

ONIRIS - ECOLE NATIONALE VETERINAIRE,  
AGROALIMENTAIRE ET DE L'ALIMENTATION

2020

**Conception d'un simulateur réaliste  
pour remplacer les animaux vivants  
lors des travaux pratiques de physiologie expérimentale  
dans les Écoles Vétérinaires et à l'Université**

THESE

pour le  
diplôme d'Etat de

DOCTEUR VETERINAIRE

présentée et soutenue publiquement

le 6 Novembre 2020

devant

la Faculté de Médecine de Nantes

par

**Marie CHEVALIER**

Né(e) le 20/08/1994

à Saint Jean de Braye (45 )

JURY

**Président :** Monsieur Patrick LUSTENBERGER,  
Professeur à la Faculté de Médecine de Nantes  
**Rapporteur :** Madame Julie HERVE,  
Maître de Conférences à Oniris  
**Examineur :** Madame Nora BOUHSINA,  
Maître de Conférences à Oniris



ONIRIS - ECOLE NATIONALE VETERINAIRE,  
AGROALIMENTAIRE ET DE L'ALIMENTATION

2020

**Conception d'un simulateur réaliste  
pour remplacer les animaux vivants  
lors des travaux pratiques de physiologie expérimentale  
dans les Écoles Vétérinaires et à l'Université**

THESE

pour le

diplôme d'État de

DOCTEUR VETERINAIRE

présentée et soutenue publiquement

le 6 Novembre 2020

devant

la Faculté de Médecine de Nantes

par

**Marie CHEVALIER**

Né(e) le 20/08/1994

à Saint Jean de Braye (45 )

JURY

**Président :** Monsieur Patrick LUSTENBERGER,  
Professeur à la Faculté de Médecine de Nantes  
**Rapporteur :** Madame Julie HERVE,  
Maître de Conférences à Oniris  
**Examineur :** Madame Nora BOUHSINA,  
Maître de Conférences à Oniris



La reproduction d'extraits de cette thèse est autorisée avec mention de la source. Toute reproduction partielle doit être fidèle au texte utilisé. Cette thèse devra donc être citée en incluant les éléments bibliographiques suivants :

- Nom et prénoms de l'auteur : Marie Chevalier
- Année de soutenance : 2020.
- Titre de la thèse : Conception d'un simulateur réaliste pour remplacer les animaux vivants lors des travaux pratiques de physiologie expérimentale dans les Ecoles Vétérinaires et à l'Université.
- Intitulé du diplôme : Thèse de doctorat vétérinaire
- Université de soutenance : Faculté de Médecine de Nantes.
- Ecole de soutenance : Oniris : Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de L'alimentation Nantes Atlantique
- Nombre de pages : 93 p.



# Liste des membres du corps enseignant d'Oniris

Département <b>BPSA</b> Biologie, Pathologie et Sciences de l'Aliment		
Responsable : <b>Hervé POULIQUEN</b> - adjoint : <b>Emmanuel JAFFRES</b>		
Nutrition et endocrinologie	Patrick NGuyen* (Pr)	
Pharmacologie et Toxicologie	Jean-Claude Desfontis (Pr) Yassine Mallem (Pr) Antoine Rostang (MCC)	Martine Kammerer (Pr) Hervé Pouliquen* (Pr)
Physiologie fonctionnelle, cellulaire et moléculaire	Jean-Marie Bach (Pr) Lionel Martignat (Pr)	Julie Herve (MC) Grégoire Mignot (MC)
Histologie et anatomie pathologique	Jérôme Abadie* (MC) Laetitia Jaillardon* (MC)	Marie-Anne Colle* (Pr) Frédérique Nguyen* (MC)
Pathologie générale, microbiologie et immunologie	François Meurens (Pr) Jean-Louis Pellerin* (Pr)	Emmanuelle Moreau (MC HDR) Hervé Sebbag (MC)
Biochimie alimentaire industrielle	Clément Cataneo (MC) Laurent Le Thuaut (MC) Thierry Serot (Pr)	Joëlle Grua (MC) Carole Prost (Pr) Florence Texier (MC)
Microbiotech	Géraldine Boue (MC) Emmanuel Jaffres (MC) Raouf Tareb (MCC) Bénédicte Sorin (IE)	Nabila Haddad (MC) Mathilde Mosser (MC) Hervé Prevost (Pr)
Département <b>SAESP</b> Santé des Animaux d'Elevage et Santé Publique		
Responsable : <b>Alain CHAUVIN</b> - adjoint : <b>Raphaël GUATTEO</b>		
Hygiène et qualité des aliments	Jean-Michel Cappelier* (Pr) Michel Federighi (Pr) Catherine Magras* (Pr) Fanny Renois -Meurens (MC)	Eric Dromigny (MC HDR) Bruno Le Bizec (Pr) Marie-France Pilet(Pr)
Médecine des animaux d'élevage	Sébastien Assie* (MC) Isabelle Breyton (MC) Alain Douart* (MC) Mily Leblanc Maridor (MC) Anne Relun (MCC)	Catherine Belloc* (Pr) Christophe Chartier* (Pr) Raphaël Guatteo* (Pr)
Parasitologie, aquaculture, Faune sauvage	Albert Agoulon (MC) Ségoène Calvez (MC) Nadine Ravinet (MC)	Suzanne Bastian (MC) Alain Chauvin* (Pr)
Maladies réglementées, zoonoses et réglementation sanitaire	Carole Peroz (MC)	Nathalie Ruvoen* (Pr)
Elevage, nutrition et santé des animaux domestiques	Nathalie Bareille* (Pr) Christine Fourichon* (Pr HDR) Henri Dumon* (Pr) Lucile Martin (Pr)	François Beaudeau* (Pr) Aurélien Madouasse (MC) Nora Navarro-Gonzalez (MCC)
Département <b>DSC</b> Sciences Cliniques		
Responsable : <b>Catherine IBISCH</b> – adjoint : <b>Olivier GAUTHIER</b>		
Anatomie comparée	Eric Betti (MC) Claude Guintard (MC)	Claire Douart (MC)
Pathologie chirurgicale et anesthésiologie	Eric Aguado (MC HDR) Eric Goyenvalle (MC HDR)	Olivier Gauthier (Pr) Béatrice Lijour (MC)

	Caroline Tessier* (MC)	Gwénola Touzot-Jourde* (MC)
Dermatologie, parasitologie des carnivores et des équidés, mycologie	Patrick Bourdeau* (Pr)	Emmanuel BENSIGNOR (Pr Ass)
Médecine interne, imagerie médicale et législation professionnelle vétérinaire	Nora Bouhsina (MCC) Anne Courouze * (Pr) Amandine Drut* (MC)	Nicolas Chouin (MC) Jack-Yves Deschamps (Pr) Marion Fusellier-Tesson (MC)
	Catherine Ibisch (MC) Odile Senecat (MC)	Françoise Roux* (Pr)
Biotechnologies et pathologie de la reproduction	Djemil Bencharif (MC HDR) Jean-François Bruyas* (Pr)	Lamia Briand (MC HDR) Francis Fieni* (Pr)
Département GPA Génie des Procédés Alimentaires		
Responsable : Olivier ROUAUD - adjoint : Sébastien CURET-PLOQUIN		
Lionel Boillereaux (Pr) Marie De Lamballerie (Pr) Francine Fayolle (Pr) Vanessa Jury (MC) Alain Lebail (Pr) Jean-Yves Monteau (MC HDR) Laurence Pottier (MC) Cyril Toublanc (MC)	Sébastien Curet Ploquin (MC) Dominique Della Valle (MC HDR) Michel Havet (Pr) Emilie Korbel (MCC) Catherine Loisel (MC) Olivier Rouaud (Pr) Eve-anne Norwood (MCC)	
Département MSC Management, Statistiques et Communication		
Responsable : Michel SEMENOU - adjoint Pascal BARILLOT		
Mathématiques, statistiques, Informatique	Véronique Cariou (MC) El Mostafa Qannari (Pr)  Chantal Thorin (Pr AG.)	Philippe Courcoux (MC) Michel Semenou (MC)  Evelyne Vigneau (Pr)
Economie, gestion	Pascal Barillot(MC) Florence Beaugrand (MC)  Sonia EL Mahjoub (MC) Samira Rousseliere (MC)	Ibrahima Barry (MCC) Sibylle Duchaine (MC)  Jean-Marc Ferrandi (Pr)
Langues et communication	Marc Bridou (PLPa)	
	David Guyler (ens. cont.)	Franck Insignares (IE)
	Shaun Meehan (ens. cont.)	Linda Morris (PCEA)

BTs : **Laurence Freret (PCEA)** Christophe Caron (PLPA), Pascale Fleury(PCEA), Virginie Magin (Ens. Cont.), Françoise Brichet (IAE).

Professeurs émérites : Poncelet

guide de lecture des tableaux suivants :Pr : Professeur, Pr. AG : Professeur agrégé. MC : maître de Conférences, MCC : MC contractuel, PLPA : Professeur Lycée Professionnel Agricole, PCEA : Professeur Certifié Enseignement Agricole, IE : Ingénieur d'Etudes ; IAE : Ingénieur de l'Agriculture et de l'Environnement ; ens. cont.: enseignant contractuel; HDR : Habilité à Diriger des Recherches

\* Vétérinaire spécialiste d'une spécialité européenne, américaine ou française



## Remerciements

**A Monsieur Patrick LUSTENBERGER,**

Professeur à la Faculté de Médecine de Nantes,  
Pour m'avoir fait l'honneur de présider à ce jury de thèse,  
Très sincères remerciements.

**A Madame Julie HERVE,**

Maître de Conférences à Oniris,  
Pour m'avoir permis de participer à ce projet,  
Pour sa bienveillance et son aide précieuse,  
Très sincères remerciements.

**A Madame Nora BOUHSINA,**

Maître de Conférences à Oniris,  
Pour m'avoir fait l'honneur de prendre part à ce jury de thèse,  
Pour sa bienveillance et son intérêt pour ces travaux,  
Très sincères remerciements.

**A Anne GOGNY,**

Pour avoir été mon enseignant référent durant trois années,  
Pour son soutien et sa bienveillance,  
Merci de m'accompagner et d'être un modèle.

**A Carine TUAL,**

Sans qui cette thèse n'aurait pu voir le jour,  
Merci pour ton aide et pour ton soutien.

**A ma famille,**

Pour son amour et son soutien indéfectible contre vents et marées. Sans vous, je ne serais pas celle que je suis aujourd'hui. Merci.

**A Jérémy,**

Pour ton soutien et cette étincelle de magie que tu mets dans ma vie chaque jour depuis le début de cette grande aventure que nous avons commencée ensemble. Je ne sais pas où elle nous mènera mais tant que c'est avec toi, cela me va.  
Je t'aime.

**A Eve Fromentin-Cossu et Frédéric Cossu,**

Pour m'avoir ouvert les portes du monde vétérinaire dont je rêvais et m'avoir accompagnée et soutenue tandis que j'esquissais mes premiers pas de bébé véto. Merci pour tout ce que vous m'avez appris et pour m'avoir donné l'envie de vous ressembler.

**A Claire,**

Pour ton amitié et ton soutien envers et contre tout. Travailler avec toi est un bonheur et j'espère qu'un jour nous aurons cette opportunité de travailler de nouveau ensemble. Merci de me comprendre peut-être trop bien.

**A Julie,**

A notre amitié et à cette complicité que nous avons toi et moi. J'espère que nous la ferons perdurer malgré la distance et les chemins que nous prendrons.

**A Cécilia, Claire, Julie, Céline, Mégane,**

Au meilleur groupe de clinique qui soit, puissions-nous continuer nos festins dans les années à venir.

**A Soline,**

Pour ton soutien, ton amitié, nos rêveries et nos bêtises passées et à venir, merci.

**A Floriane, Sarah, Ania, Lélia, Jérémy, Claire,**

Aux pires ou aux meilleurs, cela dépend des points de vue. Merci pour chaque moment que nous passons ensemble, pour votre soutien et vos rires. J'ai hâte que nous volions tous ensemble de nos propres ailes.

**A Léa,**

Pour ton aide et ton soutien moral, merci de me supporter malgré la distance.

**A Alexandre,**

Parce qu'une amitié peut tenir à raison d'une réponse tous les six mois. J'ai hâte de voir tes projets se réaliser.

**A Victoire, Bérangère, Manon, Marion, Capucine et tous ceux qui ont participé au projet Cyno'pattes,**

Merci pour votre motivation, votre enthousiasme et votre aide pour mener à bien ce projet mais aussi pour l'avoir poursuivi au-delà de ce que nous aurions pu imaginer.

**A Anne Marie PREAU,**

Pour m'avoir appris les bases du comportement et l'éducation positive, il y a neuf chiens derrière moi qui te remercient.

**A Baloo, Polka et Jalouse,**

Parce que certaines batailles méritent d'être livrées, merci pour votre présence, votre tendresse et vos bêtises.

**Aux cliniques vétérinaires Ty Loen et Kerzourat,**

Pour m'avoir accueillie et m'avoir permis d'esquisser mes premiers pas en clinique. Merci pour votre soutien et tout ce que vous m'avez appris. J'espère que nous nous recroiserons.

**A la clinique vétérinaire des Aubépines,**

Pour toutes les semaines de stage réalisées auprès de son équipe, pour tout ce que vous m'avez enseigné, merci.

**A Remake, Zippo, Dalton, Elisa et tous les autres,**

Pour m'avoir vue grandir et m'avoir accompagnée le temps de quelques années.

Merci à tous ceux qui m'ont suivie et accompagnée au long de ces années.

## Table des matières

Liste des membres du corps enseignant d'Oniris.....	1
Remerciements .....	3
Table des matières .....	7
Table des Figures .....	11
Table des Tableaux .....	12
Table des Abréviations .....	13
Introduction.....	15
Partie I : Analyse bibliographique et définition des objectifs de travail .....	16
I. Physiologie expérimentale et méthodes alternatives pour limiter l'utilisation des animaux vivants dans l'enseignement .....	17
A. Historique de la physiologie expérimentale .....	17
B. Méthodes alternatives d'enseignement de la physiologie expérimentale .....	18
1) Travaux dirigés à partir de données de physiologie expérimentale acquises à Oniris ou publiées dans des articles scientifiques ou de cas cliniques réels ou virtuels .....	18
a) Avantages d'une mise en situation à l'aide de données .....	18
b) Limites de ce type de séance .....	19
2) Utilisation de logiciels de simulation physiologique en travaux pratiques .....	19
a) Exemple de logiciels de simulation physiologique pratiques : les logiciels Virtual Cat® et Virtual Rat® .....	19
b) Avantages de l'utilisation des logiciels dans le cadre de l'enseignement de la physiologie expérimentale .....	20
c) Limites inhérentes à l'utilisation des logiciels de simulation physiologique .....	20
3) Travaux pratiques non invasifs .....	21
a) Présentation des exercices de travaux pratiques effectués sur des échantillons biologiques ou sur des étudiants .....	21
b) Exemple d'utilisation non invasive d'animaux vivants en travaux pratiques de physiologie expérimentale : travail réalisé avec la meute pédagogique d'Oniris.....	22
c) Avantage et perspectives offertes par ce type de travaux pratiques .....	22
d) Inconvénients et limites liés à ce mode d'enseignement de la physiologie expérimentale .....	23
II. Les simulateurs, une perspective réaliste pour l'enseignement de la physiologie expérimentale .....	24
A) Principe de la simulation et définition d'un simulateur réaliste .....	24
1) Définitions .....	24
2) Supports de simulation. ....	24
a) Simulateurs procéduraux. ....	24
b) Réalité virtuelle et réalité augmentée. ....	25
c) Les « <i>serious games</i> » : le jeu vidéo au service de l'apprentissage .....	27
d) Simulateurs patients.....	27

3) Fidélité des simulateurs : simulateurs <i>low</i> et <i>high fidelity</i> .....	27
a) Définitions.....	27
b) <i>Low</i> et <i>high fidelity</i> .....	28
B. Utilisation de simulateurs mannequins dans l'enseignement de la médecine humaine et vétérinaire : intérêt et perspectives pour l'enseignement de la physiologie expérimentale.....	30
1) Construction d'une séance de simulation avec un simulateur mannequin .....	30
a) 1 <sup>ère</sup> étape : la phase de briefing .....	30
b) 2 <sup>ème</sup> étape : la phase de déroulement du scénario .....	31
c) 3 <sup>ème</sup> étape : la phase de débriefing .....	31
d) Évaluation de la séance de simulation .....	32
2) Utilisation de simulateurs mannequins dans l'enseignement de la médecine humaine ....	33
a) Retour sur les avantages de l'utilisation de simulateurs mannequins en médecine humaine.....	33
b) Limites de l'enseignement avec des simulateurs <i>high tech</i> en médecine humaine .....	34
3) Place des simulateurs mannequins dans l'enseignement de la médecine vétérinaire.....	34
III- Définition des objectifs du projet Sim'Rabbit et établissement du cahier des charges .....	37
A. Analyse du ressenti des étudiants quant au déroulement des travaux pratiques .....	37
1) Analyse des retours des étudiants quant au déroulé de la semaine de travaux pratiques ..	37
2) Analyse des retours des étudiants concernant le respect de l'éthique durant les séances de travaux pratiques de physiologie.....	39
3) Perspectives, biais et limites de cette étude .....	40
B. Idéation autour du modèle de simulateur mannequin et établissement du cahier des charges .....	41
Partie II : élaboration d'un simulateur mannequin de lapin pour remplacer les lapins vivants lors des travaux pratiques de physiologie.....	44
I. Collecte des données de physiologie expérimentale .....	45
A) Utilisation des lapins en travaux pratiques de physiologie expérimentale .....	45
1) Historique et évolution de ces travaux pratiques en lien avec la réglementation en matière d'éthique et bien-être animal.....	45
2) Descriptif du déroulement des séquences de travaux pratiques .....	46
a) Anesthésie et analgésie .....	46
b) Réalisation des actes chirurgicaux.....	46
c) Appareillage de l'animal .....	46
d) Analyse et interprétation des tracés en fonction des manipulations réalisées .....	47
e) Euthanasie de l'animal .....	47
f) Exploitation des résultats en travaux dirigés et retour sur les travaux pratiques .....	47
B. Constitution, nettoyage et analyse de la banque de données expérimentales .....	48
II. Conception des différents prototypes d'automates embarqués dans le lapin robot.....	49
A. Discussions préliminaires avec les étudiants ingénieurs.....	49
B. Conception d'un simulateur de battement cardiaque .....	50

C. Conception d'un simulateur de poumons .....	50
III. Conception de l'enveloppe réaliste du lapin robot.....	52
A. Présentation du protocole et choix des matériaux utilisés .....	52
1) Présentation du protocole et enjeux .....	52
2) Choix des matériaux .....	52
B. Conception d'un moule en bandes plâtrées et tirage d'un lapin en plâtre.....	55
1) Préparation du cadavre de lapin et réalisation d'un moule en bandes plâtrées .....	55
2) Obtention d'un lapin en plâtre après coulage .....	57
B. Réalisation d'un moule chaussette en silicone.....	57
1) Présentation du matériel utilisé et préparation.....	57
2) Réalisation du moule chaussette en silicone.....	57
3) Réalisation d'un contre-moule en bandes plâtrées .....	58
4) Démoulage et obtention d'un moule chaussette en silicone .....	59
D. Phase de tirage et obtention d'une réplique en silicone .....	59
1) Tirage d'un lapin en silicone à partir du moule chaussette.....	59
2) Démoulage et finitions.....	60
Partie III : Discussion.....	62
I. Difficultés rencontrées au cours du processus de fabrication.....	63
A. Difficultés rencontrées lors de la réalisation du moule en bandes plâtrées et de la réplique en plâtre.....	64
1) Obtention d'un support de travail .....	64
2) Difficultés liées aux circonstances exceptionnelles dues au Covid-19.....	64
B. Réalisation du moule en silicone et difficultés rencontrées lors de cette étape .....	65
1) Difficultés rencontrées lors de la phase de test.....	65
2) L'élaboration du moule silicone et ses écueils.....	65
C. Tirage de la réplique finale en silicone et principales difficultés rencontrées.....	66
II. Avantages et limites de la maquette de lapin.....	66
A. Avantages offerts par le protocole et le modèle obtenu .....	66
1) Un protocole simple et des matériaux réutilisables .....	66
2) Un modèle réaliste et adaptable .....	67
B. Une maquette produite à un coût raisonnable .....	67
1) Coût de réalisation du moule en silicone .....	67
2) Coût de réalisation de la maquette finale de lapin .....	68
C. Impact environnemental de la fabrication de la maquette de lapin .....	68
D. Limites du mannequin lapin réalisé .....	69
1) Limites inhérentes au réalisme .....	69
2) Absence d'évaluation du fonctionnement du simulateur et de son intérêt pédagogique ...	69
a) Absence d'évaluation du fonctionnement du simulateur .....	69

b) Manque d'évaluation de l'intérêt pédagogique du simulateur .....	69
Conclusion .....	70
Bibliographie.....	72
Annexe 1 : Polycopié de travaux dirigés avec les logiciels Virtual rat® et Virtual cat® .....	78
Annexe 2 : Support de travaux pratiques avec les chiens de la meute pédagogique d'ONIRIS .....	84
Annexe 3 : Questionnaire travaux pratiques de physiologie expérimentale .....	87



## Table des Figures

Figure 1 : Variations de réponse entre deux stimulations à la noradrénaline sur le logiciel Virtual Cat®.....	11
Figure 2 : Simulateur procédural pour la pose de cathéter chez le chien (©Anne Gogny).....	15
Figure 3 : Réalité augmentée pour la pose de cathéter veineux (Lee et al.).....	17
Figure 4 : Réalité augmentée et fonctionnement du coeur (Gonzalez et al.).....	17
Figure 5 : Exemple de simulateur procédural <i>low fidelity</i> pour la mise-en-place d'une circulation extra-corporelle (©Multimedia Manual of Cardio-Thoracic Surgery).....	19
Figure 6 : Simulateur procédural <i>high fidelity</i> pour l'intubation (©Anne Gogny).....	20
Figure 7 : Le simulateur patient <i>critical care</i> Jerry®.....	26
Figure 8 : Le simulateur patient K-9 hero® (©Trauma F/x).....	26
Figure 9 : Le simulateur patient <i>high tech</i> Sim'baby, University of Massachusetts Lowell (©Sue Potter).....	27
Figure 10 : Êtes-vous satisfaits de votre semaine de travaux pratiques ?.....	29
Figure 11 : Analyse du détail des commentaires des étudiants concernant leur satisfaction générale vis-à-vis des travaux pratiques.....	30
Figure 12 : Selon vous, l'éthique animale a-t-elle été respectée pendant les séances de TP ?.....	31
Figure 13 : Schéma du fonctionnement du simulateur Sim'rabbit.....	33
Figure 14 : Schéma du montage expérimental.....	43
Figure 15 : Exemples de tracés obtenus lors des TP.....	44
Figure 16 : Rencontre avec Polka, ancienne lapine de travaux pratiques de pharmacologie.....	39
Figure 17 : Premier prototype du Sim'rabbit.....	40
Figure 18 : Second prototype du Sim'rabbit.....	40
Figure 19 : Troisième prototype pour la ventilation.....	41
Figure 20 : Dispositif en silicone gonflable et moule tiré à l'imprimante 3D.....	41
Figure 21 : Tests des deux silicones, en vert et rouge le Dragon Skin Fx 10®, en rose l'Ecoflex 00-20®.....	43
Figure 22a : Modèle pour répliquer des éléments fins.....	44
Figure 22b : Réplique en silicone Ecoflex 00-20®.....	44
Figure 23 : Dépôt de bandes plâtrées sur la face ventrale de la dépouille.....	47
Figure 24 : Étapes de fabrication du moule en silicone.....	48
Figure 25 : Élaboration d'un contre moule en bandes plâtrées.....	50
Figure 26 : Obtention d'un moule chaussette et d'un contre moule en bandes plâtrées.....	50
Figure 27 : Démoulage du lapin.....	52
Figure 28 : Réplique et modèle d'origine.....	53

## **Table des Tableaux**

Tableau 1 : Comparatif de trois agents de démoulage accessibles dans le commerce.....	45
Tableau 2 : Coût de fabrication du moule en silicone.....	58
Tableau 3 : Coût de production de la réplique finale.....	59

## **Table des Abréviations**

STE : Série des Traités Européens

TD : Travaux Dirigés

TP : Travaux Pratiques

TEACH Sim : The Template of Events for Applied and Critical Healthcare Simulation

SMARTER : Simulation Module for Assessment of Resident Targeted Event Responses

DASH : Debriefing Assessment for Simulation in Healthcare

ESCC : Examen Standardisé des Compétences Cliniques

OSCE : Objective Structured Clinical Examination



# Introduction

La physiologie est l'un des enseignements fondamentaux du cursus vétérinaire et confère aux étudiants les connaissances nécessaires pour ensuite appréhender la médecine des animaux dans son ensemble, des pathologies aux traitements mis en œuvre pour les soigner.

Fournissant une approche plus concrète et complémentaire aux apprentissages théoriques, la physiologie expérimentale constitue une part importante de l'enseignement de physiologie. De plus, au sein du cursus vétérinaire, les travaux pratiques de physiologie expérimentale sont pour beaucoup d'étudiants une première approche de l'animal vivant dans un contexte de pratique à la fois scientifique et médical.

Cependant, l'évolution actuelle des rapports homme/animal au sein de la société ainsi que la sensibilisation de la population au bien-être animal soulèvent la question du devenir de la physiologie expérimentale au sein de l'enseignement vétérinaire. Si sa nécessité n'est pas à prouver, elle se doit cependant d'évoluer pour s'adapter et répondre efficacement aux attentes en matière de bien-être animal tout en continuant d'apporter un enseignement de qualité aux étudiants vétérinaires ou en cursus scientifique.

C'est dans cette optique que les écoles vétérinaires françaises et européennes ont, à l'instar des universités de médecine dans le monde, mis en place divers simulateurs pour l'apprentissage des gestes cliniques aux étudiants.

A Oniris, les enseignants-chercheurs de physiologie ont adapté au fil des années les travaux pratiques de physiologie expérimentale en limitant continuellement le nombre d'animaux utilisés pour ces travaux pratiques, en raffinant les méthodes et en veillant à prodiguer aux étudiants un encadrement de qualité afin que ces séances respectent l'éthique et le bien-être animal.

Malgré tout, dans le contexte décrit précédemment, en 2018, ils ont souhaité aller plus loin dans cette démarche en arrêtant complètement de recourir au sacrifice d'animaux vivants pour les travaux pratiques de physiologie expérimentale sans esquiver le problème majeur soulevé par cette démarche : comment, dans ces conditions, dispenser un enseignement pratique sans perdre l'apport du vivant en termes de variabilité inter-individuelle, de réalisme et d'attention des étudiants ?

L'objectif de notre travail de thèse était d'accompagner cette transition en participant, en partenariat avec les enseignants chercheurs et les étudiants de l'IMT Atlantique, à la conception d'un simulateur adapté à l'enseignement de la physiologie expérimentale et capable d'offrir une interface réaliste permettant aux étudiants vétérinaires d'être immergés dans l'illusion d'expérimenter sur un lapin vivant.

Pour cela, notre travail s'est articulé autour de trois grands axes que sont l'analyse des besoins préalables à la construction du simulateur, l'accompagnement des étudiants ingénieurs dans la réalisation de l'automate et la confection d'un support réaliste à l'image d'un lapin.

## **Partie I : Analyse bibliographique et définition des objectifs de travail**

# **I. Physiologie expérimentale et méthodes alternatives pour limiter l'utilisation des animaux vivants dans l'enseignement**

## **A. Historique de la physiologie expérimentale**

La physiologie est définie, d'après l'encyclopédie Larousse, comme la science s'intéressant au fonctionnement et aux propriétés des organes et tissus des êtres vivants. La physiologie animale s'attache à l'étude du fonctionnement des organismes vivants d'origine animale et à leur adaptation au milieu dans lequel ils évoluent <sup>1</sup>. Elle intègre et tend à établir des liens à différents niveaux de l'organisme, de la cellule à l'organisme vivant dans son ensemble et à ses interactions avec le milieu extérieur et ses contraintes <sup>2</sup>.

La physiologie animale constitue une base pour la médecine puisqu'elle apporte les connaissances concernant le fonctionnement normal des organismes qui sont nécessaires pour comprendre une pathologie. En outre, dans son « Introduction à l'étude de la médecine expérimentale »<sup>3</sup> publiée en 1865, Claude Bernard définit la physiologie comme une science expérimentale à la différence des sciences vouées à l'observation des phénomènes naturels. C'est ainsi qu'il pose les bases du raisonnement scientifique et de la physiologie actuelle où l'expérimentation rigoureuse permet de confirmer ou infirmer une hypothèse donnée.

L'expérimentation animale, longtemps considérée comme la méthode de choix pour appréhender et comprendre le fonctionnement des organismes <sup>4</sup>, connaît depuis plusieurs années de grands remaniements liés à une prise de conscience concernant le bien être animal<sup>4,5</sup> et à la mise en place d'une réglementation concernant l'éthique et l'expérimentation avec la Convention STE (Série des Traités Européens) n°123 de 1985<sup>6</sup> en Europe. Ces changements s'appuient sur l'application de la règle des trois R édictée par Russell et Burch au siècle dernier et dont le but ultime est le remplacement de l'utilisation des animaux. Quand cela n'est pas possible, il convient *a minima* de réduire le nombre d'animaux utilisés au strict nécessaire et de raffiner les pratiques en matière d'expérimentation animale<sup>7</sup>.

Les enseignants-chercheurs des Universités de biologie, de médecine et des Écoles Vétérinaires sont des acteurs essentiels de ces évolutions. En effet, depuis plus d'une dizaine d'années, ils réduisent progressivement le nombre d'animaux utilisés pour l'enseignement, en particulier de la physiologie. Certains parviennent même à les remplacer complètement comme à l'Université de Novi Sad en Serbie<sup>8</sup> où les travaux informatiques et les manipulations non invasives ont pris le pas sur la physiologie expérimentale invasive. À Oniris également, les enseignants-chercheurs de physiologie se sont attachés à réduire les manipulations invasives sur les animaux et sont même allés jusqu'à les supprimer définitivement en 2018. Cette démarche a nécessité de trouver différentes alternatives que nous allons à présent présenter.

## **B. Méthodes alternatives d'enseignement de la physiologie expérimentale**

L'enseignement de la physiologie expérimentale repose généralement sur des séances de travaux pratiques ou de travaux dirigés qui incitent les étudiants à formuler des hypothèses, à raisonner scientifiquement et à tirer des conclusions à la suite des expérimentations qu'ils ont réalisées. Ce type de séances vient compléter les cours magistraux dispensés en amphithéâtre où l'interaction avec l'enseignant est limitée.

Nous allons dans cette partie nous attacher aux différentes techniques utilisées en physiologie expérimentale à Oniris pour remplacer les manipulations invasives sur les animaux afin d'en souligner les avantages et les limites.

### **1) Travaux dirigés à partir de données de physiologie expérimentale acquises à Oniris ou publiées dans des articles scientifiques ou de cas cliniques réels ou virtuels**

Les exercices proposés dans ces séances sont constitués de situations réelles grâce à l'utilisation des enregistrements réalisés lors d'anciens travaux pratiques utilisant des lapins comme support expérimental ou en utilisant les figures d'articles de la bibliographie. Ils peuvent aussi provenir de cas cliniques réels ou virtuels.

Ces séances de deux heures interviennent soit avant ou après le cours théorique sur la notion de physiologie abordée et font l'occasion d'un débriefing à l'aide d'un schéma bilan produit par les étudiants et corrigé si besoin par l'enseignant.

Les étudiants sont confrontés aux données qu'ils doivent analyser. Ils doivent formuler des hypothèses et ainsi s'approprier le raisonnement scientifique.

#### **a) Avantages d'une mise en situation à l'aide de données**

Les travaux dirigés sont plus interactifs pour les étudiants que les cours magistraux, ils favorisent la communication, le travail en équipe, la mobilisation des connaissances mais aussi le développement des capacités d'analyse et de raisonnement clinique<sup>10,9,11</sup>. De plus, à l'instar du système de séminaires présenté dans l'étude de Borges et al, ce fonctionnement permet de faciliter l'échange entre les étudiants et l'enseignant qui devient alors une aide et un soutien au lieu de garder la position traditionnelle de transmetteur de connaissances<sup>11</sup>.

L'étude de cas cliniques papiers est aussi l'occasion pour l'enseignant de mettre en évidence les soucis de compréhension concernant les mécanismes physiologiques. C'est en effet ce qu'ont montré Hull et Kerry en 2018 dans leur étude concernant la mise en place de cas cliniques virtuels créés et résolus par les étudiants<sup>13</sup>. Dépister ainsi les erreurs de compréhension permet de les corriger en amenant les étudiants à se confronter à leurs mauvaises conceptions des mécanismes physiologiques pour ensuite comprendre le fonctionnement correct de ces derniers<sup>14</sup>.

Un autre avantage de cette méthode, outre le fait qu'elle ne nécessite pas d'animaux vivants, est qu'elle ne requiert pas d'équipement particulier si ce n'est une salle et un ordinateur.

De plus, avec le développement des nouvelles technologies, une diversification des supports est rendue possible par la création de cas cliniques virtuels interactifs informatiques qui sont particulièrement bien perçus par les étudiants pour leur caractère à la fois novateur et réaliste<sup>15</sup>.

Enfin, le niveau d'encadrement requis est plus faible que pour des séances de travaux pratiques surtout lorsqu'elles impliquent des animaux vivants. A l'échelle de l'institution, les séances de TD génèrent donc une économie de temps-encadrant par rapport aux TP.



## b) Limites de ce type de séance

La première limite de ce système est que l'on perd le contact avec le vivant ainsi que l'aspect pratique qui plaît aux étudiants et les familiarise aux techniques d'acquisition des données. Ainsi, utiliser uniquement l'analyse de données en travaux dirigés reviendrait à faire perdre l'un des seuls temps de pratique dont bénéficient les étudiants en première année de cursus vétérinaire.

De plus, bien que stimulantes au premier abord, lorsque les séances s'inscrivent dans la durée, la perte de concentration des étudiants est inévitable. Sans être incités à manipuler comme lors des travaux pratiques, il arrive que les étudiants finissent par laisser l'enseignant les guider sans s'investir dans l'exercice proposé<sup>16</sup>. Cette situation, fréquente, n'est agréable pour personne et nuit tant à l'enseignant qu'aux élèves.

## 2) Utilisation de logiciels de simulation physiologique en travaux pratiques

De nos jours, les étudiants sont confrontés à des logiciels de simulation dès le collège et le lycée à travers des séances sur des supports informatiques interactifs tels que Drososimul®, Phylogène® ou ExAo®.

Des logiciels de ce type ont aussi été développés pour l'enseignement de la physiologie expérimentale et sont destinés à des étudiants en études supérieures. Ils sont ainsi utilisés dans le cadre de travaux pratiques afin d'accompagner les cours magistraux de physiologie.

### a) Exemple de logiciels de simulation physiologique pratiques : les logiciels Virtual Cat® et Virtual Rat®

Ces deux logiciels sont des simulateurs informatiques conçus pour l'enseignement de la physiologie expérimentale qui permettent d'étudier de façon interactive le fonctionnement du système cardio-vasculaire en stimulant différents nerfs ou en injectant différentes molécules à différentes doses. Leur utilisation à Oniris a commencé en 2010 lors de travaux dirigés adressés aux étudiants vétérinaires de première année.

Le logiciel Virtual Rat® propose de suivre les variations de pression artérielle, pression ventriculaire gauche, pression veineuse, fréquence cardiaque et contractilité cardiaque en fonction du temps sur des rats normaux ou décérébrés. Différents choix de molécules sont possibles avec des concentrations déterminées par l'utilisateur. De plus, plusieurs actions comme la stimulation des nerfs vagues ou leur section sont proposées.

Le logiciel Virtual Cat® fonctionne sur le même modèle mais propose un chat normal et anesthésié comme support de travail. Les mêmes stimulations que pour le rat sont possibles et au suivi de la pression artérielle et de la fréquence cardiaque s'ajoute celui de la contraction des muscles squelettiques et des mouvements de la membrane nictitante.

A Oniris, l'utilisation de ces deux logiciels se fait sous la forme de travaux dirigés en quart ou en cinquième de promotion. La séance est introduite par une mise en situation où le dispositif expérimental que reproduisent les logiciels est expliqué. Un rappel sur les différents mécanismes d'action des molécules que les étudiants seront amenés à utiliser sur leurs animaux virtuels est ensuite fait. Par ailleurs, les étudiants bénéficient d'un résumé de ces rappels dans leur polycopié de TD (annexe 1).

Une série d'exercices sur les deux logiciels est ensuite réalisée par les étudiants répartis en groupes de trois ou quatre par ordinateur. Chaque exercice est centré sur l'utilisation d'une molécule ou d'un aspect du fonctionnement cardio-vasculaire. Les étudiants doivent suivre les indications

concernant les injections puis analyser et interpréter les courbes obtenues. L'enseignant qui anime la séance se tient à leur disposition pour les guider, expliquer et répondre à leurs questions. Enfin, une correction de l'ensemble des exercices est donnée à l'issue de la séance.

#### b) Avantages de l'utilisation des logiciels dans le cadre de l'enseignement de la physiologie expérimentale

Les logiciels de simulation Virtual Cat® et Virtual Rat® se rapprochent beaucoup des séances de travaux pratiques historiques où des manipulations sur des animaux vivants étaient réalisées pour suivre l'évolution de différents paramètres physiologiques, tout en s'affranchissant du sacrifice des animaux en fin de séance.

De plus, leur utilisation permet de ne plus consacrer de temps à la chirurgie ce qui optimise le temps alloué à l'enseignement de la physiologie au cours de la séance. En effet, les gestes de chirurgie expérimentale à pratiquer sur les animaux sont longs à réaliser, surtout pour des étudiants en début de cursus, ce qui nuit à leur concentration au moment des phases d'expérimentation vraie.

Le logiciel développé par Quiroga et Choate a, en outre, permis de montrer que les étudiants ayant travaillé avec ce type de support comprenaient mieux les mécanismes physiologiques qu'ils avaient étudiés<sup>18</sup>. Cette meilleure compréhension peut s'expliquer par la possibilité de répéter l'expérience et de se confronter aux diverses possibilités de réaction de l'objet d'étude<sup>19</sup>.

En matière de coût, les logiciels tels que Virtual Cat® ou le Virtual Rat® présentent un avantage incontestable par rapport à l'utilisation d'animaux vivants : leur coût. En effet, la plupart de ces logiciels à visée pédagogique est gratuite, tandis que la mise en place de travaux pratiques avec des animaux génère des coûts importants liés à l'achat de matériel, à l'achat et à l'entretien des animaux, etc<sup>18</sup>. Néanmoins, il faut toutefois considérer le coût non négligeable des équipements informatiques à renouveler régulièrement.

#### c) Limites inhérentes à l'utilisation des logiciels de simulation physiologique

L'attrait pour ces logiciels étant certain pour les raisons évoquées plus haut, nous nous sommes intéressés plus précisément à leur fonctionnement. En effet, l'un des intérêts de travailler avec le vivant est que les étudiants puissent appréhender la variabilité interindividuelle à laquelle ils seront quotidiennement confrontés, qu'ils deviennent vétérinaire praticien ou chercheur. Dans ce contexte, nous avons testé ces deux logiciels afin de savoir s'ils étaient ou non programmés pour rendre compte de cette variabilité inter-individuelle.

Pour ce faire, nous avons comparé les résultats générés en parallèle par le même logiciel installé sur des ordinateurs différents. Nous avons ainsi testé les réponses de différents chats et rats virtuels à l'adrénaline et à l'acétylcholine. À l'issue de ces tests, nous avons remarqué que le logiciel Virtual Rat® avait en mémoire plusieurs rats avec des valeurs de pression artérielle et de fréquence cardiaque initiales différentes ce qui apportait une certaine variabilité inter-individuelle. Cependant, si le même rat était initialisé sur les deux ordinateurs, la réponse aux stimulations était systématiquement la même. Le logiciel Virtual Rat® est donc bien programmé pour générer une variabilité mais seulement implémentée au début de l'expérience avec une sélection aléatoire d'un rat. Nous avons observé que le logiciel Virtual Cat® présentait le même départ de courbe lorsque l'acquisition était lancée ; néanmoins, les valeurs obtenues ensuite au repos variaient légèrement d'un ordinateur à l'autre. Nous nous sommes donc intéressés plus particulièrement à ces variations et avons pu vérifier qu'il existait un système de variation de  $\pm 2$  unités associées aux valeurs moyennes de pression artérielle. Toutefois, en stimulant simultanément les chats virtuels des différents ordinateurs,

nous aboutissions exactement aux mêmes courbes avec un écart de  $\pm 2$  unités difficilement discernable pour une personne ne s'intéressant qu'à la tendance globale du tracé (Figure 1).

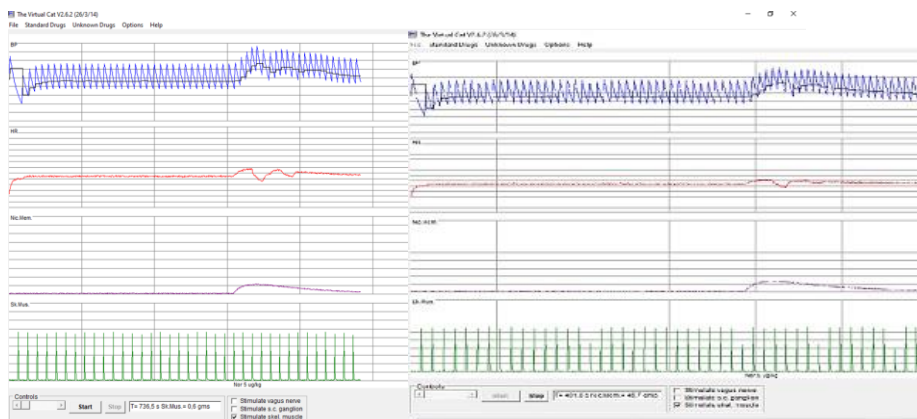


Figure 1 : Variations de réponse entre deux stimulations à la noradrénaline sur le logiciel Virtual Cat®

Ainsi, si les deux logiciels apportent une alternative aux animaux vivants, ils s'avèrent limités pour la transmission de l'importance de la variabilité inter-individuelle et ne se substituent donc pas complètement à l'expérimentation sur des lapins vivants. De plus, ils ne permettent pas d'initier les futurs vétérinaires aux gestes qu'ils seront amenés à réaliser dans le cadre de leur exercice professionnel<sup>20</sup>.

Enfin, contrairement à ce que l'on pourrait penser, l'encadrement rapproché de ces séances de travaux dirigés est essentiel car, non surveillés, les étudiants finissent par tester des scénarios extrêmes dans le seul but de sacrifier leur animal virtuel.

### 3) Travaux pratiques non invasifs

Le manque de manipulation étant une limite commune aux deux méthodes d'enseignement de la physiologie expérimentale précédemment décrites, une alternative permettant de conserver l'interaction directe avec le vivant consiste en la réalisation de travaux pratiques non invasifs. Ces derniers peuvent recourir à différents supports tels que des reliquats d'échantillons biologiques, des animaux vivants sur lesquels aucune manipulation invasive n'est pratiquée ou encore sur les étudiants eux-mêmes<sup>21</sup>.

#### a) Présentation des exercices de travaux pratiques effectués sur des échantillons biologiques ou sur des étudiants

Les échantillons biologiques humains sont définis par l'article L1243-3 du Code de la santé publique comme « des tissus et cellules issus du corps humain et leurs dérivés, des organes, du sang, de ses composants et de ses produits dérivés »<sup>22</sup>. Cette définition peut s'étendre aux échantillons biologiques d'origine animale utilisés lors de l'enseignement de la physiologie expérimentale.

L'utilisation de ces échantillons peut se faire sous la forme d'étude du fonctionnement d'organes isolés comme par exemple le nerf de crabe<sup>23</sup> ou un échantillon de muscle frais. A Oniris, les reliquats d'échantillons de sang et d'urine sont le support de différentes analyses (mesure de l'hématocrite et de la vitesse de sédimentation, analyse des gaz du sang, réalisation d'une bandelette urinaire...) qui permettent aux étudiants d'appréhender les mécanismes qui sous-tendent l'homéostasie.

D'autres séances sont organisées qui utilisent les étudiants comme sujets de l'expérimentation. Ces séances de travaux pratiques portent sur l'étude du fonctionnement cardio-respiratoire ou cardio-vasculaire via des mesures de pression artérielle, de fréquence cardiaque et respiratoire<sup>21</sup> ou la mesure des échanges gazeux<sup>24</sup> au repos et à l'effort. Une autre séance de travaux pratiques repose sur la réalisation d'électromyogrammes de surface.

b) Exemple d'utilisation non invasive d'animaux vivants en travaux pratiques de physiologie expérimentale : travail réalisé avec la meute pédagogique d'Oniris

Afin de conserver un aspect pratique pour les étudiants ainsi que le contact avec les animaux, des travaux pratiques non invasifs en compagnie des chiens de la meute pédagogique d'Oniris ont été mis en place à partir de 2018. La présence des chiens en travaux pratiques permet d'initier les étudiants à la sémiologie médicale et sert de prétexte pour illustrer le cours sur la fonction cardio-vasculaire *via* le suivi de la pression artérielle au repos et après l'effort (course avec l'étudiant en extérieur) mais aussi grâce à la réalisation d'un électrocardiogramme. Une fiche de consigne avec les exercices proposés (annexe 2) est donnée comme feuille de route aux étudiants qui devront la compléter durant la séance. Les étudiants doivent, à l'issue des mesures, analyser les valeurs et les interpréter en compagnie de leur enseignant. Ces séances requièrent un encadrement rapproché par un enseignant vétérinaire puisqu'il s'agit, pour la plupart d'entre eux, de leur premier contact « médical » avec un animal vivant. Ainsi, un enseignant encadre généralement deux groupes de 4-5 étudiants.

c) Avantage et perspectives offertes par ce type de travaux pratiques

La combinaison de ces trois types d'activités expérimentales est source de stimulation et de motivation pour les étudiants car cela rompt avec la monotonie des cours traditionnels et leur permet d'appréhender la physiologie de façon pratique<sup>24</sup>.

Concernant l'utilisation d'animaux vivants, le premier avantage des chiens dans les travaux pratiques de physiologie est le retour du contact avec le vivant. Il ne faut pas oublier que les travaux pratiques avec les lapins étaient souvent le premier contact avec un animal vivant dans un contexte médical pour les étudiants vétérinaires et que ce point était tout particulièrement apprécié par ces derniers. À travers les chiens, c'est une initiation aux gestes cliniques de base qui est alors possible mais aussi un premier enseignement sur l'abord de l'animal et une introduction aux approches *pet friendly* *via* les dispositions prises pour veiller au confort et au bien-être des chiens durant les séances (eau à disposition, tapis, jouets, friandises et promenades régulières) et *via* l'entraînement de *medical training* préalable aux séances pour familiariser les animaux aux manipulations.

L'enseignement de cette approche peut être considéré comme essentiel au sein du cursus vétérinaire car il permet aux étudiants de savoir comment aborder un animal dans de bonnes conditions et cela constitue aussi un début dans la compréhension du comportement animal que les vétérinaires doivent maîtriser<sup>25</sup>.

La question du bien-être des chiens de TP constitue aussi un moyen d'aborder la question de l'éthique et donc de poursuivre la sensibilisation des étudiants à ce point fort de leur futur métier<sup>25,26</sup>. Les chiens de la meute pédagogique représentent un lien tangible entre les travaux pratiques traditionnels de physiologie expérimentale et leur nouvelle version. C'est pourquoi ils sont un excellent support de discussion autour de l'éthique animale, en complément des cours, séminaires, tables rondes et autres activités qui peuvent être proposées pour sensibiliser les étudiants à ce sujet<sup>27</sup>.

Les expériences menées avec des étudiants comme sujets expérimentaux présentent l'avantage d'être faciles à mettre en œuvre bien qu'elles nécessitent de se procurer les équipements adaptés pour les différentes mesures.

L'utilisation d'échantillons biologiques comme support d'étude offre la possibilité de diversifier les expériences menées par les étudiants et autorise l'usage de molécules ou de stimuli similaire à ce que l'on peut rencontrer lors de manipulations invasives sur des animaux vivants.

#### d) Inconvénients et limites liés à ce mode d'enseignement de la physiologie expérimentale

Le principal inconvénient à l'utilisation des étudiants, des chiens ou des échantillons biologiques comme support des travaux pratiques de physiologie est l'impossibilité de tester la réponse des individus aux différentes situations expérimentales. Ainsi, les réponses cardio-vasculaire, ventilatoire et rénale à l'administration d'acétylcholine ou à la stimulation du nerf vague ont disparu au profit d'une étude de la réponse à l'effort.

De plus, l'efficacité pédagogique de ces séances n'a pas été évaluée, comme c'est souvent le cas<sup>24</sup>. Or, au-delà de leur caractère convivial, il conviendrait de savoir si ces méthodes favorisent réellement l'ancrage à long terme des connaissances.

L'utilisation d'échantillons biologiques soulève également des questions éthiques quant aux moyens de les obtenir. En effet, il ne semble pas raisonnable de recourir à des prélèvements non nécessaires sur des animaux, vertébrés ou invertébrés, pour les utiliser dans des séquences pédagogiques<sup>28</sup>. Une possibilité est donc de récupérer des produits issus d'animaux fraîchement morts, soit parce qu'ils ont été abattus pour la consommation ou parce qu'ils sont euthanasiés pour raison médicale. Dans les deux cas, il reste difficile d'accéder à ce type d'échantillons hormis pour les étudiants vétérinaires qui peuvent en bénéficier grâce à leur proximité avec le Centre Hospitalier Universitaire Vétérinaire présent au sein de leur école.

Ainsi, les différentes approches d'enseignement de la physiologie expérimentale que nous avons présentées permettent de mesurer les efforts réalisés par les enseignants-chercheurs de cette discipline pour maintenir un enseignement de qualité tout en respectant l'éthique et le bien-être animal. Cependant, les limites liées aux différents modèles destinés à remplacer les manipulations invasives occasionnent une perte de transmission qui concerne à la fois certaines notions de physiologie expérimentale ainsi que l'apprentissage des gestes techniques qui peut être dommageable pour de futurs vétérinaires. C'est dans cette optique que les enseignants-chercheurs d'Oniris travaillent à améliorer ces travaux pratiques de façon à conserver l'aspect physiologie expérimentale sans avoir à sacrifier d'animaux mais aussi en préservant l'aspect pratique et la dimension éthique qui suscitent beaucoup d'intérêt chez les étudiants.

Afin de répondre à ce problème, nous allons à présent nous intéresser aux simulateurs réalistes, de plus en plus utilisés dans l'enseignement de la médecine humaine et commençant à apparaître dans les universités vétérinaires depuis quelques années, afin de mettre en évidence les perspectives pédagogiques qu'ils pourraient offrir à l'enseignement de la physiologie.

## **II. Les simulateurs, une perspective réaliste pour l'enseignement de la physiologie expérimentale**

### **A) Principe de la simulation et définition d'un simulateur réaliste**

#### **1) Définitions**

Le principe de la simulation repose sur la recreation des caractéristiques du monde réel<sup>30</sup>. Elle est utilisée de nos jours dans de nombreux domaines comme l'aviation<sup>31</sup>, la navigation, l'armée, l'ingénierie, etc<sup>32</sup>. Appliquée à la santé, elle tend à imiter des patients réels, des régions anatomiques ou à reproduire des gestes techniques qui seront mis en œuvre dans la vie réelle<sup>33</sup>. Elle permet ainsi d'apporter une approche pratique aux futurs praticiens tout en garantissant la sécurité et le bien-être des patients<sup>34</sup> puisque, grâce à elle, un acte nouveau n'est jamais réalisé sur un patient.

La Haute Autorité de la Santé<sup>33</sup> a établi les objectifs suivants concernant la simulation en santé :

- La formation à des gestes et des procédures courants dans la vie de praticien ;
- L'acquisition de connaissances techniques et de méta-connaissances (compétences en communication, travail d'équipe et gestion du stress) ;
- L'analyse de ses pratiques lors de débriefing ;
- La confrontation à des situations stressantes ou « à risque » pour le patient dans des conditions contrôlées et sécurisées ;
- La reconstitution d'évènements pour mieux les comprendre et les interpréter lors des débriefings.

Ces différents objectifs sont atteignables par le biais de différents supports que sont les simulateurs. Un simulateur est un appareil de simulation de forme plus ou moins complexe et plus ou moins proche du réel. On distingue donc plusieurs types de simulateurs que nous allons à présent présenter.

#### **2) Supports de simulation.**

##### **a) Simulateurs procéduraux.**

Un simulateur procédural permet de reproduire une région anatomique donnée dans le but de pratiquer et de s'entraîner à la réalisation de gestes techniques<sup>33</sup>. Ce type de simulateur permet de travailler un nombre limité de procédures mais demeure une bonne forme d'entraînement pour les étudiants notamment en chirurgie ou en anesthésie<sup>35 36</sup>. En effet, il a été démontré que l'utilisation de simulateurs procéduraux augmente la confiance des étudiants et réduit leur stress face à la réalisation d'un geste technique tout en augmentant leurs performances vis à vis de ce dernier<sup>37</sup>.

À Oniris, de tels simulateurs sont d'ores et déjà utilisés pour apprendre aux étudiants à réaliser des sutures, l'identification par tatouage d'un animal, la pose de cathéters (Figure 2) ou encore une intubation.

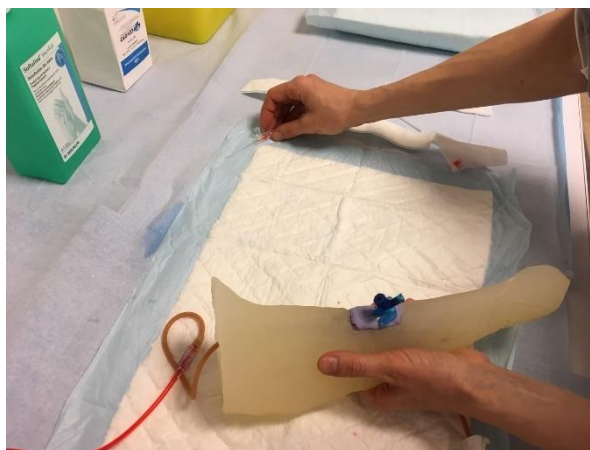


Figure 2 : Simulateur procédural pour la pose de cathéter chez le chien (©Anne Gogny)

La principale limite des simulateurs procéduraux réside dans le nombre limité de manipulations réalisables dessus. En effet, ce type de simulateur ne permet de pratiquer qu'un certain nombre de gestes ce qui pose un frein à la diversité d'activités qu'il peut offrir mais engendre aussi des coûts d'entretien car il faut régulièrement renouveler le matériel<sup>38</sup>.

De plus, un simulateur procédural ne s'adapte pas aux actions des étudiants qui s'en servent ce qui ne permet pas d'aller au-delà de la réalisation d'un simple geste technique. Cet inconvénient a été souligné par Kahol et al<sup>39</sup> qui ont cherché à remédier à ce problème en ajoutant une dimension réflexive à un modèle de simulateur procédural *via* plusieurs niveaux de difficultés et des variations au sein des manipulations proposées. Cette combinaison entre réflexion et technique a donné de bons résultats en termes d'apprentissage dans le cadre de cette étude.

#### b) Réalité virtuelle et réalité augmentée.

Autre outil de simulation, la réalité virtuelle permet de confronter les étudiants à des situations réelles *via* une interface 3D dans laquelle l'utilisateur peut agir<sup>33</sup>. Elle permet d'appréhender des situations complexes ou d'illustrer la théorie *via* une mise en situation interactive<sup>40</sup>. Ce type de simulation est une bonne alternative aux jeux de rôles notamment pour l'apprentissage de la communication clinique. Une étude menée sur des étudiants en médecine et en école d'infirmière<sup>41</sup> a montré que la réalité virtuelle présentait une efficacité équivalente aux simulations par jeux de rôle en matière de développement des compétences de travail en équipe et de communication. De plus, l'utilisation de la réalité virtuelle offre la possibilité à un grand nombre d'étudiants de se former en accédant à la plateforme de simulation à distance et ce autant de fois que nécessaire.

Cependant, si la réalité virtuelle permet de reproduire des situations de la vie réelle, elle est limitée en matière de pratique des gestes techniques. En effet, dans l'étude mentionnée précédemment<sup>41</sup>, l'examen clinique du patient se faisait en cliquant sur ce dernier ce qui demeure éloigné d'un examen clinique réel.

La réalité augmentée permet de pallier ce défaut de la réalité virtuelle. La Haute Autorité de la Santé la définit comme l'ensemble des systèmes informatiques permettant une superposition en 2D ou 3D à la perception de la réalité de l'utilisateur. Cet enrichissement virtuel peut stimuler la vue, l'audition ou le toucher et apporte un *feedback* immédiat à l'étudiant sur le geste qu'il réalise. Par exemple, un son émis lorsque l'action est correctement réalisée permet de s'entraîner sur un geste technique en autonomie. Ces systèmes de réalité augmentée commencent à être utilisés pour l'apprentissage de la médecine vétérinaire pour s'entraîner à poser un cathéter<sup>42</sup> (Figure 3), travailler l'anatomie ou encore, à un plus haut niveau, préparer une chirurgie<sup>43</sup>.

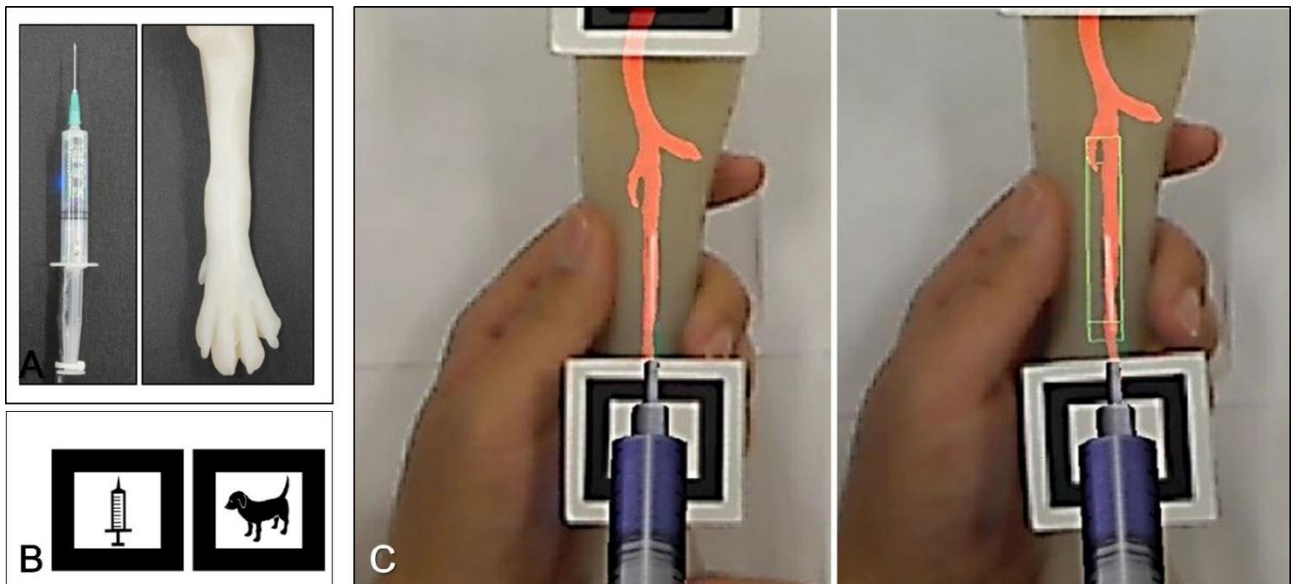


Figure 3 : Réalité augmentée pour la pose de cathéter veineux (Lee et al.)

Dans le domaine de l'enseignement de la physiologie, une application a été développée en 2019 pour permettre aux étudiants d'étudier le fonctionnement du cœur à l'échelle macroscopique et microscopique grâce à un système de réalité augmentée (Figure 4). Ce système a, en outre, été particulièrement bien perçu par les étudiants qui l'ont testé<sup>43</sup>.

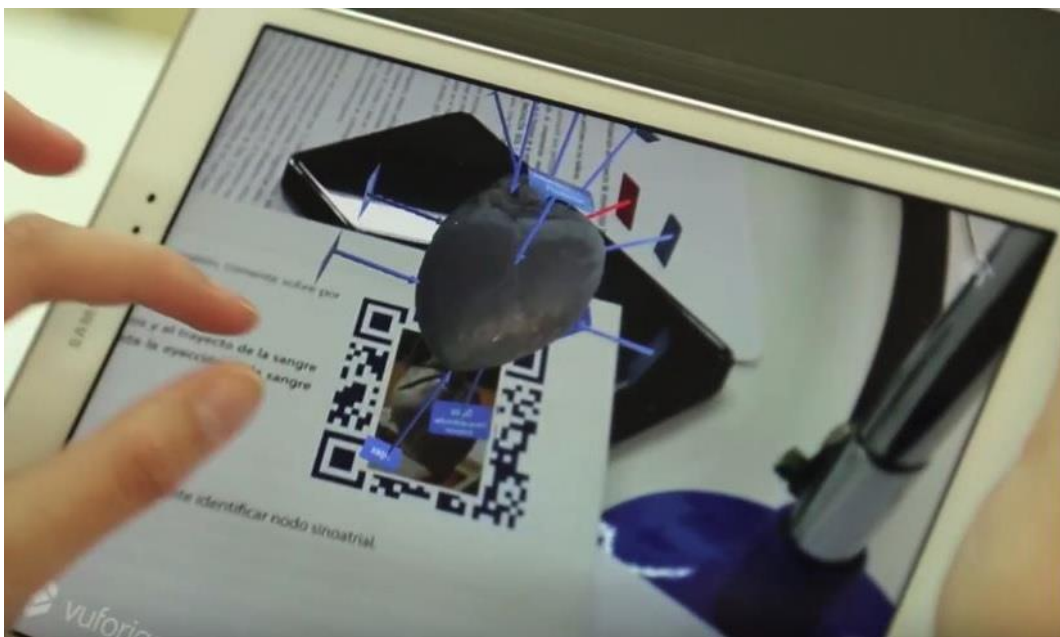


Figure 4 : Réalité augmentée et fonctionnement du coeur (Gonzalez et al.)

Néanmoins, selon l'étude menée par Eckert et al<sup>43</sup>, les bénéfices de la réalité augmentée dans l'enseignement de la médecine tant humaine que vétérinaire restent à évaluer. En effet, peu d'études démontrent une efficacité de ces systèmes pourtant en plein développement.



### c) Les « *serious games* » : le jeu vidéo au service de l'apprentissage

Issus de la technologie du jeu vidéo, les *serious games* consistent en l'élaboration d'un jeu à visée pédagogique dans lequel les étudiants interagissent dans un univers virtuel pour développer leurs compétences et connaissances<sup>44</sup>. Dans cette optique, ces jeux commencent à se répandre dans le domaine de la médecine humaine afin de former les étudiants à des situations de la vie réelle comme, par exemple, le jeu « *Discovering Pathology®* » destiné à aider les étudiants en médecine à appréhender l'anatomie pathologique et la physiopathologie<sup>45</sup> ou des simulateurs adaptés au bloc opératoire<sup>46</sup>.

Un autre intérêt des *serious games* est d'aider les étudiants à se repérer dans l'espace lors d'examen par endoscopie ou lors de laparoscopies exploratrices. En effet, le guidage de la caméra se rapproche d'éléments de déplacements connus dans les jeux vidéo. Il a par ailleurs été montré que ces derniers avaient un effet bénéfique sur la capacité des étudiants à faire évoluer la sonde endoscopique et à reconnaître les structures<sup>47,48</sup>. En revanche, leur utilisation n'améliore pas les compétences pratiques en chirurgie car les gestes ne peuvent être reproduits à travers ce type de simulateur<sup>47</sup>.

Pour être valide, un *serious game* doit proposer des objectifs à atteindre ainsi qu'un système de score à l'issue de la session afin que l'étudiant ait un retour sur ses performances. De plus, il doit offrir un *design* réaliste et engageant afin de captiver l'attention de l'utilisateur et augmenter le caractère immersif du jeu<sup>49</sup>.

Si ces systèmes de simulation semblent prometteurs en termes d'apprentissage de la médecine<sup>44,49</sup> et sont bien perçus par les étudiants<sup>50</sup>, leur coût est actuellement très élevé<sup>33</sup> ce qui limite leur accessibilité. En outre, Wang et al.<sup>49</sup> dans leur étude menée sur les différents systèmes de *serious gaming*, ont fait ressortir le manque d'organisation dans la conception de ces logiciels et l'hétérogénéité en matière de qualité de l'enseignement qui en découle. Ainsi, si ces systèmes pourraient trouver des applications dans le domaine vétérinaire, ils nécessitent encore d'être développés et améliorés afin de devenir plus accessibles.

### d) Simulateurs patients

Développés depuis les années soixante dans le but d'entraîner les futurs médecins aux gestes de secours puis de les former à la gestion de l'anesthésie, de l'arrêt cardio-respiratoire ou encore des soins au nouveau-né<sup>51</sup>, les simulateurs patients se présentent sous la forme d'un mannequin grandeur nature articulé et relié à un ordinateur. Ces mannequins *high tech* sont en mesure de ventiler, d'avoir un pouls et une fréquence cardiaque, d'avoir une couleur de muqueuses variable voire même de parler<sup>33</sup>. De plus, le tableau de commande associé au mannequin permet à l'enseignant de faire varier ses paramètres vitaux au gré de l'avancement de la séance et des décisions des étudiants<sup>52 33</sup>.

Ce type de simulateur compte parmi les plus réalistes qui soient et permet aux étudiants de réaliser de nombreux gestes techniques tout en les immergeant dans le scénario d'une situation de la vie réelle où tous leurs sens sont sollicités.

## 3) Fidélité des simulateurs : simulateurs *low* et *high fidelity*

### a) Définitions

Nous avons pu voir qu'il existait de nombreux supports de simulation présentant tous des caractéristiques différentes. Il est cependant nécessaire de réaliser une nouvelle distinction au sein des simulateurs que nous venons de décrire précédemment. En effet, un simulateur se doit d'offrir un

support permettant la simulation d'une situation réelle<sup>30,33</sup>. La fidélité par rapport à l'élément réel imité par le simulateur doit donc être évaluée. Dans leur publication, Munshi et al<sup>53</sup> définissent la fidélité d'un simulateur par son degré de ressemblance tant physiologique que comportementale avec l'objet qu'il reproduit.

La ressemblance physiologique ou fonctionnelle correspond à la proximité d'un simulateur avec son modèle réel, elle tient donc compte du réalisme physique ainsi que des réactions physiologiques. On peut donner comme exemple la réaction à l'injection d'adrénaline sur un mannequin de réanimation cardio-respiratoire ou tout simplement les fréquences respiratoire et cardiaque de base sur ce même mannequin. Pour que le modèle soit réaliste physiologiquement, il doit avoir les mêmes réactions qu'un patient humain ou animal<sup>54</sup>.

Miller<sup>54</sup> définit la ressemblance psychologique comme la capacité du simulateur à générer des réactions, tant émotionnelles que cognitives, chez l'utilisateur qui soient le plus proches possible des réactions rencontrées lors de la confrontation à la situation simulée dans la vie réelle<sup>55</sup>. Cette ressemblance joue un rôle clé dans l'investissement des étudiants lors de la séance de simulation et le stress qu'elle génère peut s'avérer bénéfique dans l'apprentissage puisqu'un événement émotionnellement marquant est plus aisément mémorisable<sup>56</sup>.

La ressemblance physique pure, physiologique et psychologique sont trois entités reliées entre elles et qui permettent d'établir la fidélité d'un simulateur non pas comme une simple ressemblance physique mais comme un ensemble d'éléments évoquant le sujet réel qu'il tend à imiter<sup>57</sup>.

#### b) *Low et high fidelity*

On définit les simulateurs selon leur degré de ressemblance avec la réalité. Ainsi, on peut concevoir des simulateurs avec un faible degré de ressemblance avec la réalité, dits *low fidelity*. On peut compter parmi ces simulateurs, les dispositifs utilisés lors des travaux pratiques de physiologie à Oniris pour préparer les étudiants à la réalisation d'une trachéotomie et d'une intubation.

En effet, le matériel utilisé est constitué d'une tubulure rigide, d'un diamètre proche de celui d'une trachée de lapin, maintenue sur un support. Ce type de support se rapporte à un simulateur procédural *low fidelity* car il est isolé et peu ressemblant à une véritable trachée de lapin (Figure 5).



Figure 5 : exemple de simulateur procédural *low fidelity* pour la mise en place d'une circulation extra-corporelle  
(©Multimedia Manual of Cardio-Thoracic Surgery)

Pour un exercice similaire d'intubation, un autre simulateur est proposé aux étudiants dans le complexe Virtual Vet. Il s'agit d'une tête de chien en silicone avec une encolure et un système de trachée permettant aux étudiants de s'entraîner au geste de l'intubation. Dans ce cas de figure, le simulateur est toujours un simulateur procédural, cependant il est plus proche de la réalité tant sur la ressemblance physique que physiologique grâce à la présence d'un système de test pour vérifier si

l'étudiant a correctement introduit la sonde dans la trachée ou s'il a fait fausse route et l'a placée dans l'œsophage. On a donc un simulateur procédural de type *high fidelity*.



Figure 6 : Simulateur procédural High fidelity pour l'intubation (©Anne Gogny)

En règle générale, le terme de simulation en médecine évoque les simulateurs *high fidelity* au détriment de simulateurs moins réalistes<sup>57</sup>. Cependant, l'étude menée par Beaubien et al en 2004<sup>57</sup> puis celle menée par Munshi et al en 2015<sup>53</sup> montrent toutes deux que les simulateurs de très haute fidélité ne sont pas forcément plus efficaces en termes d'apprentissage de compétences que des simulateurs de plus faible fidélité. En effet, pour apprendre à réaliser des points de suture, le support n'a pas nécessairement besoin de ressembler à un mannequin humain grandeur nature, un simulateur procédural de peau artificielle suffit à apprendre le geste et à l'automatiser. En revanche, pour entraîner des étudiants à la gestion d'un cas d'urgence, un simulateur de très haute fidélité sera plus utile pour que les étudiants s'imprègnent du scénario.

Concernant l'enseignement de la physiologie à Oniris, un simulateur procédural seul ne serait pas suffisant pour créer une alternative aux travaux pratiques sur les lapins car il ne permettrait pas d'avoir une vision d'ensemble de toutes les grandes fonctions physiologiques. De même, si un simulateur de type *serious game* pourrait s'avérer intéressant sur le plan de l'analyse des fonctions vitales d'un animal et offrir une grande diversité de scénarios, l'aspect pratique viendrait à manquer.

C'est pourquoi, nous allons à présent nous intéresser plus particulièrement aux simulateurs mannequins et à leur usage dans l'enseignement de la médecine afin de déterminer s'ils peuvent constituer une bonne alternative pour les travaux pratiques de physiologie expérimentale.

## **B. Utilisation de simulateurs mannequins dans l'enseignement de la médecine humaine et vétérinaire : intérêt et perspectives pour l'enseignement de la physiologie expérimentale**

### **1) Construction d'une séance de simulation avec un simulateur mannequin**

Une séance de simulation ne consiste pas simplement en l'utilisation d'un simulateur mannequin mais requiert une importante préparation autour de ce dernier tant pour le formateur que pour les étudiants.

La Haute Autorité de la Santé<sup>33</sup> définit trois étapes essentielles au bon déroulement d'une séance de simulation. Ces étapes sont une première phase de briefing, une phase de déroulement du scénario puis enfin la phase de débriefing. Nous allons à présent nous intéresser à la construction de chacune de ces phases afin d'avoir une idée du déroulement optimal d'une séance de simulation et d'évaluer comment cela pourrait être mis en application lors des travaux pratiques de physiologie expérimentale.

#### **a) 1<sup>ère</sup> étape : la phase de briefing**

Cette étape est cruciale pour le bon déroulement d'une séance de simulation. Elle a pour but de préparer les étudiants aux tâches qui leur seront confiées au cours du déroulement du scénario et de les mettre dans les meilleures conditions possibles pour qu'ils réussissent<sup>33,58</sup>.

Un briefing doit comporter quatre éléments clés pour être pertinent et efficace<sup>58,53,33</sup>. Ces éléments sont la définition des objectifs et du but de la séance, l'établissement d'un contrat fictif entre l'enseignant et les élèves<sup>58</sup>, l'explication du déroulement de la séance avec toute la logistique l'accompagnant et enfin l'élaboration d'une relation de confiance entre l'étudiant et l'enseignant.

Définir le but et les objectifs de la séance permet aux étudiants de se familiariser avec le matériel mis à leur disposition ainsi qu'avec les infrastructures dans lesquelles ils évolueront. À cette occasion, le déroulement du scénario doit être présenté de façon claire. Il est nécessaire d'informer les étudiants concernant la durée du scénario<sup>59</sup> mais aussi sur le rôle du formateur au cours de la séance. Par exemple, si l'enseignant se place aux commandes du mannequin, il doit expliquer clairement à ses étudiants qu'à un moment il fera varier les paramètres vitaux du simulateur et qu'eux devront s'adapter en conséquence.

Cette étape est aussi l'occasion de « poser le décor » du scénario<sup>33</sup>. Il ne s'agit pas uniquement de présenter un déroulé d'événements mais de mettre les étudiants en situation avec le mannequin en les plaçant par exemple dans un contexte post-opératoire ou de parturition<sup>60</sup>.

En complément de cette première étape, il est nécessaire d'informer sur l'organisation logistique de la séance. Ce second point clé englobe des informations telles que le devenir des téléphones portables pendant la session mais aussi le fonctionnement du matériel mis à disposition ainsi que les consignes de sécurité<sup>58</sup>. Il est nécessaire d'informer l'étudiant des possibilités offertes par le matériel et de ses limites<sup>33</sup>. Ainsi, l'établissement d'un contrat entre les étudiants et l'enseignant est une phase préalable essentielle au bon déroulement de la séance de simulation. Cet engagement implicite entre enseignant et étudiants permet de définir le rôle de chacun. L'enseignant s'engage à proposer un scénario le plus proche possible de la réalité avec le matériel dont il dispose et en retour, les étudiants s'engagent à respecter les consignes et à s'impliquer au cours de la session de simulation<sup>58,59</sup>.

Enfin, le dernier point clé consiste en l'établissement d'une relation de confiance entre les étudiants et leur enseignant. Cette étape permet de créer un environnement psychologiquement sécurisé pour les étudiants<sup>58</sup>. En effet, il a été démontré tant en médecine que dans d'autres domaines, qu'une personne éprouvant du stress ou de la peur est plus à risque de commettre des erreurs ou de ne pas apprendre correctement<sup>61</sup>. Or, une séance de simulation peut être source de stress pour les étudiants tant sur le plan de la communication, que des écarts de connaissances entre les uns et les autres ou tout simplement à cause de la peur d'être jugé par l'enseignant s'ils commettent une erreur<sup>62</sup>. Il est donc nécessaire pour l'enseignant de rassurer les étudiants et de mettre en place une relation basée sur la bienveillance, le respect, l'écoute attentive<sup>62 58</sup> et la communication.

Un briefing respectant ces points clés permettra de se placer dans des conditions optimales pour la suite de la séance. Cependant, dans leur étude de 2018, Cuerva et al<sup>60</sup> ont souligné l'importance de ne pas réaliser un briefing trop long au risque de perdre une part du bénéfice de cette première phase dans la phase de déroulement du scénario.

#### b) 2<sup>ème</sup> étape : la phase de déroulement du scénario

Le scénario de la simulation en santé se définit comme l'écriture du déroulement d'une session de simulation. Son but est de poser à la fois le cadre mais aussi les objectifs pédagogiques de la séance<sup>63</sup>.

L'outil de conception de scénario de simulation TEACH Sim (The Template of Events for Applied and Critical Healthcare Simulation)<sup>64</sup>, basé sur la méthodologie SMARTER, propose un modèle de construction de scénario découpé en onze parties afin de préparer une séquence de simulation efficace.

Outre un titre et toutes les informations concernant les apprenants et les différents intervenants au cours de la séance, un scénario doit définir les objectifs pédagogiques (5 au maximum) en les adaptant au niveau des étudiants<sup>64,63</sup>, le déroulé du scénario en lui-même avec tous les éléments nécessaires pour le rendre réaliste. Par exemple, les commémoratifs et l'anamnèse du « patient » devront être détaillés. De même, des résultats d'examen complémentaires type biochimie ou radiographie peuvent être ajoutés. Les prérequis doivent aussi être clairement définis au sein du script.

L'intervenant peut aussi prévoir les différentes réactions des étudiants et noter dans le scénario les adaptations qu'il devra réaliser lors du déroulement de la séance. Il est cependant nécessaire de laisser une place à l'improvisation dans de tels scripts. En effet, l'enseignant doit être capable de réagir au cours de la séance et de s'adapter aux étudiants afin de maintenir à la fois l'immersion clinique et le réalisme du scénario proposé via une interaction de type jeu de rôle entre lui et ceux qu'il encadre<sup>65,63,33</sup>.

Au cours du déroulement de la session, l'enseignant doit aussi évaluer les étudiants<sup>33</sup>. Pour cela, le fait de filmer la séquence peut s'avérer utile afin de pouvoir reprendre les événements et se concentrer sur les étudiants de façon individuelle.

#### c) 3<sup>ème</sup> étape : la phase de débriefing

La Haute Autorité de la Santé<sup>33</sup> définit le débriefing comme un temps alloué à l'analyse et à la synthèse. Il succède à la phase de déroulement du scénario et doit comporter trois points clés.

Le premier point consiste en un temps descriptif de la séquence. L'enseignant recueille le ressenti « à chaud » des étudiants concernant le déroulement du scénario dans son ensemble. Il est crucial pour permettre une bonne expression des étudiants que leur encadrant rappelle la règle de non-

jugement et de respect afin de maintenir un climat de confiance et de sécurité psychologique comme nous l'avons évoqué lors de la phase de briefing.

La phase descriptive est ensuite amorcée par des questions ouvertes posées par l'enseignant. Par exemple « à ce moment que s'est-il passé ? », « Qu'avez-vous fait ? ». Le but est d'inciter les étudiants à revenir sur leurs actions, à décrire comment ils ont vécu le scénario avec leurs propres mots mais aussi de les mener à expliciter leurs décisions.

Ce dernier point mène ensuite à une étape d'analyse. En revenant sur les événements, elle permet de décrypter et comprendre les raisons des décisions et des actions menées par les étudiants. L'enseignant se place en tant que médiateur et doit veiller à ce que chacun puisse s'exprimer librement sans rencontrer de jugement ou d'agressivité<sup>33,64</sup>. La sécurité psychologique et la gestion du stress des étudiants sont nécessaires au bon déroulement de l'analyse de la séance. Pour cela, l'enseignant doit être en mesure de rassurer, d'écouter activement les propos des uns et des autres pour rebondir dessus et doit donc posséder des compétences en matière de communication qui lui permettront de mener à bien l'ensemble du débriefing<sup>66</sup>.

Par ailleurs, la maîtrise de la communication de l'encadrant présente l'avantage d'initier les étudiants aux bases de la communication et de la gestion du stress ce qui leur servira plus tard dans leur cursus et leur profession.

À la suite de l'étape d'analyse, vient une phase de synthèse au cours de laquelle l'enseignant et les étudiants récapitulent ce qu'ils ont appris durant la simulation et discutent de comment ils auraient pu agir pour mieux gérer la situation à laquelle ils ont été confrontés. Les objectifs pédagogiques doivent être rappelés par l'enseignant et comparés aux résultats obtenus par les étudiants. Florence Policard<sup>67</sup>, dans son article portant sur l'optimisation du débriefing, insiste sur la nécessité de souligner autant les points positifs que négatifs concernant la séquence de simulation.

L'étape de synthèse est en outre l'occasion pour l'enseignant de partager ses connaissances et son expérience afin de fournir aux étudiants des moyens de s'améliorer. Cependant, ce savoir ne doit pas être imposé de façon magistrale mais diffusé sur la base d'échanges actifs entre les étudiants et leur encadrant<sup>67</sup>.

#### d) Évaluation de la séance de simulation

Il est important d'évaluer la séance de simulation proposée tant pour avoir une idée de son efficacité en termes d'apprentissage que de sa qualité. Cette démarche a pour but d'améliorer les futures séquences qui seraient menées mais aussi de relever les écueils rencontrés<sup>68</sup>.

Pour ce qui est du débriefing, le Centre de simulation médicale de Boston a développé un outil d'évaluation basé sur une échelle d'évaluation comportementale, le Dash (*Debriefing assessment for simulation in healthcare*)<sup>67</sup>. Ce système comporte une auto-évaluation par l'enseignant de son débriefing et une évaluation réalisée par les élèves afin de croiser les perceptions et d'améliorer la qualité du débriefing.

Concernant l'évaluation de l'efficacité en matière d'apprentissage d'un simulateur, plusieurs modalités sont envisageables. Parmi les plus efficaces, on retrouve la technique d'« Examen Standardisé des Compétences Cliniques » (ESCC) aussi appelée « Objective Structured Clinical Examination » (OSCE) en anglais. Cette technique consiste en l'évaluation des compétences des étudiants à travers la réalisation de différents ateliers en lien avec ce qui a été enseigné au cours des séquences de simulation. Pour chaque atelier, l'examineur dispose d'une check-list de compétences attendues et valide ou non selon la performance de l'étudiant<sup>69</sup>.

Dans le cadre de travaux pratiques de physiologie expérimentale avec des simulateurs mannequins, cette méthode d'évaluation pourrait trouver son intérêt dans la validation des compétences acquises.

L'évaluation des étudiants sur des patients réels est aussi une technique utilisée pour évaluer l'efficacité d'un simulateur<sup>69</sup>. Cependant, dans le cadre de la physiologie expérimentale dans le cursus vétérinaire, cette méthode présente peu d'intérêt.

La simulation à l'aide de simulateurs patients se rapproche des travaux pratiques de physiologie expérimentale historiquement pratiqués. En effet, les deux se basent sur l'étude des réactions d'un sujet à différents stimuli, en suivant un scénario précis dans lequel les étudiants sont amenés à réaliser des gestes techniques et à réfléchir en termes scientifiques. C'est pour cette raison que les simulateurs mannequins apparaissent comme de bons candidats au remplacement des lapins vivants dans les travaux pratiques.

Dans cette optique nous allons à présent étudier les apports de ces simulateurs dans la formation des futurs médecins et vétérinaires.

## 2) Utilisation de simulateurs mannequins dans l'enseignement de la médecine humaine

Depuis Resusci-Anne, créé en 1960<sup>51</sup>, les simulateurs mannequins n'ont cessé d'évoluer jusqu'à parvenir à des mannequins capables de parler, respirer, tousser, modifier leur coloration des muqueuses, etc. Ces simulateurs de haute technologie sont à présent utilisés dans le cadre de la formation en médecine et sont retrouvés dans les domaines de l'anesthésie, des urgences avec des mannequins voués à la réanimation, de la néonatalogie, de la cardiologie<sup>51</sup> et connaissent bien d'autres applications.

### a) Retour sur les avantages de l'utilisation de simulateurs mannequins en médecine humaine

Plusieurs études menées sur l'utilisation de mannequins *high tech* en anesthésie/réanimation et en néonatalogie ont montré une amélioration des compétences cliniques des étudiants ayant participé aux séances<sup>70,71,72</sup>. L'étude menée par Campbell en 2009<sup>70</sup>, a montré que les étudiants en néonatalogie bénéficiant de séances de réanimation de nouveau-né avec un mannequin *high tech* obtenaient de meilleurs résultats aux évaluations que les étudiants ayant suivi une séance sur un mannequin classique.

Dans le domaine de la physiologie humaine, l'utilisation d'un simulateur mannequin *high tech* a montré un rôle facilitateur dans l'apprentissage des notions de la physiologie respiratoire avec un gain de connaissances supérieur pour les étudiants ayant bénéficié de ces séquences de simulation<sup>73</sup>.

À l'amélioration des compétences cliniques s'ajoute un intérêt pronostique pour les patients et économique<sup>72</sup>. En effet, il a été montré dans le cadre de la pose de cathéters veineux centraux que l'entraînement sur simulateur diminuait significativement le risque d'infections systémiques liées aux cathéters ce qui permettait de réduire les coûts en soins et matériel pour l'hôpital.

L'utilisation de simulateurs *high tech* dans l'enseignement de la médecine présente aussi un intérêt en matière de gestion du stress. En effet, en plus d'être souvent très bien perçues par les étudiants<sup>72 74</sup>, les séances de simulation leur permettent de se confronter à des situations critiques en toute sécurité ce qui les rend plus sereins lors d'une véritable intervention.

Or, en urgences, il est reconnu que la gestion de certaines situations est directement liée à l'état d'esprit des intervenants<sup>72</sup>.

Ainsi, la simulation permet à travers une meilleure gestion du stress, d'optimiser certaines interventions et donc de mieux assurer la sécurité des patients.

#### b) Limites de l'enseignement avec des simulateurs *high tech* en médecine humaine

La première limite que nous avons soulevée auparavant concernant les simulateurs mannequins *high tech* est le prix. En effet, il faut compter entre 50 000 et plus de 150 000 euros à l'achat<sup>72</sup>. S'ajoutent à cela, les frais de maintenance, l'achat de matériel et l'aménagement de la salle autour du simulateur ainsi que la formation du personnel.

Une autre limite soulevée par Maxwell et al en 2015<sup>74</sup> est que certaines compétences ne peuvent être totalement acquises lors d'une séance de simulation unique. Par exemple, si le protocole de gestion d'une arythmie peut-être rapidement acquis via la séance de simulation, les étudiants ne sont pas pour autant en mesure de correctement détecter une arythmie quand elle se présente. C'est pourquoi, il est nécessaire, pour optimiser l'enseignement par la simulation, de réaliser plusieurs séquences au sein du cursus.

Nous avons vu précédemment qu'une séance de simulation avec un mannequin nécessitait une importante préparation et prenait du temps ce qui peut être un facteur limitant pour la répétition de ces séances car il peut s'avérer difficile de les insérer dans l'emploi du temps des étudiants et des enseignants.

Enfin, s'il a été montré que la simulation permettait une meilleure acquisition des connaissances à court et long terme, il n'existe pas encore de modèle d'évaluation fiable pour tester les connaissances des étudiants et comparer sur le long terme<sup>75</sup>.

#### 3) Place des simulateurs mannequins dans l'enseignement de la médecine vétérinaire.

À l'instar de la simulation en médecine humaine, l'utilisation de simulateurs mannequins *high tech* a montré son efficacité auprès des étudiants vétérinaires en facilitant leur apprentissage, notamment dans le contexte de l'anesthésie réanimation et en leur apprenant à gérer leur stress<sup>52</sup>.

Si ces simulateurs sont moins courants qu'en médecine humaine, ils se développent de plus en plus, offrant de nombreuses possibilités telles que l'intubation et la réanimation avec le *Critical care Jerry*® (figure 7) ou encore des gestes techniques plus poussés comme une thoraco-centèse, la gestion de polytraumatismes permis par le mannequin *high tech K-9 hero*® (Figure 8) développé initialement pour les soins d'urgence des chiens de l'armée américaine, mais aussi des chirurgies telles que l'ovariectomie par laparoscopie<sup>76</sup>.





Moscow, InterNICHE presentation, 2005, vet. departmnet, Friendship university

Figure 7 : Le simulateur patient critical care Jerry®

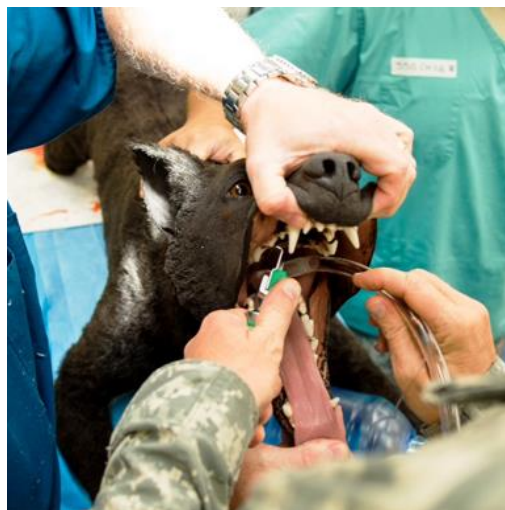


Figure 8 : Le simulateur K-9 hero® (©Trauma F/x)

Cependant, ces simulateurs demeurent très chers (plus de 3 000€ pour un mannequin de type *Critical care Jerry*®) ce qui constitue un frein important à l'équipement des écoles et universités vétérinaires<sup>77</sup>. En outre, il n'existe pas encore de simulateurs avec automate embarqué pour la médecine vétérinaire comme ceux que nous avons décrits précédemment en médecine humaine.

Une autre solution est alors d'utiliser des simulateurs mannequins humains pour enseigner aux étudiants vétérinaires. Modell et al<sup>78</sup> ont montré que cette solution était très bien perçue par les étudiants vétérinaires et aboutissait à de meilleurs résultats en termes d'apprentissage et de gestion du patient. Ce système a, par ailleurs, été employé à Oniris pour l'unité *Virtual Critical Care*. Les étudiants y sont confrontés au simulateur Sim-baby® (Figure 9), ayant été préalablement déguisé en chien, et se voient dérouler un scénario d'anesthésie réanimation pour les initier à cette discipline.



Figure 9 : Le simulateur patient high tech Sim'baby, University of Massachusetts Lowell (©Sue Potter)

Cependant, si adapter un mannequin destiné à la simulation humaine pour l'enseignement aux étudiants vétérinaires semble prometteur, les paramètres enregistrés dans les automates constituent une limite car ils ne sont pas forcément cohérents avec les paramètres physiologiques d'un chien ou d'un chat.

De plus, il n'existe à l'heure actuelle que très peu d'études concernant l'efficacité de simulateurs de ce type en médecine vétérinaire et aucune d'entre elles ne s'intéresse à son usage et à son utilité sur le long terme.

En conclusion, l'utilisation des simulateurs mannequins *high tech* se rapproche du fonctionnement des anciens travaux pratiques de physiologie utilisant des lapins vivants avec leur phase préparatoire de briefing, le déroulement de la séance puis la phase de débriefing. En outre, le caractère immersif et la diversité des réponses possibles du simulateur apparaissent comme un moyen de conserver le côté « pratique » qui suscitait l'intérêt des étudiants de première année tout en évitant de sacrifier des animaux.

Cependant, deux problèmes majeurs s'opposent à l'utilisation d'un simulateur mannequin *high tech*. Le premier obstacle est le coût élevé de tels systèmes. Le second problème est celui du réalisme. En effet, si des simulateurs mimant des chiens et des chats émergent, il n'y a pas encore de simulateurs lapins. Or, les paramètres physiologiques d'un lapin diffèrent énormément de ceux d'un chien ou d'un chat, il est donc difficile d'utiliser un autre type de simulateur pour reproduire les lapins de travaux pratiques. En outre, si un simulateur canin ou félin peut être plus pertinent pour la formation des étudiants vétérinaires du point de vue de la fréquence à laquelle ils seront confrontés à ces deux espèces, les données expérimentales à disposition ne concernent que le lapin.

C'est pourquoi, en partenariat avec l'IMT Nantes Atlantique, nous avons cherché à créer un prototype de simulateur lapin, adapté à l'enseignement de la physiologie expérimentale. Nous allons à présent détailler les attentes concernant ce projet afin de mieux en définir les objectifs pédagogiques.

### III- Définition des objectifs du projet Sim'Rabbit et établissement du cahier des charges

Le projet Sim'Rabbit s'articule autour de la création d'un simulateur réaliste se présentant sous la forme d'un lapin automatisé afin de remplacer les animaux vivants au cours des travaux pratiques de physiologie expérimentale tout en conservant l'intérêt des manipulations sur le vivant en matière de variabilité individuelle et de niveau d'étude du fonctionnement de l'organisme.

Afin de définir les attentes concernant ce projet, nous nous sommes intéressés à l'avis des étudiants de l'école vétérinaire d'Oniris concernant les travaux pratiques de physiologie expérimentale, faisant intervenir des manipulations sur des lapins, qu'ils ont suivi en première année de leur cursus.

#### A. Analyse du ressenti des étudiants quant au déroulement des travaux pratiques

Le questionnaire adressé aux étudiants de première année juste après la semaine de physiologie expérimentale portait sur l'organisation de la session, la qualité de l'enseignement de préparation, le déroulement des travaux pratiques en eux-même ainsi que sur le ressenti global sur cette semaine et la satisfaction des étudiants.

Afin de se focaliser sur l'aspect éthique des travaux pratiques de physiologie expérimentale, seules les questions concernant le respect de l'éthique et le ressenti des étudiants au long de la semaine ont été analysées ici.

##### 1) Analyse des retours des étudiants quant au déroulé de la semaine de travaux pratiques

Le questionnaire élaboré par les enseignants de physiologie et figurant en annexe 3 a été soumis aux étudiants en 2015, 2016, 2017 et 2018 avec respectivement 123, 116, 108 et 120 réponses. La première question portait sur le degré de satisfaction globale des étudiants sur l'ensemble de la semaine de travaux pratiques. Après avoir répondu à cette question « fermée », il était proposé aux étudiants d'ajouter des commentaires.

Les réponses des étudiants à la première question sur leur degré de satisfaction sont résumées dans la figure 10.

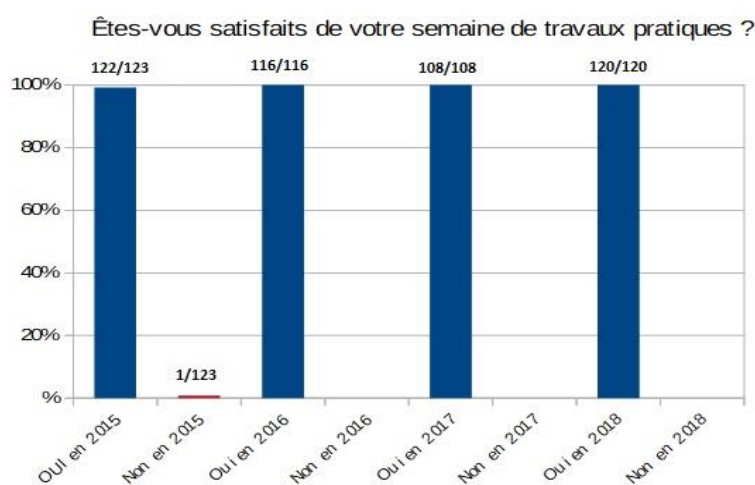
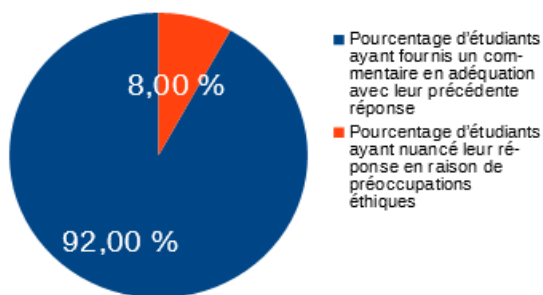


Figure 10 : êtes-vous satisfaits de votre semaine de travaux pratiques ?

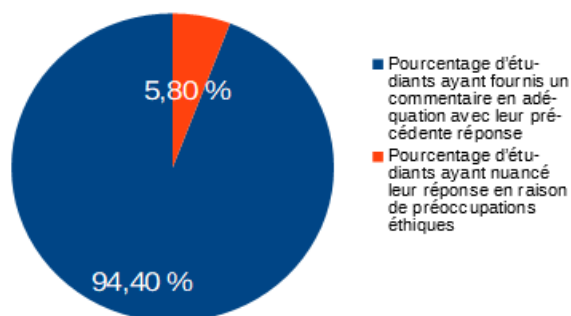
Les résultats démontrent une satisfaction générale des étudiants à propos de leur semaine de travaux pratiques, à l'exception d'un.e étudiant.e en 2015 sur laquelle nous reviendrons par la suite. L'analyse des commentaires associés à la question confirme que les étudiants vétérinaires ont compris l'intérêt pédagogique de ces séances pour mieux comprendre et appréhender la physiologie. L'avantage d'avoir un enseignant disponible exclusivement pour un petit nombre d'élèves est également mentionné, puisqu'il permet de pouvoir plus facilement s'exprimer, poser ses questions et reformuler. Enfin, 29 étudiants sur 123 en 2015 ont exprimé apprécier le fait d'être pour la première fois de leur cursus en contact avec un animal vivant en étant placé dans un contexte « médical ». En outre, l'ensemble des étudiants a été particulièrement sensible au souci du bien-être animal exprimé par leurs enseignants. La qualité des mesures d'analgésie mises en place, le calme, le professionnalisme et le sérieux des enseignants sont des termes qui reviennent dans une majorité des commentaires et ont été particulièrement appréciés des étudiants.

Cependant, à cette question, un « non » a été répondu en 2015 par un.e étudiant.e qui a justifié sa réponse par le fait que trop d'animaux étaient utilisés pour ces travaux pratiques. Cette réponse isolée nous a néanmoins amené à étudier plus finement les commentaires des étudiants afin d'analyser de façon plus précise leur ressenti. Pour ce faire, nous avons répertorié les commentaires dans lesquels, malgré une réponse « oui » à la question précédente, les étudiants nuançaient leur propos en utilisant des arguments éthiques. Les résultats de cette analyse figurent dans les diagrammes ci-dessous :

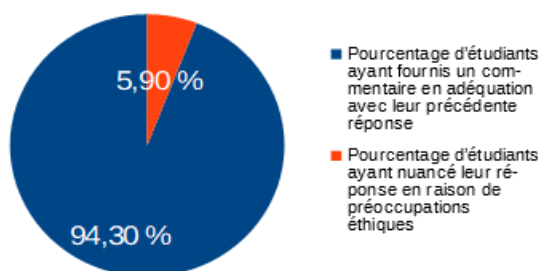
**Détail sur les commentaires ayant suivi une réponse "oui" à la question concernant la satisfaction générale en 2015**



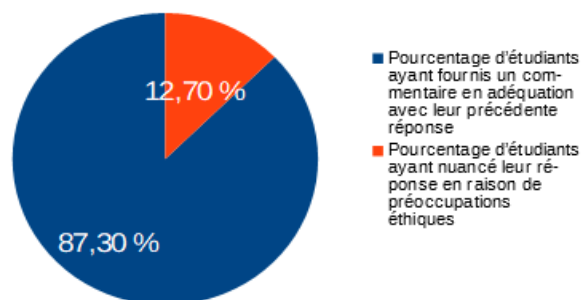
**Détail sur les commentaires ayant suivi une réponse "oui" à la question concernant la satisfaction générale en 2016**



**Détail sur les commentaires ayant suivi une réponse "oui" à la question concernant la satisfaction générale en 2017**



**Détail sur les commentaires ayant suivi une réponse "oui" concernant la satisfaction générale en 2018**



*Figure 11 : Détail des commentaires des étudiants*

Il ressort de l'analyse des commentaires à cette question que si la majorité des étudiants a apprécié les travaux pratiques, une part non négligeable d'entre eux (de 6 à 13 % selon les années) a exprimé une gêne à l'utilisation d'animaux vivants aboutissant à leur euthanasie pour la construction de leur savoir. De plus, s'ils ne remettent pas en cause toutes les précautions prises pour éviter la souffrance des lapins et l'intérêt des manipulations chirurgicales pratiquées, une dizaine d'étudiants

en 2015 a moins apprécié la partie physiologie, ayant l'impression de « jouer » avec l'animal. Ceci confirme la sensibilité des étudiants vétérinaires au bien-être animal.

## 2) Analyse des retours des étudiants concernant le respect de l'éthique durant les séances de travaux pratiques de physiologie

L'éthique et son respect étant au cœur de ces séances, tant concernant les animaux que sur le plan pédagogique avec l'objectif affiché de sensibiliser les étudiants aux notions d'éthique et de bien-être animal, la seconde question posée aux étudiants était la suivante : « Pensez-vous que l'éthique animale ait été respectée au cours des travaux pratiques ? ».

Les réponses données par les 467 étudiants vétérinaires sont présentées dans la figure 12 :

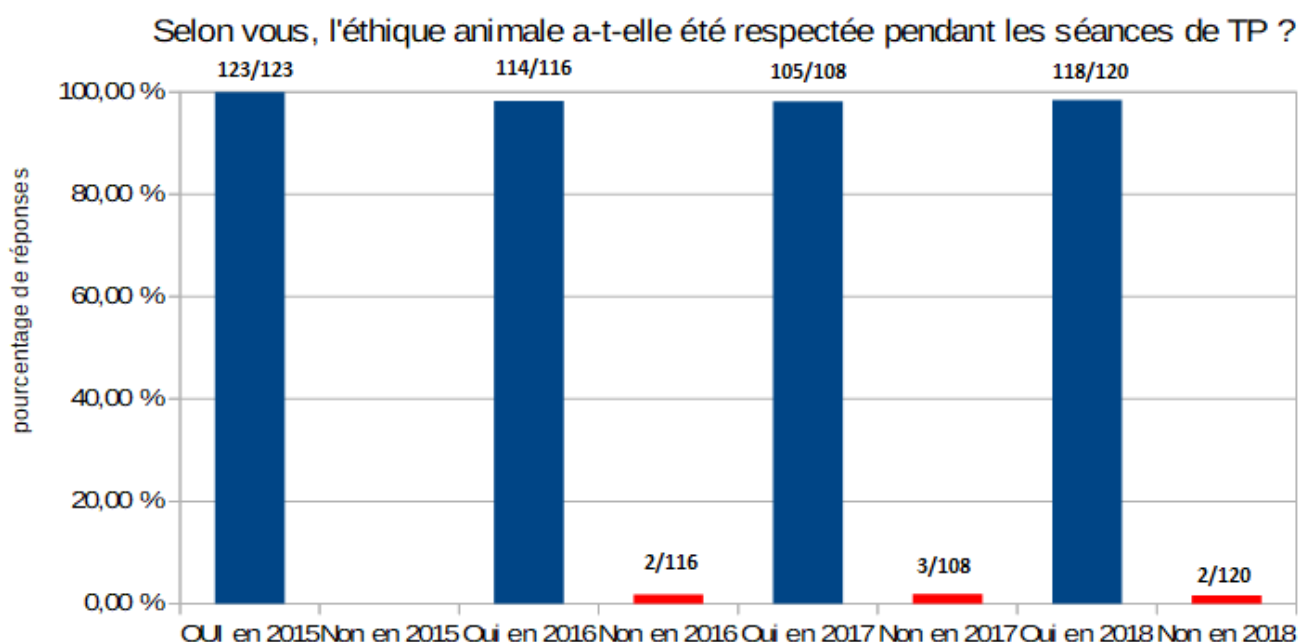


Figure 12 : Selon vous, l'éthique animale a-t-elle été respectée pendant les séances de TP ?

La majorité des étudiants ayant répondu au questionnaire s'est montrée satisfaite de la façon dont l'éthique animale a été prise en compte au cours des travaux pratiques. Cependant, 7 étudiants sur l'ensemble des étudiants interrogés sur les quatre années ont fourni une réponse négative à cette question. L'étude des commentaires rédigés par ces derniers nous a permis de mieux comprendre leur réponse. En effet, il ressort de ces réponses mitigées ou négatives une véritable préoccupation de ces étudiants pour le bien-être animal et une répugnance à ôter une vie à l'issue d'une séance de travaux pratiques.

Si tous ont conscience du fait que leur métier les mènera à pratiquer l'euthanasie ou à gérer des animaux en souffrance, le fait d'utiliser et de sacrifier des animaux en bonne santé à des fins pédagogiques leur semble inapproprié.

En outre, à l'instar de la précédente question, certains étudiants ayant répondu « oui » ont par la suite nuancé leur propos dans les commentaires en avançant le fait que malgré l'utilité de ces séances à leurs yeux, elles étaient synonymes de manipulation puis d'euthanasie d'un animal vivant et en bonne santé.

De plus, lors de la question connexe concernant le nombre de lapins utilisés, 39 étudiants sur les 467 interrogés ont souligné que trop d'animaux étaient utilisés et ce indépendamment de la question concernant le respect de l'éthique.

### 3) Perspectives, biais et limites de cette étude

Sur les quatre années consécutives, les retours des étudiants à l'égard des travaux pratiques avec les lapins ont été majoritairement positifs voire même très positifs. Cependant, des discussions quelques années plus tard avec des étudiants ayant répondu à ce questionnaire mais aussi avec des vétérinaires praticiens ont suscité des réactions divergentes de celles que nous avons pu étudier précédemment. En effet, le fait d'utiliser encore des lapins pour des manipulations invasives surprenait du côté praticien vétérinaire et suscitait une gêne vis-à-vis du caractère éthique des travaux pratiques du côté des étudiants. Afin de comprendre cette situation paradoxale entre des réponses très positives sur le sondage et des réactions plus mitigées quelques années après, nous nous sommes intéressés aux biais qui auraient pu intervenir dans notre étude.

Un biais est défini comme un écart de réponse par rapport à la réalité ou tout élément amenant à cet écart<sup>79</sup>. Il existe ainsi toutes sortes de biais qui peuvent être cognitifs, émotionnels, culturels, méthodologiques,<sup>80</sup> etc.

Dans le cadre de notre questionnaire, nous avons pu relever un biais émotionnel lié aux travaux pratiques en eux-mêmes. En effet, ces séances placées en première année du cursus vétérinaire représentent la première fois où les étudiants sont amenés à manipuler un animal dans un contexte « médical » et prennent donc une importance toute particulière comme nous l'ont montré les différents commentaires dont nous avons précédemment discuté. Or, le caractère particulier de ces séances et l'enthousiasme qu'elles suscitent peuvent biaiser les perceptions des uns et des autres en les détournant du sujet sur lequel ils sont interrogés<sup>81</sup>.

En outre, la qualité de l'encadrement qui a été saluée par la majorité des étudiants ayant répondu au questionnaire peut elle aussi constituer un biais à la fois émotionnel et de perception sélective<sup>80</sup> car du fait de leur sensibilité au bien-être animal, les étudiants vétérinaires sont plus à même d'être touchés par les précautions prises par leurs enseignants pour veiller à ce que les animaux ne souffrent pas et peuvent donc ainsi être influencés dans leur réponse<sup>82</sup>.

La différence entre les réponses données après les séances de travaux pratiques et celles données plusieurs années après peut aussi trouver une explication dans une augmentation de la sensibilité au bien-être animal des étudiants au cours de leur cursus causée par une confrontation régulière à des problèmes d'éthique<sup>83,27,84,85</sup> ainsi qu'à l'augmentation de leurs connaissances sur le sujet.

Au vu des différents biais possibles que nous avons évoqués, il aurait été intéressant de soumettre un nouveau questionnaire aux étudiants ayant connu les travaux pratiques avec les lapins quelques années auparavant afin de mesurer l'évolution de leur avis sur le sujet.

Toutefois, à la lumière de cette étude ainsi qu'à celle menée en Inde auprès d'étudiants en médecine<sup>86</sup>, il apparaît deux besoins principaux et quelque peu paradoxaux en matière d'enseignement de la physiologie expérimentale : celui de ne plus recourir au sacrifice d'animaux et celui de continuer à enseigner les gestes pratiques.

Le projet Sim'rabbit se propose donc de répondre à ces deux attentes pouvant paraître divergentes au premier abord.



## B. Idéation autour du modèle de simulateur mannequin et établissement du cahier des charges

Le développement d'un simulateur mannequin *high fidelity* est un processus complexe nécessitant la collaboration de plusieurs équipes ainsi qu'une préparation préalable non négligeable afin de déterminer les objectifs attendus et d'établir le cahier des charges.

Considérant l'importante valeur ajoutée de la présence d'animaux vivants pour favoriser l'acquisition de compétences par les étudiants vétérinaires, les enseignants-chercheurs impliqués dans le projet ont souhaité concevoir un simulateur mannequin réaliste tel que décrit précédemment. Le simulateur sera constitué d'un mannequin équipé de plusieurs automates lui permettant de ventiler, d'uriner et d'avoir un battement cardiaque. Les automates seront contrôlés par un logiciel conçu à partir de la banque de données de physiologie expérimentale disponible à ONIRIS et à l'ENVA (figure 13).

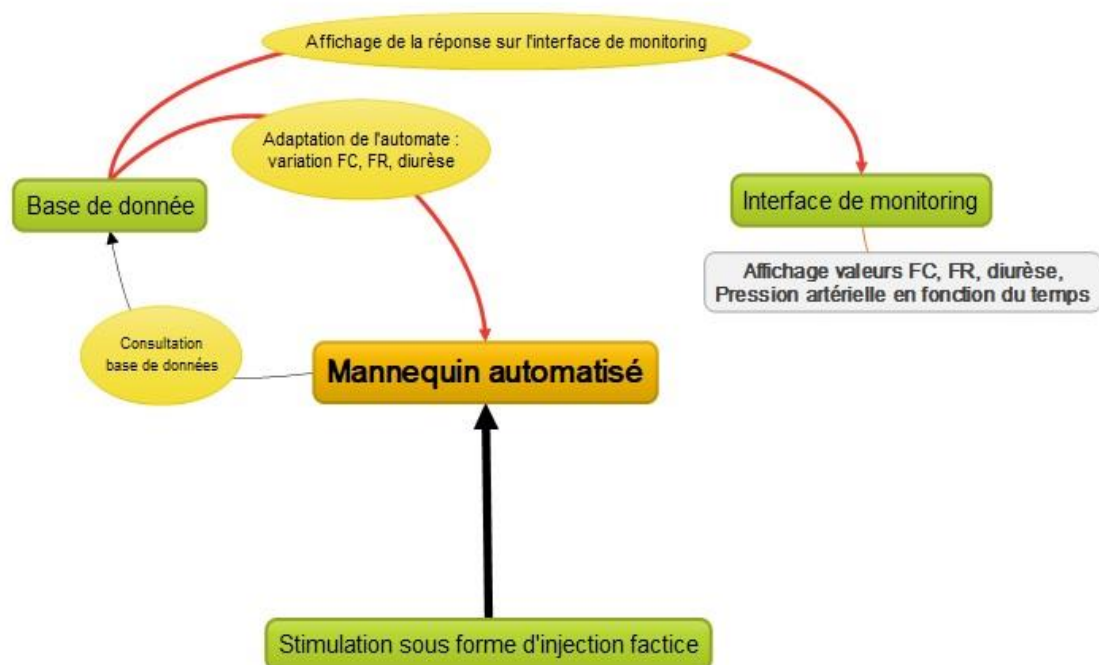


Figure 13 : Schéma du fonctionnement du simulateur Sim'rabbit

De cet objectif, trois axes de travail se dessinent : le premier concerne la conception des automates embarqués, le second la fabrication de l'enveloppe réaliste du lapin et le troisième axe vise la programmation du robot par un logiciel de commande adapté.

De plus, lors du séminaire mené en octobre 2019 pour la conception du Sim'rabbit, des pistes ont été envisagées pour le niveau d'interaction des étudiants avec le simulateur. La simulation d'injections a notamment été retenue afin de reproduire les conditions des travaux pratiques où les étudiants réalisaient les manipulations et injections sous la tutelle d'un enseignant.

Le cahier des charges pour le projet Sim'Rabbit comporte donc plusieurs axes que sont :

- L'exploitation des enregistrements d'anciens travaux pratiques pour générer une base de données qui servira de support aux réactions de l'automate ;
- Un automate capable de mimer le fonctionnement de différents organes ;
- Une enveloppe réaliste avec laquelle les étudiants seront en mesure d'interagir au cours de la session de travaux pratiques.

À cela s'ajoute l'exigence de produire un système à un coût raisonnable en le concevant de sorte qu'il soit aisément reproductible pour pouvoir bénéficier de plusieurs modèles pour une seule séance de travaux pratiques.

La seconde partie de ce manuscrit se consacrera donc à la création de ce simulateur en s'attachant plus particulièrement au mannequin en lui-même.





## **Partie II : élaboration d'un simulateur mannequin de lapin pour remplacer les lapins vivants lors des travaux pratiques de physiologie**

## **I. Collecte des données de physiologie expérimentale**

Les données de physiologie expérimentale destinées à servir de base pour le Sim'Rabbit proviennent des anciens travaux pratiques dispensés à Oniris. C'est pourquoi, dans cette partie, nous présenterons leur déroulement ainsi que le matériel utilisé à cette occasion.

### **A) Utilisation des lapins en travaux pratiques de physiologie expérimentale**

1) Historique et évolution de ces travaux pratiques en lien avec la réglementation en matière d'éthique et bien-être animal

Historiquement, les travaux pratiques de physiologie expérimentale adressés aux étudiants vétérinaires de première année comportaient des travaux incluant différents rongeurs (rats, souris), des lagomorphes ainsi que de plus gros animaux tels que des brebis.

Dans le cadre de la convention STE 123 (1985)<sup>6</sup> et afin d'appliquer le principe de la règle des 3R (réduire, remplacer, raffiner), les espèces utilisées ont été limitées au lapin. De même, le nombre d'animaux utilisé a été réduit, passant de 1,2 lapins en moyenne par étudiant avant 2004 à 0,4 lapins par étudiant en 2014.

Les travaux pratiques avec les animaux étaient organisés en 3 séances. La première constituant une séance de travaux dirigés visant à la préparation des deux séances de 4h chacune dédiées aux manipulations des animaux.

La première séance, au-delà d'une introduction à la chirurgie expérimentale, se plaçait dans une démarche de remplacement et raffinement des manipulations effectuées sur les animaux. En effet, au cours de cette séance les étudiants bénéficiaient d'une formation virtuelle où leur étaient données toutes les informations théoriques concernant les tâches qu'ils avaient à effectuer (de l'abord et contention de l'animal, monitoring de l'anesthésie, gestes chirurgicaux, euthanasie) ainsi que d'une démonstration magistrale de la chirurgie par l'un de leurs enseignants. À l'issue de cette séance, les étudiants bénéficiaient de toutes les connaissances théoriques nécessaires à la réalisation des travaux pratiques et disposaient d'une feuille de route complète qui leur permettrait de réaliser les travaux avec l'animal de manière efficace et dans le respect de son bien-être.

D'autre part, cette séance s'inscrivait dans une optique de remplacement des animaux via des mannequins et maquettes destinés aux étudiants afin qu'ils s'entraînent à réaliser les gestes (pose de cathéter, réalisation d'une incision et de ligatures, intubation trachéale) qu'ils allaient être amenés à faire lors des deux séances suivantes. Étaient associées à ces maquettes, des fiches d'information ainsi que des vidéos de démonstration qui constituaient un support d'apprentissage et une référence pour les étudiants.

Faisant suite aux travaux dirigés, les deux séances de travaux pratiques prenaient place la même semaine et se déroulaient en huitième de promotion. Les étudiants étaient répartis en groupes de quatre et chaque groupe se voyait confier un lapin. Un enseignant de physiologie était attribué à chaque groupe et restait présent tout le temps des manipulations pour superviser, aider, expliquer et veiller à ce que l'animal et son bien-être soient respectés tout du long de la séance.

Concernant le contenu des travaux pratiques, la première séquence de 4h s'attachait à la physiologie cardio-vasculaire et ventilatoire tandis que la seconde portait sur la physiologie cardio-vasculaire et rénale.

## 2) Descriptif du déroulement des séquences de travaux pratiques

### a) Anesthésie et analgésie

Le lapin était placé au calme et contenu de manière douce au moment de l'induction. Cette dernière était réalisée avec un mélange de médétomidine à 0,25 mg/kg (DORBENE NDV) et de kétamine à 50 mg/kg (IMALGENE NDV) injecté en intramusculaire. Un étudiant était alors chargé de monitorer la profondeur de l'anesthésie en évaluant les réflexes de retrait de la patte. Des demi-doses du même mélange étaient injectées si nécessaire pour l'entretien.

Une couverture analgésique était mise en place vingt minutes avant le début des procédures chirurgicales via une injection sous-cutanée de buprénorphine à 0,05mg/kg. Une anesthésie locale était aussi réalisée au niveau des zones d'incision (cou et abdomen médial) à l'aide de lidocaïne 2 % soit 0,05 mL administrés en intradermique tous les centimètres sur 4 à 6 cm selon la zone à inciser.

### b) Réalisation des actes chirurgicaux

Une fois l'induction faite, un cathéter était posé dans la veine marginale de l'oreille puis l'animal était positionné en décubitus dorsal. Le cou était alors tondu ainsi que l'abdomen au moment des séances s'intéressant au fonctionnement des reins.

Une incision longitudinale était réalisée sur le cou après avoir laissé le temps à la lidocaïne d'agir. Les tissus étaient dilacérés délicatement jusqu'à atteindre la trachée. Une carotide, une veine jugulaire et un nerf vague étaient ensuite isolés avec précaution.

Une trachéotomie était ensuite réalisée avec intubation de l'animal puis un cathéter était posé sur la veine jugulaire et l'artère carotide isolées.

Pour la séance s'intéressant au fonctionnement rénal, une laparotomie abdominale longitudinale médiane était pratiquée par un enseignant qui isolait ensuite les deux uretères et posait un cathéter sur chaque.

### c) Appareillage de l'animal

Un système de turbine était placé sur la sonde trachéale afin de réaliser une mesure de la fréquence respiratoire. Un capteur de pression artérielle était installé au niveau de la carotide. La diurèse se voyait évaluée via un compte-goutte (Figure 14).

Ces différents systèmes permettaient d'obtenir les tracés de la pression artérielle en fonction du temps, de la fréquence cardiaque en fonction du temps ainsi que de l'amplitude et de la fréquence respiratoire. La diurèse était évaluée visuellement par les étudiants via le compte-goutte.

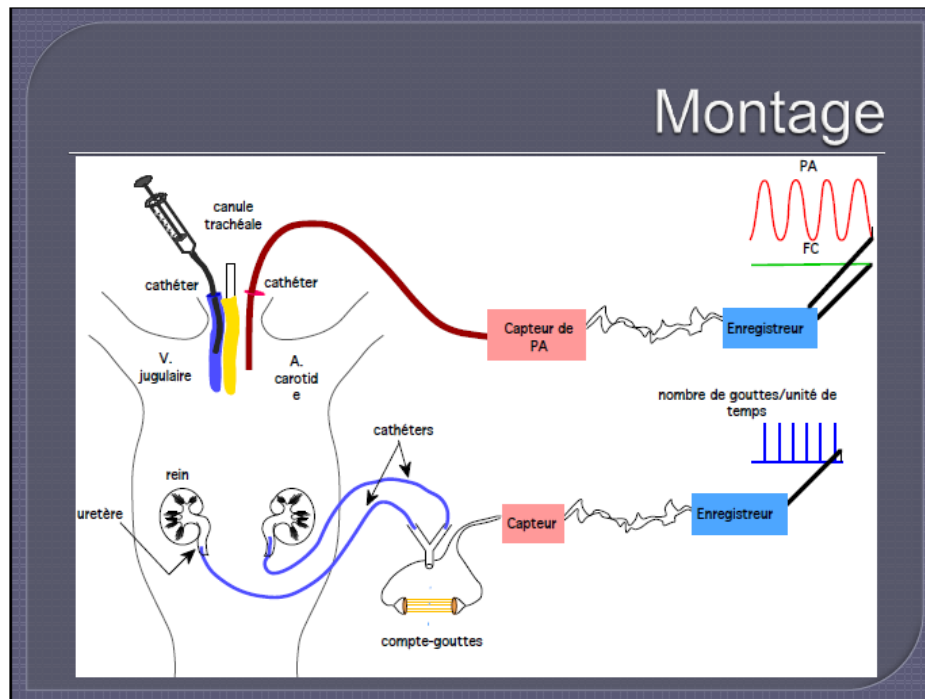


Figure 14 : schéma du montage expérimental ©Julie Hervé

#### d) Analyse et interprétation des tracés en fonction des manipulations réalisées

Le montage réalisé, la séquence portait ensuite sur l'observation et l'analyse des variations de ses paramètres sous l'effet de différents stimuli : injections d'acétylcholine, d'adrénaline, d'angiotensine II, d'ocytocine, respiration dans un ballon, hyperventilation, stimulation des nerfs vagues, section du nerf vague isolé.

Les courbes obtenues via le logiciel d'enregistrement et les modifications d'amplitude ventilatoire observables étaient discutées avec l'encadrant afin de replacer l'analyse des exercices réalisés dans le contexte du cours théorique de physiologie.

#### e) Euthanasie de l'animal

À l'issue des 4h, le lapin toujours anesthésié était euthanasié à l'aide d'un surdosage en pentobarbital disodique en intracardiaque ou en intraveineuse. Ce geste était pratiqué par un étudiant volontaire accompagné de l'encadrant ayant réalisé la séance avec lui ou par l'encadrant lui-même.

En cas de difficultés respiratoires ou d'arrêt cardiaque au cours de la séance, les enseignants mettaient en place les mesures de réanimation nécessaires ou euthanasiaient l'animal rapidement de la manière décrite précédemment afin d'éviter toute souffrance inutile.

#### f) Exploitation des résultats en travaux dirigés et retour sur les travaux pratiques

Pour conclure cette session de travaux pratiques, une dernière séance venait compléter les précédentes. Il s'agissait alors de travaux dirigés destinés à reprendre les éléments vus lors des manipulations afin de réexpliquer, répondre aux diverses questions posées et s'assurer de la bonne acquisition des connaissances à l'issue des travaux pratiques.

Un diaporama présentant les courbes obtenues par les étudiants permettait de reprendre les analyses de tracé en direct pour plus de clarté.

Une évaluation sur la semaine était aussi réalisée par les enseignants en se basant sur les connaissances des étudiants, leur capacité à répondre aux questions mais aussi sur leur tenue, leur professionnalisme et le respect du bien-être animal.

Les tracés réalisés par les étudiants au cours des sessions de travaux pratiques ont tous été enregistrés et conservés au fil des années, formant ainsi une base de données suffisamment fournie pour en extraire les valeurs qui serviront de support au Sim'Rabbit.

## B. Constitution, nettoyage et analyse de la banque de données expérimentales

Les simulateurs mannequins *high tech* disposent d'une base de données fournie permettant d'offrir un large panel de situations scénaristiques et de variabilité des réponses aux réactions des étudiants<sup>72</sup>. Afin de créer celle du Sim'Rabbit et qu'elle soit réaliste, nous nous sommes basés sur l'étude de la base de données collectées au fil des travaux pratiques à Oniris.

À l'aide du logiciel Labchart, nous avons repris l'ensemble des enregistrements réalisés sur les lapins lors des précédents travaux pratiques de physiologie expérimentale afin d'effectuer un tri et de ne conserver que les tracés les plus pertinents (figure 15). La pertinence des tracés étant déterminée par leur qualité, leur caractère complet (du début des manipulations à l'euthanasie de l'animal), la visualisation de chaque étape de la séance à travers les valeurs enregistrées et enfin l'absence d'artefacts.

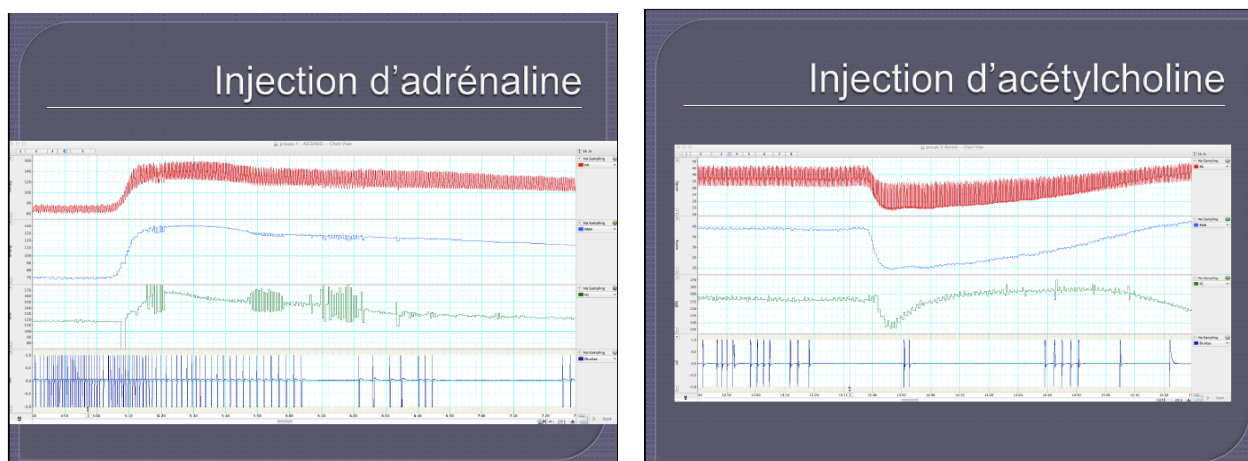


Figure 15 : Exemple de tracés obtenus lors des TP (©Julie Hervé)

Dans un premier temps, nous avons cherché à isoler les tracés les plus complets, c'est à dire ceux comportant toutes les injections et allant du début de la séance à l'euthanasie de l'animal. Certains tracés n'étant pas complets à la suite d'un redémarrage du logiciel ou à la mort prématurée du lapin, ils n'étaient pas exploitables par les étudiants ingénieurs.

La qualité des enregistrements a ensuite été évaluée afin de ne conserver que les plus lisibles. Certains artefacts sur l'enregistrement pouvant fausser les valeurs au sein de la base de données, il était préférable d'exclure les tracés qui en présentaient.

Les étudiants ingénieurs suite à cette extraction de données disposaient d'une cinquantaine de tracés de la pression artérielle moyenne en fonction du temps, de la fréquence respiratoire en fonction du temps et de la diurèse en fonction du temps.

Ainsi, les enregistrements des travaux pratiques passés nous ont permis d'établir une base de données sur les fonctions cardio-respiratoire et rénale du lapin et de fournir aux étudiants ingénieurs les informations nécessaires concernant les réactions de l'organisme suite à l'injection d'adrénaline, d'angiotensine, d'ocytocine et d'acétylcholine mais aussi celles concernant la stimulation du nerf vague et l'hyperventilation. De plus, dans un souci de réalisme, nous avons décidé d'intégrer à la base de données des tracés où le cathéter s'obstruait ou au cours desquels une complication anesthésique survenait.

## **II. Conception des différents prototypes d'automates embarqués dans le lapin robot**

### **A. Discussions préliminaires avec les étudiants ingénieurs**

Le rôle des étudiants ingénieurs était à la fois de concevoir un logiciel contenant les données que nous avons extraites des anciens travaux pratiques et en mesure d'utiliser ces données pour simuler les fonctions vitales du lapin mais aussi d'élaborer des automatismes capables de mimer la respiration et les battements cardiaques.

Afin de les aider à concevoir l'automate, nous leur avons fait rencontrer un vrai lapin (Figure 16) pour qu'ils puissent appréhender de façon concrète l'anatomie de l'animal, les dimensions à prévoir, le positionnement du cœur pour rendre l'auscultation de l'automate réaliste.



*Figure 16 : rencontre avec Polka, ancienne lapine de travaux pratiques*

Comme mentionné précédemment, la conception de l'automate devait s'axer sur trois points principaux qu'étaient la reproduction d'un cœur, d'un appareil respiratoire et d'une méthode pour mesurer la diurèse.

## B. Conception d'un simulateur de battement cardiaque

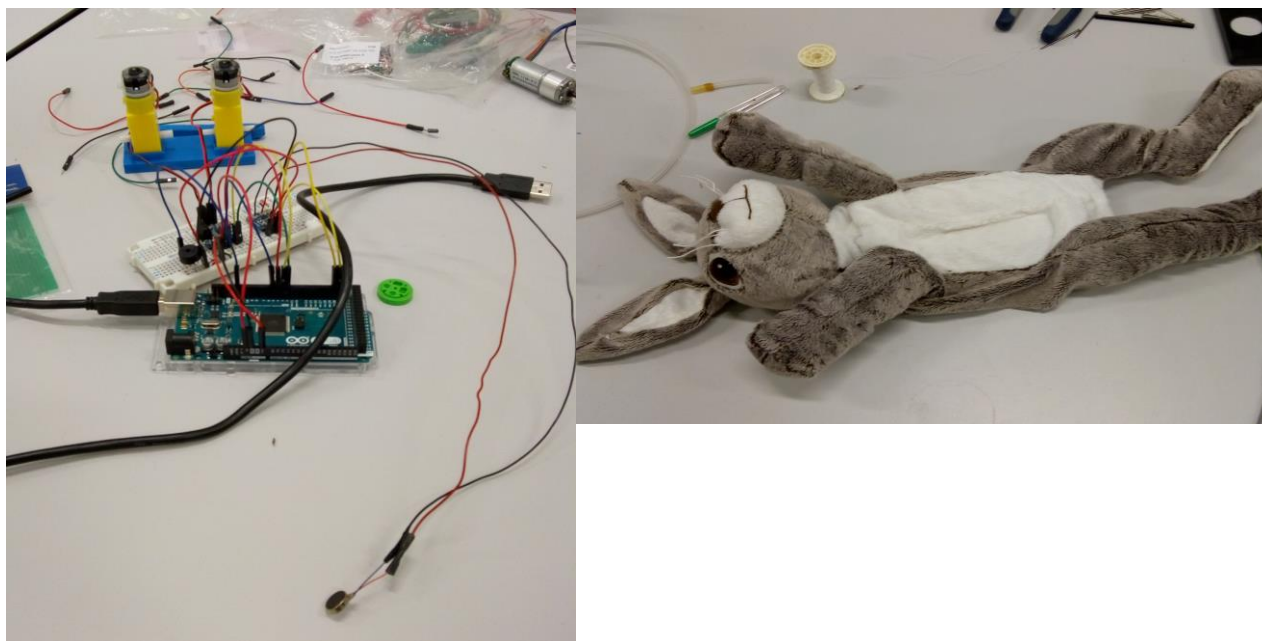
La méthode retenue pour simuler le cœur du Sim-rabbit est l'utilisation d'un buzzer capable d'émettre différentes fréquences de pulsation et d'intensité. L'auscultation du modèle vivant a permis de reproduire une pulsation similaire à celle des battements cardiaques dont la fréquence pouvait être modulée par l'interface entre l'automate et les données graphiques.

Le buzzer présente l'avantage de pouvoir être placé à l'emplacement du choc précordial sur un véritable lapin ce qui permet d'apprendre aux étudiants à trouver le choc précordial en plus d'ausculter l'animal. De plus, les possibilités de variations de fréquence et d'intensité permettent de fournir un large éventail de « rythmes cardiaques » allant des rythmes physiologiques qui nous intéressent pour les travaux pratiques à des rythmes pathologiques qui pourraient trouver leur utilité lors d'autres travaux pratiques.

## C. Conception d'un simulateur de poumons

Trois groupes d'étudiants ingénieurs ont travaillé sur un moyen de modéliser la respiration du simulateur.

Le premier prototype exploitait un système de « bras » reliés à un moteur qui les faisait tourner à différentes fréquences ce qui, placé dans un lapin en peluche, donnait lieu à des mouvements de la « cage thoracique » du modèle (figure 17).



*Figure 17 : Premier prototype du Sim'rabbit*

Cependant, plusieurs problèmes se sont posés avec ce prototype. Tout d'abord les mouvements générés se faisaient de haut en bas et étaient assez éloignés des mouvements d'une véritable cage thoracique. Ensuite, le dispositif était particulièrement bruyant ce qui constituait un obstacle supplémentaire au réalisme du système.

Un second prototype a alors vu le jour. En se basant sur l'anatomie d'une cage thoracique, un système de deux volets en arc de cercle rattachés ensemble sur une lamelle centrale visant à mimer une colonne vertébrale a été conçu à l'imprimante 3D. Un piston était installé sur la lamelle centrale pour impulser le mouvement (Figure 18). Le système était garni d'une mousse que le piston venait



compresser, permettant ainsi d'écarter les volets et d'obtenir un mouvement plus proche des mouvements respiratoires physiologiques d'un animal vivant.



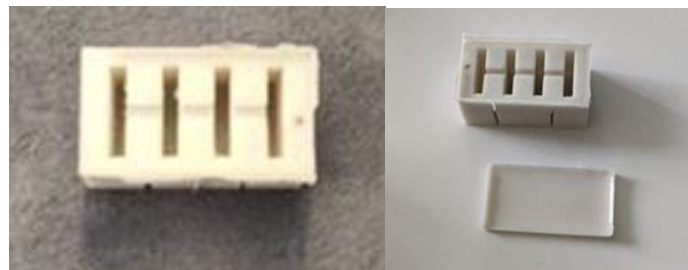
*Figure 18 : Second prototype Sim'rabbit*

Ce système présentait l'intérêt de limiter les mouvements à une zone correspondant à la « cage thoracique » du mannequin lapin et de se rapprocher des mouvements réels de cette dernière. Cependant, la mousse utilisée n'étant pas expansible lors d'une compression, elle s'écrasait mais n'actionnait pas les volets.

L'objectif du troisième prototype élaboré était donc de palier à ce problème en améliorant le système du second prototype. Dans ce nouveau système, la mousse a été remplacée par un dispositif en silicone relié à une pompe et une électrovanne. La pompe apportait de l'air à l'intérieur du système silicone qui sous la pression gonflait en s'arquant ce qui poussait les volets pour imiter une inspiration. L'électrovanne s'ouvrait alors, permettant le retour du silicone à sa forme initiale et l'abaissement des volets simulant donc une expiration (Figures 19 et 20).



*Figure 19 : troisième prototype pour la ventilation*



*Figure 20 : Dispositif silicone gonflable (à gauche) et moule tiré à l'imprimante 3D (à droite)*

Avec ce système, il était possible de simuler une respiration avec des variations de fréquence et d'amplitude. Cependant, une fois de plus, le bruit s'est avéré être un facteur limitant. En outre, l'ouverture rapide de l'électrovanne générerait un abaissement brutal de la structure qui reste à être réglé.

Les différents automates mis au point avec l'aide des étudiants ingénieurs ont permis de concevoir un dispositif de simulation du cœur et des poumons. Si ces derniers restent à peaufiner, ils représentent des pistes intéressantes pour l'automate. La simulation de la diurèse n'ayant pas encore été mise au point, elle constitue une autre piste de travail pour les étudiants ingénieurs et sera à prévoir comme objectif pour les groupes qui travailleront sur ce système à l'avenir.

À travers les différentes illustrations concernant l'élaboration de l'automate, nous avons pu voir que ce dernier avait pour enveloppe une peluche. Or, un tel système manquait de réalisme. C'est la raison pour laquelle nous avons travaillé à la réalisation d'un mannequin lapin plus réaliste du point de vue anatomique. C'est la conception de ce mannequin que nous allons à présent détailler.

### **III. Conception de l'enveloppe réaliste du lapin robot**

#### **A. Présentation du protocole et choix des matériaux utilisés**

##### **1) Présentation du protocole et enjeux**

Notre objectif était d'obtenir une enveloppe pour les automates qui présente la forme et la taille d'un lapin Néo-zélandais tout en étant suffisamment robuste pour supporter de multiples manipulations mais aussi flexible afin que les mouvements de l'automate puissent être visibles. Pour cela, nous avons choisi de nous orienter vers la réalisation d'un mannequin en silicone car la flexibilité et la robustesse de cette matière répondaient à nos attentes.

Afin d'établir un protocole, nous nous sommes basés sur les techniques utilisées pour la confection de poupons réalistes en silicone, ce qui nous a permis de déterminer deux étapes clés, la première étant la réalisation d'un moule « chaussette » en silicone dans lequel serait ensuite tiré notre lapin en silicone.

Le moule nécessitant un support pour être réalisé, il nous fallait un lapin. Or, le silicone est une matière qui requiert un long temps de séchage. Nous avons décidé de réaliser un lapin en plâtre à partir du cadavre d'un lapin néo-zélandais, euthanasié pour des raisons extérieures à notre thèse, dans le but de nous affranchir des problèmes de temps. Notre protocole s'est donc articulé autour de trois étapes majeures qui sont la réalisation d'un lapin en plâtre, la conception d'un moule « chaussette » en silicone et enfin le tirage d'un lapin en silicone.

##### **2) Choix des matériaux**

Le choix des matériaux à utiliser et en particulier celui du silicone a constitué une étape cruciale dans la conception du mannequin lapin. En effet, nous devions mouler des structures fines comme les oreilles et donc difficilement accessibles dans un moule. Le silicone devait donc être suffisamment fluide pour pouvoir remplir ces espaces étroits.

C'est pour cette raison que nous nous sommes tournés vers des gammes de silicone très souples. Deux ont particulièrement retenu notre attention, les silicones Dragon Skin Fx 10® et Ecoflex 00-20® de la marque Smooth-on. Ces deux silicones présentaient plusieurs avantages pour les moulages que souhaitions réaliser :

- Une grande flexibilité permettant de faciliter les démoulages d'objets avec de fortes contre-dépouilles ;
- Une faible viscosité utile pour couler des éléments fins comme les oreilles du lapin ;
- Un temps de séchage rapide ;
- Une résistance importante.

Un autre avantage de ces silicones que nous pouvons évoquer est le fait qu'ils sont tous deux conçus pour des moulages sur la peau et donc ne sont pas toxiques pour l'utilisateur ce qui facilite leur utilisation.

Afin de choisir lequel des deux serait le plus adapté, nous avons effectué plusieurs tests. Tout d'abord nous avons créé un moule chaussette à l'aide du Dragon Skin Fx 10® à partir d'une forme simple dans lequel nous avons coulé les deux silicones pour obtenir deux objets identiques que nous avons par la suite comparés. (Figure 21)

Le silicone Ecoflex 00-20® présente une viscosité plus faible que le Dragon Skin Fx 10® au moment de le couler dans le moule. Une fois sec, il est plus flexible et plus souple que le second silicone. Cependant, cette flexibilité rend la texture au toucher moins proche de celle de la peau comparée au Dragon Skin Fx 10®.

Du fait de sa résistance mais aussi de sa viscosité plus élevée qui facilitait l'application, nous avons choisi de réaliser le moule en silicone à l'aide du Dragon Skin Fx 10®.



*Figure 21 : Tests des deux silicones, en vert et rouge le Dragon Skin Fx 10®, en rose l'Ecoflex 00-20®*

Un second test que nous avons effectué fut de vérifier l'aptitude de ces deux silicones à se couler dans des espaces réduits. Nous avons donc créé un objet simple, une sphère avec quatre zones plus fines de chaque côté dont nous avons tiré un moule chaussette (Figure 22).



*Figure 22a : Modèle pour répliquer des éléments fins*



*Figure 22b : réplique en silicone Ecoflex 00-20®*

À l'issue de ce test, il s'est avéré que les deux silicones pouvaient facilement permettre de mouler des structures fines et se démoulaient tous deux aisément même si l'Ecoflex 00-20® était plus fluide et donc se glissait plus facilement dans les zones étroites du moule.

L'idée nous est alors venue de retenir l'Ecoflex 00-20® pour le tirage des oreilles du lapin et d'utiliser le Dragon Skin Fx 10® pour le reste du corps. C'est pourquoi nous avons cherché à voir si les deux silicones tenaient bien ensemble en les coulant l'un sur l'autre. Il s'est avéré que s'ils tenaient, la jonction entre les deux était fragile et facilement détachable. Nous n'avons donc pas retenu cette idée et décidé d'utiliser seulement le Dragon Skin Fx 10® car il était plus résistant et plus proche au toucher de la texture de la peau.

Nous avons aussi testé trois agents démoulant, le savon noir, la vaseline et le talc, afin de choisir le plus approprié pour nos travaux. Les résultats obtenus sont répertoriés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Comparatif de trois agents démoulant accessibles dans le commerce

	Avantages	Inconvénients
<b>Savon noir</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Peu cher et facile à se procurer en grandes quantités.</li> <li>· Fluidité.</li> <li>· Possibilité de le répartir dans des zones difficiles d'accès.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Sèche très rapidement et perd ses qualités d'agent de démoulage une fois sec.</li> </ul>
<b>Vaseline</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ne sèche pas et ne perd pas ses qualités d'agent de démoulage.</li> <li>· Peut être répartie plus précisément dans le moule car elle s'applique à la main comme une pommade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Plus difficile à appliquer avec précision dans des zones étroites.</li> <li>· Plus difficile à se procurer en grandes quantités.</li> </ul>
<b>Talc</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Très facile à se procurer et peu cher.</li> <li>· Conserve ses qualités d'agent démoulant avec le temps.</li> <li>· S'applique facilement dans des zones difficilement accessibles.</li> <li>· Fort pouvoir d'agent démoulant.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Sa volatilité fait qu'il peut fragiliser un moule en se mettant entre les différentes couches.</li> </ul>

À l'issue des tests réalisés avec ces trois agents démoulant, nous avons décidé de retenir le talc pour l'élaboration du moule chaussette et pour le tirage final.

## B. Conception d'un moule en bandes plâtrées et tirage d'un lapin en plâtre

La réalisation d'un lapin en plâtre a nécessité l'utilisation d'un cadavre de lapin Néo-zélandais euthanasié pour des raisons extérieures à nos travaux. Nous allons à présent détailler les étapes qui nous ont permis d'aboutir à une statue en plâtre de lapin. Le choix du plâtre comme support tient aux détails qu'il permet de conserver lors du moulage et à sa capacité à se couler dans des espaces étroits. Ainsi, notre modèle en plâtre devait présenter le dessin des poils dans un souci de préserver le réalisme de la réplique.

### 1) Préparation du cadavre de lapin et réalisation d'un moule en bandes plâtrées

Le lapin est placé en décubitus dorsal, les oreilles légèrement écartées de la tête afin de pouvoir les mouler séparément. Cette position correspond à la position des animaux lors des travaux pratiques de physiologie. De plus, elle présente l'intérêt de bien séparer chaque membre des autres.

Nous allons à présent détailler les étapes menant à la réalisation d'un moule en bandes plâtrées qui servira de support pour le tirage en plâtre :

1. La face ventrale du lapin est enduite de vaseline afin de coller les poils.
2. Des bandes plâtrées de type Cellona® 15cm\*3m ont ensuite été appliquées délicatement sur la face ventrale du lapin. Un soin tout particulier a été accordé à la tête et aux oreilles afin d'imprimer le détail des yeux, du museau et des oreilles (Figure 23).
3. Une seconde couche de bandes plâtrées est ensuite appliquée sur toute la face ventrale du lapin afin de renforcer la première.
4. Après quelques minutes de séchage, le lapin est retourné et placé en décubitus ventral sur un support. Les pattes ne devant pas supporter le poids du lapin au risque d'abîmer le plâtre, nous avons choisi de le déposer sur le ventre sur un support adapté.
5. Les bandes plâtrées sont alors appliquées sur la face dorsale du lapin en prenant soin de laisser un espace entre les bandes ventrales et dorsales qui permettra le démoulage.
6. Après séchage, le lapin est de nouveau placé en décubitus dorsal et les bandes plâtrées placées sur la face ventrale sont retirées délicatement. Un héli-moule est alors obtenu.
7. La partie ventrale du moule retirée, le lapin est retourné et une seconde couche de bande plâtrée est appliquée sur toute la partie dorsale de l'animal pour renforcer la structure.
8. Une fois les bandes sèches, elles sont retirées délicatement.

À l'issue de ces manipulations, nous avons obtenu deux héli-moules en bandes plâtrées qui seront ensuite assemblés à l'aide de bandes plâtrées pour constituer un moule complet. Lors de l'assemblage, une ouverture est laissée dans l'extrémité de la patte arrière droite afin de couler le plâtre à l'intérieur.



*Figure 23 : Dépôt de bandes plâtrées sur la face ventrale de la dépouille*

## 2) Obtention d'un lapin en plâtre après coulage

Au moment de l'assemblage, l'intérieur du moule est enduit de vaseline qui servira d'agent de démoulage. 4L de plâtre ont été nécessaires pour couler le lapin.

1. Le moule est maintenu tête vers le bas afin de pouvoir remplir correctement l'ensemble.
2. Le plâtre est coulé à l'intérieur.
3. L'ensemble est laissé à reposer pendant 48h, le temps que le plâtre sèche.

Lors du démoulage, le moule en bandes plâtrées est incisé délicatement afin de séparer les deux hémi-moules qui sont ensuite retirés.

Du fait des circonstances exceptionnelles liées au coronavirus, cette étape n'a pu être achevée. Afin d'obtenir un support, un lapin en terre cuite a été sculpté à partir des images du lapin au moment du moulage des bandes plâtrées et de Polka, la lapine Néo-zélandaise ayant permis aux étudiants ingénieurs de se familiariser avec les lapins de travaux pratiques. À partir de ce modèle, nous avons pu poursuivre le protocole par la réalisation d'un moule chaussette en silicone dont nous allons à présent détailler l'élaboration.

## **B. Réalisation d'un moule chaussette en silicone**

### 1) Présentation du matériel utilisé et préparation

La réalisation de ce moule chaussette a nécessité 1,3kg de silicone Dragon Skin Fx 10® que nous avons mélangé à de l'acrylique rouge. La coloration du silicone permettait d'aisément distinguer les zones manquant de silicone lors de l'application. L'agent démoulant choisi était le talc.

Le lapin en terre cuite est enduit de talc au préalable sur la face ventrale et sur les flancs. Il sera enduit plus tard sur la face dorsale.

### 2) Réalisation du moule chaussette en silicone

Les étapes de la réalisation du moule sont détaillées ci-dessous (Figure 24) :

1. Le lapin est placé en décubitus dorsal et une première couche de silicone est appliquée sur toute la face ventrale. Cette couche est fine de sorte à se débarrasser des éventuelles bulles d'air. Un soin tout particulier est accordé lors de l'application du silicone sur le museau, les yeux et les oreilles afin d'obtenir un maximum de détails.
2. Un temps de séchage de 30 minutes minimum est nécessaire pour que la couche soit entièrement sèche.
3. Le lapin est placé en décubitus ventral et du talc est appliqué sur sa face dorsale en prenant soin de ne pas le mettre en contact avec le silicone déjà coulé.
4. Le silicone est appliqué sur la face dorsale en une couche fine.
5. Après 30 minutes de séchage, une nouvelle couche est appliquée sur l'intégralité du corps du lapin.
6. L'opération est répétée 3 fois avec un temps de séchage de 30 minutes entre chaque application.
7. Une bande de silicone est ensuite appliquée au milieu du dos, de la nuque à la base de la queue.





*Figure 24 : étapes de fabrication du moule en silicone*

L'ensemble a été laissé à sécher pendant encore 30 minutes. À l'issue des manipulations, le lapin en terre cuite était intégralement recouvert de silicone et dans son dos se trouvait une bande plus épaisse destinée à servir au moment du démoulage.

### 3) Réalisation d'un contre-moule en bandes plâtrées

Avant le démoulage, nous avons réalisé un contre-moule afin qu'il puisse soutenir le moule et éviter les déformations au moment du tirage final (Figure 25). Ce contre-moule a nécessité deux rouleaux de bandes plâtrées Cellona® 15cm\*2m.

L'ouverture du moule allant se trouver sur le dos, le tirage se ferait en coulant le silicone via le dos du moule en forme de lapin. Nous avons donc choisi d'appliquer les bandes plâtrées sur la face ventrale du moule.



*Figure 25 : élaboration d'un contre-moule en bandes plâtrées*



Aucun agent de démoulage n'a été nécessaire. Une première couche de bandes plâtrées a été appliquée puis une seconde pour renforcer la structure. L'ensemble a été mis à sécher pendant une nuit puis a été détaché délicatement du moule.

#### 4) Démoulage et obtention d'un moule chaussette en silicone

Pour le démoulage, la bande dorsale a été incisée en formant des crans afin de permettre une fermeture du moule par la suite. L'ouverture est pratiquée du haut de la nuque à la base de la queue. Le silicone est délicatement détaché du dos du lapin puis des membres.

Il est alors retiré membre après membre, en commençant par les membres pelviens pour ensuite dégager les membres thoraciques, la tête et les oreilles. À l'issue de ces manipulations, on obtient un moule chaussette en silicone présentant intégralement la forme d'un lapin (Figure 26).

Le support en terre cuite étant intact, il peut être réutilisé pour réaliser un second moule.



*Figure 26 : obtention d'un moule chaussette et d'un contre moule en bandes plâtrées*

### **D. Phase de tirage et obtention d'une réplique en silicone**

#### 1) Tirage d'un lapin en silicone à partir du moule chaussette

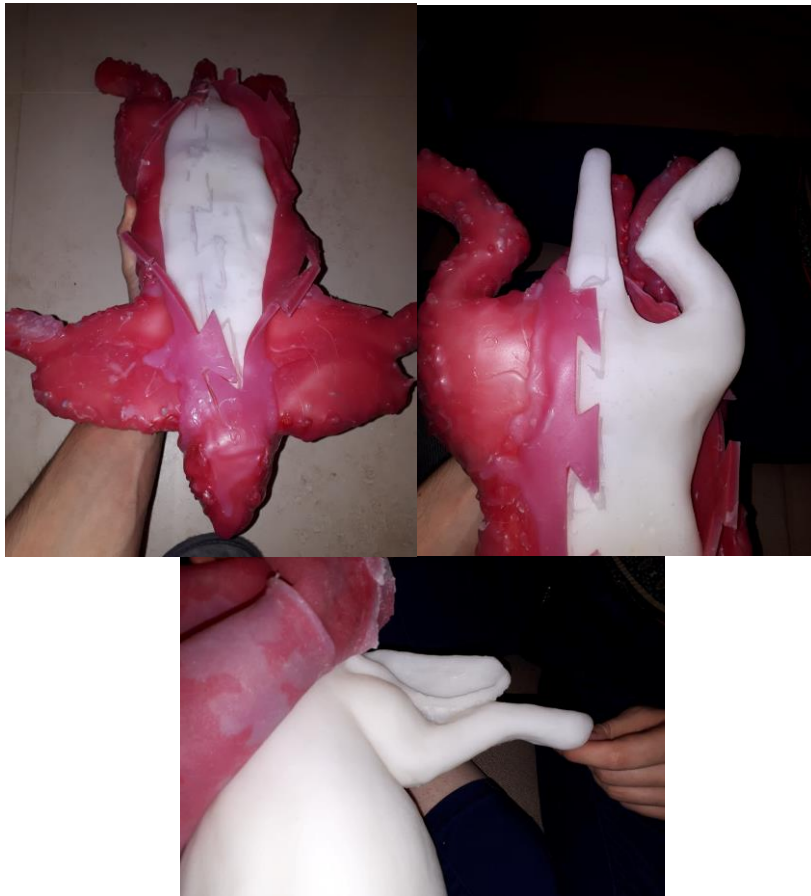
La réalisation de cette étape a nécessité 3kg de silicone Dragon Skin Fx 10® colorés en blanc avec de l'acrylique ainsi qu'un cylindre de 5 cm de diamètre et de 15 cm de long.

Afin de limiter au maximum la présence de bulles, plusieurs coulées de silicone ont été réalisées avec un temps de séchage de 45-50 minutes entre chaque. Nous avons donc commencé par couler le silicone dans les membres, la tête et les oreilles. Au moment de couler le tronc, le cylindre a été déposé à l'intérieur du moule en région thoracique. Le silicone est ensuite coulé autour.

Durant le coulage, le moule a été progressivement refermé avec des épingles et une mince couche de silicone pour le sceller. L'ensemble est laissé à sécher pendant 1 à 2 heures.

## 2) Démoulage et finitions

À l'aide d'une lame, le moule est incisé en partie dorsale, en suivant la ligne d'incision précédente. Les bords sont alors écartés et le lapin est démoulé précautionneusement, membre après membre (Figure 27).



*Figure 27 : Démoulage du lapin*

On obtient alors une réplique en silicone du lapin en terre cuite original (Figure 28). Les détails des yeux et du museau sont conservés, permettant ainsi un rendu réaliste.

Une couche de silicone est nécessaire pour finir la partie dorsale et corriger les éventuels défauts puis le dos est incisé pour extraire le cylindre et ainsi obtenir une cavité permettant d'insérer l'automate.



*Figure 28 : Réplique et modèle d'origine*

## **Partie III : Discussion**

L'objectif de notre thèse était d'aboutir à une réplique de lapin réaliste qui puisse servir de support au Sim'rabbit. Nous devions prendre en compte la robustesse du matériau en vue de son utilisation future mais aussi le coût de fabrication sans oublier le caractère reproductible des étapes de fabrication. En effet, l'objectif final étant de pouvoir réaliser des travaux pratiques avec des groupes d'étudiants répartis entre quatre simulateurs lapins, il était donc nécessaire que la production d'autres maquettes soit aisée.

Nous allons à présent revenir sur la conception du lapin en silicone afin de discuter des difficultés rencontrées mais aussi des points forts et des perspectives que l'on peut envisager avec un tel procédé de fabrication.

## **I. Difficultés rencontrées au cours du processus de fabrication**

La réalisation de la maquette de lapin a nécessité un travail de recherche préalable concernant l'art du moulage et le travail du silicone. En effet, il était indispensable d'apprendre les bases afin d'être en mesure de choisir les matériaux adaptés et les techniques les plus appropriées. Les travaux de Marie Masselot<sup>30</sup> nous ont permis de nous familiariser avec le moulage et la confection d'un simulateur réaliste. Les tutoriels d'Ethis Crea ([www.ethicrea.com](http://www.ethicrea.com)) nous ont aussi été d'une grande utilité afin de comprendre les techniques de création de moules et de tirage avec le silicone.

Ce travail de formation préalable nous a permis de nous confronter au tout premier écueil de la réalisation de la maquette. En effet, l'idée première étant de se baser sur les travaux de Marie Masselot<sup>87</sup> pour créer une maquette de lapin en silicone remplie de mousse poly-uréthane, il s'est rapidement avéré qu'un tel procédé s'avérerait trop complexe car un moulage de lapin entier laissait peu de possibilités de couler de la mousse à l'intérieur en étant certain que le coulage soit homogène. De plus, la finesse des oreilles du lapin ne permettait pas de couler la mousse entre deux couches de silicone sans risquer de déformer l'oreille et donc de perdre en réalisme. Enfin, un corps de lapin entier présente de nombreuses contre-dépouilles au niveau des membres ce qui rendait difficile le démoulage.

C'est pour ces raisons que nous nous sommes tournés vers les techniques utilisées dans le domaine du *reborning*. Le *reborning* consiste en la création de poupées très réalistes en silicone à partir d'un modèle de poupée standard, le but étant d'aboutir à une réplique ressemblant à un véritable enfant ou nourrisson. Les techniques utilisées avaient pour intérêt qu'elles aboutissaient à une poupée réaliste en un seul tenant et permettaient de mouler des éléments fins tels que des doigts ou des oreilles.

Ainsi, grâce aux tutoriels de la sculptrice professionnelle Carolyn Doughty ([www.dreams-reborn.com](http://www.dreams-reborn.com)), nous avons pu élaborer un protocole adapté aux exigences de notre modèle tout en restant simple à réaliser.

## **A. Difficultés rencontrées lors de la réalisation du moule en bandes plâtrées et de la réplique en plâtre**

La première étape du processus de fabrication était, rappelons-le, l'obtention d'une réplique en plâtre à partir d'un cadavre de lapin. Cette étape a présenté plusieurs écueils que nous allons détailler à présent.

### **1) Obtention d'un support de travail**

Obtenir une dépouille de lapin d'une taille cohérente avec celle des lapins utilisés autrefois a constitué un premier obstacle à la réalisation de la maquette. En dehors de l'aspect, la taille du modèle était essentielle pour le positionnement du dispositif élaboré par les étudiants ingénieurs qui pouvaient difficilement réduire plus leur automate.

Nous avons donc commencé à travailler sur des lapins de grande taille, de type Néo-zélandais, euthanasiés pour des raisons extérieures à notre thèse, dont les dépouilles avaient été congelées afin que nous puissions réaliser nos manipulations quand l'emploi du temps nous le permettait. De plus, le fait d'avoir une dépouille congelée permettait d'avoir plus de temps pour le séchage des bandes plâtrées.

Cependant, la congélation nous a posé de nombreux problèmes de position. En effet, les dépouilles que nous avons pu récupérer ne présentaient pas des positions adéquates si elles étaient disposées en décubitus dorsal et le décubitus latéral, bien que plus aisé pour les manipulations, n'était pas compatible avec l'automate conçu par les étudiants ingénieurs. En outre, le processus de décongélation s'est avéré problématique lors de l'élaboration du moule en bandes plâtrées car il était à l'origine de légères variations de position des membres qui décalaient les deux moitiés du moule.

Pour ces différentes raisons, nous nous sommes tournés vers une dépouille fraîchement euthanasiée, toujours pour des raisons extérieures à nos travaux, afin de réaliser notre moule en bandes plâtrées. Cette solution, bien que plus contraignante au niveau du temps, nous a permis d'obtenir le moule que nous souhaitions.

Une dernière difficulté rencontrée lors de la fabrication de ce moule fut le séchage. Après démoulage des moitiés de moule, nous les avons laissés sécher à l'air libre le temps d'une journée sans les associer au préalable ce qui a conduit à un décalage des bords des moules. Ce décalage étant problématique pour assembler le moule final, nous avons dû le corriger avant de pouvoir monter le moule en bandes plâtrées qui allait permettre d'obtenir la réplique en plâtre. Pour s'affranchir de ce problème, il aurait été plus judicieux d'assembler les deux moitiés et de les renforcer directement pour laisser sécher l'ensemble.

### **2) Difficultés liées aux circonstances exceptionnelles dues au Covid-19**

Les circonstances exceptionnelles engendrées par la pandémie due au Covid-19 ont rendu difficiles la communication et l'accès au matériel pour poursuivre les manipulations. C'est pourquoi le coulage du plâtre dans le moule en bandes plâtrées que nous avions obtenu n'a pu être réalisé comme nous l'avions prévu initialement.

Des solutions ont toutefois été trouvées pour remédier à ce problème. Tout d'abord, l'aide et l'expérience d'une personne extérieure nous ont permis d'obtenir une sculpture en terre cuite à l'image de la dépouille de lapin que nous avons utilisée pour confectionner le moule en bandes plâtrées. Un soin tout particulier a été attaché au détail des yeux et du museau lors de sa fabrication.

De plus, un effet de pelage a été donné en brossant la sculpture avant cuisson. Cela permettait ainsi d'ajouter du détail et donc du réalisme.

La seconde solution que nous avons trouvée a été de poursuivre les manipulations à distance pendant la période du confinement. Pour cela, de nouvelles contraintes se sont posées au niveau du type de matériel à utiliser. En effet, il nous fallait des matériaux livrés rapidement, à un prix raisonnable, utilisables par un particulier et facilement nettoyables au besoin. Ces conditions ont contribué à nous inciter à nous tourner vers des silicones utilisés pour la création de masques dans l'industrie du costume et des effets spéciaux car ces derniers sont constitués de sorte à ne pas être dangereux pour la santé humaine.

Nous avons donc poursuivi le protocole mis en place pour créer un moule silicone à partir de la réplique en terre cuite puis tirer un lapin en silicone.

## **B. Réalisation du moule en silicone et difficultés rencontrées lors de cette étape**

Afin de réaliser le moule silicone à partir du lapin en terre cuite, une phase de tests a été nécessaire. Cette étape préliminaire nous a permis de nous confronter aux difficultés que le moulage allait présenter mais aussi de choisir le silicone le plus adapté.

### **1) Difficultés rencontrées lors de la phase de test**

Les tests que nous avons menés avaient deux objectifs principaux, nous familiariser avec la manipulation du silicone et vérifier que nous pouvions couler le silicone dans des zones extrêmement fines comme les oreilles.

Deux principales difficultés ont été rencontrées lors des tests. La première a été constituée par l'air. En effet, la présence de bulles d'air dans le silicone fragilisait le moule obtenu et était source d'aspérités à l'origine de défauts lors du tirage. La seconde tenait à l'agent de démoulage utilisé et aux manipulations effectuées pour couler le silicone à l'intérieur du moule test. Ainsi, aux zones de jonctions, l'agent démoulant s'est rapidement retiré à force de manipulations ce qui a engendré plus tard des difficultés de démoulage.

La gestion de l'air est passée par un soin tout particulier à le laisser s'échapper lors du mélange des composants du silicone ainsi que par l'application d'une très mince couche de silicone au préalable sur toute la surface du modèle afin que le silicone épouse le plus parfaitement possible la forme de la sculpture. Les difficultés rencontrées lors du démoulage ont aussi motivé l'utilisation d'un colorant pour le silicone du moule afin de parfaitement distinguer le moule de l'objet lors du tirage final.

### **2) L'élaboration du moule silicone et ses écueils**

L'étape de tests nous ayant permis de mieux cibler les problèmes à éviter, la réalisation du moule en elle-même s'est avérée plus aisée. L'application d'une fine couche de silicone au préalable et le temps de séchage entre chaque couche ont permis de limiter la présence de bulles d'air.

Cependant, à cause des nombreux plis, creux et contre-dépouilles du modèle, le démoulage s'est avéré compliqué, notamment au niveau de la tête et des oreilles car l'agent de démoulage n'avait pas été mis en quantité suffisante dans ces zones difficiles d'accès. Des retouches ont donc été nécessaires à ces endroits afin de rendre un aspect uniforme à l'intérieur du moule et ainsi limiter les défauts de tirage.

### **C. Tirage de la réplique finale en silicone et principales difficultés rencontrées**

La phase finale de tirage a posé quelques difficultés au moment de positionner le cylindre servant à libérer de l'espace pour le dispositif des ingénieurs. En effet, il fallait couler le silicone autour et par-dessus tout en empêchant le moule de se plaquer contre le cylindre, ce qui aurait fait perdre du volume et donc du réalisme.

En procédant par étapes, nous avons réussi à surmonter cette difficulté et à garder une certaine épaisseur de silicone entre le cylindre et le dos de la réplique. Cependant, il a été nécessaire de couler de nouveau du silicone au niveau du dos après le démoulage afin de corriger certains défauts liés aux manipulations. Ces défauts étant concentrés sur la face dorsale, ils ne présentaient pas un véritable obstacle à la finalisation du lapin car ils ne gênaient pas directement.

L'attente entre chaque couche de silicone que nous coulions a permis aux bulles d'air dont n'avions pas pu nous débarrasser totalement au préalable de s'échapper vers la face dorsale du lapin, permettant ainsi que le silicone soit solide tout en conservant un maximum de détail. Cependant, ce procédé s'avère long et occasionne une perte de détails sur la face dorsale du lapin.

Dans le cas où plusieurs répliques de ce premier modèle seraient à tirer, l'utilisation d'une chambre à vide pourrait s'avérer intéressante car elle permettrait de gagner en rapidité lors du coulage et de s'affranchir des problèmes liés aux bulles d'air.

## **II. Avantages et limites de la maquette de lapin**

Dans cette partie nous nous attacherons à mettre en évidence les avantages du protocole utilisé et du modèle obtenu ainsi qu'à souligner les limites de ce travail réalisé.

### **A. Avantages offerts par le protocole et le modèle obtenu**

#### **1) Un protocole simple et des matériaux réutilisables**

Nous avons conçu le protocole de réalisation du moule et du tirage final dans l'optique qu'il puisse être ré-utilisé aisément. En effet, l'objectif initial du projet étant de fournir des lapins robotisés pour reproduire les travaux pratiques de physiologie tels qu'ils étaient par le passé, il était nécessaire que l'on puisse reproduire le modèle que nous avons conçu afin que chaque groupe d'étudiants bénéficie d'un lapin Sim'rabbit pour la séance. C'est pourquoi nous nous sommes attachés à établir un protocole simple, réalisable avec des matériaux du quotidien et ne nécessitant pas des compétences poussées en matière de moulage.

De plus, la statue en terre cuite et le moule en silicone peuvent être réutilisés, soit pour confectionner un nouveau moule, soit pour tirer directement une nouvelle réplique de lapin. L'utilisation répétée du moule peut certes aboutir à une usure et une perte de détail mais le fait que l'on puisse en produire un nouveau au besoin est un avantage non négligeable pour les réparations et les tirages que l'on pourrait être amené à faire.



## 2) Un modèle réaliste et adaptable

La réplique de lapin que nous avons obtenue présente plusieurs avantages que nous allons à présent détailler. Les détails que le silicone a permis de conserver constituent un premier avantage en matière de réalisme. Ainsi, le modèle présente des yeux, un museau et des babines mais aussi un détail du pelage obtenu par brossage au moment de la réalisation de la statue en terre cuite. De plus, le poids de la maquette se rapproche de celui d'un lapin néo-zélandais de deux à trois mois.

Le silicone étant une matière souple et résistante, la maquette est plus à même de supporter des mouvements et des transports. De plus, la place laissée pour l'automate à l'intérieur de la « cage thoracique » est modulable ce qui permet de s'adapter plus aisément aux dispositifs conçus par les étudiants ingénieurs.

En outre, en se basant sur le protocole que nous avons élaboré, il est possible de refaire des tirages en ménageant d'autres espaces à l'intérieur de la maquette pour pouvoir insérer un autre composant robotique ou encore glisser des tubulures souples pour mimer des veines.

### **B. Une maquette produite à un coût raisonnable**

Le coût de production de ce modèle représentait une contrainte fondamentale pour deux aspects. Le premier étant la nécessité de fournir plusieurs lapins robots pour les travaux pratiques, le coût devait donc rester raisonnable. Le second tenant aux contraintes liées au coronavirus, les matériaux choisis devaient être accessibles financièrement pour mener à bien le projet.

#### 1) Coût de réalisation du moule en silicone

Le moule en silicone a nécessité pour sa réalisation 1,3kg de silicone Dragon Skin Fx 10® ainsi que du talc comme agent de démoulage. Les ustensiles utilisés pour appliquer le silicone sur la statue étaient des spatules métalliques initialement dédiées à la cuisine.

La boîte de talc utilisée contenait 300g de talc qui ont servi à la fois pour l'élaboration du moule et le tirage final. Nous avons donc réparti son prix entre les deux étapes. Les coûts inhérents à la production du moule en silicone sont présentés dans le tableau ci-dessous :

*Tableau 2 : coûts de fabrication du moule en silicone*

	Coût approximatif
Silicone Dragon Skin Fx 10®	78,9 €
Agent de démoulage	0,80€
Matériel utilisé	5€
Coût total	84,70€

Le coût total de fabrication du moule reste raisonnable, sachant qu'il peut être utilisé pour plusieurs tirages mais aussi servir pour des réparations des maquettes. Au coût du moule silicone, il faut ajouter celui du contre moule que nous avons réalisé à l'aide de bandes plâtrées. Les deux rouleaux de bandes plâtrées utilisés pour la confection du contre moule coûtaient 14€.

Nous arrivons donc à un total de 98,70€ pour la première étape de fabrication du modèle de lapin.

## 2) Coût de réalisation de la maquette finale de lapin

Le tirage final a nécessité 3kg de silicone Dragon Skin Fx 10®, du talc comme agent de démoulage et un cylindre de 15cm de long que nous avons élaboré nous même à partir de matériel de récupération. L'acrylique blanche utilisée pour colorer le silicone provenait de nos propres réserves de peinture. Nous avons cependant intégré le coût d'un tube de peinture acrylique blanche afin d'avoir une idée du coût global dans l'optique de se fournir le matériel nécessaire pour produire un nouveau lapin (Tableau 3).

Tableau 3 : Coût de production de la réplique finale

	Coût approximatif
Silicone Dragon Skin Fx 10®	182,10€
Agent de démoulage	0,80€
Peinture acrylique	3,99€
Coût total	186,89€

Sachant que le prix d'une poupée créée à partir d'une technique de *reborning* peut varier entre 80€ et plusieurs milliers d'euros selon son degré de réalisme, notre modèle demeure à un prix raisonnable au vu de sa taille et de la quantité de silicone nécessaire pour le confectionner.

Le coût de réalisation total de notre modèle, moule et maquette compris, s'élève donc à 271,59€. Ce prix demeure raisonnable comparé au prix d'un simulateur mannequin *high fidelity* comme ceux que nous avons présentés précédemment dans ce manuscrit.

Cependant, il n'est pas possible pour le moment d'évaluer le coût final du Sim'rabbit car il dépendra aussi des composants et des dispositifs conçus par les étudiants ingénieurs qui viendront compléter la maquette. De même, les coûts d'entretien du Sim'rabbit dépendront essentiellement des matériaux utilisés pour les mécanismes robotiques puisque la maquette en elle-même n'aura pas besoin d'être changée.

### C. Impact environnemental de la fabrication de la maquette de lapin

Le matériel utilisé pour confectionner le moule et la maquette était du matériel recyclable ou déjà issu de récupération. Lors des étapes concernant la manipulation d'une dépouille de lapin, les déchets ont été éliminés dans des conteneurs prévus pour les Déchets d'Activité de Soin à Risque Infectieux.

Le reste des manipulations ayant été réalisé lors du confinement, nous avons opté pour des silicones conçus pour le contact avec la peau et ne présentant pas de toxicité pour la santé humaine ou animale. Ce choix nous a permis de faciliter les manipulations en nous affranchissant de la nécessité de disposer d'une hotte comme c'était le cas pour la confection du simulateur de cathétérisme de la veine jugulaire de la thèse de Marie Masselot<sup>30</sup>.

Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour la réalisation de la maquette de lapin nous a permis de réduire l'impact environnemental de nos moulages.

## **D. Limites du mannequin lapin réalisé**

### **1) Limites inhérentes au réalisme**

Si l'utilisation du silicone nous a permis de conserver des détails visuels et anatomiques, une perte de réalisme est à noter au niveau du toucher car il n'est pas possible avec ces matériaux de reproduire la sensation du pelage. De plus, le mannequin actuel a été créé à partir d'une sculpture faite main avec pour modèle des photos prises lors des premières manipulations et un modèle vivant, ce qui engendre une perte de détails puisqu'il est difficile de reproduire exactement le modèle vivant. La terre cuite étant, de plus, un matériau dense et épais, les oreilles apparaissent plus épaisses sur le mannequin par rapport à un véritable lapin. Toujours au niveau de l'oreille, le détail des veines et artères que le silicone aurait pu permettre de conserver est perdu.

Afin de pallier ce problème, il serait intéressant de reprendre le protocole avec cette fois-ci un tirage de lapin en plâtre comme nous aurions dû le faire initialement. Cela permettrait de gagner en réalisme et d'augmenter le niveau de détails sur le mannequin.

### **2) Absence d'évaluation du fonctionnement du simulateur et de son intérêt pédagogique**

#### **a) Absence d'évaluation du fonctionnement du simulateur**

Les dispositifs de système respiratoire étant toujours à l'état de prototype, leur fonctionnement à l'intérieur de notre mannequin n'a pu être testé. Il sera cependant nécessaire de réaliser des essais afin de vérifier que les mouvements respiratoires s'exécutent facilement et que l'automate dispose d'une force suffisante pour soulever l'enveloppe en silicone.

Dans l'optique où l'automate peinerait à soulever l'enveloppe du mannequin, des solutions sont envisageables. En effet, il est possible d'ajuster l'épaisseur de silicone par rapport à la cavité que nous avons aménagée dans le mannequin lapin. Cela nous permettra de corriger d'éventuels défauts et de faciliter les mouvements de l'automate.

L'évaluation du fonctionnement du prototype sera aussi une étape fondamentale dans la validation du réalisme du Sim'rabbit une fois que celui-ci sera complet.

#### **b) Manque d'évaluation de l'intérêt pédagogique du simulateur**

La pertinence du Sim'rabbit et son utilité en tant que simulateur tiennent à ce qu'il apportera aux étudiants dans l'enseignement de la physiologie au sein du cursus vétérinaire. C'est pourquoi, une fois le prototype fini, il sera nécessaire d'évaluer l'apport pédagogique qu'il fournit aux étudiants.

Des séances tests pourraient être envisagées ainsi qu'un comparatif avec l'ancienne version des séances où des lapins vivants étaient utilisés. Solliciter les étudiants ayant connu les travaux pratiques réalisés auparavant pourrait être une solution intéressante pour évaluer l'intérêt pédagogique du simulateur tout en comparant avec l'expérience acquise par les étudiants lors des travaux pratiques avec lapins vivants.

Une telle évaluation nécessitera un travail préalable pour mettre en place une séance et son déroulement ainsi que le nécessaire pour évaluer le degré d'immersion des étudiants au cours de la séance ainsi que ce qu'ils en auront retenu. Les recherches que nous avons réalisées concernant le déroulement d'une séance de simulation avec un simulateur mannequin automatisé, et que nous avons présentées dans la première partie de ce manuscrit, pourront s'avérer utiles lors de la préparation des séances test du Sim'rabbit et lors de l'évaluation de son efficacité comme outil pédagogique.

## Conclusion

Les attentes sociétales en matière d'éthique, de droit et de bien-être animal ont considérablement progressé au cours des dernières années. Les formations en physiologie animale dispensées dans les Écoles Vétérinaires et à l'Université doivent adapter l'offre pédagogique aux attentes des apprenants et à l'évolution de la législation, dans le respect du bien-être animal.

Dans ce contexte, j'ai participé à un projet collaboratif d'envergure, le projet Sim'Rabbit, visant à concevoir un simulateur réaliste piloté par de l'intelligence artificielle, se substituant complètement aux lapins vivants pour les travaux pratiques de physiologie expérimentale.

Ainsi, j'ai consacré ma thèse vétérinaire, d'une part, à l'accompagnement du travail d'ingénierie automatique réalisé par des étudiants de l'IMT Atlantique, et, d'autre part, à la conception d'un mannequin à l'image d'un lapin de type néo-zélandais, répondant aux attentes du projet en matière de taille, de poids et de réalisme mais aussi de robustesse et de coût grâce aux matières premières choisies pour sa conception. Le modèle a, en outre, été pensé pour être aisément reproductible soit en utilisant le moule créé pour son tirage, soit en créant un nouveau moule à partir du protocole élaboré, ce qui permettra, à terme, d'équiper les Écoles Vétérinaires et la Faculté des Sciences et Techniques de Nantes avec plusieurs automates.

La finalisation des prototypes d'automate et de l'interface de commande du Sim'Rabbit ainsi que l'évaluation et la validation de ce nouveau modèle de simulation destiné aux travaux pratiques de physiologie expérimentale viendront compléter cette étude.

Si le projet Sim'Rabbit nécessite encore du travail avant d'être pleinement abouti, les prototypes d'automates embarqués et l'enveloppe corporelle en silicone du lapin lui offrent de nombreuses perspectives. En effet, la méthode utilisée pour le tirage du lapin peut s'adapter à d'autres éléments de robotique ce qui permettrait d'animer différemment le Sim'Rabbit ou encore de créer d'autres simulateurs réalistes animés destinés à la formation des étudiants.



## Bibliographie

1. Cooper CE, Wither P, General Ecology : Animal Physiology, in Jorgensen S and Fath B (ed), Encyclopedia of Ecology, pp 181-189, Elsevier, 2008, Berlin.
2. Baro I, Delcayre C, Prip-buus C, Sigauco-roussel D, Turque N, Physiologie moléculaire et intégrative, rapport du Comité National du CNRS, 2006.
3. Claude B, Introduction à l'étude de La Médecine Expérimentale, 1865, 434 p, disponible sur [http://www.uqac.quebec.ca/zone\\_30/Classiques\\_des\\_sciences\\_sociales/index.html](http://www.uqac.quebec.ca/zone_30/Classiques_des_sciences_sociales/index.html) (consulté le 03/04/2020)
4. Ferrari A. Contesting Animal Experiments through Ethics and Epistemology : In Defense of a Political Critique of Animal Experimentation, p.194-206, 2019 doi:10.1163/9789004391192
5. Eb V. Eurobaromètre spécial 442 Résumé Attitudes des Européens à l'égard du bien-être animal Terrain Novembre – Décembre 2015 Publication Etude commandée par la Commission européenne, Direction générale Santé et Sécurité Alimentaire Eurobaromètre Spécial 442. Published online 2016.
6. Conseil de l'Europe. Convention européenne sur la protection des animaux vertébrés utilisés à des fins expérimentales ou à d'autres fins scientifiques. Published online 1986:1-12.
7. Inserm. Site officiel de l'Inserm, <https://www.inserm.fr> (consulté le 03/02/2020)
8. Kaisarevic SN, Andric SA, Kostic TS. Teaching Animal Physiology: A 12-year experience transitioning from a classical to interactive approach with continual assessment and computer alternatives. *Adv Physiol Educ.* 2017;41(3):405-414. doi:10.1152/advan.00132.2016
9. Wood DF , Problem based learning In ABC of learning and teaching in medicine. *Br Med J.* 2003;326(February):3.
10. Center for teaching Innovation CU. Problem-Based learning, <https://teaching.cornell.edu/teaching-resources/engaging-students/problem-based-learning>, (consulté le 04/10/2020)
11. Kleinsorgen C, Tipold A. Impact of Virtual Patients as Optional Learning Material in Veterinary Biochemistry Education. 2018;17(2):177-187. doi:10.3138/jvme.1016-155r1
12. Borges S, Mello-carpes PB. Physiology applied to everyday : The practice of professional contextualization of physiology concepts as a way of facilitating learning Physiology applied to everyday : the practice of professional contextualization of physiology concepts as a way of fac. 2015;(March 2014). doi:10.1152/advan.00113.2013
13. Hull K. Using student-generated case studies to teach respiratory physiology. *Adv Physiol Educ.* 2018;42(2):251-255. doi:10.1152/advan.00147.2017

14. Modell, H., Michael, J., & Wenderoth MP. (2005) Helping the Learner To Learn: The Role of Uncovering Misconceptions. *Am Biol Teach*. Published online 2005.
15. Gupta A, Singh XS, Khaliq F, Dhaliwal U, Madhu S V. (2018) Development and validation of simulated virtual patients to impart early clinical exposure in endocrine physiology. *Adv Physiol Educ*. 2018;42(1):15-20. doi:10.1152/advan.00110.2017
16. Gerschler J. Classroom Strategies for Maintaining Student Focus. 2018;(September 2012).
17. Abdelkarim A, Ford TG. (2018) Advantages and disadvantages of problem-based learning from the professional perspective of medical and dental faculty. 2018;(June).
18. Quiroga M, Choate JK. (2019) A virtual experiment improved students ' understanding of physiological experimental processes ahead of a live inquiry-based practical class. Published online 2019:495-503. doi:10.1152/advan.00050.2019
19. Scheckler RK. (2003) Virtual labs : a substitute for traditional labs ? 2003;236:231-236.
20. Faulconer EKABG. (2018) A Review to Weigh the Pros and Cons of Online, Remote, and Distance Science Laboratory Experiences. *Int Rev Res Open Distrib Learn*. 2018;Volume 19,.
21. Shokr E. Practical Physiology Power Lab. Experiments For Medical Students By Dr. ELSayed A. M. Shokr Professor of physiology Head of physiology Department Faculty of Medicine Hail Universit... 2016;(December 2015).
22. Article L1243-3 Code de la Santé Publique.
23. Activité électrique du nerf de crabe, Université de Jussieu, Paris, [www.snv.jussieu.fr/bmedia/ATP/crabe.htm](http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/ATP/crabe.htm) (consulté le 04/10/2020).
24. Dohn NB, Fago A, Overgaard J, Madsen PT, Malte H. Students' motivation toward laboratory work in physiology teaching. *Adv Physiol Educ*. 2016;40(3):313-318. doi:10.1152/advan.00029.2016
25. Sherman BL. Training Veterinary Students in Animal Behavior to Preserve the Human – Animal Bond. 2008;(February). doi:10.3138/jvme.35.4.496
26. Collins T, Id AC, Hood J, et al. Importance of Welfare and Ethics Competence Regarding Animals Kept for Scientific Purposes to Veterinary Students in Australia and New Zealand. Published online 2018. doi:10.3390/vetsci5030066
27. Abood SK. Student Perceptions of an Animal-Welfare and Ethics Course Taught Early in the Veterinary Curriculum. 2012;(July 2014). doi:10.3138/jvme.0911.093R1
28. Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council of 22 September 2010 on the protection of animals used for scientific purposes. *Off J Eur Union*. Published online 2010:33-79.
29. Horvath KC, Angeletti D, Nascetti G, Carere C. Invertebrate welfare : an overlooked issue. 2013;(March). doi:10.4415/ANN

30. Masselot M, Conception de simulateurs réalistes pour le cathétérisme de la veine jugulaire chez le veau et l'anesthésie du nerf cornual, Thèse pour le diplôme de docteur vétérinaire, 2019.
31. Naukowe Z, Ślaskiej P, Transport S. Scientific Journal of Silesian University of Technology . Series Transport. 2018;98.
32. Abram SR, Hodnett BL, Summers RL, Coleman TG, Hester RL. Quantitative Circulatory Physiology : an integrative mathematical model of human physiology for medical education. 2020;4505:202-210. doi:10.1152/advan.00114.2006.
33. Haute Autorité de la Santé. Guide de bonnes pratiques en matière de simulation en santé. Published online 2012. [www.has-sante.fr](http://www.has-sante.fr), (consulté le 20/10/2019)
34. Lateef F. Simulation-based learning : Just like the real thing. Published online 2010. doi:10.4103/0974-2700.70743
35. Hunt JA, Hughes C, Ascitutto M, Johnson JT. Development and validation of a feline medial saphenous venipuncture model and rubric. *J Vet Med Educ*. 2020;47(3):333-341. doi:10.3138/jvme.0718-085
36. Hunt JA, Heydenburg M, Kelly CK, Anderson SL, Dascanio JJ. Development and Validation of a Canine Castration Model and Rubric. 2020;47(1):24-29. doi:10.3138/jvme.1117-158r1
37. Levi O, Michelotti K, Schmidt P, Lagman M, Fahie M, Griffon D. Comparison between training models to teach veterinary medical students basic laparoscopic surgery skills. *J Vet Med Educ*. 2016;43(1):80-87. doi:10.3138/jvme.0715-109R
38. Krishnan, Dr. Divya G, Dr. Anukesh Vasu DSU. Pros and cons of simulation in medical education: A review. *Int J Med Heal Res*. 2017;3(6):84-87. doi:10.1038/ejcn.2014.65
39. Kahol K, Vankipuram M, Smith ML. Cognitive simulators for medical education and training. *J Biomed Inform*. 2009;42(4):593-604. doi:10.1016/j.jbi.2009.02.008
40. Bogert K, Platt S, Haley A, et al. Development and use of an interactive computerized dog model to evaluate cranial nerve knowledge in veterinary students. *J Vet Med Educ*. 2016;43(1):26-32. doi:10.3138/jvme.0215-027R1
41. Liaw SY, Ooi SW, Rusli KDB, Lau TC, Tam WWS CW. Nurse-Physician Communication Team Training in Virtual Reality Versus Live Simulations: Randomized Controlled Trial on Team Communication and Teamwork Attitudes. *J Med Internet Res* 2020. Published online 2020. doi:10.2196/17279
42. Lee S, Lee J, Lee A, et al. Augmented reality intravenous injection simulator based 3D medical imaging for veterinary medicine. *Vet J*. 2013;196(2):197-202. doi:10.1016/j.tvjl.2012.09.015
43. Gonzalez AA, Lizana PA, Pino S, Miller BG, Merino C. Augmented reality-based learning for the comprehension of cardiac physiology in undergraduate biomedical students. Published online 2020:314-322. doi:10.1152/advan.00137.2019
44. Olszewski AE, Wolbrink TA. Serious Gaming in Medical Education. Published online 2017:240-253. doi:10.1097/SIH.0000000000000212



45. Jacquier A, Briot M, Barillot G, et al. "Discovering Pathology" a serious game dedicated to the discovery of pathology for medical students. *Ann Pathol.* 2019;39(2):151-157. doi:10.1016/j.annpat.2018.12.002
46. Devreux G. *Le Rôle Des Comportements Informationnels Dans La Prise de Conscience de La Situation : Usage Dans Le Serious Game 3D Virtual Operating Room.*; 2017.
47. Kilkenny JJ, Singh A, Kerr CL, Khosa DK, Fransson BA. Factors associated with simulator-assessed laparoscopic surgical skills of veterinary students. *J Am Vet Med Assoc.* 2017;250(11):1308-1315. doi:10.2460/javma.250.11.1308
48. Millard HAT, Millard RP, Constable PD, Freeman LJ. Relationships among video gaming proficiency and spatial orientation, laparoscopic, and traditional surgical skills of third-year veterinary students. *J Am Vet Med Assoc.* 2014;244(3):357-362. doi:10.2460/javma.244.3.357
49. Wang R, Demaria S, Goldberg A, Katz D. A Systematic Review of Serious Games in Training Health Care Professionals. 2016;11(1):41-51. doi:10.1097/SIH.0000000000000118
50. Laumen AAG, Velzen M van, Veul I, Lam I, Hürst WO, Zeeland YRA van. Teaching clinical reasoning and decision-making skills by visualizing the thought-process: an interdisciplinary gaming project involving honours students from veterinary and computing sciences. *J Eur Honor Counc.* 2017;1(2):1-4. doi:10.31378/jehc.23
51. Cooper JB, Taqueti VR. A brief history of the development of mannequin simulators for clinical education and training. Published online 2004:11-18. doi:10.1136/qshc.2004.009886
52. Jones JL, Rinehart J, Spiegel JJ, Englar RE, Sidaway BK, Rowles J. Development of veterinary anesthesia simulations for pre-clinical training: Design, implementation, and evaluation based on student perspectives. *J Vet Med Educ.* 2018;45(2):232-240. doi:10.3138/jvme.1016-163r
53. Munshi F, Lababidi H, Alyousef S. Low- versus high-fidelity simulations in teaching and assessing clinical skills. *J Taibah Univ Med Sci.* 2015;10(1):12-15. doi:10.1016/j.jtumed.2015.01.008
54. Miller. *Psychological Considerations in the Design of Training Equipment.*; 1980.
55. Vadcard L. Réflexions à propos de la conception d'environnements de formation par la simulation : le cas de la formation médico-chirurgicale. *Raisons éducatives.* 2017;n°21:81-96. doi:10.3917/raised.021.0081.
56. Johnson G. The Relationship Of Fidelity On Simulation Performance by. 2017;(January). <https://commons.und.edu/theses/2243%0AThis>
57. Beaubien JM, Baker DP. The use of simulation for training teamwork skills in health care: how low can you go ? Published online 2004:51-56. doi:10.1136/qshc.2004.009845
58. Hughes P, Hughes K. Briefing Prior to Simulation Activity. StatPearls Publishing. Published 2020. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK545234/>
59. Stephenson E. Tips for Conducting the Pre-brief for a simulation. 2016;47:353-355.

60. Cuerva MJ, Piñel CS, Martin L, Espinosa JA, Octavio J, Mendoza N. Teaching childbirth with high-fidelity simulation . Is it better observing the scenario during the briefing session ? *J Obstet Gynaecol (Lahore)*. 2018;0(0):1-4. doi:10.1080/01443615.2017.1393403
61. Henricksen JW, Altenburg C, Reeder RW. Operationalizing Healthcare Simulation Psychological Safety. *Simul Healthc*. 2017;12(5):289-297. doi:10.1097/SIH.0000000000000253
62. Nielsen B, Harder N. Causes of student anxiety during simulation: What the literature says. *Clin Simul Nurs*. 2013;9(11):e507-e512. doi:10.1016/j.ecns.2013.03.003
63. Der Sahakian G, Lecomte F, Buléon C, Guevara F, Jaffrelot M, Alinier G. *Référentiel Sur l ' Élaboration de Scénarios de Simulation En Immersion Clinique*. Vol 84.; 2017.
64. Sim ST, Lazzara EH, Gaught WL, Arcaro LL. The Template of Events for Applied and Critical Healthcare. 2015;10(1):21-30. doi:10.1097/SIH.0000000000000058
65. Clapper TC. Role Play and Simulation: Returning to Teaching for Understanding. *Educ Dig Essent Readings Condens Quick Rev*. 2010;75(8):39-43.
66. Emerald Works. Mindtools, essential skills for an excellent career. Mindtools. Accessed May 14, 2020. <https://www.mindtools.com/>
67. Policard F. Optimiser le débriefing d'une séance de simulation en santé. *Soins Cadres*. 2015;24(94):51-54. doi:10.1016/j.scad.2015.03.010
68. Baillie S, Booth N, Catterall A, et al. A Guide to Veterinary Clinical Skills Laboratories, 2015.
69. Baillie S, Warman S, Rhind S. *A Guide to Assessment in Veterinary Medicine*.; 2014.
70. Barozzino T, Farrugia M. High-fidelity simulation in neonatal resuscitation. 2009;14(1):19-23.
71. Surcouf JW, Chauvin SW, Ferry J, Yang T, Barkemeyer B. Enhancing residents ' neonatal resuscitation competency through unannounced simulation-based training. 2013;1:1-7.
72. Benhamou D, Roulleau P, Trabold F. La simulation en anesthésie-réanimation : outil pédagogique et d ' amélioration de la prise en charge des patients. *Enseign supérieur en réanimation*. Published online 2012:1-8. doi:10.1007/s13546-012-0631-1
73. Bintley HL, Bell A, Ashworth R. Remember to breathe: Teaching respiratory physiology in a clinical context using simulation. *Adv Physiol Educ*. 2019;43(1):76-81. doi:10.1152/advan.00148.2018
74. Maxwell WD, Mohorn PL, Haney JS, et al. Impact of an Advanced Cardiac Life Support Simulation Laboratory Experience on Pharmacy Student Confidence and Knowledge. 2016;80(8).
75. Berger C, Brinkrolf P, Ertmer C, et al. Combination of problem-based learning with high-fidelity simulation in CPR training improves short and long-term CPR skills : a randomised single blinded trial. Published online 2019:1-10.

76. Chen CY, Elarbi M, Ragle CA, Fransson BA. Development and evaluation of a high-fidelity canine laparoscopic ovariectomy model for surgical simulation training and testing. *J Am Vet Med Assoc*. 2019;254(1):113-123. doi:10.2460/javma.254.1.113
77. Scalese RJ, Issenberg SB. Effective use of simulations for the teaching and acquisition of veterinary professional and clinical skills. *J Vet Med Educ*. 2005;32(4):461-467. doi:10.3138/jvme.32.4.461
78. Modell JH, Cantwell S, Hardcastle J, Robertson S, Pablo L. Using the human patient simulator to educate students of veterinary medicine. *J Vet Med Educ*. 2002;29(2):111-116. doi:10.3138/jvme.29.2.111
79. Choi BCK, Pak AWP. A catalog of biases in questionnaires. *Prev Chronic Dis*. 2005;2(1):1-13.
80. Chabal S. *Les Principaux Biais à Connaître En Matière de Recueil d'information.*; 2014.
81. Dejoux C, Dherment-Férère I, Wechtler H, Ansiau D, Bergery L. Intelligence émotionnelle et. *Gest 2000*. 2011;28:67-81. doi:https://doi.org/10.3917/g2000.283.0067
82. Behimehr S, Jamali HR. Cognitive biases and their effects on information behaviour of graduate students in their research projects. *J Inf Sci Theory Pract*. 2020;8(2):18-31. doi:10.1633/JISTaP.2020.8.2.2
83. Paul ES, Podberscek AL. Veterinary education and students' attitudes towards animal welfare. *Vet Rec*. 2000;146(10):269-272. doi:10.1136/vr.146.10.269
84. Herzog HA, Vore TL, New JC, Herzog HA. Conversations with Veterinary Students: Attitudes, Ethics, and Animals. 1989;2:181-188. [http://animalstudiesrepository.org/acwp\\_sata](http://animalstudiesrepository.org/acwp_sata)
85. Batchelor CEM, McKeegan DEF. Survey of the frequency and perceived stressfulness of ethical dilemmas encountered in UK veterinary practice. *Vet Rec*. 2012;170(1):19. doi:10.1136/vr.100262
86. Goyal R, Garg R, Goyal P. Need for changes in the practical physiology curriculum of medical undergraduates. *J Clin Diagnostic Res*. 2017;11(6):CC06-CC08. doi:10.7860/JCDR/2017/24341.9977

## Annexe 1 : Polycopié de travaux dirigés avec les logiciels Virtual rat® et Virtual cat®

Cardiovascular experimental simulations

(rat and cat)

*(Based on a compilation of tutorials from J. Dempster, Strathclyde University, UK)*

**You are provided with two experimental simulations.**

1. A virtual Rat

2. A Virtual Cat.

Both experimental preparations allow stimulation of various nerves and administration of a variety of drugs. Use the simulations to answer the following questions and provide quantitative experimental data in support of your answers. ('Drug X raised blood pressure' is not quantitative. 'Drug x at 20 mg.kg<sup>-1</sup> raised BP by 20mmHg' is quantitative).

Rat Cardiovascular System Preparation

The **Virtual Rat** is a simulation of a "normal" or pithed rat experimental preparation for investigating the actions of drugs on the heart and cardiovascular system.

"**Pithing**" refers to the destruction of spinal cord pathways, severing all the nerve connections between the brain and the cardiovascular system, a.k.a. decerebration. This greatly simplifies the interpretation of experimental results by removing the central baroreceptor reflexes.

The simulation allows you to observe many parameters, namely **blood pressure, left ventricular pressure, venous pressure, heart rate and contractile force**, on a simulated chart polygraph recorder, to apply a variety of different drugs, and to observe their effects.

Cat Cardiovascular System Preparation

The **Virtual Cat** is a simulation of the anaesthetised cat experiment - a whole animal' preparation which is widely used as a tool for screening the actions of new pharmaceutical compounds on the cardiovascular and skeletal muscle systems.

Compared to studies on isolated cells or tissues, whole animal preparations such as this have the capacity to reveal the multiplicity of effects that a drug can have on the different organ systems.

The simulation allows you to observe the traces of **blood pressure, heart rate, skeletal muscle and nictitating membrane** twitches on the screen, to apply a variety of different drugs and to observe their effects

The Rat and Cat Cardiovascular System Preparation

A rat or a cat are anaesthetised and artificially ventilated. According to the experimental preparation, the cannulae are inserted into the femoral artery, vein and the left ventricle of the heart.

A cannula is inserted into the **left brachial vein (Cat)** or the **jugular vein (Rat)** and used to administer drugs

The **arterial cannula** is connected to a pressure transducer to measure arterial blood pressure. Traces of arterial blood pressure (ABP) and heart rate (HR), computed from ABP, are recorded on the chart. The **left ventricular cannula** is connected to a second pressure transducer and used to produce a trace of left ventricular pressure (LVP). A measure of the contractile force of the heart (HF) is derived from the LVP.

The **venous cannula** is connected to a third pressure transducer and used to produce a trace of central venous blood pressure (VBP). Drugs can also be injected into the animal via the venous cannula.

For the Rat, a specially designed **pithing** rod can be passed down the spinal cord of the animal destroying all nerve connections with the brain, and hence disabling the central blood pressure reflexes associated with the carotid artery baroreceptors.

**Several nerves** are exposed and can be electro-stimulated (vagus, sympathetic, renal ...).

Using the simulation

- 1) Select **New Rat** or a **New Cat** from the **File** menu, to clear the chart.
- 2) Click the **Start** button to start the chart recorder running.
- 3) To inject a drug into the animal's circulation :
  - a) Select a drug from the "**Standard Drugs**" menu.
  - b) Select the required dose from the list of doses.
  - c) Click "**Inject Drug**" button to add the drug.
- 4) You can make quantitative measurements from the traces by moving the mouse cursor over the trace and noting the value in the readout at the bottom of the screen.
- 5) You can add as many doses and/or drugs as necessary. When you have finished your experiment, click the **Stop** button to stop the chart.

The heart and its receptors

The **vagus** nerve releases **acetylcholine** and acts via **muscarinic** cholinceptors (mAChR) on the heart to **slow** heart rate and **reduce** cardiac force.

**The baroreceptor reflex.** Baroreceptors within the CNS when stimulated by **high** arterial pressure increase the nerve activity along the vagus **depressing** heart rate and force

The accelerans nerves (sympathetic nervous system) releases **noradrenaline** and acts via **Beta-adrenoceptors** (b1Adr) on the heart to **increase** heart rate and contractile force or stroke volume (especially b1Adr (and secondary b2Adr)).

Both the vagus and accelerans nerves act indirectly via ganglia. Synaptic transmission at the ganglia is by **neuronal nicotinic cholinceptors** (nAChR).

Mu-Opioid receptors are present on the presynaptic nerve endings of both the vagus and accelerans nerves and act to **depress** transmitter release.

Heart muscle also has **adenosine** (A1R) receptors which cause a **reduction** in heart rate and force in response to circulating adenosine.

**Blocking calcium channels** in heart muscle causes a **reduction** in heart rate and stroke volume.

The circulation and its receptors

Smooth muscle in the walls of arteries act to **constrict** the vessels. The blood vessels are innervated by **sympathetic** nerves, via **nicotinic ganglia** and are also sensitive to drugs in the circulation.

The sympathetic nerves release **noradrenaline** which acts upon **alpha 1-adrenoceptors** in the smooth muscle to cause **vasoconstriction** which **increases** blood pressure. **Beta2-adrenoceptors** on blood vessels cause **vasodilation**.<sup>[1 SEP]</sup>

Agents which open smooth muscle **potassium ion channels** cause **vasodilation**.

**Nitrovasodilators** cause **vasodilation** by generating nitric oxide.

Angiotensin I is converted to **angiotension II** and causes **vasoconstriction**.

Circulating **acetylcholine** can produce **vasodilatation** by acting upon **muscarinic** receptors on endothelial cells to release vasodilators.

Circulating **adenosine** can produce **vasodilatation** by acting upon adenosine (A1) receptors in the smooth muscle.

Circulating **histamine** can produce **vasodilatation** by acting upon histamine (H1) receptors.

The renal nerve

The renal sympathetic nerves (**noradrenaline**) provide the majority of the autonomic control of the kidney.

Its stimulation promotes **release of renin** from the juxtaglomerular cells and increases thus angiotensin II synthesis. At high level of stimulation, the renal tubular epithelial cells also become activated in the ascending limb of the loop of Henle, leading to reduced urinary sodium excretion. The highest levels of stimulation lead to renal vasoconstriction and decreased renal blood flow.

### The Nictitating Membrane and its Receptors

The **nictitating membrane** is a protective membrane which can be drawn over the cat's eye. It contains **smooth** muscle and is indirectly innervated by the **superior cervical nerve**. Stimulation of the **pre-ganglionic** nerve causes the membrane to contract.

The smooth muscle has **-adrenoceptors** which respond to **noradrenaline** released by the nerve.

The post-ganglionic nerve terminals which release noradrenaline have pre-synaptic **Mu-opioid** (uOpR) receptors which act to **depress** transmitter release.

The superior cervical ganglion is a **neuronal nicotinic** synapse.

### Skeletal Muscle and its Receptors

The **tibialis** muscle is a fast **skeletal** muscle, innervated directly via the **sciatic** nerve. Stimulation of the nerve produces a muscle twitch.

The nerve releases **acetylcholine** which acts upon **nicotinic cholinceptors** (AChR) at the neuromuscular junction to cause a muscle twitch.

The muscle does **not** respond to circulating acetylcholine with a contracture since depolarization block occurs (a combination of sodium channel inactivation and receptor desensitization) in response to the slow and prolonged application of Ach.

Virtual Rat/Cat Simulation Drugs

**Acetylcholine** : Cholinoceptor agonist.

**Adenosine** : Adenosine receptor agonist.

**Adrenaline** : Alpha- + Beta-adrenoceptor agonist (Alpha=Beta).

**Angiotensin II** : Vasoconstrictor

**Atenolol** : Beta-1 adrenoceptor antagonist.

**Atropine** : Muscarinic cholinoceptor antagonist.

**Captopril** : Angiotensin converting enzyme inhibitor.

**Carbachol** : muscarinic and nicotinic receptor agonist.

**Cromakalim** : Potassium channel opener.

**Digoxin** : Na/K pump inhibitor.

**Gallamine** : muscarinic and nicotinic antagonist

**Glibenclamide** : Potassium channel blocker.

**Glyceryl Trinitrate** : Nitrovasodilator.

**Hexamethonium** : Nicotinic receptor antagonist

**Histamine** : histaminic (H1 & H2) receptor agonist

**Losartan** : Angiotension II antagonist.

**Mepyramine** : H1 receptor antagonist

**Milrinone** : Phosphodiesterase 3 inhibitor

**Morphine** : mu receptor agonist

**Naloxone** : mu receptor antagonist

**Neostigmine** : cholinesterase inhibitor

**L-NOARG** : Nitric oxide synthase inhibitor.

**8-SPT (8-parasulphophenyltheophylline)** : Adenosine receptor antagonist.

**Phentolamine** : Alpha-adrenoceptor antagonist.

**Phenylephrine** : Alpha adrenoceptor agonist.

**Prazosin** : Alpha-1 adrenoceptor antagonist.

**Propanolol** : Beta-adrenoceptor antagonist.

**Tubocurarine** : nicotinic receptor antagonist.

**Verapamil** : Calcium channel blocker.

Preliminary remark

For all your experiments, you'll have an infinite amount of virtual animals, and all these animals are identical before your intervention. Keeping in mind that all the drugs you'll have to administer have their own elimination kinetic, don't refrain from using a new, untouched animal for the next step of the procedure. You can also consider, using two running copies of the software, to analyse results from two virtual animals on your computer.

Please take note that you'll have to record the basal experiment every time (for example, injecting the agonist alone) before to perform the modified response (for example injecting antagonist and agonist together) in order to compare the different experimental settings.

Both experimental preparations allow stimulation of various nerves and administration of a variety of drugs. Use the simulations to answer the following questions and provide quantitative experimental data in support of your answers. For example, "Drug X raised blood pressure" is not quantitative, while "Drug X at  $20 \text{ mg.kg}^{-1}$  raised BP by 20mmHg" is quantitative.

Observed parameters

See the "experiment" tab's chart for details.

**ABP**: arterial blood pressure

**LVP**:left ventricular pressure

**VBP**: venous blood pressure

**HF**: heart contractile force

**HR**: heart rate

**Sk mus**: skeletal muscle

**Nic mem**: nictitating membrane

Ex. 1: Autonomic and tonic control of Blood Pressure

Using a **non-pithed rat**, start the device and wait for the experimental measures to stabilize. Then inject intraveinously  $2 \text{ mg.kg}^{-1}$  **atropine**. Observe and interpret the measured variations.

Wait for the parameters to normalize again, then inject  $2 \text{ mg.kg}^{-1}$  **propranolol**. Observe and interpret the measured variations.

Wait for the parameters to normalize again, then decerebrate your rat (**pithed** one). Repeat injections of **atropine**, then **propranolol**. Observe and explain the different reactions to both compounds.

Ex. 2:  $\alpha$  and  $\beta$ -adrenoceptors

Take a **new and pithed rat**. Record the effect of the following on arterial blood pressure and heart rate:

**Stimulate the sympathetic nerves “heart only”** (selected from nerve stim pull-down menu) and observe their effects.

Take a **new and pithed rat** and inject intravenously  $5 \mu\text{g.kg}^{-1}$  **adrenaline**.

Take a **second new and pithed rat (besides the first one)**, inject  $2 \text{ mg.kg}^{-1}$  **prazosin** and immediately repeat the intravenous injection of **adrenaline**. How adrenaline effects have been affected by prazosin?

(IV) Inject  $50 \text{ mg.kg}^{-1}$  **atenolol**. Repeat the intravenous injection of **adrenaline**. How the effects of adrenaline have been affected by atenolol?

**Conclusion:** What can you conclude about the locations and roles of  $\alpha_1$  and  $\beta_1$ -adrenoceptors in blood vessels and the heart?

Ex. 3: Renin-angiotensin system

Select a **new and pithed Rat**. Record the effect of the following on arterial blood pressure and heart rate:

Intravenous injection of:

**losartan**  $10 \text{ mg.kg}^{-1}$

**captopril**  $10 \text{ mg.kg}^{-1}$

Select a **new pithed Rat**. Record the effect of the following on arterial blood pressure and heart rate:

**angiotensin II**  $2 \mu\text{g.kg}^{-1}$

**renal nerve stimulation**

Take a **second new and pithed rat (besides the first one)**, inject **captopril**  $10 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Repeat the injection of **angiotensin II**. Then repeat this experiment with **renal nerve stimulation**. How does captopril modify the effects of angiotensin and renal nerve stimulation?

Inject **losartan**  $10 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Repeat the injection of **angiotensin II**. Then repeat this experiment with **renal nerve stimulation**. How does losartan modify the effects of angiotensin and renal nerve stimulation?

*If you have spare time, you can go on with the next exercise.*

Ex. 4: Organic nitrates and endothelium

Take a **new and pithed rat**. Record the effect of the following on arterial blood pressure and heart rate:



And proceed to an intravenous injection of  $20 \mu\text{g.kg}^{-1}$  **acetylcholine**.

Take a **second new and pithed rat (besides the first one)**, repeat the injection of **acetylcholine**. Then, inject  $50 \text{ mg.kg}^{-1}$  of the NO synthase inhibitor **L-NOArg**. How has the response to acetylcholine been changed by L-NOArg?

**Conclusion:** What can you conclude about the mechanisms by which acetylcholine produce its haemodynamic effects?

Ex. 5: motor exploration in the virtual cat

Take a **new cat**. Stimulate the **skeletal muscle** and the **sympathetic cervical ganglion** but not the vagal nerve.

Inject  $1 \text{ mg.kg}^{-1}$  **tubocurarin**. Observe and explain the effects.

Repeat the injection of tubocurarin. Inject  $1 \text{ mg.kg}^{-1}$  **neostigmine** while the cat is still under the effect of tubocurarin. Observe and explain the effects.

Compare the effects of intravenous vs intra-arterial (femorale artery) injection of  $1 \mu\text{g.kg}^{-1}$  **acetylcholine**.

Inject  $10 \text{ mg.kg}^{-1}$  of **atropine**, then intra-arterial  $1 \mu\text{g.kg}^{-1}$  **acetylcholine**. What is your conclusion about cholinergic receptor distributions?

Compare the effects of  $1 \text{ mg.kg}^{-1}$  **tubocurarin** and  $5 \text{ mg.kg}^{-1}$  **gallamine** injections on a new cat, then on the effect of injected acetylcholine. What is your hypothesis about the molecular target(s) of gallamine ?

## Annexe 2 : Support de travaux pratiques avec les chiens de la meute pédagogique d'ONIRIS

NOM DU CHIEN : IRS  
DATE DE L'EXAMEN : 12/02/20  
NUMERO DE GROUPE : 3  
NOMS-Prénoms : Zéphire Pauline Aurin Yohane  
Déprie Camille Peray Perrine.

### 1- Inspection

- Après avoir observé le comportement du chien, observer la ventilation de ce chien et examiner sa courbe respiratoire en suivant les mouvements thoraciques (permet de détecter une éventuelle dyspnée inspiratoire ou expiratoire, obstructive ou restrictive, polypnée thermique, présence d'une toux...).

- Quelle est sa fréquence respiratoire au repos ?

~~16~~ 56/min.

- Examen des muqueuses (permet d'identifier une éventuelle anémie, congestion, cyanose ...)

RAS

### 2- Palpation

- Palper et identifier le choc précordial. Calculer la fréquence cardiaque précordiale au repos chez ce chien.

112/min.

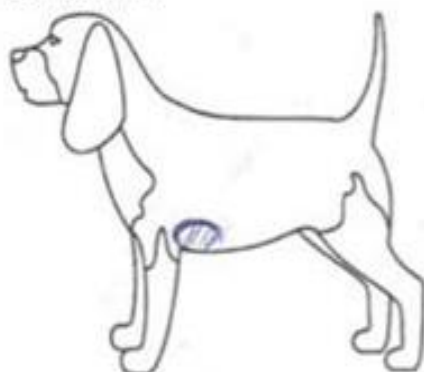
- Prendre un pouls fémoral en parallèle. Calculer la fréquence cardiaque au repos chez ce chien et comparer la à la fréquence précordiale (permet d'identifier un trouble du rythme par exemple).

149/min, plus élevée qu'avec la fc précordiale

- Évaluer le temps de recoloration de la muqueuse buccale (remplissage capillaire  $\leq 3$  sec., évalue entre-autre la puissance de la pompe cardiaque ...)

RAS

- Identifier la principale zone d'auscultation cardiaque au stéthoscope chez le chien que vous identifiez :



- Combien de bruits avez-vous entendu chez le chien ? A quoi correspondent-ils d'après vous ?

*2 bruits*

*2 : Beau + la*

- Prendre une pression artérielle à la queue et noter la pression systolique et diastolique.

*↓ ↓*  
*138 80 mmHg.*

#### 4- L'ECG (examen complémentaire)

- Tracer l'ECG chez ce chien (dérivation D2) :



- A quoi correspondent les ondes obtenues sur le tracé d'ECG (dérivation D2) ?

*P = dépolariation oreillettes    R = dépolariat° paroi ventriculaire*  
*Q = dépolariation septale    S = dépolariat° de la base*  
*T = repolarisat° des ventricules*

- Noter la fréquence cardiaque chez ce chien d'après l'ECG (intervalle RR).

*Rq : ici, on a 2 pics R très proche car chien plutôt stressé pu ventiler beaucoup.*

## « L'adaptation à l'effort chez le chien »

Reportez dans le tableau ci-dessous les valeurs demandées avant et après un effort de moyenne intensité (précisez les unités) :

	AU REPOS	APRES EFFORT
FC	125	↗
FR	56	↗
PA		
Systolique	138	↗
Diastolique	80	↗

## Annexe 3 : Questionnaire travaux pratiques de physiologie expérimentale

### Evaluation de la semaine de TP

- 1 \* Veuillez indiquer votre niveau de satisfaction de la séance de 'démonstration de la phase chirurgicale sur lapin'.

plutôt intéressant	indispensable	inutile	peu intéressant
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

- 2 \* Veuillez indiquer votre niveau global de satisfaction pour la séance de TD 'simulation'.

indispensable	plutôt intéressant	peu intéressant	inutile
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

- 3 \* Comment qualifiez-vous le matériel audiovisuel (films, photos, schémas...) fourni pendant la séance 'Simulation'.

indispensable	inutile	peu adapté	plutôt adapté
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

- 4 \* Veuillez indiquer votre niveau global de satisfaction pour le poste 1 'Incision'.

indispensable	plutôt intéressant	peu intéressant	inutile
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>




- 5 \* Veuillez préciser vos commentaires libres à propos du poste 1 'Incision'.

- 6 \* Veuillez indiquer votre niveau global de satisfaction pour le poste 2 'Noeuds'.

indispensable	plutôt intéressant	peu intéressant	inutile
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

- 7 \* Veuillez préciser vos commentaires libres à propos du poste 2 'Noeuds'.

8 \* Veuillez indiquer votre niveau global de satisfaction pour le poste 3 "Oreille".

indispensable	peu intéressant	plutôt intéressant	inutile
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

9 \* Veuillez préciser vos commentaires libres à propos du poste 3 "Oreille".

A ▼

B

I

A ▼

10 \* Veuillez indiquer votre niveau global de satisfaction pour le poste 4 "Cou".

indispensable	plutôt intéressant	peu intéressant	inutile
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

11 \* Veuillez préciser vos commentaires libres à propos du poste 4 "Cou".

A ▼

B

I

A ▼

12 \* Veuillez indiquer votre niveau global de satisfaction pour le poste 5 "Préparation aux injections sur lapin mort".

indispensable	plutôt intéressant	inutile	peu intéressant
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

13 \* Veuillez préciser vos commentaires libres à propos du poste 5 "Préparation aux injections".

A ▼

B

I

A ▼

- 14 \* Veuillez indiquer votre niveau global de satisfaction pour le poste 6 "Observation du site opératoire sur lapin anesthésié".

indispensable	inutile	peu intéressant	plutôt intéressant
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

- 15 \* Veuillez préciser vos commentaires libres à propos du poste 6 "Observation du site opératoire".

- 16 \* Veuillez indiquer à quel point la séance de TD démonstration vous a aidé pour les séances de TP.

beaucoup aidé	plutôt aidé	un peu aidé	pas du tout aidé
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

- 17 \* Veuillez indiquer à quel point la séance de TD simulation vous a aidé pour les séances de TP.

plutôt aidé	beaucoup aidé	un peu aidé	pas du tout aidé
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

- 18 \* Veuillez indiquer votre niveau global de satisfaction pour la séance de TP "physiologie rénale".

indispensable	plutôt intéressant	peu intéressant	inutile
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

- 19 \* Veuillez indiquer votre niveau global de satisfaction pour la séance de TP "physiologie cardiovasculaire et ventilatoire".

indispensable	inutile	peu intéressant	plutôt intéressant
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

- 20 \* Pensez-vous que les TP se sont déroulés dans le respect de l'éthique et du bien-être animal ?

☐ Oui ☐ Non

- 21 \* Si vous avez répondu NON à la question précédente expliquez pourquoi.

22 \* Que pensez-vous du nombre de lapins utilisés lors des séances de TP ?

Nombre de lapins adapté	Pas assez de lapins utilisés	Trop de lapins utilisés
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

23 \* Êtes-vous globalement satisfaits de votre semaine de TP ?

☐ Oui ☐ Non

24 \* Veuillez indiquer vos commentaires généraux sur le déroulement de la semaine de TP.

A ▼

B

I

A ▼

Fermer cette fenêtre





Vu : L'enseignant Rapporteur

De l'Ecole Nationale Vétérinaire,  
Agroalimentaire et de l'Alimentation  
Oniris



Vu : Le Directeur Général

par interim  
De l'Ecole Nationale Vétérinaire,  
Agroalimentaire et de l'Alimentation  
Oniris  
Marc GOGNY

*Par ordre et par délégation*

*L. M. J.*

Sandy LECOQ-ESPALLARGAS

Directrice des Etudes  
et de la Vie Etudiante

Nantes, le 5/10/2020

Vu :

Le Président de la Thèse

Professeur P. LUSTENBERGER

Vu :

Le Doyen de la Faculté de  
Médecine de Nantes

Professeur Pascale JOLLIET

Vu et permis d'imprimer

NOM : CHEVALIER  
Prénom : Marie



**CONCEPTION D'UN SIMULATEUR REALISTE  
POUR REMPLACER LES ANIMAUX VIVANTS  
DANS LES TRAVAUX PRATIQUES DE PHYSIOLOGIE EXPERIMENTALE DANS LES  
ECOLES VETERINAIRE ET A L'UNIVERSITE DE NANTES**

**RESUME**

L'objectif de notre travail était d'accompagner la transition de l'enseignement de physiologie expérimentale dans les écoles vétérinaires et à l'Université de Nantes vers un abandon des manipulations invasives sur les animaux. C'est dans cette optique que nous avons pris part à la conception d'un lapin automatisé destiné à remplacer les lapins vivants dans les séances de travaux pratiques de physiologie expérimentale.

Notre mission au sein du projet Sim'rabbit était donc d'aider les étudiants ingénieurs à concevoir un prototype d'automate mais surtout de concevoir une enveloppe réaliste à l'image d'un lapin Néo-zélandais pour le simulateur.

Nous sommes donc attachés à étudier les méthodes de substitution d'ores et déjà utilisées pour remplacer les manipulations invasives afin d'établir ce qu'apporterait notre simulateur puis nous avons étudié les différents types de simulateurs afin de déterminer le modèle le plus adapté pour la conception du Sim'rabbit.

À l'issue de cette thèse, une enveloppe silicone a été conçue à prix raisonnable pour accueillir le prototype d'automate mis au point par les étudiants ingénieurs.

**MOTS CLES**

- OUTIL PEDAGOGIQUE
- EXPERIENCE DE SIMULATION
- ECOLE VETERINAIRE
- PHYSIOLOGIE
- ETHIQUE

**JURY**

Président : Monsieur le Professeur Patrick LUSTENBERGER, Professeur à l'Université de Médecine de Nantes.

Rapporteur : Madame Julie HERVE, Maître de Conférences à Oniris

Assesseur : Madame Nora BOUHSINA, Maître de Conférences à Oniris

**ADRESSE DE L'AUTEUR**

13 Allée Jean Rostand,  
44470 Carquefou

**Nom de l'imprimeur**

Impression Thèse