



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : [http://oatao.univ-toulouse.fr/Eprints ID : 8626](http://oatao.univ-toulouse.fr/Eprints/ID/8626)

To cite this version :

Coursin, Stéphane. *Prédiction du potentiel reproducteur de jeunes taureaux par échographie testiculaire et mesure de la circonférence scrotale*. Thèse d'exercice, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse - ENVT, 2012, 72 p.

Any correspondance concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@inp-toulouse.fr.

PREDICTION DU POTENTIEL REPRODUCTEUR DE JEUNES TAUREAUX PAR ECHOGRAPHIE TESTICULAIRE ET MESURE DE LA CIRCONFERENCE SCROTALE

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

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

par

COURSIN Stéphane

Né, le 11 novembre 1988 à BRETIGNY-SUR-ORGE (91)

Directeur de thèse : Mme Nicole HAGEN-PICARD

JURY

PRESIDENT :
M. Jean PARINAUD

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :
Mme Nicole HAGEN-PICARD
M. Faouzi LYAZHRI

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

MEMBRE INVITE :
M. Olivier GERARD
M. Eli SELLEM

Docteur vétérinaire responsable d'ATS à l'UNCEIA
Ingénieur de Recherche d'ATS à l'UNCEIA

PREDICTION DU POTENTIEL REPRODUCTEUR DE JEUNES TAUREAUX PAR ECHOGRAPHIE TESTICULAIRE ET MESURE DE LA CIRCONFERENCE SCROTALE

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

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

par

COURSIN Stéphane

Né, le 11 novembre 1988 à BRETIGNY-SUR-ORGE (91)

Directeur de thèse : Mme Nicole HAGEN-PICARD

JURY

PRESIDENT :
M. Jean PARINAUD

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :
Mme Nicole HAGEN-PICARD
M. Faouzi LYAZHRI

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

MEMBRE INVITE :
M. Olivier GERARD
M. Eli SELLEM

Docteur vétérinaire responsable d'ATS à l'UNCEIA
Ingénieur de Recherche d'ATS à l'UNCEIA

Remerciements

A notre jury de thèse

A Monsieur le Professeur Jean PARINAUD

Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse,
Biologie du développement et de la reproduction,

Qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse,
Hommages respectueux.

A Madame le Docteur Nicole HAGEN-PICARD,

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,

Qui m'a fait l'honneur d'accepter de diriger ce travail,
Qui m'a aidé à trouver ce sujet de thèse,
Sincères remerciements.

A Monsieur Faouzi LYAZRHI,

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,
Statistiques biologiques et mathématiques,

Qui a su recentrer les étapes statistiques de ce travail,
Sincères remerciements.

A Monsieur le Docteur Olivier GERARD,

Docteur Vétérinaire responsable de l'Andrologie et Technologie de la Semence,
Union Nationale des Coopératives d'Elevage et d'Insémination Animale,

et Monsieur Eli SELLEM,

Ingénieur de Recherche Andrologie et Technologie de la Semence,
Union Nationale des Coopératives d'Elevage et d'Insémination Animale,

Pour avoir été les instigateurs du projet,
Pour la confiance qu'ils m'ont accordée pour réaliser ce projet,
Pour l'accueil qu'ils m'ont réservé à chacune de nos entrevues,
Pour le soutien qu'ils m'ont accordé lors de mes déplacements,
Pour m'avoir laissé participer aux GTA de l'UNCEIA,
Sincères remerciements.

A notre collaborateur,

A Stéphane BASQUIN,

Chef de centre de la station de quarantaine d'Amélie à Mayenne,

Pour nous avoir facilité l'accès aux installations du centre,
Pour la mise à disposition des animaux du centre,
Pour la transmission des résultats de collecte,
Pour m'avoir guidé et accompagné lors de la réalisation des examens à Mayenne,
Pour sa disponibilité permanente,
Pour le transport aller-retour Mayenne – Paris,
Sincères remerciements.

A ma famille,

A mes parents, pour m'avoir soutenu depuis le début, dans toutes mes entreprises, et en particulier tout au long de ma scolarité à l'école, même à l'autre bout du monde. Merci à vous d'avoir toujours été présents, merci pour cette vie particulière mais si enrichissante de voyageurs.

A ma sœur Christelle, pour avoir réussi à me supporter tout au long de ces années, pour continuer à correspondre malgré l'éloignement géographique et la divergence de nos vies.

A mes amis,

A Pauline, ma belle, parce que tu n'as pas eu peur du bonhomme Haribo, merci pour ces un peu plus d'un an passés ensemble.

A Julien, pour les parties de volley en prépa, pour m'avoir encore un peu plus motivé à venir sur Toulouse, pour toutes les préchauffes de A2, en mémoire de ton premier 4L Trophy, pour les heures et les heures de Xbox, pour toutes les sorties réalisées aux cours de ces 5 ans.

A Flo, pour ces 2 mois australiens, pour avoir réussi à se perdre même en forêt de Bouconne, pour ce premier voyage à Saragosse, pour la personne de confiance que tu représentes, pour tous les bons moments de ces 5 dernières années.

A Sébastien, le polyglotte, pour avoir traversé la terminale et la prépa ensemble, pour les discussions sur Skype, pour l'accueil en Belgique, pour la préparation et surtout les voyages en Crète et aux USA, pour tes histoires passionnantes.

A Ivan, le hobbo citadin, pour nos voyages aux confins du globe, pour Holakiès, pour notre apple addict, pour ta culture générale et pour ton regard perçant.

A Brouty, pour la solidarité de gros du VRC, pour les records de ballons touchés par match, pour ta motivation à Beauvais, pour le groupe de soutien à Marc Lièvreumont.

A Sandra et Léa, pour m'avoir fait intégrer le groupe de TD, pour toutes ces après-midi coinche enchaînées de soirées coinche, pour votre gentillesse et votre franc-parler.

A Hadrien et Françou, pour ce trinôme de choc, pour les blind tests, la chasse aux mouches et aux pigeons, et surtout les rodéos sur Patrick.

A Marion, pour le beurre demi-sel, pour ta témérité, pour ta bonne humeur et ta générosité.

A la Taupe et Rouich, sans qui ce groupe de TD n'aurait jamais pu être aussi exceptionnel.

A Belouche, pour toutes les soirées dans ton appart, pour toutes tes idées saugrenues de préchauffé, pour les séjours à Piau, pour cet aller-retour à la nage en Croatie.

A Mattias, pour être quelqu'un de sympathique mais d'un peu différent, pour l'homme en mousse du volley et du tennis.

A Alex, Camille et Julia, pour ce fantastique voyage en Australie, et pour avoir partagé avec vous le meilleur poste de l'amicale.

A Lulu, qui restera à jamais dans nos mémoires.

A mes docs de we, Lourd, Romain, Nelly, Anaïs, Eugénie, Marielle, P'tite Fille, les Fanny, Aurélie, Elsa, qui ont su m'accueillir à l'école avec **Vincent, Marie, Tanguy, Virginie, Claire et Marine**, au plaisir que j'ai à vous revoir tous à chaque fois.

A mes poulots de we, Dugland et Béber, pour la continuation du bar et pour la BU, **Malek**, pour le futur Doc que je ne voudrais pas subir, **Marou**, l'expatriée, pour nos toutes nos discussions de boum, **Marie**, pour les étoiles filantes, **Geoffrey**, pour ton Museau !, sans oublier **Amélia, Manon, Chloé, Fanny, Iris, Audrey**, à cette fameuse nuit au Rempart !

Au VRC, pour avoir eu plaisir à me faire mal pendant 5 ans, continuez à rester maîtres des intersantés et des interécoles, faites nous rêver encore un peu plus à Toulouse et à Beauvais, et rendez-vous à un prochain Cavegat !

Ministère de l'Agriculture et de la Pêche
ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE

Directeur : M. A. MILON

Directeurs honoraires M. G. VAN HAVERBEKE.
M. P. DESNOYERS

Professeurs honoraires :

M. L. FALIU	M. J. CHANTAL	M. BODIN ROZAT DE MENDRES NEGRE
M. C. LABIE	M. JF. GUELFY	M. DORCHIES
M. C. PAVAU	M. EECKHOUTTE	
M. F. LESCURE	M. D.GRIESS	
M. A. RICO	M. CABANIE	
M. A. CAZIEUX	M. DARRE	
Mme V. BURGAT	M. HENROTEAUX	

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

M. **AUTEFAGE André**, *Pathologie chirurgicale*
M. **BRAUN Jean-Pierre**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
M. **CORPET Denis**, *Science de l'Aliment et Technologies dans les Industries agro-alimentaires*
M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
M. **EUZEBY Jean**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*
M. **FRANC Michel**, *Parasitologie et Maladies parasitaires*
M. **MARTINEAU Guy**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*
M. **PETIT Claude**, *Pharmacie et Toxicologie*
M. **REGNIER Alain**, *Physiopathologie oculaire*
M. **SAUTET Jean**, *Anatomie*
M. **TOUTAIN Pierre-Louis**, *Physiologie et Thérapeutique*

PROFESSEURS 1° CLASSE

M. **BERTHELOT Xavier**, *Pathologie de la Reproduction*
Mme **CLAUW Martine**, *Pharmacie-Toxicologie*
M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie Pathologique*
M. **SCHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*

PROFESSEURS 2° CLASSE

Mme **BENARD Geneviève**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Physiologie et Thérapeutique*
Mme **CHASTANT-MAILLARD Sylvie**, *Pathologie de la Reproduction*

- M. **DUCOS Alain**, *Zootechne*
- M. **DUCOS DE LAHITTE Jacques**, *Parasitologie et Maladies parasitaires*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
- Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la Reproduction*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
- M. **LIGNEREUX Yves**, *Anatomie*
- M. **PICAVET Dominique**, *Pathologie infectieuse*
- M. **SANS Pierre**, *Productions animales*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*

PROFESSEURS CERTIFIES DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

- Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*
- M **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
- M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*
- Mle **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
- Mle **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
- M. **JOUGLAR Jean-Yves**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*
- M **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants.*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*

MAITRES DE CONFERENCES (classe normale)

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **BENNIS-BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
- M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
- Mle **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
- Mme **BOUCLAINVILLE-CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
- Mle **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie*
- M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*
- M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
- M. **CUEVAS RAMOS Gabriel**, *Chirurgie Equine*
- M. **DOSSIN Olivier**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
- Mlle **FERRAN Aude**, *Physiologie*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Elevage et Santé avicoles et cunicoles*
- M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
- Mle **LACROUX Caroline**, *Anatomie Pathologique des animaux de rente*
- M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des Ruminants*
- M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie Chirurgicale*
- M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*
- M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*

- Mlle **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*
Mme **TROGELER-MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation*
M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et Infectiologie (disponibilité à cpt du 01/09/10)*
M. **VERWAERDE Patrick**, *Anesthésie, Réanimation*

MAITRES DE CONFERENCES et AGENTS CONTRACTUELS
--

- M. **BOURRET Vincent**, *Microbiologie et infectiologie*
M. **DASTE Thomas**, *Urgences-soins intensifs*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

- Mlle **DEVIERS Alexandra**, *Anatomie-Imagerie*
M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie*
Mlle **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*
Mlle **PASTOR Mélanie**, *Médecine Interne*
M. **RABOISSON Didier**, *Productions animales*
Mlle **TREVENNEC Karen**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles et porcins*
M **VERSET Michaël**, *Chirurgie des animaux de compagnie*

Liste des abréviations

ATS : Andrologie et Technologie de la Semence

BVD : Bovine Viral Diarrhea – Maladie des muqueuses ou diarrhée virale bovine

CL : Coupe Longitudinale

CS : Circonférence Scrotale

CT : Coupe Transversale

CV : Coefficient de Variation

FSH : Follicle-Stimulating Hormone

GnRH : Gonadotropin Releasing Hormone

IBR : Infectious Bovine Rhinotracheitis – Rhinotrachéite infectieuse bovine

IP : Intensité des Pixels

LH : Luteinizing Hormone – Hormone lutéinisante

NP : Nombre de Pixels

ROI : Region Of Interest – Région sélectionnée

spz : spermatozoïdes

UNCEIA : Union Nationale des Coopératives d'Élevage et d'Insémination Animale

VPN : Valeur Prédicative Négative

VPP : Valeur Prédicative Positive

Table des matières

LISTE DES ABREVIATIONS	10
INTRODUCTION	15
PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	17
1. ANATOMIE ET PHYSIOLOGIE DES TESTICULES	18
1.1. ANATOMIE DES TESTICULES.....	18
1.1.1. Les enveloppes testiculaires	18
1.1.2. Le testicule	20
1.2. PHYSIOLOGIE ET HISTOLOGIE DES TESTICULES	21
1.2.1. Spermatogenèse	21
1.2.2. Mise en place de la puberté	23
1.2.2.1. Période infantile	23
1.2.2.2. Initiation de la spermatogénèse.....	23
2. L'ÉCHOGRAPHIE.....	24
2.1. LES ULTRASONS	24
2.2. FORMATION DES ECHOS.....	25
2.3. ATTENUATION DE L'ONDE ULTRASONORE	26
2.3.1. La réfraction	27
2.3.2. La diffusion.....	27
2.3.3. L'absorption	28
2.4. FORMATION DES IMAGES	28
2.4.1. Intégration des échos par la sonde	28
2.4.2. Les artefacts.....	29
2.4.2.1. Les réflexions spéculaires.....	29
2.4.2.2. Les réflexions non spéculaires	29
2.4.2.3. Les ombres artefactuelles	30
2.4.2.4. Les artefacts par augmentation.....	31
2.4.2.5. Les artefacts de réverbération	31
3. PARAMETRES UTILISES POUR ESTIMER LA FONCTION SEXUELLE DU TAUREAU	31
3.1. PREDICTION DE LA PUBERTE PAR LA CIRCONFERENCE SCROTALE	31
3.2. ECHOGRAPHIE ET FONCTION SEXUELLE.....	32
PARTIE EXPERIMENTALE	34
4. MATERIELS ET METHODES	35
4.1. LOCALISATION ET PERSONNEL.....	35
4.2. LES ANIMAUX.....	35
4.2.1. Conduite d'élevage.....	35

4.2.2.	Suivi sanitaire	36
4.3.	<i>CONTROLE DE LA FONCTION SEXUELLE</i>	36
4.4.	<i>MESURES ECHOGRAPHIQUES</i>	37
4.4.1.	Technique d'échographie	37
4.4.2.	Choix des régions à analyser sur chaque image échographique	38
4.4.3.	Analyse des images échographiques.....	39
4.4.4.	Standardisation de la méthode d'échographie testiculaire	41
4.4.4.1.	<i>Répétabilité des paramètres échographiques</i>	41
4.4.4.2.	<i>Reproductibilité des paramètres échographiques</i>	41
4.5.	<i>MESURE DE LA CIRCONFERENCE SCROTALE</i>	42
4.6.	<i>ANALYSE DU CARACTERE PREDICTIF DE LA FONCTION SEXUELLE PAR LES PARAMETRES ECHOGRAPHIQUES</i>	43
5.	RESULTATS ET DISCUSSION	46
5.1.	<i>EVALUATION DE LA REPETABILITE DES PARAMETRES ECHOGRAPHIQUES DU PARENCHYME TESTICULAIRE</i>	46
5.1.1.	Evaluation de la répétabilité des paramètres échographiques sur plusieurs taureaux testés deux fois	46
5.1.2.	Evaluation de la répétabilité des paramètres échographiques sur un seul taurillon.....	47
5.2.	<i>EVALUATION DE LA REPRODUCTIBILITE DES PARAMETRES TESTICULAIRES ECHOGRAPHIQUES</i>	49
5.2.1.	Analyse par testicule	49
5.2.2.	Analyse sur la moyenne des testicules droits et gauches	49
5.2.2.1.	<i>Effet de l'appareil</i>	49
5.2.2.2.	<i>Effet de l'opérateur</i>	50
5.2.3.	Standardisation des paramètres échographiques	51
5.3.	<i>MESURES DE LA CIRCONFERENCE SCROTALE (CS)</i>	52
5.4.	<i>EVOLUTION DES PARAMETRES SEMINOLOGIQUES DES TAUREAUX EN FONCTION DE L'AGE</i>	53
5.5.	<i>EVALUATION DE LA FONCTION SEXUELLE PAR LES PARAMETRES ECHOGRAPHIQUES, LA CS ET L'AGE DES TAURILLONS</i>	55
5.5.1.	Niveau de gris moyen par ROI et fonction sexuelle.....	55
5.5.2.	Evaluation de la fonction sexuelle	55
5.5.2.1.	<i>Concentration spermatique</i>	56
5.5.2.2.	<i>Volume de l'éjaculat</i>	56
5.5.2.3.	<i>Nombre de spermatozoïdes de l'éjaculat</i>	56
5.6.	<i>APPLICATION DU MODELE D'EVALUATION DE LA FONCTION SEXUELLE A LA SELECTION DES TAURILLONS</i>	57
5.6.1.	Sélection des taureaux avec le modèle fondé sur les paramètres échographiques	58
5.6.2.	Sélection des taureaux pour leur production spermatique avec la CS et l'âge	58
5.7.	<i>PREDICTION DE LA FONCTION SEXUELLE 30 JOURS APRES L'ECHOGRAPHIE GRACE AUX PARAMETRES ECHOGRAPHIQUES, A LA CS ET A L'AGE DES TAURILLONS</i>	59
5.7.1.	Modèle de prédiction de la fonction sexuelle 30 jours après l'échographie	59
5.7.2.	Application du modèle de prédiction à J+30 sur la sélection des taurillons	60
5.8.	<i>PREDICTION DE LA CONCENTRATION SPERMATIQUE DES TAURILLONS PAR CLASSE D'AGE</i>	61
5.8.1.	Estimation de la concentration spermatique des taurillons par classe d'âge.....	61
5.8.2.	Prédiction de la concentration spermatique des taurillons 30 jours après l'échographie par classe d'âge.....	61
6.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	61

BIBLIOGRAPHIE	67
TABLE DES ILLUSTRATIONS	70
A. LES FIGURES.....	70
B. LES TABLEUX	71

INTRODUCTION

L'insémination artificielle est le mode de reproduction le plus répandu en France en élevage bovin laitier. Par exemple, en 2010, sur un total de 2,5 millions de vaches Prim'Holstein, 59,5 % étaient inséminées (34).

L'insémination permet d'accroître le progrès génétique en utilisant des taureaux élites. Ainsi, en 2010, le taureau le plus utilisé en France, STOL JOC, de race Prim'Holstein, a été utilisé pour inséminer plus de 106 000 vaches. Son père, JOCKO BESNE, a produit au cours de son existence plus de 1,7 million de paillettes qui ont été exportés dans une soixantaine de pays, selon Créavia, son entreprise de sélection propriétaire. Il a eu entre 300 et 400 000 filles dans le monde, dont 161 888 sont dûment attestées.

Autrefois testés sur descendance, ces taureaux améliorateurs sont désormais issus d'accouplements raisonnés au sein d'une base de sélection et sont caractérisés par un index génomique calculé à la naissance. Cet index est ajusté au fur et à mesure de l'enregistrement des performances zootechniques des bovins apparentés. Ces jeunes taureaux ont une grande valeur génétique comme futurs reproducteurs à condition de produire de la semence de bonne qualité.

Pour cela, ils sont soumis à un contrôle de la fonction sexuelle qui consiste en une série de collectes de semence successives selon un rythme défini. Ce contrôle démarre dès leur entrée en station de quarantaine, entre 8 et 14 mois d'âge. Les paramètres séminologiques évalués sont quantitatifs : volume de l'éjaculat, concentration en spermatozoïdes et nombre total de spermatozoïdes par éjaculat ou qualitatifs : motilité massale, pourcentage de spermatozoïdes vivants et/ou mobiles, pourcentage de spermatozoïdes anormaux, et test de Schalm.

Les examens qualitatifs présentent une part de subjectivité. Ils ne sont pas toujours corrélés avec la fertilité de la semence ou reliés mais de façon trop faible (10). Pour cette raison et afin de rendre plus pertinente la sélection des jeunes taureaux, de nouveaux critères de classement et de sélection doivent être étudiés.

La mesure de la circonférence scrotale constitue un bon indicateur du potentiel reproducteur à l'âge adulte (28). Elle est corrélée au poids des testicules, lié à la production journalière de sperme et à sa qualité. Cependant, une faible circonférence scrotale observée chez le jeune au sevrage peut être suivie, en fin de puberté, par une croissance testiculaire compensatrice, qui pourrait entraîner l'élimination à tort de futurs reproducteurs (8).

L'échographie des testicules permet d'apprécier les caractéristiques du parenchyme et de révéler d'éventuelles pathologies. *Gérard O. et Rault P. (19)* ont ainsi montré qu'elle était un outil efficace pour mesurer la taille, l'intégrité et la structure des organes génitaux mâles, sans donner de valeurs références par race pour la sélection des reproducteurs. Les images échographiques permettaient néanmoins, associées à l'examen classique de la fonction

sexuelle, de préciser le diagnostic et le pronostic d'une infection génitale, et donc de sauver ou de précipiter la carrière reproductrice du taureau.

Une étude (4) a montré que la modification de l'échogénicité du parenchyme testiculaire trois semaines après une hyperthermie scrotale était corrélée aux variations de production de semence. Ce délai est expliqué par la durée de la spermatogenèse et de la maturation spermatique. Ainsi l'échographie testiculaire pourrait permettre de prédire la qualité du sperme quelques semaines plus tard.

Les objectifs de notre étude sont :

- de confirmer la relation entre le volume testiculaire mesuré par échographie et la production de semence.
- d'évaluer si l'échogénicité du parenchyme testiculaire peut permettre de prédire la production de semence.

Cette étude a été réalisée sur de jeunes taureaux en centre d'insémination animale. Elle a nécessité au préalable la standardisation de l'examen échographique des testicules de taureaux.

Avant d'exposer notre étude expérimentale, selon un plan classique matériels et méthodes, résultats et discussion, une partie bibliographique présentera l'anatomie et la physiologie de l'appareil génital mâle, ainsi que le principe de l'échographie.

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Anatomie et physiologie des testicules

L'interprétation des images échographiques des testicules nécessite de connaître l'anatomie des testicules et de leurs enveloppes.

1.1. Anatomie des testicules

1.1.1. Les enveloppes testiculaires

Plusieurs enveloppes recouvrent les testicules (*figures 1 et 2*). De l'extérieur vers l'intérieur se trouvent (29) :

Les enveloppes superficielles :

- L'enveloppe la plus externe est le scrotum. C'est une peau mince, souple, élastique, riche en glandes sébacées et couverte d'un fin duvet. Elle recouvre l'ensemble des deux gonades, formant une dépression entre les deux testicules, le raphé du scrotum. Le scrotum est détaché, pendulaire, avec un axe vertical.
- En-dessous du scrotum se trouve une tunique musculaire lisse, le dartos. Contrairement au scrotum, il forme un sac individuel pour chaque testicule et se fixe sur l'anneau inguinal. Ces sacs fusionnent médialement en un septum scrotal. Le dartos permet, par la contraction de ses fibres lisses, de contrôler la position des testicules dans les bourses afin d'assurer la régulation de la température, nécessaire au bon déroulement de la spermatogenèse.
- Le fascia spermatique externe est constitué de deux plans fibreux superposés glissant facilement l'un sur l'autre. Cela permet au testicule d'effectuer d'amples mouvements dans le scrotum. Cette enveloppe protège les testicules des chocs et compressions.

Les enveloppes profondes :

- Le muscle crémaster externe est situé dorso-latéralement par rapport aux testicules. Il s'attache au fascia spermatique interne. Il est constitué de fibres musculaires striées, permettant de réguler la température testiculaire.
- Le fascia spermatique interne est la fibreuse testiculaire, intimement lié à la tunique vaginale. Entre les deux fascias spermatiques, une faible quantité de liquide péritonéal permet de faciliter le glissement entre le scrotum et le testicule.
- La tunique vaginale est la séreuse testiculaire, correspondant à l'évagination du péritoine pariétal. Elle adhère fortement à l'albuginée du testicule.

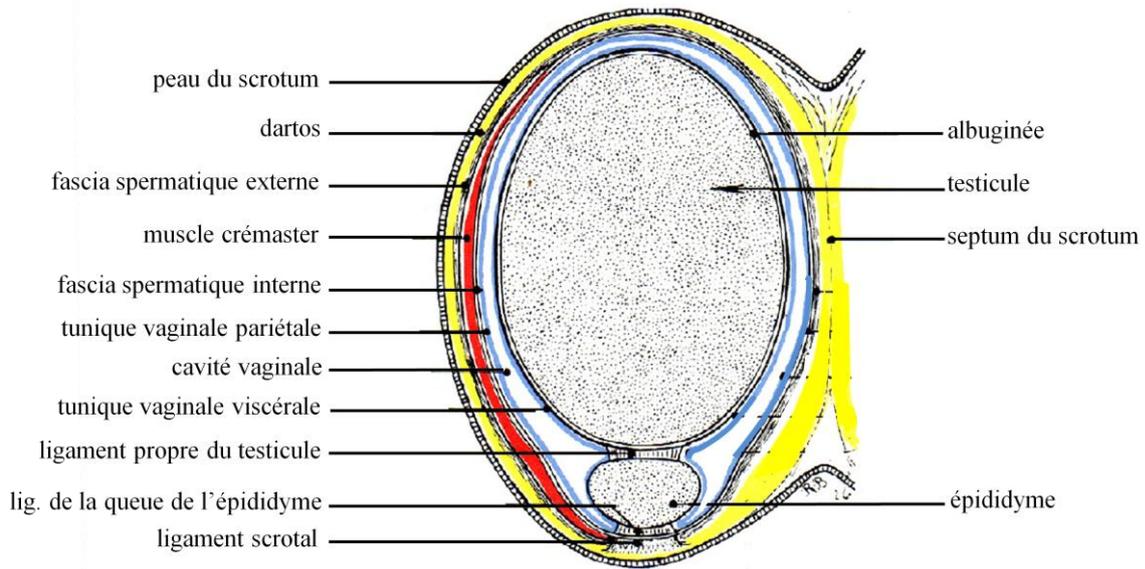


Fig. 1 : Coupe transversale du testicule gauche et de ses enveloppes (d'après 5)

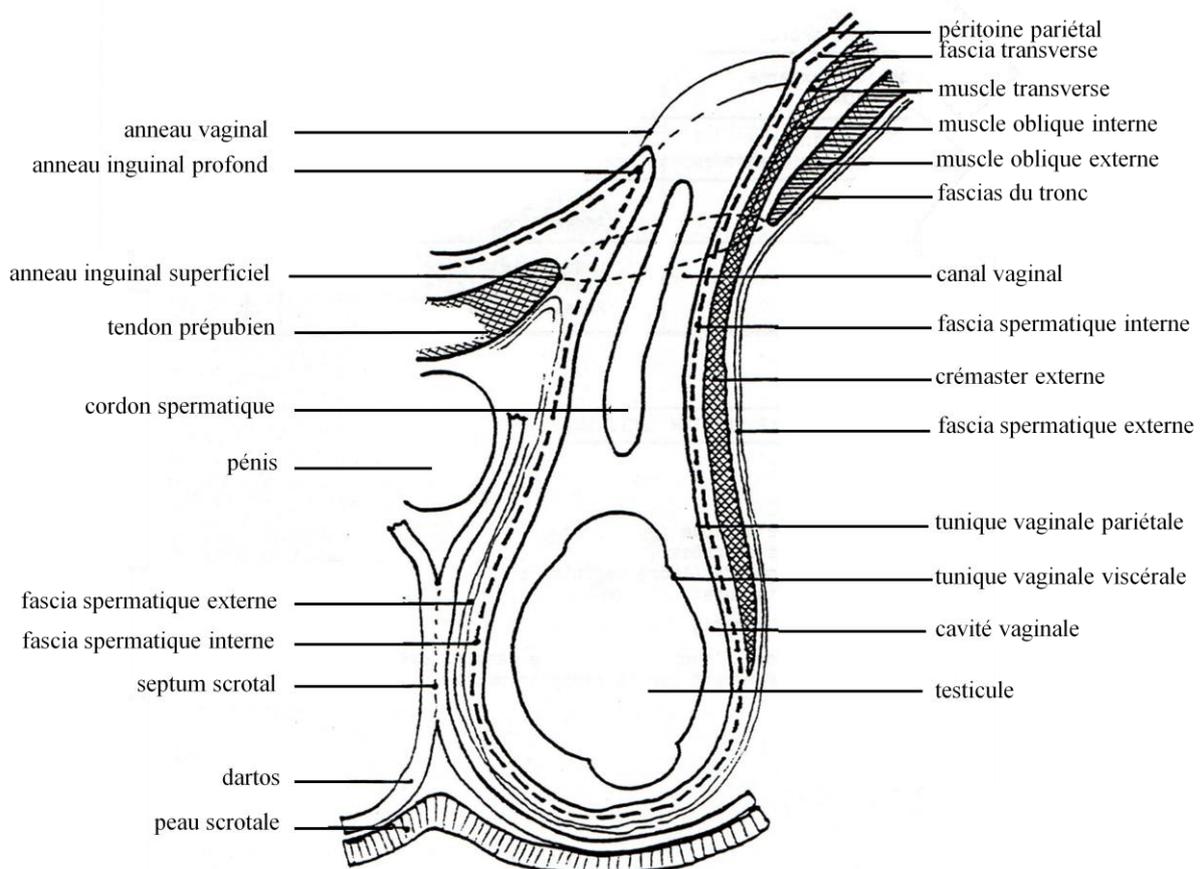


Fig. 2 : Schéma d'une coupe longitudinale du testicule droit et de ses enveloppes (d'après 29)

1.1.2. Le testicule

Le testicule, situé en position sous-inguinale, possède un grand axe vertical (29). L'extrémité capitée est supérieure, le bord épидидymaire est médial. Les testicules sont allongés, ovoïdes et légèrement aplatis médio-latéralement (figure 3). A la palpation, leur consistance est ferme et homogène.

Chaque testicule est entouré par une tunique albuginée (31, 32). Celle-ci forme une capsule fibreuse blanchâtre, non-élastique et parcourue par les vaisseaux sanguins alimentant le testicule. Des cloisons testiculaires se détachent de la face profonde de l'albuginée vers la partie centrale du testicule, appelée médiastin testiculaire, qui renferme le *rete testis*, un réseau de conduits anastomosés qui collecte les tubes séminifères et émet les conduits efférents dans la tête de l'épididyme.

Les cloisons testiculaires divisent le parenchyme en lobules. Il y a en moyenne entre 200 et 300 lobules dans un testicule, enfermant chacun entre 1 et 4 tubes séminifères (29), dans lesquels se déroule la spermatogénèse.

Ces tubes et le tissu interstitiel qui les entoure forment le parenchyme du testicule (29). Celui-ci est jaune et mou à la coupe. La consistance ferme des testicules vient d'une mise sous pression de la pulpe maintenue par la tunique albuginée. Une augmentation significative de la pression intra-testiculaire (inflammation) entraînera une douleur chez l'animal.

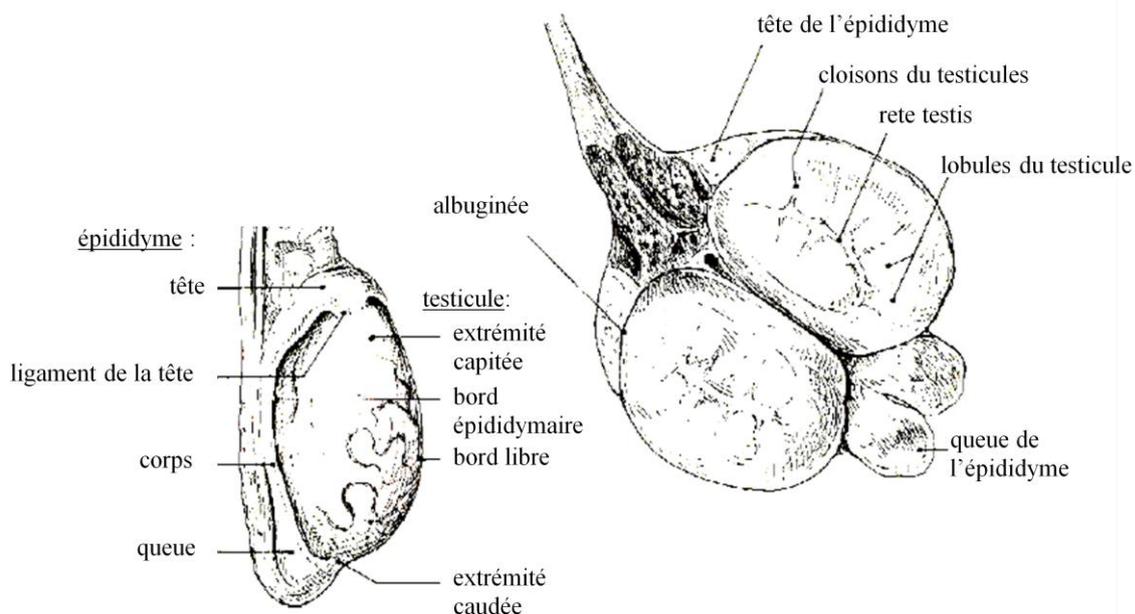


Fig. 3 : Vue caudale et coupe longitudinale du testicule droit et de son épидидyme d'un taureau (d'après 12)

1.2. Physiologie et histologie des testicules

1.2.1. Spermatogenèse

La spermatogenèse correspond au processus continu de différenciation cellulaire permettant la production de spermatozoïdes à partir des spermatogonies souches (15). La spermatogenèse permet à un taureau pubère de produire environ 140 spermatozoïdes/seconde/g de parenchyme testiculaire, soit 12 millions de spermatozoïdes/j/g de parenchyme (2).

Le testicule est composé de trois compartiments (*figure 4*).

- le tissu interstitiel sert de communication entre les cellules de Leydig, les vaisseaux sanguins et lymphatiques et les tubes séminifères.
- les tubes séminifères sont séparés en compartiments luminal et basal par des jonctions complexes entre les cellules de Sertoli, permettant de fournir un environnement isolé aux cellules germinales postmitotiques.

La couche basale des tubes séminifères contient des A-spermatogonies (23). Celles-ci se multiplient par mitose. La première phase de la spermatogenèse est la spermatocytogenèse, au cours de laquelle ces A-spermatogonies se transforment en B-spermatogonies puis en spermatocytes I.

Ces spermatocytes I initient ensuite la méiose. Cette phase va permettre à partir d'un spermatocyte I de former 2 spermatocytes II puis 4 spermatides. Au cours de la méiose, les cellules traversent la barrière formée par les cellules de Sertoli.

Les spermatides sont des cellules rondes et immobiles. L'étape leur permettant d'acquérir leur mobilité est la spermiogenèse. Ainsi, les spermatozoïdes sont formés après de nombreux remaniements cytoplasmiques et une condensation de la chromatine.

Ainsi, les coupes de tubes séminifères représentent toujours les mêmes associations de différenciation cellulaire. Chaque coupe retrouve le même type de section par cycle de 13,5 jours (2). 4 couches de cellules sont retrouvées par section, correspondant au nombre de cycles nécessaires pour qu'une cellule germinale accomplisse sa différenciation. Chez le taureau, la durée de spermatogenèse est de 54 jours. Le temps de transit des spermatozoïdes dans l'épididyme est de 8 jours.

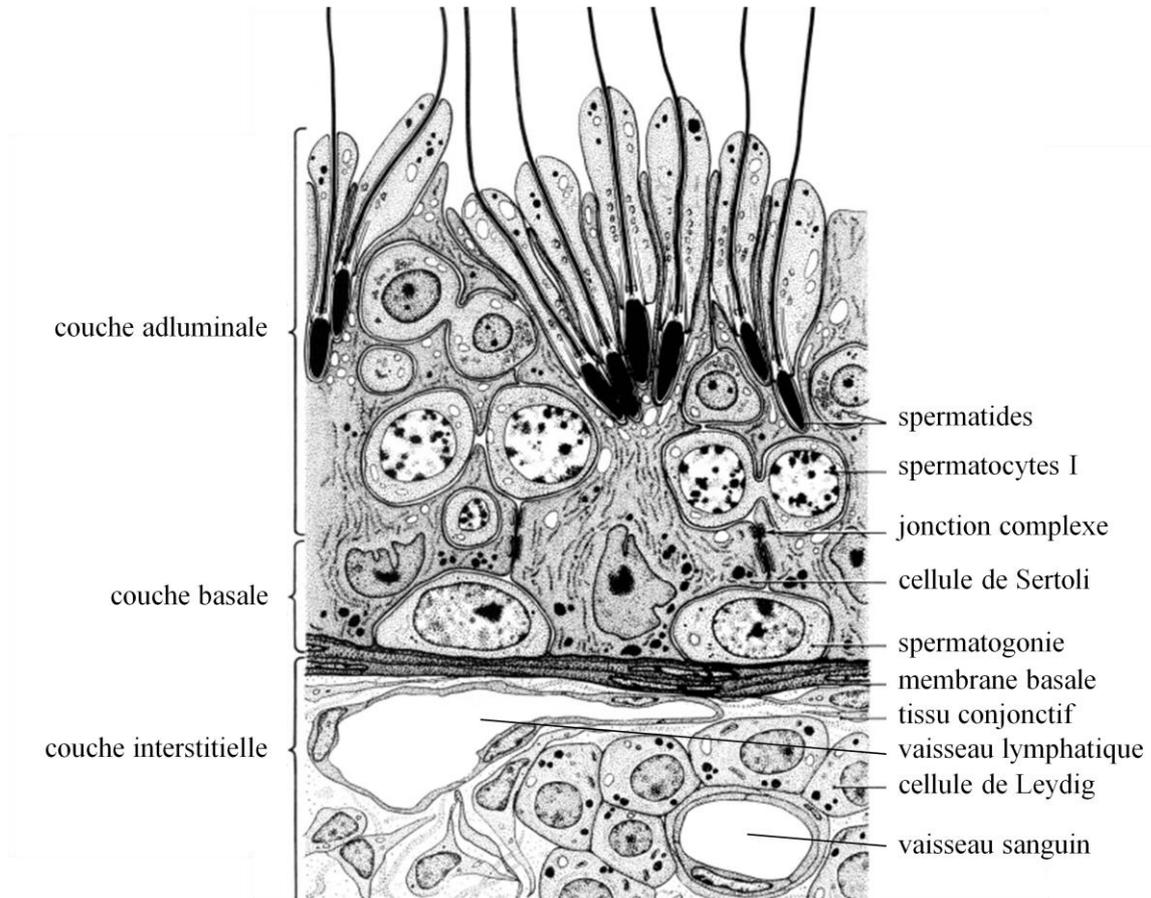


Fig. 4 : Schéma d'une coupe transversale de tube séminifère avec la localisation des différents stades de la lignée germinale (d'après 2)

Ainsi, l'éjaculat obtenu un jour donné est le reflet de la spermatogenèse initiée environ 2 mois auparavant. Ce délai doit être pris en compte lorsque l'on veut mesurer l'impact de différents facteurs sur la spermatogenèse et la fonction sexuelle.

La spermatogenèse est régulée principalement par l'axe hypothalamo-hypophysaire. L'hypothalamus produit la GnRH (gonadotropin releasing hormone), qui contrôle la production hypophysaire de LH (luteinizing hormone) et de FSH (follicle-stimulating hormone).

La LH, sécrétée de manière pulsatile, agit sur les cellules de Leydig, et stimule la production de testostérone et d'œstradiol. La testostérone régule notamment l'initiation et le maintien de la spermatogenèse.

La FSH agit sur les cellules de Sertoli qui assurent la nutrition des cellules germinales. Elles produisent de l'inhibine, de l'activine et une protéine de liaison des hormones androgènes (androgen binding protein) qui assure le transport de la testostérone aux cellules germinales (22).

L'activine stimule la production de FSH. A l'inverse, la testostérone, l'œstradiol et l'inhibine induisent un rétrocontrôle négatif sur la production hypothalamo-hypophysaire de GnRH, LH et FSH.

1.2.2. Mise en place de la puberté

1.2.2.1. Période infantile

Chez le veau mâle non sevré, les tubes séminifères des testicules ne contiennent que des cellules souches germinales et des cellules indifférenciées (7).

La pulsativité de LH est faible, et la sécrétion de testostérone reste basse.

1.2.2.2. Initiation de la spermatogénèse

La mise en place de la puberté s'explique par l'enchaînement des événements cellulaires et endocriniens suivants (2) :

- initiation des décharges de LH spontanées (12^{ème} semaine)
- différenciation et sécrétion d'androstènedione par les cellules de Leydig en réponse aux décharges de LH (12^{ème} à 16^{ème} semaine)
- différenciation des cellules de Leydig et sécrétion consécutive de testostérone (16^{ème} à 20^{ème} semaine)
- différenciation des cellules indifférenciées en cellules de Sertoli (12^{ème} à 20^{ème} semaine) et des gonocytes en pré- et A-spermatogonies (16^{ème} à 20^{ème} semaine)
- rétrocontrôle négatif des stéroïdes testiculaires sur l'axe hypothalamo-hypophysaire (18^{ème} à 20^{ème} semaine)
- arrêt de la formation des cellules de Sertoli, mise en place de jonctions complexes formant une barrière sang/parenchyme testiculaire (20^{ème} semaine)
- formation des premiers spermatozoïdes puis des spermatozoïdes (24^{ème} à 28^{ème} semaine)
- stimulation de la spermatogénèse permettant la production du premier éjaculat à la 37^{ème} semaine environ
- augmentation de la concentration en spermatozoïdes de l'éjaculat. La **puberté est atteinte** lorsque le taureau produit un premier éjaculat contenant plus de 50×10^6 spermatozoïdes/ml avec une motilité minimale de 10%. En moyenne, les taureaux Holstein sont pubères entre 39 et 41 semaines, soit environ 9 mois.
- le taureau est considéré comme sexuellement mature 14 à 16 semaines après la puberté, délai nécessaire pour obtenir une qualité des spermatozoïdes satisfaisante (pourcentage de spermatozoïdes mobiles > 60 % et pourcentage de spermatozoïdes normaux > 70%). La production de spermatozoïdes continue d'augmenter jusqu'à l'âge de 3 ans, elle reste stable jusqu'à 6-7 ans puis commence à diminuer (23).

Ces événements physiologiques sont associés à des modifications histologiques et anatomiques du testicule. Ainsi, entre la 12^{ème} et la 32^{ème} semaine, le poids des testicules passe de 9 g à 117 g (14) ; les tubes séminifères augmentent en longueur de 830 à 2 010 m/testicule et en diamètre de 65 à 208 µm. Les tubes séminifères occupent un volume de plus en plus important dans le parenchyme testiculaire, avec une proportion augmentant de 44 % à

81 %. Après 32 semaines d'âge, leur longueur augmente (jusqu'à > 4000 m/testicule) puis leur diamètre (270 µm).

Ainsi à 32 semaines, les testicules pèsent plus de 80 g, avec une production d'environ $0,5 \cdot 10^6$ spermatozoïdes/g de parenchyme testiculaire contre $12 \cdot 10^6$ spermatozoïdes/g chez le taureau adulte.

Les modifications histologiques du parenchyme testiculaire à la puberté pourraient être explorées par échographie et permettre d'évaluer la production de spermatozoïdes. Dans cette synthèse bibliographique, nous présenterons le principe de l'échographie, en mentionnant les particularités de l'échographie du testicule.

2. L'échographie

L'échographie est une technique d'imagerie médicale fondée sur l'utilisation d'ultrasons. Elle permet de visualiser de façon non invasive la structure même des organes. Elle est généralement plus informative et précise que l'inspection et la palpation.

La technique est normalement sans danger pour l'animal comme pour l'utilisateur (13). La réponse des tissus aux ultrasons (vibration des molécules et absorption de la chaleur) est sans conséquence (l'élévation de température ne peut pas excéder 1°C sur la durée de l'examen). L'énergie minimum pour produire des lésions est de 100 mWatts/cm² alors que les ultrasons utilisés en imagerie médicale n'émettent que de 1 à 10 mWatts/cm².

2.1. Les ultrasons

Les ondes ultrasonores sont produites à partir d'un courant électrique, par le cristal piézoélectrique contenu dans la sonde échographique. Elles sont définies (22) par quatre critères : célérité, intensité, longueur et fréquence (figure 5).

La célérité est la vitesse de propagation de l'onde. Elle dépend uniquement des caractéristiques du tissu traversé : son élasticité et sa densité. La vitesse moyenne dans la plupart des tissus mous est de 1540 m/s, à part dans les os (4080 m/s) et dans les poumons (600 m/s en raison de la présence d'air).

L'amplitude de l'onde correspond à l'amplitude du mouvement des particules. Elle détermine l'intensité de l'onde. L'intensité est la quantité d'énergie qui traverse l'unité de surface par unité de temps ; elle s'exprime en Watt par cm² (W/cm²).

La fréquence exprime le nombre de vibrations de la source ultrasonore par unité de temps. L'unité de mesure est l'hertz (Hz). Les ultrasons sont définis par une fréquence supérieure à 20 000 Hz.

La longueur d'onde (λ) mesure l'étendue spatiale d'un cycle de vibration. Elle est reliée à la fréquence (f) et à la célérité (C) par la relation $\lambda = C/f$.

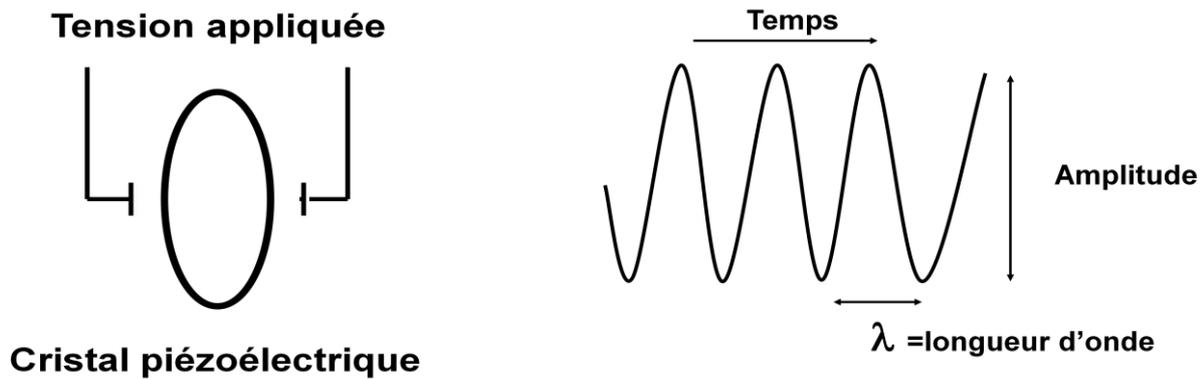


Fig. 5 : Amplitude et longueur d'onde de l'onde produite par le cristal subissant une tension électrique

2.2. Formation des échos

Lorsqu'une onde ultrasonore traverse l'interface de deux milieux d'impédance acoustique différente, elle se divise principalement en une onde réfléchie et une onde transmise. L'onde réfléchie correspond à l'écho, l'onde transmise explore les tissus situés plus profondément.

L'impédance acoustique (z) traduit la plus ou moins grande aptitude d'un milieu donné à la pénétration des ultrasons (*figure 6*). Elle est définie par le produit de la densité du milieu (ρ) par la célérité (C) : $z = \rho \times C$.

Si les milieux ont des impédances proches, alors l'onde est fortement transmise.

Par contre, l'air et l'os possèdent des impédances très différentes de celles des tissus mous. Ces deux éléments constituent des obstacles à la propagation des ultrasons. Par exemple, l'impédance acoustique de l'air est très inférieure à celle des tissus mous et à l'interface tissu mou/air, plus de 99% de l'énergie est réfléchie. C'est la raison pour laquelle lors d'une échographie transcutanée, il est recommandé de raser les poils pour minimiser les poches d'air et d'avoir recours à un gel.

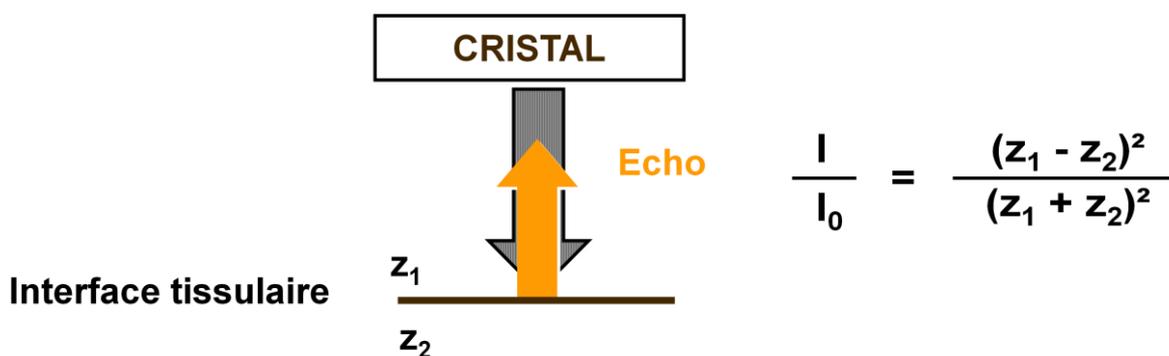


Fig. 6 : Réflexion de l'écho au niveau d'une interface tissulaire. Exemple de l'interface grasse (impédance $z_1 = 1,33 \times 10^{-6}$ rayl) / muscle (impédance $z_2 = 1,7 \times 10^{-6}$ rayl) : l'onde réfléchie (I) est faible par rapport à celle émise (I_0), les impédances étant proches l'une de l'autre.

L'onde réfléchié ou écho retourne au cristal piézo-électrique et génère un courant en réponse à la réception de l'écho (*figure 7*). Le délai entre la propagation de l'ultrason et la réception de son écho permet de déterminer la distance entre les cristaux et l'interface.

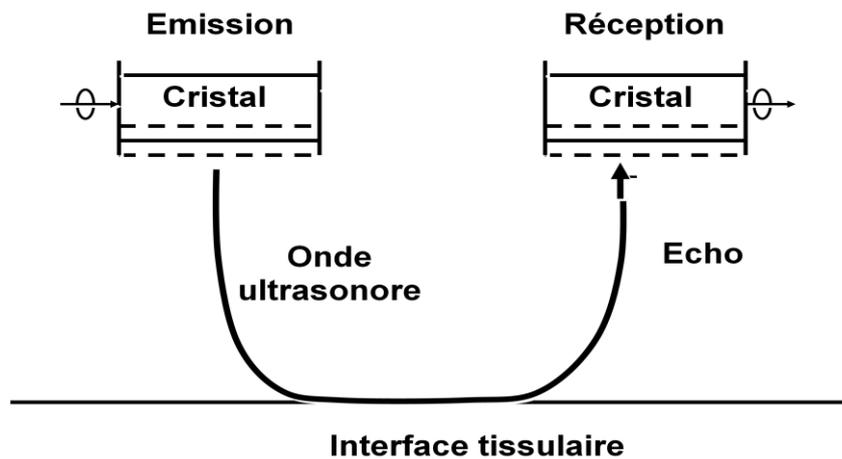


Fig. 7 : Emission et réception de l'onde ultrasonore

2.3. Atténuation de l'onde ultrasonore

L'énergie de l'onde est atténuée au cours de sa propagation dans les tissus (*figure 8*). C'est ce qui limite la profondeur des tissus explorés. En effet, l'énergie est prélevée au faisceau incident pour être réémise dans des directions différentes (réflexion, réfraction, diffusion) ou pour être absorbée (absorption) par les tissus et transformée en chaleur. Ainsi, sur l'image échographique, pour des interfaces d'impédances acoustiques comparables, les parties les plus profondes sont plus sombres que les parties plus superficielles.

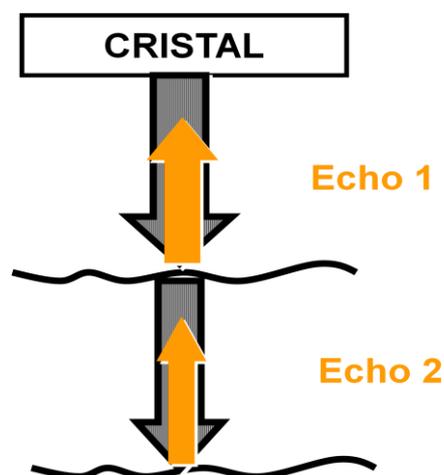


Fig. 8 : Atténuation de l'onde ultrasonore. Si I_0 est l'onde incidente sur la première interface, l'écho 1 qui revient vers le cristal entraîne une baisse de l'intensité de I_1 , l'onde transmise vers la seconde interface. Même si cette seconde interface possède les mêmes caractéristiques d'impédance que la première, l'écho 2 est inférieur à l'écho 1 car I_1 est inférieure à I_0 .

2.3.1. La réfraction

La réfraction correspond à une déviation de l'onde ultrasonore transmise lorsque l'interface n'est pas perpendiculaire la direction de l'onde. L'onde est réfléchie avec un angle égal à l'angle d'incidence et ne repart pas vers la source émettrice ; l'onde transmise est déviée par rapport à l'onde incidente (*figure 9*).

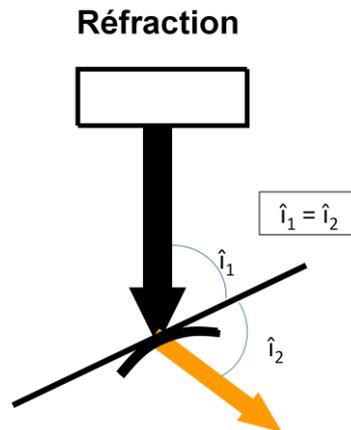


Fig. 9 : Schéma de la réfraction d'une onde ultrasonore. L'angle de l'onde incidente \hat{i}_1 et l'angle de l'onde réfléchie \hat{i}_2 sont égaux.

2.3.2. La diffusion

La diffusion correspond à la réflexion dans de multiples directions d'une fraction minimale de l'énergie de l'onde ultrasonore par des cibles dont les dimensions sont petites en comparaison avec la longueur d'onde (*figure 10*).

La diffusion provoque une perte d'intensité de l'écho réfléchi. En même temps, la cible se comporte comme une source secondaire d'ultrasons.

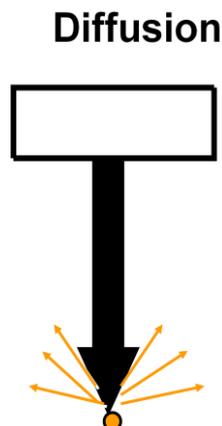


Fig. 10 : Schéma de la diffusion d'une onde ultrasonore

2.3.3. L'absorption

L'absorption correspond à la transformation de l'énergie en chaleur lorsque l'onde se propage dans un milieu. Ce mécanisme est dépendant de la fréquence et obéit à une loi exponentielle décroissante. Ainsi, l'intensité ultrasonore diminue exponentiellement avec la profondeur de pénétration dans le tissu. C'est pourquoi il est important de comparer des images avec des fréquences et des profondeurs égales.

2.4. Formation des images

2.4.1. Intégration des échos par la sonde

La sonde échographique est formée de cristaux piézoélectriques, qui reçoivent un courant électrique qu'ils transforment en une série de vibrations appelée salve (*figure 11*). Entre chaque salve une phase de latence permet la réception de l'écho par les cristaux qui à l'inverse vont transformer ces nouvelles vibrations en un courant électrique, intégré ensuite par l'appareil échographique. Le nombre de vibrations par salve est de 3-4 ; ce nombre n'est pas fonction de la fréquence mais appartient aux caractéristiques intrinsèques de l'appareil. La fréquence agit sur la durée de chaque salve. La salve se dirige vers les tissus sous-jacents et le volume traversé par l'onde est appelé faisceau.

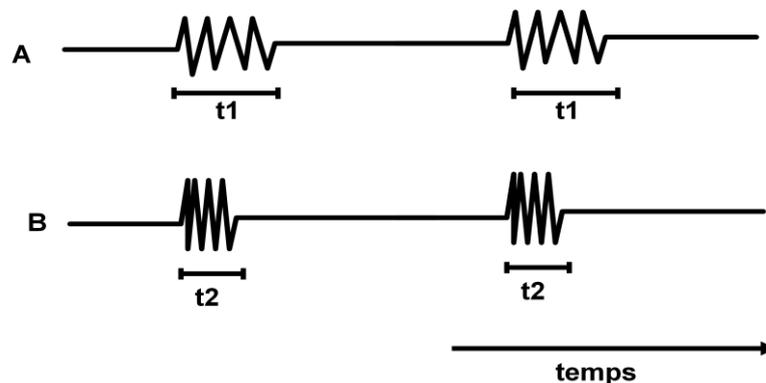


Fig. 11 : Production de salves d'ultrasons pour des fréquences différentes ($f(B) > f(A)$), avec $t1$ et $t2$ les durées de chaque salve ($t1 > t2$).

L'échographie en mode B (bidimensionnel) produit une image obtenue par le balayage automatique, rapide et séquentiel par le faisceau du plan de coupe défini par l'orientation de la sonde. Ce mode permet donc de réaliser des images de tranche de tissu, équivalentes à une coupe histologique.

Le faisceau d'ultrasons va rencontrer différentes interfaces et générer des échos de retour. Les échos sont traités pour former l'image échographique dont chaque élément, nommé pixel, est placé à l'écran à une profondeur déterminée par la latence de retour de l'écho.

La brillance des éléments de l'image varie en fonction de l'intensité de l'écho : les structures anéchogènes (liquide) apparaissent en noir et les structures plus échogènes (*rete*

testis) apparaissent plus blanches. Les structures à échogénicité intermédiaire sont représentées par des nuances de gris.

La vitesse de formation des images est typiquement de 20 à 30 images par seconde. Ainsi des images en temps réel sont produites. Les images échographiques changent lorsque les structures se déplacent ou lors du déplacement de la sonde.

2.4.2. Les artefacts

La connaissance des artefacts rencontrés à l'échographie est nécessaire pour analyser les images échographiques. Certains artefacts sont en effet caractéristiques des tissus traversés par l'onde, permettant de mieux visualiser la structure tissulaire ; à l'inverse, d'autres artefacts constituent des entraves à l'interprétation des images échographiques.

2.4.2.1. Les réflexions spéculaires

Une réflexion spéculaire survient lorsque le faisceau tombe sur une interface lisse, plus large que le faisceau et parallèle à la sonde (*figure 12*). Seule une impulsion qui frappe un réflecteur spéculaire à angle droit pourra produire un écho sur l'écran. Une impulsion qui frappe une interface avec un angle différent d'un angle droit est réfléchi avec le même angle et l'interface n'est pas détectée.

Ce type d'artefact est surtout rencontré pour les structures vésiculaires.

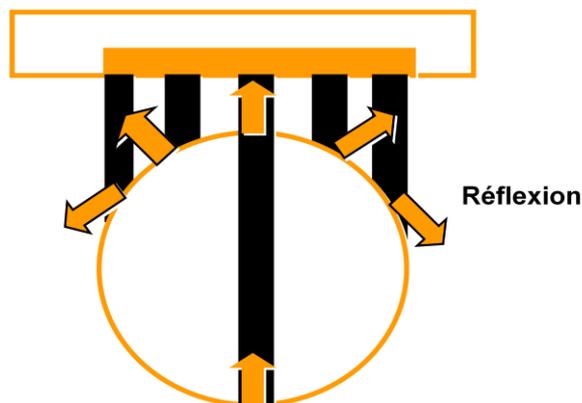


Fig. 12 : Réflexion de type spéculaire d'un faisceau d'ondes ultrasonores. Lorsque l'angle est trop important, les ondes réfléchies ne reviennent pas vers le cristal.

2.4.2.2. Les réflexions non spéculaires

Les réflexions non spéculaires (encore appelées diffuses) ont pour origine des réflexions sur des surfaces rugueuses ou des surfaces qui sont plus étroites que le faisceau (*figure 13*). A la différence des réflexions spéculaires, l'amplitude de l'écho pour les réflecteurs non spéculaires ne dépend pas de l'angle d'incidence du faisceau. La structure présente ainsi un aspect échographique grisé, avec une nuance de couleur constante quelque soit l'orientation de la sonde.

Ce phénomène de diffusion est observé pour le parenchyme testiculaire qui présente des structures de petite dimension. La perte d'intensité de l'écho réfléchi explique l'échogénicité plus faible et homogène du testicule.

Réflecteurs non spéculaires

Surface non lisse Petites interfaces

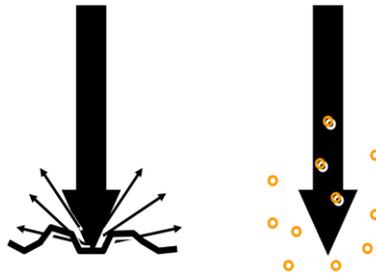


Fig. 13 : Réflexion sur des réflecteurs non spéculaires, surfaces rugueuses ou parenchymes : l'onde est diffusée et seul un faible écho revient vers le cristal

2.4.2.3. Les ombres artefactuelles

Sur une image échographique, une zone noire peut correspondre à une absence de réflecteur (ex : air, liquide) ou être due à une ombre artefactuelle. Ces ombres sont obtenues lors de l'arrêt de la propagation du faisceau par un réflecteur très dense comme une structure osseuse. Elles sont également obtenues lors de la déviation du faisceau à partir du côté d'une structure cavitaire remplie de liquide ou d'air, formant un cône d'ombre (*figure 14*).

Cet artefact est fréquemment rencontré lors de l'échographie testiculaire en raison des poches d'air liées à la forme arrondie du scrotum, d'où la nécessité de bien maintenir les testicules au fond des bourses et d'appliquer du gel sur la sonde.

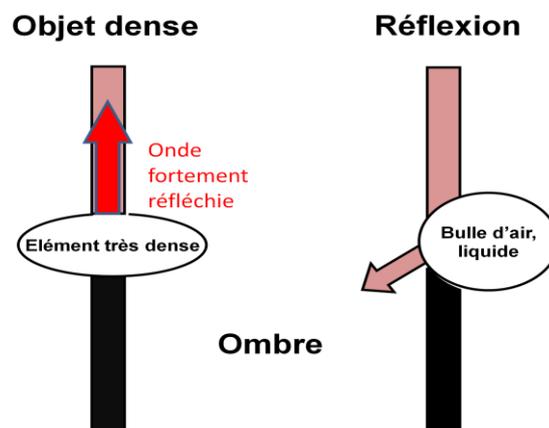


Fig. 14 : Création d'un cône d'ombre par réflexion d'une onde ultrasonore

2.4.2.4. Les artefacts par augmentation

Les artefacts par augmentation ou renforcement postérieur se rencontrent pour des structures cavitaires remplies de liquide. Lors de la traversée d'une cavité, le faisceau n'est pas atténué et son amplitude pour une profondeur donnée est plus grande lorsqu'il a eu à traverser une structure liquidienne.

Ce type d'artefact n'est pas rencontré pour le testicule.

2.4.2.5. Les artefacts de réverbération

La réverbération se réfère à la production d'échos illégitimes dus à deux réflecteurs ou plus situés sur le trajet de l'onde ultrasonore ; le premier est généralement l'interface peau/sonde. Le deuxième réflecteur peut être une poche de gaz ou une structure osseuse. La réverbération est due au rebondissement de l'écho entre les deux réflecteurs et cela jusqu'à l'épuisement de l'écho par atténuation. Cela donne naissance à un empilement d'échos sur l'écran, visualisé sous forme de lignes échogènes parallèles. Le premier est légitime alors que les autres sont des réverbérations, ces dernières s'affaiblissant progressivement et apparaissant de plus en plus bas sur l'écran. Compte tenu de la force décroissante des échos réverbérés on parle d'artefacts en queue de comète.

Ce type d'artefact n'est pas rencontré pour le testicule.

3. Paramètres utilisés pour estimer la fonction sexuelle du taureau

3.1. Prédiction de la puberté par la circonférence scrotale

L'âge à la puberté est un paramètre utilisé pour estimer la capacité reproductrice du taureau. Cependant, il est peu précis et un taureau précoce n'est pas systématiquement un bon producteur de sperme.

Différentes études ont évalué la relation entre la circonférence scrotale (CS), la puberté et la fonction sexuelle des taureaux.

La circonférence scrotale mesurée au mètre ruban nous renseigne indirectement sur le poids des testicules et par conséquent sur la fonction sexuelle.

Ainsi, selon *Gipson et al. (20)*, les taureaux allaitants avec des circonférences scrotales supérieures à 32 cm ont une qualité spermatique supérieure (nombre de spermatozoïdes, concentration, motilité) à celle des mâles présentant une CS inférieure à 32 cm, alors qu'il n'y a pas de différence d'âge entre les groupes (9 jours en moyenne).

Dans une autre étude, sur un groupe de 31 taureaux de différentes races, l'âge à la puberté entre les taureaux variait de 88 jours. En revanche, la circonférence scrotale entre les taureaux était relativement homogène, en moyenne de 27,9 cm +/- 0,2 cm (27). La production

spermatique est donc fortement liée à la circonférence scrotale, plus que ne le sont le poids vif ou l'âge du taurillon.

Cependant la sélection des taureaux en fonction d'une taille minimale de circonférence scrotale peut entraîner une élimination à tort de taureaux élites.

En effet, une étude sur 708 taureaux au Canada (8) a montré que la circonférence scrotale à l'âge du sevrage pour des taureaux allaitants n'était pas toujours prédictive de celle des mêmes taureaux à l'âge de 1 an. Les taureaux n'ayant pas la CS minimale requise au sevrage de 21 cm ont en effet parfois atteint la CS recommandée pour la race à 365 jours. La CS au sevrage ne semble donc pas être utilisable pour décider de réformer les taureaux insuffisants. A l'inverse, 80 % des taureaux âgés de 240 jours présentant une CS supérieure à la valeur seuil de circonférence, variable selon les races, présentaient à 1 an aussi la taille minimale requise.

L'âge de sélection des taureaux le plus adapté pour utiliser le paramètre de CS semble être 1 an. A cet âge, les taureaux Holstein ont presque atteint leur maturité sexuelle. Les taureaux présentant à 1 an une CS inférieure à 30 cm, ont une fonction sexuelle insuffisante à 2 ans (25). La valeur seuil de circonférence scrotale généralement validée pour sélectionner les taureaux producteurs de semence est de 30 cm à 1 an pour la race Prim'Holstein (16).

3.2. Echographie et fonction sexuelle

Différentes études ont déterminé l'intérêt de l'échographie testiculaire pour mesurer les dimensions testiculaires, ou l'aspect du parenchyme, et évaluer ainsi la fonction sexuelle.

En effet, une corrélation entre la largeur des testicules à l'échographie et la CS a été observée (1). Chez les ovins, des modèles mathématiques (24) utilisant CS et mesures échographiques ont permis d'obtenir une bonne estimation des mensurations testiculaires.

Cependant, la mesure de la CS au mètre-ruban est une technique plus simple et plus fiable que l'imagerie (18) pour déterminer la taille des testicules.

De même, l'échotexture du testicule analysée par traitement d'images (18) est corrélée au volume occupé par les tubes séminifères dans le testicule.

Ainsi, sur des taurillons suivis pendant leur croissance prépubertaire (17, 11), l'intensité des pixels du parenchyme testiculaire augmente entre 20 et 46 semaines d'âge, avec une inflexion à 30 semaines.

Au même âge, le nombre de pixels par unité de surface du parenchyme testiculaire (3), entre 34 et 40 semaines d'âge, est plus élevé sur le groupe de taurillons avec une puberté précoce comparativement à celui avec une puberté plus tardive.

Une étude (4) a testé l'hypothèse selon laquelle l'échographie permettait de prédire la fonction sexuelle. Les testicules de 16 taureaux adultes ont été maintenus isolés par un sac serré à la base du scrotum pendant quelques jours. Les paramètres échographiques testiculaires (intensité des pixels, nombre de pixels) et séminologiques (motilité individuelle

et morphologie des spermatozoïdes) ont diminué régulièrement les premières semaines après le défaut de thermorégulation testiculaire. Les critères échographiques n'ont pas été corrélés aux mesures de qualité spermatique sur les éjaculats produits dans les mêmes semaines que les échographies.

Cependant, l'intensité des pixels et le nombre de pixels ont permis d'expliquer entre 13 et 25 % de la variation de la motilité et de la morphologie des spermatozoïdes des éjaculats produits 2 à 4 semaines plus tard. Les paramètres échographiques (intensité et nombre de pixels) ont ainsi présenté une sensibilité et une valeur prédictive négative modérées (64,5 – 82,6 %) mais une spécificité et une valeur prédictive positive faibles (33,3 – 61,2 %) comme prédicateurs d'une qualité de semence satisfaisante (> 60 % de motilité individuelle et > 70 % de morphologie normale des spermatozoïdes).

L'ensemble de ces données suggère que l'échographie pourrait être utilisée comme un outil complémentaire à la mesure de la circonférence scrotale pour évaluer et prédire le potentiel reproducteur du taureau.

PARTIE EXPERIMENTALE

4. Matériels et méthodes

4.1. Localisation et personnel

Le travail a été conduit dans le cadre du laboratoire d'Andrologie et Technologie de la Semence (ATS) de l'Union Nationale des Coopératives d'Elevage et d'Insémination Animale (UNCEIA), situé 13 rue Jouët, 94704 MAISONS-ALFORT, sous la responsabilité du Docteur Vétérinaire Olivier GERARD responsable du laboratoire et de l'ingénieur de recherche Eli SELLEM.

La partie expérimentale s'est déroulée dans une des stations de quarantaine du groupe Amélis, située 406 rue de Normandie, 53100 MAYENNE.

Les échographies testiculaires ont été réalisées en coopération avec le chef de centre de la station, Mr BASQUIN Stéphane.

La station de quarantaine comprend une salle de monte contiguë au laboratoire d'analyse et de conservation de la semence.

4.2. Les animaux

4.2.1. Conduite d'élevage

Les taurillons de race Prim'Holstein (n = 175), sont entrés à la station de quarantaine entre 10 et 15 mois d'âge. Ils sont restés dans la station 56 jours. La station fonctionne en tout plein tout vide avec une arrivée des animaux par lot.

Le tableau 1 présente les sept lots utilisés pour l'étude, depuis mai 2010 jusqu'à janvier 2012. Deux taurillons n'ont pas quitté la quarantaine après le premier passage ; ECHU qui est resté en quarantaine avec les lots 2 et 3 ; FLOCON qui est resté avec les lots 3 et 4.

Tabl. 1 : Répartition des lots de taurillons utilisés au centre d'insémination d'Amélis pour l'étude

numéro de lot	nombre d'animaux utilisés	date d'entrée	date de sortie
1	31	mai 2010	juillet 2010
2	26	août 2010	octobre 2010
3	30	novembre 2010	janvier 2011
4	32	février 2011	avril 2011
5	26	mai 2011	juillet 2011
6	31	septembre 2011	novembre 2011
7	1	décembre 2011	février 2012

Les animaux ont été logés dans des boxes individuels de 24,5 m², avec un abreuvoir et une auge individuels, et un râtelier de foin pour deux taurillons. Le paillage était réalisé quotidiennement.

L'alimentation était composée d'un foin de prairie naturelle à volonté, de 4 kg de concentrés (aliment complet pour bovins à l'engraissement Toniform®) dont la distribution est répartie entre le matin et le soir, auquel était prémélangé un complément minéral (Fertilance®) à raison de 50 à 60 g par semaine.

La gestion sanitaire de la station (locaux, gestion des entrants et des sortants) repose sur des mesures de biosécurité strictes.

4.2.2. Suivi sanitaire

Tous les taurillons (plus les boute-en-train utilisés pour récolter la semence) ont séjourné depuis leur naissance uniquement dans des cheptels indemnes de toute maladie réputée contagieuse bovine, et officiellement indemnes de tuberculose, de leucose et de brucellose. De même, les mères appartenaient à des cheptels officiellement indemnes de tuberculose, brucellose et leucose.

Vis-à-vis de l'IBR, la mère et le veau étaient séronégatifs (méthode immuno-enzymatique).

Au cours des 56 jours de quarantaine, les examens suivants ont été réalisés :

- sur les 28 premiers jours de quarantaine : intradermotuberculation, sérologies individuelles vis-à-vis de la brucellose, de la leucose, de l'IBR et du BVD, recherche de virémie pour le BVD.
- sur les 28 derniers jours de quarantaine : sérologies individuelles vis-à-vis de la brucellose, de l'IBR et du BVD, recherche de virémie pour le BVD, recherche de *Campylobacter* et de *Trichomonas* sur le liquide préputial par isolement et culture, examen clinique des organes génitaux externes et internes, examen sanitaire du sperme.

Après ces 56 jours de quarantaine, si tous les contrôles étaient satisfaisants, les taureaux étaient acheminés soit vers l'abattoir soit vers les centres de production de semence.

Simultanément à ce suivi sanitaire réglementaire, une prévention médicale classique (vaccinations, vermifuges...) a été mise en place sous contrôle vétérinaire.

4.3. Contrôle de la fonction sexuelle

La période de quarantaine correspond aux premières collectes de semence des taurillons. Des bœufs sont utilisés comme boute-en-train, et la récolte de la semence est réalisée au vagin artificiel.

Le but n'est pas de récupérer un sperme utilisable, mais d'habituer les jeunes taureaux à la monte. Cependant, la semence a été analysée afin d'évaluer l'évolution de la qualité spermatique des taurillons. Au cours des 56 jours, entre 5 et 9 collectes ont été réalisées par taurillon.

Le spermogramme comprend un ensemble d'examens macroscopiques et microscopiques : volume, concentration en spermatozoïdes, qualité du mouvement (motilité massale) et pourcentage de spermatozoïdes vivants en sperme frais. Le nombre total de spermatozoïdes a été calculé à partir de la concentration et du volume. Les éjaculats des taureaux de notre étude ont tous été analysés par le même opérateur (Stéphane Basquin).

Pour mettre en relation les données échographiques et spermatiques, la fonction sexuelle d'un taurillon a été évaluée à partir des examens de semences prélevées sur une durée de 15 jours autour de l'examen échographique testiculaire.

Par ailleurs, une échographie et une mesure de la circonférence scrotale ont été réalisées en début et en fin de quarantaine, le plus souvent une semaine après l'arrivée et avant le départ du taureau (*figure 15*).

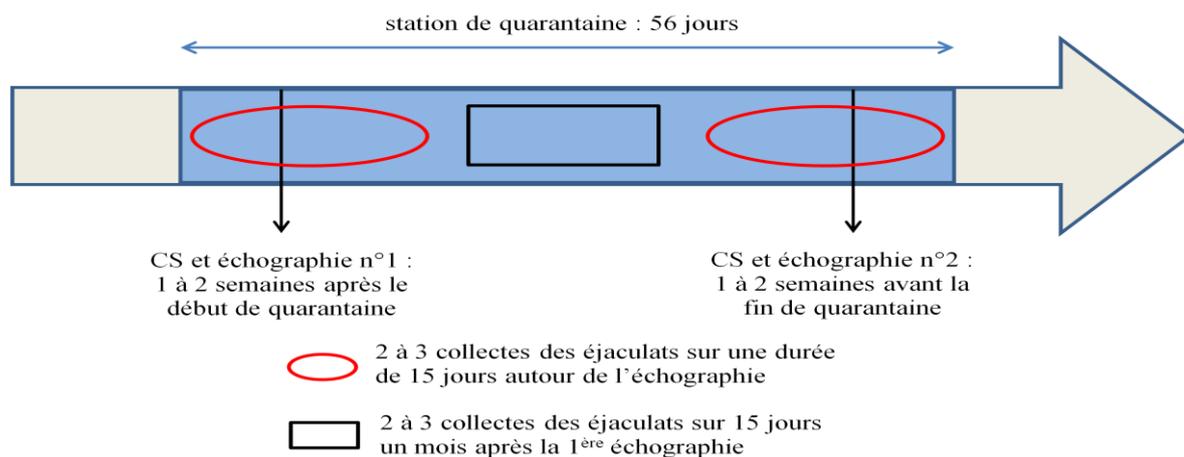


Fig. 15 : Frise chronologique des interventions rentrant dans le cadre de l'étude sur un lot de taurillon

4.4. Mesures échographiques

4.4.1. Technique d'échographie

Les opérateurs de l'examen échographique des testicules étaient Stéphane Basquin et moi-même. Les taurillons étaient bloqués au cornadis et maintenus par un licol passant par l'anneau nasal. L'opérateur était situé à l'arrière de l'animal. Si les testicules étaient remontés vers l'anneau inguinal, notamment lors de températures extérieures froides, la première étape était de les descendre ventralement pour faciliter l'examen échographique. L'un des deux opérateurs tenait la sonde d'une main et maintenait de l'autre les testicules au fond du scrotum. Un appareil photographique était connecté à l'échographe pour enregistrer les images qui étaient numérotées et classées.

Les 2 appareils échographiques utilisés étaient des AgroScan AL équipés de sonde linéaire ALR 575 bifréquence (5, 7,5 MHz). L'écran mesure 5,5 pouces. Les pixels de l'image sont colorés selon 256 niveaux de gris. Le réglage des appareils était le même pour pouvoir

comparer les clichés obtenus. Ainsi, la focalisation était située au milieu de l'image. La profondeur était de 8 cm pour les mesures de niveau de gris, et de 13 cm pour la mesure de la circonférence scrotale afin de visualiser les deux testicules sur la même image échographique.

Seuls les testicules étaient échographiés, d'abord le gauche puis le droit. Pour chacun d'entre eux, les images échographiques étaient réalisées de façon standard, en abord latéral, sur le plus grand axe du testicule (coupe longitudinale), puis en coupe transversale. La coupe enregistrée comprenait systématiquement le *rete testis*.

L'ensemble du parenchyme testiculaire était attentivement examiné afin de détecter une éventuelle anomalie. Si une anomalie était identifiée, celle-ci était enregistrée.

4.4.2. Choix des régions à analyser sur chaque image échographique

Sur chaque image échographique (coupe longitudinale et transversale), le logiciel MaZda (version 2.21 par Piotr Szczypinski de l'Instytut Elektroniki (Lodzka) – 1999/2000) mesurait le niveau de gris des pixels de l'image ou d'une zone particulière de l'image (appelée ROI ou *region of interest*). 3 zones du testicule ont ainsi été sélectionnées (*figures 16 et 17*) :

- Le *rete testis* (en bleu)
- Le parenchyme testiculaire : le parenchyme latéral (en rouge) et médial (en vert)

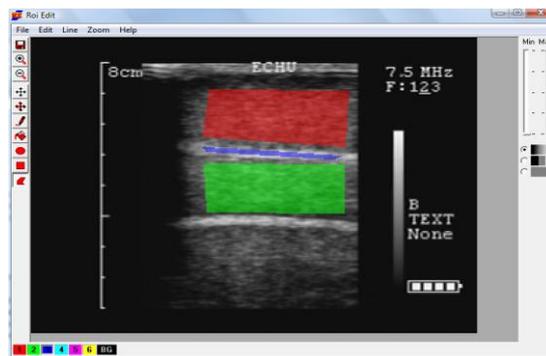


Fig. 16 : Choix des ROI avec MaZda sur une image échographique d'un testicule en coupe longitudinale

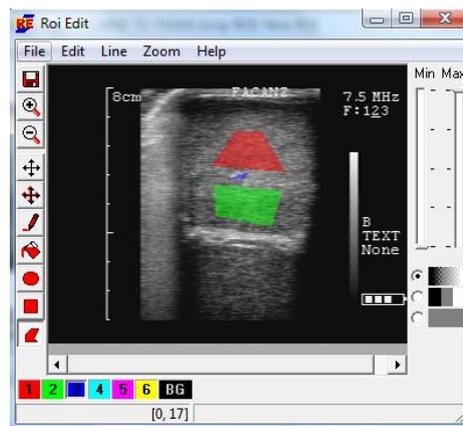


Fig. 17 : Choix des ROI avec MaZda sur une image échographique d'un testicule en coupe transversale

Les taureaux présentant une anomalie testiculaire étaient exclus de l'étude. La majorité de ces anomalies correspondait à des calcifications testiculaires. Ces points hyperéchogènes atténuent fortement le passage de l'onde ultrasonore. Une étude (21) chez le jeune bouc indique que ces lésions testiculaires focalisées sont relativement fréquentes et n'ont pas de répercussion sur la production de la semence.

Sur les taureaux sains, les ROI étaient choisies en prenant la plus grande surface de parenchyme testiculaire possible, et en excluant les artefacts échographiques.

Les artefacts les plus souvent rencontrés étaient des cônes d'ombre, dus à des poches d'air entre la sonde échographique et la peau scrotale. Ces poches d'air étaient favorisées par le défaut de contact entre la sonde linéaire et le scrotum en raison de la forme ovoïde du testicule. Les ombres artéfactuelles étaient aussi retrouvées sur la face latérale du testicule, probablement à cause du liquide séparant les fascias spermatiques.

Enfin, le défaut de contact entre la sonde et le scrotum pouvait également entraîner la coupure de l'image en deux zones d'intensité lumineuses distinctes ; la plus sombre des deux zones était alors éliminée de la ROI.

4.4.3. Analyse des images échographiques

Les images étaient analysées par le logiciel MaZda, après une conversion de l'image sous format jpeg au format bitmap par le logiciel XnView. Pour chaque ROI, quatre données ont été étudiées :

- Le niveau de gris moyen correspond à l'intensité moyenne de luminosité de la région sélectionnée.
- La variance (« variance des pixels ») rend compte de l'hétérogénéité du tissu testiculaire sélectionné.
- Le kurtosis (« kurtosis des pixels ») rend aussi compte de l'hétérogénéité du tissu testiculaire sélectionné. En effet, le kurtosis, ou coefficient d'aplatissement, est une mesure de l'aplatissement de la courbe de répartition du niveau de gris des pixels. Plus le coefficient est fort, plus la courbe est aplatie, et plus le coefficient est faible, plus la courbe est haute et resserrée (*figure 18*).

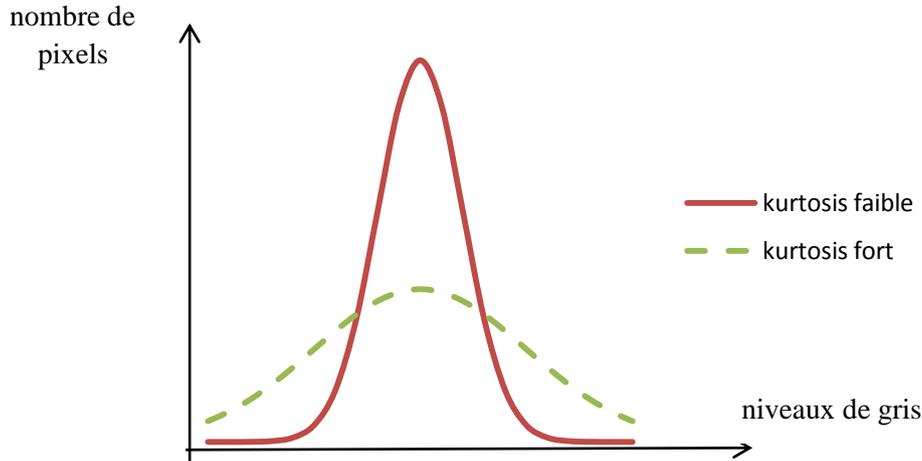


Fig. 18 : Courbe de distribution de variable possédant des kurtosis différents

La courbe pleine (kurtosis faible) montre une répartition homogène des pixels dans la zone de parenchyme testiculaire analysée alors que la courbe en pointillés (kurtosis fort) montre une hétérogénéité des niveaux de gris dans le parenchyme testiculaire.

Etant donné la variable X (niveaux de gris des n pixels), d'espérance μ , d'écart-type σ , son kurtosis β peut être calculé par la relation :

$$\beta = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{X_i - \mu}{\sigma} \right)^4 \right)$$

Le kurtosis de la loi normale $\mathcal{N}(0 ; 1)$ vaut 3.

Le logiciel MaZda donne une valeur corrigée, l'excès d'aplatissement. Cela revient à calculer $\beta - 3$, c'est-à-dire à comparer l'aplatissement de la courbe de répartition du niveau de gris des pixels obtenus pour la région sélectionnée par rapport à la courbe d'une loi normale. Une valeur positive signifie que la variable a une répartition hétérogène, une valeur négative signifie que la répartition est homogène.

- Le skewness, (« skewness des pixels ») ou coefficient d'asymétrie de la courbe, décrit la répartition des pixels par rapport au niveau de gris moyen. Si le coefficient est positif, plus de pixels ont un niveau de gris inférieur à la moyenne. S'il est négatif, plus de pixels ont un niveau de gris supérieur à la moyenne (**figure 19**).

C'est un paramètre complémentaire de description des niveaux de gris des pixels de la zone sélectionnée, même si sa signification biologique est difficile à interpréter.

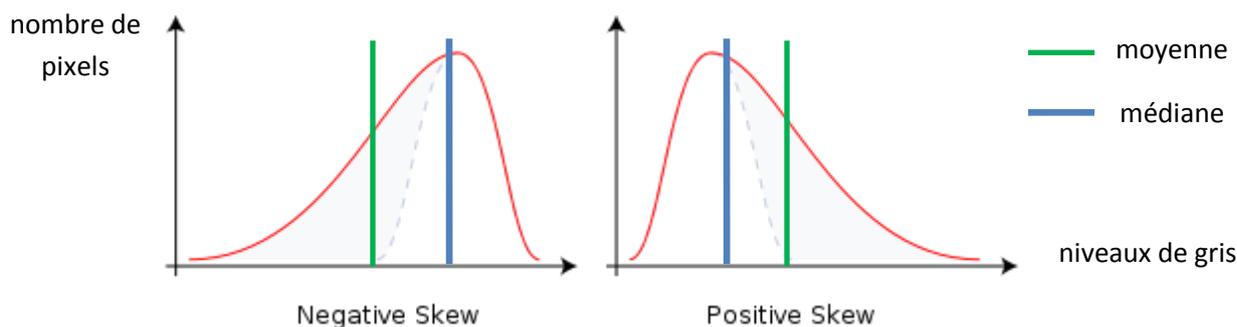


Fig. 19 : Courbe de distribution de variables à skewness négatif (gauche) ou positif (droite)

L'ensemble des données a été transféré depuis MaZda vers un fichier Excel. L'analyse de ces différents paramètres échographiques et de la qualité de la semence a été réalisée avec le logiciel R.

4.4.4. Standardisation de la méthode d'échographie testiculaire

4.4.4.1. Répétabilité des paramètres échographiques

Mesurer la répétabilité consiste à vérifier que les mesures d'une variable soient sensiblement les mêmes après plusieurs répétitions de l'examen, dans les mêmes conditions expérimentales, dans un laps de temps assez court, et sur un même échantillon.

Pour mesurer la répétabilité de l'examen échographique, 21 taureaux d'un même lot ont été échographiés deux fois avec le même matériel (échographe UNCEIA) et le même opérateur (Stéphane Coursin), en coupe longitudinale et transversale, en début puis en fin de journée. La durée entre les 2 examens échographiques d'un même testicule variait de 1 à 7 heures.

Les moyennes de pixels du parenchyme testiculaire ont été comparées pour les deux sessions d'échographie par un test de Student. L'unité de comparaison n'était pas un taurillon mais un testicule.

Dans un second temps, un taureau a été échographié à 12 reprises sur deux jours par Stéphane Basquin avec l'échographe d'Amélis. 2 à 3 examens échographiques ont été réalisés en début de chaque demi-journée. Le coefficient de variation des paramètres échographiques pour chaque coupe et chaque testicule a été déterminé.

4.4.4.2. Reproductibilité des paramètres échographiques

Mesurer la reproductibilité consiste à vérifier que les mesures d'une variable soient sensiblement les mêmes après plusieurs répétitions de l'examen, quelles que soient les conditions expérimentales, sur un même échantillon.

Les images échographiques ont été réalisées par les deux opérateurs, avec 2 échographes de même modèle, sur 50 taureaux.

La reproductibilité a été étudiée par une analyse de variance selon les deux modèles suivants :

- En considérant les testicules individuellement, en tenant compte du taurillon d'origine :

$$Y = \mu + \text{individu}_i + \text{appareil}_j + \text{opérateur}_k + (\text{appareil} * \text{opérateur})_{jk} + (\text{individu/testicule})_{il} + \varepsilon_{ijkl}$$

Avec

- Y la variable analysée
- μ la moyenne des données de la variable échographique
- individu_i le taureau utilisé avec i variant de 1 à 50
- appareil_j l'appareil échographique utilisé avec $j=1$ pour Amélis et $j=2$ pour UNCEIA
- opérateur_k la personne réalisant l'échographie avec $k=1$ pour S. Basquin et $k=2$ pour S. Coursin
- testicule_l le testicule étudié avec $l=1$ pour le droit et $l=2$ pour le gauche
- ε_{ijkl} la valeur résiduelle

- La production de semence dépend du développement du parenchyme testiculaire des deux testicules. La reproductibilité a donc aussi été évaluée sur la moyenne des mesures d'échogénicité des deux testicules :

$$Y = \mu + \text{individu}_i + \text{appareil}_j + \text{opérateur}_k + (\text{appareil} * \text{opérateur})_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

Avec

- Y la variable analysée
- μ la moyenne des données de la variable échographique
- individu_i le taureau utilisé avec i variant de 1 à 50
- appareil_j l'appareil échographique utilisé avec $j=1$ pour Amélis et $j=2$ pour UNCEIA
- opérateur_k la personne réalisant l'échographie avec $k=1$ pour S. Basquin et $k=2$ pour S. Coursin
- ε_{ijk} la valeur résiduelle

4.5. Mesure de la circonférence scrotale

La circonférence scrotale a été mesurée au mètre ruban, pour chaque taurillon avant chaque échographie, ainsi qu'en entrée et en sortie de station de quarantaine. Les mesures obtenues par chaque opérateur ont été comparées par un test de Student afin de vérifier leur reproductibilité.

La circonférence scrotale a également été évaluée par échographie. 2 formules de calcul de la circonférence (c) d'une ellipse ont été utilisées, elles nécessitaient la mesure échographique de la largeur (a) et de la profondeur (b) des testicules (**figure 20**). Selon les recommandations du laboratoire d'ATS (données non publiées), les longueurs (a) et (b) ont

été majorées de 0,5 cm pour prendre en compte l'épaisseur du scrotum. Cette majoration a été directement intégrée dans les formules :

- formule simple : $c = \pi (a + b + 1)$
- formule de Ramanujan :

$$c = \pi [3(a+b+1) - \sqrt{(3(a + 0.5) + (b + 0.5))((a + 0.5) + 3(b + 0.5))}]$$



Fig. 20 : mesure de la largeur a (à droite) et de la profondeur b (à gauche) des testicules à l'échographie.

Dans une étude préliminaire réalisée sur 15 animaux, le laboratoire d'ATS avait montré que ces formules permettaient d'estimer correctement la CS. Pour vérifier cette hypothèse, les mesures de CS estimées à l'examen échographique ont été comparées aux mesures au mètre-ruban par un test de Student.

Ensuite, des régressions linéaires ont été réalisées pour évaluer la relation entre les différentes méthodes de mesure de CS et les paramètres séminologiques.

4.6. Analyse du caractère prédictif de la fonction sexuelle par les paramètres échographiques

Le but de cette partie était d'évaluer la relation entre les paramètres échographiques et la production de semence. Ces paramètres ont été calculés sur la moyenne des deux testicules d'un taurillon. Seules les images échographiques des coupes longitudinales du parenchyme testiculaire ont été utilisées.

- **Evolution de la qualité de la semence, de la CS et des paramètres échographiques en fonction de l'âge**

L'effet de l'âge a été analysé sur 219 individus des lots 1 à 5 selon le modèle de régression linéaire suivant :

$$Y_i = \mu + (\hat{age})_i + \varepsilon_i$$

où Y_i représente la variable de qualité de semence mesurée, μ la moyenne des données de la variable, $(\hat{age})_i$ l'âge du taurillon, et ε_i la valeur résiduelle, avec $i = [1 ; 219]$.

- **Relation entre les paramètres échographiques, la CS, l'âge et la qualité de la semence produite au moment de l'échographie**

L'ensemble des 219 taurillons a été divisé aléatoirement en deux groupes répartis pour les 2/3 dans le groupe 1 et 1/3 dans le groupe 2. Le modèle de description a été déterminé sur le groupe 1, selon une équation de régression linéaire.

Chacun des paramètres de qualité de semence (concentration, volume, nombre de spermatozoïde) a été évalué comme étant la moyenne de ce paramètre sur l'échantillon des 219 taureaux, plus la somme des variables individuelles pondérées : paramètres échographiques (niveau de gris moyen, variance/kurtosis/skewness des pixels) sur les différentes ROI de l'image échographique (parenchyme latéral, médial ou *rete testis*), circonférence scrotale, âge et valeur résiduelle.

Le groupe 2 a ensuite été utilisé pour vérifier le modèle déterminé pour le groupe 1.

- **Relation entre les paramètres échographiques, la CS, l'âge et la qualité de la semence produite 30 jours après l'échographie**

La spermatogenèse dure 54 jours. Le trajet des spermatozoïdes dans l'épididyme est de 8 jours. Le parenchyme testiculaire échographié le jour J serait donc à l'origine des éjaculats collectés entre J+8 et J+62 jours. Il a été décidé de comparer l'échographie avec les éjaculats prélevés en moyenne 30 jours plus tard (soit entre 3 et 5 semaines après échographie), selon le modèle de régression linéaire précédant.

147 taurillons ont été intégrés dans ce modèle.

- **Etude des animaux par classe d'âge**

La qualité spermatique augmente rapidement pour les plus jeunes animaux. Elle continue à s'améliorer jusqu'à l'âge de 3 ans, mais plus lentement. Le modèle de prédiction peut ainsi différer en fonction de la classe d'âge des taurillons.

Des régressions linéaires ont donc été réalisées selon le modèle précédant, sur les taureaux de moins de 1 an d'une part, et sur les taureaux plus âgés.

- **Sélection des animaux selon les modèles de prédiction**

Prédire la production spermatique n'était pas une fin en soit, puisque la volonté d'un centre d'insémination est de trouver des critères pour sélectionner ou éliminer les taurillons du programme d'insémination artificielle.

Le centre d'Amélis a ainsi déterminé un seuil de concentration spermatique équivalent à $0,3 \cdot 10^9$ spermatozoïdes/ml. Un taurillon possédant en fin de quarantaine une concentration supérieure était conservé, mais si sa concentration était inférieure, il était éliminé.

Les tests de sélection fondés sur les modèles prédictifs ont ainsi été comparés au test de sélection basé sur la production spermatique.

- **Seuil de signification**

Pour l'ensemble des tests statistiques utilisés, le seuil de signification a été fixé à 5 %.

Le tableau 2 présente un récapitulatif des conditions expérimentales des différentes études, avec le nombre de taurillons, le numéro des lots, l'opérateur, l'appareil et la nature des images échographiques utilisées (coupes, nombre de testicules). Les paramètres échographiques d'un taurillon échographié en entrée et en sortie de lot ont été considérées comme indépendants, correspondant ainsi à 2 équivalent-taurillons.

Tabl. 2 : Nombre d'équivalent-taurillons, numéros de lots et natures des images échographiques utilisées pour chacune des expériences menées dans l'étude

expérience	nombre d'équivalent-taurillon	numéro de lot	conditions expérimentales
répétabilité des paramètres échographiques sur plusieurs taureaux testés 2 fois	21	5	coupes longitudinales, Stéphane Coursin, appareil UNCEIA, testicules pris individuellement
répétabilité des paramètres échographiques sur un taureau	1	7	CL et CT, S. Basquin, appareil Amélis, testicules pris individuellement
reproductibilité des paramètres testiculaires échographiques	50	5 et 6	CL et CT, S. Basquin et S. Coursin, appareils UNCEIA et Amélis, testicules pris séparément puis moyenne des 2 testicules
mesure de la CS au mètre ruban	27	5	S. Basquin et S. Coursin
estimation de la CS par échographie	23	5	S. Basquin et S. Coursin
évolution des paramètres séminologiques en fonction de l'âge	219	1 à 6	CL, S. Basquin, appareil Amélis, moyenne des 2 testicules
prédiction de la fonction sexuelle du taureau au moment de l'échographie	219	1 à 6	CL, S. Basquin, appareil Amélis, moyenne des 2 testicules
prédiction de la fonction sexuelle du taureau 30 jours après l'échographie	147	1 à 6	CL, S. Basquin, appareil Amélis, moyenne des 2 testicules

5. Résultats et discussion

5.1. Evaluation de la répétabilité des paramètres échographiques du parenchyme testiculaire

5.1.1. Evaluation de la répétabilité des paramètres échographiques sur plusieurs taureaux testés deux fois

Les tableaux 3, 4, 5 et 6 présentent les moyennes (\pm écart-type) du niveau de gris moyen, de la variance des pixels, du kurtosis et du skewness des pixels pour les images échographiques des coupes longitudinales de testicules.

Tabl. 3 : moyenne, écart-type et coefficient de variation (CV en %) moyen pour le niveau de gris moyen des pixels par zone sur les coupes longitudinales d'images échographiques testiculaires d'un lot de 21 taurillons examinés deux fois, matin et soir

	niveau de gris moyen					
	parenchyme latéral		parenchyme médial		rete testis	
mesure	matin	après-midi	matin	après-midi	matin	après-midi
moyenne	163,3	138,1	139,3	119,9	214,5	207,1
écart-type	16,66	17,72	19,44	23,06	16,77	12,01
CV moyen	11,99		12,90		4,086	

Tabl. 4 : moyenne, écart-type et coefficient de variation (CV en %) moyen pour la variance du niveau de gris des pixels par zone sur les coupes longitudinales d'images échographiques testiculaires d'un lot de 21 taurillons examinés deux fois, matin et soir

	variance des pixels					
	parenchyme latéral		parenchyme médial		rete testis	
mesure	matin	après-midi	matin	après-midi	matin	après-midi
moyenne	274,3	446,8	311,8	535,1	103,6	217,6
écart-type	69,05	118,5	102	199,3	51,05	103,8
CV moyen	35,08		36,16		47,97	

Tabl. 5 : moyenne, écart-type et coefficient de variation (CV en %) moyen pour le skewness du niveau de gris des pixels par zone sur les coupes longitudinales d'images échographiques testiculaires d'un lot de 21 taurillons examinés deux fois, matin et soir

	skewness des pixels					
	parenchyme latéral		parenchyme médial		rete testis	
mesure	matin	après-midi	matin	après-midi	matin	après-midi
moyenne	- 0,1735	- 0,09137	0,09002	0,09915	- 1,059	- 0,4989
écart-type	0,1452	0,14	0,226	0,1546	0,6331	0,3326
CV moyen	31,55		- 434,7		- 64,64	

Tabl. 6 : moyenne, écart-type et coefficient de variation (CV en %) moyen pour le kurtosis du niveau de gris des pixels par zone sur les coupes longitudinales d'images échographiques testiculaires d'un lot de 21 taurillons examinés deux fois, matin et soir

kurtosis des pixels						
	parenchyme latéral		parenchyme médial		rete testis	
mesure	matin	après-midi	matin	après-midi	matin	après-midi
moyenne	- 0,2022	- 0,1971	- 0,2336	- 0,3488	2,002	0,009589
écart-type	0,2077	0,2067	0,2688	0,1781	4,821	0,6402
CV moyen	171,6		112,1		5,865	

Les tests de Student indiquent que le moment de la journée influence chacun des paramètres échographiques testés sur toutes les zones d'intérêt de nos clichés. Les mesures du paramètre échographique évaluées le matin étaient inférieures à celles évaluées le soir. Cette différence pourrait être liée à un facteur environnemental, tel que la température, qui pourrait faire varier la position des testicules ou la souplesse du scrotum, et ainsi le contact avec la sonde et l'échogénicité testiculaire.

Cependant, le niveau de gris moyen présente un coefficient de variation moyen inférieur à 15%. De plus, l'inspection visuelle de la figure 21 montre une corrélation ($R^2 = 0,6318$) entre les niveaux de gris moyens du parenchyme testiculaire latéral du matin et du soir.

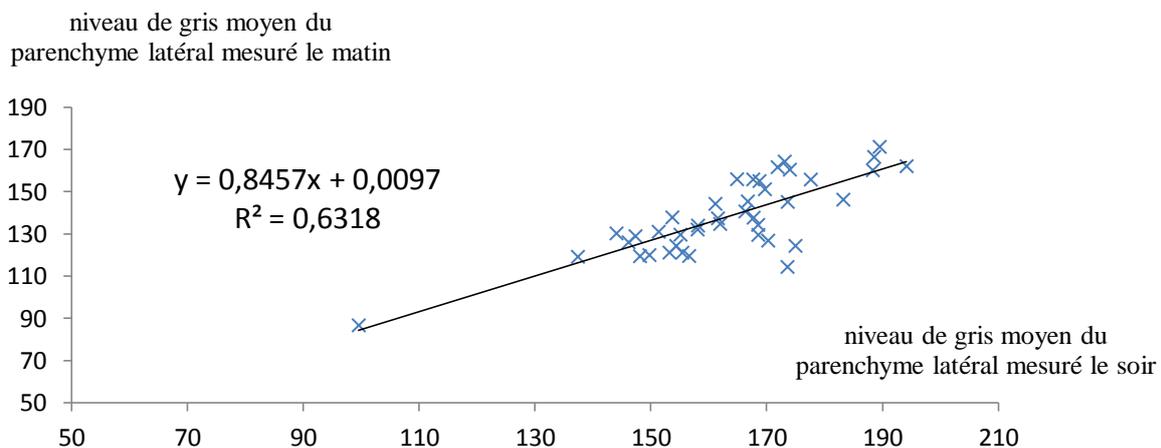


Fig. 21 : Niveau de gris moyen de l'image échographique du parenchyme testiculaire latéral des 41 testicules mesurés le matin en fonction de celui des testicules mesurés le soir.

Dans un second temps, la répétabilité a été évaluée sur un taureau dans les mêmes conditions environnementales.

5.1.2. Evaluation de la répétabilité des paramètres échographiques sur un seul taurillon

Un seul taurillon a été inclus dans cette étude (le n°9696). Des échographies testiculaires ont été réalisées de manière répétée, à raison de 3 par demi-journée pendant 2

jours. Les heures d'examen étaient approximativement les mêmes entre les deux jours, entre 8h00 et 9h09 pour le matin, et entre 14h00 et 15h17 l'après-midi.

Pour s'affranchir des biais liés aux variations des conditions expérimentales entre les différentes sessions échographiques, c'est-à-dire entre chaque demi-journée, le coefficient de variation a été calculé sur la moyenne des variances de chaque demi-journée.

Le tableau 7 présente les coefficients de variation obtenus pour chaque paramètre échographique sur les différentes ROI des images échographiques des coupes longitudinales des deux testicules. Le tableau 8 présente les résultats obtenus sur les coupes transversales.

Tabl. 7 : Moyenne des coefficients de variation (CV en %) des 4 paramètres échographiques sur les 3 ROI de coupe longitudinale (CL) de chacun des deux testicules examinés 10 fois sur un taureau

	CL droite			CL gauche		
	parenchyme latéral	parenchyme médial	<i>rete testis</i>	parenchyme latéral	parenchyme médial	<i>rete testis</i>
niveau de gris moyen	8,228	11,63	6,094	10,86	3,662	1,009
variance des pixels	18,34	18,02	30,07	8,601	11,88	24,79
skewness des pixels	-116,7	455,7	- 46,47	- 141,6	- 232,6	- 56,33
kurtosis des pixels	- 24,19	- 111,8	- 417,2	- 32,41	- 193,4	- 424,3

Tabl. 8 : Moyenne des coefficients de variation (CV en %) des 4 paramètres échographiques sur les 3 ROI de coupe transversale (CT) de chacun des deux testicules examinés 10 fois sur un taureau

	CT droite			CT gauche		
	parenchyme latéral	parenchyme médial	<i>rete testis</i>	parenchyme latéral	parenchyme médial	<i>rete testis</i>
niveau de gris moyen	11,54	7,854	11,84	7,318	6,527	6,666
variance des pixels	18,92	14,84	41,35	14,70	21,95	50,92
skewness des pixels	- 223,9	374	- 246,3	- 216,4	- 374,1	- 125,6
kurtosis des pixels	- 94,10	- 109,3	2261	- 77,81	- 62,77	- 156

Seul le niveau de gris moyen possédait pour l'ensemble des ROI et pour les coupes longitudinales et transversales des coefficients de variation inférieurs au seuil de 15 %. Seul le niveau de gris moyen pouvait donc être considéré comme répétable, dans nos conditions expérimentales.

Les mesures de variance des pixels, de skewness des pixels et de kurtosis des pixels n'étant pas répétables, elles n'ont pas été retenues comme outil de description des testicules pour la suite de l'étude.

5.2. Evaluation de la reproductibilité des paramètres testiculaires échographiques

L'objectif de cette étude a été de vérifier l'effet de l'opérateur, en l'occurrence Stéphane Basquin ou Stéphane Coursin, ou l'effet de l'appareil, en l'occurrence celui appartenant à l'UNCEIA ou à Amélis, sur les paramètres échographiques.

5.2.1. Analyse par testicule

L'analyse du niveau de gris moyen des coupes testiculaires longitudinales et transversales a mis en évidence un effet significatif des facteurs individu, appareil et opérateur.

Les analyses de la variance et du skewness des pixels ont mis en évidence un effet significatif des facteurs individu, appareil, opérateur, ainsi que des interactions d'ordre supérieur.

L'analyse du kurtosis des pixels n'a permis d'identifier aucun effet significatif des différents facteurs.

5.2.2. Analyse sur la moyenne des testicules droits et gauches

De même, l'analyse de variance du niveau de gris moyen pour les deux testicules des coupes échographiques longitudinales et transversales a révélé un effet significatif des facteurs individu, appareil et opérateur.

L'ensemble des facteurs ont un effet significatif sur la variance et le skewness des pixels, tandis que l'analyse du kurtosis des pixels n'a permis d'identifier aucun effet significatif des différents facteurs.

Les effets de l'appareil et de l'opérateur sur le niveau de gris moyen ont été quantifiés, pour évaluer leur impact sur la précision des mesures.

5.2.2.1. Effet de l'appareil

Le tableau 9 présente les moyennes des niveaux de gris obtenues avec l'appareil d'Amélis et celles obtenues avec l'appareil de l'UNCEIA, ainsi que les moyennes des coefficients de variation de ces deux mesures. Le niveau de gris est mesuré sur la moyenne des testicules droit et gauche de 50 taureaux.

Tabl. 9 : Niveau de gris moyen et coefficient de variation moyen entre les 2 appareils pour chaque ROI des images échographiques de chaque coupe, sur la moyenne des testicules droit et gauche

	coupe longitudinale			coupe transversale		
	appareil 1	appareil 2	CV moyen	appareil 1	appareil 2	CV moyen
parenchyme latéral	123,6	143,2	12,69	134,5	152,8	10,46
parenchyme médial	101,8	120	17,05	114,1	134,1	13,70
<i>rete testis</i>	197,9	209,1	5,943	202	212,6	4,866

Les coefficients de variation moyens de reproductibilité sont légèrement supérieurs au coefficient de répétabilité.

La figure 22 présente les mesures de niveau de gris moyen du parenchyme testiculaire latéral obtenues avec les appareils d'Amélis et de l'UNCEIA.

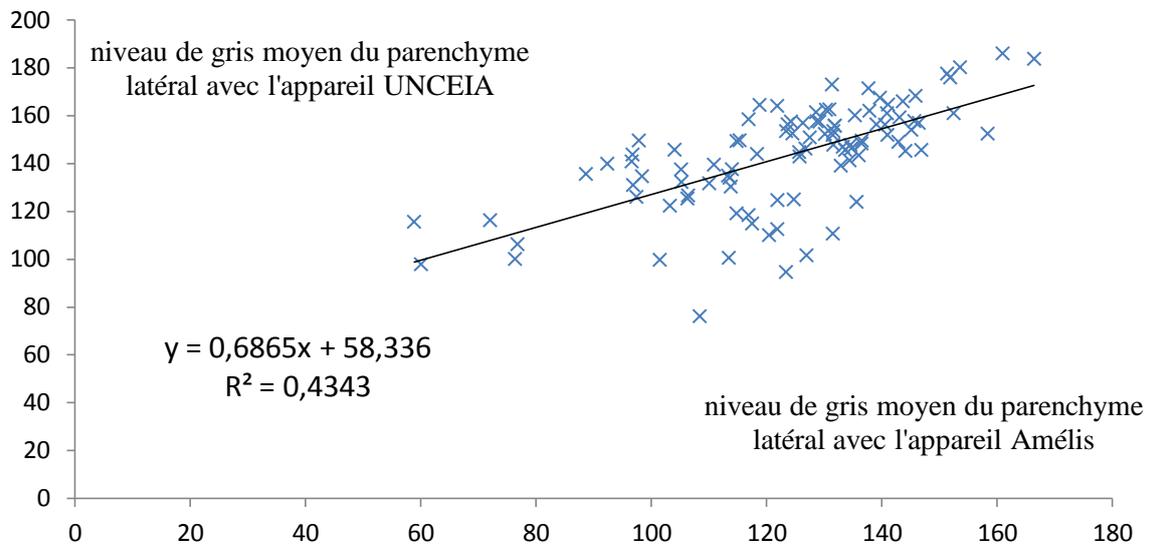


Fig. 22 : Niveau de gris moyen du parenchyme testiculaire latéral de 50 taureaux obtenu avec l'appareil de l'UNCEIA en fonction de celui obtenu sur le même échantillon avec l'appareil d'Amélis

5.2.2.2. Effet de l'opérateur

Le tableau 10 présente les moyennes des niveaux de gris obtenues par S. Basquin et celles obtenues par S. Coursin, ainsi que les moyennes des coefficients de variation de ces deux mesures. Le niveau de gris est mesuré sur la moyenne des testicules droit et gauche de 50 taureaux.

Tabl. 10 : Niveau de gris moyen et coefficient de variation moyen entre les 2 opérateurs pour chaque ROI du parenchyme testiculaire déterminé sur les images échographiques de chaque coupe, sur la moyenne des testicules droits et gauches

	coupe longitudinale			coupe transversale		
	opérateur 1	opérateur 2	CV moyen	opérateur 1	opérateur 2	CV moyen
parenchyme latéral	123,5	143,3	11,86	138,1	149	7,007
parenchyme médial	100,2	121,7	17,43	120	128,4	9,285
rete testis	195,9	211	6,383	204,4	210,2	3,652

Les coefficients de variation moyens de reproductibilité sont légèrement supérieurs au coefficient de variation de répétabilité. Cela signifie que l'effet appareil et l'effet opérateur sont négligeables devant l'incertitude des mesures de niveau de gris moyen des images testiculaires échographiques.

La figure 23 présente la comparaison des mesures de niveau de gris moyen sur les images échographiques du parenchyme testiculaire latéral réalisées par S. Basquin et S. Coursin.

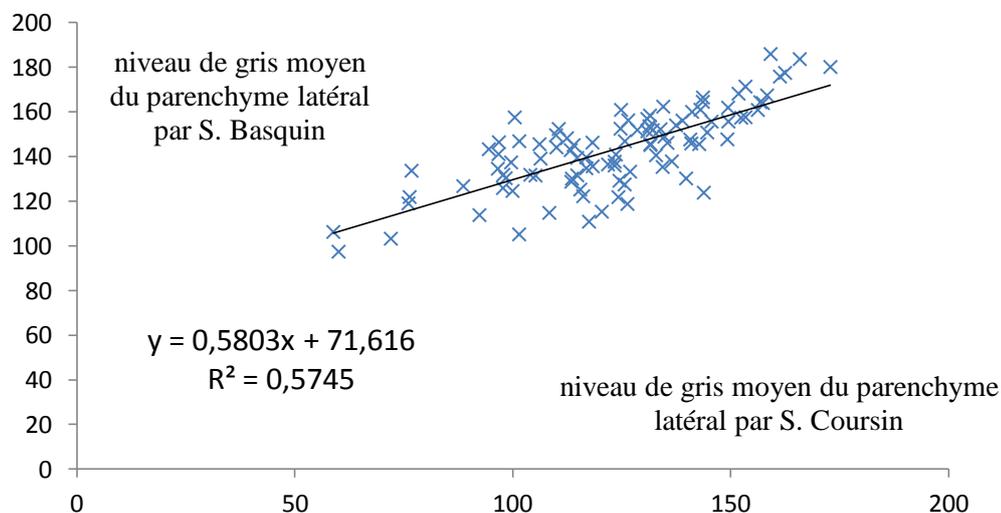


Fig. 23 : Niveau de gris moyen du parenchyme testiculaire latéral de 50 taureaux échographiés par S. Basquin en fonction des mesures réalisées sur les mêmes taureaux par S. Coursin

Les examens échographiques ont été réalisés par 2 opérateurs différents, mais cela n'a pas été le cas du traitement informatique des images. En effet, seul S. Coursin a déterminé les ROI sur les images échographiques testiculaires. Cela peut avoir lissé les différences entre les opérateurs.

5.2.3. Standardisation des paramètres échographiques

L'ensemble de ces résultats préliminaires nous a amené à standardiser les mesures d'échogénicité testiculaire pour évaluer leur valeur prédictive de la production de semence. Toutes les mesures de notre étude expérimentale ont donc été réalisées avec un seul appareil

(celui d'Amélis) et par le même opérateur (Stéphane Basquin). Seul le niveau de gris moyen a été étudié, les autres mesures échographiques n'étant pas assez répétables.

5.3. Mesures de la circonférence scrotale (CS)

Dans un premier temps, la CS a été mesurée au mètre ruban par Stéphane Basquin et Stéphane Coursin sur 27 taurillons du lot 5. Les moyennes étaient respectivement de $34,15 \pm 2,72$ cm et de $33,92 \pm 2,75$ cm. Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les deux opérateurs.

Dans un second temps, la CS a été calculée grâce aux mesures échographiques sur 23 des 27 taurillons. Ces valeurs ont été comparées à la moyenne des mesures au mètre ruban des 2 opérateurs. Les moyennes (\pm écart-type) des CS déterminées par la mesure au mètre ruban et par les formules de calcul d'une ellipse (simple et Ramanujan, en tenant compte de l'épaisseur du scrotum) sont respectivement $34,32 (\pm 2,62)$; $28,25 (\pm 2,28)$ et $28,49 (\pm 2,38)$ cm.

La figure 24 représente la circonférence scrotale calculée par les deux formules de l'ellipse à partir des mesures échographiques en fonction de la mesure de circonférence scrotale réalisée au mètre-ruban.

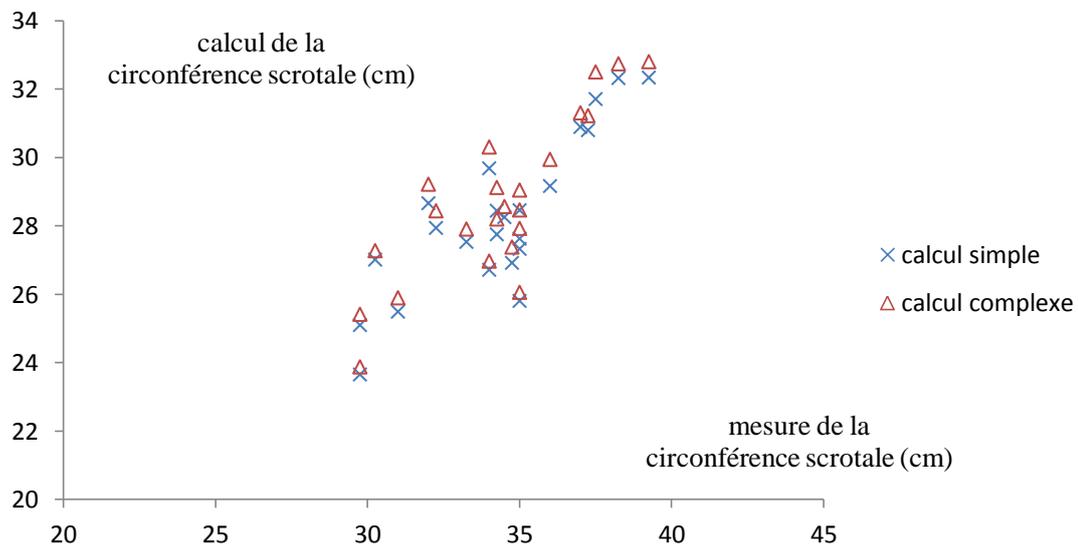


Fig. 24 : Circonférence scrotale calculée à partir des mesures échographiques par les formules de l'ellipse simple et de Ramanujan en fonction de la circonférence scrotale mesurée au mètre-ruban sur 23 taurillons

Les CS calculées à partir des mesures échographiques étaient significativement supérieures à celles mesurées au mètre ruban. En revanche, les CS calculées avec les formules simple et de Ramanujan ne sont pas différentes.

Contrairement aux résultats préliminaires obtenus par l'UNCEIA, ces formules n'ont pas permis d'estimer correctement la CS mesurée.

Toutefois, les calculs de CS étant basés sur les dimensions testiculaires et non sur celles du scrotum, ils pouvaient être plus adaptés pour décrire la production de semence. Des

régressions linéaires ont donc été réalisées pour évaluer la corrélation de la CS calculée ou mesurée avec la qualité spermatique. Le tableau 11 présente les coefficients de corrélation obtenus par ces régressions linéaires.

Tabl. 11 : Coefficient de corrélation entre les paramètres séminologiques et la CS mesurée au mètre ruban ou estimée avec une formule simple ou de Ramanujan à partir de la largeur testiculaire

R ² / méthode	Mètre ruban	Formule simple	Formule de Ramanujan
Concentration	0,2297	0,0932	0,0834
Volume	0,0890	0,0869	0,1019
Nombre de spermatozoïdes	0,4468	0,2845	0,2759

Les paramètres de fertilité étaient mieux corrélés à la CS mesurée au mètre ruban qu'à celle calculée à partir des mesures échographiques. Ainsi, pour la suite de l'étude, la CS a été évaluée classiquement avec le mètre ruban.

5.4. Evolution des paramètres séminologiques des taureaux en fonction de l'âge

La qualité spermatique évaluée sur 219 taureaux âgés de 300 à 516 jours a été corrélée à l'âge des taureaux (*figure 25*) :

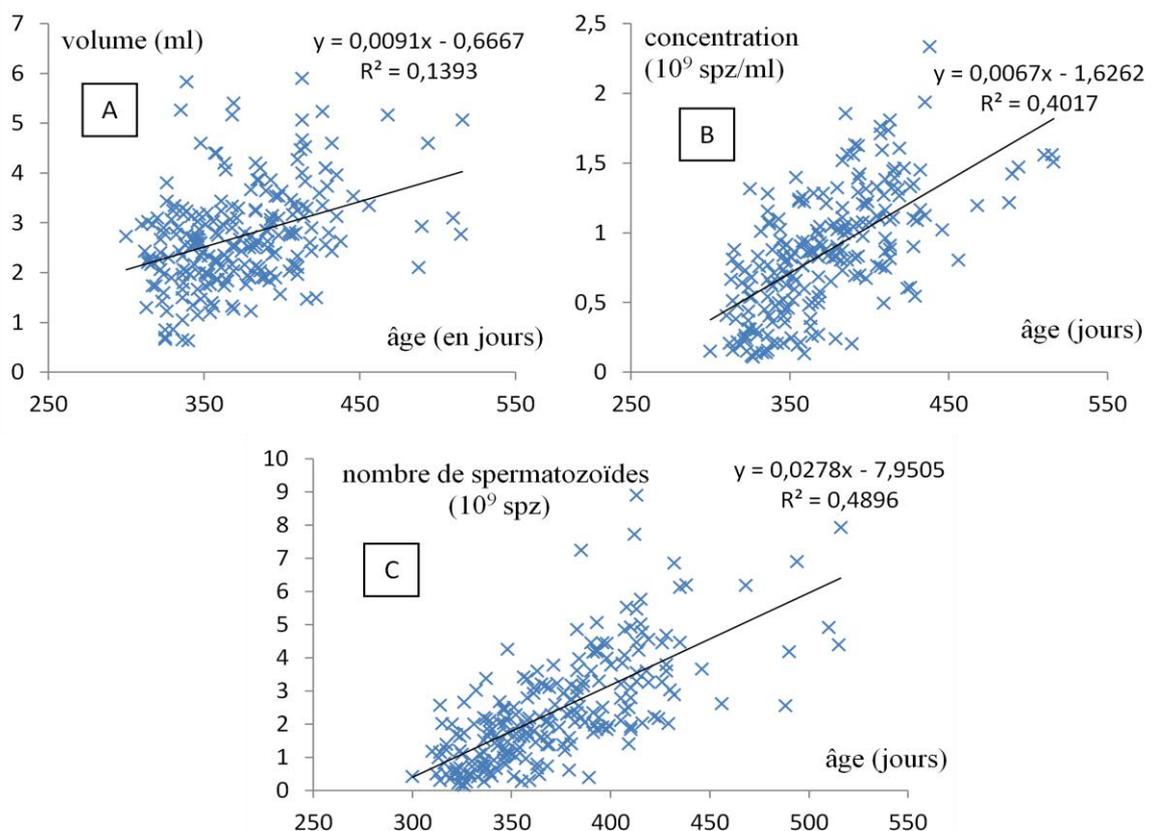


Fig. 25 : Volume (ml), concentration (10^9 spz/ml) et nombre de spermatozoïdes (10^9 spz/ml) de l'éjaculat de 219 taurillons en fonction de leur âge (jours)

La CS a été corrélée ($R^2 = 0,40$) à l'âge des taureaux (**figure 26**) :

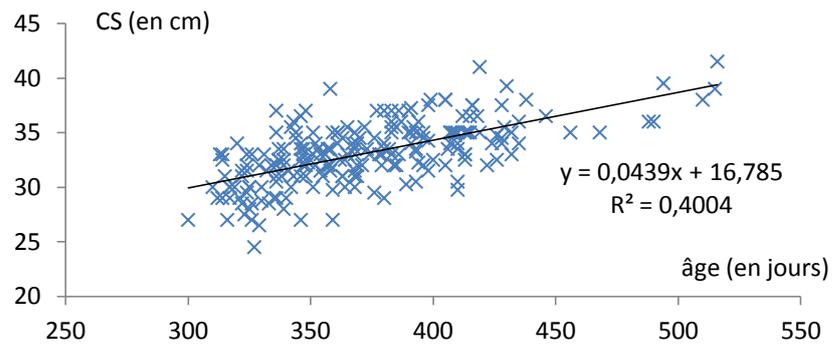


Fig. 26 : Circonférence scrotale (cm) de 219 taurillons en fonction de leur âge (jours)

La figure 27 représente le niveau de gris moyen du parenchyme testiculaire en fonction de l'âge des taureaux. L'échogénicité du parenchyme testiculaire varie peu en fonction de l'âge des taureaux.

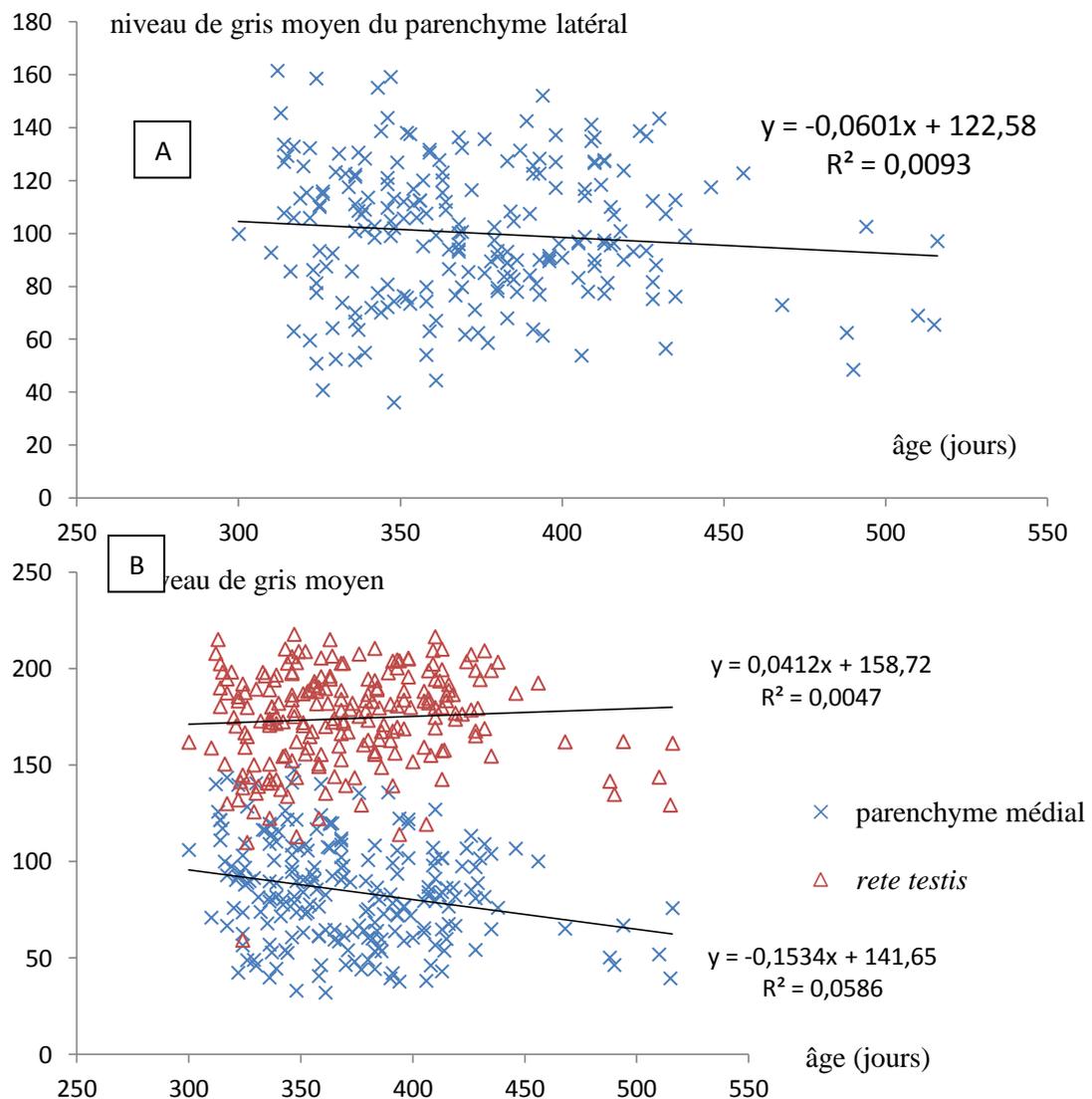


Fig. 27 : Niveau de gris moyen des pixels de l'image échographique des parenchymes testiculaires latéral et médial et du rete testis en fonction de l'âge (jours) de 219 taurillons

5.5. Evaluation de la fonction sexuelle par les paramètres échographiques, la CS et l'âge des taurillons

5.5.1. Niveau de gris moyen par ROI et fonction sexuelle

La relation entre le niveau de gris moyen de chaque ROI et les critères de fonction sexuelle des taurillons (concentration, volume et nombre de spermatozoïdes) a été étudiée par régression linéaire. Les paramètres échographiques testiculaires sont peu corrélés à la qualité de la semence.

La figure 28 représente le niveau de gris moyen des pixels de l'image échographique du parenchyme testiculaire latéral en fonction de la concentration spermatique de l'éjaculat des taurillons.

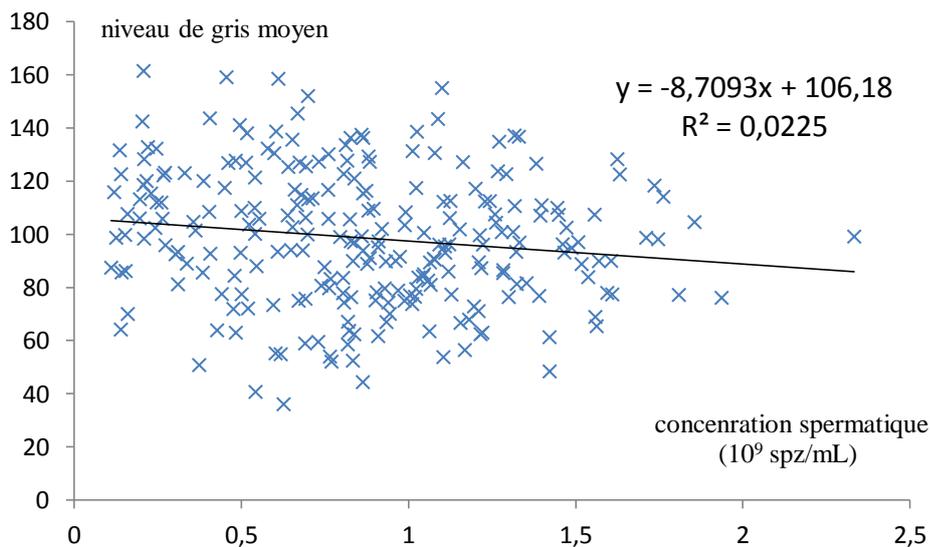


Fig. 28 : Niveau de gris moyen des pixels de l'image échographique du parenchyme testiculaire latéral en fonction de la concentration spermatique (10⁹ spz/ml) de l'éjaculat de 219 taurillons

5.5.2. Evaluation de la fonction sexuelle

Pour chaque critère spermatique, l'ensemble des variables (âge, niveau de gris moyen, CS) a été utilisé pour décrire la fonction sexuelle du taurillon, avec le modèle de régression linéaire décrit dans « matériels et méthodes ». Les variables non significatives ont dans un deuxième temps été ôtées de l'équation (par exemple, le niveau de gris moyen du parenchyme latéral).

Les 219 taurillons de l'étude ont été séparés aléatoirement en 2 groupes comprenant 2/3 et 1/3 des taureaux ; le premier groupe a permis de déterminer le modèle, le second de le valider.

5.5.2.1. Concentration spermatique

Le modèle de description obtenu sur le groupe 1 (n = 146 animaux), avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,5436$, est le suivant :

$$\text{Concentration} = -2,436 - 7,268 \cdot 10^{-3} (\text{niveau de gris moyen parenchyme médial}) + 5,998 \cdot 10^{-3} (\text{niveau de gris moyen du } \textit{rete testis}) + 4,978 \cdot 10^{-2} (\text{CS}) + 3,265 \cdot 10^{-3} (\text{jours})$$

Avec le groupe 2 (n = 73 animaux), le modèle a présenté un coefficient de corrélation $R^2 = 0,593$, ce qui a permis la validation du modèle (**figure 29**).

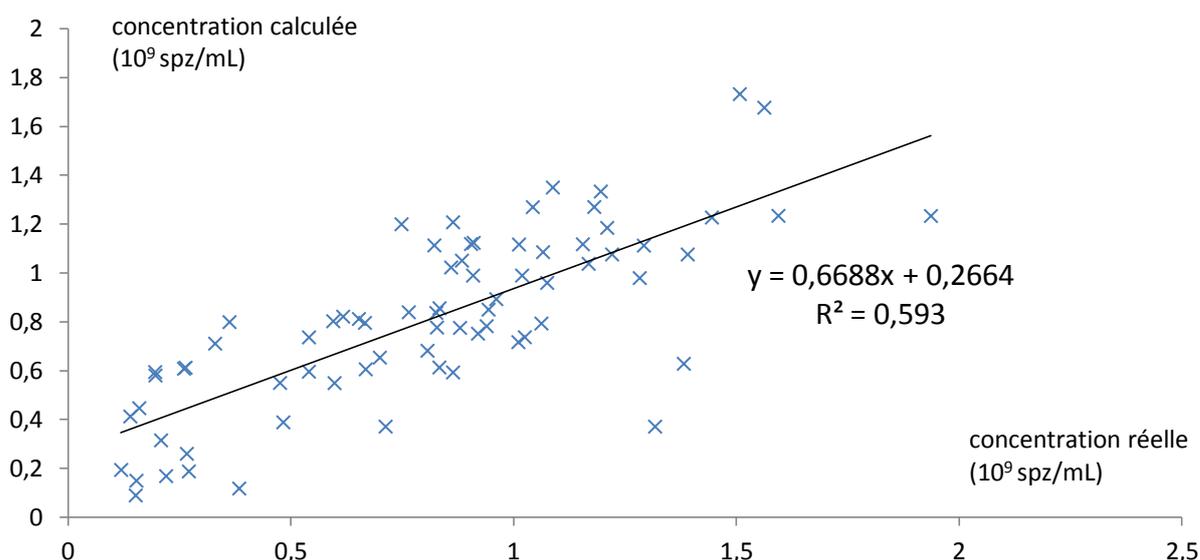


Fig. 29 : Concentration spermatique (10^9 spermatozoïdes/ml) calculée par le modèle en fonction de la concentration spermatique réelle des 73 taurillons du second groupe

Si l'échographie n'avait pas été prise en compte dans le modèle, le coefficient de détermination aurait été de $R^2 = 0,4904$ sur le 1^{er} groupe. Les paramètres échographiques permettent donc d'expliquer 5 % de variabilité supplémentaire.

5.5.2.2. Volume de l'éjaculat

La régression linéaire n'a pas permis d'obtenir un modèle satisfaisant de description du volume de l'éjaculat.

5.5.2.3. Nombre de spermatozoïdes de l'éjaculat

Le modèle de régression linéaire obtenu sur le groupe 1, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,5118$ est le suivant :

$$\text{Nb de spz} = -9,42 - 1,934 \cdot 10^{-2} (\text{niveau de gris moyen parenchyme médial}) + 1,8 \cdot 10^{-2} (\text{niveau de gris moyen } \textit{rete testis}) + 1,083 \cdot 10^{-1} (\text{CS}) + 1,8 \cdot 10^{-2} (\text{jours})$$

Avec le groupe 2, ce modèle avait alors un coefficient de corrélation $R^2 = 0,6468$, ce qui a permis de valider le modèle préétabli (*figure 30*).

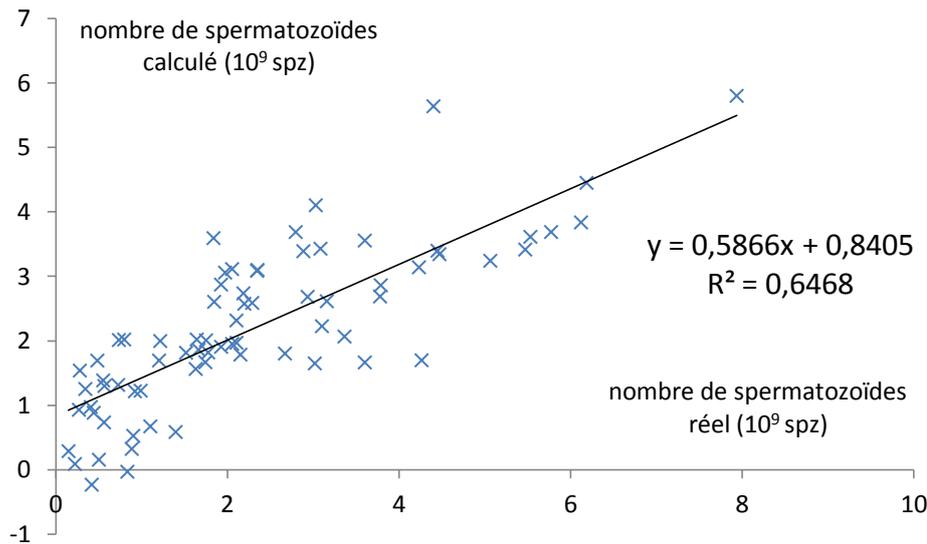


Fig. 30 : Nombre de spermatozoïdes (10^9 spermatozoïdes) calculé par le modèle de description en fonction du nombre réel de spermatozoïdes dans l'éjaculat des 73 taurillons du second groupe

Si l'échographie n'avait pas été prise en compte dans le modèle, le coefficient de détermination R^2 aurait été de 0,4811 pour le 1^{er} groupe. L'apport des niveaux de gris moyens des pixels permet donc d'expliquer 3 % de variabilité supplémentaire.

L'objectif d'un centre d'insémination est de produire un nombre élevé de paillettes à partir d'un éjaculat, les données de production totale de spermatozoïdes sont donc les plus pertinentes. Cependant, le critère de sélection des taurillons à notre disposition était un seuil de concentration spermatique. Ces différentes raisons nous ont conduit par la suite à étudier uniquement le modèle de prédiction de la concentration spermatique plutôt que celui du nombre de spermatozoïdes.

5.6. Application du modèle d'évaluation de la fonction sexuelle à la sélection des taurillons

Le modèle de prédiction de la production de semence avait pour but de sélectionner les taurillons capables ou non de produire des paillettes pour l'insémination animale.

Le critère de sélection généralement appliqué par le centre d'Amélis est une concentration spermatique supérieure à $0,3 \cdot 10^9$ spermatozoïdes/ml.

Ainsi, un taureau auquel le modèle attribuait une concentration supérieure au seuil était considéré comme bon producteur de semence (positif), un taureau inférieur au seuil était considéré comme mauvais producteur de semence (négatif).

5.6.1. Sélection des taureaux avec le modèle fondé sur les paramètres échographiques

Le tableau 12 présente les taureaux du groupe 2 correctement évalués pour leur concentration spermatique par le modèle de régression linéaire :

Tabl. 12 : Classification des 73 taurillons en fonction du seuil de $0,3 \cdot 10^9$ spz/ml pour la concentration spermatique estimée par le modèle de régression fondé sur les paramètres échographiques et pour la concentration spermatique mesurée.

		Concentration spermatique mesurée (10^9 spz/ml)	
		< 0,3	> 0,3
Concentration spermatique estimée (10^9 spz/ml)	< 0,3	6	1
	> 0,3	7	59

Ainsi, la prévalence de taureaux avec une production de semence insuffisante est de 18%, la sensibilité du modèle de 98,3%, sa spécificité de 46,1% et les valeurs prédictives positives et négatives respectivement de 89,4 et 85,7%.

En conclusion, le modèle permettait de réaliser une sélection « prudente ». En effet, 98% des taurillons bons producteurs (sauf 1) était conservée en respectant le seuil indiqué de $0,3 \cdot 10^9$ spermatozoïdes/ml, alors que seulement la moitié des taureaux mauvais producteurs (46%) était éliminée par le modèle.

5.6.2. Sélection des taureaux pour leur production spermatique avec la CS et l'âge

Le tableau 13 présente les taureaux du groupe 2 correctement évalués pour leur production spermatique avec le modèle fondé sur la CS et l'âge :

Tabl. 13 : Classification des 73 taurillons en fonction du seuil de $0,3 \cdot 10^9$ spz/ml pour la concentration spermatique estimée par le modèle de régression fondé sur la CS et l'âge et pour la concentration spermatique mesurée.

		Concentration spermatique mesurée (10^9 spz/ml)	
		< 0,3	> 0,3
Concentration spermatique estimée (10^9 spz/ml)	< 0,3	2	1
	> 0,3	11	59

Ainsi, la prévalence de taureaux avec une production de semence insuffisante est de 18%, la sensibilité du modèle de 98,3%, sa spécificité de 15,4% et les valeurs prédictives positives et négatives respectivement de 84,3 et 66,7%.

La VPN est inférieure à celle obtenue avec le modèle de régression précédent (0,67 versus 0,86), ce qui signifie que le modèle n'incluant pas les paramètres échographiques ne permet pas de déterminer les taureaux mauvais producteurs de semence.

5.7. Prédiction de la fonction sexuelle 30 jours après l'échographie grâce aux paramètres échographiques, à la CS et à l'âge des taurillons

5.7.1. Modèle de prédiction de la fonction sexuelle 30 jours après l'échographie

Les 147 taurillons utilisés ont été divisés aléatoirement en 2 groupes comprenant 2/3 et 1/3 des taureaux, comme précédemment, le premier groupe pour déterminer le modèle, le second pour le valider.

Le modèle de régression linéaire obtenu sur le groupe 1 (n = 98), avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,2932$, est le suivant :

$$\text{Concentration} = -0,623 - 8,982 \cdot 10^{-3} (\text{niveau de gris moyen parenchyme médial}) + 7,337 \cdot 10^{-3} (\text{niveau de gris moyen du rete testis}) + 3,033 \cdot 10^{-3} (\text{jours})$$

Avec le groupe 2 (n = 49), ce modèle a présenté un coefficient de corrélation $R^2 = 0,23$ (figure 31).

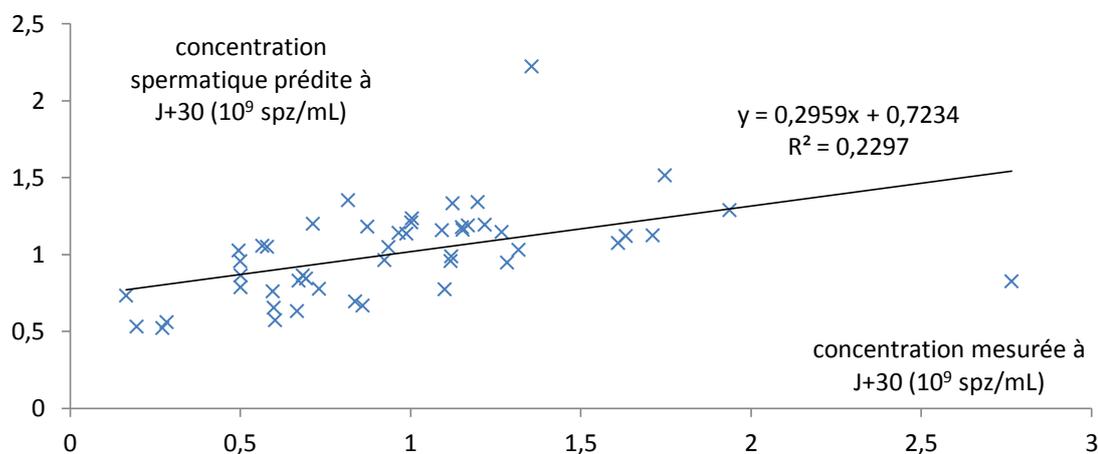


Fig. 31 : Concentration spermatique (10^9 spermatozoïdes/ml) calculée par le modèle de prédiction à J+30 en fonction de la concentration spermatique réelle à J+30 des 49 taurillons

Si l'échographie n'avait pas été prise en compte dans le modèle, le coefficient de détermination aurait été de $R^2 = 0,2513$ sur le 1^{er} groupe. Les paramètres échographiques permettent donc d'expliquer 4 % de variabilité supplémentaire.

5.7.2. Application du modèle de prédiction à J+30 sur la sélection des taurillons

Le tableau 14 présente la classification des taureaux du groupe 2 en fonction du seuil de concentration spermatique de $0,3 \cdot 10^9$ spz/ml :

Tabl. 14 : Classification des 49 taurillons en fonction du seuil de $0,3 \cdot 10^9$ spz/ml de concentration spermatique estimée par le modèle de régression fondé sur les paramètres échographiques et en fonction de la concentration spermatique mesurée 30 jours plus tard.

		Concentration spermatique mesurée (10^9 spz/ml)	
		< 0,3	> 0,3
Concentration spermatique estimée (10^9 spz/ml)	< 0,3	0	0
	> 0,3	4	45

Ainsi, la prévalence de taureaux avec une production de semence insuffisante est de 8%, la sensibilité du modèle de 100%, sa spécificité de 0% et la valeur prédictive positive de 91,83% et la VPN n'est pas calculable.

La limite principale de ce modèle est que la prévalence des mauvais reproducteurs est faible, 8%, ce qui rend l'estimation des VPP et VPN difficile.

La VPN n'est pas calculable, le modèle de prédiction à J+30 ne permet pas de prédire précocement les mauvais producteurs de semence. Cependant, le modèle a été établi sur la base de taureaux bons producteurs de semence ; il faudrait inclure un nombre plus élevé d'animaux ou alors de mauvais producteurs dans le pool initial afin que le modèle de régression linéaire « apprenne » à différencier les animaux proches du seuil de sélection.

La seconde limite est l'incertitude des mesures. En effet, les coefficients de variation de répétabilité pour la mesure du niveau de gris ont oscillé entre 5 et 15%. Cette marge d'erreur a été considérée initialement comme faible, mais dans un échantillon d'animaux où les individus sont proches les uns des autres, cette incertitude peut être responsable du passage d'un taureau mauvais producteur de semence à la classe bon reproducteur.

5.8. Prédiction de la concentration spermatique des taurillons par classe d'âge

5.8.1. Estimation de la concentration spermatique des taurillons par classe d'âge

106 taurillons avaient moins de 1 an, 113 avaient plus de 1 an. En reprenant les modèles de prédiction préétablis, les coefficients de corrélation étaient respectivement $R^2 = 0,3994$ et $R^2 = 0,2948$. Le modèle de description était donc plus adapté aux jeunes taurillons.

5.8.2. Prédiction de la concentration spermatique des taurillons 30 jours après l'échographie par classe d'âge

En reprenant les modèles de prédiction préétablis, les coefficients de corrélation étaient pour les jeunes taurillons $R^2 = 0,2089$ et pour les taurillons plus âgés $R^2 = 0,0865$. Le modèle de prédiction ne semble donc pas adapté aux taurillons de plus de 1 an.

6. Conclusion et perspectives

Notre étude a permis de définir les conditions de réalisation d'un examen échographique pour obtenir une mesure du niveau de gris moyen des pixels répétable sur les parenchymes latéral et médial et le *rete testis*. Les autres paramètres échographiques (variance, kurtosis, skewness des pixels) ne sont pas répétables et donc inutilisables en pratique.

L'étude de la répétabilité des examens a révélé une variation journalière de l'échogénicité testiculaire. Le niveau de gris moyen était significativement plus élevé le matin que l'après-midi. Les mesures entre les deux périodes restaient corrélées. Cette différence pourrait être liée à un facteur environnemental, tel que la température qui peut influencer la position des testicules dans les bourses, et donc le contact de la sonde sur le scrotum.

L'examen n'est pas reproductible, il dépend de l'opérateur et de l'appareil utilisé. En effet, la différence de pression exercée sur le testicule avec la sonde, la position de la sonde, la quantité de gel déposée étaient autant de facteurs capables de faire varier les mesures échographiques.

L'ensemble de ces résultats nous a amené à standardiser les examens pour évaluer l'influence de l'échogénicité testiculaire sur la production de semence. Des mesures du niveau de gris moyen, réalisées avec un seul appareil, par le même opérateur, et à un même moment de la journée, ont pu être considérées comme répétables.

Les calculs de circonférence scrotale estimés par l'échographie selon les formules déterminées par l'UNCEIA ont été comparés à la mesure au mètre-ruban. Les corrections effectuées n'étaient pas pertinentes dans notre étude. De plus, en accord avec *Gabor et al. (18)*, la mesure au mètre-ruban reste plus corrélée à la qualité de la semence que celle estimée à l'échographie.

Le niveau de gris moyen des pixels du parenchyme testiculaire latéral, médial ainsi que du *rete testis* s'est révélé être un marqueur de la fonction sexuelle du taureau. Cependant, les apports de l'échographie par rapport aux variables classiques d'évaluation de la fonction sexuelle restaient limités (5% de variabilité supplémentaire expliquée).

L'intérêt des paramètres échographiques doit être confronté aux contraintes des examens dans les conditions de terrain. En effet, les mesures échographiques sont très chronophages.

Dans une étude sur des taureaux allaitants (9), une augmentation de l'échogénicité testiculaire a été observée à partir de 12-16 semaines avant la puberté, et une intensité maximale 4 semaines avant la puberté. Cette intensité est ensuite restée constante. L'échogénicité du parenchyme était peu corrélée aux paramètres séminologiques. Elle restait néanmoins un bon indicateur de la puberté, toutefois moins précise que la circonférence scrotale. Ainsi, en accord avec nos résultats, cette étude a montré que les applications cliniques de l'échographie pour la sélection des taureaux d'insémination restaient limitées.

L'étude d'*Arteaga et al. (4)* avait montré que des modifications échographiques du parenchyme testiculaire induites par une hyperthermie scrotale pouvaient avoir des répercussions sur la production de semence 2 à 4 semaines plus tard. Ce résultat suggère que notre modèle fondé sur les paramètres échographiques pourrait permettre de prédire la qualité de la semence 30 jours après l'examen. Cependant la prédiction n'a pas été satisfaisante dans notre étude en partie en raison du nombre limité de taureaux (147 contre 219 pour l'estimation de la fonction sexuelle), mais surtout des modifications probablement moins importantes du parenchyme testiculaire des taureaux sains.

Pour améliorer les performances de l'échographie testiculaire, différentes alternatives pourraient être proposées.

Le choix d'un appareil échographique de meilleure qualité pour réaliser l'examen nous procurerait une meilleure résolution. L'image échographique du parenchyme testiculaire reflétant la microstructure du tissu, l'augmentation du nombre de pixels permettrait de mieux caractériser le tissu. La répétabilité, la reproductibilité et les estimations de la fonction sexuelle pourraient ainsi être améliorées. Il faut aussi envisager l'utilisation d'un appareil de multimédia de capture des images plus performant. De même, MaZda n'a pas été prévu initialement pour cette application, un logiciel différent et mieux adapté pourrait améliorer les résultats. Quid du Doppler 2D pour ces applications ?

Pour améliorer le modèle de prédiction, il aurait été souhaitable de disposer d'individus présentant des concentrations spermatiques faibles et élevées. L'utilisation de taurillons Prim'Holstein de centre d'insémination, c'est-à-dire de lignées de taureaux sélectionnés depuis plusieurs générations sur leur fonction sexuelle, ne reflète pas la variabilité de la population.

Notre étude a réalisé des mesures ponctuelles sur un groupe de 219 taurillons. Elle nous a permis d'évaluer les paramètres échographiques en fonction de l'âge de différents taurillons. Il pourrait être intéressant de suivre de manière plus régulière des taureaux, pour évaluer l'évolution des paramètres échographiques par taureau au cours du temps et obtenir une meilleure estimation du potentiel reproducteur du taureau. Cependant, ce suivi est plus difficile à réaliser en pratique.

Les taurillons utilisés étaient en centre d'insémination. Leur sperme étant collecté, des informations sur la qualité de leur semence étaient déjà disponibles. Il pourrait être intéressant de réaliser des examens échographiques avant leur entrée en station de quarantaine, afin de prédire leur fonction sexuelle et de les sélectionner le plus précocement possible.

Le niveau de gris moyen est le seul paramètre échographique qui a été utilisé dans notre étude. Les paramètres caractérisant l'homogénéité du parenchyme n'ont en effet pas pu être standardisés. Il serait intéressant d'explorer d'autres paramètres échographiques.

La densité de l'image échographique, c'est-à-dire le nombre de pixels par unité de surface, a ainsi déjà été étudiée. Or cette densité a été identifiée comme corrélée à la proportion de tubes séminifères du parenchyme testiculaire par *Gabor et al. (18)*, voire même à leur activité de spermatogenèse en humaine (25). Chez la vache, cette densité est utilisée pour déterminer le statut physiologique ovarien (30). Intégrer la densité de l'image échographique à nos modèles pourrait donc améliorer la précision de nos estimations de la fonction sexuelle.

En andrologie humaine, l'imagerie médicale est très utilisée, et en particulierité l'outil Doppler. Il a ainsi été démontré (33) que la qualité et la quantité d'un éjaculat étaient corrélées à la perfusion sanguine des tissus testiculaires (débit sanguin de l'artère testiculaire et importance de la microcirculation). Ces mesures pourraient être effectuées chez le taureau.

L'apport de l'examen échographique dans la prédiction de la fonction sexuelle est discuté. La circonférence scrotale, bien plus simple à mesurer, est autant, sinon plus, informative. Cependant, l'échographie en centre d'insémination reste un atout majeur, en tant que complément à l'examen clinique classique de la fonction sexuelle. Elle permet une détection précoce et une meilleure caractérisation des pathologies, non seulement des testicules, mais de l'appareil génital dans son ensemble.

AGREMENT SCIENTIFIQUE

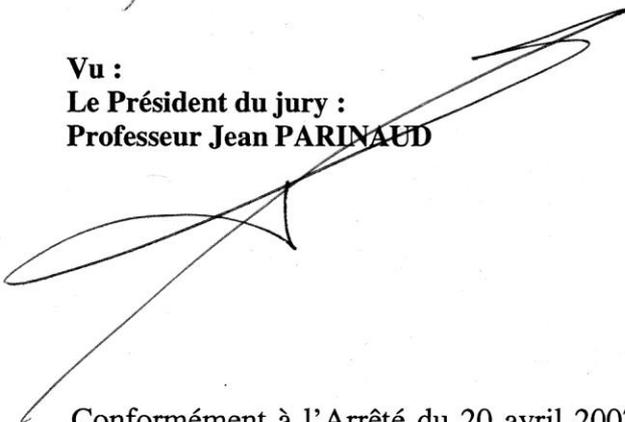
En vue de l'obtention du permis d'imprimer de la thèse de doctorat vétérinaire

Je soussignée, Nicole HAGEN, Enseignant-chercheur, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, directeur de thèse, certifie avoir examiné la thèse de COURSIN Stéphane intitulée « **Prédiction du potentiel reproducteur de jeunes taureaux par échographie testiculaire et mesure de la circonférence scrotale.** » et que cette dernière peut être imprimée en vue de sa soutenance.

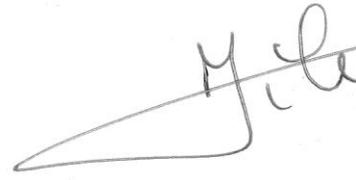
Fait à Toulouse, le 24 Septembre 2012
Professeur Nicole HAGEN
Enseignant chercheur
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse



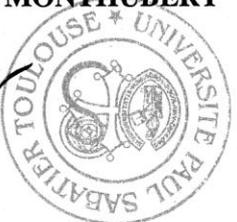
Vu :
Le Président du jury :
Professeur Jean PARINAUD



Vu :
Le Directeur de l'Ecole Nationale
Vétérinaire de Toulouse
Professeur Alain MILON




Vu et autorisation de l'impression :
Le Président de l'Université
Paul Sabatier
Professeur Bertrand MONTHUBERT

Conformément à l'Arrêté du 20 avril 2007, article 6, la soutenance de la thèse ne peut être autorisée qu'après validation de l'année d'approfondissement.

BIBLIOGRAPHIE

- 1- **Abdel-Razek A.Kh.** (2005) Developmental changes of bull (*Bos taurus*) genitalia as evaluated by caliper and ultrasonography. *Reprod. Dom. Anim.*, 40,23-27.
- 2- **Amann R.P.** (1983) Endocrine changes associated with onset of spermatogenesis in Holstein bulls. *J Dairy Sci*, 66:2606-2622.
- 3- **Aravindakshan J.P.** (2000) Patterns of gonadotropin secretion and ultrasonographic evaluation of developmental changes in the testis of early and late maturing bull calves. *Theriogenology*, 54:339-354.
- 4- **Arteaga Andres A.** (2005) Relationship between semen quality and pixel-intensity of testicular ultrasonograms after scrotal insulation in beef bulls. *Theriogenology*, 64:408-415.
- 5- **Barone R.** (2001) Anatomie comparée des mammifères domestiques, Tome 4, splanchnologie II. 3^{ème} édition. Paris : Vigot, 896 pages, ISBN.
- 6- **Barth A.D., Brito L.P.C.** (2004) Le développement pubertaire des taureaux de type *Bos taurus*. *La médecine vétérinaire des grands animaux – Rondes cliniques*, volume 4, numéro 4.
- 7- **Barth A.D.** (2004) Pubertal development of *Bos taurus* beef bulls. Proceedings of the WBC Congress, Québec, Canada.
- 8- **Barth A.D. Ominski K.H.** (2000) The relationship between scrotal circumference at weaning and at one year of age in beef bulls. *Can Vet J* : 541-546.
- 9- **Brito L. F.** (2012) Testicular ultrasonogram pixel intensity during sexual development and its relationship with semen quality, sperm production and quantitative testicular histology in beef bulls. *Theriogenology*, 78(1):69-76.
- 10- **Cabannes C.** (2008) Comparaison des méthodes d'évaluation de la qualité de la semence dans les espèces bovines, canines et humaines. Thèse de doctorat vétérinaire, Toulouse 3, 107 p.
- 11- **Chandolia R.K.** (1997) Assessment of development of the testes and accessory glands by ultrasonography in bull calves and associated endocrine changes. *Theriogenology*, 48:119-132.
- 12- **Chatelain E.**, (1986) Anatomie descriptive de l'appareil génital du taureau. *Elev. Insem.*, 214, 3-17.

- 13- Coulter G.H., Bailey D.R.C.** (1988) Effects of the ultrasonography on the bovine testis and semen quality. *Theriogenology*, 30(4):743-9.
- 14- Curtis S.K., Amann R.P.** (1981) Testicular development and establishment of spermatogenesis in Holstein bulls. *J Anim Sci*, 53:1645-1657.
- 15- Dadoune J.P., Demoulin A.** Structure et fonctions du testicule. *In: La reproduction chez les mammifères et l'homme*. Nouvelle édition. Paris : INRA. Editions ellipses, 2001, 256-289.
- 16- DeJarnette J.M.** (2004) Industry application of technology in male reproduction, Proceedings, Applied reproductive strategies in beef cattle, September 1 and 2, North Platte, Nebraska.
- 17- Evans A.C.O. and al.** (1996) Changes in circulating hormone concentrations, testes histology and testes ultrasonography during sexual maturation in beef bulls. *Theriogenology*, 46:345-357.
- 18- Gábor G.** (1998) Computer analysis of video and ultrasonographic images for evaluation of bull testes. *Theriogenology*, 50:223-228.
- 19- Gérard O., Rault P.** (2007) L'échographie, un outil pour la sélection des reproducteurs. *Bulletin Technique de l'Insémination Animale*, 136, 19-22.
- 20- Gipson T.A., Vogt D.W., Massey J.W., Eilersieck M.R.** (1985) Associations of scrotal circumference with semen traits in young beef bulls. *Theriogenology*, 24(2):215-25.
- 21- Guillot J.** (2002) La calcification testiculaire chez les boucs de centres d'insémination artificielle : étude clinique et répercussion sur la production de semence. Thèse de doctorat vétérinaire, Toulouse 3, 113 p.
- 22- Hagen N., Toutain P.L., Gayrard V.** (2008) L'échographie de l'appareil génital de la vache.
- 23- Hanzen Ch.** (2009-2010) Rappels anatomophysiologiques relatifs à la reproduction du taureau, cours de la faculté de médecine vétérinaire de Liège.
- 24- Jimenez-Severiano H.** (2010) Evaluation of mathematical models to describe testicular growth in Blackbelly ram lambs. *Theriogenology*, 74:1107-1114.
- 25- Lenz S.** (1994) Ultrasonic texture and volume of testicles in infertile men. *Hum Reprod*, 9(5):878-81.

- 26- Lunstra D.D., Gregory K.E., Cundiff L.V.** (1988) Heritability estimates and adjustment factors for the effects of bull age and age of dam on yearling testicular size in breeds of bulls. *Theriogenology*, 30:127 – 136.
- 27- Lunstra D.D., Ford J.J., Echtenkamp S.E.** (1978) Puberty in beef bulls : hormone concentrations, growth, testicular development, sperm production and sexual aggressiveness in bulls of different breeds. *J Anim Sc* ; 46:1054-1062.
- 28- Parkinson T.J.** (2004) Evaluation of fertility and infertility in natural service bulls. *Vet J*, 168(3):215-229.
- 29- Pavaux Cl.** (2001) Splanchnologie des animaux domestiques, fascicule II, appareil uro-génital, E.N.V.T., document pédagogique.
- 30- Pierson R.A., Adams G.P.** (1995) Computer-assisted image analysis, diagnostic ultrasonography and ovulation induction : strange bedfellows. *Theriogenology*, 43(1):105-112.
- 31- Rault P.** (2006) Etude échographique de l'appareil génital du taureau. Thèse de doctorat vétérinaire, Alfort, 109 p.
- 32- Rigal F.** (2008) Comparaison de la qualité de la semence de taureaux collectés à l'électro-éjaculateur ou au vagin artificiel. Thèse de doctorat vétérinaire, Toulouse 3, 99 p.
- 33- Schurich M.** (2009) The role of ultrasound in assessment of male fertility. *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology* 1445, S192-S198.
- 34- Med'ia, revue d'information de l'UNCEIA** (2011) source Institut de l'Élevage, Service Système d'Information, Identification et Traçabilité Animale – Statistique BDNI.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

a. Les figures

Fig. 1 : Coupe transversale du testicule gauche et de ses enveloppes (<i>d'après 5</i>)	19
Fig. 2 : Schéma d'une coupe longitudinale du testicule droit et de ses enveloppes (<i>d'après 29</i>).....	19
Fig. 3 : Vue caudale et coupe longitudinale du testicule droit et de son épидидyme d'un taureau (<i>d'après 12</i>)	20
Fig. 4 : Schéma d'une coupe transversale de tube séminifère avec la localisation des différents stades de la lignée germinale (<i>d'après 2</i>)	22
Fig. 5 : Amplitude et longueur d'onde de l'onde produite par le cristal subissant une tension électrique	25
Fig. 6 : Réflexion de l'écho au niveau d'une interface tissulaire. Exemple de l'interface grasse (impédance).....	25
Fig. 7 : Emission et réception de l'onde ultrasonore	26
Fig. 8 : Atténuation de l'onde ultrasonore. Si I_0 est l'onde incidente sur la première interface, l'écho 1 qui revient vers le cristal entraîne une baisse de l'intensité de I_1 , l'onde transmise vers la seconde interface. Même si cette seconde interface possède les mêmes caractéristiques d'impédance que la première, l'écho 2 est inférieur à l'écho 1 car I_1 est inférieure à I_0	26
Fig. 9 : Schéma de la réfraction d'une onde ultrasonore. L'angle de l'onde incidente \hat{i}_1 et l'angle de l'onde réfléchi \hat{i}_2 sont égaux.	27
Fig. 10 : Schéma de la diffusion d'une onde ultrasonore	27
Fig. 11 : Production de salves d'ultrasons pour des fréquences différentes ($f(B) > f(A)$), avec t_1 et t_2 les durées de chaque salve ($t_1 > t_2$).	28
Fig. 12 : Réflexion de type spéculaire d'un faisceau d'ondes ultrasonores. Lorsque l'angle est trop important, les ondes réfléchies ne reviennent pas vers le cristal.....	29
Fig. 13 : Réflexion sur des réflecteurs non spéculaires, surfaces rugueuses ou parenchymes : l'onde est diffusée et seul un faible écho revient vers le cristal.....	30
Fig. 14 : Création d'un cône d'ombre par réflexion d'une onde ultrasonore	30
Fig. 15 : Frise chronologique des interventions rentrant dans le cadre de l'étude sur un lot de taurillon.....	37
Fig. 16 : Choix des ROI avec MaZda sur une image échographique d'un testicule en coupe longitudinale	38
Fig. 17 : Choix des ROI avec MaZda sur une image échographique d'un testicule en coupe transversale.....	38
Fig. 18 : Courbe de distribution de variable possédant des kurtosis différents.....	40
Fig. 19 : Courbe de distribution de variables à skewness négatif (gauche) ou positif (droite)	41
Fig. 20 : mesure de la largeur a (à droite) et de la profondeur b (à gauche) des testicules à l'échographie.....	43
Fig. 21 : Niveau de gris moyen de l'image échographique du parenchyme testiculaire latéral des 41 testicules mesurés le matin en fonction de celui des testicules mesurés le soir.	47
Fig. 22 : Niveau de gris moyen du parenchyme testiculaire latéral de 50 taureaux obtenu avec l'appareil de l'UNCEIA en fonction de celui obtenu sur le même échantillon avec l'appareil d'Amélis 50	

Fig. 23 : Niveau de gris moyen du parenchyme testiculaire latéral de 50 taureaux échographiés par S. Basquin en fonction des mesures réalisées sur les mêmes taureaux par S. Coursin	51
Fig. 24 : Circonférence scrotale calculée à partir des mesures échographiques par les formules de l'ellipse simple et de Ramanujan en fonction de la circonférence scrotale mesurée au mètre-ruban sur 23 taurillons.....	52
Fig. 25 : Volume (ml), concentration (10^9 spz/ml) et nombre de spermatozoïdes (10^9 spz/ml) de l'éjaculat de 219 taurillons en fonction de leur âge (jours)	53
Fig. 26 : Circonférence scrotale (cm) de 219 taurillons en fonction de leur âge (jours)	54
Fig. 27 : Niveau de gris moyen des pixels de l'image échographique des parenchymes testiculaires latéral et médial et du rete testis en fonction de l'âge (jours) de 219 taurillons	54
Fig. 28 : Niveau de gris moyen des pixels de l'image échographique du parenchyme testiculaire latéral en fonction de la concentration spermatique (10^9 spz/ml) de l'éjaculat de 219 taurillons	55
Fig. 29 : Concentration spermatique (10^9 spermatozoïdes/ml) calculée par le modèle en fonction de la concentration spermatique réelle des 73 taurillons du second groupe	56
Fig. 30 : Nombre de spermatozoïdes (10^9 spermatozoïdes) calculé par le modèle de description en fonction du nombre réel de spermatozoïdes dans l'éjaculat des 73 taurillons du second groupe	57
Fig. 31 : Concentration spermatique (10^9 spermatozoïdes/ml) calculée par le modèle de prédiction à J+30 en fonction de la concentration spermatique réelle à J+30 des 49 taurillons	59

b. Les tableaux

Tabl. 1 : Répartition des lots de taurillons utilisés au centre d'insémination d'Améris pour l'étude	35
Tabl. 2 : Nombre d'équivalent-taurillons, numéros de lots et natures des images échographiques utilisées pour chacune des expériences menées dans l'étude	45
Tabl. 3 : moyenne, écart-type et coefficient de variation (CV en %) moyen pour le niveau de gris moyen des pixels par zone sur les coupes longitudinales d'images échographiques testiculaires d'un lot de 21 taurillons examinés deux fois, matin et soir	46
Tabl. 4 : moyenne, écart-type et coefficient de variation (CV en %) moyen pour la variance du niveau de gris des pixels par zone sur les coupes longitudinales d'images échographiques testiculaires d'un lot de 21 taurillons examinés deux fois, matin et soir	46
Tabl. 5 : moyenne, écart-type et coefficient de variation (CV en %) moyen pour le skewness du niveau de gris des pixels par zone sur les coupes longitudinales d'images échographiques testiculaires d'un lot de 21 taurillons examinés deux fois, matin et soir	46
Tabl. 6 : moyenne, écart-type et coefficient de variation (CV en %) moyen pour le kurtosis du niveau de gris des pixels par zone sur les coupes longitudinales d'images échographiques testiculaires d'un lot de 21 taurillons examinés deux fois, matin et soir	47
Tabl. 7 : Moyenne des coefficients de variation (CV en %) des 4 paramètres échographiques sur les 3 ROI de coupe longitudinale (CL) de chacun des deux testicules examinés 10 fois sur un taureau	48
Tabl. 8 : Moyenne des coefficients de variation (CV en %) des 4 paramètres échographiques sur les 3 ROI de coupe transversale (CT) de chacun des deux testicules examinés 10 fois sur un taureau	48
Tabl. 9 : Niveau de gris moyen et coefficient de variation moyen entre les 2 appareils pour chaque ROI des images échographiques de chaque coupe, sur la moyenne des testicules droit et gauche	50

Tabl. 10 : Niveau de gris moyen et coefficient de variation moyen entre les 2 opérateurs pour chaque ROI du parenchyme testiculaire déterminé sur les images échographiques de chaque coupe, sur la moyenne des testicules droits et gauches.....	51
Tabl. 11 : Coefficient de corrélation entre les paramètres séminologiques et la CS mesurée au mètre ruban ou estimée avec une formule simple ou de Ramanujan à partir de la largeur testiculaire	53
Tabl. 12 : Classification des 73 taurillons en fonction du seuil de $0,3 \cdot 10^9$ spz/ml pour la concentration spermatique estimée par le modèle de régression fondé sur les paramètres échographiques et pour la concentration spermatique mesurée.	58
Tabl. 13 : Classification des 73 taurillons en fonction du seuil de $0,3 \cdot 10^9$ spz/ml pour la concentration spermatique estimée par le modèle de régression fondé sur la CS et l'âge et pour la concentration spermatique mesurée.	58
Tabl. 14 : Classification des 49 taurillons en fonction du seuil de $0,3 \cdot 10^9$ spz/ml de concentration spermatique estimée par le modèle de régression fondé sur les paramètres échographiques et en fonction de la concentration spermatique mesurée 30 jours plus tard.	60

Toulouse, 2012

NOM : COURSIN

PRENOM : STEPHANE

TITRE : PREDICTION DU POTENTIEL REPRODUCTEUR DE JEUNES TAUREAUX PAR ECHOGRAPHIE TESTICULAIRE ET MESURE DE LA CIRCONFERENCE SCROTALE.

RESUME :

Les objectifs de l'étude étaient d'évaluer et de prédire l'aptitude des taureaux à la production de semence par les paramètres échographiques testiculaires et la circonférence scrotale. Cette étude a été réalisée sur 175 taureaux du centre d'insémination d'Amélie, âgés de 8 à 16 mois. Dans un premier temps, les conditions expérimentales permettant de standardiser les mesures échographiques testiculaires ont été déterminées. Un modèle fondé sur la circonférence scrotale, l'âge et les paramètres testiculaires a été construit pour estimer et prédire la production spermatique. Les paramètres échographiques ont permis d'expliquer 3 à 5% de variabilité supplémentaire par rapport au modèle classique. Avec le seuil de concentration spermatique de $0,3 \cdot 10^9$ spermatozoïdes/ml, ce modèle a permis de sélectionner les bons reproducteurs alors qu'il ne détecte que 85% des mauvais reproducteurs.

MOTS-CLES : fonction sexuelle, testicule, échographie, circonférence scrotale, taureau.

ENGLISH TITLE : PREDICTION OF YOUNG BULLS' REPRODUCTIVE POTENTIAL USING TESTICULAR ULTRASONOGRAPHY AND SCROTAL CIRCUMFERENCE MEASUREMENT.

ABSTRACT :

The purpose of the study was to evaluate and to predict bulls' ability to produce semen using ultrasound parameters and scrotal circumference of testicles. This study was carried out on 175 bulls from 8 to 16 years old, from the insemination center of Amélie. As a first step, experimental conditions providing standardized testicular ultrasound measurements were established. A model was built using scrotal circumference, age and testicular parameters to estimate and predict sperm production. Ultrasound parameters increased the accuracy of the model by 3 to 5%. With a sperm concentration threshold value of $0.3 \cdot 10^9$ spermatozooids/ml, this model allowed the selection of good reproductive performers whereas only 85% of low breeders were detected.

KEY WORDS : sexual function, testis, ultrasonography, scrotal circumference, bull