilisé en impression 3D. C'est un matériau résistant avec une force de tension comprise entre 45 et 70 MPa, et thermoformable avec une température de fusion à 170-180°C.

L'avantage principal du PLA est son côté « *eco-friendly* » : il est synthétisé à partir de ressources renouvelables (maïs) ; il est biodégradable, recyclable et compostable ; et il est moins coûteux en énergie à produire que des plastiques conventionnels. Enfin, le PLA est thermoformable et fait partie des SMPs (*Shape memory polymers*) ce qui lui confère l'aptitude de retrouver sa forme originale après déformation à une température de transformation (65°C)(Mehrpooya et al. 2021). Cette aptitude peut être optimisée en modifiant les paramètres d'impression comme l'angle d'impression par rapport à l'axe x (« *raster angle* ») qui permet une mémoire de forme optimale à 45°/-45°(Liu, He, et Huang 2020). Cette aptitude s'inscrit dans le concept de l'impression 4D incluant le « temps » comme quatrième dimension qui traduit l'évolution dans le temps de l'objet 3D sous l'influence de paramètres extérieurs.

Cependant, le PLA est moins performant que d'autres matériaux car il est peu résistant à l'élongation : il se rompt avec moins de 10% d'élongation. De plus, s'il est biodégradable, il met 3 à 5 ans à se dégrader *in vivo* et il est hydrophobe ce qui le

rend peu compatible avec les cellules et peut entraîner une réaction inflammatoire lorsqu'il est en contact direct avec des fluides biologiques. (Taib et al. 2023)

L'impression de PLA nécessite :

- Une température de l'extrudeur entre 180°C et 220°C ;
- Une température du lit d'impression entre 50°C et 70°C ;
- Une vitesse d'impression lente entre 40 et 60 mm/s qui peut varier selon l'objet imprimé. (« The Best 3D Print Speed Settings for PLA & More » 2022)

Le PLA Soft et le TPU, des matériaux flexibles prometteurs

Parmi les matériaux d'impression 3D il existe des matériaux flexibles, appelés TPEs (*Thermoplastic Elastomers*), dont les principaux sont le TPU (*Thermoplastic polyurethane*), le TPC (*Thermoplastic co-polyester*), le TPA (*Thermoplastic polyamide*) et le PLA soft.

Le TPU est le matériau flexible le plus utilisé dans l'impression par extrusion de matériau de par sa facilité d'impression. Il est très résistant à l'abrasion et également résistant aux huiles et graisses animales et végétales, mais il n'est pas respectueux de l'environnement comme l'est le PLA.

L'impression de TPU nécessite :

- Une température de l'extrudeur entre 210°C et 230 °C ;
- Une température du lit d'impression entre 30 et 60°C ;
- Une vitesse d'impression lente entre 20 et 30 mm/s.(« The Best TPU Bed & Print Temperature Settings » 2023)

En plus du PLA classique, le PLA soft gagne deux avantages : sa flexibilité d'une part et son aptitude à absorber les vibrations et les chocs d'autre part. Par rapport aux autres matériaux flexibles, il présente l'avantage d'être plus résistant et plus durable. L'inconvénient principal de ce matériau est qu'il est difficile à imprimer car il nécessite des paramètres particuliers et ne peut par exemple pas servir de support lors de l'impression d'un objet. (« What's Soft PLA Filament & How Does It Compare to TPU? » 2019)

L'impression de PLA soft nécessite :

- Une température de l'extrudeur entre 220°C et 235 °C ;

- Une température du lit d'impression à 100°C ;
- Une vitesse d'impression lente entre 10 et 30 mm/s. (« Flexible Filaments for 3D Printing – Simply Explained » 2020)

C) Impression de l'objet

L'impression d'un objet en 3D avec la technologie FDM est réalisée à l'aide d'un logiciel de découpe en tranches, aussi appelé « *slicer* », qui va permettre de convertir le fichier 3D en g-code, c'est-à-dire en instructions spécifiques pour l'imprimante qui vont piloter les mouvements de la buse d'extrusion.

Pour se faire, le logiciel va d'abord permettre de définir s'il y a besoin de créer des supports notamment pour les parties creuses de l'objet et proposer plusieurs formes de supports. Il va également permettre de régler certains paramètres d'impression comme la résolution d'impression qui correspond à la hauteur des « tranches » de l'objet et la densité aussi appelée le « *filling* » de l'objet, c'est-à-dire le remplissage de l'intérieur de l'objet. Le choix de la densité est important car il influence la résistance de l'objet mais également son poids (Figure 3). Par exemple, un remplissage en nid d'abeille à 10% permet d'alléger grandement le poids d'un objet tout en lui apportant une grande résistance.

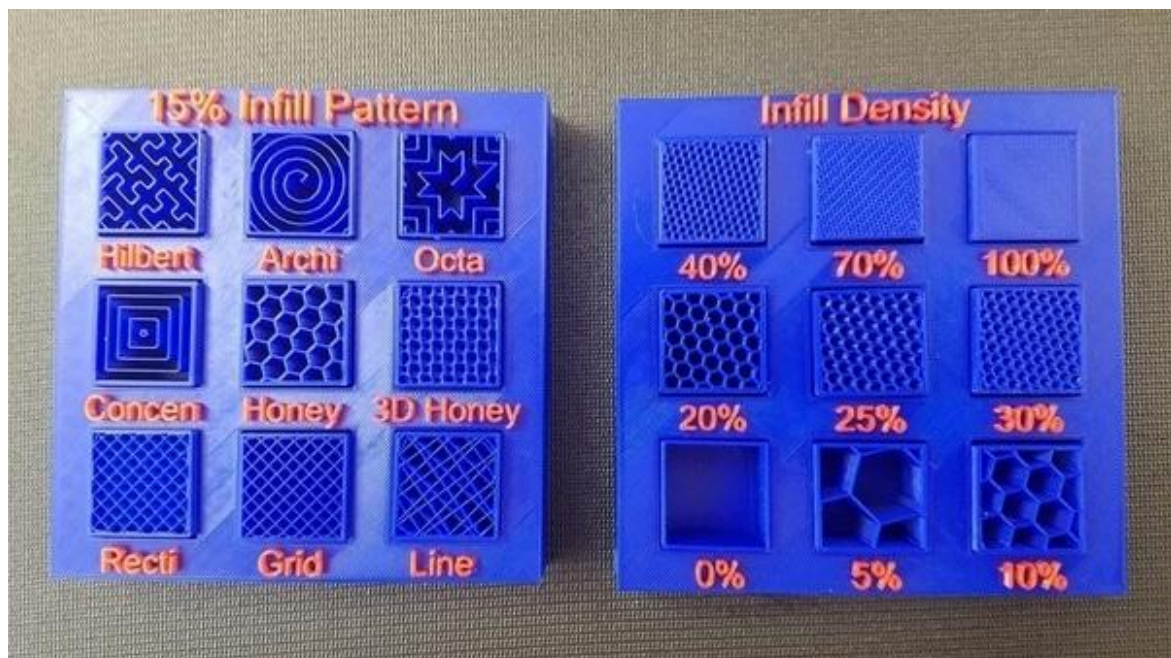


Figure 3. Photographie de modèles d'impression 3D montrant les différents modes de remplissage (à gauche) et les pourcentages de remplissage (à droite) possibles d'un objet imprimé en 3D.

Enfin, en prenant en compte tous ces paramètres, le logiciel de découpe va définir précisément le trajet de la buse d'impression couche par couche.

D) Finitions de l'objet

A la fin de l'impression d'un objet, celui-ci n'est pas totalement prêt à être utilisé.

Tout d'abord, il faut détacher l'objet de la plateforme et retirer les supports d'impression s'il y en a. Deux cas de figure existent : le cas des supports solubles et insolubles. En effet lorsque que les supports sont imprimés avec le même filament insoluble que l'objet imprimé, le retrait des supports est forcément manuel et se fait à l'aide d'une pince coupante. Mais dans le cas où l'imprimante possède deux buses d'impression, il est possible d'imprimer les supports avec un filament soluble. Dans ce cas, il suffit de tremper l'objet imprimé dans un bain (la solution est variable selon le matériau soluble utilisé) qui dissout les supports.

Ensuite, le rendu d'impression couche par couche n'étant pas tout à fait lisse, il est possible de lisser la surface de l'objet. Cependant, il existe autant de méthodes de lissage d'un objet qu'il existe de matériaux. La méthode la plus simple et réalisable sur le PLA et de nombreux autres matériaux est celle du ponçage à l'aide d'un papier abrasif à faible grain avec un mouvement circulaire. Pour certains matériaux, il est également possible d'utiliser des produits dissolvants : par exemple, l'acétone peut être appliquée à l'aide d'un chiffon sur des objets imprimés en ABS car elle dissout ce matériau et permet ainsi de lisser leur surface. Mais certains matériaux tels que le TPU sont difficile à traiter et afin d'avoir le meilleur rendu possible, il faut dans ce cas arriver à obtenir une impression de la meilleure qualité possible (Yonis 2023).

E) Conclusion

Le monde de l'impression 3D est très vaste : il existe de nombreuses techniques d'impression 3D, de nombreux matériaux, de nombreuses machines de marques différentes avec une ou plusieurs buses d'impression. Tout ceci engendre des méthodes de fabrication variables à adapter selon les caractéristiques de l'objet recherché, des paramètres d'impression à adapter selon le modèle d'imprimante utilisé mais aussi parfois en fonction des conditions environnementales.

II – Exemples d'applications actuelles à la médecine

A) Application en médecine humaine

L'impression 3D est une technologie en plein essor en médecine humaine, mais elle est utilisée différemment selon les domaines (Figure 4).

L'un des domaines médicaux qui utilise l'impression 3D depuis le plus longtemps est la dentisterie, car les produits doivent être de petite taille et très adaptables aux patients. Dans d'autres domaines, l'impression 3D est en train d'émerger avec le développement de l'impression de tissu et d'organes qui peuvent notamment servir de modèles pour la conception de traitements pharmaceutiques et ainsi réduire l'utilisation de modèles animaux.

Enfin, l'impression 3D est tout particulièrement utile pour la création de modèles d'organes ou de pièces anatomiques qui peuvent servir d'une part d'outils pédagogiques, et d'autre part de support visuel pour la planification d'opérations chirurgicales (Ciobotaru et al. 2022).

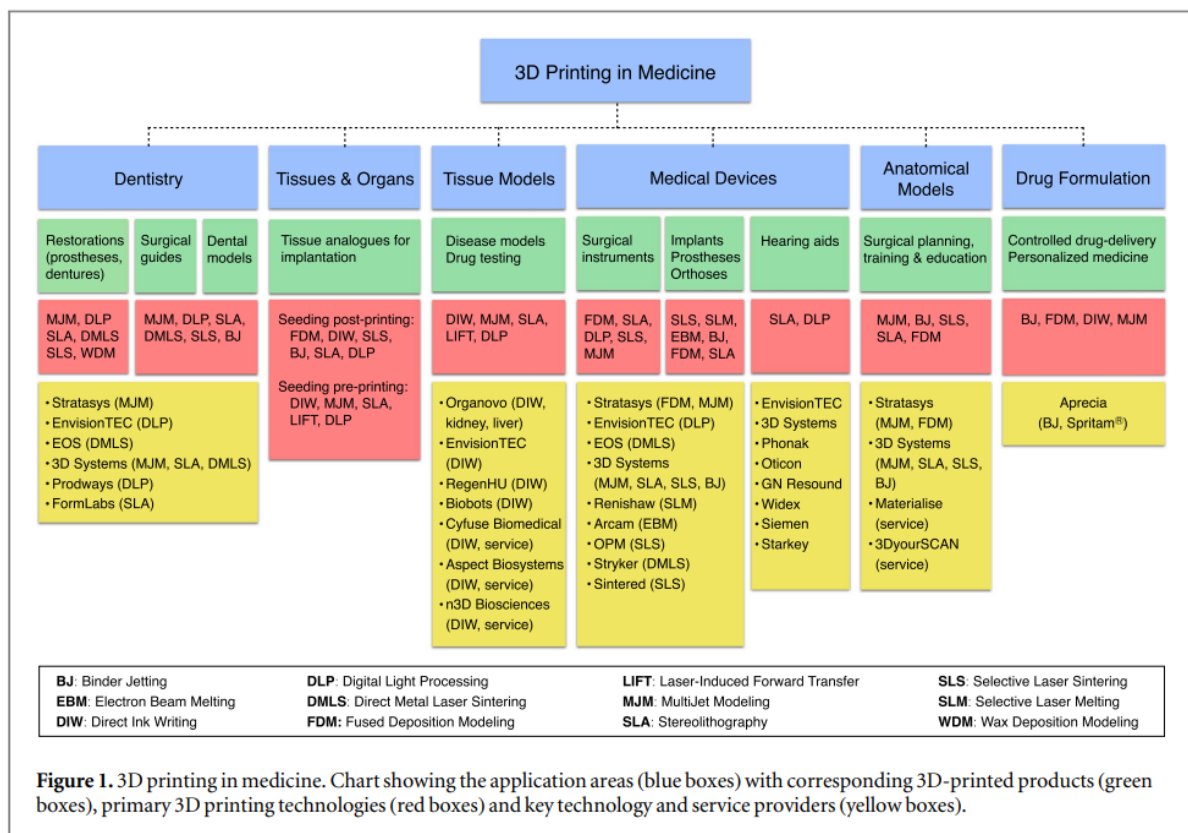


Figure 4. Applications de l'impression 3D à plusieurs domaines de médecine humaine (Liaw et Guvendiren 2017)

B) Application en médecine vétérinaire

En médecine vétérinaire, l'impression 3D est peu développée. Mais c'est une technologie qui peut prendre beaucoup d'importance pour deux raisons principales. D'une part, les espèces traitées sont de tailles et de morphologies variées et l'impression 3D peut, avec l'utilisation de scanner 3D, permettre de fabriquer des éléments sur mesure. D'autre part, certaines technologies telles que le dépôt de fil fondu, sont peu onéreuses et peuvent être utilisés pour la faune sauvage dans des centres de soins qui ont peu de revenus.

A l'heure actuelle, on recense de nombreux cas cliniques où l'impression 3D a été utilisée mais aucune étude statistique n'a permis de comparer son efficacité par rapport aux pratiques actuelles.

a. Conception d'orthèses, de prothèses ou de guides chirurgicaux

Tout d'abord, l'impression 3D peut permettre de concevoir des orthèses, qui sont des appareillages permettant d'offrir un soutien à un membre (comme les attelles) ; des prothèses, donc le but est de remplacer une partie manquante de l'organisme (hanche, membre entier, ...) ; ou même de concevoir des outils tels que des guides chirurgicaux.

Comme on peut le voir sur des sites *open source*, certaines orthèses ou prothèses comme des chariots pour animaux paralysés ou des prothèses articulées pour pattes d'oiseaux, sont conçues par des amateurs extérieurs au monde vétérinaire. Mais au sein de la communauté vétérinaire, de plus en plus de cas où l'impression 3D a été utilisée pour la conception d'orthèses ou de prothèses sont publiés.

En 2020, une orthèse a été conçue pour un veau souffrant d'une fracture du métatarse gauche pour laquelle la pose de broche avait échoué, et a permis une bonne cicatrisation osseuse (Santos et al. 2020).

En 2017, une prothèse de membre pelvien gauche a été imprimée pour un perroquet amazone à lores rouges (*Amazona autumnalis*) de 21 ans dont l'une des pattes avait été amputée suite à une attaque par un perroquet amazone poudrée (*Amazona farinosa*). Cette prothèse, constituée d'un manchon rigide et d'une spatule souple (Figure 5), a permis d'améliorer le confort de vie de l'oiseau et de limiter les

lésions sur le membre intact (Galicia et al. 2018). Les prothèses conçues peuvent aussi l'être pour des raisons esthétiques comme un implant oculaire suite à une énucléation (Park et al. 2020).



Figure 5. Modèle 3D (gauche) et prothèse imprimée (droite) chez un perroquet Amazone à lores rouges (*Amazona autumnalis*). (Galicia et al. 2018)

Mais la plupart du temps ces prothèses sont externes. Les cas d'endoprothèses sont plus rares car le risque de réaction inflammatoire est grand. Ces prothèses nécessitent alors des matériaux métalliques qui sont plus coûteux que les matériaux couramment utilisés. L'intérêt d'utiliser des prothèses métalliques est d'une part pour leur durabilité et leur solidité et d'autre part car il est possible de les soumettre à un procédé de stérilisation au contraire des composés plastiques. Un cas publié en 2022 décrit la pose d'une prothèse osseuse du bassin suite à une chirurgie d'ostéotomie dans un contexte d'ostéome, chez un chat angora turc de 5 ans (Figure 6). La prothèse a été conçue en titanium avec une structure poreuse de sorte à permettre la colonisation par les tissus mous et par l'os, et munie d'orifices pour la pose de vis et pour permettre la réalisation de sutures (Roh et al. 2022).

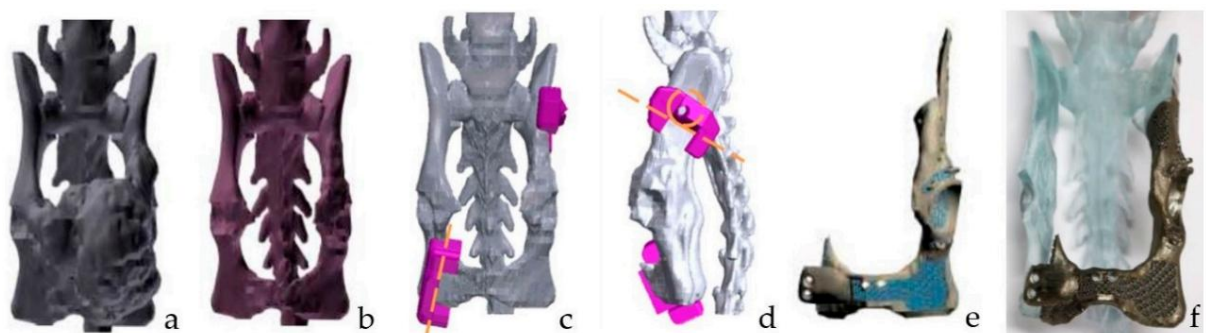


Figure 6. Conception pré-opératoire d'une prothèse de bassin chez un chat angora turc de 5 ans. (a) Segmentation et reconstruction 3D du bassin avec la tumeur. (b) Modélisation 3D du bassin physiologique. (c-e) Conception de la prothèse 3D. (f) Pose de la prothèse sur un modèle 3D d'os lors d'un entraînement avant la chirurgie.

Enfin, en dehors des orthèses et prothèses, l'impression 3D peut permettre la conception de guides chirurgicaux. Ainsi en 2017 une fracture comminutive médio-diaphysaire de l'humérus chez un chat a pu être traitée à l'aide de l'impression d'un guide de réduction : un scanner a d'abord permis la reconstitution 3D de l'humérus fracturé en se basant sur l'humérus controlatéral, puis un guide a été modélisé pour permettre de maintenir l'alignement des fragments proximal et distal à l'aide de fixateurs externes (Figure 7). Enfin, une plaque a été posée pour solidifier le montage et fixer le fragment médial. L'utilisation de ce guide a permis la restauration quasi-parfaite de l'angulation de l'humérus avec un abord chirurgical peu invasif. (Oxley 2018)

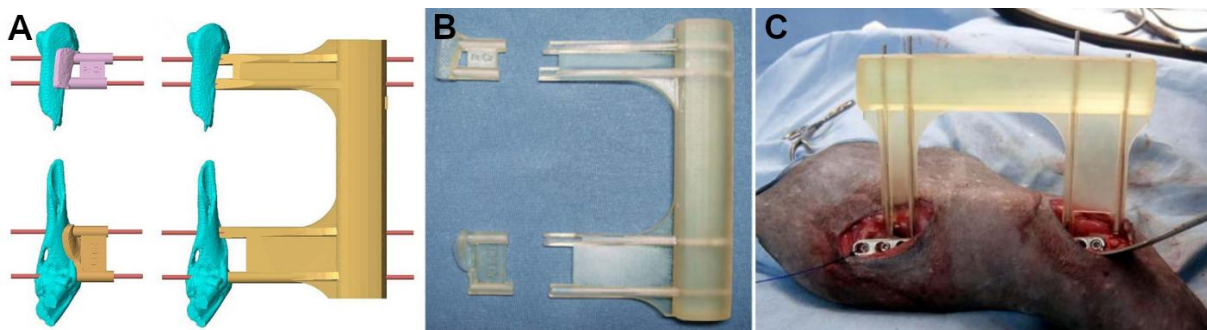


Figure 7. Conception d'un guide de réduction chez un chat présentant une fracture comminutive médio-diaphysaire de l'humérus. Conception du modèle 3D en deux parties (A). Impression du modèle en résine (B). Mise en place du guide (C). (Oxley 2018)

b. Planification chirurgicale

Avant même la création d'outils chirurgicaux imprimés en trois dimensions, l'impression de modèles 3D peut être utilisée pour planifier des interventions chirurgicales sur plusieurs plans.

D'une part, l'impression en taille réelle d'une anomalie peut permettre le choix des instruments et des outils de l'intervention. Lors de chirurgies orthopédiques, cela peut permettre le choix de la meilleure plaque nécessaire à la stabilisation d'une fracture et la déformation de celle-ci avant la chirurgie (Figure 8). Cela apporte une meilleure anticipation de la chirurgie et une réduction du temps chirurgical au bénéfice de l'animal. (Caron 2024)

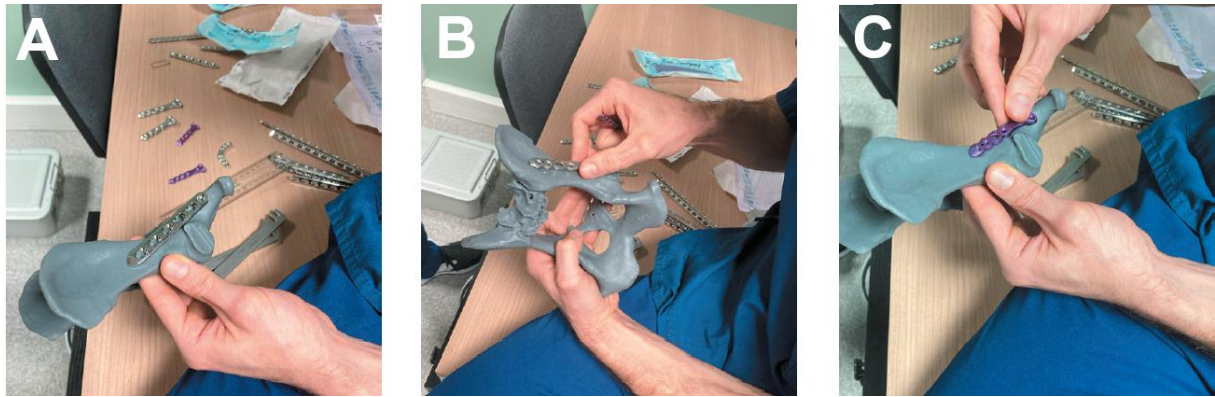


Figure 8. Choix de la plaque nécessaire à la stabilisation d'une fracture du bassin grâce au modèle sain imprimé, et contournement préopératoire de la plaque. Plusieurs modèles de plaque sont essayés (A et B) et la plaque est positionnée sur l'impression (C). (Caron 2024)

D'autre part, imprimer un modèle peut permettre de visualiser des anomalies plus facilement et de planifier les abords chirurgicaux. Ce fut le cas en 2016 lors d'une chirurgie chez un chiot de 10 mois qui souffrait de plusieurs anomalies vasculaires thoraciques congénitales. Les anomalies avaient été diagnostiquées par scanner puis un modèle 3D du cœur et de la vascularisation thoracique avait été imprimé en taille réelle (Figure 9) et avait été utilisé afin de faciliter l'organisation de la chirurgie en coordonnant les équipes de chirurgiens et d'anesthésistes, en permettant aux chirurgiens de mieux visualiser les anomalies, leur orientation spatiale et les voies d'abord vasculaires, et en facilitant le choix de taille des instruments (Dundie et al. 2017).

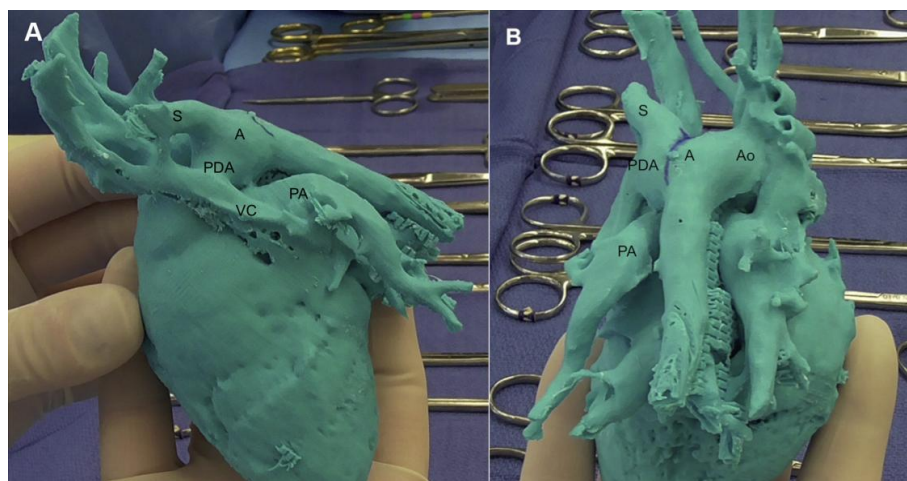


Figure 9. Modèle 3D du cœur et des principaux vaisseaux thoraciques d'un chiot de 10 mois souffrant d'anomalies vasculaires congénitales. A : Dilatation anévrysmale de l'aorte. PDA : Persistance du canal artériel. S : Artère subclavière gauche aberrante. PA : Artère pulmonaire gauche. Ao : Arc aortique à droite. VC : Veine cave.

Les études ayant utilisé l'impression de modèles 3D pour préparer des chirurgies ont montré subjectivement que cette préparation avait permis de réduire les temps

chirurgicaux, d'améliorer la précision des chirurgiens et de réduire les risques péri-opératoires et les complications post-chirurgicales (Yilgör Huri et Oto 2022).

c. Modèles pédagogiques

Les modèles 3D peuvent également servir de supports pédagogiques dans le domaine de l'anatomie. En effet, des professeurs de l'université vétérinaire de Turquie ont utilisé l'impression 3D pour imprimer des os hyoïdes de différentes espèces à partir d'images de scanner (Figure 10). Ils ont rapporté que c'est un os pour lequel l'impression de modèles 3D est particulièrement utile, d'une part car c'est un os fragile et difficile à conserver et d'autre part car c'est un os de petite taille et que l'impression peut être agrandie pour permettre une meilleure visualisation des structures (Bakici, Akgün, et Oto 2019).



Figure 10. Modèles 3D d'os hyoïdes de différentes espèces domestiques (Bakici, Akgün, et Oto 2019)

Enfin, si les modèles d'organes imprimés en 3D peuvent servir de supports pédagogiques, ils peuvent également servir de support de communication pour expliquer aux propriétaires d'animaux la localisation d'une affection ou bien le déroulement d'une opération chirurgicale.

PARTIE 2 : ESSAIS CLINIQUES ET APPLICATION À PLUSIEURS PATHOLOGIES AVIAIRES

I – Essai clinique d’une attelle dite « en J » conçue pour la cicatrisation des fractures des métacarpes chez les oiseaux de centre de soin

A) Fracture des métacarpes chez les oiseaux

a. Anatomie et fonction des métacarpes

Les métacarpes font partie des os distaux de l’aile et sont au nombre de trois : l’alula, le métacarpe majeur et le métacarpe mineur (du plus crânial au plus caudal lorsque l’aile est en extension). Chez l’adulte, les métacarpes majeur et mineur sont fusionnés en leur extrémité proximale et distale. A leur extrémité distale, ils s’articulent avec les phalanges, tandis qu’au niveau de leur extrémité proximale ils forment le carpométacarpe qui s’insère dans l’articulation du poignet avec les os radial et ulnaire du carpe d’une part, et avec le radius et l’ulna d’autre part (Figure 11).

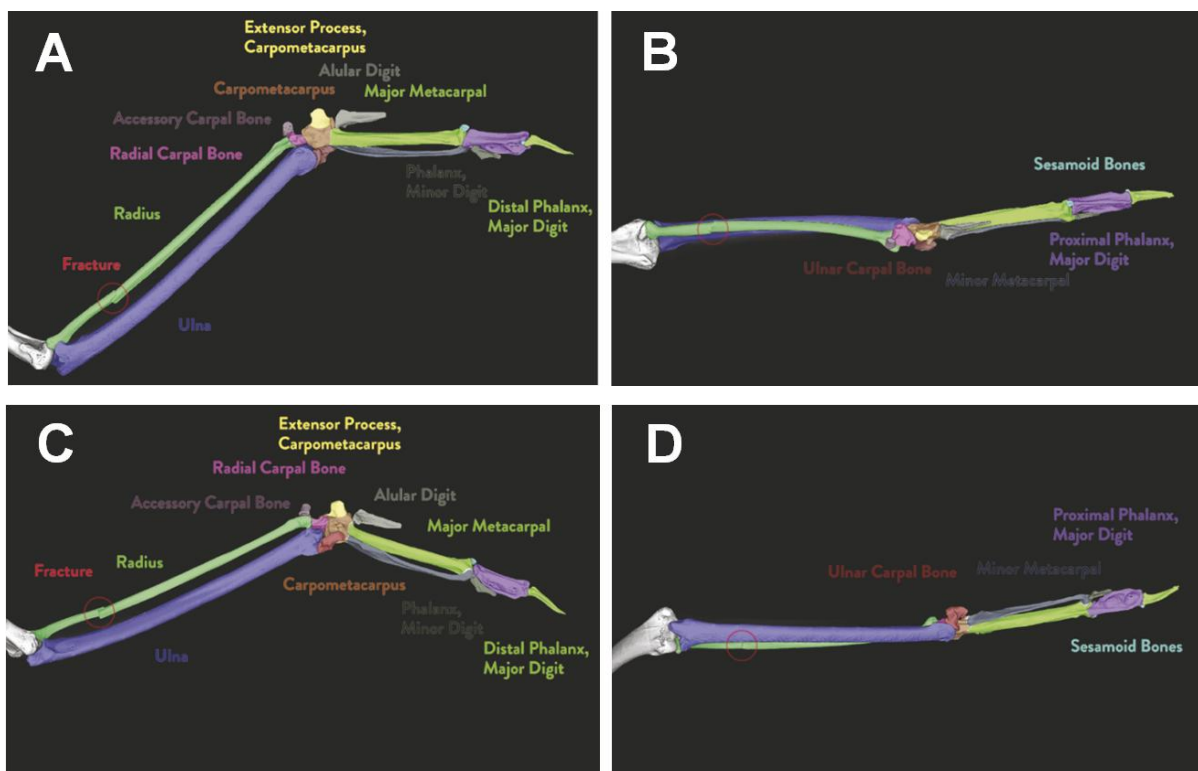


Figure 11. Images obtenues par tomodensitométrie de la partie distale d’une aile de buse à queue rousse (*Buteo jamaicensis*) : vue dorsale (A), vue crâniale (B), vue ventrale (C), vue caudale (D). (Orosz, Echols, et Redig 2023)

Le poignet joue un rôle majeur pendant le vol en empêchant la pronation et la supination des métacarpes soumis respectivement aux pressions ventrales et dorsales de l'air (Vazquez 1992).

Les métacarpes jouent également un rôle important de par leur forme aplatie dorso-ventralement qui permet l'insertion d'une partie des rémiges primaires sur leur partie caudo-dorsale. Les rémiges primaires sont les grandes plumes les plus distales de l'aile et jouent un rôle important dans le vol de l'oiseau car elles sont soumises à la poussée de l'air au cours du vol.

Enfin, la structure osseuse des métacarpes leur confère plutôt des propriétés de résistance à des forces entraînant une flexion de l'os lorsque d'autres os comme l'humérus et l'ulna présentent plutôt des propriétés de résistance à la torsion (De Margerie et al. 2005).

b. Fréquence des fractures des métacarpes

Peu de données sont disponibles en ce qui concerne les fractures des métacarpes chez les oiseaux de faune sauvage.

Les données du centre de soin de l'école nationale vétérinaire de Toulouse (ENVT) récoltées entre le 1^{er} janvier 2016 et le 31 décembre 2022 (voir Annexe 2) ont pu être analysées et ont ainsi permis de caractériser les fractures des métacarpes rencontrées dans le centre de soin.

Tout d'abord, il a été mis en évidence qu'au centre de soin, les fractures les plus fréquentes chez les oiseaux reçus touchent les ailes (Figure 12).

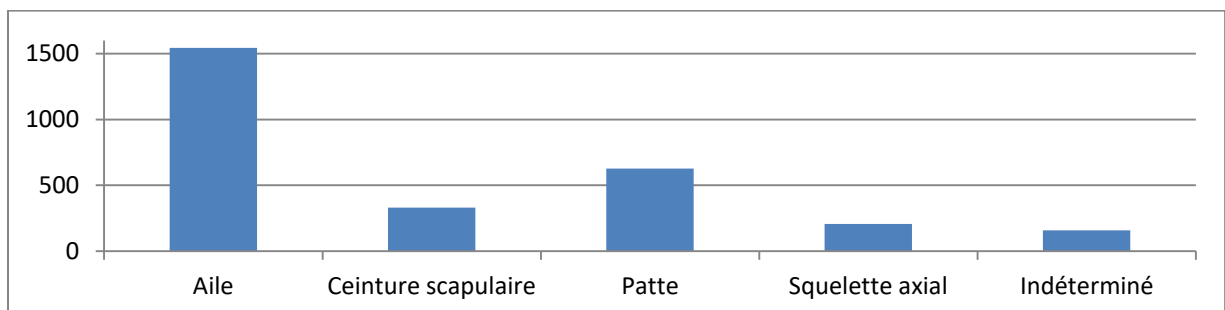


Figure 12. Histogramme représentant le nombre de fractures pour chaque zone anatomique, recensées au centre de soin de la Faune sauvage de l'ENVT entre le 01/01/2016 et le 31/12/2022.

Parmi les fractures des ailes, les fractures des métacarpes sont le 4^{ème} type de fractures le plus représenté après les fractures de l'humérus puis du radius et de

l'ulna (qui sont souvent concomitantes). Les fractures des métacarpes représentent ainsi 18% des fractures de l'aile (Figure 13).

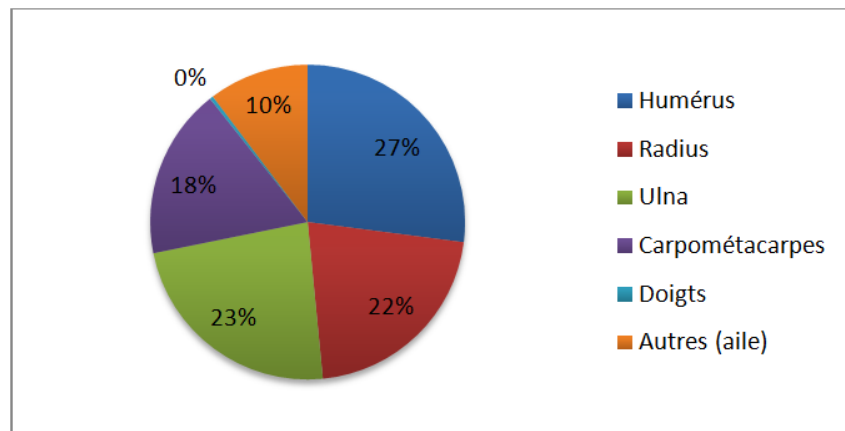


Figure 13. Graphique représentant la proportion de fractures touchant les différents segments osseux de l'aile d'après les données du centre de soin de la Faune sauvage de l'ENVT entre le 01/01/2016 et le 31/12/2022.

De plus, les fractures des métacarpes sont en pratique très souvent ouvertes, d'une part car elles sont fréquemment la conséquence de collision en vol ce qui implique des chocs de forte énergie et d'autre part car les métacarpes sont peu protégés et maintenus par des tissus mous. Au centre de soin de la faune sauvage de l'ENVT, on remarque tout d'abord que pour tous les segments osseux, une grande proportion des fractures sont « indéterminées » de par le manque d'information renseignées dans les dossiers des individus. On peut supposer qu'on a plus tendance à renseigner le fait qu'une fracture est ouverte et donc qu'il y a dans les cas indéterminés une plus grande proportion de fractures fermées. Malgré cela, en comparant les différents segments osseux de l'aile, on remarque que les fractures des métacarpes semblent plus souvent ouvertes que pour les autres segments osseux (Figure 14).

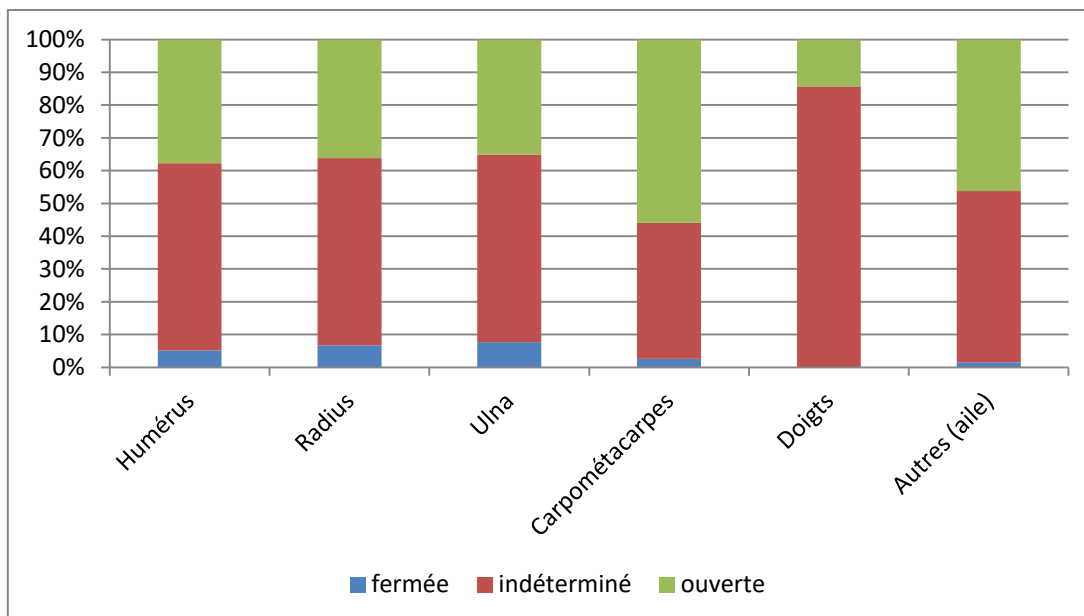


Figure 14. Histogramme représentant le type de fractures pour chaque segment osseux de l'aile, d'après les données centre de soin de la Faune sauvage de l'ENVT entre le 01/01/2016 et le 31/12/2022.

Enfin, lorsqu'on se penche sur les espèces touchées par les fractures des métacarpes (Figure 15), on remarque que les espèces les plus touchées sont principalement les rapaces et certains colombidés.

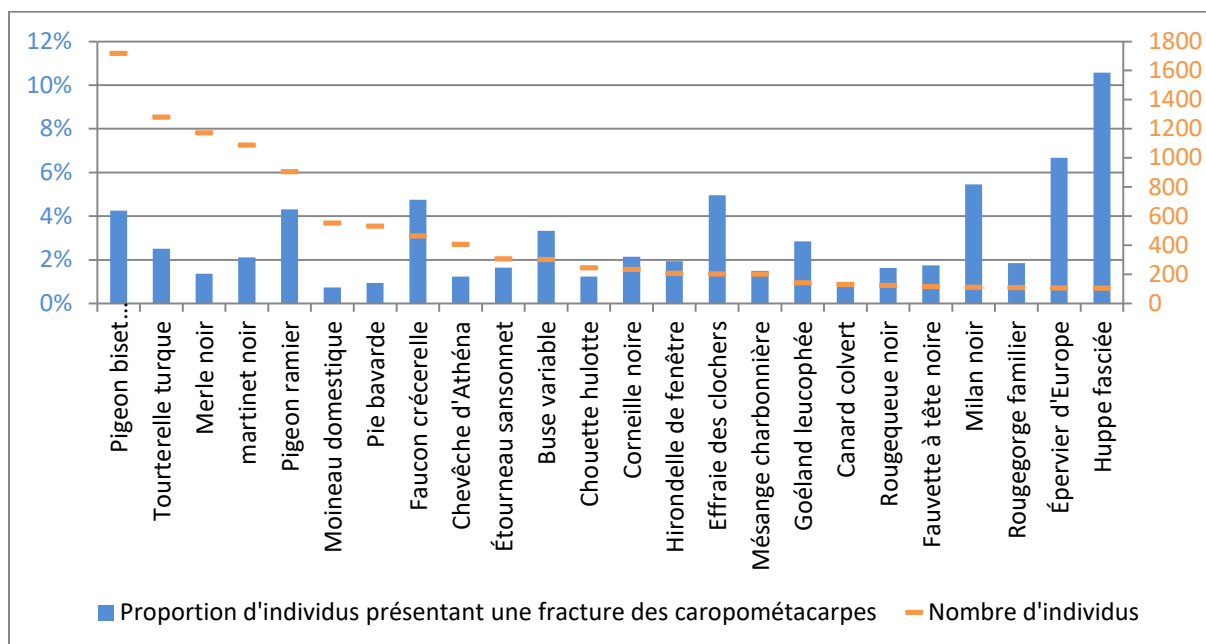


Figure 15. Histogramme représentant la proportion des fractures des métacarpes chez les espèces d'oiseaux les plus fréquentes au centre de soin (N>100), d'après les données centre de soin de la Faune sauvage de l'ENVT entre le 01/01/2016 et le 31/12/2022.

Ainsi, au centre de soin de l'ENVV, les fractures des métacarpes sont des fractures des ailes plutôt fréquentes qui sont souvent ouvertes et touchent principalement les rapaces et les colombidés.

c. Physiopathologie et enjeux des fractures des métacarpes

La stabilisation des fractures des métacarpes présente de nombreux enjeux liés à l'anatomie de cette portion de l'aile.

Tout d'abord, les métacarpes sont des os couverts par une faible quantité de tissus mous car ils sont essentiellement entourés de tendons et de vaisseaux (Figure 16). Ainsi, les fractures rencontrées sont souvent ouvertes, comminutives et œdématisées et leur réduction chirurgicale est difficile de par la fragilité des os (Bennett et Kuzma 1992).

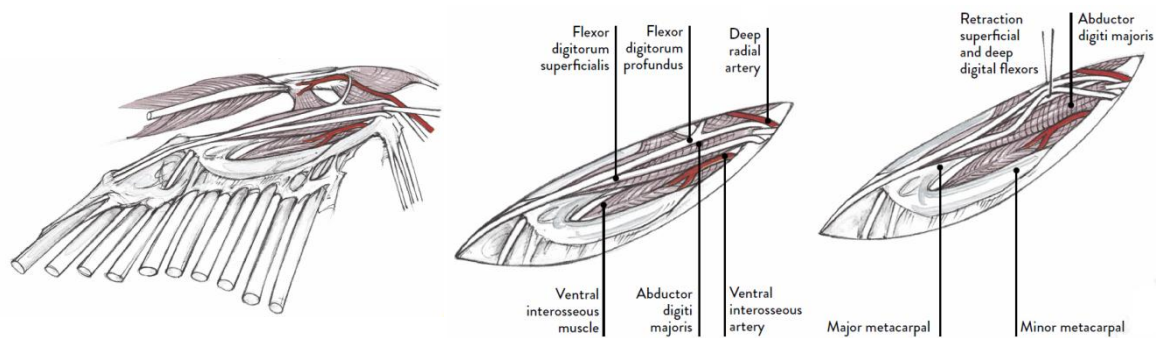


Figure 16. Schéma présentant les structures internes sur la face ventrale en portion distale de l'aile d'un oiseau

De plus, bien que la cicatrisation osseuse chez les oiseaux soit plus rapide que celle des mammifères (Sabater González 2019), les métacarpes présentent une longue durée de cicatrisation par rapport aux autres os de l'aile. En effet, pour une fracture de l'humérus, on obtient une cicatrisation au bout d'environ trois semaines ; pour une fracture du radius et/ou de l'ulna, on obtient une cicatrisation au bout d'environ trois à quatre semaines ; mais une fracture des métacarpes met plus de temps à cicatriser, environ quatre à six semaines, de par la réduction d'afflux sanguin à l'extrémité de l'aile (Dascalu et al. 2013).

Enfin, le pronostic de cicatrisation des fractures des métacarpes est variable en fonction de l'os atteint. En effet, il paraît logique que si le métacarpe mineur est intact, il permet d'apporter un support interne pour la cicatrisation. Cependant,

lorsque les métacarpes majeur et mineur sont atteints, la fracture peut également être réduite avec succès (Burdeaux et Wade 2018).

d. Traitements actuels

De nombreux traitements sont aujourd'hui cités dans le cadre de fractures des métacarpes (Orosz, Echols, et Redig 2023). Les différentes approches chirurgicales et non chirurgicales présentent des inconvénients et des atouts variés. Le choix de la méthode est principalement basé sur la taille de l'oiseau et sur le type de fracture.

Parmi les traitements non chirurgicaux, deux possibilités existent : le bandage en huit ou une attelle externe renforcée. Un simple bandage en huit peut suffire dans le cas de fractures peu déplacées et particulièrement lorsque le métacarpe mineur est intact. Une attelle externe (appelée « *curved-edge splint* » en anglais) est conçue à l'aide d'un matériau thermoformable et permet également la stabilisation de fractures peu déplacées (Figure 17).

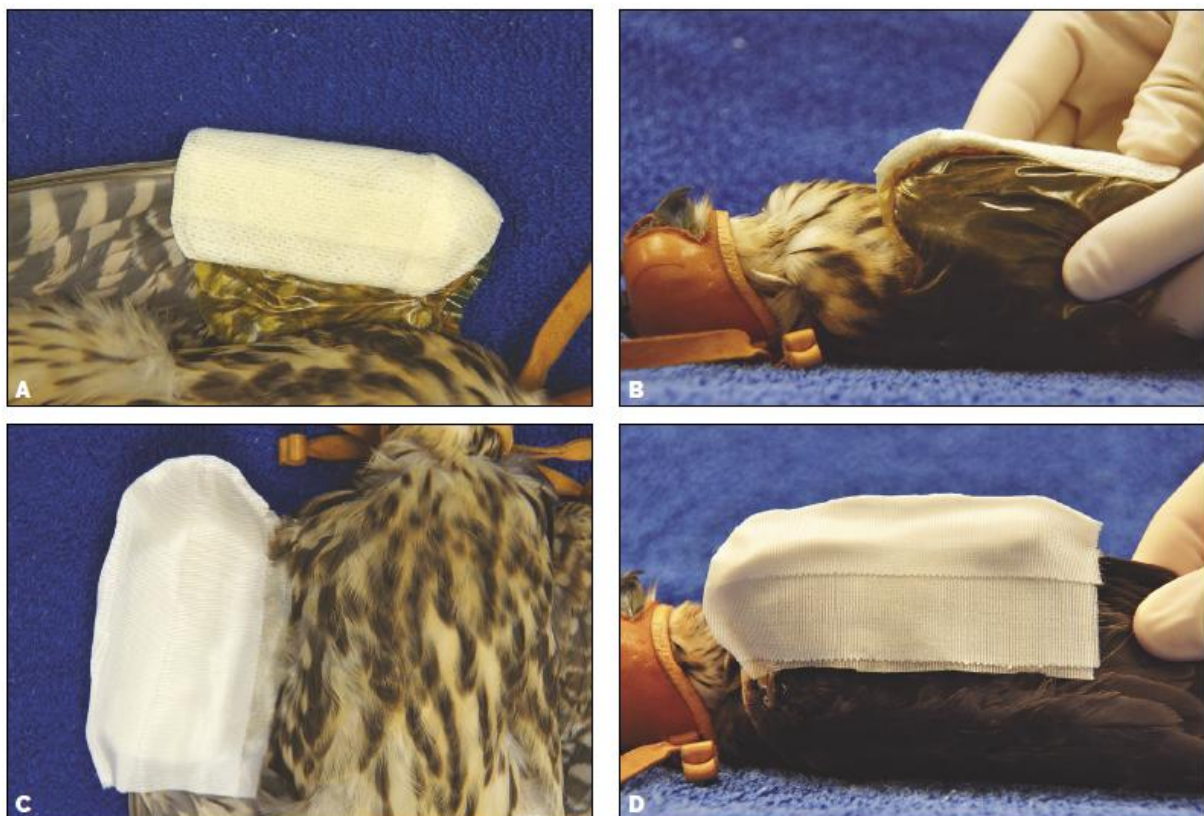


Figure 17. « *Curved-edge splint* » formé à l'aide de plastique thermoformable et appliqué à un faucon émerillon (*Falco columbarius*). Une pièce de plastique thermoformable est coupée à la longueur du métacarpe et modelée sur la face ventrale de l'os (A). Vue dorsale du modelage de l'attelle (B). L'attelle est fixée à l'aide de scotch adhésif appliqué ventralement (C) et dorsalement (D)(Orosz, Echols, et Redig 2023).

En ce qui concerne les traitements chirurgicaux, les possibilités sont une fixation par clou centromédullaire ou bien une fixation par des fixateurs externes de type I. L'utilisation de fixateurs externes de type I est la méthode de choix dans le cas de fractures comminutives avec un fort délabrement des tissus mous environnants car elle permet une bonne réduction de la fracture, un bon alignement et une bonne stabilisation avec une manipulation minimale des tissus mous. Elle permet la réduction de fractures diaphysaires mais aussi métaphysaires (Figure 18). Une cicatrisation plus rapide est observée lors de la mise en place de fixateur internes, mais une meilleure conservation de la fonctionnalité de l'aile est observée avec l'utilisation de fixateurs externes (Tully 2002). Ces méthodes chirurgicales sont uniquement possibles sur des oiseaux de grands formats et pour lesquelles le poids du montage serait supportable.

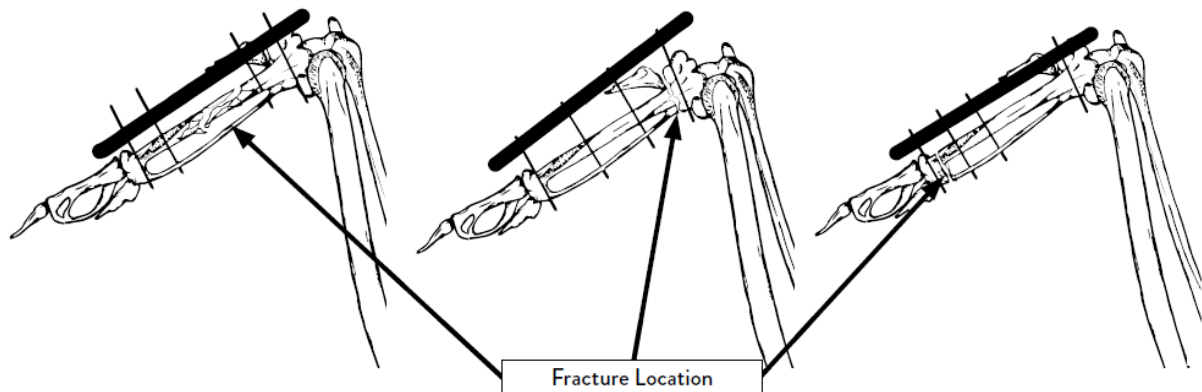


Figure 18. Schémas de la mise en place de fixateurs externes de type I sur des fractures respectivement comminutive diaphysaire, métaphysaire proximale et métaphysaire distale (de gauche à droite) (Orosz, Echols, et Redig 2023).

B) Conception de l'attelle

a. Objectifs du prototype

Le bandage en huit est parfois insuffisant pour assurer un bon maintien de l'alignement des métacarpes. Le « *curved-edge splint* » quant à lui est long à créer et peut bouger selon sa conception. Il serait donc profitable de concevoir un moyen de contention externe qui permettrait de maintenir les métacarpes alignés et qui serait facile à mettre en place.

Ainsi, Adrien CORSI (responsable soigneur, capacitaire et médiateur faune sauvage à la Ligue pour la Protection des Oiseaux d'Auvergne-Rhône-Alpes) a imaginé et conçu une attelle à l'aide de l'impression 3D qui répond à ces critères.

C'est une attelle qui englobe les métacarpes sur leurs faces interne et externe et qui présente une forme de J qui lui permet d'englober le poignet et l'empêche de glisser le long des métacarpes.

b. Réalisation du prototype

Mesures

L'attelle en J a été conçue selon des mesures précises propres à chaque espèce. Ces mesures correspondent aux deux longueurs du J, à la largeur de l'attelle et à l'angle du J (Figure 19) et doivent être prises sur une aile au repos :

- La grande longueur correspond à la distance allant du poignet jusqu'à l'extrémité du métacarpe ;
- La petite longueur correspond à la distance allant du poignet jusqu'au patagium ;
- la largeur correspond à l'épaisseur du poignet ;
- L'angle est celui entre le radius/ulna et les métacarpes.

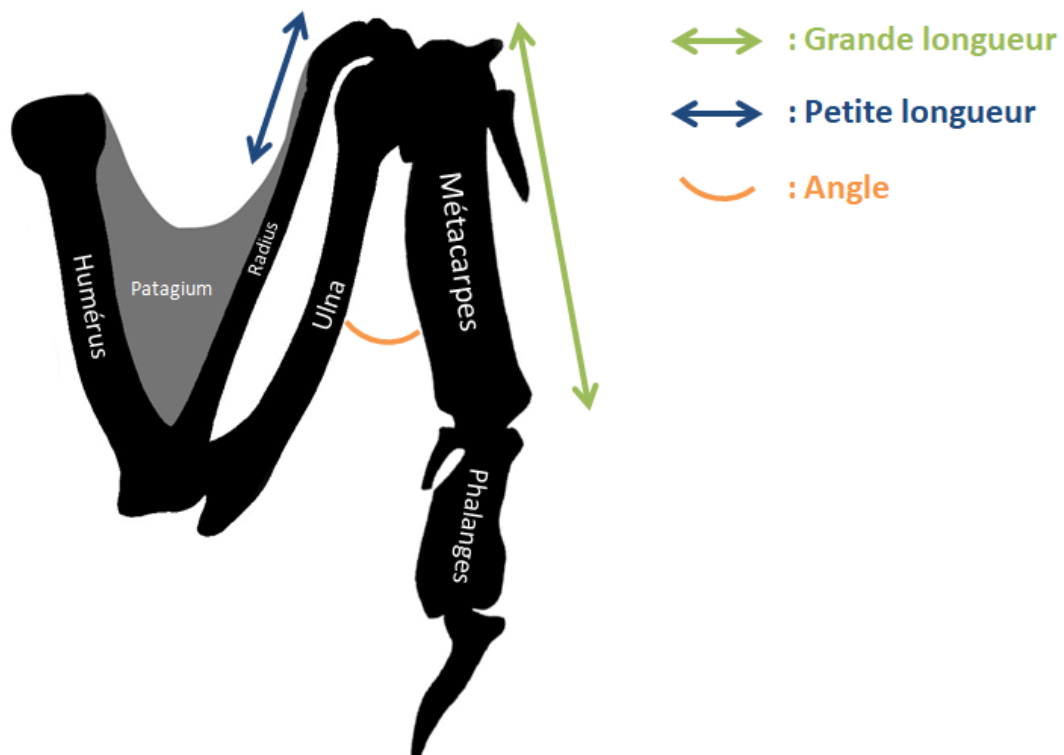


Figure 19. Schéma simplifié d'une aile d'oiseau au repos représentant les mesures à réaliser pour la conception d'une attelle en J

Modélisation

Plusieurs attelles ont ensuite été modélisées grâce à un logiciel de modélisation 3D. Elles ont été ajourées de trous afin de permettre d'une part une aération des tissus et d'autre part une réduction du poids des attelles et donc du poids supporté par l'aile.

Les attelles ont été conçues par Adrien CORSI spécifiquement pour plusieurs espèces (Figure 20). Cependant, certaines espèces ayant des morphologies d'ailes similaires, certaines attelles peuvent être utilisées pour plusieurs espèces. Les utilisations de ces attelles au centre de soin de la faune sauvage à la LPO d'Auvergne-Rhône-Alpes ont montré par exemple que l'attelle pour buse variable imprimée à 50% peut être utilisée sur un colombidé. De même, l'attelle pour faucon crécerelle, lorsqu'elle est imprimée en plus grande taille, elle peut être utilisée sur des chouettes.

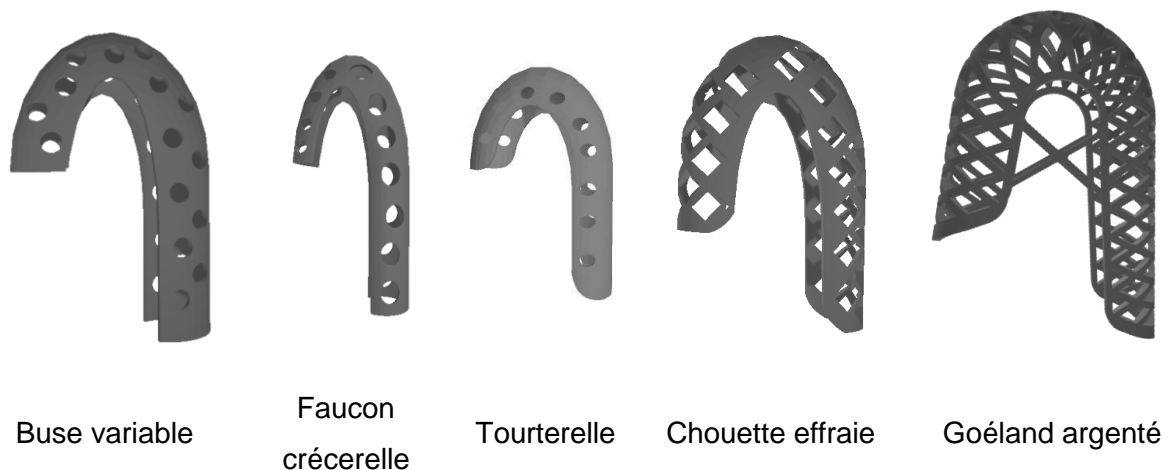


Figure 20. Modèles d'attelle en J en trois dimensions pour différentes espèces d'oiseaux

Impression

Avant l'impression, vient d'abord le choix du mode d'impression et du matériau. En ce qui concerne le mode d'impression, l'impression par dépôt de fil fondu suffit largement car elle permet une impression rapide, grand public, à faible coût, et car il n'est ici pas nécessaire d'obtenir un objet parfaitement lisse. Pour ce qui est du matériau, pour l'attelle en J, un matériau souple est préférable car il permet une mise en place plus aisée, une adaptation individuelle à la forme de l'aile et certains matériaux souples ont même des propriétés de thermoformabilité. Il est ainsi possible d'imprimer l'attelle en TPU (polyuréthane thermoplastique) ou en PLA soft.

L'impression du TPU étant plus simple et plus couramment réalisée, c'est ce matériau qui a été choisi pour l'impression des attelles en J.

Les impressions ont été réalisées à l'aide de l'imprimante Original Prusa i3 MK3S+ avec un filament TPU (SainSmart TPU). Les paramètres d'impression étaient les suivants :

- Température du plateau : 50°C ;
- Température de la buse : 230°C ;
- Vitesse d'impression : entre 25 et 45 millimètres par seconde.

Les impressions ont duré entre une heure et deux heures et ont consommé entre 3 et 13 grammes de filament en fonction de la taille des attelles. Pour les quantités de filament utilisées, le coût de production s'élève entre 0,11 € pour les plus petites tailles et 0,45€ pour les plus grandes tailles.

Résultats pour plusieurs espèces

Dans un premier temps, les attelles pour buse, pour faucon crécerelle et pour chouette effraie ont été imprimées en taille originale (Figure 21). L'attelle pour chouette effraie était trop souple et trop fragile. Ainsi, une attelle pour faucon crécerelle a été imprimée à 150% pour servir d'attelle pour chouette. De la même façon, l'attelle pour tourterelle était très souple et fragile et une attelle pour buse variable a été imprimée à 50% pour servir d'attelle pour colombidé.



Buse variable, 100%



Tourterelle, 100%



Buse variable, 50%



Faucon crécerelle, 100%



Chouette effraie, 100%



Faucon crécerelle, 150%

Figure 21. Photographies d'attelles en J imprimées en PLU pour différentes espèces d'oiseaux

c. Essai clinique

Au centre de soin de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, deux essais d'attelles en J ont pu être réalisés.

Essai de mise en place sur un élanion blanc

Le premier cas est celui d'un élanion blanc (*Elanus caeruleus*) percuté par une voiture et amené au centre de soin de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse le lendemain.

L'examen clinique initial a montré un animal alerte mais qui présentait d'une part une main droite pendante avec une mobilisation anormale du segment carpo-métacarpien sans plaie ou hématome en regard ; et d'autre part un strabisme convergent de l'œil gauche associé à un hématome péri-oculaire et un enfoncement du processus supra-orbitaire de l'os préfrontal évoquant un traumatisme crânien.

Une radiographie de l'aile droite a été réalisée et a montré une fracture proximale du métacarpe majeur droit avec un léger déplacement ventral de l'about distal (Figure 22).

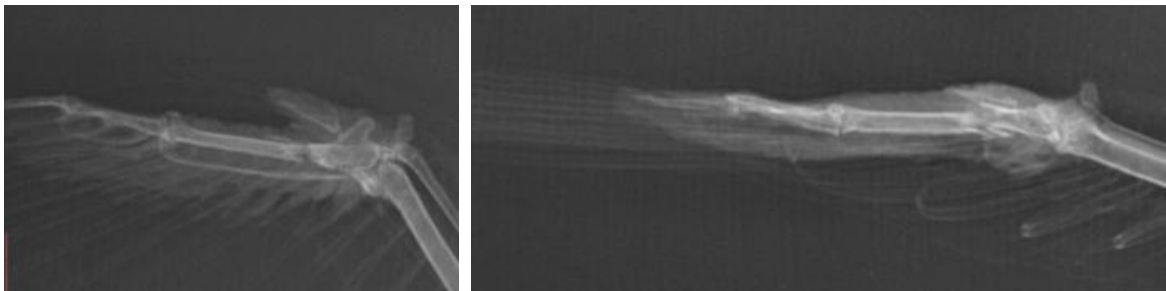


Figure 22. Radiographies centrées sur le carpométacarpe de l'aile droite d'un élanion blanc (*Elanus caeruleus*) le jour de son admission, présentant une fracture du métacarpe majeur droit. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).

Dans la mesure où la fracture était peu déplacée et fermée, une attelle en J a été mise en place (Figure 23). L'angle du poignet de l'élanion blanc étant plutôt aigu, le modèle choisi a été celui d'un faucon crécerelle. L'attelle était légèrement irrégulière et sa surface peu lisse mais l'ajout d'une compresse entre l'attelle et le poignet ajoutait trop d'épaisseur. L'attelle a donc été positionnée directement sur le poignet et maintenue à l'aide d'un bandage en huit.

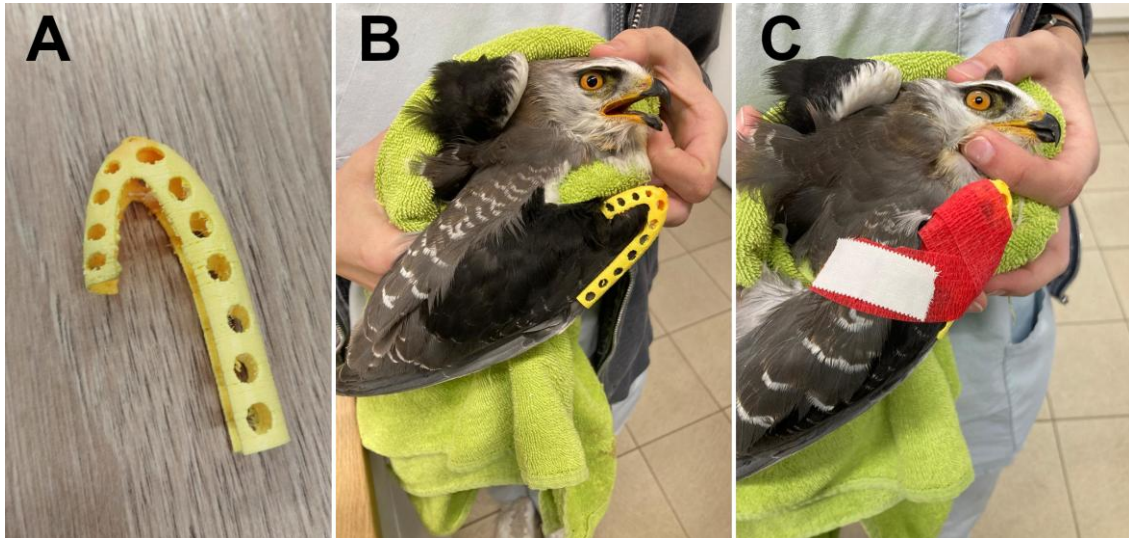


Figure 23. Photographies de la mise en place d'une attelle en J sur un élanion blanc (*Elanus caeruleus*). Attelle seule (A). Positionnement de l'attelle (B). Stabilisation de l'attelle par un bandage en huit (C).

Trois jours plus tard, le bandage en huit et l'attelle ont été retirés pour réaliser de la physiothérapie, puis remis en place. L'aile ne présentait pas de lésions associées à l'attelle. Cependant l'élanion blanc présentant de plus en plus de signes neurologiques, une décision d'euthanasie a été prise. L'attelle en J a ainsi pu rester en place quatre jours et a permis une bonne immobilisation de l'aile sans engendrer de lésions secondaires. Cependant, malgré la courte période d'essai, il aurait été intéressant de réaliser une radiographie de contrôle afin de voir si l'alignement des deux bouts osseux avait été conservé ou modifié.

Essai de cicatrisation sur une buse variable atteinte d'une fracture du métacarpe majeur gauche

Le deuxième cas est celui d'une buse variable (*Buteo buteo*) amenée au centre de soin par des particuliers l'ayant trouvée en bord de route, abattue et ne pouvant pas voler.

A son arrivée, la buse était en décubitus sternal. L'examen clinique a montré un animal en bon état corporel (590 grammes et une note d'état corporel de 3/5) et a mis en évidence une fracture fermée du tibio-tarse droit, une fracture fermée du métacarpe majeur gauche et un traumatisme facial avec une légère déviation du bec. Pour stabiliser le patient à son arrivée, un bandage en huit a été réalisé au niveau de l'aile gauche, un bandage de Robert-Jones a été réalisé sur le postérieur droit et la

buse a reçu des traitements anti-inflammatoires (Meloxicam, 1mg/kg) et analgésiques (Butorphanol, 2mg/kg).

Nous ne nous intéresserons ici qu'à la prise en charge de la fracture du métacarpe gauche.

Le lendemain de son admission, des radiographies ont été réalisées (Figure 24) et ont montré une fracture comminutive du métacarpe majeur gauche avec un léger déplacement proximal. Le métacarpe mineur et l'alula étaient intacts.

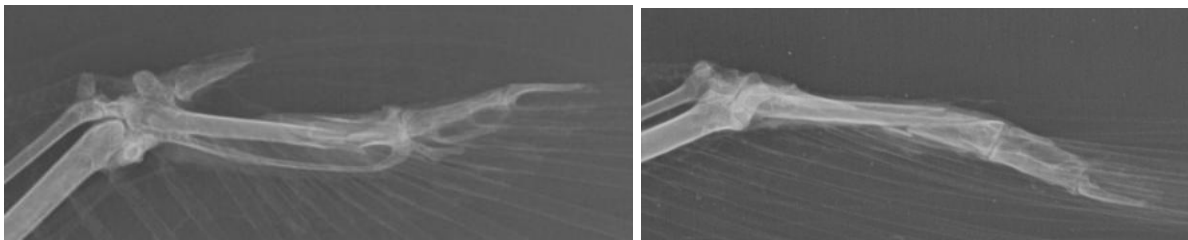


Figure 24. Radiographies centrées sur le carpométacarpe de l'aile gauche d'une buse variable (*Buteo buteo*) à son admission présentant une fracture du métacarpe majeur gauche. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).

La fracture étant peu déplacée et fermée, une prise en charge non chirurgicale a été choisie avec la mise en place d'une attelle en J. Tout d'abord, l'attelle n'étant pas parfaitement lisse, elle a été couverte de compresses afin de protéger l'aile. Elle a ensuite été positionnée au niveau de l'aile gauche puis maintenue en place à l'aide d'un bandage en huit (Figure 25).

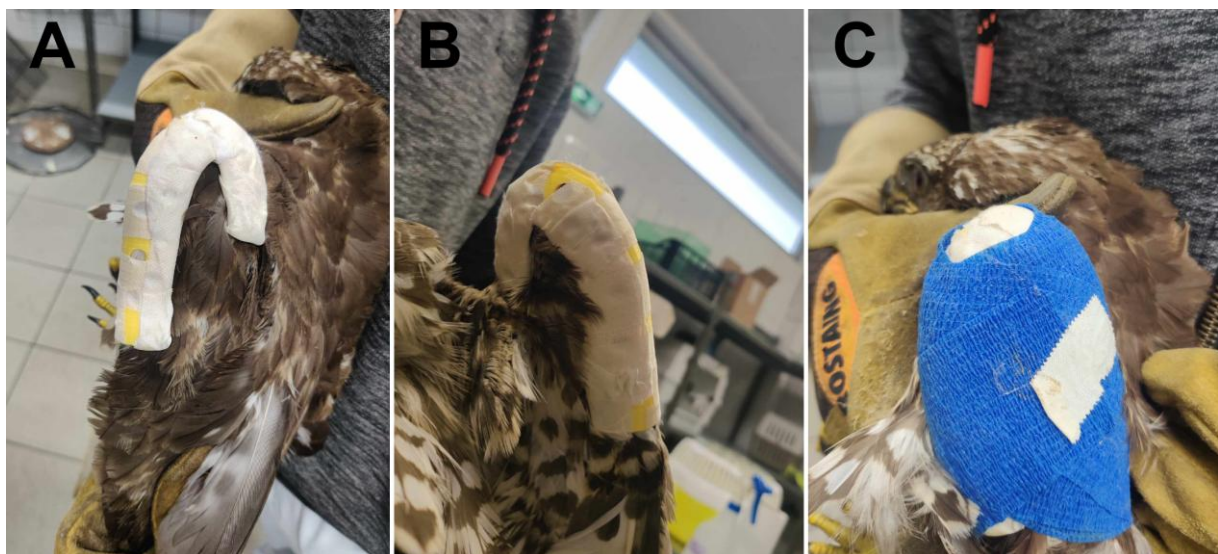


Figure 25. Photographies de la mise en place d'une attelle en J sur une buse (*Buteo buteo*). Positionnement de l'attelle : vue de la face dorsale (A), vue de la face palmaire (B). Stabilisation de l'attelle par un bandage en huit (C).

La buse a été placée dans un box en carton et a conservé l'attelle pendant six semaines. L'attelle en J était retirée tous les trois à quatre jours pour permettre la réalisation de physiothérapie puis était remise en place. La physiothérapie permet d'éviter une synostose entre les métacarpes majeur et mineur, une ankylose articulaire et une rétractation du patagium. Au cours des physiothérapies, l'aile a conservé une bonne amplitude et aucune lésion cutanée n'a été observée. Au bout de six semaines, la mobilisation de l'aile a montré une bonne stabilisation de la fracture. De plus, des contrôles radiographiques ont été réalisés à trois semaines (Figure 26) et à six semaines (Figure 27). Le contrôle à trois semaines a montré un meilleur alignement sur la vue de face qu'à l'admission, l'absence d'ostéomyélite et l'absence de cal osseux minéralisé. Le contrôle à six semaines a quant à lui montré une conservation du bon alignement observé lors du contrôle précédent et l'absence de signes d'ostéomyélite.

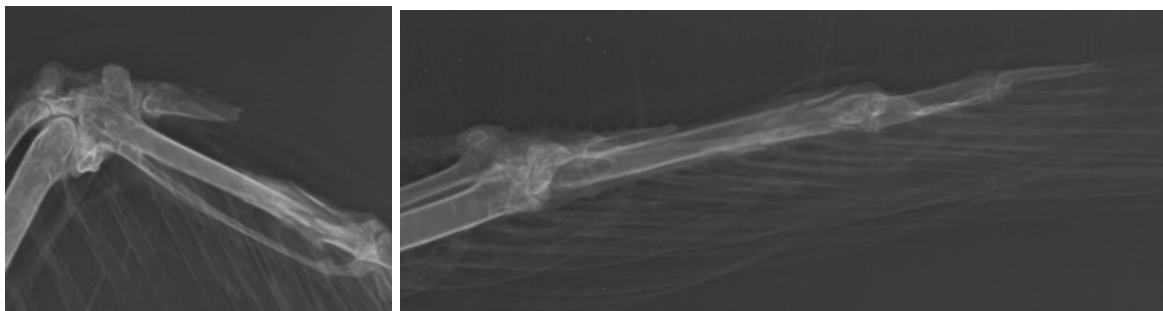


Figure 26. Radiographies centrées sur le carpométacarpe de l'aile gauche d'une buse variable (*Buteo buteo*) trois semaines après son admission présentant une fracture du métacarpe majeur gauche. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).

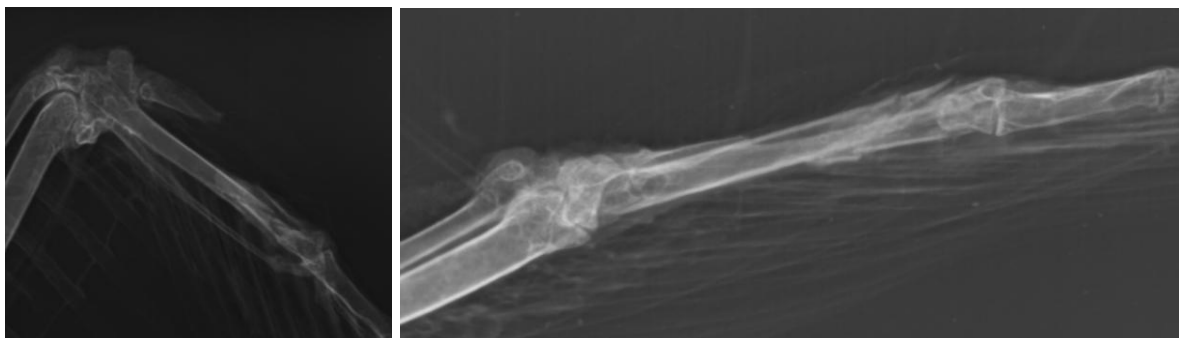


Figure 27. Radiographies centrées sur le carpométacarpe de l'aile gauche d'une buse variable (*Buteo buteo*) six semaines après son admission présentant une fracture du métacarpe majeur gauche. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).

Suite au retrait de l'attelle, la buse a été placée en volière extérieure (Longueur = 20m, largeur = 4m, hauteur = 3,5m), où elle a recommencé à voler au bout d'une semaine. Son vol était alors de bonne qualité mais elle ne volait pas longtemps. Au

bout de deux semaines, une évaluation de son vol a montré un vol sans essoufflement, symétrique, agile et permettant une bonne prise d'altitude. Ainsi, cette buse a pu être relâchée au bout de 12 semaines.

Essai de cicatrisation sur un milan noir atteint d'une luxation du doigt gauche

Le derniers cas sur lequel l'attelle en J a pu être utilisée est celui d'un milan noir (*Milvus migrans*) trouvé sur une piste d'aéroport et amené par les pompiers au centre de soin de l'ENVT.

Le premier examen clinique a montré un animal alerte mais qui présentait une plaie au niveau du tarse droit, et un saignement au niveau de l'articulation métacarpo-phalangienne gauche. La manipulation de cette articulation a montré une instabilité de celle-ci. Dans un premier temps, la plaie au niveau du tarse droit a été suturée, des soins de plaie ont été prodigués au niveau de la main gauche. En attendant de pouvoir réaliser une radiographie, une immobilisation de la main gauche a été réalisée à l'aide d'une attelle en J maintenue par un bandage en huit (Figure 28). Le milan a également reçu des traitements analgésique (butorphanol, tramadol), antibiotique (lincomycine) et anti-inflammatoire (meloxicam) avant d'être placé dans une petite volière (Longueur = 1 m, largeur = 2m, hauteur = 2 m).



Figure 28. Photographies de la mise en place d'une attelle en J sur l'aile gauche d'un milan noir (*Milvus migrans*). Mise en place de l'attelle (à gauche) et stabilisation de celle-ci par un bandage en huit (à droite).

Le lendemain de son admission, une radiographie a été réalisée sous anesthésie générale et a montré une luxation de la phalange gauche (Figure 29) particulièrement visible sur la radiographie de profil de l'aile.

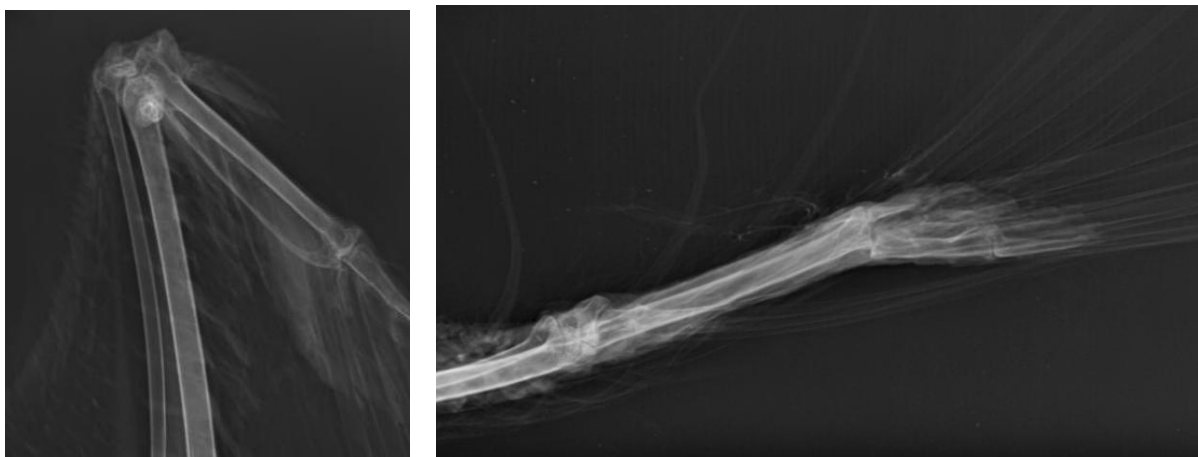


Figure 29. Radiographies centrées sur la main gauche d'un milan noir (*Milvus migrans*) le lendemain de son admission présentant une luxation du doigt. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).

La luxation a alors été réduite manuellement et l'attelle en J a été remise en place. Des séances de physiothérapie ont été réalisées tous les quatre jours environ, sous anesthésie générale, et ont permis de conserver une bonne amplitude articulaire. Au bout de trois semaines et demi, l'articulation métacarpo-phalangienne présentait une bonne stabilité et l'attelle a donc été retirée. Le milan noir est resté en volière et une semaine après le retrait de l'attelle, des radiographies de contrôle ont été réalisées (Figure 30) montrant un ré-alignement de l'articulation métacarpo-phalangienne.

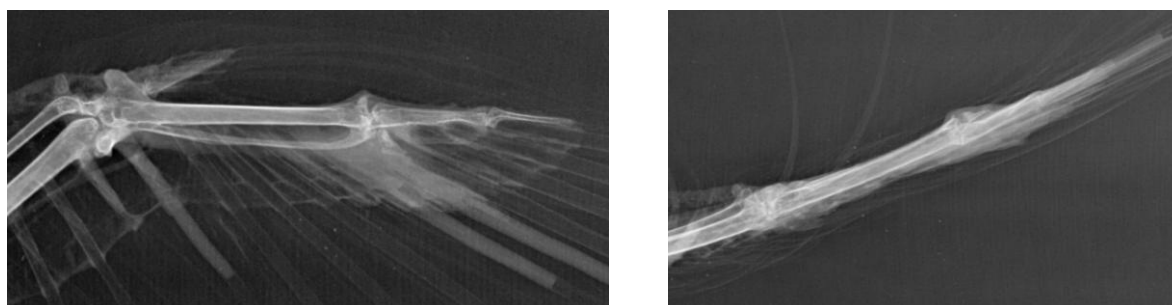


Figure 30. Radiographies centrées sur la main gauche d'un milan noir (*Milvus migrans*) quatre semaines après son admission montrant un meilleur alignement du doigt gauche. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).

Le milan noir a alors pu être déplacé dans une grande volière pour permettre sa réhabilitation. Après un peu plus de 5 semaines après son admission, il a pu être relâché.

C) Discussion et perspectives

a. Aspect clinique

Les objectifs lors de la conception de l'attelle en J étaient d'une part d'assurer un bon maintien de l'alignement des métacarpes et d'autre part, d'être facile à mettre en place sur l'individu. Ces deux objectifs ont bien été remplis lors des essais cliniques.

En effet, les trois essais cliniques ont d'abord montré que l'attelle en J était effectivement pratique à utiliser car elle est facile à mettre en place sur l'oiseau mais aussi car elle est facile à nettoyer et à désinfecter. La facilité de mise en place permet également de la retirer facilement pour les physiothérapies puis de la remettre en gardant approximativement le même alignement des métacarpes. L'essai clinique sur la buse variable a quant-à-lui montré que cette attelle permet un bon maintien et un bon alignement des métacarpes autorisant une bonne cicatrisation de ceux-ci. Sur cet essai clinique, il a même été observé une amélioration de l'alignement au cours de temps, même si celui-ci n'est pas forcément imputable à l'attelle. L'essai clinique sur le milan noir a quant-à lui montré que l'attelle a également permis de maintenir solidement la réduction manuelle de luxation de la phalange.

Les trois essais ont montré que l'attelle est également bien adaptée et adaptable : elle s'adapte bien sur l'espèce pour laquelle elle est conçue et la structure de l'attelle lui confère une légèreté bien supportée par l'oiseau. Elle est également adaptable à d'autres espèces de morphologie similaire comme l'a montré l'essai sur l'élanion blanc qui a porté une attelle conçue pour les faucons crécerelle. Enfin, l'essai clinique sur l'élanion blanc a montré que même non protégée par des compresses, l'attelle n'a pas engendré de lésions secondaires sur une utilisation de courte durée (trois jours). Cependant on ne peut pas conclure sur une utilisation prolongée car pour la buse variable et le milan noir, l'attelle a été protégée par défaut.

C'est l'un des inconvénients de cette attelle : selon les imprimantes 3D utilisées et leur qualité d'impression, les attelles en J peuvent présenter une certaine irrégularité qui pourrait engendrer des lésions cutanées. De plus, le modèle présente

des angles droits qui pourraient également léser la peau notamment au niveau du patagium.

Ainsi, on pourrait imaginer améliorer le modèle en arrondissant les arrêtes. Une autre amélioration possible serait de créer une fente dans la partie courte du J pour libérer le patagium (Figure 31).



Figure 31. Modèle d'attelle en J en trois dimensions présentant une fente au niveau de la branche courte afin de libérer le patagium.

b. Aspects économique, écologique et technique

Un des derniers avantages de l'attelle en J est son côté économique. En effet, moyennant une imprimante 3D, les attelles en J coûtent moins d'un euro, ce qui peut permettre leur utilisation sur des oiseaux sauvages soignés dans des centres de soin ayant peu de moyens. De plus, l'impression 3D s'étant largement démocratisée aujourd'hui, il existe des imprimantes de bonne qualité à des prix abordables pour des associations, d'autant plus si on imagine une imprimante 3D mutualisée pour plusieurs centres de soins.

Cependant, les attelles en J doivent être imprimées dans un matériau souple. Elles ont ici été imprimées en PLU qui est un plastique peu respectueux de l'environnement. L'impression en PLA Soft permettrait d'utiliser un matériau plus respectueux de l'environnement mais c'est un matériau beaucoup moins courant et plus difficile à imprimer en termes de paramètres d'impression.

II – Conception d’une attelle permettant la réduction des fractures du tibiotarse chez les oiseaux sauvages de centre de soin

A) Fracture du tibiotarse chez les oiseaux

a. Anatomie et fonction du tibiotarse

Le tibiotarse est un des os principaux de la patte. Il s’articule à son extrémité proximale avec le fémur, la patelle et la fibula et à son extrémité distale avec le tarsométatarse (Figure 32) (Orosz, Echols, et Redig 2023).

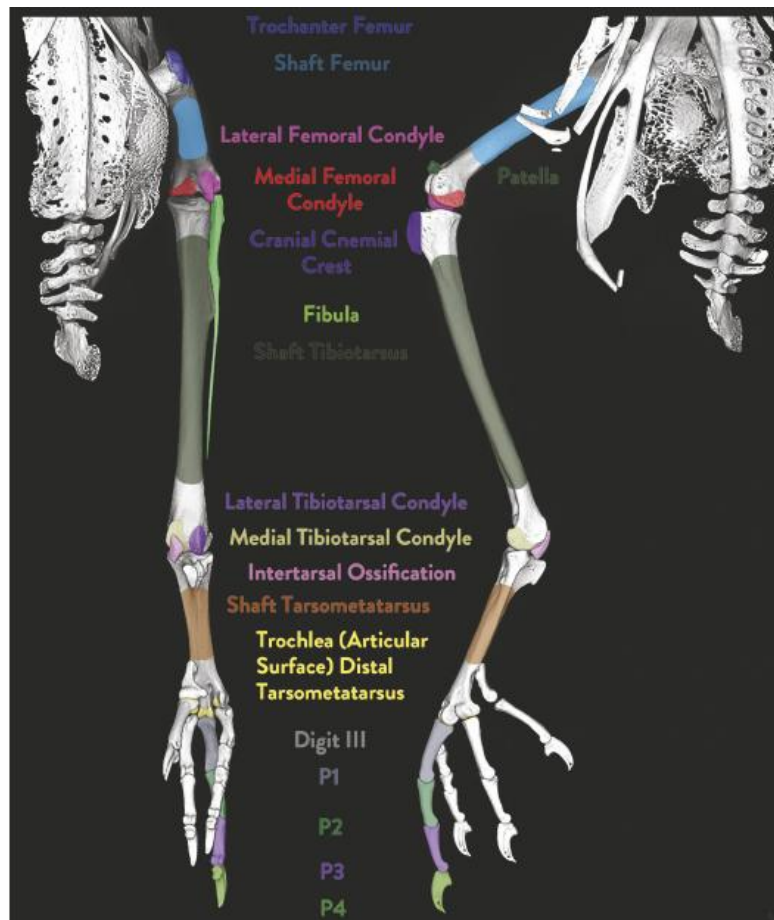


Figure 32. Images obtenues par tomodensitométrie de la patte d’un pigeon biset (*Columba livia*) : vue dorsale (à gauche) et vue latérale (à droite). (Orosz, Echols, et Redig 2023)

C’est un os long et creux dont la structure apporte plutôt des propriétés de résistance à des forces entraînant une flexion ou une compression longitudinale de l’os lorsque le fémur présente quant à lui plutôt des propriétés de résistance à la torsion (De Margerie et al. 2005). Cela lui permet d’une part de supporter le poids de l’oiseau au sol lors de l’atterrissage et d’autre part de résister à la compression

engendrée par les muscles fléchisseurs et extenseurs des doigts qui exercent une force puissante notamment lors de la préhension des proies chez les rapaces.

Cet os de la patte de l'oiseau est inégalement recouvert de tissus mous. En effet, la moitié proximale du tibiotarse est couverte de nombreux muscles assurant la flexion et l'extension du pied. La moitié distale quant à elle est plutôt couverte par des tendons en continuité avec les muscles précédents (Figure 33). Ainsi, dans cette portion distale, l'os est peu protégé par de la masse musculaire et ceci expose également les nerfs et vaisseaux qui longent l'os (Figure 34) (König, Korbelt, et Liebich 2016).

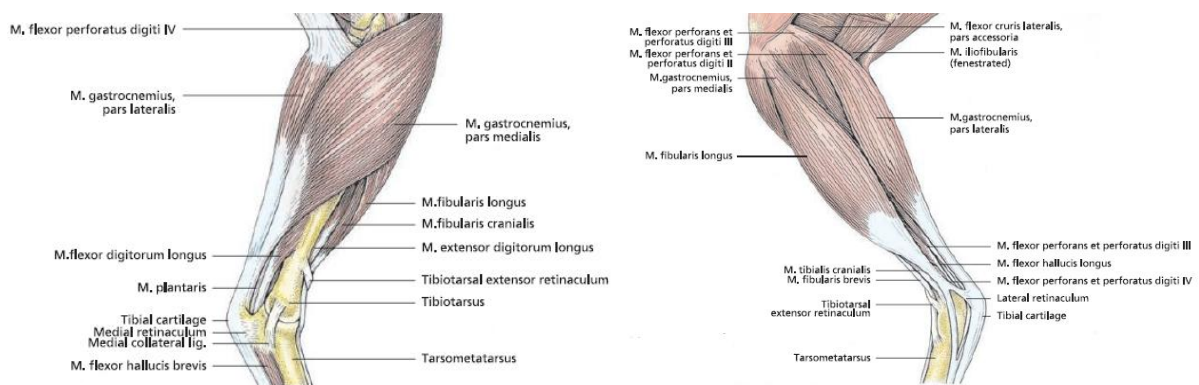


Figure 33. Schéma de la musculature au niveau du tibiotarse d'une poule : vue médiale (à gauche) et vue latérale (à droite). (König, Korbelt, et Liebich 2016)

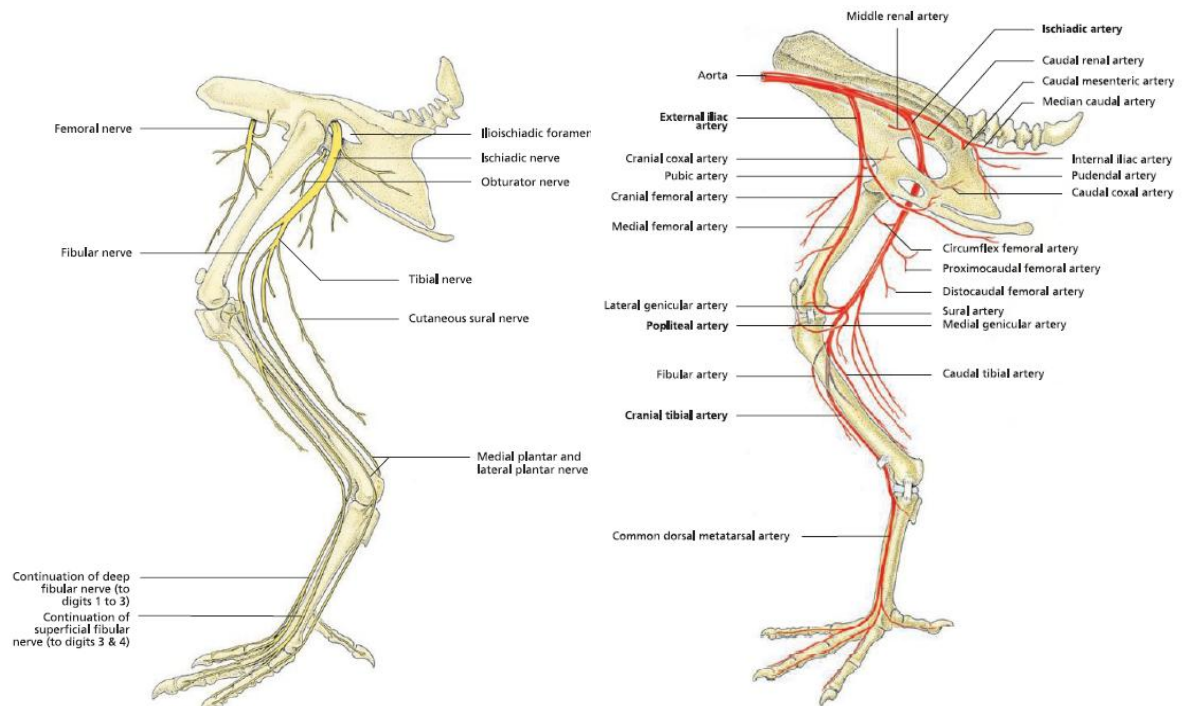


Figure 34. Schéma de l'innervation (à gauche) et de la vascularisation (à droite) de la patte d'une poule. (König, Korbelt, et Liebich 2016)

b. Fréquence des fractures du tibiotarse

Dans la littérature, la fréquence des fractures du tibiotarse est très variable et on retrouve des prévalences allant de 20 à 80% (Mc et al. 2022). Ces grandes variations s'expliquent principalement par le mode de locomotion principal des espèces étudiées et les variations anatomiques qui accompagnent ces modes de locomotion. En effet les espèces qui se déplacent principalement au sol sont plus sujettes aux fractures des pattes et ces fractures touchent principalement le tibiotarse. Au contraire, les fractures des pattes sont plus rares chez les espèces qui se déplacent principalement en volant et dont les pattes sont plus courtes (Mc et al. 2022).

De la même façon que pour les métacarpes, les données du centre de soin de l'ENVT récoltées entre le 1^{er} janvier 2016 et le 31 décembre 2022 (voir Annexe 2) ont permis de caractériser les fractures des tibiotarses rencontrées dans le centre de soin.

Tout d'abord, les pattes sont la deuxième région anatomique la plus touchée par les fractures chez les oiseaux (Figure 12). Au niveau des pattes en revanche, ce sont les tibiotarses qui sont les plus touchés : près de 50% des fractures des pattes sont des fractures des tibiotarses (Figure 35).

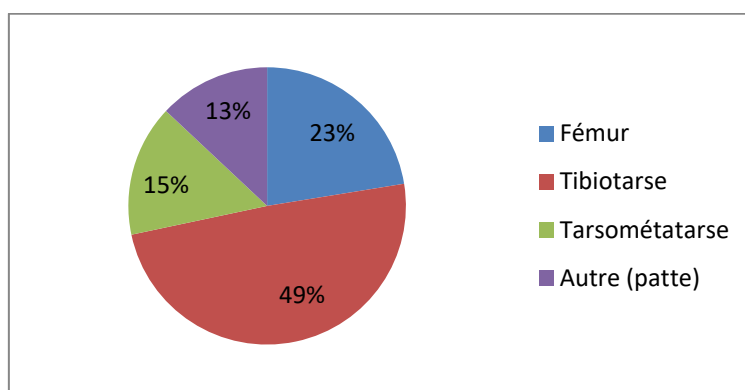


Figure 35. Graphique représentant la proportion de fractures touchant les différents segments osseux de la patte d'après les données du centre de soin de la Faune sauvage de l'ENVT entre le 01/01/2016 et le 31/12/2022.

Cependant, il est difficile de dire si ce sont des fractures plus souvent ouvertes ou fermées car cette donnée est peu renseignée (Figure 36). On peut cependant supposer qu'elles sont plutôt fermées car les opérateurs ont plutôt tendance à renseigner le type de fracture lorsque celles-ci sont ouvertes.

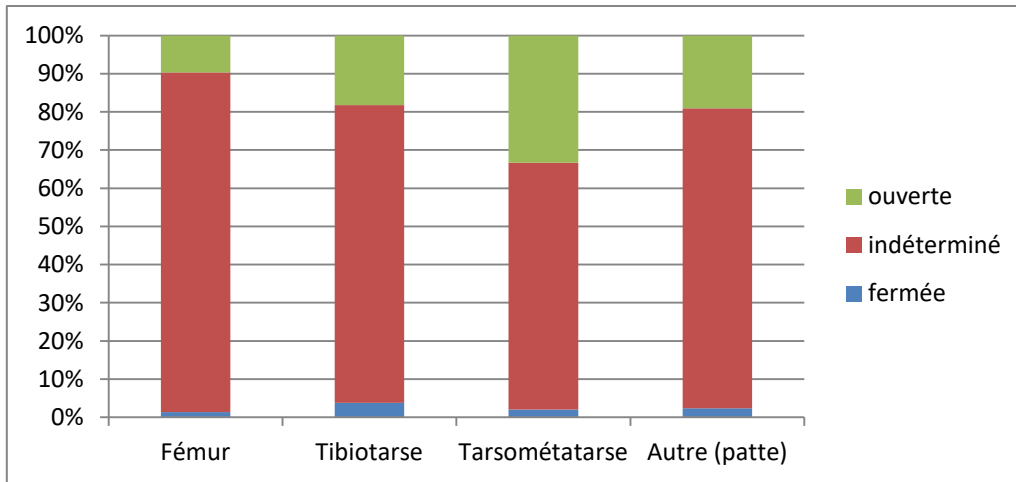


Figure 36. Histogramme représentant le type de fractures pour chaque segment osseux de la patte, d'après les données centre de soin de la Faune sauvage de l'ENVT entre le 01/01/2016 et le 31/12/2022.

Enfin, lorsqu'on se penche sur les espèces touchées par les fractures des tibiotarses (Figure 32), on remarque qu'on retrouve à nouveau les rapaces et les colombidés mais également certains passereaux qui semblent plus fréquemment touchés.

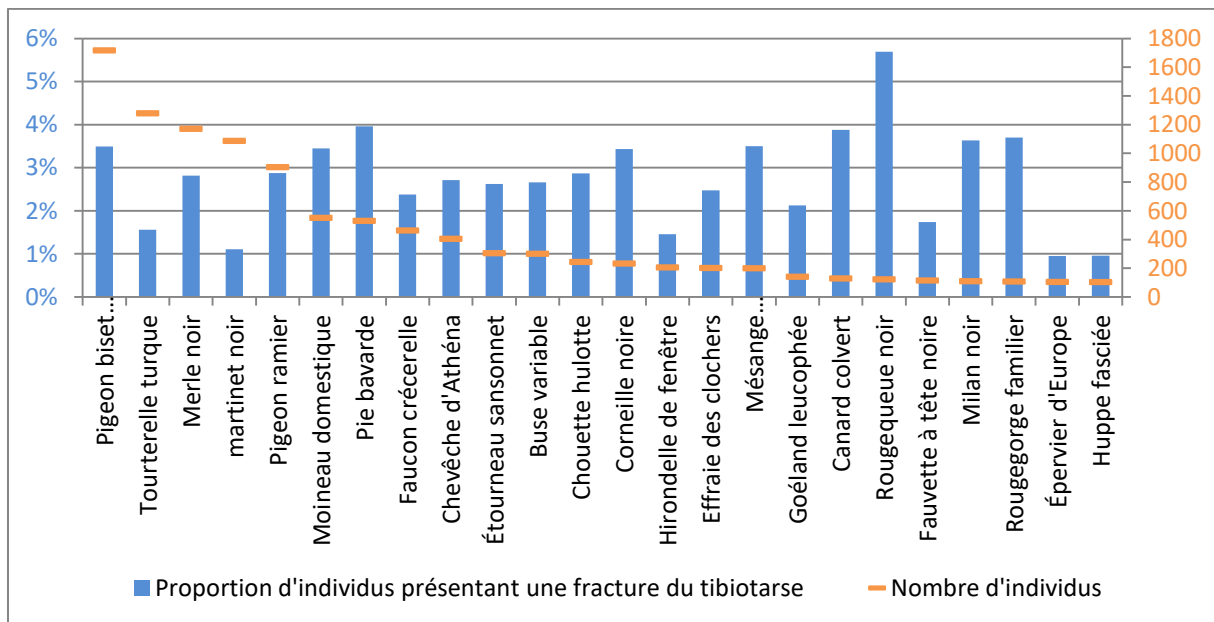


Figure 37. Histogramme représentant la proportion des fractures du tibiotarse chez les espèces d'oiseaux les plus fréquentes au centre de soin (N>100), d'après les données centre de soin de la Faune sauvage de l'ENVT entre le 01/01/2016 et le 31/12/2022.

Ainsi, au centre de soin de l'ENVT, les fractures du tibiotarse sont les fractures des pattes les plus fréquentes et touchent toutes les espèces.

c. Physiopathologie et enjeux des fractures du tibiotarse

Les fractures du tibiotarse sont un défi à traiter car elles sont associées à de nombreux enjeux.

Tout d'abord, lors de traitement des fractures du tibiotarse il faut non seulement aligner les fragments osseux mais également empêcher la rotation de l'about distal autour de l'axe de l'os. Ceci nécessite généralement un moyen de fixation externe qu'il soit chirurgical ou non.

De plus, le tibiotarse soutient le poids de l'oiseau ce qui a deux conséquences principales. D'une part, le montage chirurgical ou l'attelle mis en place doivent décharger le tibiotarse du poids de l'oiseau afin que la fracture ne soit pas soumise à des forces de compression pendant sa cicatrisation. D'autre part, une attention particulière doit être portée à la patte controlatérale car celle-ci reçoit inévitablement un report de poids qui peut engendrer des lésions de pododermatite, particulièrement dans la famille des accipitridés (Rodríguez Díez et al. 2020).

Enfin, du fait de la couverture musculaire variée le long du tibiotarse, les fractures de cet os ont des caractéristiques différentes selon leur localisation. Les fractures plutôt proximales sont rarement ouvertes et ont généralement un bon pronostic, tandis que les fractures distales seront généralement ouvertes et elles engendrent des lésions nerveuses et vasculaires avec un moins bon pronostic (Orosz, Echols, et Redig 2023).

d. Traitements actuels

Parmi les traitements actuels, on compte des méthodes chirurgicales et des méthodes de contention externe.

La première méthode chirurgicale consiste à fixer le tibiotarse à l'aide d'un clou centromédullaire et de fixateurs externes. Le clou centromédullaire est la plupart du temps inséré depuis le plateau tibial. Les fixateurs externes sont insérés de part et d'autre de la fracture. L'extrémité proximale du clou centromédullaire est repliée à 90° et est reliée aux fixateurs externes latéralement au tibiotarse par une barre de résine (Figure 38)(Orosz, Echols, et Redig 2023). C'est une chirurgie risquée qui requiert de la précision pour éviter les lésions nerveuses, vasculaires ou tendineuses.

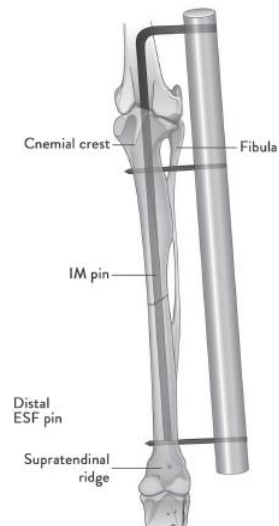


Figure 38. Schéma de la prise en charge chirurgicale d'une fracture du tibiotarse.

Une variante chirurgicale est d'avoir recourt à une arthrodèse articulaire, c'est-à-dire de bloquer l'articulation pour entrainer sa fusion. Cela est nécessaire lorsque la fracture est très proche d'une articulation. Les méthodes chirurgicales permettent une bonne cicatrisation avec un bon alignement mais sont difficiles à mettre en place chez des petits oiseaux.

En cas d'approche non chirurgicale, il existe deux méthodes de contention externe en fonction de la taille des espèces concernées. La première méthode, utile pour les oiseaux de petits formats (moins de 200g), est celle du « *tape splint* » (Figure 39) : cette méthode consiste à accumuler des couches de ruban adhésif médical épais et à les appliquer de part et d'autre du tibiotarse afin de l'immobiliser (Wright et al. 2018).

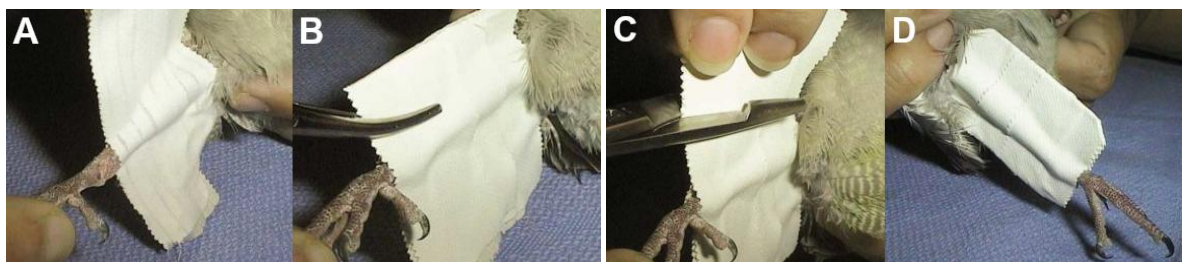


Figure 39. Photographies des étapes de mise en place d'un " *tape splint* " : positionnement des bandes de ruban adhésif médical (A) ; fixation des bandes entre elles au plus près du membre à l'aide d'un clamp (B) ; découpage des excédents de bandes (C) ; *tape splint* en place (D). (Palazzolo, s. d.)

La deuxième méthode est celle de l'attelle de Schroeder-Thomas modifiée. Cette attelle est indiquée pour les fractures distales du tibiotarse et peut également être

utilisée pour les fractures du tarsométatarse (Orosz, Echols, et Redig 2023). Fabriquée sur mesure en fil de fer, le principe est de former un anneau qui sera glissé autour de la hanche et de former deux branches qui partent de cet anneau, crânialement et caudalement à la patte. Ces deux branches doivent retracer la forme physiologique de la patte. L'anneau autour de la hanche est ensuite recouvert de compresses pour protéger la hanche et la patte est fixée aux branches qui l'entourent (Figure 40). Le tout est enfin recouvert de strap afin de protéger le montage.

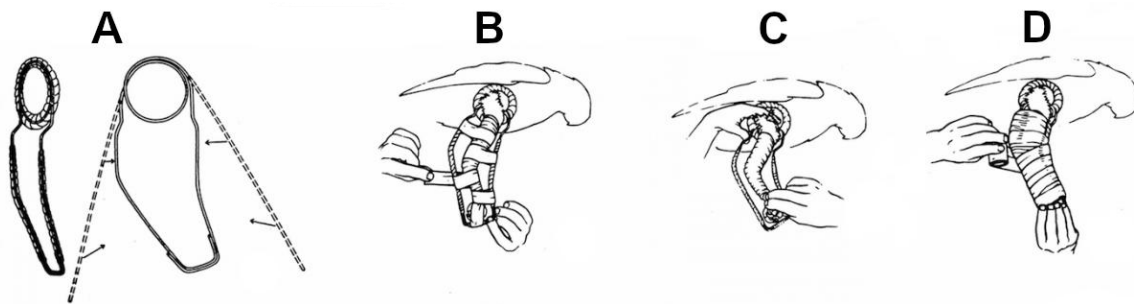


Figure 40. Schéma des étapes de fabrication (A) et de mise en place (B, C, D) d'une attelle de Schroeder-Thomas modifiée. (Higbie 2016)

B) Conception de l'attelle

a. Objectifs du prototype

L'attelle pour les fractures du tibiotarse a été conçue sur le principe d'une attelle de Schroeder-Thomas modifiée.

L'objectif était en premier lieu de créer un moyen de contention externe qui permette un bon maintien de la patte lorsque la chirurgie était impossible ou dans l'attente d'une chirurgie ultérieure.

L'idée était ensuite de pallier au problème de fixation rencontré lors de l'utilisation d'une attelle de Schroeder-Thomas modifiée. En effet cette attelle, bien qu'enfilée autour de la patte, ne possède aucun moyen de fixation à la hanche et a ainsi tendance à glisser le long du membre. Pour résoudre ce problème de fixation à la hanche, la nouvelle attelle a été formée en deux pièces : une pièce principale, à positionner sur la patte fracturée ; et une pièce de soutien, à positionner sur la patte controlatérale saine. La pièce principale est modélisée sur une attelle de Schroeder-Thomas modifiée mais l'anneau glissé autour de la hanche est doté de deux fentes qui sont reliées à la pièce de soutien à l'aide de bandes élastiques formant des

sangles. La pièce de soutien est constituée seulement de l'anneau qui se glisse autour de la patte et qui est également doté de deux fentes.

b. Réalisation des prototypes

Avant de pouvoir modéliser l'attelle, des mesures des différents segments de la patte ont été relevées dans la littérature pour plusieurs espèces (Tableau 2).

Tableau 2. Longueurs moyennes (en millimètres) tirées de la bibliographie des segments de la patte chez différentes espèces d'oiseaux.

Espèce	Fémur	Tibiotarse	Tarsométatarse	Source
Pigeon ramier	45,6 mm	60,6 mm	32,5 mm	(Zeffer, Johansson, et Marmebro 2003)
Pie bavarde	42,2 mm	69,4 mm	49,5 mm	
Buse a queue rousse	83,6 mm	109,6 mm	84,4 mm	(Ward, Weigl, et Conroy 2002)
Crécerelle d'Amérique	33,9 mm	49,3 mm	36,7 mm	
Grand Duc d'Amérique	76,9 mm	118,6 mm	62,0 mm	

c. Premier prototype

La première attelle a été modélisée pour un pigeon ramier.

Modélisation

Le modèle en trois dimensions a été créé avec plusieurs caractéristiques.

Tout d'abord, le pigeon ramier ayant un pli inguinal marqué, l'articulation du genou est très proche de la base de l'attelle. La pièce principale n'est donc constituée que d'un seul angle qui correspond à l'angle de l'articulation tibiotarso-tarsométatarsienne. Cet angle a été choisi à 30° afin de correspondre à l'angle de l'articulation au repos. Le premier segment de la pièce principale correspond au tibiotarse et a été modélisé à la taille du tibiotarse majorée d'un centimètre. Le second segment de la pièce principale correspond au tarsométatarse et aux doigts et a été modélisé à partir de la taille du tarsométatarse multipliée par deux pour pouvoir contenir les doigts.

De plus, en ce qui concerne l'anneau des deux pièces de l'attelle, celui-ci a été modélisé avec un angle de trente degrés pour pouvoir épouser la courbe du corps de part et d'autre de la patte. La taille de l'anneau nécessaire a été mesurée manuellement sur un pigeon ramier du centre de soin de l'ENVT et majorée à trois

centimètres de diamètre. L'anneau est inclus dans un rectangle doté de deux fentes au dessus et en dessous de l'anneau.

Enfin, toutes les portions internes des pièces de l'attelle ont été arrondies pour la rendre la plus atraumatique possible.

Le modèle a été modélisé à l'aide du logiciel OnShape© (<https://www.onshape.com/>) et exporté au format .stl pour pouvoir être imprimé (Figure 41).

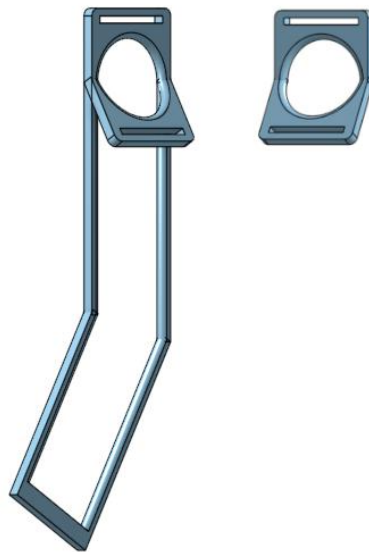


Figure 41. Modèle 3D du premier prototype d'attelle de patte avec une pièce principale (à gauche) et une pièce de soutien (à droite).

Impression

L'objectif étant d'obtenir un moyen de contention solide et rigide, l'impression a été réalisée à l'aide de filament PLA, avec une technique FDM.

L'impression a été réalisée à l'aide de l'imprimante FlashForge Adventurer 3 ©. Les paramètres d'impression choisis étaient :

- Température du plateau : entre 50°C et 60°C ;
- Température de la buse : 210°C ;
- Vitesse d'impression : 60 millimètres par seconde.

L'impression a duré 48 minutes et a consommé 6,39g de filament. Pour la quantité de filament utilisée, le coût de production s'élève à 0,15 € (Annexe I).

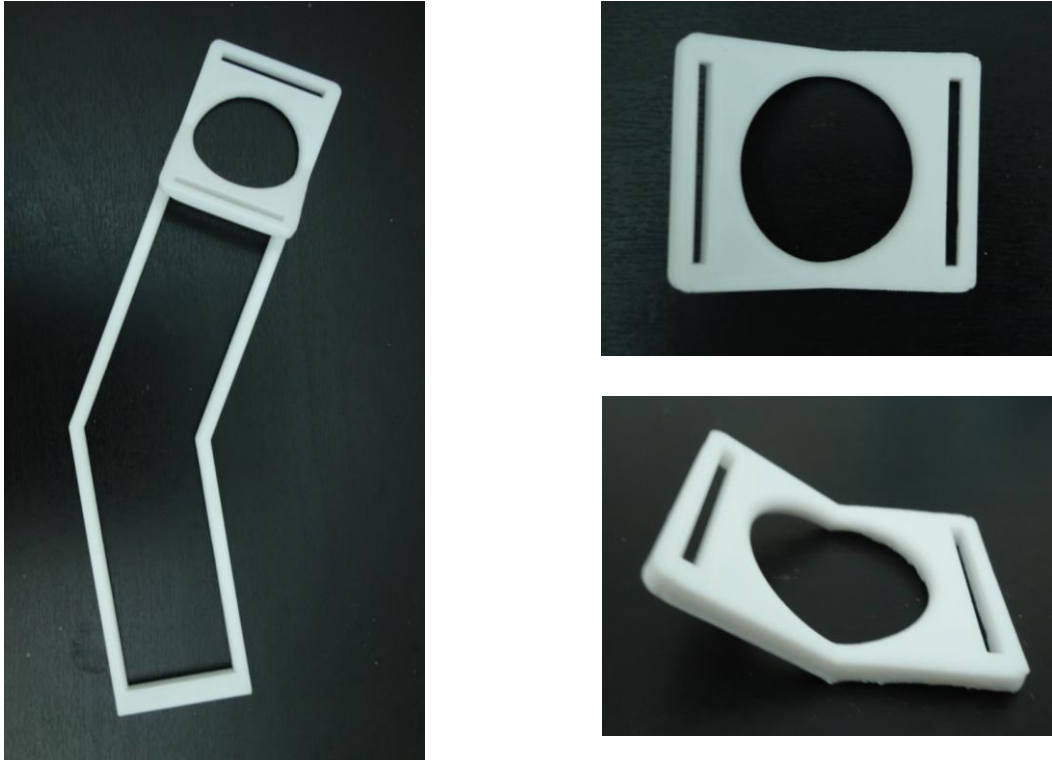


Figure 42. Photographies du premier prototype imprimé en PLA avec la pièce principale (à gauche) et la pièce de soutien vue de dessus et de profil (à droite).

Essai et problèmes rencontrés

L'attelle a pu être essayée sur un pigeon ramier décédé du centre de soin (Figure 43). Les deux pièces de l'attelle ont été reliées par des bandes cohésives découpées à la bonne largeur. La patte a été fixée à l'attelle à l'aide de sangles en bandes adhésives.

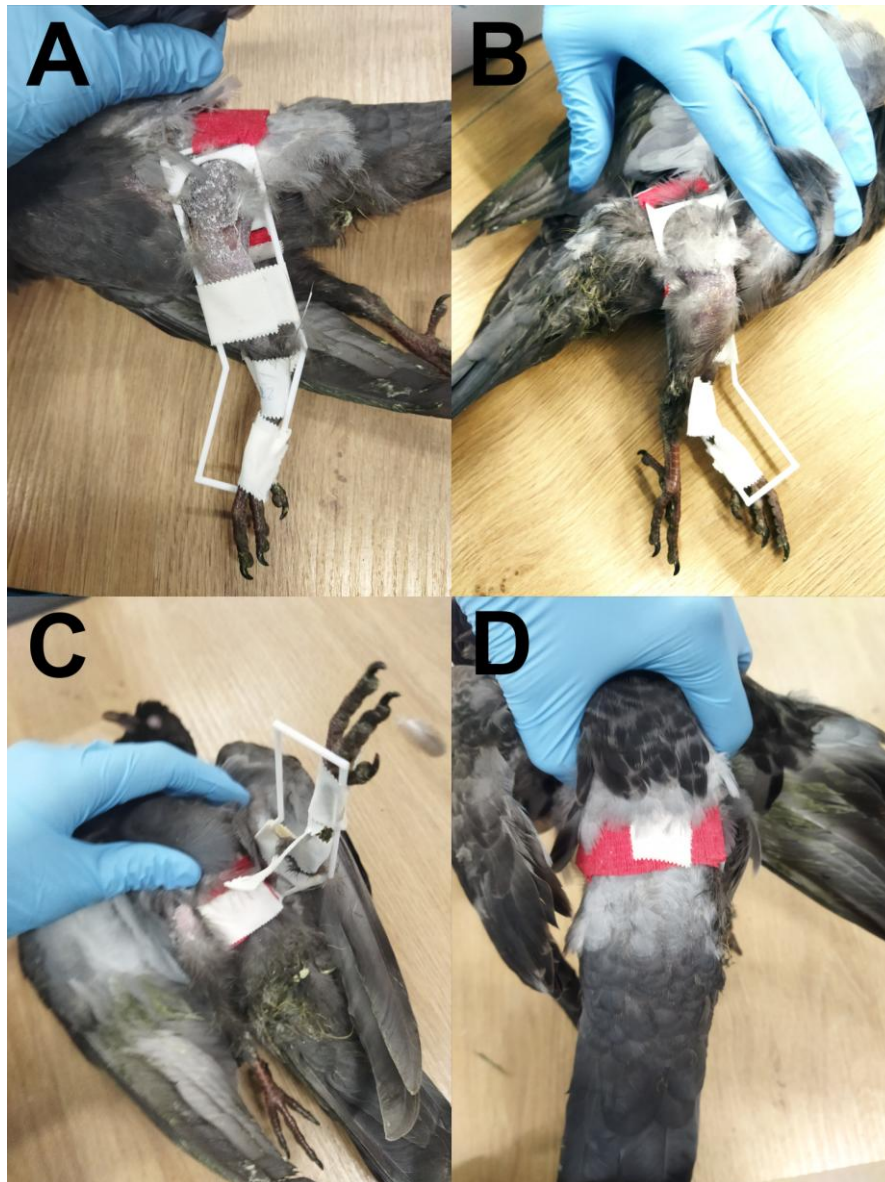


Figure 43. Mise en place du premier prototype d'attelle pour les fractures du tibiotarse sur un pigeon ramier décédé du centre de soin de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse : vue latérale de la pièce principale (A) ; vue latérale de la pièce de soutien sur la patte controlatérale (B) ; vue ventrale montrant la face médiale de la pièce principale et la sangle ventrale (C) ; vue dorsale montrant la sangle dorsale (D).

Cet essai a validé l'efficacité de la pièce de soutien sur la patte controlatérale qui apporte un bon maintien de la pièce principale autour de la patte grâce aux sangles. Cependant, elle a révélé un manque d'adaptabilité à la longueur de la patte : en effet, le pigeon ramier était de grand format et malgré le fait que l'anneau soit adapté, les segments étaient trop courts.

d. Second prototype

Modélisation

Lors de son essai, le premier prototype a présenté des limites de taille et de symétrie. En effet avec un modèle « fixé », il faudrait modéliser un prototype par espèce, imprimer plusieurs tailles par espèce et pour chaque taille il faudrait imprimer un modèle pour la patte gauche et un modèle pour la patte droite. Ainsi, un deuxième prototype a été modélisé à partir du premier avec des tiges coulissantes afin de pouvoir ajuster la taille des deux segments de la pièce principale (Figure 44).

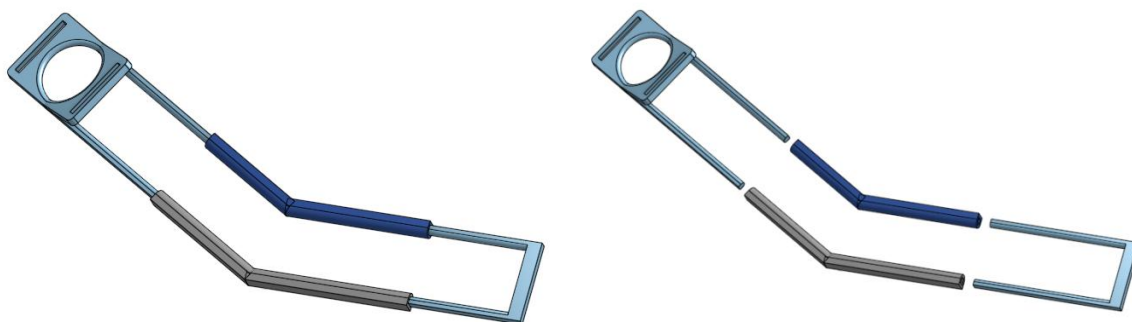


Figure 44. Modèle 3D de la pièce principale du second prototype d'attelle de patte avec une vue assemblée (à gauche) et une vue éclatée (à droite).

Impression

L'attelle a été imprimée avec la même imprimante et les mêmes paramètres que pour le premier prototype. La taille des segments étant adaptable, deux tailles seulement ont alors été imprimées (Figure 45) : une à 100% (utilisable pour les oiseaux de moyen format tels que les colombidés ou les corvidés) et l'autre à 150% (utilisable pour des oiseaux de grand format tels que les buses ou milans).

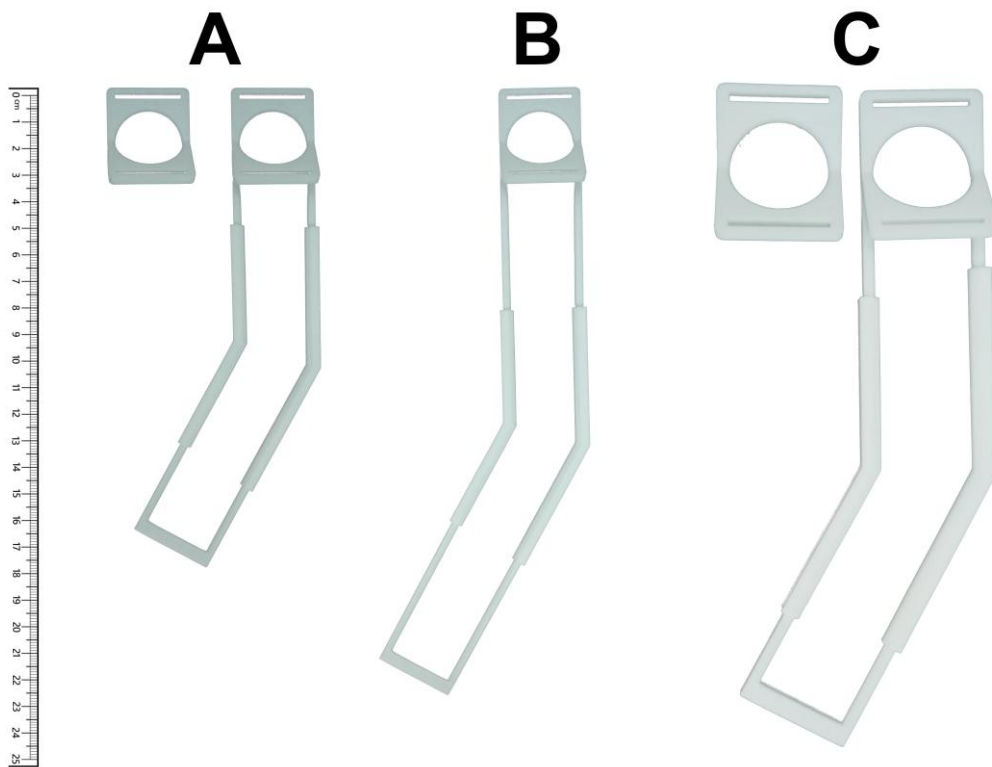


Figure 45. Photographies du second prototype d'attelle de patte imprimé en PLA. Le modèle a été imprimé en taille 100% avec la pièce de soutien, la pièce principale réglée à sa taille minimale (A) et à sa taille maximale (B). Le modèle a été imprimé en taille 150% avec la pièce de soutien et la pièce principale (C).

Les impressions ont duré entre une et trois heures environ et ont consommé entre 8 et 27g de filament. Pour les quantités de filament utilisées, les coûts de production s'élèvent entre 0,31€ et 0,64€ (Annexe I).

Essais de mise en place sur des oiseaux décédés du centre de soin

Dans un premier temps, le deuxième prototype a pu être essayé sur plusieurs oiseaux décédés du centre de soin (Figure 46). Pour les différents essais, l'attelle a été d'abord enfilée sur l'une des deux pattes et fixée à l'anneau controlatéral à l'aide de bandes élastiques, puis les tiges coulissantes ont été réglées à la bonne taille et maintenues à la bonne taille à l'aide de scotch. Enfin, la patte a été fixée à l'attelle avec des rubans adhésifs placés en alternance.



Figure 46. Mise en place du second prototype d'attelle pour les fractures du tibia-tarse sur plusieurs oiseaux décédés et provenant du centre de soin de l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse.

Ces essais ont montré, comme pour le modèle précédent, une bonne fixation de l'attelle aux hanches grâce à l'anneau controlatéral. Ils ont également montré une bonne adaptabilité des segments coulissants de l'attelle aux segments osseux des oiseaux de différentes espèces. Enfin, la patte semblait fixée solidement en position physiologique.

Essai clinique : prise en charge d'une fracture comminutive du tibiotarse chez un pigeon ramier (*Columba palumbus*)

Un essai de la deuxième version d'attelle a pu être réalisé au centre de soin de l'ENVT sur un pigeon ramier (*Columba palumbus*) apporté au centre de soin après avoir été trouvé au sol chez des particuliers.

L'examen clinique d'arrivée a montré d'une part des plaies ventrales associées à un hématome et à une absence de nombreuses rectrices et d'autre part une mobilisation anormale de deux segments osseux au niveau du tibiotarse associée à un hématome et un œdème massif (Figure 47).



Figure 47. Photographie de la patte gauche d'un pigeon ramier (*Columba palumbus*) montrant un hématome et un œdème important au niveau du tibiotarse. Face latérale (gauche), face médiale (droite).

Dans un premier temps, le membre pelvien gauche a été immobilisé à l'aide d'un pansement compressif. Des traitements médicamenteux ont été mis en place afin de gérer la douleur (tramadol), l'inflammation (meloxicam) et le risque infectieux (lincomycine).

Le lendemain de son admission, une radiographie du membre pelvien gauche a mis en évidence une fracture comminutive du tibiotarse gauche déplacée cranio-latéralement avec un fragment distal très biseauté et fendu longitudinalement (Figure 48).



Figure 48. Radiographies de la patte gauche d'un pigeon ramier (*Columba palumbus*) après son admission présentant une fracture du tibiotarse gauche. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).

A J5 une anesthésie a été réalisée et a permis la mise en place de l'attelle. La mise en place a été facile grâce à la préparation de l'attelle et des bandes au préalable (Figure 49). La préparation du matériel puis l'anesthésie et la mise en place de l'attelle ont duré environ trente minutes au total. Les bandes élastiques ont permis une bonne fixation de l'attelle sans gêner le cloaque.

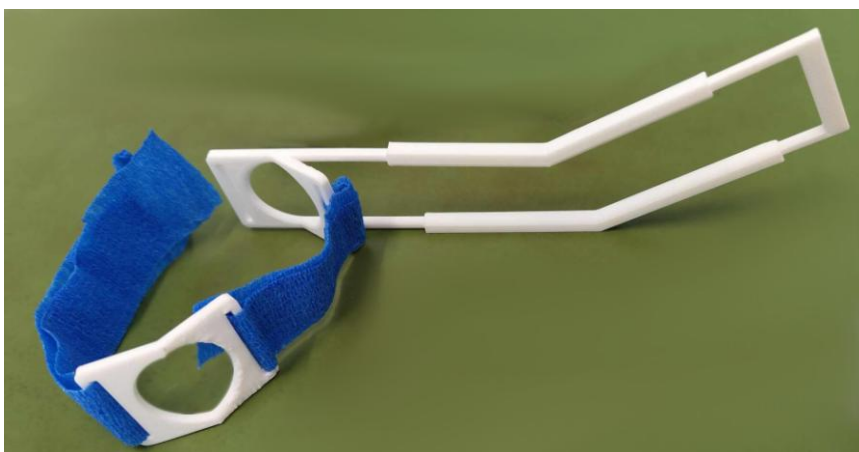


Figure 49. Photographie de la préparation de la deuxième version de l'attelle avant sa mise en place.



Figure 50. Photographies de la mise en place de la deuxième version de l'attelle imprimée en 3D sur un pigeon ramier (*Columba palumbus*) atteint d'une fracture du tibiotarse gauche. Vue de la face latérale (A), vue de la face ventrale (B) vue de la face médiale (C). Aspect final de l'attelle et de la patte protégés (D)

Une semaine plus tard, à J12 une réévaluation a été réalisée. Tout d'abord, la démarche du pigeon a pu être observée : l'oiseau arrivait à se tenir debout mais la patte portant l'attelle était étendue vers l'avant rendant ses déplacements difficiles (Figure 51). Il était également impossible pour lui de se percher.



Figure 51. Images issues d'une vidéo montrant un pigeon ramier (*Columba palumbus*) portant une attelle imprimée en 3D au niveau du postérieur gauche se tenant accroupi (à gauche) et debout (à droite).

Ensuite, un examen rapproché a mis en évidence la présence d'un cal fibreux en regard du foyer de fracture. Une lésion de dermatite de contact a été mise en évidence au niveau du genou gauche, liée au frottement de celui-ci contre l'attelle (Figure 53). Aucune lésion de pododermatite n'a été relevée sur la patte controlatérale.

Enfin, des radiographies de contrôle sous anesthésie générale été réalisées. La vue de face a montré un réalignement médial du fragment distal avec le détachement

d'un fragment osseux médialement à la fracture. La radiographie de profil a quant à elle montré un déplacement crânial du fragment distal plus important que lors de la première radiographie à J5 (Figure 52).



Figure 52. Radiographies de la patte gauche d'un pigeon ramier (*Columba palumbus*) présentant une fracture du tibiotalon gauche, sept jours après la mise en place de l'attelle. Vue de face (à gauche), vue de profil (à droite).

L'état général de l'oiseau se dégradait avec notamment une anorexie prolongée. De plus, malgré la solidification de la fracture, celle-ci était très déplacée et le pronostic fonctionnel était très incertain. Une décision d'euthanasie a donc été prise deux jours après le contrôle.

Problèmes rencontrés

Cette nouvelle version a résolu le problème principal de la première attelle en devenant à la fois adaptable en taille grâce aux tiges qui coulissent, et adaptable à la patte gauche ou droite en inversant les angles coulissants de sens. De plus, malgré la division des tiges en plusieurs pièces, celles-ci ont gardé une bonne solidité. Un inconvénient des tiges coulissantes est qu'il n'existe pas de moyen de fixation de celles-ci et qu'il faut les fixer manuellement à la bonne taille à l'aide de ruban adhésif.

Cependant, l'essai clinique sur le pigeon ramier a mis en évidence deux limites dans la conception de l'attelle qui seraient à améliorer. Tout d'abord, même sur des espèces dont le pli inguinal est peu marqué et donc pour lesquelles on s'attendait à ce que le genou ne soit pas gêné par l'attelle, des frottements au niveau du genou ont entraîné des lésions de dermatite de contact (Figure 53). Deux solutions sont alors possibles : bien protéger la patte avec des compresses ou bien imaginer une nouvelle version de l'attelle avec deux angles, un pour chaque articulation.



Figure 53. Photographie du genou gauche d'un pigeon ramier (*Columba palumbus*) présentant une fracture du tibiotarse gauche montrant une lésion de dermatite de contact sur la face médiale du genou en regard de l'attelle.

De plus, l'attelle ne permettait pas une démarche normale. Le pigeon arrivait à se tenir debout mais il se déplaçait peu. L'attelle s'étendait plutôt en avant et le poids de l'oiseau tombait légèrement vers l'arrière. Au contraire, une lésion attendue qui n'a pas été retrouvée était la présence de pododermatite sur la patte controlatérale (Figure 54). L'angulation de l'attelle au niveau de l'articulation du tarse serait également un aspect de l'attelle à améliorer.



Figure 54. Photographie de la face palmaire de la patte droite, chez un pigeon ramier (*Columba palumba*) atteint d'une fracture du tibia-tarse gauche, montrant l'absence de lésion de pododermatite.

d. Troisième prototype

Modélisation

Un troisième prototype a été modélisé avec pour but de présenter un second angle pour l'articulation du genou mais également de présenter des angles plus aigus afin d'offrir une meilleure posture à l'oiseau. Ainsi, des tiges coulissantes présentant un angle supplémentaire ont été ajoutées au modèle précédent. L'angle initial de 30° a été resserré à 45° (Figure 55).

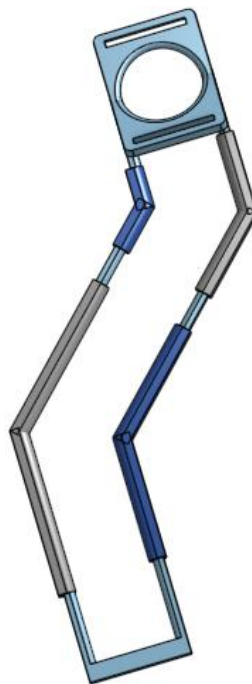


Figure 55. Modèles 3D de la pièce principale du troisième prototype d'attelle de patte avec une angulation de 45° .

Impression

L'attelle a été imprimée avec la même imprimante et les mêmes paramètres que pour les deux premiers prototypes. Elle a été imprimée à la taille 100% en PLA (Figure 56).

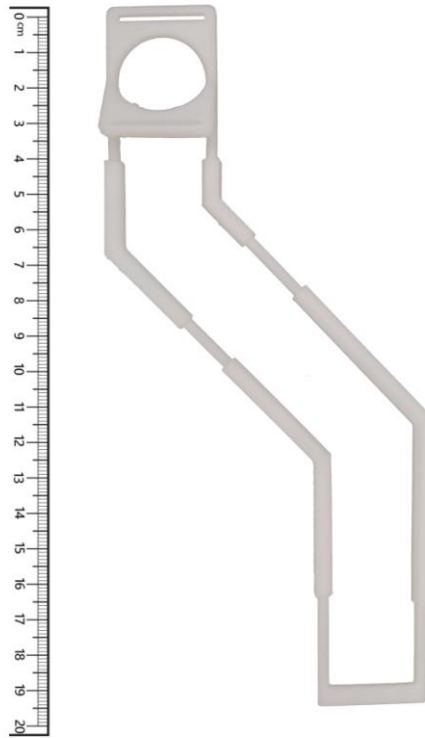


Figure 56. Photographies de la pièce principale du troisième prototype d'attelle de patte avec une angulation de 45°, imprimée en PLA.

L'impression a duré environ 1h33 min et ont consommé 11,94 g de filament. Pour la quantité de filament utilisée, les coûts de production s'élèvent à 0,28 € (Annexe I).

Essais de mise en place sur des oiseaux décédés du centre de soin

Le troisième prototype a pu être essayé sur un hibou moyen-duc (*Asio otus*) décédé du centre de soin de l'ENVV (Figure 57). L'attelle a été enfilée de la même façon que pour le deuxième prototype. La patte a été déplumée afin d'offrir une meilleure visibilité.

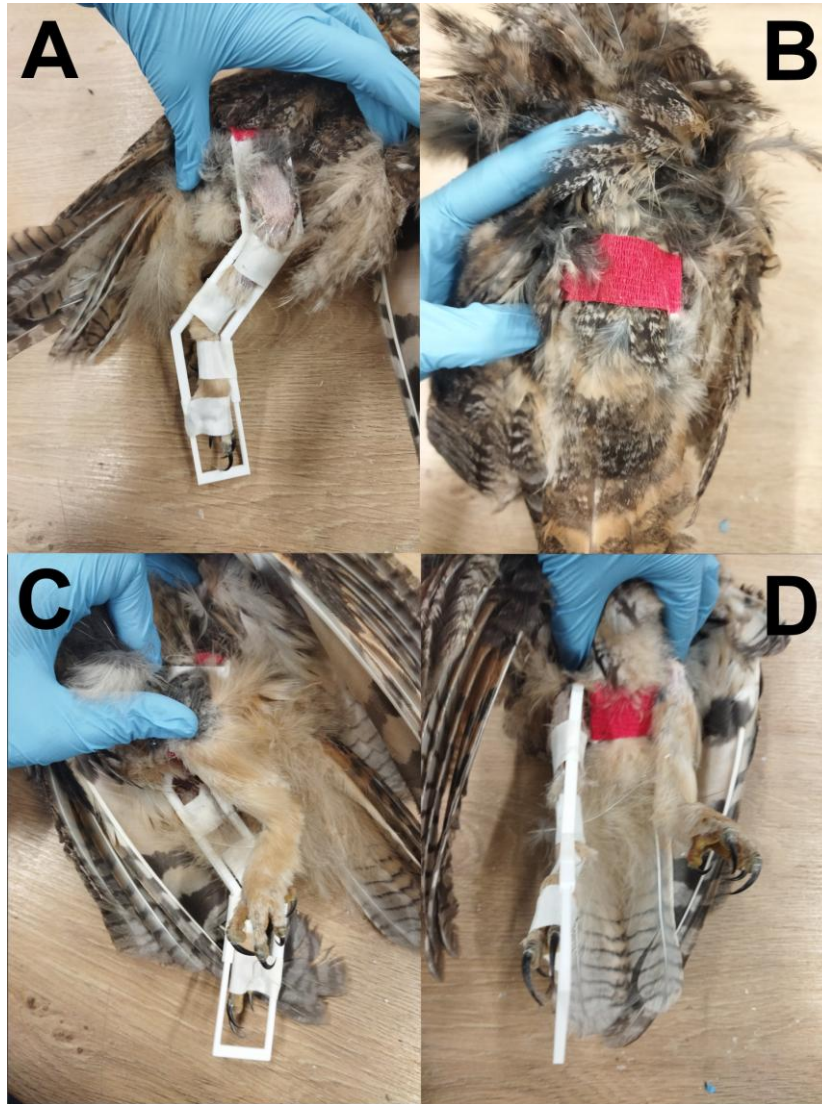


Figure 57. Mise en place du troisième prototype d'attelle pour les fractures du tibiotarse sur un hibou moyen-duc (*Asio otus*) décédé du centre de soin de l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse : vue latérale de la pièce principale (A) ; vue latérale de la pièce de soutien sur la patte controlatérale (B) ; vue ventrale montrant la face médiale de la pièce principale et la sangle ventrale (C) ; vue dorsale montrant la sangle dorsale (D).

Ces essais ont montré, comme pour les modèles précédents, une bonne fixation de l'attelle aux hanches et une bonne adaptabilité à la longueur des segments osseux. L'ajout d'un angle pour l'articulation du grasset a apporté une meilleure congruence avec l'ensemble de la patte.

Aucun essai clinique n'a pu être réalisé de par l'absence d'individu blessé.

C) Discussion et perspectives

Les essais des différents modèles conçus sur la base d'une attelle de Schroeder-Thomas modifiée ont répondu à certains objectifs initiaux et ont également montré des limites inattendues.

a. Mise en place

L'attelle est plutôt difficile à mettre en place que ce soit au niveau de la fixation des anneaux ou bien au niveau de la fixation des segments osseux aux tiges. La mise en place nécessite ainsi des entraînements préalables et une anesthésie générale parfois risquée notamment le jour de l'arrivée de l'individu.

b. Aspect statique

En ce qui concerne l'aspect statique, la conception d'anneaux au niveau des deux hanches reliés par des bandes adhésives a permis une bonne fixation de l'attelle à la hanche et n'a pas entraîné de gêne au niveau du cloaque. Plus globalement, l'attelle a pu rester en place et a permis une bonne stabilisation des différents segments osseux. De plus, les tiges coulissantes des segments de l'attelle ont permis une adaptation idéale aux segments osseux. Enfin, le troisième modèle présentant deux angles a permis de respecter au mieux la position physiologique de la patte.

Cependant, une limite sur la conception de l'attelle est à noter. En effet, bien que les tiges coulissantes permettent d'adapter la taille de l'attelle aux segments osseux, l'écartement entre les deux tiges parallèles n'est pas réglable et peut parfois s'avérer serré autour de la patte. Il faudrait alors imprimer des attelles de différentes tailles pour que les tiges parallèles ne soient pas collées à la patte.

c. Aspect dynamique

Un des aspects importants est l'impact de l'attelle sur la démarche de l'oiseau. Le deuxième prototype a pu être essayé sur un pigeon ramier (*Columba palumbus*) et a montré que l'oiseau arrivait à se tenir debout mais que sa patte était repoussée en avant gênant ainsi sa démarche. Le troisième prototype modélisé présentait donc des angles plus aigus afin que la patte soit plus repliée. Cependant, cette dernière version de l'attelle n'a pas pu être essayée.

d. Solidité

Les tiges se sont révélées légèrement fragiles (Figure 58), mais n'ont tout de même pas cédé lors de l'essai sur le pigeon ramier (*Columba palumbus*).

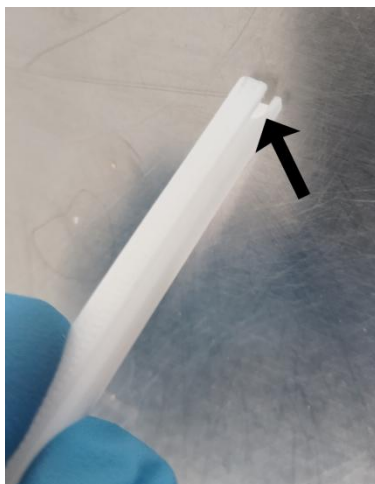


Figure 58. Photographie d'une tige coulissante de l'attelle conçue pour les fractures du tibia-tarse montrant un morceau manquant à l'extrémité de la tige.

e. Aspects économiques, écologiques et techniques

De la même façon que pour l'attelle en J, l'attelle pour les fractures du tibia-tarse est peu chère avec des coûts en matériaux inférieurs à un euro.

Mais contrairement à l'attelle en J, l'attelle pour les fractures du tibia-tarse est imprimée en un matériau rigide, le PLA, qui est quant à lui plus respectueux de l'environnement et facile à imprimer.

Enfin, si le PLA est un matériau plutôt facile à imprimer, des ajustements lors de l'impression sont nécessaires afin d'imprimer les différentes parties de l'attelle pour que les tiges puissent coulisser correctement sans trop d'accroche ni trop de facilité.

IV – Conception d'une « chaussure » pour le traitement des pododermatites : exemple chez les poules de compagnie






A) Pododermatites chez les oiseaux

a. Physiopathologie et enjeux des pododermatites

La pododermatite, aussi appelée « podagre » est une affection douloureuse et multifactorielle de la face plantaire du pied.

Cliniquement, on observe des lésions d'infection bactérienne au départ d'une plaie cutanée de la face plantaire du pied avec souvent pénétration des tissus plus profonds, à l'origine de boiterie simple jusqu'à une suppression d'appui. Ces lésions sont gradées en fonction de l'étendue et de la profondeur de la lésion. Il existe plusieurs classifications dont une par exemple en cinq grades (Tableau 3) (Devaux 2023). Elles touchent le plus souvent la face plantaire du pied en son centre, c'est-à-dire au niveau de l'appui de la trochlée tarsométatarsienne au sol.

Tableau 3. Gradation permettant l'évaluation de la gravité des lésions de pododermatite chez les oiseaux (Devaux 2023; « Bumblefoot » 2023)

Grade I		Dermatite sans signe d'infection, bon pronostic <u>Prise en charge conseillée</u> : amélioration du milieu de vie et l'utilisation éventuelle d'un émollient huileux pour protéger la peau
Grade II		Dermatite associée à une infection localisée, bon pronostic <u>Prise en charge conseillée</u> : traitement médical voire chirurgical
Grade III		Infection plus profonde, structure anatomique du pied modifiée <u>Prise en charge conseillée</u> : traitement chirurgical indispensable avec excision complète des tissus infectés et cicatrisation par première intention
Grade IV		Infection qui touche des structures profondes et indispensables à la marche (ostéomyélite), pronostic réservé à sombre <u>Prise en charge conseillée</u> : traitement chirurgical est quasi impossible car tous les tissus infectés ne peuvent être retirés, augmentant le risque de
Grade V		Lésion très sévère avec une infection profonde et étendue, pronostic sombre <u>Prise en charge conseillée</u> : Euthanasie car les traitements sont inefficaces

La pododermatite est souvent bilatérale lorsque les causes sont environnementales mais elle peut également être unilatérale notamment lors de pathologies traumatiques. Par exemple, un oiseau touché par une fracture sur une patte présente un report de poids sur la patte controlatérale qui peut alors développer une pododermatite (Greenacre 2015; Rodriguez-Lainz et al. 1997).

b. Facteurs de risque des pododermatites

Les causes expliquant le développement d'une pododermatite sont très nombreuses, notamment chez les poules d'élevage. Parmi les facteurs prédisposant, on retrouve les facteurs environnementaux avec de mauvaises conditions d'hygiène : humidité de la litière élevée, sol abrasif et perchoirs non adaptés. Des carences alimentaires peuvent également augmenter l'incidence de la maladie. Enfin, le surpoids et la sédentarité sont positivement corrélés à la présence de pododermatites (Greenacre 2015).

Les agents bactériens impliqués sont variés. On retrouve principalement des bactéries du genre *Staphylococcus* mais d'autres bactéries sont régulièrement isolées. Des agents fongiques des genres *Candida* et *Aspergillus* sont aussi retrouvés dans de très rares cas (Devaux 2023).

B) Epidémiologie des pododermatites

Les oiseaux touchés par les pododermatites sont nombreux. Parmi les oiseaux d'élevage, les races de poules à risque sont les races lourdes donc plutôt les races destinées à la production de viande. Les canards d'élevage sont également à risque notamment lorsque leurs besoin de baignade ne sont pas respectés (Greenacre 2015). Chez les rapaces, les espèces lourdes (buses et aigles) sont plus à risque de développer des pododermatites, à la fois dans leur milieu naturel et en captivité (Rodriguez-Lainz et al. 1997). Enfin, en captivité dans les parcs zoologiques, on retrouve beaucoup de pododermatites chez les espèces aquatiques comme les manchots (Wolanin 2018).

C) Traitements actuels

Les traitements des pododermatites sont variables en fonction de l'atteinte (Tableau 3).

Le premier traitement consiste à identifier la cause et la résoudre ce qui repose sur une modification des facteurs environnementaux dans un premier temps (humidité, litière, perchoirs). Le choix des perchoirs est assez controversé : il a été montré que les perchoirs anguleux sont plus enclins à provoquer des pododermatites ; cependant, les perchoirs à section ronde sont souvent glissants et les oiseaux doivent appliquer une force de serrage plus forte autour des perchoirs, pouvant également entraîner des lésions de pododermatite. Un compromis est l'utilisation de perchoirs non anguleux mais suffisamment large pour offrir une meilleure stabilité aux oiseaux (Bist et al. 2023). Pour les rapaces de fauconnerie, le diamètre des perchoirs peut être varié dans une même cage et il est important de les espacer suffisamment pour favoriser le vol. Des cordes peuvent être utilisées et il est préférable d'éviter les perchoirs en bois trop durs (Degernes et al. 1990).

Un traitement de première intention en cas de pododermatite légère consiste à désinfecter régulièrement les lésions à l'aide de bains dans une solution de chlorhexidine (ou de povidone iodée) diluée, et à mettre en place des traitements analgésique, antibactérien voire antifongique adaptés à l'espèce (Greenacre 2015).

La plupart du temps, les traitements non chirurgicaux sont insuffisants et une approche multifactorielle est nécessaire avec la mise en place d'une antibiothérapie systémique, une antibiothérapie locale, un débridage chirurgical de la plaie et enfin des soins post-opératoire afin de limiter l'appui sur les lésions. Le débridage de la plaie est conduit de façon à retirer tout le tissu nécrotique en incisant en zone saine autour de la lésion afin de recréer une plaie saine qui peut être suturée et qui peut cicatriser par première intention (Remple 2006). Pour ce qui est du bandage post-opératoire, il existe de nombreuses façons de faire (Figure 59). L'objectif est de permettre à l'oiseau de se déplacer tout en évitant tout appui sur la zone opérée. Il est important de noter qu'au cours de la cicatrisation, un bandage devrait également être réalisé dans la mesure du possible sur le membre controlatéral sain afin d'éviter un report de poids et le développement d'une pododermatite secondaire.

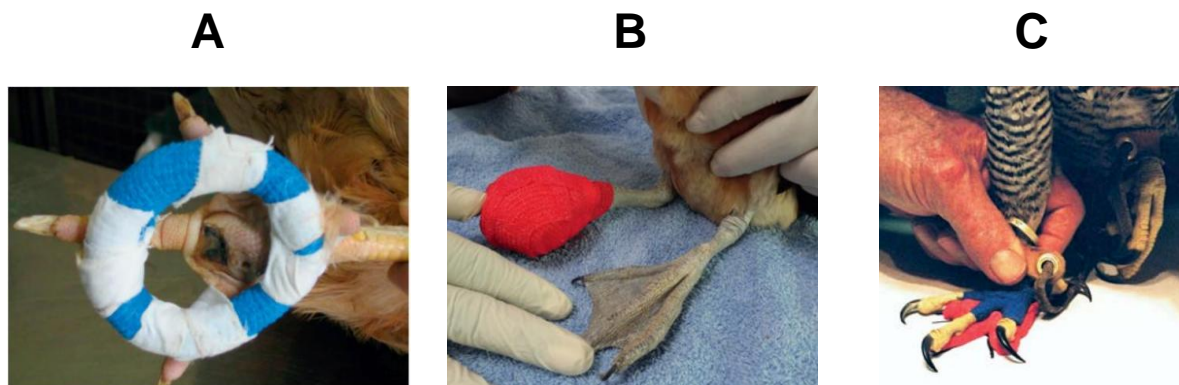


Figure 59. Photographies de différents bandages post-opératoires possibles suite à un débridage de plaie de pododermatite. A : Bandage dit « en donut » (Samour 2015) ; B : Bandage dit « en balle » (Samour 2015) ; C : Bandage sur mesure en silicone (Remple 2006).

Enfin, certains traitements apparaissent avec notamment la thérapie laser qui peut permettre pour des stades débutants d'éviter l'antibiothérapie et la chirurgie, en apportant une augmentation et une modulation de la microcirculation tissulaire et des effets antalgiques, anti-œdémateux et anti-inflammatoires locaux. Un avantage majeur de cette thérapie est l'absence d'utilisation de traitement par voie orale et donc l'absence d'incidence sur la consommation d'œufs. Cependant, c'est une thérapie difficilement envisageable en élevage de grande taille (Monchaux et al. 2021).

D) Conception de l'attelle pour les poules de compagnie

a. Objectifs du prototype

L'objectif principal de l'attelle est le même que pour tous les pansements post-opératoires existants déjà : l'attelle doit permettre de soulager l'appui sur la face plantaire du centre du pied.

Le deuxième objectif est sa facilité d'utilisation et de mise en place contrairement aux autres bandages qui sont parfois longs à fabriquer.

Enfin, le dernier objectif est, comme pour le bandage en « donut », de permettre de réaliser des soins locaux sans avoir besoin de retirer l'attelle.

b. Réalisation du prototype :

Acquisition du modèle 3D par scanner

Afin d'adapter au mieux l'attelle à la morphologie d'une patte de poule, le modèle 3D a été produit à partir de l'obtention d'images tomodensitométriques d'une patte de

poule, puis un traitement de l'objet 3D obtenu a été réalisé afin d'une part de nettoyer l'objet 3D puis de créer un trou au niveau de la face plantaire du pied pour soulager l'appui de cette partie du pied et pour permettre la réalisation de soins locaux réguliers.

Tout d'abord, des images tomodensitométriques d'une patte de poule ont été réalisées au sein du pôle imagerie de l'ENVT (Figure 60), à l'aide du scanner Optima CT540 (GE Medical Systems). Les paramètres de la machine étaient les suivants :

- Tension : 120 KV
- Courant : 120 mA
- Matrice : 512 x 512
- SFOV (Scanner Field Of View) : Small
- Acquisition : épaisseur de coupe : 0,625 mm ; intervalle de coupe : 0,310 mm
- Reconstruction tissulaire : épaisseur de coupe : 0,625 mm ; intervalle de coupe : 0,625 mm.



Figure 60. Photographie prise lors de l'acquisition des images tomodensitométriques d'une patte de poule, à l'aide du scanner Optima CT540 (GE Medical Systems) de l'ENVT.

Obtention du modèle de patte de poule en 3D

Les images tomodensitométriques ont ensuite été traitées à l'aide du logiciel InVesalius (Amorim et al. 2015) qui permet, en sélectionnant une tranche d'intensité de pixels des images tomodensitométriques, d'obtenir l'objet 3D correspondant au format « .stl ». Pour le modèle de la patte, tous les tissus ont été sélectionnés et afin d'enlever au maximum les éléments parasites (sparadrap), la tranche pixels

sélectionnée s'étendait d'un seuil minimal de -280 à un seuil maximal de 2616 (Figure 61). Une patte de poule en 3 dimensions a alors été obtenue.

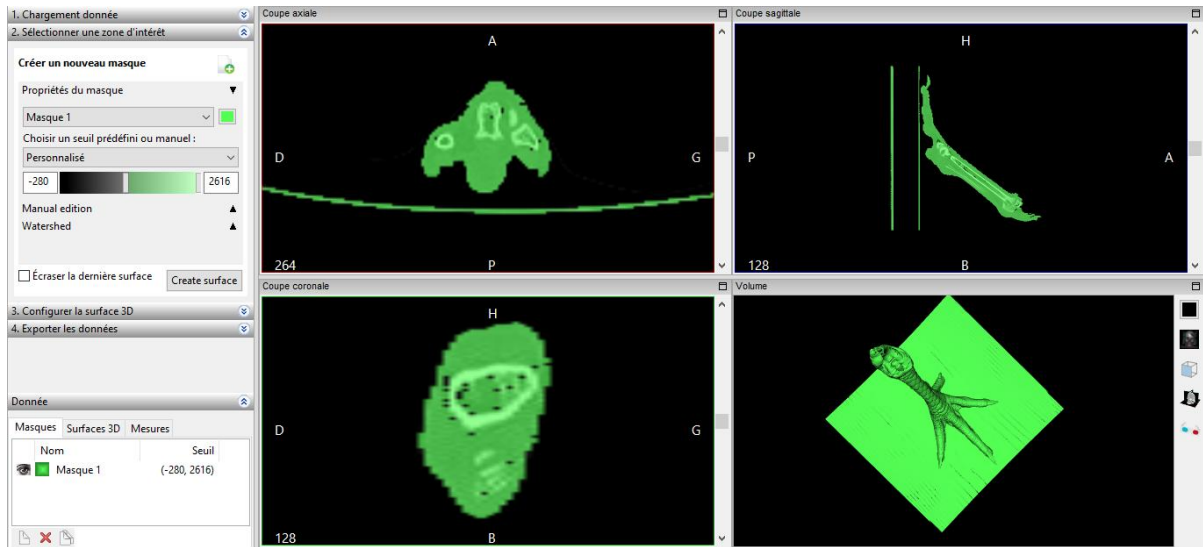


Figure 61. Capture d'écran du logiciel InVesalius 1.3 Ink. © montrant les pixels sélectionnés (Seuil : -280 à 2616) sur les trois plans de coupe et le modèle 3D obtenu à partir des images tomodensitométriques d'une patte de poule.

Modélisation 3D de l'attelle

Pour finir, le logiciel Blender (*Blender Online Community* 2018) a été utilisé afin d'enlever les éléments parasites restants autour de la patte de poule, et afin de créer une attelle autour de la patte de poule. L'attelle a été fendue au niveau de la face dorsale des doigts pour permettre sa mise en place, et un trou a été créé sur la face plantaire du pied pour répondre aux objectifs de l'attelle (Figure 62).

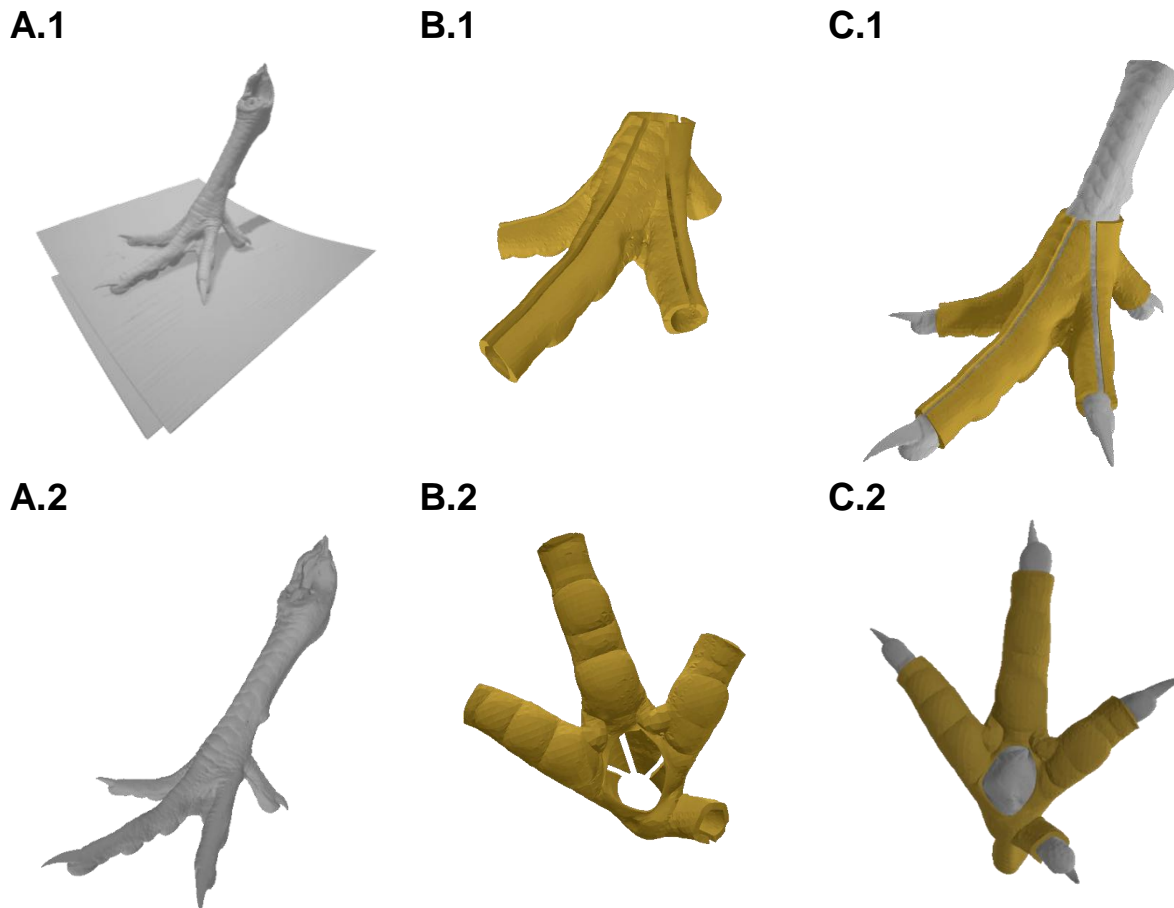


Figure 62. Modélisations 3D des différentes étapes de conception de l'attelle de patte de poule, avec d'abord la modélisation de la patte de poule avant traitement (A.1) et après traitement (A.2), puis la modélisation de l'attelle vue de dessus (B.1) et vue de dessous (B.2), et enfin l'assemblage de la patte et de l'attelle vue de dessus (C.1) et vue de dessous (C.2).

Impression

De la même façon que pour les autres attelles, il faut d'abord choisir le mode d'impression et le matériau. L'attelle étant comme une chaussure fermée, pour pouvoir être enfilée sur la patte, elle doit être imprimée à l'aide d'un matériau souple. Comme pour l'attelle en J, le TPU a été choisi pour l'impression de cette attelle. Une chaussure droite et une chaussure gauche ont été imprimées (Figure 63).

Les impressions ont été réalisées à l'aide de l'imprimante Original Prusa i3 MK3S+ avec un filament TPU (SainSmart TPU). Comme pour l'attelle en J pour les fractures de la main, les paramètres d'impression étaient les suivants :

- Température du plateau : 50°C ;
- Température de la buse : 230°C ;
- Vitesse d'impression : entre 25 et 45 millimètres par seconde.

Les impressions ont duré 3h41 chacune et ont consommé 27,99g de filament. Le coût de production s'élève à 0,95€ pour chaque attelle (annexe I).

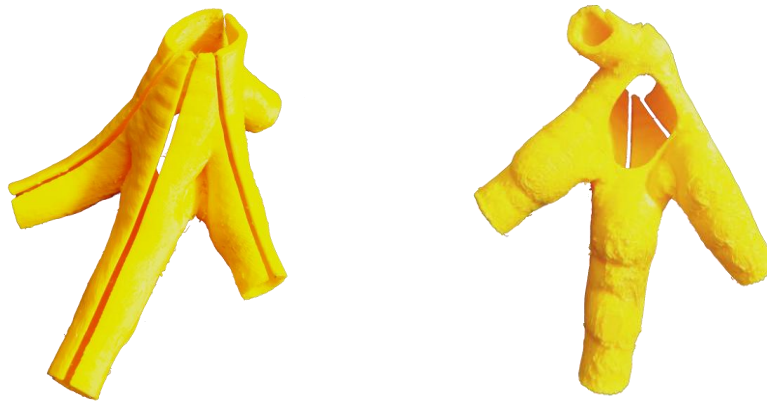


Figure 63. Photographie de la version droite de l'attelle de patte de poule imprimée en TPU. Vue de dessus (à gauche) et de dessous (à droite).

Essai de mise en place et de tenue sur une poule domestique

L'attelle a pu être essayée sur la patte gauche d'une poule domestique. L'objectif initial de cet essai était simplement de vérifier que l'attelle tenait en place, pouvait être supportée par l'animal, et n'engendrait pas de lésions secondaires. Il s'est avéré que la poule choisie présentait une pododermatite bilatérale de grade III (Figure 64) sans influence sur sa démarche.



Figure 64. Photographies montrant une pododermatite bilatérale de grade III chez une poule avec la patte droite (à gauche) et la patte gauche (à droite).

L'attelle étant peu lisse, les doigts ont été protégés à l'aide de compresses enroulées autour des doigts. L'attelle a ensuite été mise en place puis fixée à l'aide de bandes de sparadrap autour de chaque doigt de l'attelle et autour du tarsométatarse (Figure 65). La mise en place de l'attelle a été difficile car il est

compliqué d'écarter les quatre fentes de l'attelle et d'enfiler les doigts de la poule dans l'attelle en même temps. De plus, les compresses empêchaient le glissement des doigts dans l'attelle. La mise en place de l'attelle étant difficile et anxiogène pour la poule, une seule attelle a été placée sur la patte gauche de la poule.

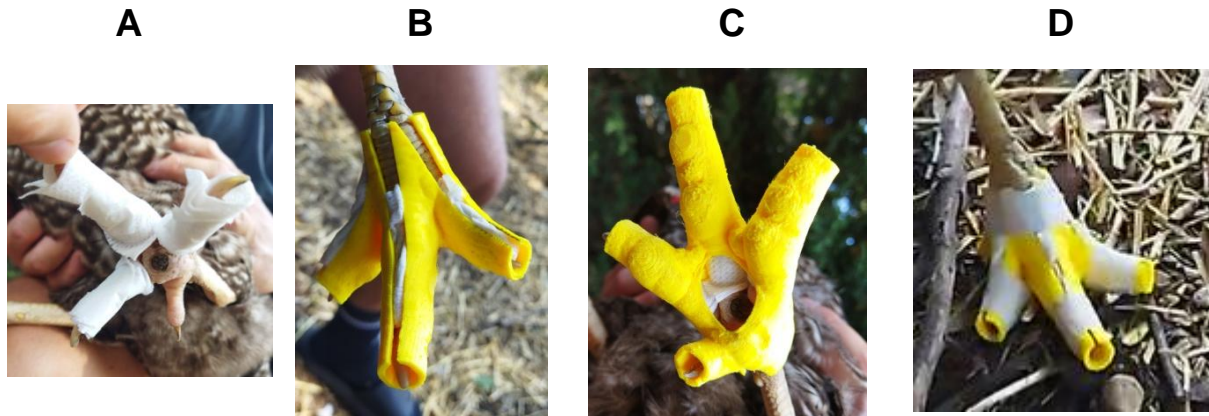


Figure 65. Photographies de la mise en place de l'attelle sur une poule présentant une pododermatite. Protection de la patte avec des compresses (A). Mise en place de l'attelle : vue de la face dorsale (B) et vue de la face palmaire (C). Fixation de l'attelle avec des bandes de sparadrap (D).

La démarche de la poule était affectée de par la gêne de l'attelle mais la face palmaire de la patte exposée par le trou de l'attelle n'entraîne pas en contact avec le sol.

L'attelle représentait une grande gêne pour la poule qui ne s'y est pas habituée et le lendemain matin l'attelle n'était plus en place. Aucune lésion secondaire n'a été observée mais la durée de port de l'attelle est inconnue.

Aucun autre essai n'a été réalisé.

E) Discussion et perspectives

L'essai réalisé a montré que l'attelle ne répond globalement pas aux objectifs initiaux.

a. Mise en place

L'attelle se met en place sur un animal vigile mais elle est difficile à enfiler. En effet le matériau choisi est souple mais pas assez pour que l'attelle soit mise en place facilement. Cependant, la conformation de l'attelle permet de maintenir la plante du pied en hauteur, sans contact de la face plantaire avec une quelconque surface. Ainsi, si choisir un matériau plus souple serait une solution pour une

meilleure mise en place, cela ne permettrait probablement pas à l'attelle de supporter la plante du pied en hauteur.

b. Tenue à long terme

L'attelle n'a également pas tenu malgré sa fixation. Une fixation de l'attelle à la patte au niveau du tarsométatarse pourrait être une solution.

Un autre point à soulever est l'irrégularité de la surface de l'attelle. En effet, dans l'essai ci-dessus, aucune lésion secondaire n'a été observée mais les doigts de la poule étaient protégés par défaut avec des compresses. On peut s'attendre à ce que sans protection et à long terme, l'attelle engendre des lésions secondaires sur les doigts.

c. Améliorations et perspectives

Afin d'améliorer l'attelle, on pourrait envisager un autre moyen de fixation avec une attelle en deux parties rigides, ce qui permettrait une mise en place plus facile et qui serait plus difficile à enlever pour la poule. Une deuxième version de l'attelle (Figure 66) a donc été modélisée avec une partie basse et une partie haute. Sur la partie basse, le trou au niveau de la face plantaire a été agrandi et la partie autour du doigt I a été retirée pour pouvoir enfiler facilement l'attelle. La surface du modèle a également été lissée dans la mesure du possible.

Cette attelle a alors été imprimée en PLA, ce qui est plus simple à imprimer, plus respectueux de l'environnement, et peut également permettre un rendu plus lisse de la pièce. Un essai sur une patte de poule décédée a été réalisé et a montré une mise en place grandement facilitée. Cependant, l'attelle comprime les espaces inter digités, elle doit donc être perfectionnée avant tout essai sur un animal vivant.

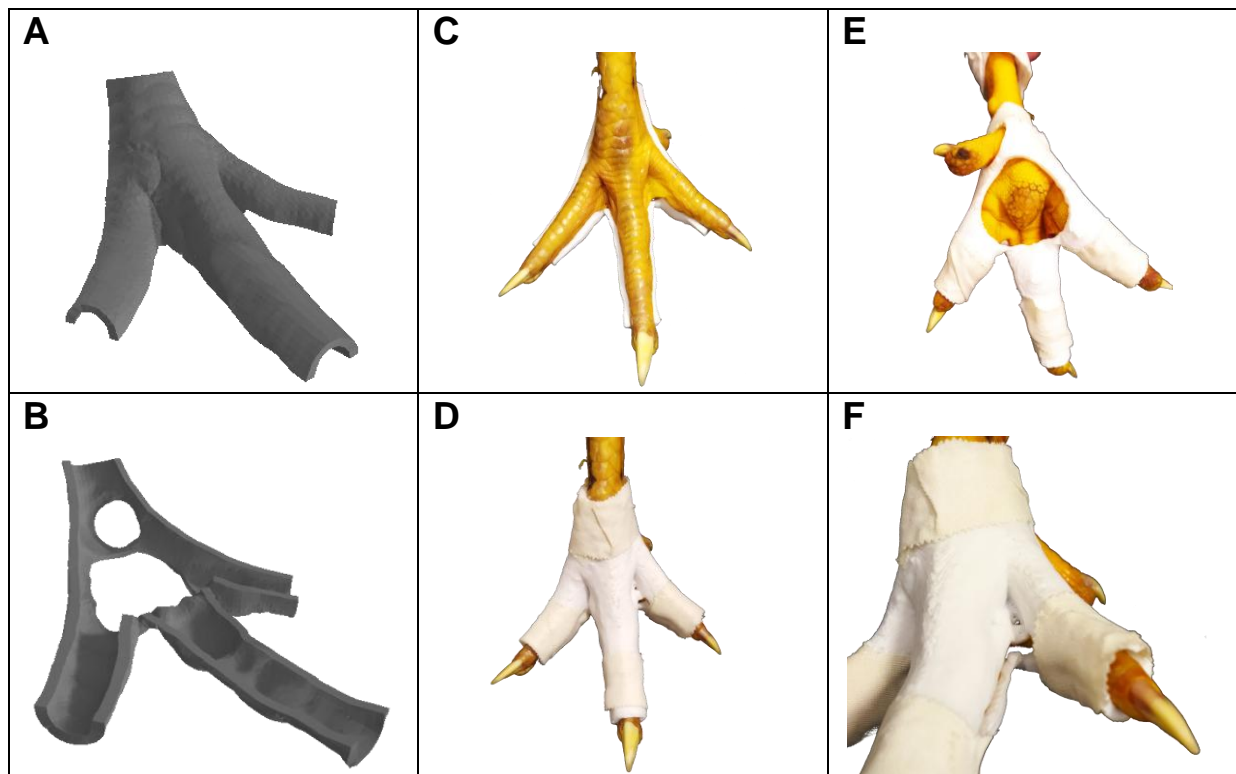


Figure 66. Modèle 3D et photographies de la mise en place de l'attelle de patte de poule. L'attelle est constituée de deux parties : la partie haute (A) et la partie basse (B). Vue de la mise en place de la partie du bas (C), vue dorsale de l'attelle en place (D), vue palmaire de l'attelle en place (E), vue de l'espace inter digité (F).

Enfin, une autre solution serait de revoir complètement l'attelle en utilisant un matériau beaucoup plus souple. C'est le cas d'une attelle conçue récemment par des chercheurs (Konicek 2024) : la conception et l'impression 3D de moules leur a permis d'utiliser du silicone afin de fabriquer leurs attelles (Figure 67). Malgré des difficultés à faire tenir l'attelle, le port de celle-ci en plus de traitements médicaux ou chirurgicaux adaptés a permis une résolution des lésions de pododermatites dans tous les essais.



Figure 67. Attelle en silicone conçue pour le traitement des pododermatites à l'aide de moules imprimés en 3D (Konicek 2024): modèle 3D présentant des fentes pour la fixation (A) ; modèle en silicone avec le système de fixation (B) ; modèle en place sur des pattes de poule (C).

Conclusion

L'impression 3D apparait aujourd'hui comme un outil formidable. A la portée de chacun, elle permet la création d'objets qui peuvent se révéler utiles notamment dans le domaine vétérinaire. C'est le cas avec deux attelles pour oiseaux parmi les trois présentées ici.

La première attelle conçue est une attelle en forme de J dont l'objectif est d'immobiliser la main des oiseaux dans le cadre de pathologies traumatiques de la main et notamment dans le cadre de fractures des métacarpes. Ces fractures sont fréquentes et même si l'option chirurgicale est idéale, il est parfois impossible d'opérer lorsque le patient n'est pas stable ou lorsque la fracture est multi esquilleuse. C'était le cas du premier cas clinique complet (buse variable) sur lequel l'attelle en J a pu être essayée. Le deuxième cas clinique complet (milan noir) avec l'attelle en J concernait quant-à-lui une luxation du doigt résolue avec succès. Dans les deux cas, l'attelle en J a offert de nombreux avantages : en plus d'apporter l'immobilisation nécessaire à la cicatrisation, elle était facile à mettre en place et à retirer. Si elle a été utilisée dans nos cas en tant que traitement en elle-même, on peut également imaginer l'utiliser dans l'attente d'une chirurgie ultérieure.

La seconde attelle est une attelle destinée au traitement des fractures du tibiotarse. Les fractures du tibiotarse sont difficiles à traiter : de par la rotation axiale du tibiotarse, les traitements par contention externe immobilisent difficilement le membre et la chirurgie est la méthode de choix. Cependant, la chirurgie n'est parfois pas possible. L'attelle conçue avait donc pour objectif d'apporter une contention externe solide en se basant sur une attelle de Schroeder-Thomas modifiée et en apportant plus de fixation notamment au niveau de la hanche. Ainsi, l'attelle a été conçue en deux parties : une partie pour la patte atteinte, reliée par des bandes élastiques à un anneau placé autour de la patte controlatérale afin de fixer le dispositif aux hanches de l'oiseau. Trois versions de cette attelle ont été modélisées d'abord pour apporter de l'adaptabilité pour les différentes espèces, puis pour diminuer la gêne occasionnée par l'attelle. Ainsi, malgré une mise en place difficile à réaliser sous anesthésie générale, l'attelle répond bien aux objectifs initiaux : elle est adaptable et semble apporter une très bonne stabilisation de la patte. Cependant,

aucun essai clinique complet n'a pu être réalisé. L'efficacité sur le traitement d'une fracture du tibiotalar reste donc à démontrer.

Enfin, la dernière attelle modélisée est celle d'une chaussure pour poule dans le cadre du traitement des pododermatites. Les pododermatites sont très fréquentes chez les poules et peuvent avoir des conséquences très lourdes car dans des stades avancés, elles sont difficiles à traiter. L'attelle conçue avait principalement des objectifs ergonomiques : en plus de soulager la face plantaire du pied, elle devait être facile à utiliser. Elle a alors été modélisée à partir de l'acquisition d'images tomodensitométriques, et imprimée dans un matériau souple pour une mise en place facile. Une seule utilisation a été réalisée et l'attelle s'est révélée difficile à mettre en place et a été retirée rapidement par la poule. Des améliorations ont été envisagées avec la conception d'une attelle en deux parties et des essais doivent être réalisés afin de vérifier l'efficacité de ce nouveau modèle.

Si l'impression 3D s'est largement démocratisée ces quinze dernières années, cela reste une technologie complexe à maîtriser de par la diversité de techniques, de matériaux ou encore de logiciels utilisables. L'utilisation de méthodes d'impression 3D plus complexes que la méthode par dépôt de fil fondu est parfois nécessaire. Cependant lorsque les objectifs sont simples, l'impression 3D est un atout considérable, notamment pour son aspect économique non négligeable qui peut offrir des solutions auparavant inenvisageables pour des structures comme les centres de soin pour la faune sauvage.

Bibliographie

- Amorim, Paulo, Thiago Moraes, Jorge Silva, et Helio Pedrini. 2015. « InVesalius: An Interactive Rendering Framework for Health Care Support ». In *Advances in Visual Computing*, édité par George Bebis, Richard Boyle, Bahram Parvin, Darko Koracin, Ioannis Pavlidis, Rogerio Feris, Tim McGraw, et al., 45-54. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27857-5_5.
- Baik, Seungyeop, Sunyoung Choi, Suho Ahn, et Hangjung Zo. 2022. « The Role of Remixing for Innovation in Online Innovation Communities ».
- Bakici, Caner, Remzi Orkun Akgün, et Çağdaş Oto. 2019. « The Applicability and Efficiency of 3 Dimensional Printing Models of Hyoid Bone in Comparative Veterinary Anatomy Education ». *Veteriner Hekimler Derneği Dergisi* 90 (2): 71-75. <https://doi.org/10.33188/vetheder.518909>.
- Bennett, R. Avery, et Alan B. Kuzma. 1992. « Fracture Management in Birds ». *Journal of Zoo and Wildlife Medicine* 23 (1): 5-38.
- Bist, Ramesh Bahadur, Sachin Subedi, Lilong Chai, Prafulla Regmi, Casey W. Ritz, Woo Kyun Kim, et Xiao Yang. 2023. « Effects of Perching on Poultry Welfare and Production: A Review ». *Poultry* 2 (2): 134-57. <https://doi.org/10.3390/poultry2020013>.
- Blender Online Community. 2018. « Blender - a 3D modelling and rendering package ». Blender Foundation. <http://www.blender.org>.
- « Bumblefoot ». 2023. *Happy Morning Farm* (blog). 23 avril 2023. <https://happymorningfarm.com/chicken-health-101/chicken-illnesses/bumblefoot/>.
- Burdeaux, Richard R., et Laura Wade. 2018. « Successful Management of Open, Contaminated Metacarpal Fractures in an Adult Snowy Owl (*Bubo Scandiacus*) With a Minimal Type II External Skeletal Fixator ». *Journal of Avian Medicine and Surgery* 32 (3): 210-16. <https://doi.org/10.1647/2017-280>.
- Caron, Alexandre. 2024. « Applications vétérinaires de l'impression en trois dimensions ». *Le Point Vétérinaire*, n° n°449 (janvier). <https://www.lepointveterinaire.fr/publications/le-point-veterinaire/article/n-449/applications-veterinaires-de-l-impression-en-trois-dimensions.html>.
- Ciobotaru, Vlad, Victor-Xavier Tadros, Claire A Martin, et Sebastien Hascoet. 2022. « Complex transcatheter left atrial appendage closure using a tailored transjugular approach simulated by 3D printing: a case report ». *European Heart Journal: Case Reports* 6 (8): ytac304. <https://doi.org/10.1093/ehjcr/ytac304>.
- Dabove, Grasso, et Piras. 2019. « Smartphone-Based Photogrammetry for the 3D Modeling of a Geomorphological Structure ». *Applied Sciences* 9 (18): 3884. <https://doi.org/10.3390/app9183884>.

- Dascalu, R., M. Sabau, A. Proteasa, L. Schuszler, A. Sala, M. Şerb, et C. Igna. 2013. « Contributions to the treatment of traumatic orthopedic disorders in birds. » *Scientific Works. Series C. Veterinary Medicine*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Contributions-to-the-treatment-of-traumatic-in-Dascalu-Sabau/20dd408de3f4c0b19bdb683a2201bd186cbd4118>.
- De Margerie, Emmanuel, Sophie Sanchez, Jorge Cubo, et Jacques Castanet. 2005. « Torsional Resistance as a Principal Component of the Structural Design of Long Bones: Comparative Multivariate Evidence in Birds ». *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology* 282A (1): 49-66. <https://doi.org/10.1002/ar.a.20141>.
- Degernes, Laurel A., Barbara J. Talbot, Lori R. Mueller, et Raptor Center. 1990. « Raptor Foot Care ». *Journal of the Association of Avian Veterinarians* 4 (2): 93-95. <https://doi.org/10.2307/30136889>.
- Devaux, Laurianne. 2023. « LES MALADIES NERVEUSES ET MYO-ARTHRO-SQUELETTIQUES CHEZ LA POULE - Le Point Vétérinaire n° 445 du 01/09/2023 ». Le Point Vétérinaire. septembre 2023. <https://www.lepointveterinaire.fr/publications/le-point-veterinaire/article/n-445/les-maladies-nerveuses-et-myo-arthro-squelettiques-chez-la-poule.html>.
- Dundie, A., G. Hayes, P. Scrivani, L. Campoy, D. Fletcher, K. Ash, E. Oxford, et N.S. Moïse. 2017. « Use of 3D Printer Technology to Facilitate Surgical Correction of a Complex Vascular Anomaly with Esophageal Entrapment in a Dog ». *Journal of Veterinary Cardiology* 19 (2): 196-204. <https://doi.org/10.1016/j.jvc.2016.10.003>.
- « Flexible Filaments for 3D Printing – Simply Explained ». 2020. All3DP. 20 octobre 2020. <https://all3dp.com/2/flexible-3d-printing-filament-which-should-you-chose/>.
- Galicia, Cecilia, Vanessa Hernandez Urraca, Luis Del Castillo, et Jaime Samour. Mvz. 2018. « Design and Use of a 3D Prosthetic Leg in a Red-Lored Amazon Parrot (*Amazona Autumnalis*) ». *Journal of Avian Medicine and Surgery* 32 (2): 133-37. <https://doi.org/10.1647/2017-282>.
- Greenacre, Cheryl B. 2015. « Backyard Poultry Medicine and Surgery ».
- « Guide des matériaux d'impression 3D : types, applications et propriétés ». 2022. Formlabs. 2022. <https://formlabs.com/fr/blog/materiaux-impression-3d/>.
- Higbie, Christine. 2016. « External Coaptation in Birds: Bandages and Splints ». *LafeberVet* (blog). 7 mars 2016. <https://lafeber.com/vet/external-coaptation-birds-bandages-splints/>.
- Huang, Jiaqi, Qian Chen, Hao Jiang, Bin Zou, Lei Li, Jikai Liu, et Huangchao Yu. 2020. « A Survey of Design Methods for Material Extrusion Polymer 3D Printing ». *Virtual and Physical Prototyping* 15 (2): 148-62. <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1708027>.

- Konicek, C. 2024. « Silicone Shoes for Treatment of Pododermatitis (Bumblefoot) in Pet Chickens, a Retrospective Case Series ». *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202408.0281.v1>.
- König, Horst Erich, Rüdiger Korb, et Hans-Georg Liebich, éd. 2016. *Avian Anatomy: Textbook and Colour Atlas*. 2nd edition. Veterinary Clinical Reference. Sheffield, UK: 5m Publishing.
- Liaw, Chya-Yan, et Murat Guvendiren. 2017. « Current and emerging applications of 3D printing in medicine ». *Biofabrication* 9 (2): 024102. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/aa7279>.
- Liu, Hao, Hui He, et Bai Huang. 2020. « Favorable Thermoresponsive Shape Memory Effects of 3D Printed Poly(Lactic Acid)/Poly(ϵ -Caprolactone) Blends Fabricated by Fused Deposition Modeling ». *Macromolecular Materials and Engineering* 305 (11): 2000295. <https://doi.org/10.1002/mame.202000295>.
- Mc, Fernandes, Rahal Sc, Teixeira Cr, Mamprim Mj, Freirias Cd, Lima Hc, Da Silva Jp, et Moresco A. 2022. « Retrospective Study of Fractures in Both Appendicular and Axial Skeletons of Birds Belonging to the Families Falconidae and Cariamidae ». *Journal of Animal Science and Research* 6 (1). <https://doi.org/10.16966/2576-6457.156>.
- Mehrpouya, Mehrshad, Henri Vahabi, Shahram Janbaz, Arash Darafsheh, Thomas R. Mazur, et Seeram Ramakrishna. 2021. « 4D Printing of Shape Memory Polylactic Acid (PLA) ». *Polymer* 230 (septembre):124080. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.124080>.
- Monchaux, Marie, Jessie Vandenbruggen, Christophe Rodrigues, et Didier Marlier. 2021. « Traitement alternatif de la pododermatite sur une poule (Gallus gallus) » 12 (mars):15-16.
- Ntousia, Margarita, et Ioannis Fudos. 2019. « 3D Printing Technologies & Applications: An Overview ». In *Proceedings of CAD'19*, 243-48. CAD Solutions LLC. <https://doi.org/10.14733/cadconfP.2019.243-248>.
- Orosz, Susan E., M. Scott Echols, et Patrick T. Redig. 2023. *Avian Surgical Anatomy and Orthopedic Management*. Second edition. Florence, OR: Teton NewMedia.
- Oxley, Bill. 2018. « A 3-dimensional-printed Patient-specific Guide System for Minimally Invasive Plate Osteosynthesis of a Comminuted Mid-diaphyseal Humeral Fracture in a Cat ». *Veterinary Surgery* 47 (3): 445-53. <https://doi.org/10.1111/vsu.12776>.
- Palazzolo, Carl. s. d. « Fractured (Broken) Bird Leg ». *Long Beach Animal Hospital* (blog). Consulté le 27 mars 2024. <https://lbah.com/avian/fractured-bird-leg/>.
- Park, So-Young, Jeong-Hee An, Hyun Kwon, Seo-Young Choi, Ka-Young Lim, Ho-Hyun Kwak, Kamal Hany Hussein, Heung-Myong Woo, et Kyung-Mee Park. 2020. « Custom-made artificial eyes using 3D printing for dogs: A preliminary

- study ». *PLoS ONE* 15 (11): e0242274. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242274>.
- Remondino, Fabio, Alberto Guarnieri, et Antonio Vettore. 2005. « 3D modeling of close-range objects: photogrammetry or laser scanning? » In , édité par J.-Angelo Beraldin, Sabry F. El-Hakim, Armin Gruen, et James S. Walton, 216. San Jose, CA. <https://doi.org/10.1117/12.586294>.
- Remple, J. David. 2006. « A Multifaceted Approach to the Treatment of Bumblefoot in Raptors ». *Journal of Exotic Pet Medicine* 15 (1): 49-55. <https://doi.org/10.1053/j.jepm.2005.11.003>.
- Rodríguez Díez, Clara, Fernando González, Irene López, Laura Suárez, Virginia Moraleda, et Casilda Rodríguez. 2020. « Pododermatitis in raptors admitted in a wildlife rehabilitation centre in central Spain ». *Preventive Veterinary Medicine* 175 (février):104875. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2019.104875>.
- Rodriguez-Lainz, Alfonso J., David W. Hird, Philip H. Kass, et Dale L. Brooks. 1997. « Incidence and Risk Factors for Bumblefoot (Pododermatitis) in Rehabilitated Raptors ». *Preventive Veterinary Medicine* 31 (3-4): 175-84. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(96\)01137-3](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(96)01137-3).
- Roh, Yoonho, Jaemin Jeong, Youngjin Jeon, Daehyun Kim, Seongmok Jeong, et Haebeom Lee. 2022. « Pelvic Endoprosthesis after Hemipelvectomy Using a 3D-Printed Osteotomy Guide for Infiltrative Osteoma in a Cat ». *Veterinary Sciences* 9 (5): 237. <https://doi.org/10.3390/vetsci9050237>.
- Sabater González, Mikel. 2019. « Skeletal Bone Structure and Repair in Small Mammals, Birds, and Reptiles ». *Veterinary Clinics of North America: Exotic Animal Practice* 22 (2): 135-47. <https://doi.org/10.1016/j.cvex.2019.01.002>.
- Samour, Jaime. 2015. *Avian Medicine*. Elsevier Health Sciences.
- Santos, Marcelo A. R. D., Ruís C. Tokimatsu, Tiago L. E. Treichel, Tales D. D. Prado, et Adecir C. D. S. Junior. 2020. « Orthosis and Prosthesis Development for Large and Medium Animals using reverse Engineering and Additive Manufacturing Techniques ». *International Journal of Advanced Engineering Research and Science* 7 (5): 169-77. <https://doi.org/10.22161/ijaers.75.23>.
- Stark, Erich, Oto Haffner, et Erik Kučera. 2022. « Low-Cost Method for 3D Body Measurement Based on Photogrammetry Using Smartphone ». *Electronics* 11 (7): 1048. <https://doi.org/10.3390/electronics11071048>.
- Taib, Nur-Azzah Afifah Binti, Md Rezaur Rahman, Durul Huda, Kuok King Kuok, Sinin Hamdan, Muhammad Khusairy Bin Bakri, Muhammad Rafiq Mirza Bin Julaihi, et Afrasyab Khan. 2023. « A Review on Poly Lactic Acid (PLA) as a Biodegradable Polymer ». *Polymer Bulletin* 80 (2): 1179-1213. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04160-y>.

- « The Best 3D Print Speed Settings for PLA & More ». 2022. All3DP. 18 décembre 2022. <https://all3dp.com/2/3d-printing-speed-optimal-settings/>.
- « The Best TPU Bed & Print Temperature Settings ». 2023. All3DP. 20 juillet 2023. <https://all3dp.com/2/best-tpu-print-temperature-bed-filament/>.
- Tully, Thomas N. 2002. « Basic Avian Bone Growth and Healing ». *Veterinary Clinics of North America: Exotic Animal Practice* 5 (1): 23-30. [https://doi.org/10.1016/S1094-9194\(03\)00044-6](https://doi.org/10.1016/S1094-9194(03)00044-6).
- Vazquez, Rick J. 1992. « Functional Osteology of the Avian Wrist and the Evolution of Flapping Flight ». *Journal of Morphology* 211 (3): 259-68. <https://doi.org/10.1002/jmor.1052110303>.
- Ward, Andrea B., Peter D. Weigl, et Rachael M. Conroy. 2002. « Functional Morphology of Raptor Hindlimbs: Implications for Resource Partitioning ». Édité par C. D. Marti. *The Auk* 119 (4): 1052-63. <https://doi.org/10.1093/auk/119.4.1052>.
- « What's Soft PLA Filament & How Does It Compare to TPU? » 2019. All3DP. 27 septembre 2019. <https://all3dp.com/2/what-s-soft-pla-filament-how-does-it-compare-to-tpu/>.
- Wolanin, Jamie A. 2018. « A Critical Analysis of Bumblefoot: Care and Preventative Measures in Captive Penguins ». In . <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Critical-Analysis-of-Bumblefoot%3A-Care-and-in-Wolanin/2829b70ac23260a945260f541cc1581b02c9ef2c>.
- Wright, Loudon, Christoph Mans, Geoff Olsen, Grayson Doss, Ermias W. Amene, Gerd Britsch, Jane Christman, et Jill Heatley. 2018. « Retrospective Evaluation of Tibiotarsal Fractures Treated With Tape Splints in Birds: 86 Cases (2006–2015) ». *Journal of Avian Medicine and Surgery* 32 (3): 205-9. <https://doi.org/10.1647/2016-2241>.
- Yilgör Huri, Pınar, et Çağdaş Oto. 2022. « 3D Printing in Veterinary Medicine ». *Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi* 69 (1): 111-17. <https://doi.org/10.33988/auvfd.871933>.
- Yonis. 2023. « Le Guide Ultime Du Post-traitement De L'impression 3D - Conseils Faciles | 3D GURU ». 9 août 2023. <https://www.3d-guru.fr/conseils-et-astuces/le-guide-ultime-du-post-traitement-de-limpression-3d-conseils-faciles/>.
- Zeffer, Anna, L. Christoffer Johansson, et Åsa Marmebro. 2003. « Functional Correlation between Habitat Use and Leg Morphology in Birds (Aves): HABITAT and LEG MORPHOLOGY IN BIRDS (AVES) ». *Biological Journal of the Linnean Society* 79 (3): 461-84. <https://doi.org/10.1046/j.1095-8312.2003.00200.x>.

ANNEXES

ANNEXE I : Tableau présentant les durées d'impression, les quantités de matériau utilisées et les coûts estimés pour chaque attelle imprimée.

Modèle	Matériau	Taille d'impression	Durée de l'impression	Quantité de matériau utilisée	Prix du matériau	Estimation du coût de l'attelle
Attelle en J, buse variable	TPU	100%	Environ 2h	Environ 7g	33,95€/kg	0,23 €
Attelle en J, buse variable	TPU	50%	48 min	3,25		0,11 €
Attelle en J, faucon crécerelle	TPU	100%	Environ 1h	Environ 9g		0,31 €
Attelle en J, faucon crécerelle	TPU	150%	1h 51 min	13,37g		0,45 €
Attelle de patte, premier prototype	PLA	100%	48 min	6,39g	23,99€/kg	0,15 €
Attelle de patte, second prototype	PLA	100%	1h 14 min	8,86g		0,21 €
Attelle de patte, second prototype	PLA	150%	3h 06 min	26,74g		0,64 €
Attelle de patte, troisième prototype	PLA	100%	1h 33 min	11,94 g		0,29 €
Chaussure pododermatite, poule	TPU	100%	3h 41 min	27,99g	33,95€/kg	0,95 €

ANNEXE II : Données du centre de soins de la faune sauvage de l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse récoltées entre le 1er janvier 2016 et le 31 décembre 2022

Annexe II.A : Tableau présentant les critères d'inclusion utilisés dans le tri des données brutes du centre de soin

Catégorie	Mots présents dans la description du diagnostic incluant le cas dans la catégorie ci-contre
Fracture	"fracture" ou "cassé"
Ouverte/Fermée/Non déterminé	"fracture" + si ouverte : "ouverte" + si fermée : "fermée" + si non déterminé : non renseigné.
Ancienne	"ancienne" ou "cal" ou "consolidée" ou "chronique"
Aile	"fracture"/"cassé" + "aile" ou "Membre antérieur" ou "épaule" ou "coude" ou toutes les autres propositions ci-dessous
Humérus	"fracture"/"cassé"+"humérus"
Radius	"fracture"/"cassé"+"radius"
Ulna	"fracture"/"cassé"+"ulna"
Carpométacarpes	"fracture"/"cassé" + "carpométacarpe" ou "métacarpe" ou "main" ou "poignet"
Doigts	"fracture"/"cassé"+"doigt"
Ceinture scapulaire	"fracture"/"cassé" + "clavicule" ou "coracoïde" ou "scapula"
Clavicule	"fracture"/"cassé" + "clavicule"
Coracoïde	"fracture"/"cassé" + "coracoïde"
Scapula	"fracture"/"cassé" + "scapula"
Patte	"fracture"/"cassé" + "patte" ou "membre postérieur" ou tout autre ci-dessous
Fémur	"fracture"/"cassé" + "fémur"
Tibiotarse	"fracture"/"cassé" + "tibiotarse" ou "tibia"
Tarsométatarse	"fracture"/"cassé" + "tarsométatarse" ou "tarse" ou "métatarse" ou "pied" ou "cheville"
Squelette axial	"fracture"/"cassé" + tout les trucs ci-dessous ou "sternale"
Colonne	"fracture colonne" ou "traumatisme médullaire" ou "fracture vertèbre" "fracture sacrum"
Crâne/mandibule/bec	"fracture"/"cassé" + "crâne" ou "mandibule" ou "bec" ou "arcade"
Bassin	"fracture"/"cassé" + "bassin" ou "ilium" ou "ischium" ou "hanche"
Indéterminée	"fracture" seul ou "fracture" + "épaule" ou "phalanges"

Annexe II.B : Tableau présentant le nombre de fractures par région anatomique

Région anatomique	Nombre de fractures
Aile	1542
Ceinture scapulaire	330
Patte	628
Squelette axial	207
Indéterminé	158
Total	2865

Annexe II.C : Tableau présentant la proportion de fractures ouvertes, fermées ou indéterminées en fonction des segments osseux de l'aile

Segment osseux	Fractures fermées	Fractures ouvertes	Indéterminé
Humérus	5%	38%	57%
Radius	7%	36%	57%
Ulna	8%	35%	57%
Carpométacarpes	3%	56%	42%
Autres (aile)	1%	46%	52%
Total général	5%	41%	54%

Annexe II.D : Tableau présentant la proportion de fractures ouvertes, fermées ou indéterminées en fonction des segments osseux de la patte

Segment osseux	Fractures fermées	Fractures ouvertes	Indéterminé
Fémur	1%	10%	89%
Tibiotarse	4%	18%	78%
Tarsométatarse	2%	33%	65%
Autre (patte)	2%	19%	79%
Total général	3%	19%	78%

Annexe II.E : Tableau présentant le nombre de fractures par segment osseux pour les espèces d'oiseaux les plus représentées au centre de soins (N > 100)

Espèce	Aile				Ceinture scapulaire				Patte				Squelette axial				Indéterminé	Absence de fracture	Total général	
	Humerus	Radius	Ulna	Carpométacarpes	Autres (aile)	Clavicule	Coracoïde	Scapula	Autre (ceinture scapulaire)	Fémur	Tibiotarse	Tarsométatarse	Autre (patte)	Colonne	Crâne/Mandibule/bec	Bassin				Autre (squelette axial)
Pigeon biset domestique	67	83	81	73	35	24	31	1	5	21	60	14	15	14	10	8	5	23	1147	1717
Tourterelle turque	46	26	23	32	17	42	34			12	20	7	11	5	7		12	20	965	1279
Merie noir	47	26	26	16	20	9	12	2	2	10	33	5	7	6	6	3	5	11	925	1171
martinet noir	20	18	18	23	13	1	6			3	12	2	2	1	5		3	6	954	1087
Pigeon ramier	41	36	37	39	18	17	17	1	4	11	26	6	7	7	10	2	2	17	606	904
Moineau domestique	14	8	9	4	1	1	4		1	7	19	7	2	6		2		6	460	551
Pie bavarde	19	6	7	5	4	4	2	2		13	21	5	7	8	2	2		7	416	530
Faucon crécerelle	34	13	20	22	12	3	10	1	1	4	11	3	4	4	1	1	2	14	303	463
Chevéche d'Athéna	12	9	13	5	5	1	7			8	11	10	3	8	1	6		7	299	405
Étourneau sansonnet	4	10	13	5	5	6	2	2		3	8	3	2	1	1			5	235	305
Busse variable	26	22	26	10	8	1	5	2		7	8	3	2	7	3	2	1	3	165	301
Chouette hulotte	15	7	10	3	3		1			3	7	3		1	2			3	186	244
Cornelle noire	14	7	11	5	3	1	4	1		5	8	1	1	3				3	166	233
Hirondelle de fenêtre	5	8	8	4	1		2		1	1	3	2	1		1			1	168	206
Effraie des clochers	21	11	18	10	8	1	5	3		5	5	3	2	1	1	3		9	96	202
Mésange charbonnière	2	3	3	3	2		1			2	7	1	2					1	173	200
Goéland leucopnée	8	10	10	4	8	1					3		1					2	94	141
Canard colvert	3	2	3	1	3			1		2	5	2			1	1		1	103	129
Rougequeue noir	3	2	2	2		1	1			5	7		1					1	98	123
Fauvette à tête noire	2	2	2	2		2	2			2	2		1					1	97	115
Milan noir	7	5	11	6	3	1				1	4			1		1		1	69	110
Rougegorge familier	4	3	3	2	2				2	1	4	2	1	2				2	77	108
Épervier d'Europe	10	15	14	7	3	2	7			1	1	1							44	105
Huppe fasciée	13	12	9	11	4	1	1			2	1							1	46	104
Autres espèces	91	74	79	48	23	25	34	2	3	16	32	19	12	9	5	4	2	13	981	1472
Total général	528	418	456	342	201	145	191	18	19	145	318	99	84	84	58	35	33	158	8873	12205

Résumé

L'impression 3D, aujourd'hui accessible à tous, présente de nombreuses applications dans de nombreux domaines, dont la médecine vétérinaire.

Dans notre étude, cette technologie est utilisée pour la mise au point de trois attelles pour les oiseaux sauvages et domestiques. La première attelle est une attelle en forme de J destinée à l'immobilisation de la main des oiseaux dans le cadre de pathologies traumatiques et notamment dans le cadre de fractures des métacarpes. La seconde attelle est une attelle de patte basée sur une attelle de Schroeder-Thomas modifiée, destinée au traitement des fractures du tibiotarse. Enfin, la dernière attelle est une chaussure pour poule ajourée au niveau de la face plantaire dont l'objectif est de s'inscrire dans le traitement des pododermatites.

Les résultats de cette étude ont montré une bonne efficacité de l'attelle en J sur deux cas cliniques complets, mais son efficacité reste à démontrer sur une plus grande multitude de cas cliniques. L'attelle pour patte n'a pas pu être essayée sur un cas clinique complet mais elle semble apporter une bonne stabilité de la patte. L'attelle pour poule n'a pas répondu aux objectifs ergonomiques originaux et nécessite des améliorations de forme et de matériau.

Mots-clefs : impression 3D, oiseaux, attelle, fracture, pododermatite

Abstract

The 3D-printing mainstream technology is used in various fields today, including veterinary medicine.

In the present study 3D printing is used to develop three splints for wild and domestic birds. The first one is a J-shaped splint aimed at treating traumatic conditions of birds' hand especially metacarpal bone fractures, by immobilizing the hand. The second one is a leg splint based on modified Schroeder-Thomas splint designed for the treatment of tibiotarsal fractures. The last one is a shoe with a hole on the plantar face of the foot designed for chicken for the treatment of bumblefoot.

The study shows great results for the J-shaped split that was used on two clinical cases, but its effectiveness remains to be demonstrated with various clinical cases. The leg splint that couldn't be used on a full clinical case seems to bring a solid stability to the leg. The shoe for chicken succeeded less well because it didn't bring the ergonomics it was designed for and it needs shape and material improvement before being tested again.

Key-words: 3D-printing, birds, splint, fracture, bumblefoot