

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2021 - Thèse n° 126

***APPLICATION DE LA REALITE AUGMENTEE A UN MODELE
PEDAGOGIQUE D'AUSCULTATION CARDIAQUE :
MODELISATION HOLOGRAPHIQUE DU FONCTIONNEMENT ET
DES AIRES DE PROJECTIONS CARDIAQUES CHEZ LE CHIEN.***

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 16 décembre 2021
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

VIGIÉ Antony

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2021 - Thèse n° 126

***APPLICATION DE LA REALITE AUGMENTEE A UN MODELE
PEDAGOGIQUE D'AUSCULTATION CARDIAQUE :
MODELISATION HOLOGRAPHIQUE DU FONCTIONNEMENT ET
DES AIRES DE PROJECTIONS CARDIAQUES CHEZ LE CHIEN.***

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 16 décembre 2021
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

VIGIÉ Antony

Liste des Enseignants du Campus Vétérinaire de Lyon (01-09-2021)

ABITBOL	Marie	DEPT-BASIC-SCIENCES	Professeur
ALVES-DE-OLIVEIRA	Laurent	DEPT-BASIC-SCIENCES	Maître de conférences
ARCANGIOLI	Marie-Anne	DEPT-ELEVAGE-SPV	Professeur
AYRAL	Florence	DEPT-ELEVAGE-SPV	Maître de conférences
BECKER	Claire	DEPT-ELEVAGE-SPV	Maître de conférences
BELLUCO	Sara	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Maître de conférences
BENAMOU-SMITH	Agnès	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Maître de conférences
BENOIT	Etienne	DEPT-BASIC-SCIENCES	Professeur
BERNY	Philippe	DEPT-BASIC-SCIENCES	Professeur
BONNET-GARIN	Jeanne-Marie	DEPT-BASIC-SCIENCES	Professeur
BOULOCHER	Caroline	DEPT-BASIC-SCIENCES	Maître de conférences
BOURDOISEAU	Gilles	DEPT-ELEVAGE-SPV	Professeur émérite
BOURGOIN	Gilles	DEPT-ELEVAGE-SPV	Maître de conférences
BRUYERE	Pierre	DEPT-BASIC-SCIENCES	Maître de conférences
BUFF	Samuel	DEPT-BASIC-SCIENCES	Professeur
BURONFOSSE	Thierry	DEPT-BASIC-SCIENCES	Professeur
CACHON	Thibaut	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Maître de conférences
CADORÉ	Jean-Luc	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Professeur
CALLAIT-CARDINAL	Marie-Pierre	DEPT-ELEVAGE-SPV	Maître de conférences
CHABANNE	Luc	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Professeur
CHALVET-MONFRAY	Karine	DEPT-BASIC-SCIENCES	Professeur
DE BOYER DES ROCHES	Alice	DEPT-ELEVAGE-SPV	Maître de conférences
DELIGNETTE-MULLER	Marie-Laure	DEPT-BASIC-SCIENCES	Professeur
DJELOUADJI	Zorée	DEPT-ELEVAGE-SPV	Maître de conférences
ESCRIOU	Catherine	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Maître de conférences
FRIKHA	Mohamed-Ridha	DEPT-ELEVAGE-SPV	Maître de conférences
GALIA	Wessam	DEPT-ELEVAGE-SPV	Maître de conférences
GILOT-FROMONT	Emmanuelle	DEPT-ELEVAGE-SPV	Professeur
GONTHIER	Alain	DEPT-ELEVAGE-SPV	Maître de conférences
GRANCHER	Denis	DEPT-BASIC-SCIENCES	Maître de conférences
GREZEL	Delphine	DEPT-BASIC-SCIENCES	Maître de conférences
HUGONNARD	Marine	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Maître de conférences
JUNOT	Stéphane	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Professeur
KODJO	Angeli	DEPT-ELEVAGE-SPV	Professeur
KRAFFT	Emilie	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Maître de conférences
LAABERKI	Maria-Halima	DEPT-ELEVAGE-SPV	Maître de conférences
LAMBERT	Véronique	DEPT-BASIC-SCIENCES	Maître de conférences
LE GRAND	Dominique	DEPT-ELEVAGE-SPV	Professeur
LEBLOND	Agnès	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Professeur
LEDOUX	Dorothée	DEPT-ELEVAGE-SPV	Maître de conférences
LEFEBVRE	Sébastien	DEPT-BASIC-SCIENCES	Maître de conférences
LEFRANC-POHL	Anne-Cécile	DEPT-BASIC-SCIENCES	Maître de conférences
LEGROS	Vincent	DEPT-ELEVAGE-SPV	Maître de conférences
LEPAGE	Olivier	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Professeur
LOUZIER	Vanessa	DEPT-BASIC-SCIENCES	Professeur
MARCHAL	Thierry	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Professeur
MOISSONNIER	Pierre	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Professeur
MOSCA	Marion	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Maître de conférences
MOUNIER	Luc	DEPT-ELEVAGE-SPV	Professeur
PEPIN	Michel	DEPT-BASIC-SCIENCES	Professeur
PIN	Didier	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Professeur
PONCE	Frédérique	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Professeur
PORTIER	Karine	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Professeur
POUZOT-NEVORET	Céline	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Maître de conférences
PROUILLAC	Caroline	DEPT-BASIC-SCIENCES	Professeur
REMY	Denise	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Professeur
RENE MARTELLET	Magalie	DEPT-ELEVAGE-SPV	Maître de conférences
ROGER	Thierry	DEPT-BASIC-SCIENCES	Professeur
SAWAYA	Serge	DEPT-BASIC-SCIENCES	Maître de conférences
SCHRAMME	Michael	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Professeur
SERGENTET	Delphine	DEPT-ELEVAGE-SPV	Professeur
THIEBAULT	Jean-Jacques	DEPT-BASIC-SCIENCES	Maître de conférences
TORTEREAU	Antonin	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Maître de conférences
VIGUIER	Eric	DEPT-AC-LOISIR-SPORT	Professeur
ZENNER	Lionel	DEPT-ELEVAGE-SPV	Professeur

Remerciements

Aux membres de mon jury,

À Monsieur le Professeur Marc GUÉNOT, Professeur en neurochirurgie de l'Université Claude Bernard Lyon 1, Faculté de médecine de Lyon, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse, sincères remerciements.

À Madame la Professeure Caroline PROUILLAC, Professeure en pharmacie et toxicologie à VetAgro Sup, Campus vétérinaire de Lyon, pour vos conseils, votre réactivité, vos idées et votre aide à la réalisation de cette thèse en tant que première assesseuse, sincères remerciements.

À Madame la Professeure Jeanne-Marie BONNET-GARIN, Professeure en physiologie, pharmacologie et thérapeutique à VetAgro Sup, Campus vétérinaire de Lyon, pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse, sincères remerciements.

À Monsieur le Professeur Claude CAROZZO, votre disparition nous a laissé à tous un sentiment d'injustice et de tristesse profond, pour votre travail et votre soutien au commencement de cette thèse, sincères remerciements.

TABLE DES MATIÈRES

Table des annexes.....	13
Table des figures.....	13
Table des tableaux.....	14
Liste des abréviations.....	14
Introduction :	15
<u>Première partie : L'auscultation cardiaque</u>	17
I/ L'auscultation	19
A) Le stéthoscope	19
1) Histoire du stéthoscope	19
2) Mode de fonctionnement	21
3) Les différents stéthoscopes.....	22
B) Le son	24
1) La perception du son.....	24
2) Propagation du son	25
C) L'auscultation en médecine vétérinaire	26
1) La notion de rythme cardiaque	26
2) Les aires de projections cardiaques chez le chien	27
II/ Le muscle cardiaque du chien	28
A) Anatomie et physiologie du cœur de chien.....	28
1) Rappel anatomique	28
2) Physiologie de la pompe cardiaque	30
3) Les valvules cardiaques	31
B) Les bruits cardiaques	33
1) Les bruits physiologiques	33
2) Les bruits surajoutés	34
3) Les souffles cardiaques	35
4) Caractérisation des souffles cardiaques.....	36
C) Les maladies cardiaques auscultables chez le chien.....	38
1) Les maladies valvulaires dégénératives	38
2) La cardiomyopathie dilatée.....	39

3) Les maladies cardiaques congénitales	40
III/ Apprentissage de l'auscultation à VetAgro Sup	41
A) Intérêt de maîtriser l'auscultation cardiaque	41
1) Au CHUV	41
2) En clinique privée	42
B) Méthode d'apprentissage actuel	43
1) Cours d'anatomie et de physiologie cardiaque.....	43
2) En stage	44
3) Au CHUV	45
C) Méthodes d'évaluations	47
1) Partiels.....	47
2) Évaluation en clinique	48
3) Pistes d'amélioration.....	49
<u>Deuxième partie : Les nouvelles technologies au service de l'auscultation</u> <u>cardiaque 2.0.....</u>	<u>51</u>
I/ Acquisition d'images numériques	53
A) L'imagerie par résonance magnétique	53
1) Un peu d'histoire.....	53
2) Mode de fonctionnement	54
3) Acquisition des images.....	55
B) L'IRM Cardiaque.....	57
1) Principes	57
2) Les différentes coupes	58
3) Pondération fiesta.....	59
C) Fabrication d'image numérique en 3D	60
1) 3D numérique.....	61
2) Segmentation IRM.....	63
3) Modélisation et animation.....	65
II/ La réalité augmentée.....	66
A) Définition et explications	66
1) De la réalité à la réalité virtuelle	66
2) Présentation de la réalité augmentée.....	67
3) Explication de la réalité augmentée.....	68

B) Les HoloLens	69
1) Présentation et mode de fonctionnement	69
2) Utilisation	71
3) Intérêts pédagogiques.....	72
III/ L'application Cysart et le modèle pédagogique :	74
A) Développement.....	74
1) Concept de base	74
2) Mise en place et positionnement des mains dans l'espace.....	75
3) Modèle utilisé.....	77
B) Fonctionnement.....	78
1) Prise en main	78
2) Utilisation du modèle	79
3) Fonctionnalités à développer	80
C) Utilité pour les étudiants	81
1) Découverte de la réalité augmentée et prise en main des HoloLens 2	81
2) S'entraîner et revoir l'auscultation cardiaque	82
3) Limite du modèle et amélioration prévue	82
Conclusion générale :	85
Bibliographie :	87
Annexes :	91

Table des annexes

Annexe 1 - Fiche de stage infirmier. Source : www.vetagrotice.vetagro-sup.fr	91
Annexe 2 - Fiche de demande d'anesthésie. Source : CHUV VetAgro Sup.	93

Table des figures

Figure 1. Conception originelle du stéthoscope de Laënnec et photo du premier construit. Source : Harbison 2017	20
Figure 2. Stéthoscope de Cammann 1901 (gauche) et stéthoscope Littmann (droite) Source : (Renner 2013) et www.distrimed.com	21
Figure 3. Aires d'auscultations cardiaques chez le chien au niveau de l'hémithorax gauche (gauche) et de l'hémithorax droit (droite). Source : Bruyette 2020	27
Figure 4. Schéma de la conformation externe du cœur d'un chien, vues gauche (face auriculaire) et droite (face atriale) Source : S.SAWAYA ENVL	29
Figure 5. Schéma du cycle cardiaque Source : Jean-Baptiste Dugast	31
Figure 6. Mode de fonctionnement normal de la valve mitrale en systole (gauche) et en diastole (droite) Source : Richards et al. 2012	32
Figure 7. Schéma de la position des différents bruits cardiaques lors d'un cycle complet Source : Antony VIGIÉ	34
Figure 8. Exemple de question sur l'auscultation cardiaque. Source : Partiel d'équine.	47
Figure 9. Schéma de modification de la fréquence de Larmor des atomes d'hydrogènes dans un gradient de champ magnétique. Source : Yousaf, Dervenoulas, Politis 2018	56
Figure 10. Coupe grand axe 4 cavités (A) et coupe petit axe (B) d'IRM cardiaque. Source : d'après Russo et al 2020	59
Figure 11. Exemple d'image IRM de cerveau en pondération T1 (A), T2 (B) et d'image IRM cardiaque en pondération FIESTA (C). Source : d'après HawkCell et www.info-radiologie.ch	60
Figure 12. Reconstruction de cœur au format STL avec le logiciel Blender. Un zoom est effectué pour mettre en évidence l'ensemble des triangles qui composent la structure. Source : Antony VIGIÉ	62
Figure 13. Reconstruction 3D de cœur de chien en vue latérale + 30° dans le sens horaire (gauche) et - 30° (droite) à partir d'image IRM. Source : Antony VIGIÉ	64

Figure 14. Coupe sagittale d'un cœur humain reconstitué informatiquement. Source : Application INSIGHT HEARTH.	65
Figure 15. Base de la réalité augmentée. Source : Havard 2018.....	69
Figure 16. Exemple d'augmentation par les HoloLens 2. Source : Antony VIGIÉ.....	70
Figure 17. Exemple de tenu du stéthoscope avec rayon émanant. Source : Antony VIGIÉ.....	76
Figure 18. Exemple de « mapping » informatique pour la reconnaissance de la main par les HoloLens 2. Source : Antony VIGIÉ.....	76
Figure 19. Geste pour ouvrir le menu démarrer dans HoloLens 2. Source : Antony VIGIÉ.....	78

Table des tableaux

Tableau 1 : Mesures en dB des modifications d'amplitude, d'intensité ou de puissance sonore. Source : Ghio 2007.	24
Tableau 2 : Classification de l'intensité des souffles cardiaques Source : Bruyette 2020.....	37

Liste des abréviations

3D : 3 dimensions
 CHUV : centre hospitalier universitaire vétérinaire
 dB : décibel
 ECG : électrocardiogramme
 FOV : field-of-view, champ de vue
 Hz : Hertz
 IRM : imagerie par résonance magnétique
 m/s : mètres par seconde
 ms : millisecondes
 NAC : nouveaux animaux de compagnie
 OBJ : Objet 3D
 Pa : pascal
 PIM : point d'intensité maximale
 RA : Réalité augmentée
 RMN : résonance magnétique nucléaire.
 RV : réalité virtuelle
 STL : stéréolithographie
 T : tesla
 TE : temps d'écho.
 TR : temps de répétition.
 TRC : temps de remplissage capillaire

Introduction :

Depuis des centaines d'années l'étude des bruits du corps humain et animal au travers de l'auscultation a été utilisée pour aider les soignants à établir un diagnostic. Il y a plus de 200 ans un médecin français, René Laennec, inventa le stéthoscope pour écouter les bruits cardiaques et pulmonaires avec une plus grande précision. Cela lui permit de découvrir et de décrire de nombreuses maladies qui sont toujours d'actualité. Après plusieurs modifications et améliorations, le stéthoscope moderne est né il y a 60 ans. De nos jours, il est un dispositif médical indispensable, c'est d'ailleurs un symbole universel de la médecine. L'auscultation cardiaque est une étape primordiale de l'examen clinique rendant son utilisation systématique. Elle permet de déceler des problèmes fonctionnels et/ou anatomiques avant même l'apparition de signes cliniques. La maîtrise de son utilisation implique de bonnes connaissances théoriques et pratiques. La formation théorique de l'auscultation cardiaque du chien à VetAgro Sup permet aux étudiants d'acquérir une bonne base avant leur entrée en clinique mais il reste nécessaire de l'appuyer par des entraînements pratiques au même titre que d'autres actes vétérinaires qui bénéficient maintenant de modèles de simulation.

La réalité augmentée est une technologie émergente de la fin du 20^{ème} siècle. Elle permet d'ajouter des éléments virtuels au monde réel. En plein essor depuis une dizaine d'année, cette technologie trouve une multitude d'applications dans l'industrie, la médecine ou même l'éducation. Avec l'aide d'Abys Medical (startup deeptech basé à La Rochelle en France, spécialisée dans la création d'application d'aide à la chirurgie humaine et vétérinaire) et de HawckCell (société d'imagerie par IRM basé sur le campus vétérinaire de VetAgro Sup), ce travail de thèse a pour but de créer un modèle pédagogique alliant l'auscultation et la réalité augmentée afin d'aider les étudiants à s'exercer en salle de simulation. Grâce à l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et l'utilisation de lunettes immersives (les HoloLens 2), nous avons pu mettre en place une application permettant de voir sur un mannequin à l'échelle 1/1 la projection de la zone auscultée sur une silhouette cardiaque de chien en hologramme. Elle permettra aux étudiants de s'entraîner à réaliser une auscultation cardiaque et à retrouver les aires de projections cardiaques sur le mannequin avant de réaliser leur première auscultation sur animal vivant.

En première partie, nous présenterons dans un premier temps l'auscultation avec un rappel sur les stéthoscopes, le son et ses spécificités en médecine vétérinaire. Nous verrons ensuite le muscle cardiaque du chien, ses différents bruits auscultables et les principales maladies cardiaques associées. Nous finirons cette partie en présentant les intérêts d'une bonne maîtrise de l'auscultation, les méthodes d'apprentissages et d'évaluations qui sont actuellement utilisées à VetAgro Sup.

En deuxième partie nous expliquerons la méthode utilisée pour la création des hologrammes grâce à l'imagerie médicale par résonance et plus particulièrement l'IRM cardiaque. Nous présenterons ensuite la réalité augmentée, les lunettes immersives et leur intérêt pédagogique. Nous finirons ce travail par la présentation détaillée du modèle pédagogique au travers de son développement, son fonctionnement et l'intérêt qu'il peut apporter aux étudiants.

Première partie : **L'auscultation cardiaque**

I/ L'auscultation

Dans cette partie, nous allons découvrir le stéthoscope au travers de son histoire, son mode de fonctionnement et les différents stéthoscopes qui existent. Nous verrons ensuite le son, sa perception et sa propagation pour finir par l'auscultation cardiaque en médecine vétérinaire avec la notion de rythme cardiaque et des aires de projections chez le chien.

A) Le stéthoscope

1) Histoire du stéthoscope

Un stéthoscope est un dispositif médical utilisé lors d'auscultation de différents organes. Son étymologie vient de la contraction des mots grecs *sthetos* et *skopein* qui signifient poitrine et exploration respectivement. Il a été inventé en 1816 par René Théophile Hyacinthe Laënnec, un jeune médecin français de 35 ans. À cette époque, l'auscultation cardiaque était pratiquée en collant une oreille contre la poitrine du patient ou en apposant simplement une main en regard du cœur. D'après ses propres mots, il inventa le stéthoscope lors d'une consultation d'une jeune femme. L'état d'embonpoint et l'âge de la patiente rendit Laënnec réticent à pratiquer une auscultation de manière classique. Il se rappela un principe physique assez simple ; certains matériaux conduisent les sons et peuvent même les amplifier. Il prit un feuillet sur son bureau, en forma un rouleau, colla une extrémité sur la poitrine de la patiente et l'autre extrémité sur son oreille. Il se rendit compte alors qu'il pouvait entendre les bruits cardiaques avec beaucoup plus de discernement (Laennec 1819). Le premier stéthoscope était né (Figure 1).

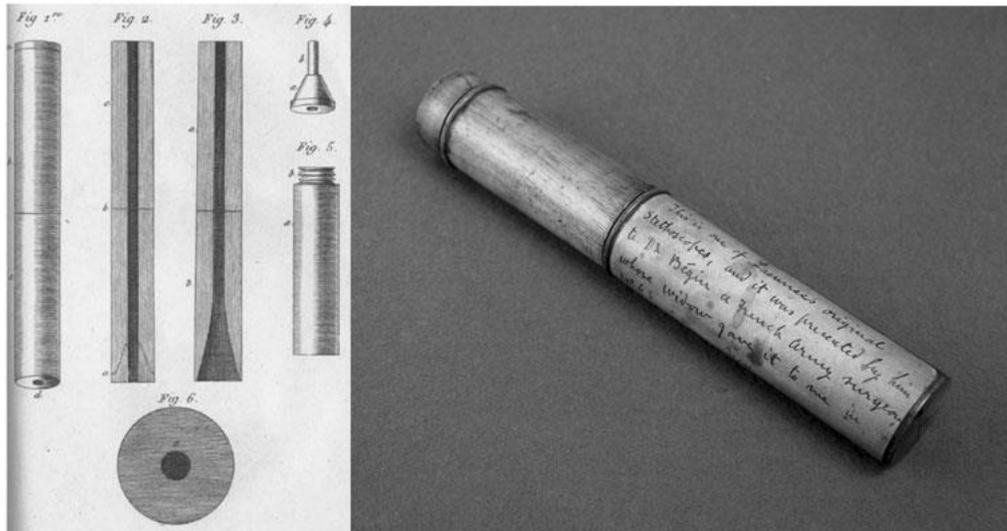


Figure 1. Conception originelle du stéthoscope de Laënnec et photo du premier construit.
Source :Harbison 2017

Ce nouvel instrument lui permit d'améliorer considérablement ses examens cliniques en décrivant avec précision de nombreuses maladies pulmonaires comme la bronchiectasie, la pneumonie ou la pleurésie. Certains termes sont d'ailleurs encore utilisés de nos jours (Roguin 2006). Depuis 1816, le stéthoscope a subi plusieurs évolutions le rendant de plus en plus performant et confortable mais le principe physique que Laënnec mis en évidence reste toujours le même.

Le premier changement majeur est la création d'un stéthoscope biauriculaire seulement 10 ans après l'invention de Laennec. Il faut cependant attendre 1855 et le stéthoscope de Georges Cammann (Figure 2) pour voir apparaître une démocratisation de cet ustensile. Il est formé d'une cloche en ébène, de deux branches en ivoire avec embout pénétrant et d'un tube souple reliant le tout. Un élastique vient se prendre sur les 2 branches pour permettre un ajustement automatique sur les oreilles du praticien et ainsi lui libérer les mains. On remarque que même si ce stéthoscope a plus de 160 ans, on retrouve de très nombreuses similitudes avec nos stéthoscopes modernes (Figure 2). Au fil des années, plusieurs médecins et mêmes des vétérinaires comme le Dr Chauveau ont tour à tour proposé différents prototypes avec plus au moins de succès.

En 1901, l'ingénieur Robert C. M. Bowles obtient un brevet pour l'invention d'un pavillon de stéthoscope avec diaphragme vibrant qui sera utilisé pendant près de 60 ans. Finalement, c'est David Littmann qui créa le stéthoscope moderne en 1961. Il se compose d'un tube en plastique tygon

et d'un double pavillon en acier. On retrouve d'un côté le diaphragme vibrant de Bowles et de l'autre une cloche pour les sons graves (Figure 2).



Figure 2. Stéthoscope de Cammann 1901 (gauche) et stéthoscope Littmann (droite)
Source : (Renner 2013) et www.distrimed.com

2) Mode de fonctionnement

Le principe du stéthoscope est de transmettre les sons produits par le corps jusqu'aux oreilles du praticien. Pour cela, il va effectuer une continuité entre la paroi extérieure du patient et les tympanes de l'auscultant. Il se compose d'un pavillon avec un diaphragme qui est une couche de plastique dur très fine. Lorsqu'une onde sonore va venir taper le diaphragme, celui-ci va vibrer et retransmettre cette onde. A l'arrière de ce diaphragme on retrouve une chambre acoustique. Cet espace fait effet de caisse de résonance afin d'amplifier les sons perçus. Le son est ensuite transmis sur une faible distance dans un faible volume au travers d'une tubulure. Cela a pour effet de conserver le plus d'informations possibles. La dernière partie du stéthoscope est constituée de la Lyre, elle-même en 3 parties, le ressort,

les tubes auriculaires et les embouts auriculaires. Le ressort permet un maintien des embouts auriculaires en place. Il est le plus souvent invisible de l'extérieur car caché dans le Y de la tubulure. Les tubes sont en métal creux pour jouer le même rôle que la tubulure et permettre un meilleur maintien au niveau des oreilles en rigidifiant l'ensemble de l'appareil. Pour finir, les embouts auriculaires ont une double fonction, ils servent à la fois pour le maintien au niveau du conduit auditif et d'isolant aux bruits extérieurs. L'isolation des bruits extérieurs permet au praticien de se concentrer uniquement sur les bruits provenant du pavillon. Certains stéthoscopes sont équipés d'un double pavillon, avec d'un côté le diaphragme présenté ci-dessus et de l'autre une cloche. Cela permet d'augmenter la plage de fréquence sonore auscultable. Le diaphragme est plus sensible au son de haute fréquence, les bruits aigus pulmonaires par exemple. Alors que la cloche permet de capter et de transmettre plus efficacement les sons de basses fréquences, comme les sons graves du cœur. De nos jours, on retrouve une multitude de stéthoscopes, du simple à l'électronique, ils ont chacun leur utilité.

3) Les différents stéthoscopes

Le stéthoscope le plus connu des étudiants vétérinaires est le stéthoscope à double pavillon de Littmann. En effet, c'est celui qui leur est offert par l'ordre national des vétérinaires (jusqu'en 2018) à l'occasion de leur premier jour à l'école, de plus c'est le stéthoscope le plus polyvalent. Il est léger, résistant et suffisant dans la plupart des situations. Il existe également des stéthoscopes à doubles tubulures ce qui permet de séparer physiquement le son transmis dans chaque oreille. On gagne légèrement en précision au détriment du poids et de l'encombrement. Des stéthoscopes spécialisés pour certaines disciplines sont également commercialisés tels que les stéthoscopes cardiologiques ou pédiatriques. Chacun a ses modifications, un pavillon plus petit, une cloche plus profonde, pour s'adapter au mieux aux situations que le praticien est amené à rencontrer. Par exemple en médecine vétérinaire pour les nouveaux animaux de compagnie (NAC), il est indispensable d'avoir un stéthoscope adapté. En effet, bon nombre des patients rencontrés vont avoir un muscle cardiaque plus petit que le pavillon d'un stéthoscope classique rendant impossible la

bonne caractérisation des bruits entendus. Une des dernières avancées technologiques utilisée pour l'auscultation est le stéthoscope électronique. Ils sont de 2 catégories, les stéthoscopes électroniques à microphone et ceux à capteur piézoélectrique. La plus grosse problématique de l'auscultation est le faible volume sonore émis, en particulier en médecine vétérinaire lors d'auscultation d'animaux à thorax très profond. Le stéthoscope électronique pallie ce problème en amplifiant les sons. Celui à microphone fonctionne comme un stéthoscope classique à la différence de la chambre de résonance qui est remplacée par un microphone pour capter les sons, les traduit en signaux électriques et les transmet à des écouteurs directement placés dans le conduit auditif. Cela permet d'amplifier les sons mais sans distinctions, on peut alors se retrouver avec une multitude de sons parasites amplifiés comme le crissement des poils sous le diaphragme, ce qui peut être délétère à l'auscultation. Un capteur piézoélectrique quant à lui fonctionne par déformation d'une couche d'un matériel piézoélectrique. On utilise généralement le quartz qui est un cristal commun. Sous l'effet d'une contrainte, il va naturellement se polariser électriquement. Dans le cas d'un stéthoscope, ce sont les vibrations sonores qui vont déformer la couche de quartz, qui va à son tour se polariser et émettre un signal électrique. Ce signal électrique est ensuite transformé informatiquement et retransmis au niveau d'écouteurs auriculaires. Cette méthode permet d'atténuer les sons parasites mais change également la tonalité exacte des bruits entendus. De nos jours, la plupart des stéthoscopes électroniques sont couplés à des logiciels informatiques qui permettent de lisser, supprimer, augmenter certains signaux pour avoir un rendu très proche de la réalité et sans sons parasites. Certains peuvent également se connecter à un smartphone ou un ordinateur pour enregistrer une auscultation afin de pouvoir retravailler dessus plus tard ou de la partager avec un confrère (Leng et al. 2015).

B) Le son

1) La perception du son

Le son perçu par l'oreille humaine est un ensemble d'ondes acoustiques propagées dans un milieu qui est généralement l'air. Sous l'effet d'une excitation mécanique, les molécules d'air reçoivent une impulsion qui les met en mouvement dans une direction. Elles avancent dans cette direction jusqu'à rencontrer d'autres molécules qu'elles poussent devant elles, formant ainsi une zone de compression. Ces molécules vont alors à leur tour être mises en mouvement et propager ainsi l'onde de proche en proche. Ainsi un son peut se propager dans différents milieux à une vitesse différente en fonction de celui-ci. On estime la vitesse d'une onde sonore à environ 350 mètres par seconde (m/s) dans l'air, à 1450 m/s dans l'eau et à 3500 m/s dans le tissu osseux (Ghio 2007). L'onde qui se propage est formée par l'alternance de compression/dépression des molécules dans un milieu donné, elle s'apparente donc à une onde sinusoïdale sur laquelle on peut mesurer une période et une amplitude. Une

période correspond à un cycle complet de l'onde, en acoustique on parle alors de fréquence, qui correspond à un nombre de cycles par seconde et qui est mesuré en Hertz (Hz). L'oreille

*Tableau 1 : Mesures en dB des modifications d'amplitude, d'intensité ou de puissance sonore.
Source : Ghio 2007.*

Amplitude	Intensité ou Puissance	dB
Multipliée par 1.41	Double	+3 dB
Double	Quadruple	+6 dB
Multipliée par 3.16	Décuple	+10 dB
Décuple	Centuple	+20 dB

Amplitude	Intensité ou Puissance	dB
Divisée par 1.41	Divisée par 2	-3dB
Divisée par 2	Divisée par 4	- 6dB
Divisée par 3.16	Divisée par 10	-10 dB
Divisée par 10	Divisée par 100	-20 dB

humaine est sensible aux sons dont la fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 000 Hz. Les fréquences inférieures à 20 Hz sont appelées infrasons et les fréquences supérieures à 20 000 Hz sont appelées ultrasons. La deuxième mesure que l'on peut effectuer sur une onde est son amplitude. Elle correspond à l'ampleur de la vibration et correspond à une pression acoustique mesurée en Pascal (Pa). Cette unité ne correspondant pas à une grandeur physique palpable pour la plupart des êtres humains, les physiciens ont décidé de mesurer la puissance d'un son en décibels (dB). Nous laisserons de côté l'ensemble des calculs mathématiques et des

conversions physiques qui lient la relation entre l'amplitude d'un son en Pa et l'amplitude sonore en dB pour se concentrer sur ce que cela signifie concrètement. Il existe une relation logarithmique entre l'intensité d'un son et son niveau en dB. Ainsi on peut se rendre compte qu'une modification même infime en dB donne lieu à de grosses modifications en termes d'intensité ou de puissance perçue d'un son (Tableau 1). Le dB s'est démocratisé car c'est ce qui se rapproche le plus de la perception que nous nous faisons du son. Pour donner un ordre de grandeur, un bruissement de feuille aura une amplitude de 0,0002 Pa et de 20 dB alors qu'une conversation normale aura une amplitude de 0,02 Pa et de 60 dB. Ces différences sont encore plus frappantes lors de petits écarts « Si le niveau vocal d'un locuteur baisse de trois décibels, l'auditeur s'en apercevra pendant la seconde qui suit l'atténuation, mais si le locuteur s'en va et revient le lendemain avec une baisse de trois ou même de cinq décibels, l'auditeur ne s'en apercevra pas. Or, diminuer de six décibels, c'est déjà diviser par quatre la puissance sonore. » (Ghio 2007).

2) Propagation du son

Les ondes sonores ont des vitesses de conceptions et un comportement différent en fonction des milieux dans lequel elles se trouvent. Elles se propagent et conservent leur intensité différemment en fonction du milieu dans lesquelles elles se trouvent, dans un gaz, un solide ou un liquide. C'est pour cela que nous percevons beaucoup plus les basses (ondes musicales de basses fréquences) par rapport aux aiguës (ondes sonores de hautes fréquences) sous l'eau qu'à l'air libre. Un autre élément à prendre en compte dans le cas de l'auscultation est le phénomène de diffraction des ondes au changement de milieu, on retrouve le même phénomène physique pour les ondes sonores que les ondes lumineuses. À chaque changement de milieu, une partie des ondes va être transmise mais une autre partie va rebondir, être diffractée ou absorbée par le milieu. Si l'on simplifie et schématise un cœur de chien dans sa cage thoracique, on se rend compte que le son du battement cardiaque traverse de nombreux milieux différents avant d'arriver dans le milieu extérieur. On comprend donc que sans un stéthoscope il est très difficile de capter les ondes sonores produites par le cœur. En s'éloignant de l'endroit où le son est produit on

perd en intensité. Certains bruits cardiaques ont une intensité très faible comme les souffles cardiaques. Si on appose le stéthoscope trop loin de la zone de production de ces bruits ils peuvent devenir inaudibles par manque d'intensité.

C) L'auscultation en médecine vétérinaire

1) La notion de rythme cardiaque

L'auscultation chez le chien est un moment primordial lors de l'examen clinique. En effet, elle est généralement pratiquée en début d'examen et elle conduit à un moment privilégié avec l'animal. Bon nombre de chiens appréhendent le fait d'être touchés par un objet qu'ils n'ont jamais ou quasiment jamais vu. Ils sont généralement assez peu désensibilisés aux contacts physiques sur le bas des côtes ou sous l'épaule. Le vétérinaire doit dans certains cas différer son auscultation le temps de gagner la confiance de l'animal. De plus, le chien refroidit son corps en haletant et ce mécanisme peut s'avérer très gênant lors de l'auscultation. En effet, en augmentant sa fréquence respiratoire et en respirant gueule ouverte, le chien peut refroidir son corps efficacement. Cependant, au niveau thoracique qui fait office de caisse de résonance, cela a pour effet de démultiplier les bruits respiratoires qui viennent couvrir les bruits cardiaques rendant impossible une bonne auscultation. L'auscultation a pour but de renseigner le vétérinaire sur l'état du cœur de l'animal au travers du rythme et des bruits cardiaques. On peut donc dans un premier temps juger de l'état et de la fréquence du rythme cardiaque en apposant simplement le stéthoscope en regard de la silhouette cardiaque au niveau thoracique à gauche. On peut donc facilement calculer le rythme cardiaque en comptant le nombre de battements sur un temps défini. Cela permet de vérifier que le chien n'est pas en bradycardie ou en tachycardie. On peut également vérifier la bonne cyclicité des différents bruits cardiaques.

2) Les aires de projections cardiaques chez le chien

Dans un deuxième temps, on peut aller plus loin dans l'auscultation en écoutant les bruits cardiaques au niveau de zones précises. Chez le chien, il existe quatre aires d'auscultations cardiaques précises, qui correspondent à la projection des 4 valves cardiaques au niveau de la paroi thoracique.

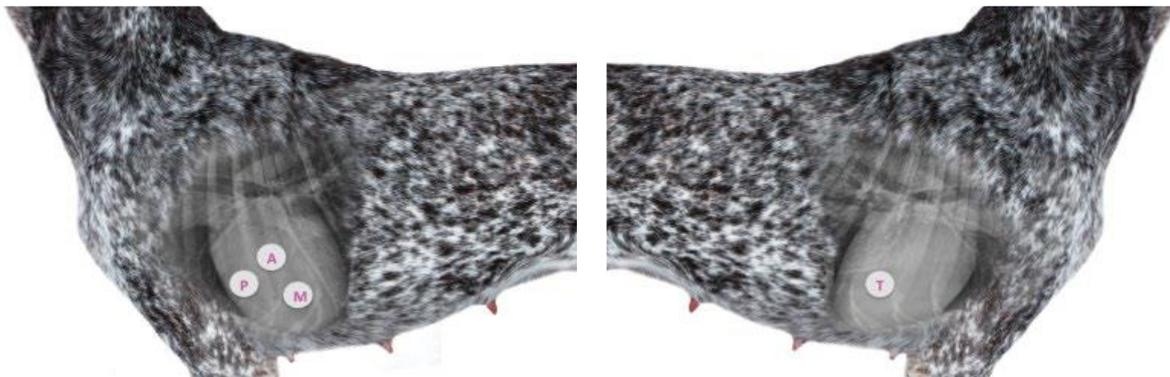


Figure 3. Aires d'auscultations cardiaques chez le chien au niveau de l'hémithorax gauche (gauche) et de l'hémithorax droit (droite). Source : Bruyette 2020

On retrouve sur la Figure 3 à gauche, l'aire d'auscultation correspondante à la valve aortique (A), au niveau du 4^{ème} espace intercostal au milieu de la cage thoracique. Toujours à gauche, au niveau du 3^{ème} espace intercostal juste au-dessus du sternum c'est l'aire d'auscultation de la valve pulmonaire (P). Ces 2 aires correspondent à la base du cœur. Pour finir à gauche, on trouve l'aire d'auscultation de la valve mitrale (M) au niveau du 5^{ème} espace intercostal légèrement au-dessus de la jonction costochondrale, cette zone est en regard du choc précordial et correspond à l'apex du cœur. À droite entre le 3^{ème} et 5^{ème} espace intercostal au niveau de la jonction costochondrale il y a l'aire d'auscultation de la valve tricuspide (T) qui forme la pointe du cœur. L'auscultation cardiaque ne se limite pas uniquement à ces zones, mais nous verrons par la suite qu'il est important de bien avoir ces aires en tête. Par exemple, un souffle cardiaque qui aurait une intensité maximale au niveau de l'aire M peut nous orienter vers un problème de la valvule mitrale.

II/ Le muscle cardiaque du chien

Dans cette partie nous verrons l'anatomie et la physiologie cardiaque du chien en effectuant un rappel sur son anatomie, sa physiologie et le mode de fonctionnement des valvules cardiaques. Nous parlerons ensuite des bruits cardiaques, les bruits physiologiques et les bruits surajoutés en développant l'exemple des souffles cardiaques. Pour finir nous ferons un rapide rappel des principales maladies à l'origine de souffle cardiaque chez le chien.

A) Anatomie et physiologie du cœur de chien

1) Rappel anatomique

Le cœur est un muscle strié creux situé au niveau du thorax dans le médiastin moyen. Il est enveloppé par le péricarde qui joue principalement le rôle de lubrifiant en emprisonnant un transsudat autour du cœur. Comme tous les muscles fonctionnant en aérobose, il est de couleur rouge à rouge-brun. Il a une forme de cône aplati à base dorsale et à pointe ventrale. Chez le chien il fait en moyenne 0,75 % du poids du corps. L'aplatissement du thorax latéro-latéralement entraîne une rotation du cœur dans le sens anti-horaire, le cœur droit se retrouve en position crâniale et le cœur gauche en position caudale. Chez l'homme l'aplatissement dorso-ventral laisse le cœur en place, le cœur droit est à droite et le cœur gauche est à gauche. C'est pour cela que l'auscultation cardiaque se fait sur le côté du thorax chez le chien et non pas sur la face ventrale comme chez l'Homme. On retrouve également un léger dimorphisme sexuel, le cœur des mâles est en général légèrement plus gros que celui des femelles. En position physiologique, il est emprisonné entre les poumons latéralement, par le sternum ventralement et par la trachée dorsalement. Son aire se projette en général entre la 3^{ème} et la 6^{ème} côte et sur la moitié inférieure du thorax. Vu de profil, le grand axe du cœur est oblique, il forme avec le sternum un angle de 30 à 40°. Cette inclinaison et la taille de la zone en contact avec le sternum varient en fonction de la race. Chez les races brévilignes l'angle est plus fermé, le cœur est plus large et arrondi, la zone de contact avec le

sternum est grande. À l'inverse chez les chiens de type longiligne, le cœur est redressé avec un axe plus ouvert et un contact avec le sternum plus faible. Il est divisé en quatre compartiments. La division principale coupe le cœur en deux, le cœur gauche et le cœur droit. Cette séparation est due à une cloison imperméable chez l'adulte, le septum. Ensuite, chaque partie du cœur est également séparée en deux cavités communicantes, l'atrium recevant le sang des veines et le ventricule qui renvoie le sang dans les artères. Depuis l'extérieur on voit une division inégale au niveau du sillon coronaire, un sillon transversal faisant le pourtour du cœur. Dorsalement à cette limite, on retrouve la base du cœur formée par les masses des atriums et des gros vaisseaux qui font environ 1/5^{ème} de l'ensemble et ventralement on a la masse ventriculaire qui représente les 4/5^{ème} restant dont l'apex qui correspond au tiers distal du ventricule gauche. Les atriums ont une forme de croissant dont la pointe entoure la racine des gros troncs artériels. C'est au niveau de ces pointes que se trouvent les auricules, l'auricule gauche et l'auricule droite respectivement. Perpendiculairement au sinus coronaire partent le sillon inter-ventriculaire paraconal sur la face gauche et le sillon inter-ventriculaire sous-sinusal sur la face droite, qui séparent les deux ventricules (Figure 4).

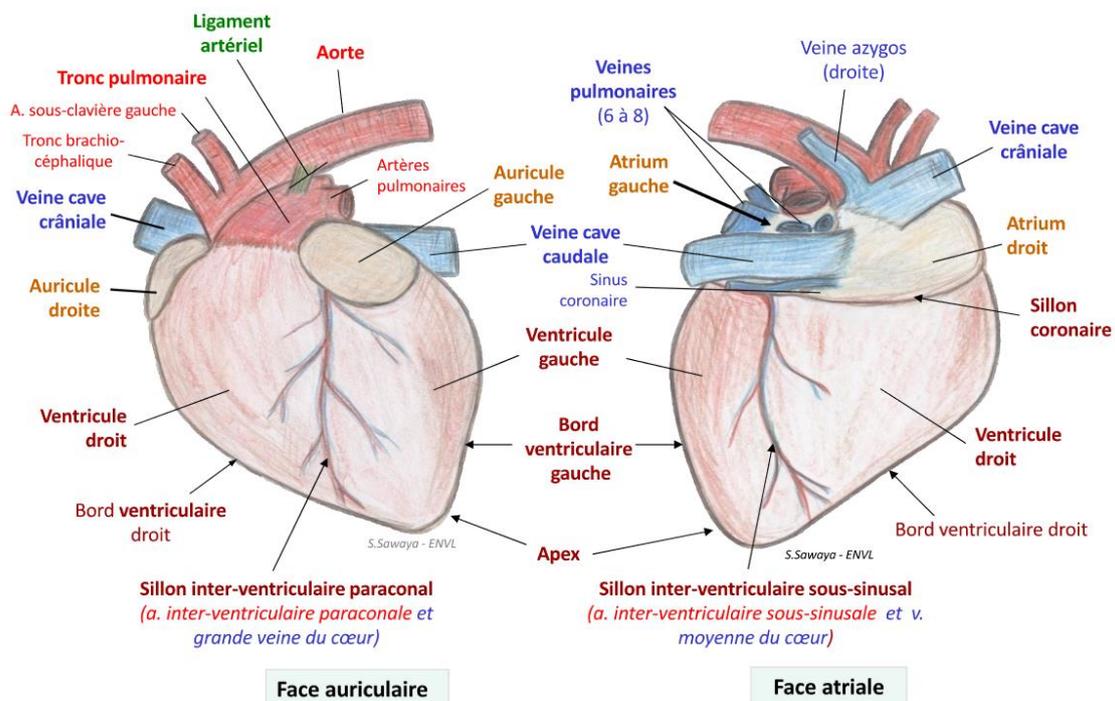


Figure 4. Schéma de la conformation externe du cœur d'un chien, vues gauche (face auriculaire) et droite (face atriale) Source : S.SAWAYA ENVL

2) Physiologie de la pompe cardiaque

C'est l'organe principal de la circulation sanguine. Le cœur droit permet de mettre en mouvement le sang désoxygéné provenant de l'ensemble des organes (sauf des poumons) vers les poumons où il sera réoxygéné. Le cœur gauche quant à lui permet d'amener le sang oxygéné des poumons vers l'ensemble des autres organes. Le cycle cardiaque (Figure 5) se découpe en deux parties, la systole et la diastole. En partant du cœur rempli de sang, la première partie est la systole ventriculaire qui se découpe en deux phases. La première phase est une contraction isovolumétrique. Les cellules myocardiques se contractent mais le volume au sein des ventricules ne change pas car les valves sigmoïdes sont encore fermées et les valves auriculo-ventriculaires se ferment. Cela a pour effet de faire augmenter la pression dans le ventricule jusqu'à un point de bascule. Lorsque celui-ci est atteint, c'est-à-dire quand la pression sanguine au sein des ventricules devient égale à la pression sanguine des artères cardiaques, les valves sigmoïdes s'ouvrent. C'est le début de la deuxième phase, l'éjection systolique qui correspond à l'éjection du sang dans l'aorte et dans l'artère pulmonaire. À la fin de cette phase, la deuxième partie du cycle qui est la diastole débute. Sa première phase commence par une relaxation isovolumétrique par relâchement des cellules myocardiques. La pression interventriculaire devient inférieure à la pression artérielle, les valves sigmoïdes se referment empêchant le sang artériel de revenir dans les ventricules. On a ensuite le remplissage rapide, quand la pression ventriculaire devient inférieure à la pression dans les oreillettes, les valves auriculo-ventriculaires s'ouvrent et le sang afflue dans les ventricules. Cette étape permet de remplir passivement les ventricules à environ 70%. S'en suit la phase de remplissage lent, qui correspond à l'égalisation de pression entre les oreillettes et les ventricules. Cette étape permet surtout un meilleur remplissage des oreillettes avant la dernière étape. La diastole se termine par la contraction des oreillettes qui finissent de remplir les ventricules avant de repartir sur un cycle cardiaque complet. Le bon fonctionnement du cycle cardiaque est possible en grande partie par l'alternance de contraction-relaxation des cellules du myocarde synchronisé et aussi par les différentes valves qui empêchent le sang d'aller dans le mauvais sens.

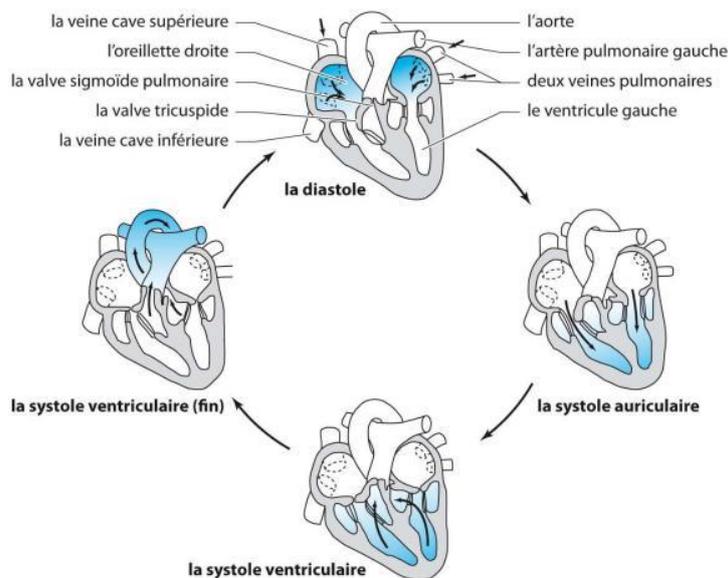


Figure 5. Schéma du cycle cardiaque

Source : Jean-Baptiste Dugast

3) Les valvules cardiaques

Pour que le sang puisse aller toujours dans un seul sens, le cœur possède un système anti-retour, les valvules. On en retrouve deux entre les vaisseaux et les ventricules à savoir la valvule sigmoïde pulmonaire entre le ventricule droit et l'artère pulmonaire, et la valvule sigmoïde aortique entre le cœur gauche et l'aorte. On en retrouve également deux entre les atriums et les ventricules appelées valvules auriculo-ventriculaire droite et gauche respectivement. La valvule auriculo-ventriculaire droite est également appelée valve tricuspide et la gauche est appelée valve mitrale. L'étanchéité est faite par la forme et le mode de fonctionnement des valves. Afin d'expliquer un peu plus précisément ce mode de fonctionnement, nous allons prendre l'exemple de la valve tricuspide. Cette valve a plusieurs rôles : s'ouvrir et laisser passer le sang de l'oreillette gauche au ventricule gauche au bon moment ; se fermer hermétiquement pendant la systole pour empêcher un flux sanguin à contre-courant du ventricule vers l'atrium ; permettre au sang de sortir rapidement et à forte pression au niveau de l'aorte lors de la systole. Son mode de fonctionnement a été décrit comme uniquement passif durant des décennies mais cela est remis en cause depuis plusieurs années (Williams, Jew 2004). L'ensemble de ces rôles est permis par le bon fonctionnement des éléments qui la composent, l'atrium gauche, les lames de la valve mitrale, l'anneau cardiaque, les cordages tendineux, les muscles papillaires et la paroi du ventricule gauche. Le mode de fonctionnement exact de la valve est un phénomène complexe

et non complètement compris de nos jours. On sait cependant qu'il est un ensemble de mécanisme à la fois passif et actif. Premièrement, en tout début de systole, l'anneau cardiaque se resserre tel un sphincter et les lames de la valve viennent s'apposer l'une contre l'autre. Durant la systole, un gradient de pression s'opère entre l'atrium gauche et le ventricule. Cela a pour effet de repousser les lames de la valvule jusqu'à hauteur de l'anneau cardiaque. Le stress au niveau de la commissure entre les lames et au niveau de leur bordure est maximal à ce moment-là. C'est la contraction des muscles papillaires via l'aide des cordages tendineux qui permet d'éviter l'éversion des lames et une fuite importante de sang du ventricule vers l'atrium (

Figure 6). La structure des cordages tendineux au niveau macroscopique montre un motif en forme d'éventail qui leur permettent l'élargissement ou le rétrécissement des lames au niveau de la commissure. Les réarrangements au niveau de cette zone, même minimes, peuvent empêcher le bon fonctionnement de la valve et on peut alors voir apparaître des fuites (Muresian 2009).

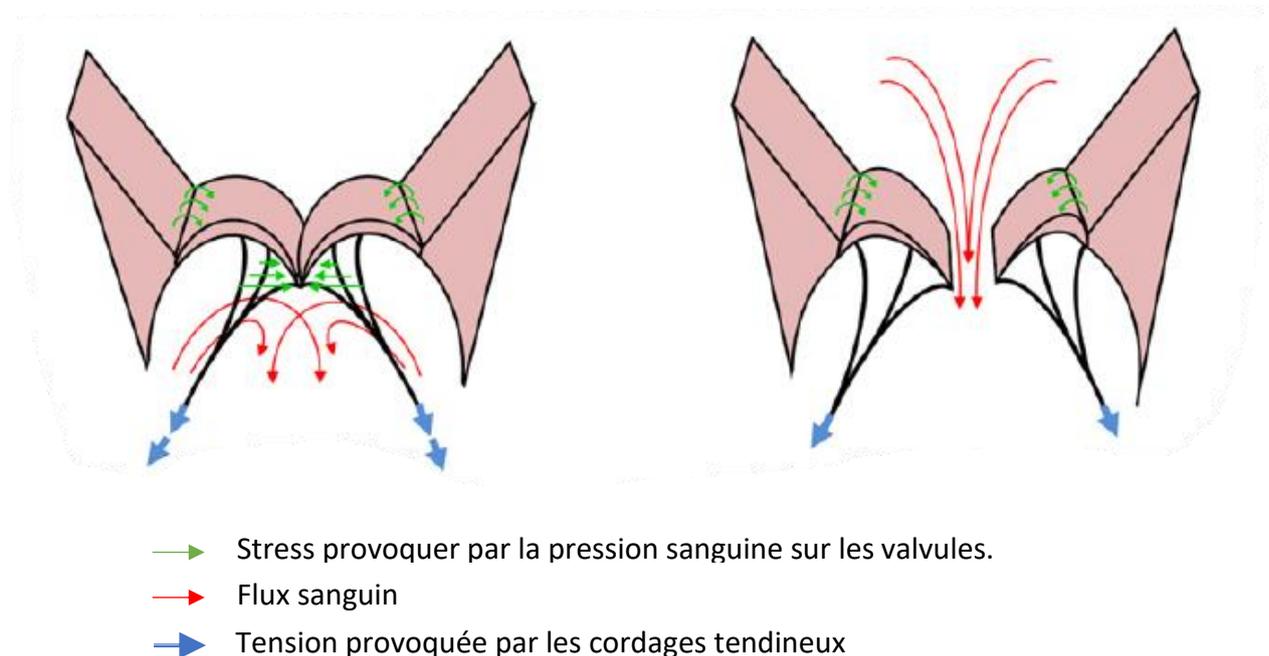


Figure 6. Mode de fonctionnement normal de la valve mitrale en systole (gauche) et en diastole (droite) Source : Richards et al. 2012

B) Les bruits cardiaques

1) Les bruits physiologiques

Durant le cycle cardiaque plusieurs bruits peuvent être entendus. Ils marquent le passage d'une phase à une autre. Ces bruits sont produits par un ensemble anatomique et un moment précis du cycle. Par conséquent, ils ont chacun un ordre, une tonalité et une musicalité différentes. Par la suite chaque bruit cardiaque sera défini par 4 éléments : sa tonalité, son intensité, sa durée et son moment dans le cycle. Par convention, le cycle cardiaque commence en début de systole. Le premier bruit entendu est B1, c'est un « Boum » sourd, fort, long et protosystolique. Il est émis par la contraction ventriculaire, la fermeture des valvules auriculo-ventriculaires et au sang venant frapper contre celles-ci. Après un petit silence, un deuxième son est audible : B2. Il correspond plus à un « TA » sec, fort, court et protodiastolique. À l'instar de B1, il correspond au bruit de fermeture de valve et de sang venant les percuter, mais ce sont les valves sigmoïdes cette fois. Après un grand silence, le cycle recommence et on peut entendre de nouveau B1. La systole dure environ 1/3 du cycle et la diastole 2/3 du cycle. Dans un cœur sain, il n'y eu que ces 2 sons décrits pendant près de 100 ans. Le développement de la phonocardiographie permet de mettre en évidence 2 autres sons. Vers 1908, un article parle du « so-called third heart-song » (*The So-Called Third Heart-Sound* 1908). C'est un bruit quasiment inaudible à l'auscultation simple car il est de basse fréquence (sourd), de très faible intensité et protodiastolique. Il se situe juste après B2 et il est par conséquent nommé B3. Il correspond au bruit du sang qui arrive dans le ventricule pendant la phase de remplissage rapide. Le dernier bruit, nommé B4, correspond à la systole auriculaire. Il est de très faible intensité, sourd, court et télédiastolique. L'ensemble de ces bruits sont reportés dans le schéma ci-dessous (Figure 7).

Cycle cardiaque

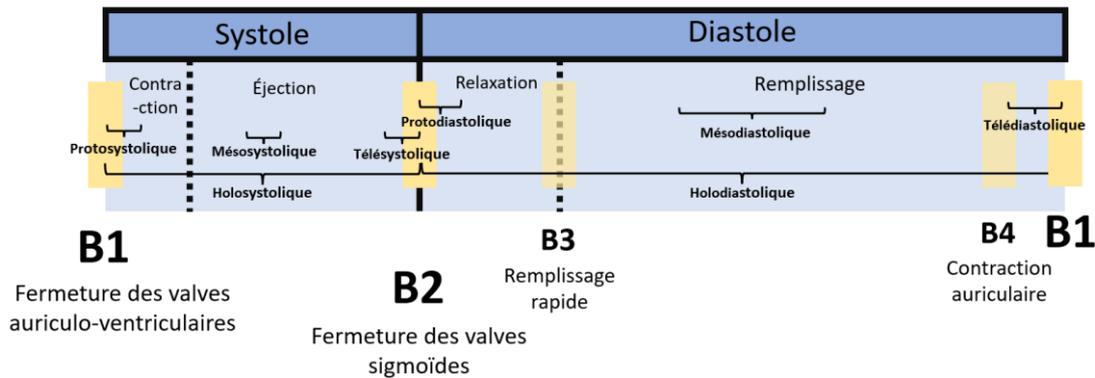


Figure 7. Schéma de la position des différents bruits cardiaques lors d'un cycle complet
Source : Antony VIGIÉ

2) Les bruits surajoutés

Ils peuvent être de 4 types :

- Variation d'intensité
- Dédoublement
- Bruits de galop
- Souffles

Nous verrons dans la partie suivante le cas particulier des souffles cardiaques. La variation d'intensité des bruits cardiaques peut être due à différents éléments.

La tension dans les vaisseaux peut augmenter les bruits cardiaques. Après un effort physique important ou lors d'hypertension artérielle, la pression sanguine augmente ce qui a pour effet d'augmenter la force de percussion du sang sur les valvules et par conséquent le bruit de B1 et B2. À l'inverse, les modifications de la viscosité du sang comme lors d'anémie ou le ralentissement du flux sanguin lors d'insuffisance cardiaque vont avoir pour effet de diminuer les bruits cardiaques. Certaines pathologies ne vont pas nécessairement modifier les bruits cardiaques, mais vont empêcher leur transmission en totalité jusqu'au stéthoscope. C'est le cas par exemple de la pleurésie ou du pneumothorax, la présence de liquide ou d'air respectivement entre le cœur et la plèvre va atténuer les bruits cardiaques.

Le dédoublement prend principalement en compte les bruits B1 et B2. Normalement, on ne peut différencier le B1 ou B2 du cœur droit et du cœur gauche. Il existe cependant certaines pathologies pour lesquelles un

dédoublé droit/gauche peut être entendu : une communication interauriculaire par exemple, ou pour un bloc de branche nerveuse. Dans ce cas-ci, l'information nerveuse entraînant la contraction du ventricule gauche peut prendre un peu de retard et par conséquent donner un bruit B1 dédoublé.

Pour finir, les bruits de galop correspondent à l'augmentation d'intensité de B3 et/ou B4 qui deviennent alors audibles à l'auscultation. On les qualifie donc de galop protodiastolique lors de l'apparition de B3, télédiastolique pour l'apparition de B4 ou galop de fusion lorsque B3 et B4 sont audibles et regroupés. On peut retrouver un bruit de galop protodiastolique dans le cas d'une surcharge volémique par exemple. Le remplissage rapide va être raccourci et de plus forte intensité permettant d'entendre B3.

3) Les souffles cardiaques

Le sang se déplace dans les vaisseaux et le cœur sous forme d'un écoulement laminaire. Cela veut dire qu'il circule sous forme de lames concentriques qui s'écoulent toutes dans la même direction avec une vitesse maximale au centre du flux. Ce type d'écoulement ne produit quasiment aucun son, c'est pourquoi dans une situation normale on ne peut entendre le son s'écouler à l'auscultation. Cependant, il existe plusieurs cas pour lesquels le flux sanguin est perturbé, il devient turbulent et on peut alors entendre son écoulement sous forme d'un léger bruit aigu et sifflant que l'on nomme souffle. Il existe 5 grandes causes pouvant donner des souffles.

L'anémie par déficit en globules rouges entraîne une diminution de la viscosité du sang. Le flux sanguin accélère et on peut alors voir apparaître des turbulences et un souffle systolique aortique. Les quatre autres causes ont pour origine une anomalie de structure.

La sténose d'un vaisseau, par rétrécissement du flux va entraîner un flux turbulent en aval et en amont de l'obstacle. C'est en général au niveau des gros vaisseaux que le souffle sera le plus audible.

Lors de dilatation d'une chambre de compression. Le sang ne va plus s'écouler au travers d'un cylindre mais dans une sphère entraînant des turbulences et donc un souffle. On retrouve ce type de souffle dans la cardiomyopathie du chien par exemple.

On peut également avoir un souffle lors de la vibration d'une membrane au niveau de l'écoulement du sang. C'est le cas lors d'une rupture de cordage tendineux ou d'un muscle papillaire. La lame de la valve qui est normalement tenue par ce muscle va alors vibrer au passage du sang et créer des turbulences.

Pour finir, une des causes principales de souffle chez le chien est le passage de sang vers une chambre de pression inférieure. Dans le cas d'une insuffisance mitrale, celle-ci va laisser passer du sang durant la systole du ventricule vers l'auricule et provoquer un souffle.

4) Caractérisation des souffles cardiaques

Afin de diagnostiquer le plus précisément possible un problème cardiaque et de traiter l'animal au mieux, les recommandations actuelles sont les examens d'imagerie, et en particulier l'échocardiographie qui permet de mesurer et de quantifier avec précision l'origine et la physiopathologie d'un problème cardiaque. Cependant ces examens sont coûteux pour le propriétaire et il faut dans un premier temps revenir aux bases de l'examen clinique au travers de l'auscultation cardiaque, l'anamnèse, les commémoratifs et les symptômes cliniques afin de préconiser ce type d'examen quand cela est nécessaire. On retrouve très régulièrement un souffle lors de pathologie cardiaque et l'auscultation permet de mettre en évidence sa position dans le cycle, son point d'intensité maximal (PIM) et son grade. Cela permet d'amener plusieurs informations importantes au vétérinaire durant l'examen clinique et lui permet ensuite d'effectuer une échocardiographie dans de meilleures conditions. Nous avons déjà vu comment décrire la position d'un souffle dans le cycle (Figure 7). Le PIM est donné en fonction des aires d'auscultations vues précédemment (Figure 3). Le grade est donné en fonction d'un classement sur VI. Depuis son invention en 1933 par le docteur Samuel Levine (Rishniw 2018), cette échelle sur 6 a subi différentes modifications sur la définition de chaque grade, mais elle continue à servir de base pour définir les souffles auscultés. L'échelle actuellement utilisée en médecine vétérinaire est reportée dans le Tableau 2. Ce sont les docteurs Ettinger et Suter qui l'ont introduit dans un livre de cardiologie canine en 1970 (Rishniw 2018).

Tableau 2 : Classification de l'intensité des souffles cardiaques
 Source : Bruyette 2020

	Grade	Description
Souffles de faible intensité	Grade I	Souffle très faible, difficilement auscultable et localisé sur une petite aire
	Grade II	Souffle faible, auscultable facilement mais localisé sur une petite aire
Souffles d'intensité modérée	Grade III	Souffle modéré et auscultable facilement sur au moins 2 zones
	Grade IV	Souffle important et qui s'étend sur plusieurs aires d'auscultation mais sans la présence d'un frémissement au niveau du choc précordial
Souffles de forte intensité	Grade V	Identique au grade IV mais avec la présence d'un frémissement palpable au niveau du choc précordial
	Grade VI	Souffle très important avec la présence d'un frémissement au niveau du choc précordial et qui est audible sans stéthoscope ou avec le stéthoscope décollé de la paroi

C) Les maladies cardiaques auscultables chez le chien

1) Les maladies valvulaires dégénératives

La maladie valvulaire dégénérative des valves auriculo-ventriculaires est la maladie cardiaque la plus fréquente chez le chien. La valve la plus touchée est la valvule mitrale dans 62% des cas (Fox 2012). Elle touche principalement les chiens de petite race et âgés, mais peut être retrouvée chez toutes les races et à différents âges. Une étude chez le cavalier King Charles montre que sur 29 chiens âgés de 1 à 2 ans, 10,3 % avaient un souffle cardiaque de grade I/VI et 1 avait déjà un prolapsus sévère de la valvule mitrale (Pedersen, Lorentzen, Kristensen 1999). Les lésions et les conséquences dépendent de l'âge d'apparition et peuvent varier d'un animal à l'autre. Les lésions apparaissent en premier au niveau du bord libre de la valve. La dégénération des tissus transforme les lames fines et translucides des valves en structure épaisses et opaques. Leur tier distal devient de plus en plus épais avec une déformation des tissus. La progression de la maladie transforme ces déformations en nodules et épaissit de plus en plus la bordure de la valve. On commence alors à avoir une légère régurgitation mitrale à ce stade. Un souffle de grade I au niveau de l'apex du cœur à gauche correspondant à l'aire d'auscultation de la valvule mitrale peut être entendu à ce stade. Au fur et à mesure de l'avancée de la maladie, les déformations deviennent de plus en plus marquées ce qui aggrave les fuites de la valve mitrale. Une partie du sang éjecté à chaque systole va alors repartir vers l'auricule gauche. Celle-ci va se dilater de plus en plus, on peut alors voir apparaître une insuffisance cardiaque gauche. Une classification de cette maladie en 4 stades est proposée. Elle ne se base que sur les lésions nodulaires partant du stade 1 avec l'apparition de nodule rare et en petite quantité en bordure de valve, au stade 4 comprenant une déformation importante de la valve par fusion de nodule et envahissement des cordages. Ces stades sont directement reliés à la gravité des signes cliniques (Fox 2012). En début de maladie, l'auscultation permet de déceler précocement l'insuffisance valvulaire, mais il n'y a que l'échocardiographie qui permet de mesurer avec précision l'importance de la fuite et la déformation de l'atrium. Les signes terminaux de la maladie sont une insuffisance cardiaque congestive pouvant amener à un œdème des poumons. Dans le cas d'une maladie dégénérative, on ne peut traiter

directement les lésions. Le traitement recommandé est à base de diurétique, d'inotrope positif et de vasodilatateur. Cela permet de réduire la pression au niveau des veines pulmonaires et d'améliorer les contractions cardiaques.

2) La cardiomyopathie dilatée

C'est une maladie cardiaque très représentée chez les chiens de grande race. Des études ont montré une prévalence allant jusqu'à 20% chez le lévrier Irlandais. L'âge moyen d'apparition est estimé à 4,52 +/- 2,0 ans dans cette race (Thomas 2013). D'autres études ont montré une surreprésentation des mâles (73 %) dans cette maladie. Les signes cliniques les plus communs sont l'essoufflement et la toux, mais on retrouve également un souffle cardiaque dans près d'un tiers des cas et un bruit de galop dans 10% des cas. Parmi les chiens avec un souffle cardiaque plus de la moitié n'était que de grade I et 5% de grade IV (Martin, Stafford Johnson, Celona 2009). Cette maladie se traduit par une dégénérescence précoce du myocarde entraînant des anomalies rythmiques et une dilatation cardiaque. La dilatation du ventricule gauche entraîne une insuffisance cardiaque gauche et des problèmes pulmonaires. Le taux de survie à un an post diagnostic est d'à peine 28%. Les causes de mortalité sont l'euthanasie par dégradation de l'état général, une insuffisance cardiaque congestive ou une arythmie fatale. Son origine est génétique dans la majorité des cas pour les races prédisposées. Des recherches pour la création de tests antigéniques sont en cours, et permettrait de prendre en charge plus précocement les chiens prédisposés. Une mode est apparue sur l'utilité d'un régime sans céréales qui permettrait de réduire le risque de cardiomyopathie dilatée mais à ce jour aucune étude n'a réussi à mettre en lien une prévalence plus faible dans une population au régime sans-céréales (McCauley et al. 2020).

3) Les maladies cardiaques congénitales

Une autre cause fréquente de problème cardiaque est l'anomalie congénitale. Une étude regroupant 76 301 chiens croisés a montré que la prévalence de maladie cardiaque congénitale était de 0,13% (Schrope 2015). Les femelles sont légèrement plus touchées (51,4%). Cette étude montre également qu'il y a environ 0,10 % de chien avec un souffle bénin pouvant aller jusqu'au grade de IV/VI. La maladie la plus représentée est la sténose de la valvule pulmonaire, suivie par la persistance du canal artériel, la sténose de la valvule aortique et la communication interventriculaire. Ces différentes causes amènent des symptômes et nécessitent plus ou moins de suivis. Cependant il est très difficile de relier le grade d'un souffle avec la gravité des signes cliniques. Une sténose de la valvule aortique entraîne en général des souffles de haut grade sans altérer le fonctionnement cardiaque en début d'évolution. Au contraire, une communication interventriculaire provoque un mélange des sangs ce qui peut entraîner des répercussions très importantes sur l'ensemble de l'organisme. Plus la communication interventriculaire sera importante, plus les signes cliniques apparaîtront tôt et seront importants alors que paradoxalement le souffle sera de grade inférieur. C'est pourquoi il ne faut pas hésiter à proposer aux propriétaires des examens d'imagerie dès que notre auscultation nous semble anormale. Mais pour cela, il faut avoir un minimum de connaissances et de compétences en auscultation cardiaque.

III/ Apprentissage de l'auscultation à VetAgro Sup

L'ensemble des éléments rapportés dans cette partie sera à considérer par rapport à mon expérience personnelle. Nous discuterons ici du cas des étudiants sortants de la promotion 2021, l'approche tant au niveau des cours théoriques que de la pratique au sein du centre hospitalier universitaire vétérinaire (CHUV) peut être amenée à être modifiée et différente pour les autres promotions.

Nous verrons dans cette partie l'intérêt de maîtriser l'auscultation cardiaque puis les méthodes d'apprentissage qui sont utilisées à VetAgro Sup pour finir par les différentes méthodes d'évaluation.

A) Intérêt de maîtriser l'auscultation cardiaque

1) Au CHUV

À VetAgro Sup, les étudiants commencent les enseignements cliniques dès la troisième année. Les étudiants sont amenés à suivre des rotations cliniques dans un CHUV. Les rôles principaux des cliniques sont de permettre aux étudiants de renforcer leurs connaissances théoriques, d'acquérir des compétences techniques et de se confronter à la gestion d'une clientèle afin de développer des compétences de savoir-être. Il est nécessaire que les étudiants aient déjà une base théorique pour pouvoir utiliser le temps en clinique efficacement. Pour le cas de l'auscultation cardiaque, les étudiants n'ont que les stages pour s'entraîner avant le début des enseignements cliniques. Au sein du CHUV, ce sont les étudiants qui effectuent les examens cliniques des animaux dans un premier temps. Le manque d'expérience peut être difficile à gérer pour certains et être une source de stress important. Or, il a été démontré que les hormones libérées dans une situation stressante comme le cortisol jouent un rôle négatif sur la mémoire et l'apprentissage de tâches complexes (Bangasser, Shors 2010). La visite dans une clinique vétérinaire est généralement une source de stress pour l'animal et le propriétaire. Lors de leurs premiers examens

cliniques, les étudiants doivent dans un premier temps apprendre à maîtriser leur propre stress pour ne pas le transmettre à l'animal. Pour cela, les étudiants peuvent bénéficier de l'aide des étudiants des années supérieures ou se concentrer dans un premier temps sur ce qu'il maîtrise le plus. Une bonne maîtrise de l'auscultation cardiaque permet donc à l'étudiant de réduire son stress, de se concentrer sur ce qu'il fait, de retenir plus efficacement les gestes techniques et d'être plus attentif aux sons entendus. Nous verrons par la suite que même si l'apprentissage théorique de l'auscultation cardiaque est effectué à VetAgro Sup au travers de cours, l'entraînement pratique avant le début des cliniques est limité pour permettre une bonne maîtrise de cet acte médical.

2) En clinique privée

Un vétérinaire généraliste canin est amené à faire des actes très différents au sein de la même journée. Du vaccin annuel à l'opération en urgence d'un syndrome de dilatation torsion de l'estomac en passant par la prise de cliché radiographique sous anesthésie, il pratique des dizaines d'examen cliniques chaque jour. Pour chacun de ces examens, l'auscultation cardiaque est incontournable et apporte différentes informations. Dans le cadre d'une consultation vaccinale, elle permet de s'assurer de la bonne santé de l'animal et/ou de mettre en évidence un problème cardiaque via un souffle de bas grade avant même l'apparition des premiers signes cliniques. Le vétérinaire peut alors proposer des examens complémentaires pour investiguer ce problème, prendre en charge l'animal précocement et dans les meilleures conditions possibles. Le succès de la prise en charge d'une maladie valvulaire dégénérative est donc très souvent lié à la détection d'un souffle précoce (Häggström, Höglund, Borgarelli 2009). Dans le cadre d'une opération ou de la réalisation de clichés radiographiques sous anesthésie, l'auscultation est la première marche vers un bon déroulement de l'acte. Une bonne auscultation cardiaque permet de déceler une quelconque anomalie permettant de préparer au mieux l'anesthésie qui va suivre. Cela permet d'adapter le protocole anesthésique ainsi que de prévenir les différents problèmes qui peuvent survenir durant l'anesthésie. On a également besoin de l'auscultation dans le suivi et le soin des animaux. L'apparition d'un bruit de galop à l'auscultation cardiaque lors de la fluidothérapie d'un chat hospitalisé permet de réagir dans les temps et d'empêcher les dégâts

qu'une surcharge volémique peut causer. Les compétences du vétérinaire en auscultation cardiaque sont donc indispensables à la bonne prise en charge d'un patient.

B) Méthode d'apprentissage actuel

1) Cours d'anatomie et de physiologie cardiaque

Dès la première année les étudiants sont sensibilisés au fonctionnement cardiaque. Dans le module système respiratoire et cardiovasculaire on étudie l'anatomie, la physiologie et l'auscultation cardiaque avec les différentes aires d'auscultations et les différents bruits cardiaques sous forme de cours magistraux et de travaux dirigés. Des cours sur l'anatomie cardiaque sont également assurés dans le module d'anatomie en première et deuxième année. L'ensemble des connaissances sur l'auscultation des étudiants à la fin de leur première année est uniquement théorique. Les professeurs encouragent également les étudiants à réaliser une auscultation cardiaque sur leur animal de compagnie pour s'habituer aux sons normaux et renforcer leurs connaissances. Or tous les étudiants ne disposent pas nécessairement d'un chien de compagnie ce qui entraîne une acquisition de la compétence différente. Pour ces derniers, la pratique ne pourra être faite que lors des stages. En deuxième année, une séance de travaux dirigés est consacrée à l'auscultation cardiaque chez le cheval. C'est la première occasion pour les étudiants d'entendre les différents bruits cardiaques en présence d'un enseignant. Un ensemble de bande sons enregistrés via un stéthoscope électronique est diffusé dans un amphithéâtre clinique. Les étudiants peuvent alors apprendre à reconnaître un cycle cardiaque normal et différents bruits pathologiques. C'est une étape indispensable pour entraîner l'oreille des étudiants aux différents bruits cardiaques. Cependant, il est souvent difficile de retrouver en pratique un son aussi net et caractéristique. La qualité du stéthoscope et de l'opérateur n'est pas du tout la même lors de nos premières auscultations. L'enseignement n'est pas accompagné d'une mise en pratique sur animal vivant et l'étudiant doit essayer de rapprocher au maximum ce qu'il entend lors de sa première auscultation à ce qu'il a entendu. En effet entre la date de la séance pédagogique et la date à

laquelle les étudiants sont confrontés à leur première auscultation, il peut s'écouler plusieurs années, ce qui joue un rôle préjudiciable à une assimilation et une compréhension optimale.

2) En stage

Lors de notre cursus nous sommes amenés à effectuer des stages dans des cliniques privées en dehors de l'école. Les étudiants sollicitent un vétérinaire libéral comme maître de stage afin d'être accueilli dans leur structure sur des périodes pouvant aller de 1 semaine à plusieurs mois. Chaque stage a des objectifs différents à atteindre par l'étudiant. Parmi l'ensemble des stages, un s'intitule « soins infirmiers et examen clinique », les détails se trouvent en Annexe 1. Le but de ce stage est de permettre aux étudiants d'effectuer des actes techniques dans des conditions réelles. Il doit être effectué avant l'entrée de l'étudiant en clinique au CHUV. Un des objectifs de ce stage est de « mettre en pratique les gestes d'investigations sémiologiques clinique de base ». L'auscultation cardiaque fait partie de ces gestes. Théoriquement, l'étudiant va pouvoir s'entraîner à l'auscultation entre autres sous la surveillance et le contrôle de son maître de stage pendant les consultations. À la fin de son stage, l'étudiant et le maître de stage remplissent une fiche bilan ainsi qu'un passeport d'auto-évaluation pour l'étudiant. Lors de son retour sur le campus, l'étudiant doit prendre rendez-vous avec son enseignant référent avec lequel il va pouvoir discuter de son ressenti et de ce qu'il a appris pendant le stage. À la fin de cet entretien, l'enseignant valide le stage de l'étudiant en signant la fiche bilan. Cette fiche est ensuite transmise à la scolarité qui vérifie l'ensemble des documents et valide définitivement le stage. L'ensemble de ce système est très bien construit en théorie, chaque point est contrôlé afin de s'assurer que chaque étudiant acquière l'ensemble des connaissances et objectifs attendus à la fin de son cursus. Cependant, en observant en détail le fonctionnement de ces stages, on peut voir apparaître plusieurs problèmes. Premièrement, le caractère de chaque étudiant et de chaque maître de stage peut faire varier considérablement la quantité et la qualité des actes que l'étudiant pourra faire durant un stage. Certains étudiants auront déjà pu effectuer une centaine d'auscultations avant la fin de leur 3^{ème} année alors que certains en seront restés à l'observation uniquement. La création

du passeport d'auto-évaluation vient essayer de gommer ces différences en permettant aux étudiants de faire remonter à l'administration des éventuels problèmes ou manquements durant ces stages. Malheureusement, il n'y parvient qu'en partie car il est difficile de demander à refaire un stage en ayant comme unique critère le sentiment de ne pas avoir assez progressé. De plus, les étudiants n'ont pas énormément de temps consacrer aux stages sur l'année. Ainsi, si un étudiant ne peut atteindre tous ses objectifs lors d'un stage, il a toujours la possibilité de se rattraper sur le stage suivant. Le problème est qu'il peut s'écouler plusieurs mois entre deux stages, et certains étudiants peuvent se retrouver à accumuler du retard avant leur entrée au CHUV.

3) Au CHUV

Une des forces de la formation vétérinaire en France est la présence d'un centre hospitalier universitaire vétérinaire, (CHUV) au sein des écoles vétérinaires. A Lyon, le CHUV rassemble plusieurs secteurs cliniques (animaux de compagnie, équidés, animaux de production) et sont accessibles aux étudiants dès le semestre 10 avec des enseignements cliniques appelés rotation clinique. Cela permet de mettre en pratique l'ensemble des éléments appris lors des cours théoriques, d'acquérir des notions de savoir-être, savoir-vivre et de se familiariser au fonctionnement d'une clinique vétérinaire. Les rotations cliniques se font en groupe. Chaque rotation est basée sur une spécialité et a ses propres règles de fonctionnement et d'évaluation qui sont communiquées aux étudiants en début de rotation selon les objectifs pédagogiques fixés par l'enseignant. Chaque groupe d'étudiants a donc un ensemble de devoirs à respecter et de compétences à acquérir durant ses rotations. Une grande partie de l'apprentissage se fait en autonomie et par entre-aide. Les groupes des années supérieures encadrent les années inférieures, en partageant leurs connaissances et leurs expériences. Une des rotations où l'on passe le plus de temps à ausculter les animaux en clinique est la rotation d'anesthésie. Tous les animaux devant subir une anesthésie doivent dans un premier temps avoir un examen clinique complet. L'étudiant en charge de l'animal doit réaliser l'anamnèse et recueillir les commémoratifs concernant l'animal. Un examen clinique classique est ensuite effectué. Les points importants

vérifiés sont le fait que l'animal soit bien à jeun, la température et tout ce qui est relatif au système cardio-vasculaire. Les étudiants relèvent donc la fréquence cardiaque, la fréquence respiratoire et le temps de remplissage capillaire (TRC). Un des points importants lors de cet examen clinique est la détection d'un souffle cardiaque ou non (Annexe 2). Les molécules anesthésiantes étant cardiomodulatrices, une pathologie cardiaque majeure le risque de mortalité pour l'animal. L'ensemble des animaux doit avoir été au moins une fois ausculté par un interne pour vérifier ce point. On laisse donc l'étudiant faire son examen clinique seul dans un premier temps, puis l'interne ausculte l'animal pour vérifier les éléments notés par l'étudiant. Ce mode de fonctionnement permet aux étudiants de s'entraîner à l'auscultation cardiaque tout en minimisant les risques pour l'animal avec une étape de vérification par une personne plus expérimentée.

C) Méthodes d'évaluations

1) Partiels

L'évaluation de la partie théorique de l'apprentissage se fait sous forme d'examens. Deux fois par an, lors d'une semaine aménagée l'ensemble des étudiants doivent valider chaque module pour accéder à l'année d'étude supérieure. Les modalités d'examens sont communiquées aux étudiants en début de semestre. Les questions des partiels peuvent porter sur l'ensemble des éléments vus lors des cours magistraux, des travaux dirigés ou pratiques. Il s'agit d'un ensemble de questions à réponses ouvertes courtes ou de questions à choix multiples. Pour l'auscultation cardiaque, un exemple de question sur les souffles est présenté (Figure 8). Cela permet de vérifier les connaissances théoriques de l'étudiant sur le sujet mais ne l'aide que légèrement pour la partie pratique. En effet, même en connaissant parfaitement les caractéristiques d'un souffle, il faut pouvoir le mettre en évidence lors de l'examen clinique. Une étude a démontré que l'on pouvait avoir de grosses différences de signal obtenu sur le spectre sonore d'une auscultation cardiaque avec un stéthoscope électronique uniquement en y appliquant des niveaux de pressions différents (Nowak, Nowak 2017). On peut avoir des différences allant jusqu'à 5 dB sur certaines fréquences. On peut donc aisément imaginer qu'un novice en auscultation puissent passer à côté d'un souffle cardiaque de bas grade même en ayant une connaissance théorique avancée. La méthode de contrôle de connaissances avec des partiels « classiques » est donc utile pour évaluer des connaissances mais insuffisante pour évaluer des compétences en matière d'auscultation cardiaque.

- c/ Un souffle de régurgitation aortique correspond aux descriptifs suivants :
(cocher la ou les réponses VRAIES)
- est moins fréquent qu'une régurgitation pulmonaire
 - peut-être protodiastolique
 - peut-être pansystolique
 - peut-être continu
 - peut-être holodiastolique
 - a un PIM apical Gauche
 - a un PIM apical Droit
 - a un PIM basal Gauche
 - a un PIM basal Droit
 - est plutôt sifflant
 - est plutôt ronflant
 - a une intensité 2/5
 - a une intensité 5/5

Figure 8. Exemple de question sur l'auscultation cardiaque.
Source : Partiel d'équino.

2) Évaluation en clinique

Les méthodes d'évaluations en clinique sont différentes. Chaque rotation est encadrée par un enseignant. Les étudiants sont principalement évalués sur leur savoir-être, leur assiduité et leur implication. Certaines rotations se finissent par une présentation d'un cas clinique vu dans la semaine. Cela permet à l'étudiant de s'impliquer en profondeur sur un cas en effectuant des recherches sur un sujet précis. Cela permet également au professeur de s'assurer que l'étudiant a suivi le cas avec intérêt, qu'il a compris les différents aspects de la pathologie ainsi que sa prise en charge. En revanche, il n'y a pas d'évaluation à proprement parlé sur les actes techniques que l'étudiant est amené à effectuer. Dans le cas de l'auscultation cardiaque, l'étudiant effectue un premier examen clinique lors de la prise en charge de l'animal. Il note l'ensemble de ses observations avant de faire une présentation clinique au responsable de la rotation. Le senior fait en parallèle ou à la fin de la présentation un examen clinique et confronte ses observations avec celles de l'étudiants. La question de la présence ou non d'un souffle cardiaque est un sujet assez récurrent à cette étape. Le professeur peut alors aiguiller l'étudiant et l'encourager à réausculter l'animal à la fin de la présentation pour écouter ce qu'il a manqué. Cependant, cela est rarement effectué en clinique par manque de temps. Dans une très grande majorité des cas, une fois la présentation finie, l'étudiant doit raccompagner les propriétaires à l'accueil, pour signer des documents ou régler leur facture. L'étudiant doit ensuite accompagner les propriétaires vers la sortie et rendre l'animal ou l'amener en hospitalisation suivant la prise en charge qui a été décidée. Une fois cela effectué, l'étudiant doit s'occuper de la consultation suivante. Même si l'étudiant a la possibilité de discuter et de faire part de ses interrogations lors de l'examen clinique à l'enseignant responsable, il est très rare d'avoir le temps de réausculter l'animal après discussion et ainsi permettre à l'étudiant d'entendre ce qu'il a pu manquer. Un autre point à souligner est que l'on discute de la présence d'un souffle cardiaque pendant la présentation du cas. Une multitude d'informations y sont échangées en très peu de temps. L'étudiant doit en particulier se concentrer sur la prise en charge du cas et le cas échéant du traitement choisit par le professeur, ce qui peut gêner à la compréhension et à l'apprentissage des gestes techniques pour certains étudiants. Lors de la semaine de médecine interne, deux jours sont consacrés à la cardiologie.

Dans cette rotation les étudiants peuvent discuter plus en détails sur les pathologies cardiaques et sur les différents outils diagnostics comme l'auscultation cardiaque. Cela permet un bon rappel et du temps est consacré à l'étudiant pour s'entraîner à réaliser une auscultation correcte. Cependant, deux jours dédiés à la cardiologie sur une année peuvent être insuffisant à une bonne maîtrise de l'auscultation pour une majorité d'étudiant. De plus, le nombre d'animaux qui sont présentés en consultation de cardiologie n'est pas suffisant par rapport aux nombres d'étudiants. Il est alors difficile que chaque étudiant puisse faire une auscultation complète sans qu'un animal ne soit ausculté de nombreuses fois, ce qui peut augmenter son stress et fausser l'examen.

3) Pistes d'amélioration

Nous discuterons ici d'éléments de réflexion pour améliorer l'apprentissage des gestes pratiques de l'auscultation cardiaque. Comme nous l'avons vu, l'apprentissage de la partie théorique à VetAgro Sup est suffisant et évalué de manière objective concernant les connaissances au travers des partiels. L'apprentissage de la partie pratique est, quant à lui, plus difficile à évaluer. En effet, la pratique peut s'apprendre en autodidacte, en stage ou au CHUV. Pour un apprentissage en autodidacte, il est impossible de vérifier la progression de chaque étudiant. L'apprentissage au travers de stages est beaucoup plus formateur mais il reste très inégal. Certains maîtres de stage suivent à la lettre les objectifs de stage alors que certains n'en tiennent pas suffisamment compte. On peut donc noter une disparité importante au sein d'une même promotion d'étudiants avec d'une part ceux qui auront eu un maître de stage qui, conscient des objectifs, poussera l'étudiant à effectuer des dizaines d'examen cliniques jusqu'à ce qu'il soit à l'aise sur l'auscultation cardiaque, et d'autre part des étudiants qui auront effectué plusieurs stages sans jamais avoir eu l'occasion de faire un seul examen clinique complet. Pour finir, l'apprentissage pratique au CHUV est réellement efficace et formateur. L'ensemble des étudiants sortants de l'école sont capables de faire un examen clinique complet et une auscultation cardiaque correcte. Il n'existe cependant pas de réelles évaluations sur les gestes techniques au sein des cliniques. On se retrouve

donc avec des disparités individuelles importantes en termes de temps nécessaire pour arriver à ce résultat. L'auscultation cardiaque passe en grande partie par une bonne connaissance théorique mais également par une maîtrise de gestes techniques. Or, pour l'instant les étudiants n'ont que les examens cliniques au CHUV pour s'entraîner et les stages qui peuvent être insuffisants dans certains cas. Le but de ce projet de thèse est de mettre en place un atelier pédagogique alliant un mannequin de chien et la réalité augmentée afin de permettre aux étudiants de s'entraîner dans des conditions proches du réel sans stress avant leur début en clinique. Cela permet de revoir certaines bases théoriques vues les années précédentes ainsi que d'apprendre les bons gestes techniques. L'ensemble de ces éléments peuvent permettre aux étudiants qui le souhaitent d'acquérir une bonne maîtrise de cet acte incontournable et ainsi l'aborder plus sereinement en condition réelle. En gagnant en maîtrise, l'étudiant peut réduire son stress, améliorer la qualité et la vitesse de son apprentissage.

Deuxième partie : Les nouvelles technologies au service de l'auscultation cardiaque

I/ Acquisition d'images numériques

Dans cette partie nous présenterons l'imagerie par résonance magnétique en détaillant cette technique pour l'obtention d'image cardiaque pour finir par la méthode utilisée pour obtenir une reconstruction en 3 dimensions de cœur à partir de ces images.

A) L'imagerie par résonance magnétique

1) Un peu d'histoire

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est devenue un incontournable en médecine humaine et vétérinaire en quelques décennies seulement. Dès la fin des années 1940, Bloch et Purcell deux physiciens ont décrit le principe de la résonance magnétique nucléaire (RMN) qui est à la base de l'IRM. Ils ont d'ailleurs reçu un prix Nobel en physique en 1952 pour leurs travaux. La RMN était dans un premier temps utilisée pour l'analyse structurale de composés chimiques. Elle se base sur la capacité d'exciter certains noyaux via un fort champ magnétique. Lors de leur retour à l'équilibre, ces noyaux vont émettre une onde faible qui peut être captée. Cette technique a été utilisée la première fois pour former une image par Paul Lauterbur en 1973. En plaçant un gradient magnétique dans le sens du champ magnétique principal il a pu isoler chaque couche de noyau et obtenir une projection en une dimension de la position de chaque noyau de l'élément étudié. En répétant l'opération tout en effectuant une rotation de l'objet, il est possible d'obtenir une projection en deux dimensions de l'ensemble des positions des noyaux et par conséquent une image. Le temps d'acquisition des images et leur qualité n'ont pas séduit la communauté scientifique. Ce n'est qu'en 1983, grâce aux techniques de transformations d'image en deux dimensions à des images en trois dimensions par Fournier ainsi qu'à l'acquisition multicouches d'images par Crooks et al (1983), que la résonance magnétique nucléaire connaît un véritable essor. Son nom devient alors l'imagerie par résonance magnétique (Seibert 1995). Les débuts de l'IRM ont été difficile car en concurrence avec le scanner. De nos jours, il n'existe plus vraiment de concurrence, chaque appareil a ses avantages et ses limites. Mais les nouvelles générations d'IRM atteignent

des qualités d'images inégales, avec une définition qui peut descendre jusqu'à 10 μm et la possibilité d'acquérir des images fonctionnelles. L'IRM a permis des avancées considérables dans la connaissance du mode de fonctionnement du cerveau humain (Bridge, Clare 2006).

2) Mode de fonctionnement

Le mode de fonctionnement détaillé et les principes mathématiques qui se cachent derrière l'IRM sont complexes. Nous rappellerons ici uniquement les grandes lignes afin de comprendre simplement l'origine des images que nous avons utilisées dans ces travaux. Comme nous venons de le voir, l'IRM repose sur la récupération des ondes émises par les atomes d'hydrogènes lorsque leurs noyaux passent d'un état excité à un état stable. On utilise les atomes d'hydrogènes car ils sont très sensibles à la résonance magnétique et ces atomes sont constitutifs des molécules organiques. De plus, c'est un atome très simple car composé uniquement d'un proton et d'un électron. Pour réaliser une analyse par IRM, nous avons besoin de deux choses :

- Un champ magnétique puissant pour positionner l'ensemble des protons dans la même direction. Chaque proton possède un spin, propriété quantique intrinsèque, qui indique un sens de rotation et une direction. Pour pouvoir récupérer l'information de position de l'ensemble des atomes d'hydrogènes, il faut donc les positionner dans la même direction. Dans une IRM, le champ magnétique est produit par un aimant permanent ou un aimant supraconducteur et il a une puissance donnée en tesla (T). La puissance du champ magnétique est directement reliée à la qualité de l'image obtenue en améliorant le rapport signal sur bruit. Contrairement aux aimants permanents qui sont fabriqués à partir de matériaux ferromagnétiques qui produisent naturellement un champ magnétique, les aimants supraconducteurs utilisent la

supraconductivité pour produire des champs magnétiques puissants. La supraconductivité et la capacité qu'ont certains métaux ou alliages d'acquies une résistance électrique nulle lorsqu'ils sont refroidis à très basse température, proche du zéro absolue (-273,15°C). Dès lors, un courant électrique peut circuler indéfiniment sans perte et ainsi former un champ magnétique stable. Le plus gros défaut de ces aimants est la difficulté de garder l'ensemble du système à des températures aussi basses. Ils sont donc plongés dans de l'hélium liquide à -269°C avec un système de refroidissement et une enveloppe de vide pour éviter au maximum l'échange de chaleur.

- Des antennes capables d'émettre et de réceptionner un signal radiofréquence. Une fois que les protons sont dans la même direction, il faut dans un premier temps les exciter par l'envoi d'une onde électromagnétique. Lors de la relaxation, les protons vont à leur tour émettre une onde qui cette fois va être captée par une antenne réceptrice. La majorité des IRM possède des antennes émettrices directement dans leur structure, et les antennes réceptrices sont placées sur le patient au niveau des zones explorées.

3) Acquisition des images

Avant d'arriver à afficher des images sur un écran d'ordinateur, il faut prendre en compte différents paramètres. La zone que nous allons observer est appelée champ de vision (en anglais field-of-view (FOV)). Elle est définie par trois grand type de matériel et leurs paramètres. Le premier est le champ magnétique principal qui est formé par l'aimant de l'IRM. Le deuxième est le système de gradient qui permet la variation spatiale du gradient d'intensité du champ magnétique statique noté B_0 . Le dernier est formé par l'ensemble des antennes qui émettent et reçoivent des ondes

électromagnétiques avec une fréquence très précise. Comme expliqué en première partie, le champ magnétique principal permet d'aligner l'ensemble des spins des atomes d'hydrogène dans le même sens. Afin d'acquérir des images, il faut ensuite définir le FOV. Pour cela, nous plaçons des antennes sur la zone d'étude. Le choix des antennes se fait en fonction de la nature du tissu étudié, sa profondeur et ses caractéristiques physiques. On place ensuite un gradient magnétique B_0 perpendiculairement au tissu étudié. Il permet de modifier la fréquence de Larmor de chaque atome présent sur une tranche de tissu d'épaisseur définie. Lors de l'envoi d'une onde électromagnétique, uniquement les atomes qui ont la fréquence de Larmor correspondante vont s'exciter. En récupérant les ondes réémises via les antennes réceptrices, on peut alors connaître la position de l'ensemble des atomes d'hydrogènes de la tranche ciblée (Figure 9) (Yousaf, Dervenoulas, Politis 2018).

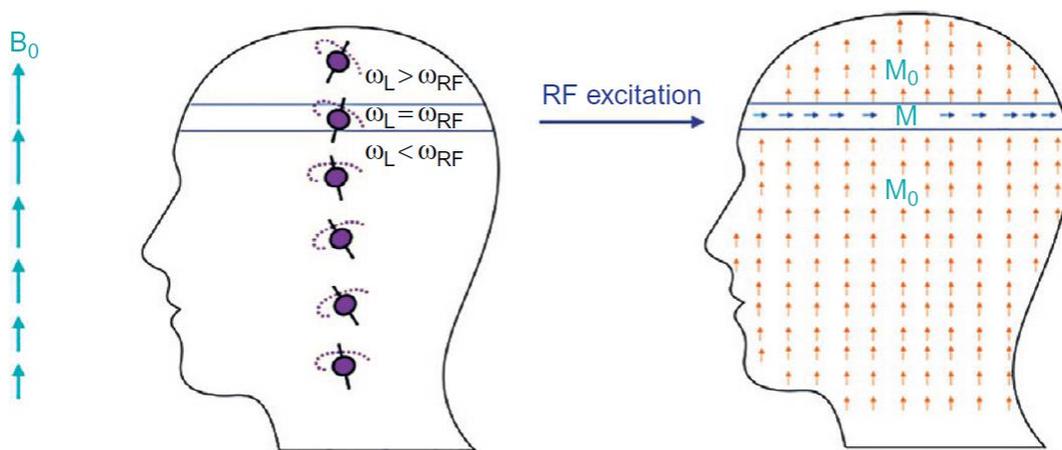


Figure 9. Schéma de modification de la fréquence de Larmor des atomes d'hydrogènes dans un gradient de champ magnétique. Source : Yousaf, Dervenoulas, Politis 2018

B) L'IRM Cardiaque

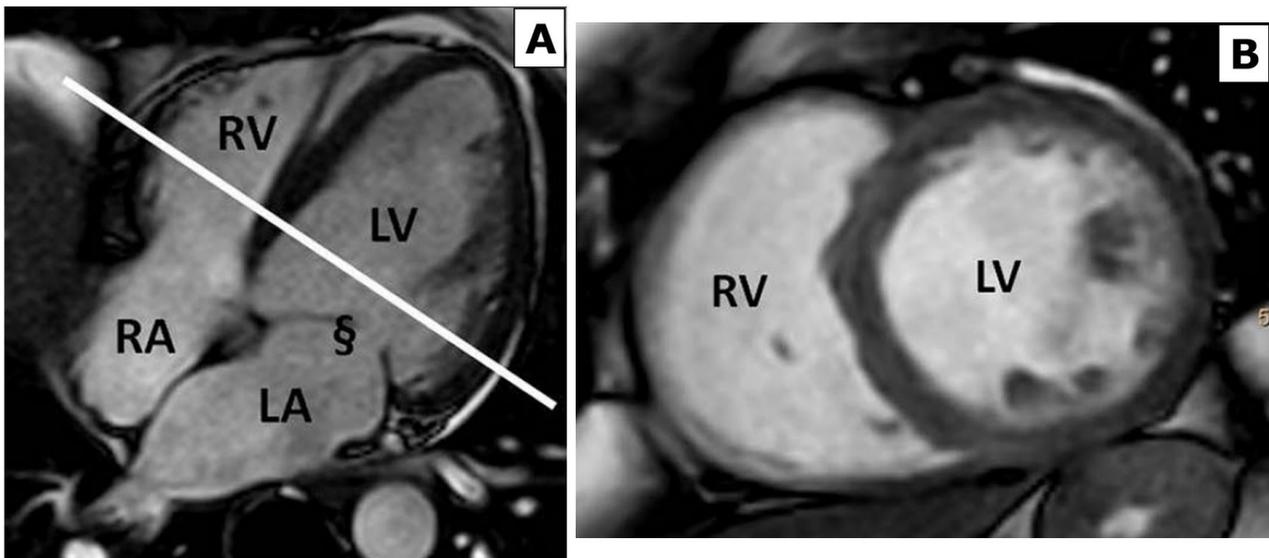
1) Principes

Les acquisitions d'images IRM prennent entre une et plusieurs minutes en fonction de la pondération et des paramètres utilisés. Or, le rythme cardiaque du chien est en moyenne de 120 battements par minute. Ainsi, lors de l'acquisition d'une session cardiaque le cœur du chien va battre entre 120 et 6000 fois environ. Pour éviter un flou cinétique énorme, qui rendrait les images inexploitable, il a fallu trouver des moyens de contourner ce problème. Une de ces premières avancées a été la synchronisation cardiaque. En branchant un électrocardiogramme (ECG) au niveau du patient depuis l'IRM ou en utilisant un périphérique qui mesure la saturation en oxygène au niveau de la langue il est possible d'acquérir les images à un temps précis du cycle. L'onde R devient alors le signal d'acquisition, et chaque image est enregistrée à ce moment précis. On peut alors reconstituer l'ensemble de la silhouette cardiaque par un ensemble de couches enregistrées exactement au même moment du cycle cardiaque et ainsi éviter un flou cinétique (Russo, Lovato, Ligabue 2020). Un autre élément à prendre en compte est la respiration de l'animal. Le cœur se situant dans la cage thoracique à proximité des poumons, les mouvements respiratoires vont très légèrement modifier sa position entre chaque acquisition. Il existe trois méthodes permettant de réduire le risque d'apparition d'artefact lié au mouvement respiratoire. La synchronisation respiratoire à l'instar de la synchronisation cardiaque permet d'acquérir les images à un moment précis du cycle respiratoire, cela permet de réduire efficacement le flou cinétique ou la formation d'artefact, mais cela augmente aussi considérablement le temps d'acquisitions car on ne récupère les images que sur un laps de temps court entre chaque respiration. Une deuxième méthode est de provoquer une apnée chez le patient. À l'inverse de l'IRM en médecine humaine qui se pratique avec un sujet conscient, l'IRM en médecine vétérinaire passe obligatoirement par l'anesthésie générale de l'animal. Lors d'un scanner, nous avons la possibilité de provoquer une apnée chez l'animal pour réduire au maximum les mouvements respiratoires. Le temps d'acquisition d'images via un scanner dure entre 20 et 40 secondes, ce délai reste compatible avec une apnée chez l'animal sans risque d'hypoxie. Or dans le cas de l'IRM, le temps

d'acquisition des images dure entre 5 et 20 minutes. Il est impossible de provoquer des apnées aussi longues sans risques pour l'animal. Cette méthode n'est malheureusement pas utilisable en médecine vétérinaire. La dernière méthode est l'acquisition d'image en temps réel. Cela regroupe un ensemble de nouvelles technologies qui permettent d'acquérir des images dans un laps de temps très court. Cette méthode n'est encore qu'au début de son développement mais elle permettra d'améliorer grandement la qualité des IRM cardiaques en médecine vétérinaire (Russo, Lovato, Ligabue 2020).

2) Les différentes coupes

Une deuxième avancée a été l'angle de vue utilisé. Les images IRM s'acquièrent selon 3 axes (sagittale, axiale et coronale) pour avoir un rendu en 3D. Or, du fait de l'inclinaison du cœur dans le thorax, ces coupes au niveau du corps ne coupent pas le cœur perpendiculairement. Nous avons donc mis en place des sections parallèles et orthogonales spécifiques à l'axe cardiaque qui sont principalement orientées suivant le petit axe ou le grand axe du cœur. Le grand axe correspond à une ligne tracée de l'apex du cœur jusqu'à l'atrium gauche en passant par le milieu du cœur. Cette vue nous permet de voir les quatre chambres du cœur, le ventricule et l'atrium gauche et droit. Le petit axe correspond à une perpendiculaire du grand axe au milieu du cœur. Comme nous l'avons vu en première partie, la position et l'axe du cœur varient de plusieurs dizaines de degrés en fonction de la race et du type morphologique du chien. La qualité de l'examen IRM sera alors dépendante du savoir-faire du technicien imageur, qui va manuellement placer les axes de vues pour chaque animal. On peut alors se déplacer sur ces différents axes pour faire apparaître les différents éléments d'intérêts. Ainsi, dans le cadre d'une maladie valvulaire dégénérative, on peut donc se placer au niveau de la valvule problématique et acquérir des images sur l'ensemble du cycle cardiaque. On obtient une image dynamique du fonctionnement de la valvule et du mouvement du sang pendant un cycle cardiaque, ce qui permet de mettre en évidence une atteinte ou non de celle valvule et en cas d'atteinte cela nous permet de la quantifier.



RV : Ventricule Droit
 LV : Ventricule Gauche

RA : Atrium Droit
 LA : Atrium Gauche

Figure 10. Coupe grand axe 4 cavités (A) et coupe petit axe (B) d'IRM cardiaque.
 Source : d'après Russo et al 2020

3) Pondération fiesta

Différents paramètres sont également à prendre en compte lors de l'obtention d'une image IRM. Comme vu précédemment après excitation, on récupère l'onde émise par les atomes d'hydrogènes lors de leur retour en phase stable. Pour avoir une image contrastée, c'est-à-dire avec des niveaux de gris différents permettant de différencier les éléments, il est nécessaire de jouer sur les propriétés physiques propres à chaque tissu. Les deux paramètres principaux qui jouent sur le contraste sont le temps de répétition (TR) qui est l'intervalle de temps entre deux excitations et le temps d'écho (TE) qui est l'intervalle de temps entre l'excitation et la réception du signal. En fonction des paramètres utilisés on note deux types d'images, appelées pondération T1 et T2. La pondération T1 correspond à un TR et TE court, ce qui a pour effet de faire apparaître le tissu graisseux hyper-intense (blanc) et l'eau hypo-intense (noir). À l'inverse, la pondération T2 correspond à un TR et TE long, ce qui a pour effet de faire apparaître le tissu graisseux hypo-intense et l'eau hyper-intense. Dans le cas de l'IRM cardiaque, il a fallu développer des méthodes d'imagerie particulières. En effet, le cœur est majoritairement composé de muscle (le myocarde qui possède ses propres propriétés physiques) et de sang, qui

possède également d'autres propriétés physiques. De plus, le sang est en circulation et ne reste pas plus d'une demi-seconde dans le cœur. Une nouvelle pondération avec des paramètres bien précis a donc vu le jour, la pondération FIESTA « Fast Imaging Employing Steady-state Acquisition ». Cette pondération correspond à un rendu d'image de contraste T2/T1, avec un TR et un TE très courts pour éviter la perte de signal d'éléments en mouvement rapide. Les tissus qui ont un ratio T2/T1 élevé (sang, liquide céphalo rachidien, ...) apparaissent en hypersignal et à l'inverse les tissus qui ont un ratio T2/T1 faible (myocarde) apparaissent en hyposignal. Cette pondération permet d'obtenir des images qualitatives pour les IRM cardiaques, nous l'avons donc choisi pour effectuer les images à la base de la modélisation holographique.

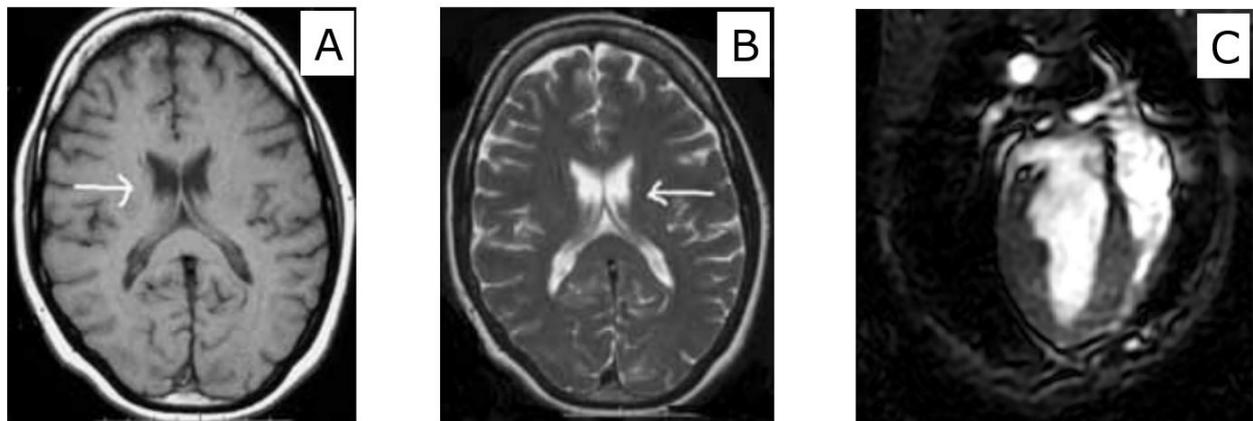


Figure 11. Exemple d'image IRM de cerveau en pondération T1 (A), T2 (B) et d'image IRM cardiaque en pondération FIESTA (C).

Source : d'après HawkCell et www.info-radiologie.ch

C) Fabrication d'image numérique en 3D

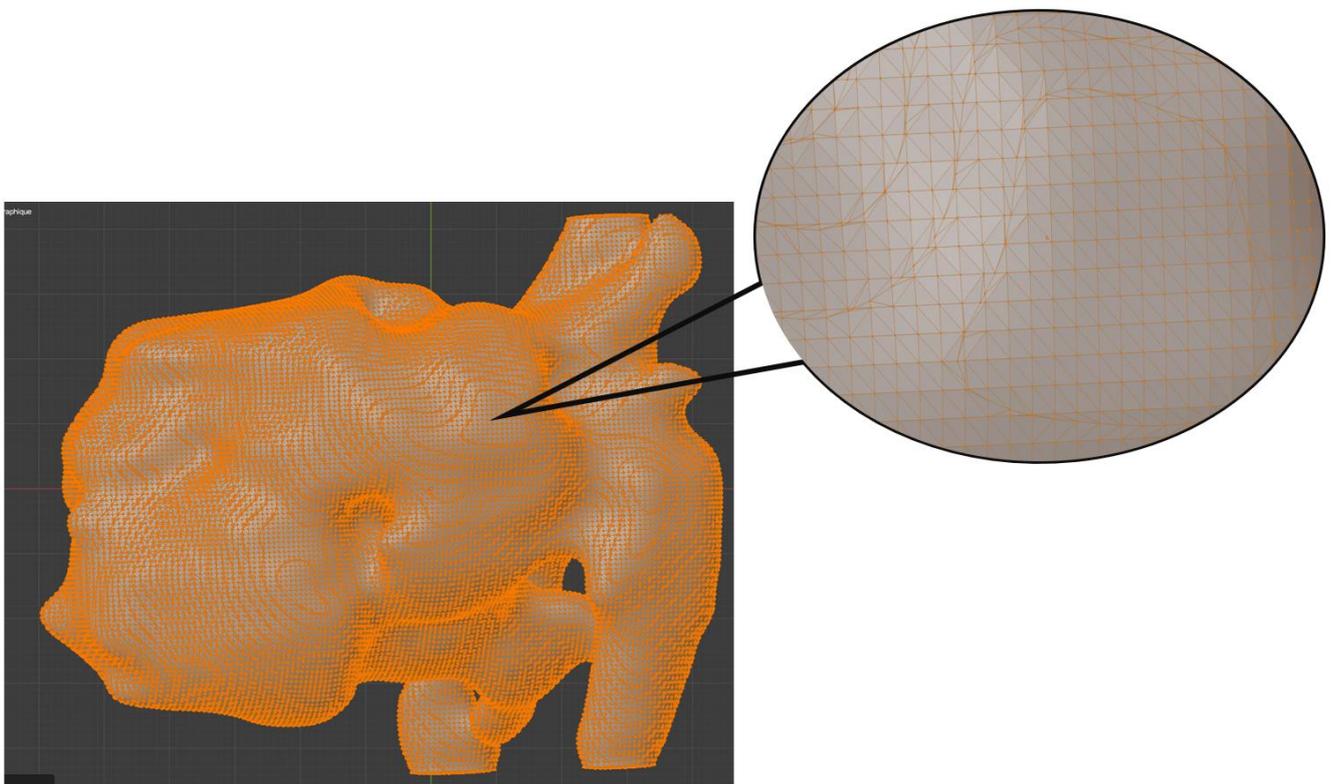
La création d'hologramme et de modèle en 3 dimensions animés réalistes sont désormais possibles grâce à des logiciels d'animation performants. Cependant ces logiciels sont également très complexes, ils nécessitent des connaissances et un savoir-faire important. Nous discuterons dans cette partie des difficultés rencontrées lors de la segmentation d'image IRM et la création d'hologramme. Le résultat à l'heure actuelle est perfectible pour notre application, pour cela nous avons déjà mis en place des solutions qui permettront d'améliorer notre modèle rapidement. Nous verrons également en dernière partie de cette

thèse, que malgré ses défauts, notre modèle pédagogique apporte déjà un ensemble d'éléments pertinents pour les étudiants.

1) 3D numérique

La notion de dimension correspond au nombre d'axe d'un référentiel sur lequel l'image va évoluer. Une image en 3 dimensions (3D) est une image qui évolue sur un repère composé de 3 axes orthonormés nommés X, Y et Z. Chaque point de l'image va donc posséder une coordonnée composée de 3 chiffres correspondant à sa position sur chacun des trois axes que l'on note (x, y, z) . Par convention, l'axe X correspond à la longueur d'un objet, l'axe Y à sa largeur et l'axe Z à sa hauteur. Le monde qui nous entoure peut être associé à un tel référentiel. C'est pour cela que la plupart des expériences qui se veulent immersives évoluent dans un repère en 3D pour être plus réaliste. Les images numériques en 3D peuvent rapidement devenir très volumineuses car il faut que chaque point de l'objet possède une coordonnée sur chacun des axes. Pour pallier ce problème, plusieurs formats d'image ont été inventés. Nous parlerons ici des deux principaux que nous avons utilisés pour ce projet, à savoir le format STL pour stéréolithographie et le format OBJ pour Objet 3D. Le format STL a été conçu pour le prototypage rapide et la fabrication assistée par ordinateur par imprimante 3D. Il ne décrit que la géométrie extérieure d'un objet 3D sans texture ni couleur. L'ensemble de l'objet est défini par une série de triangles (Figure 12). Chaque triangle est lui-même défini par des coordonnées cartésiennes (x, y, z) . Ce format d'image permet de modifier facilement l'image car celle-ci est très légère numériquement, on remplace les coordonnées de chaque point par celui d'un triangle qui comporte une multitude de points. Cependant, ce format ne permet de travailler que sur l'extérieur d'un objet creux et il est nécessaire de rajouter des textures pour le rendre plus réaliste. Le format OBJ a quant à lui été développé pour un logiciel d'animation 3D Advanced Visualizer. Il permet d'obtenir un objet en 3D en le définissant par des polygones ou des surfaces lisses. Les surfaces polygonales sont décrites informatiquement par un ensemble de sommets (accompagné de coordonnées de texture) et d'un ensemble de faces. L'image ainsi obtenue comporte plus d'informations qu'au format STL mais elle est également plus lourde et plus difficilement modifiable. Pour ce

projet, nous avons dans un premier temps travaillé sur des images STL dans un logiciel d'animation Blender puis nous sommes passés au format OBJ pour texturiser le cœur ainsi créé. Au même titre que les images IRM, l'absence de texture et de contraste rend impossible la différenciation des différentes structures que composent un cœur de chien. Il est alors important d'effectuer un travail de texturisation et d'animation avant d'obtenir un rendu animé et réaliste d'un cœur en fonctionnement. La fin de ce travail d'animation et de texturisation sera postérieur à la publication de cette thèse.



*Figure 12. Reconstruction de cœur au format STL avec le logiciel Blender. Un zoom est effectué pour mettre en évidence l'ensemble des triangles qui composent la structure.
Source : Antony VIGIE*

2) Segmentation IRM

Pour ce projet nous avons utilisé des images IRM effectuées par la société HawkCell. La machine utilisée est une General Electric explorer version G3. C'est une IRM de 1,5 T produit par un aimant supraconducteur. Les acquisitions des images ont été faites sur un chien mâle entier Beagle de 5 ans et de 13,6 kg en pondération FIESTA selon le grand axe 4 cavités et le petit axe centré sur le milieu du cœur. La fréquence cardiaque du chien durant l'examen été de 111 battements par minute. L'IRM a acquis un cycle cardiaque sur 30 points temporeux de 18 millisecondes (ms) chacun. La résolution spatiale des images est de 0,74 mm x 0,74 mm dans le plan de coupe et de 8 mm entre les coupes. En d'autres termes, l'IRM a acquis une succession de « tranches » du cœur, en partant de l'apex et en remontant jusqu'à l'aorte. Chacune de ses tranches a été acquise 30 fois durant 18 ms avec une résolution de 0,74 mm par 0,74 mm et la distance entre chaque tranche est de 8 mm. En ajoutant l'ensemble des couches successives on obtient alors le cœur en entier. L'acquisition IRM concerne l'ensemble d'un cycle cardiaque sur une couche avant de passer à la couche suivante, ce qui a pour effet que chaque couche n'a pas été obtenue sur le même cycle cardiaque. Les cycles cardiaques sont quasiment identiques, mais il peut y avoir une légère modification spatiale entre chaque cycle et donc l'apparition de très légers artefacts lors de la compilation de tous les plans entre eux. Une deuxième cause d'artefact est l'écart entre chaque couche. Lors de l'observation des images IRM dans le sens du petit axe, on passe d'une couche à l'autre ce qui ne pose pas de problème. Mais lors de la reconstruction 3D de l'ensemble du cœur, l'absence d'information sur 8 mm entre chaque coupe a pour effet de faire apparaître d'importants artefacts en « marche d'escalier ». Dans un deuxième temps, il a fallu découper de l'ensemble des organes la partie qui correspond au cœur. Pour cela, une application codée avec python a été créée. Le voxel est l'unité de base utilisée en imagerie IRM, on peut l'apparenter au pixel d'une photo 2D. Il correspond à un point d'un volume sur un maillage régulier constitué d'un ensemble de données comme la couleur, la densité, l'intensité mais également des informations spatiales et temporelles. À partir de l'algorithme des k-means, nous avons classifié chaque voxel en fonction de leur intensité. Une fois appliqué à chaque couche, nous avons récupéré l'ensemble des voxels dont l'intensité correspond au cœur.

La reconstruction 3D de l'ensemble des couches a été possible avec l'algorithme des marching cubes qui permet de récupérer la surface qui entoure un objet 3D à partir de l'ensemble des voxels qui le compose. Une fois l'ensemble de la silhouette cardiaque reconstituée, une exportation au format STL permet d'obtenir un objet 3D utilisable et modifiable. L'automatisation de ce processus amène un avantage considérable pour des projets futurs, à partir de cette application on peut recréer facilement en 3D n'importe quel organe en sélectionnant le groupe de voxel correspondant sur une image IRM.

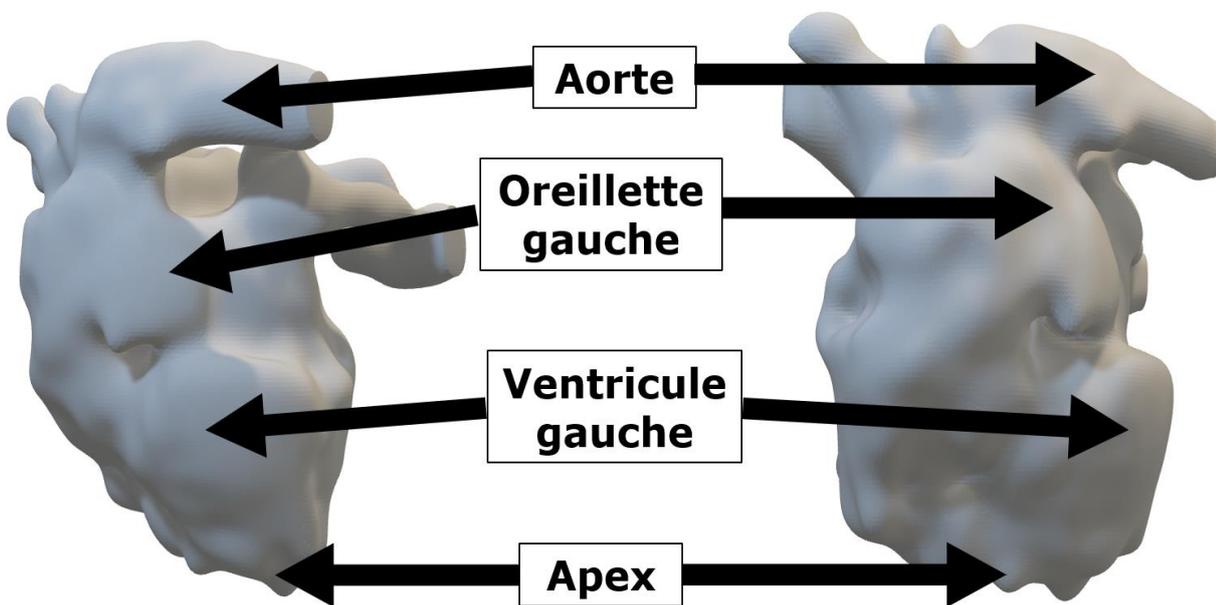


Figure 13. Reconstruction 3D de cœur de chien en vue latérale + 30° dans le sens horaire (gauche) et - 30° (droite) à partir d'image IRM. Source : Antony VIGIÉ

3) Modélisation et animation

L'IRM dynamique avec une acquisition en temps réel sur l'ensemble d'un cœur battant aurait dû nous permettre d'obtenir facilement et rapidement un hologramme de cœur animé. En effectuant un ensemble de photographies sur une pièce anatomique de cœur de chien, on peut récupérer une texture réaliste simplement. Le résultat attendu pour ce projet devait donc donner quelque chose d'équivalent à ce qui existe déjà en modélisation cardiaque humaine (Figure 14). Malheureusement, la présence d'artéfacts trop importants a rendu impossible l'animation et la texturisation des images que nous avons récupérées au format STL. Le cœur est un des organes les plus difficiles à modéliser. Il est entouré par les poumons, en mouvement rapide et continu. Il est composé d'un ensemble d'éléments très différents comme la graisse péricardique, les valvules ou le myocarde. L'ensemble de ces éléments couplé à une connaissance faible en animation 3D expliquent les difficultés à fournir un modèle 3D réaliste et animé dans les délais. Cependant, le rendu brut à l'échelle avec certains éléments anatomiques reconnaissables comme l'aorte au sein d'un mannequin de chien reste une très bonne base pour permettre aux étudiants de s'entraîner à l'auscultation cardiaque et à la prise en main des HoloLens 2. La poursuite de ce projet pourra permettre d'améliorer le réalisme de l'hologramme cardiaque et aider la compréhension de son fonctionnement par les étudiants. La récupération d'image scanner ainsi que des nouveaux modèles mathématiques pour la création d'hologramme permettent déjà actuellement de créer des modèles 3D très proches du réel avec une quantité moindre d'artéfacts. Il ne s'agit que d'une question de temps avant de pouvoir améliorer notre modèle.

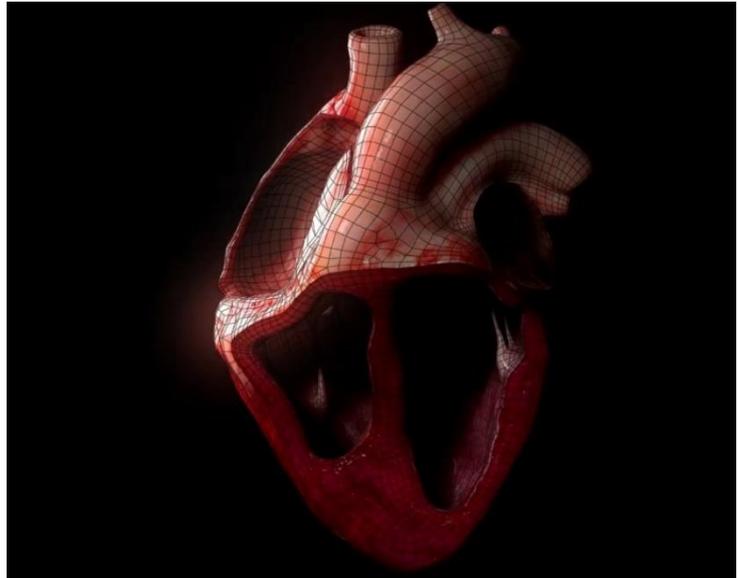


Figure 14. Coupe sagittale d'un cœur humain reconstitué informatiquement.

Source : Application INSIGHT HEARTH.

II/ La réalité augmentée

Dans cette partie nous allons présenter ce qu'est la réalité augmentée avant de présenter en détail les HoloLens 2 de Microsoft et pourquoi nous avons fait le choix de ces lunettes en particulier.

A) Définition et explications

1) De la réalité à la réalité virtuelle

L'humain évolue dans le monde qui l'entoure. Historiquement, on a rattaché l'ensemble des sens nécessaires pour interagir avec lui à 5 sens principaux : l'ouïe, l'odorat, le goût, le toucher et la vue. Contrairement à beaucoup d'espèces animales, l'homme a développé majoritairement la vue et le toucher. La bipédie et le pouce opposable sont des caractéristiques qui déterminent en grande partie notre rapport au monde. On définit le monde qui nous entoure par l'ensemble des éléments qui peuvent être captés par un de nos sens. L'ensemble de ce monde est décrit comme notre réalité. En opposition à la réalité, un autre concept s'est développé, la virtualité. Par définition, la virtualité regroupe l'ensemble des éléments qui n'existent que par simple possibilité ou éventualité, notre référentiel de réalité se limite à ce qu'on peut physiquement voir et toucher. Ainsi l'Homme a évolué dans un référentiel physique appelé réalité pendant des millénaires. Avec l'essor de l'informatique une nouvelle notion s'est ajoutée à la réalité. On retrouve des représentations de notre monde via des dessins depuis plus de 70 000 ans. La représentation d'un élément par rapport à l'élément en lui-même reste abstraite mais elle ne change pas notre référentiel et donc notre réalité. Que ce soit au travers d'un dessin ou du dernier écran plat, l'observation d'éléments non-réels reste ancrée dans notre monde. Il suffit de quitter l'écran ou le dessin des yeux pour s'en rendre compte. Le terme de réalité virtuelle (RV) a été prononcé pour la première fois en 1989 lors d'un salon professionnel à San Francisco par Jaron Lanier (Tisseau, Nedelec 2003). Il n'explicite pas vraiment le concept derrière ce mot. Le développement de l'informatique et du graphisme permet de mettre progressivement en application ce terme. Il consiste à remplacer notre

monde physique par un monde entièrement informatique. Une fois le casque de réalité virtuelle mis en place, le sujet est complètement coupé du monde qui l'entoure. Même si pour l'instant l'expérience se limite à la vue et à l'ouïe, de plus en plus d'avancées technologiques vont nous permettre prochainement de rajouter l'odorat et le toucher à cette nouvelle réalité. Les progrès en modélisation et en graphisme informatique permettent de nos jours de vivre des expériences de réalité virtuelle très proche du réel, si bien qu'elle est utilisée dans de nombreux domaines allant du simple divertissement à des actes thérapeutiques. Un des principaux défauts de cette technologie est qu'elle coupe entièrement le sujet du monde qui l'entoure ce qui peut entraîner des incompréhensions et des difficultés à évoluer dans un monde dans lequel notre corps n'est pas transposé. Pour pallier ce défaut une nouvelle technologie a vu le jour, la réalité augmentée.

2) Présentation de la réalité augmentée

Si l'on prend à une extrémité la réalité et à l'autre extrémité la réalité virtuelle, la réalité augmentée (RA) se situe sur l'ensemble du chemin qui sépare ces deux mondes. Au lieu d'enfermer le sujet dans un monde où l'ensemble de ce qu'il expérimente est virtuel, elle permet de garder le contact avec le réel en y ajoutant des éléments virtuels. Cela peut aller de simples mots écrits à la reconstruction complète en 3D de structures complexes et animées. Ronald T. Azuma (1997) a proposé une définition simple de la RA par « l'ensemble des applications vérifiant les trois propriétés suivantes : la combinaison du réel et du virtuel ; l'interaction en temps réel et l'intégration du réel et du virtuel » (Arnaldi, Guitton, Moreau 2018). Contrairement à la RV qui nécessite des équipements spéciaux, la RA peut être expérimentée très simplement. Un exemple très connu est l'application Pokemon Go. Elle permet au travers de son smartphone de voir évoluer et capturer des êtres imaginaires, les Pokémons, dans le monde réel. Avec l'utilisation de la caméra du smartphone de l'utilisateur, l'application retransmet sur l'écran le réel auquel elle intègre un être numérique, qui se déplace en temps réel en prenant en compte les éléments physiques de l'endroit filmé. Il nous suffit d'avoir une caméra, un écran et un logiciel capable d'afficher des images pour pouvoir l'expérimenter. La RA

amène aussi un degré de liberté inégalé. De nos jours, plus de 80% de la population française possède un smartphone. En se baladant sur l'ensemble du spectre du monde réel au monde virtuel, la RA a de nombreuses applications. Du simple divertissement sur smartphone, elle joue également un rôle dans l'apprentissage, la médecine, l'industrie et de nombreux autres domaines. Afin de rendre l'expérimentation de plus en plus réaliste et augmenter le champ d'application de la RA, Microsoft a développé des lunettes immersives, les HoloLens. Elles permettent d'intégrer parfaitement les éléments au monde réel, en englobant la quasi-totalité de notre champ de vision et en nous laissant les mains libres, elles permettent d'améliorer intensément l'expérimentation utilisateur. Nous rentrerons dans les détails de ces lunettes par la suite.

3) Explication de la réalité augmentée

Afin d'intégrer des éléments numériques dans le monde réel, il faut dans un premier temps un matériel capable de retransmettre numériquement l'environnement. Cela est permis par une caméra le plus souvent. Il faut ensuite définir la position et l'angle de vue de la caméra. C'est indispensable pour avoir un rendu réaliste, cet élément permet de déterminer la perspective et la dimension de l'objet ajouté. On peut ensuite ajouter l'élément numérique voulu. Pour finir, il suffit d'afficher ces images sur un support visible pour l'œil humain (Figure 15). On peut aller du simple écran de smartphone à des lunettes immersives complexes en passant par la vidéo projection. Un des éléments le plus complexe de la RA et la cohabitation entre les objets réels capturés par la caméra et les éléments virtuels rajoutés informatiquement. Pour que l'élément ajouté donne une impression de réel il faut qu'il soit parfaitement intégré. L'évolution de l'informatique et de l'intelligence artificielle aide considérablement dans ce domaine. De très nombreux algorithmes permettent de détecter les objets filmés, de les interpréter en tant que forme 3D et de les situer dans l'espace. Il en existe une multitude, mais leur rôle principal est de définir la position des objets dans l'espace en 3D à partir d'une trame 2D filmée. En développant la RA pour qu'elle soit accessible à tous et partout, il est impossible de référencer tous les objets possibles que l'on peut rencontrer. C'est à ce moment que l'intelligence artificielle intervient au travers de

l'apprentissage automatique. Pour résumer simplement, ce sont des programmes informatiques qui à partir d'une base statistique permettent aux ordinateurs d'apprendre en continue. Une fois que le programme a été mis en contact avec un objet simple comme un verre par exemple, il va garder en mémoire l'ensemble des éléments qui définissent cet objet comme un verre et il va pouvoir ressortir ces éléments lorsqu'il sera remis en contact avec un autre verre pour le reconnaître en tant que tel.

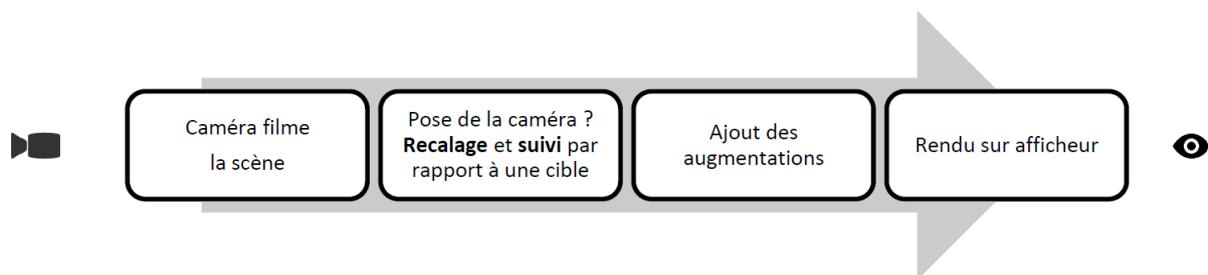


Figure 15. Base de la réalité augmentée.
Source : Havard 2018

B) Les HoloLens

1) Présentation et mode de fonctionnement

Pour améliorer le réalisme et l'interaction humain-machine, il est nécessaire d'utiliser des outils adaptés. Les lunettes de réalités mixtes HoloLens 2 de Microsoft en font partie. C'est un ordinateur holographique sans fil. Il se compose d'une visière transparente, d'un arceau, d'un ordinateur connecté et d'une batterie. Il se porte au niveau de la tête avec la visière au niveau des yeux. Cela permet de couvrir l'ensemble de notre champ de vision et d'avoir les mains libres. Il possède également 4 caméras pour le suivi de la tête, une caméra couleur RGB, une caméra pour la profondeur de champ et une centrale à inertie. L'ensemble de ces capteurs jouent le premier rôle de la mise en place de la réalité augmentée, connaître précisément la position et l'angle de vue de l'utilisateur. Leur position très proche des yeux permet de suivre en temps réel le déplacement et la position des yeux. Il peut modifier et repositionner l'élément ajouté. Une des forces de ces lunettes est la capacité à créer un hologramme et de le

maintenir dans l'espace comme un objet physique existant. Une fois mis en place, on peut s'approcher, tourner autour, se baisser ou se lever par rapport à l'hologramme qui va se comporter comme un élément réel. Cela veut dire qu'en se rapprochant d'un objet, la perspective et la taille de celui-ci vont être modifiées exactement comme elles sont modifiées lorsque l'on se rapproche d'un objet réel. Ensuite, l'ajout des augmentations se fait via des logiciels et applications. Fonctionnant sur le système d'exploitation Windows® cela lui permet d'avoir accès à une multitude d'application. Pour finir, le rendu sur afficheur se fait au niveau de la visière. Les éléments sont directement projetés sur une fine couche de verre avec une résolution de 2 K par œil et un angle de vue de 52°. Pour donner un ordre d'idée, la vision binoculaire humaine est d'environ 60° d'angle et 2K par œil correspond à une résolution de 47 pixels par degré de vision ce qui est la résolution minimale nécessaire pour lire un texte de taille de police 8. On peut donc différencier les éléments ajoutés du réel mais le résultat est plus que correct pour permettre une bonne immersion (Figure 16). L'ensemble de ces caractéristiques ont permis au HoloLens 2 de se placer en tant qu'équipement indispensable pour l'utilisation et le développement de la réalité augmentée.

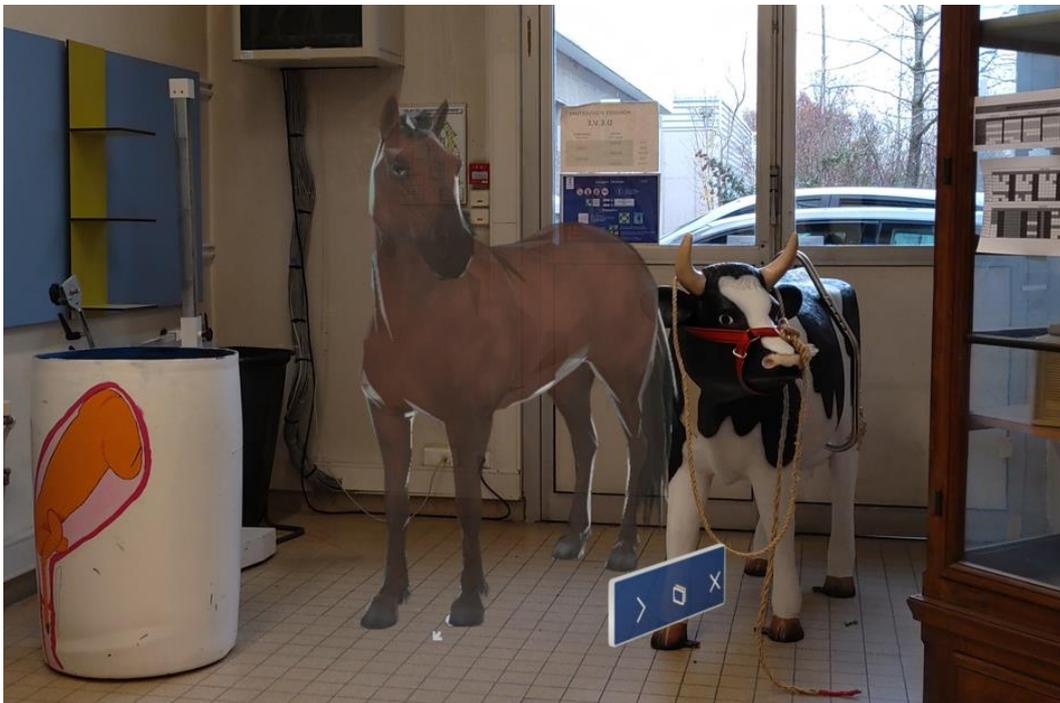


Figure 16. Exemple d'augmentation par les HoloLens 2.
Source : Antony VIGIÉ

2) Utilisation

Très ergonomique et d'un poids léger, les HoloLens 2 se mettent en place sur la tête de l'utilisateur facilement. Avec une sangle réglable on peut facilement l'ajuster à notre tour de tête pour permettre un maintien optimal. Une fois la visière devant les yeux, les éléments ajoutés viennent naturellement dans notre champ de vision. Une fois familiarisé avec les différents gestes, l'utilisation des lunettes devient très naturelle. La possibilité d'interagir directement avec les éléments ajoutés en les saisissant à la main apporte un plus considérable dans l'expérience utilisateur. De plus, les lunettes sont capables de s'adapter à toutes les circonstances (en dehors de l'obscurité complète), on peut donc les utiliser aussi bien en extérieur qu'en salle de travaux pratiques ou dans un amphithéâtre. Le réel intérêt qu'apporte cette technologie, les fonctionnalités des HoloLens 2 et leur monopole sur ce secteur font que la grande majorité du développement d'applications de RA dans les domaines de l'industrie ou de la médecine se font sur ces lunettes. Toute la partie conception industrielle vit actuellement une révolution. La réalité augmentée permet de donner vie très rapidement et à l'échelle des projets à partir de simple dessin 3D par ordinateur. Il n'y a plus besoin de faire et refaire des maquettes à chaque modification. On peut simplement créer, matérialiser et modifier à l'infini n'importe quel concept. Au niveau de la médecine, la RA a également permis d'importantes évolutions. Premièrement, la répétabilité de certains exercices permet au chirurgien de s'entraîner le nombre de fois nécessaire avant une opération sans utiliser ni consommables ni pièces anatomiques périssables. Deuxièmement, elle permet de préparer et de faire participer plusieurs personnes sur une même opération. Début décembre 2017 a eu lieu la première opération chirurgicale avec l'utilisation d'HoloLens. Elle a consisté à la pose d'une prothèse d'épaule. Après avoir effectué un scanner complet du patient, le chirurgien a pu effectuer numériquement la pose de prothèse sur le squelette du patient. Durant l'opération, l'ensemble des éléments nécessaires à la chirurgie (angle de coupe, axe et point d'ancrage) ont été communiqués directement sur le corps du patient via des hologrammes projeté sur la visière des HoloLens. Les lunettes ont également permis de filmer en direct l'opération qui été retransmise à quatre autres chirurgiens qui pouvaient suivre et apporter des informations au fur et à mesure de

l'opération. Actuellement une clinique à Nîmes (Gard) utilise la RA pour ses opérations de prothèse de genou. Les praticiens déclarent que cette technologie permet de poser avec précision ces prothèses ce qui a eu pour effet de réduire les potentielles gênes occasionné par ce type d'opération. Il est très difficile de dresser une liste exhaustive de l'utilisation que l'on peut faire avec ce type de lunettes, mais ce qui est sûr c'est que nous ne sommes actuellement qu'au début d'une révolution technologique qui va toucher une quantité de domaine considérable. Il suffit de faire essayer les HoloLens 2 par 10 personnes néophytes pour avoir 10 nouvelles idées d'utilisations différentes.

3) Intérêts pédagogiques

Cette technologie étant en plein essor, de nombreuses études ont tenté de démontrer l'utilité de la RA dans l'apprentissage. Nous discuterons ici de résultat d'étude qui touche uniquement le domaine médical, mais on peut noter que les mécanismes d'apprentissages peuvent se transposer dans de nombreux autres domaines. Dans le cas de l'apprentissage de l'anatomie, la majorité des enseignements se font théoriquement puis visuellement avec l'utilisation de pièces anatomiques. À VetAgro Sup par exemple, après plusieurs cours théoriques, les étudiants effectuent des dissections sur cadavres dans le module d'anatomie. Le problème est qu'il est de plus en plus difficile de se procurer des pièces anatomiques, et que celles-ci se conservent difficilement. Avec l'augmentation du nombre d'étudiants par promotion, la partie pratique est de plus en plus remise en cause. Or la dissection est indispensable pour assurer une qualité d'enseignement suffisante dans le métier de vétérinaire. Une publication (Duarte et al. 2020) regroupe un ensemble d'étude sur l'utilisation de la RV et de la RA en comparaison avec des enseignements traditionnels sur différents sujets médicaux. La grande majorité des études montrent qu'à minima, l'utilisation de modèle 3D en RV (Ellington et al. 2019) donne les mêmes résultats que l'apprentissage traditionnel et que l'utilisation de la RA donne même de meilleurs résultats académiques dans certaines conditions (Küçük, Kapakin, Gökteş 2016). On peut également noter que malgré un coût d'investissement important, sur du long terme l'utilisation de ces technologies réduit le coût d'éducation (Duarte et al. 2020).

L'augmentation du nombre de publications de manière exponentielle d'année en année sur ce sujet démontre un intérêt croissant pour ces technologies. Leur utilisation deviendra la norme dans quelques années qui sera assurément suivie par le développement et l'utilisation à grande échelle des lunettes immersives comme les HoloLens 2.

III/ L'application Cysart et le modèle pédagogique :

Nous discuterons ici d'une sous-partie développée par Abys Medical pour ce projet. Cysart fait partie d'un projet de grande envergure d'aide à la chirurgie humaine et vétérinaire via la réalité augmentée pour fin 2023. Une grande partie du développement de cette application est confidentielle et ne sera donc pas présentée ici. Plusieurs éléments ne sont pas encore installés dans l'application, ils nécessitent plus de développement. Les éléments présentés dans cette partie sont ou seront dans l'application finale en 2023 au plus tard.

A) Développement

1) Concept de base

En débutant les enseignements cliniques à VetAgro Sup les étudiants se rendent compte de différents éléments. Premièrement, de nombreux gestes techniques qui ont été vus et revus théoriquement ne se déroulent pas forcément comme prévu quand il faut passer à la pratique. Deuxièmement, le temps est souvent un facteur clef, il est difficile d'effectuer des gestes pour la première fois en étant pressé par le temps. Troisièmement, dans le cadre de l'auscultation cardiaque, il se déroule plus d'un an entre les derniers cours sur le sujet et la réalisation. L'ensemble de ces éléments a amené l'idée de mettre en place un modèle pédagogique permettant aux étudiants de revoir leurs cours et de s'entraîner sur un modèle à taille réelle. Lors de l'auscultation cardiaque, on se base sur des repères anatomiques externes pour retrouver la projection d'éléments anatomiques qui se situent à plusieurs centimètres en profondeur et au travers de nombreux organes (peau, muscles, os, ...). De manière générale, l'Humain se base en majorité sur sa vue pour appréhender et comprendre le monde qui l'entoure. Avoir le pouvoir de voir au travers d'éléments opaques et se concentrer sur l'organe cible est un fantasme très répandu chez les étudiants. La réalité augmentée couplée à de l'imagerie de pointe

et des lunettes performantes permet à ce fantasme de devenir réalité. En plaçant un hologramme réaliste au sein d'un mannequin et grâce au suivi des mains de l'utilisateur par les HoloLens 2 on retrouve cette idée de possibilité de voir au travers du corps du mannequin.

2) Mise en place et positionnement des mains dans l'espace

La première difficulté de la mise en place de ce modèle est la mise en place de l'hologramme de cœur en position physiologique au niveau du mannequin ainsi que l'intégration de la position du stéthoscope par rapport à celui-ci. Tout l'intérêt de ce modèle est de reproduire avec précision une auscultation cardiaque réelle tout en permettant à l'utilisateur d'observer directement la zone auscultée sur le cœur. Pour cela, les lunettes doivent connaître avec précision la position de l'hologramme dans l'espace mais également celle du stéthoscope pour pouvoir ajuster en temps réel la projection de l'auscultation sur l'hologramme. La position de l'hologramme sur un mannequin à l'échelle est permise par des puces de positions. Informatiquement nous plaçons des points dans l'espace dont la position selon trois axes (x, y et z) par rapport au centre du cœur holographique est connue de manière précise. On vient ensuite positionner l'hologramme du cœur à une distance fixe par rapport à chaque point. Une fois que la position est fixée, il suffit de reporter la position physiologique d'un cœur de chien par rapport à ces points en mesurant avec précision la distance entre chaque point et le centre de l'hologramme. Une fois que tous ces paramètres sont connus, il suffit de matérialiser physiquement la position des points informatiques sur le mannequin. Pour cela des gommettes de couleurs sont positionnées à la distance correspondante. Une fois que l'application est lancée, il suffit de calibrer les puces de position sur les gommettes placées pour calibrer l'hologramme en position physiologique à l'intérieur du mannequin. Un système de verrouillage permet de bloquer cette position, ainsi peu importe les manipulations effectuées l'hologramme reste en position physiologique. On peut alors tourner autour du mannequin, le déplacer ou changer d'angle de vue sans que cela influe sur la position de l'hologramme par rapport au mannequin. Il faut ensuite que les lunettes prennent en compte la position du stéthoscope dans l'espace. Pour cela, nous nous sommes simplement appuyés sur la reconnaissance

gestuelle qui est intégrée dans les HoloLens 2. En effet, ces lunettes fonctionnent quasi-exclusivement à la reconnaissance vocale ou gestuelle pour pouvoir interagir avec des éléments non-physiques. La reconnaissance gestuelle est permise par un maillage cartographique (mapping) informatique de l'environnement. Des caméras filment en permanence l'environnement de l'utilisateur et des outils informatiques permettent de détecter des éléments connus, ici les mains de l'utilisateur (Figure 18). En reconnaissant les mains de l'utilisateur ainsi que leur position dans l'espace (hauteur, latéralité et profondeur, ce qui correspond aux axes x, y et z en informatique) les HoloLens 2 sont capables de faire le lien entre le monde réel et virtuel. Une fonction de rayon permet également d'interagir avec les hologrammes à distance, en tenant les mains d'une certaine façon, les lunettes sont capables de calculer la direction d'une droite qui partirait du centre de notre paume. Plusieurs fonctions sont rattachées à ce rayon comme le clic gauche ou droit sous Windows mais surtout elle permet de voir avec précision la direction pointée par le centre de notre paume. En tenant la capsule d'un stéthoscope avec notre main de cette façon (Figure 17) on peut ainsi donner la direction du pavillon et observer par projection sur l'hologramme la zone exacte de l'auscultation.

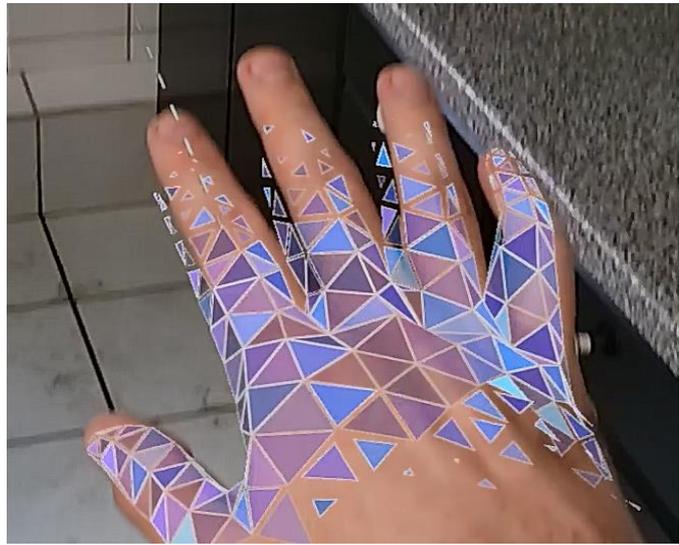


Figure 18. Exemple de « mapping » informatique pour la reconnaissance de la main par les HoloLens 2.
Source : Antony VIGIÉ



Figure 17. Exemple de tenu du stéthoscope avec rayon émanant. Source : Antony VIGIÉ

3) Modèle utilisé

Le modèle utilisé est formé d'un mannequin de chien d'une part et de l'hologramme d'un cœur de chien d'autre part. Le mannequin est un modèle en plastique dur (PVC) représentant une chienne labrador d'environ 25 kg et qui est normalement utilisé comme mannequin d'obstétrique. À l'échelle et d'un poids faible, il peut se déplacer facilement et être positionné sur une table pour faciliter l'auscultation par les étudiants. Il respecte les proportions et l'anatomie de chien. On peut regretter l'absence de côtes palpables pour se repérer plus facilement au niveau des zones d'auscultation. Couplé à ce mannequin, on retrouve la projection holographique cardiaque créée à partir des images IRM (Figure 19). Elle est accompagnée d'une interface avec des informations et des rappels de cours sur l'auscultation cardiaque. Il est possible de mettre différents éléments en surbrillance pour retrouver plus facilement l'anatomie cardiaque. Le rayon projeté sur l'hologramme permet de situer avec précision la zone auscultée. On peut basculer simplement d'une vue extérieure à une coupe sagittale du cœur. Cela permet de mettre en corrélation la zone auscultée et la zone anatomique précise. Dans le cas d'un souffle cardiaque, le *punctum optimum* de ce souffle nous permet d'orienter notre diagnostic sur son origine. En voyant directement la valvule que nous avons sous notre pavillon de stéthoscope au moment où le souffle est le plus audible, on peut retrouver quelle valvule est atteinte.

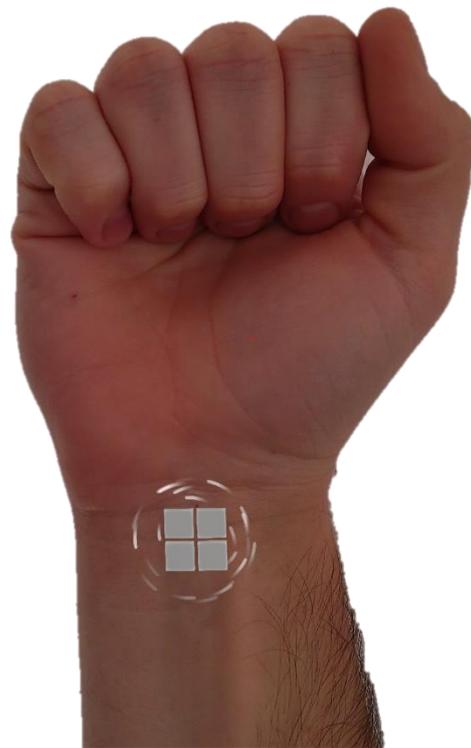


Figure 19. Positionnement de l'Hologramme du cœur sur le mannequin.
Source : Antony VIGIÉ

B) Fonctionnement

1) Prise en main

Le modèle ainsi que les HoloLens 2 seront mis à disposition des étudiants dans la salle de simulation de VetAgro Sup campus vétérinaire. La salle fonctionne avec des horaires d'ouverture libres sur lesquels les étudiants peuvent venir et utiliser les différents modèles présents. En fonction du succès de ce modèle, la mise en place de réservation à son utilisation pourra être mise en place. Le modèle est prévu pour être utilisé en autonomie, pour cela il faut que toutes les étapes de son utilisation soit trivial ou explicité en détail. La première étape sera l'installation. En arrivant sur l'atelier, les étudiants trouveront le mannequin et les HoloLens 2. Il faut tout d'abord positionner les lunettes sur la tête avec la visière à hauteur des yeux. Les HoloLens 2 sont équipées d'une vis de réglage pour ajuster le bandeau au tour de tête de chacun. Il faut ensuite tenir appuyé sur le bouton power pendant 1 seconde pour allumer les lunettes. Un logo Windows apparaît avec un son correspondant au démarrage. Après 20 secondes, à l'instar du démarrage d'un ordinateur Windows, une fenêtre de connexion apparaît sur laquelle il faut entrer un mot de passe. Une fois cette étape effectuée, le menu Windows apparaît à l'écran. Si rien n'est affiché à sur la visière sauf les rayons émanant de la main, il faut l'ouvrir manuellement. Pour cela, il faut fermer le poing et présenter l'intérieur de son poignet devant soit à hauteur des yeux. Un hologramme représentant le logo de Windows apparaît sur le poignet (Figure 20). À l'aide de son index gauche, on peut venir toucher ce logo pour ouvrir le menu démarrer. Au niveau du menu on



*Figure 20. Geste pour ouvrir le menu démarrer dans HoloLens 2.
Source : Antony VIGIÉ*

retrouve différents éléments ou informations comme la batterie restante, les paramètres ou la galerie de photo. On retrouve également épinglé en première page l'application Cysart. On peut donc noter qu'il faut maîtriser une succession d'étapes avant d'arriver à l'application nécessaire au fonctionnement du modèle. Certaines de ces étapes sont triviales pour des étudiants d'écoles supérieures habitués à l'informatique. Mais d'autres étapes sont beaucoup plus complexes pour des personnes novices dans l'utilisation de la réalité augmentée, comme le fait d'interagir avec des éléments non-physiques ou d'utiliser les rayons émanants. Pour cela, nous mettons en place un ensemble de fiches explicatives qui sont fixées à côté du mannequin pour permettre aux étudiants de prendre en main cette technologie plus facilement.

2) Utilisation du modèle

Pour utiliser ce modèle, les étudiants n'ont besoin que de leur stéthoscope. Une fois les lunettes mises en place et l'application lancée, il suffit de suivre les étapes qui s'affichent à l'écran. Après ouverture de l'hologramme, il faut dans un premier temps le recalibrer. Cette étape est très importante car le but premier de ce modèle est d'entraîner les étudiants à retrouver les aires d'auscultations cardiaques avec leur stéthoscope. Si l'hologramme cardiaque ne se retrouve plus en position physiologique, les aires de projections par rapport au mannequin seront faussées. Pour cela, à l'ouverture de l'application une question fermée demande la vérification des puces de position. Si celles-ci ne sont plus en position, un menu permettant de les repositionner s'ouvre. Une fois cette étape terminée, l'étudiant peut se déplacer et tourner autour du mannequin sans que cela n'influe sur la projection holographique. Un programme natif de Microsoft permet de calibrer les hologrammes à la vue de l'utilisateur en 3 min. Il consiste à l'apparition successive de « gemmes » numériques que l'on doit suivre du regard pour permettre aux caméras de suivi des yeux de calibrer parfaitement les éléments ajoutés à la vue de chaque individu. Un tutoriel est également disponible pour apprendre les gestes de bases comme ouvrir le menu Windows ou cliquer en utilisant les rayons émanants de la main. Il faut environ 1 à 2 heures d'utilisation pour commencer à être à l'aise avec les gestes et les éléments ajoutés. Dans le cadre d'un modèle pédagogique,

le temps d'adaptation peut être un frein à son utilisation. La salle de simulation est ouverte sur des horaires correspondant aux horaires de travail des étudiants. Ils n'ont pas beaucoup de temps disponible durant ces horaires. Il est donc important d'explicitier au maximum l'utilisation des HoloLens 2 et l'utilisation du modèle au travers de vidéos explicatives ou de fiches imprimées. Laissés en autonomie, ils peuvent également revenir utiliser le modèle plusieurs fois afin de se familiariser complètement avec cette technologie.

3) Fonctionnalités à développer

Le retard pris pour différentes raisons n'a pas permis la mise en place d'essais sur le terrain et de retour utilisateur. Le modèle est utilisable en l'état mais en utilisant une nouvelle technologie, il est difficile de prévoir certains problèmes que les utilisateurs peuvent rencontrer. De nombreux ajustements vont être nécessaires au fur et à mesure que les étudiants utiliseront ce modèle. Ce projet se veut participatif et en développement continu. Mon nom et mes coordonnées sont sur les fiches explicatives et un paragraphe invite les utilisateurs à me faire part de leurs remarques et de leurs idées d'améliorations. Il existe une fonction de direct et d'enregistrement vidéo. Cela permet de profiter du modèle à plusieurs personnes et de repartir avec la vidéo de notre auscultation. On peut alors la voir et la revoir, regarder ce qu'on a pu oublier ou manquer. Un bon nombre d'amélioration se feront naturellement en parallèle du développement de l'application Cysart. La fin du développement est prévue pour 2023, plusieurs éléments comme les puces de positions ont été développées en avance pour répondre au besoin de notre modèle pédagogique. À l'inverse, certains éléments comme la possibilité d'avoir l'ensemble des cours de cardiologie sous forme de fiche accessible directement depuis l'application ne sont pas encore disponibles.

C) Utilité pour les étudiants

1) Découverte de la réalité augmentée et prise en main des HoloLens 2

Convaincu de l'intérêt que cette technologie va apporter au monde vétérinaire, il nous semble important de permettre aux étudiants de s'y familiariser le plus tôt possible. Le choix des HoloLens 2 de Microsoft pour introduire cette technologie est fait par simplicité. C'est un équipement onéreux, mais actuellement il n'y a que très peu de concurrence sur ce secteur. Ce monopole fait que la grande majorité des applications créées sont optimisées pour cet outil et qu'il est donc difficile de s'en passer. Hormis ces éléments, ces lunettes sont capables de prouesses technologiques impressionnantes. Il est important d'être confronté au maximum des possibilités qu'apporte cette technologie afin d'avoir une vision la plus complète possible sur la RA. Afin de développer ce segment de la médecine vétérinaire, ce projet a pour but de faire découvrir les possibilités permises par les HoloLens 2 au maximum d'étudiants. Pour commencer à avoir des idées d'utilisations possibles, il faut dans un premier temps être à l'aise avec ces lunettes. Lors de la première utilisation, nos sens sont perturbés. On a du mal à interagir avec les éléments augmentés qui apparaissent devant nos yeux et on reste figé sur place comme lorsqu'on regarde un simple écran de télévision. On est également égaré dans les différents menus et on a du mal à naviguer dans l'interface en utilisant nos mains dans l'air. Petit à petit, après plusieurs heures d'utilisations, on commence à s'habituer aux éléments et on découvre avec joie une multitude de possibilités. On se met à marcher à côté des éléments, on tourne autour, on se penche ou on s'approche pour voir de plus près. C'est à ce moment que l'on prend conscience du potentiel que cette technologie peut nous apporter dans notre apprentissage et dans notre métier. Mais pour arriver à ce stade, il est nécessaire de pouvoir s'approprier les lunettes. Une simple présentation même complète et imagée n'arrive pas à faire comprendre ce que l'on vit en essayant ces lunettes. Pour cela, il faut au minimum les utiliser 1 à 2 heures. C'est le but principal de ce modèle, faire réaliser aux étudiants des possibilités que l'imagerie de pointe couplée à la RA permet déjà actuellement et permettra dans quelques années.

2) S'entraîner et revoir l'auscultation cardiaque

Durant les premières années d'études, les étudiants doivent apprendre une quantité de cours importante. Parmi ces cours, figure l'auscultation cardiaque. L'apprentissage théorique de l'auscultation cardiaque semble suffisant pour la grande majorité des étudiants. Des examens viennent vérifier l'assimilation et la compréhension théorique pour permettre à l'étudiant de passer à l'année supérieure. Pour beaucoup d'étudiants l'apprentissage théorique sans pratique ne permet qu'une assimilation partielle des connaissances. Or, il se passe 1 à 2 ans entre les derniers cours théoriques et la pratique pour l'auscultation cardiaque. De plus, la partie pratique c'est-à-dire comment tenir son stéthoscope, où le placer exactement, retrouver les aires de projections sur un chien vivant, n'est que très rapidement présentée et sans démonstration durant les cours magistraux. L'apprentissage de la pratique se fait beaucoup en autonomie et en observant les personnes plus expérimentées en clinique. Ce modèle permet aux étudiants qui le souhaitent de pouvoir s'entraîner en autonomie sur un geste simple mais indispensable. Il permet également de faire un rappel général sur l'auscultation, la notion de souffle cardiaque et sur l'anatomie cardiaque. En intégrant des fiches explicatives au modèle, les étudiants peuvent revoir leurs cours des années précédentes de manière ludique et complète. Ils peuvent aussi lier la théorie à la pratique en effectuant l'ensemble des gestes nécessaires sur un mannequin. Le dernier point est la représentation 3D du muscle cardiaque ainsi que sa position physiologique. L'apprentissage de l'anatomie peut poser des difficultés à se représenter les organes dans l'espace et en 3 dimensions à partir de photo ou de schéma. Avec une représentation 3D du cœur, les étudiants qui ont du mal à s'imaginer la position physiologique du cœur chez un chien pourront ainsi s'en faire une représentation précise.

3) Limite du modèle et amélioration prévue

La première limite de ce modèle pédagogique est la qualité de l'hologramme cardiaque. En effet, le réalisme de l'hologramme cardiaque est un des points principaux à respecter pour permettre une utilisation correcte du modèle. Pour avoir une compréhension optimale du fonctionnement cardiaque et de son cycle il est important d'avoir un modèle

représentatif. Pour le muscle cardiaque, cela passe principalement par un respect de l'anatomie et un contraste suffisant pour différencier les éléments qui le constituent. L'animation d'un cycle complet est également très importante. Le muscle cardiaque effectue un enchaînement de contractions et de relaxations en continu et rapidement. Pour pouvoir appréhender le cycle dans son ensemble, il est important de pouvoir observer son fonctionnement de manière dynamique. La présence d'artefact en trop grande quantité lors de la reconstruction 3D de la silhouette cardiaque à partir d'image IRM a rendu impossible la texturisation de l'hologramme ainsi que son animation. À l'heure actuelle, le modèle n'est pas suffisamment abouti pour aider efficacement les étudiants. Cependant, en observant les modèles humains actuels, il est certain que notre modèle sera complètement opérationnel et réaliste en peu de temps. Nous avons fait le choix de faire l'ensemble de ce modèle par nous-même. Il existe déjà des modèles 3D de cœur animé que l'on peut acheter sur internet et que l'on peut intégrer très facilement à notre application. Cela reste une solution envisageable en cas d'échec à améliorer notre modèle.

La deuxième limite est l'utilisation d'un mannequin par rapport à un animal vivant. En effet, même si celui-ci est très réaliste et à l'échelle, il ne peut être comparé à un animal vivant. En condition réelle, il faut pouvoir s'adapter à chaque animal, certains sont peureux et se laissent difficilement approcher, d'autres sont au contraire très expressifs et bougent continuellement. On doit alors trouver des solutions pour parvenir à faire une auscultation cardiaque convenable. Dans ces situations, l'entraînement en amont permet d'appréhender plus sereinement ces imprévus et de se concentrer sur le principal.

Nous laissons également la possibilité de continuer à développer ce modèle pour le compléter. De futurs projets scolaires pourront permettre la mise en place de nouveaux modèles anatomiques dans l'application. On peut facilement imaginer qu'après quelques années le modèle comporte l'ensemble de l'anatomie du chien à l'échelle et à taille réelles. Il pourra ainsi devenir un plus considérable pour l'apprentissage de l'anatomie du chien, en comportant l'ensemble des organes et du squelette en 3D. On aura alors peut-être une solution à la difficulté croissante de se fournir en pièce anatomique et en cadavre pour les dissections des étudiants.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La réalité augmentée est une nouvelle technologie qui trouve des applications dans une multitude de domaines comme l'industrie, la communication ou la médecine. En permettant d'ajouter des éléments numériques au monde qui nous entoure et de les faire interagir avec le monde physique en temps réel, un nouveau champ des possibles s'ouvre pour l'Humanité. Convaincu que cette technologie sera la norme avant la fin de ce demi-siècle, il est important de s'y confronter et de s'y familiariser le plus tôt possible.

Ce projet de thèse permet d'apporter une nouvelle approche pédagogique pour les étudiants. L'apprentissage d'un acte commun couplé à une nouvelle technologie dans une salle de simulation permet aux étudiants de s'entraîner en autonomie de façon ludique et pertinente. Cet entraînement possède un triple effet bénéfique. Le premier est le fait de pouvoir mieux maîtriser l'auscultation cardiaque avant de l'expérimenter lors d'une consultation réelle, ce qui permet de l'aborder plus sereinement, d'augmenter la vitesse d'apprentissage et d'améliorer la prise en charge globale de l'animal. Le deuxième est le côté ludique qu'apporte la nouveauté. Même le meilleur modèle peut devenir inutile s'il n'est pas utilisé, en intégrant une nouvelle technologie ce modèle sera nécessairement attractif auprès des étudiants. Le dernier effet bénéfique est la possibilité de rencontrer une nouvelle technologie dès le début du cursus vétérinaire. La mise à disposition de lunettes de réalité augmentée comme les HoloLens 2 couplée à une application médicale dans un cadre scolaire permet d'élargir la vision du monde vétérinaire auprès des étudiants. Cela sera une source d'inspiration et de motivation pour modeler le futur du métier de vétérinaire.

Bibliographie :

ARNALDI, Bruno, GUITTON, Pascal et MOREAU, Guillaume, 2018. *Réalité virtuelle et réalité augmentée: Mythes et réalités*. ISTE Group. ISBN 978-1-78405-467-0.

BANGASSER, Debra A. et SHORS, Tracey J., 2010. Critical brain circuits at the intersection between stress and learning. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. juillet 2010. Vol. 34, no. 8, p. 1223-1233. DOI 10.1016/j.neubiorev.2010.02.002.

BRIDGE, Holly et CLARE, Stuart, 2006. High-resolution MRI: *in vivo* histology? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 29 janvier 2006. Vol. 361, no. 1465, p. 137-146. DOI 10.1098/rstb.2005.1777.

BRUYETTE, David (éd.), 2020. *Clinical small animal internal medicine: two-volume set*. 1599 p.

DUARTE, M.L., SANTOS, L.R., GUIMARÃES JÚNIOR, J.B. et PECCIN, M.S., 2020. Learning anatomy by virtual reality and augmented reality. A scope review. *Morphologie*. décembre 2020. Vol. 104, no. 347, p. 254-266. DOI 10.1016/j.morpho.2020.08.004.

ELLINGTON, David Rich, SHUM, Phillip Corey, DENNIS, Eva Adiki, WILLIS, Heather Lynn, SZYCHOWSKI, Jeff Michael et RICHTER, Holly Elizabeth, 2019. Female Pelvic Floor Immersive Simulation: A Randomized Trial to Test the Effectiveness of a Virtual Reality Anatomic Model on Resident Knowledge of Female Pelvic Anatomy. *Journal of Minimally Invasive Gynecology*. juillet 2019. Vol. 26, no. 5, p. 897-901. DOI 10.1016/j.jmig.2018.09.003.

FOX, Philip R., 2012. Pathology of myxomatous mitral valve disease in the dog. *Journal of Veterinary Cardiology*. mars 2012. Vol. 14, no. 1, p. 103-126. DOI 10.1016/j.jvc.2012.02.001.

GHIO Alain. L'onde sonore : réalités physiques et perception. Auzou P.; Rolland V.; Pinto S. ; Ozsancak_C. Les dysarthries, Solal, 2007. hal-01616690

HÄGGSTRÖM, J., HÖGLUND, K. et BORGARELLI, M., 2009. An update on treatment and prognostic indicators in canine myxomatous mitral valve disease. *Journal of Small Animal Practice*. septembre 2009. Vol. 50, p. 25-33. DOI 10.1111/j.1748-5827.2009.00800.x.

HARBISON, J., 2017. 'The old guessing tube': 200 years of the stethoscope. *QJM*. janvier 2017. Vol. 110, no. 1, p. 9-10. DOI 10.1093/qjmed/hcw108.

HAVARD, Vincent, 2018. Développement de méthodes et outils basés sur la réalité augmentée et virtuelle pour l'assistance ou l'apprentissage d'opérations dans un contexte industriel. . 2018. P. 205.

KÜÇÜK, Sevda, KAPAKIN, Samet et GÖKTAŞ, Yüksel, 2016. Learning anatomy via mobile augmented reality: Effects on achievement and cognitive load: Learning Anatomy. *Anatomical Sciences Education*. octobre 2016. Vol. 9, no. 5, p. 411-421. DOI 10.1002/ase.1603.

LAENNEC, René-Théophile-Hyacinthe (1781-1826) Auteur du texte, 1819. *De l'auscultation médiate ou Traité du diagnostic des maladies des poumons et du coeur, fondé principalement sur ce nouveau moyen d'exploration. Tome 2 / par R. T. H. Laënnec,...* [en ligne]. [Consulté le 1 septembre 2021]. Consulté à l'adresse: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k98759b>

LENG, Shuang, TAN, Ru San, CHAI, Kevin Tshun Chuan, WANG, Chao, GHISTA, Dhanjoo et ZHONG, Liang, 2015. The electronic stethoscope. *BioMedical Engineering OnLine*. 10 juillet 2015. Vol. 14, no. 1, p. 66. DOI 10.1186/s12938-015-0056-y.

MARTIN, M. W. S., STAFFORD JOHNSON, M. J. et CELONA, B., 2009. Canine dilated cardiomyopathy: a retrospective study of signalment, presentation and clinical findings in 369 cases. *Journal of Small Animal Practice*. janvier 2009. Vol. 50, no. 1, p. 23-29. DOI 10.1111/j.1748-5827.2008.00659.x.

MCCAULEY, Sydney R, CLARK, Stephanie D, QUEST, Bradley W, STREETER, Renee M et OXFORD, Eva M, 2020. Review of canine dilated cardiomyopathy in the wake of diet-associated concerns. *Journal of Animal Science*. 1 juin 2020. Vol. 98, no. 6, p. skaa155. DOI 10.1093/jas/skaa155.

MURESAN, Horia, 2009. The clinical anatomy of the mitral valve. *Clinical Anatomy*. janvier 2009. Vol. 22, no. 1, p. 85-98. DOI 10.1002/ca.20692.

NOWAK, Karolina M et NOWAK, Lukasz J, 2017. Experimental validation of the tuneable diaphragm effect in modern acoustic stethoscopes. *Postgraduate Medical Journal*. septembre 2017. Vol. 93, no. 1103, p. 523-527. DOI 10.1136/postgradmedj-2017-134810.

PEDERSEN, H. D., LORENTZEN, K. A. et KRISTENSEN, B. O., 1999. Echocardiographic mitral valve prolapse in cavalier King Charles spaniels: epidemiology and prognostic significance for regurgitation. *The Veterinary Record*. 20 mars 1999. Vol. 144, no. 12, p. 315-320. DOI 10.1136/vr.144.12.315.

RENNER, Claude, 2013. *Évolution du stéthoscope biauriculaire* [en ligne]. 2013. HISTOIRE DES SCIENCES MEDICALES - TOME XLVII - N° 2 - 20. Consulté à l'adresse: <https://www.biusante.parisdescartes.fr/sfhm/hsm/HSMx2013x047x002/HSMx2013x047x002x0243.pdf>

RICHARDS, Jennifer M., FARRAR, Emily J., KORNREICH, Bruce G., MOÏSE, N. Sydney et BUTCHER, Jonathan T., 2012. The mechanobiology of mitral valve function, degeneration, and repair. *Journal of Veterinary Cardiology*. mars 2012. Vol. 14, no. 1, p. 47-58. DOI 10.1016/j.jvc.2012.01.002.

RISHNIW, M., 2018. Murmur grading in humans and animals: past and present. *Journal of Veterinary Cardiology*. août 2018. Vol. 20, no. 4, p. 223-233. DOI 10.1016/j.jvc.2018.06.001.

ROGUIN, Ariel, 2006. Rene Theophile Hyacinthe Laënnec (1781–1826): The Man Behind the Stethoscope. *Clinical Medicine & Research*. 9 janvier 2006. Vol. 4, no. 3, p. 230-235. DOI 10.3121/cm.4.3.230.

RUSSO, Vincenzo, LOVATO, Luigi et LIGABUE, Guido, 2020. Cardiac MRI: technical basis. *La radiologia medica*. novembre 2020. Vol. 125, no. 11, p. 1040-1055. DOI 10.1007/s11547-020-01282-z.

SCHROPE, Donald P., 2015. Prevalence of congenital heart disease in 76,301 mixed-breed dogs and 57,025 mixed-breed cats. *Journal of Veterinary Cardiology*. septembre 2015. Vol. 17, no. 3, p. 192-202. DOI 10.1016/j.jvc.2015.06.001.

SEIBERT, Anthony, 1995. ONE HUNDRED YEARS OF MEDICAL DIAGNOSTIC IMAGING TECHNOLOGY. *Health Physics*. 1995. Vol. 69, no. 5, p. 26.

The So-Called Third Heart-Sound, 1908. *The Hospital*. Vol. 45, no. 1159, p. 142.

THOMAS, Par Anne, 2013. LA CARDIOMYOPATHIE DILATÉE DU CHIEN : RÉSULTATS DE L'ÉTUDE EUROPEENNE LUPA. . 2013. P. 8.

TISSEAU, J et NEDELEC, A, 2003. Réalité Virtuelle : un contexte historique interdisciplinaire. . 2003. P. 11.

WILLIAMS, T.H et JEW, J.Y, 2004. Is the mitral valve passive flap theory overstated? An active valve is hypothesized. *Medical Hypotheses*. avril 2004. Vol. 62, no. 4, p. 605-611. DOI 10.1016/j.mehy.2003.12.001.

YOUSAF, Tayyabah, DERVENOULAS, George et POLITIS, Marios, 2018. Advances in MRI Methodology. In: *International Review of Neurobiology* [en ligne]. Elsevier. p. 31-76. [Consulté le 21 septembre 2021]. ISBN 978-0-12-815418-2. Consulté à l'adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0074774218300758>

Annexes :

Annexe 1 - Fiche de stage infirmier. Source : www.vetagrotice.vetagro-sup.fr



Fiche de stage

Type : STAGE DE CONSTRUCTION

Thème : SOINS INFIRMIERS ET EXAMEN CLINIQUE

DESCRIPTION DU STAGE

L'objectif général du stage de type CONSTRUCTION en Soins infirmiers et examen clinique est de mettre en application, dans une ou plusieurs espèces et au sein de structures libérales, les enseignements dispensés dans le module « Abord de l'animal et bases de l'examen médical ».

C'est un stage d'une durée de 5 jours, à effectuer lors de la période dédiée selon le calendrier des stages.

Ce stage est ouvert aux étudiants de première, seconde ou troisième années ; dans tous les cas, il doit obligatoirement être réalisé avant l'entrée au Centre Hospitalo-Universitaire Vétérinaire (CHUV).

OBJECTIFS SPECIFIQUES

Prendre conscience de la partie administrative des postes d'assistants vétérinaires (accueil *si* des clients, commandes, gestion de stocks, nettoyage, désinfection, rangement, préparation du matériel nécessaire aux actes vétérinaires, se familiariser avec les logiciels de gestion de clientèle)

Réaliser les soins courants aux animaux hospitalisés et en consultation (voir liste de soins non exhaustive en annexe)

Mettre en pratique les gestes d'investigations sémiologiques cliniques de base (voir liste d'actes sémiologiques en annexe)

L'étudiant mettra à profit ce stage pour mieux comprendre :

- le fonctionnement au quotidien d'une structure vétérinaire privée :
 - travail des vétérinaires, des ASV et assistant(e)s vétérinaires
 - accueil réservé aux clients et relations du praticien avec les clients
 - répartition du travail entre collaborateurs
 - organisation et la planification de la journée
- les particularités de l'exercice vétérinaire en tenant compte de la filière considérée (gardes, astreintes, organisation hospitalière)
 - aspects hygiéniques
 - aspects éthiques
 - appréciation du bien être des animaux hospitalisés
 - sécurité au travail
 - gestion du médicament.

L'étudiant se donnera les moyens d'effectuer tous les gestes et actes contenus dans son passeport de compétences sous le contrôle d'un professionnel.

CHOIX D'UN LIEU DE STAGE

L'étudiant cherche une adresse de structure par démarche personnelle (internet, annuaires, réseaux familiaux et professionnels) ou après consultation de l'annuaire Roy recensant les cliniques vétérinaires selon leur localisation et leur activité.

Aucun critère d'inclusion particulier n'est obligatoire.

Critère d'exclusion : il est préférable d'éviter les structures trop spécialisées.

MARCHE A SUIVRE

L'étudiant doit prendre contact avec le maître de stage, si possible au cours d'une pré-visite (bien avant le déroulement du stage) afin de pouvoir préciser les conditions de son stage. L'étudiant rencontre son enseignant référent qui approuve et signe la convention de stage.

VALIDATION

L'étudiant prendra rendez-vous dès son retour de stage avec son enseignant référent pédagogique pour un entretien de validation. La validation tiendra compte du travail accompli, du renseignement du passeport d'auto-évaluation et de l'appréciation du maître de stage notée sur la fiche bilan.

La fiche bilan mentionnant l'appréciation de l'enseignant référent pédagogique sera à rapporter par l'étudiant à la DEVE.

Annexe

Liste soins :

Actes de contention
Administration de médicaments (préciser la voie)
Appréciation du bien être
Calcul de ration alimentaire
Entretien des animaux
Maintenance de dispositifs de nutrition
Préparation des animaux à la chirurgie (désinfection, tonte, contention spécifique...)
Soins post-opératoires, pansements
Surveillance de perfusions

Listes d'actes sémiologiques

Analyse d'urines
Auscultation abdominale (EQ)
Auscultation cardiaque
Auscultation digestive (BV)
Auscultation pulmonaire
Examen de la cavité buccale
Examen de la courbe respiratoire
Examen des pavillons auriculaires
Examen fourreau et testicules (AC)
Examen mamelles (AC, BV)
Examen oculaire
Examen peau et phanères
Palpation abdominale (AC)
Palpation abdominale transrectale (EQ, BV)
Palpation de la trachée
Palpation des membres et mobilisation des articulations
Palpation des nœuds lymphatiques
Palpation du larynx
Prise de sang, pose de cathéter
Prise de température
Prise du pouls artériel
Toucher rectal (AC)
Vérification d'identité



DEMANDE D'ANESTHESIE

Date : ___ / ___ / ___

N° Dossier : _____

INTERVENTION

Type : _____
 Heure prévue : _____ Salle : _____
 Anesthésiste : _____
 Clinicien prescripteur : _____
 Etudiant responsable : _____

ANIMAL

Nom : _____
 Propriétaire : _____
 Espèce : _____
 Race : _____
 Sexe : _____ Age : _____

Durée prévisible :

- < 30 minutes
 30-60 minutes
 60-90 minutes
 > 90 minutes

Douleur anticipée :

- nulle
 faible (palier I)
 modérée (palier II)
 importante (palier III)

Risque chirurgical :

- nul
 faible
 modéré
 important

Poids :

- Score corporel :**
 < idéal : 0 1 0 2
 = idéal : 0 3
 > idéal : 0 4 0 5

EXAMEN PREANESTHESIQUE

Comportement : calme stressé / coopératif stressé / agressif très agressif

Médecine préventive : Vacciné(e) : oui non Traitement antiparasitaire : oui non

Antécédents médicaux : Allergie connue : oui non Antécédents familiaux : oui non

Anesthésie(s) précédente(s) : oui non Nombre : ___ Cause(s) : _____

Problème(s) rapporté(s) : oui non _____

Affection(s) diagnostiquée(s) : _____ **Traitement(s) en cours :** _____

Examen clinique : _____ **Animal à jeun :** oui non

FC : _____	FR : _____	Muqueuses : _____	TRC : _____	T(°C) : _____	% Deshyd : _____
------------	------------	-------------------	-------------	---------------	------------------

Toux : oui non Intolérance à l'effort : oui non Auscultation : cœur poumons

Anomalie(s) décelée(s) : _____

Examen(s) complémentaire(s) :	Ht :	Prot Tot :	Créat	Urée :	Glyc :	Lact :
Normes	%	g/L	mmol/L	mmol/L	mmol/L	mmol/L

Autres examens préop : _____

PROTOCOLE ANESTHESIQUE PROPOSE

Risque anesthésique : ASA1 ASA2 ASA3 ASA4 ASA5 Urgence

Problème(s) à anticiper : _____

Prémédication					Induction				
Agent	mg/kg	mg	mg/mL	mL	Agent	mg/kg	mg	mg/mL	mL
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____

Entretien : _____ **AINS :** oui non

Fluides : _____ : _____ mL/kg/h = _____ gouttes/s
 _____ : _____ mL/kg/h = _____ gouttes/s

Autre(s) : _____ **Autre(s) analgésique(s) :** _____

Anesthésie loco-régionale : _____

Antibiotique(s) : _____

PARTIE A REMPLIR PAR L'ANESTHESISTE Prémédication : ___ h ___ Induction : ___ h ___ Signature : _____

APPLICATION DE LA REALITE AUGMENTEE A UN MODELE PEDAGOGIQUE D'AUSCULTATION CARDIAQUE : MODELISATION HOLOGRAPHIQUE DU FONCTIONNEMENT ET DES AIRES DE PROJECTIONS CARDIAQUES CHEZ LE CHIEN.

Auteur

VIGIÉ Antony

Résumé

L'auscultation cardiaque est un acte incontournable de l'examen clinique. Elle est réalisable grâce à un stéthoscope et elle est un bon outil diagnostic. Sans nouveauté dans ses méthodes d'apprentissage depuis des décennies, l'idée d'utiliser une nouvelle technologie pour aider les étudiants à sa pratique a vu le jour. Ce document retrace la mise en place d'un modèle pédagogique qui allie un mannequin de chien réaliste et la réalité augmentée afin d'aider les étudiants à s'entraîner à l'auscultation cardiaque. Après une première partie qui dépeint l'auscultation, le cœur du chien et les méthodes d'apprentissages actuelles à VetAgro Sup, la deuxième partie explique les démarches effectuées pour parvenir à la création de ce modèle. En partant d'images IRM, on explique la création d'un hologramme de cœur de chien en trois dimensions, on présente la réalité augmentée et les HoloLens 2. Ce document se termine sur la présentation de l'application nécessaire à ce modèle en expliquant en détail son fonctionnement et les intérêts qu'elle apporte aux étudiants. Cette technologie est en plein développement, elle deviendra incontournable prochainement. Il est essentiel que les étudiants s'y familiarisent le plus tôt possible.

Mots-clés

RÉALITÉ AUGMENTÉE, LUNETTE DE RÉALITÉ MIXTE, AUSCULTATION
CARDIAQUE, HOLOGRAMME, CHIEN

Jury

Président du jury : Pr **GUÉNOT Marc**
Directeur de thèse : Pr **PROUILLAC Caroline**
Assesseur : Pr **BONNET-GARIN Jeanne-Marie**