



HAL
open science

L' échographie doppler de l'artère testiculaire du taureau : mise au point de la méthode et corrélation avec les paramètres physiologiques et sémiologiques

Julie Bassalert

► To cite this version:

Julie Bassalert. L' échographie doppler de l'artère testiculaire du taureau : mise au point de la méthode et corrélation avec les paramètres physiologiques et sémiologiques. Médecine vétérinaire et santé animale. 2023. dumas-04245377

HAL Id: dumas-04245377

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04245377v1>

Submitted on 17 Oct 2023

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

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

L'ECHOGRAPHIE DOPPLER DE L'ARTERE TESTICULAIRE DU TAUREAU : MISE AU POINT DE LA METHODE ET RELATIONS AVEC LES PARAMETRES PHYSIOLOGIQUES ET SEMINOLOGIQUES

THESE D'EXERCICE

pour obtenir le titre de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

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

par

BASSALERT Julie, Léa

Directrice de thèse : Mme Nicole HAGEN

JURY

PRESIDENT :
M. Renaud MAILLARD

Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

ASSEESSEURES :
Mme Nicole HAGEN
Mme Catherine LAYSSOL-LAMOUR

Professeure à l'Ecole Nationale Vétérinaire d'ALFORT
Ingénieure de recherche à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

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

Liste des directeurs/assesseurs de thèse de doctorat vétérinaire

Directeur : Professeur Pierre SANS

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

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

PROFESSEURS 1^{ère} CLASSE

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

PROFESSEURS 2^{ème} CLASSE

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

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

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

MAITRES DE CONFERENCES CLASSE NORMALE

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

INGENIEURS DE RECHERCHE

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

REMERCIEMENTS

A Monsieur le professeur Renaud MAILLARD,

Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Pathologie des Ruminants

Qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de jury de cette thèse,
Hommage et remerciements respectueux.

A Madame la Professeur Nicole HAGEN-PICARD,

Professeure de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Pathologie de la reproduction

Qui m'a proposé ce sujet de thèse et accepté d'en encadrer le travail,
Reconnaissance et remerciements les plus sincères.

A Madame la Docteure Catherine LAYSSOL-LAMOUR,

Praticienne Hospitalière de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Imagerie médicale

Qui a accepté de prendre part au jury de cette thèse,
Qui m'a fait l'honneur de participer à sa réalisation,
Sincères remerciements.

A Madame Aline BOUSSARIE

Responsable du pôle semences du site de Soual – AURIVA- Elevage

Pour sa disponibilité et son aide précieuse,
Sincères remerciements

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	3
TABLE DES MATIERES	4
TABLE DES ILLUSTRATIONS	6
LISTE DES ABBREVIATIONS	10
INTRODUCTION	11
I. Thermorégulation et spermatogenèse	12
A. Effet du stress thermique sur la spermatogenèse	12
B. Mécanismes de la thermorégulation des testicules	15
II. Apport de l'échographie Doppler à l'examen de l'appareil reproducteur du taureau	20
A. L'échographie Doppler	20
1. Principe de l'échographie Doppler	20
2. Les différents modes Doppler	21
a. Le Doppler continu	21
b. Le Doppler pulsé	21
c. Le Doppler couleur	22
3. Signal Doppler et analyse spectrale	22
4. Réglages et optimisation	23
a. Sonde	23
b. Gamme de vitesses	23
c. Filtres de paroi	23
d. Gain	24
e. Taille de la fenêtre couleur	24
5. Facteurs limitants et artéfacts	24
a. Limites liées à l'angle entre le faisceau ultrasonore et l'axe du vaisseau	24
b. Limites liées à la mesure des vitesses élevées : le phénomène d'aliasing	25
c. Limites liées à la profondeur d'exploration	26
6. Principaux index de mesure	26
B. Echographie Doppler de l'artère testiculaire	28
1. Valeurs usuelles des paramètres hémodynamiques évalués par échographie doppler	28
2. Facteurs physiologiques influençant les paramètres hémodynamiques testiculaires	30
3. Facteurs pathologiques influençant les paramètres hémodynamiques testiculaires	35
4. Relations entre les paramètres hémodynamiques de l'artère testiculaire et la qualité de la semence	36
III. Matériel et méthodes	37
A. Animaux	37
B. Collecte de sperme et examen de la semence	40
C. Examens testiculaires	42
1. Contention de l'animal	42
2. Volume testiculaire et circonférence scrotale	42
3. Examens échographiques	43

a. Echographie du parenchyme testiculaire	43
b. Echographie Doppler de l'artère testiculaire	44
IV. Résultats et discussion	47
A. Mise au point de la méthode d'échographie Doppler de l'artère testiculaire	47
1. Réglages et mesures	47
2. Répétabilité des mesures hémodynamiques	52
B. Evaluation des paramètres hémodynamiques testiculaires	53
1. Influence de l'âge sur l'index de résistance	56
2. Influence de la race sur l'index de résistance	57
3. Influence des paramètres biométriques sur l'index de résistance	58
4. Influence de la saison sur les paramètres hémodynamiques.....	59
5. Relations entre les paramètres hémodynamiques et la production de semence	62
VI. Conclusion et perspectives	69
AGREMENT SCIENTIFIQUE	70
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	71

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Étapes de la spermatogenèse chez le taureau d'après Rahman et al. 2018	13
Figure 2 : Schéma d'une coupe histologique transversale de tubes séminifères de bovin illustrant la localisation des différents stades de cellules germinales au sein des tubes séminifères (Amann et al., 1983)	13
Figure 3 : Vue caudale du testicule gauche illustrant certaines caractéristiques anatomiques du testicule permettant sa thermorégulation : muscle crémaster et cône vasculaire.	16
Figure 4 : Coupe transversale du cordon spermatique de taureau. Les différentes coupes de vaisseaux de plus large diamètre correspondent à l'artère testiculaire circonvolutionnée, elle est entourée par le plexus pampiniforme d'aspect spongieux (Hees et al., 1984)	17
Figure 5 : Représentation du plexus veineux formant de nombreuses anastomoses et entourant l'artère. Les veines peuvent atteindre un diamètre minimal de 10 μ m (Hees et al., 1984). ...	17
Figure 6 : Testicule de buffle (visualisation de l'artère testiculaire par injection de latex) (Sary et al., 2020).	18
Figure 7 : Schéma du principe de l'effet doppler : la fréquence de l'onde réfléchie F_r par des hématies en mouvement dans un vaisseau sanguin est différente de celle de l'onde incidente F_e , θ étant l'angle formé par les faisceaux d'ultrasons et le vaisseau sanguin et V la vitesse des hématies (d'après Grataloup-Oriez, 1999)	20
Figure 8 : Schéma d'un doppler pulsé. L'émission spectrale du signal F_e est discontinue. Le nombre de signaux émis par seconde est la PRF (d'après Dauzat, 2012)	22
Figure 9 : Exemples de l'erreur relative liée à un angle θ réglé de 10° ou 60°.	24
Figure 10a. : Une PRF faible permet la réception du signal ultrason F_r avant l'émission d'un nouveau pulse F_e (d'après Dauzat, 2012)	25
Figure 10b. : Lorsque la PRF est trop élevée la réception du signal ultrason F_r est effectuée après l'émission d'un nouveau pulse F_e (d'après Dauzat, 2012)	26
Figure 11 : Courbe de vitesses du flux sanguin. Les valeurs de vitesse au pic systolique et en fin de diastole sont mesurées sur la courbe.	27
Figure 12 : Facteurs influençant l'hémodynamique testiculaire et son évaluation par échographie Doppler (d'après Samir et al., 2022)	30
Figure 13 : Mesure de la circonférence scrotale à l'aide d'un mètre ruban	43
Figure 14 : Echographie du parenchyme testicule. Positionnement de la sonde (à gauche) et image échographique correspondante d'une coupe longitudinale du testicule (à droite)	44
Figure 15 : Positionnement de la sonde pour la caractérisation du flux sanguin de l'artère testiculaire par échographie Doppler	45
Figure 16 : Analyse spectrale du flux sanguin de l'artère testiculaire du taureau (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). Les vitesses systolique et diastolique sont mesurées par l'échographe à l'aide d'un caliper positionné par l'opérateur sur chaque courbe obtenue. ..	46
Figure 17 : Coupe transversale du cordon spermatique de taureau. Les différentes coupes de vaisseaux de plus large diamètre correspondent à l'artère testiculaire circonvolutionnée, elle est entourée par le plexus pampiniforme d'aspect spongieux (Hees et al., 1984).	47

Figure 18 : Image d'échographie Doppler de l'artère testiculaire du taureau (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). L'angle θ entre le faisceau d'ondes ultrasonores et le vaisseau sanguin est de 0° la mesure est donc correcte.	48
Figure 19 : Échographie Doppler de l'artère testiculaire du taureau (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). L'angle θ entre la portion d'artère évaluée et le faisceau d'ultrasons est trop élevé	49
Figure 20 : Échographie Doppler de l'artère testiculaire du taureau (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). L'angle θ est adapté à la portion de l'artère testiculaire dans laquelle le flux sanguin est mesuré.....	50
Figure 21 : Échographie Doppler de l'artère testiculaire du taureau (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). Le flux sanguin mesuré dans la portion de l'artère testiculaire s'éloigne de la sonde. La courbe de vitesse est inversée et difficilement interprétable.	51
Figure 22 : Échographie Doppler couleur de l'artère testiculaire du taureau (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). La portion d'artère testiculaire évaluée est prévisualisée par échographie Doppler couleur afin de sélectionner une portion d'artère pour laquelle le sens du flux sanguin se dirige vers la sonde (rouge).	51
Figure 23 : Échographie Doppler de l'artère testiculaire du taureau en fonction du positionnement du volume sanguin évalué (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). Quand la mesure est effectuée au centre de l'artère testiculaire, les gammes de fréquence sont plus homogènes (à gauche), comparativement à un positionnement trop proche d'une paroi (à droite), l'échantillon n'est donc pas homogène, le spectre obtenu est de faible intensité.	52
Figure 24 : Relation entre les index de résistance vasculaire (RI) et les index de pulsatilité (PI) de l'artère testiculaire, évalués sur 14 taureaux par échographie Doppler (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz)	55
Figure 25 : Index de résistance (RI) en fonction de l'âge pour les 11 taureaux de race Blonde d'Aquitaine obtenus par échographie Doppler de l'artère testiculaire (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz)	56
Figure 26 : Index de résistance (RI) en fonction de l'âge pour les 11 taureaux de race INRA 95 obtenus par échographie Doppler de l'artère testiculaire (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz)	57
Figure 27 : Index de résistance de l'artère testiculaire (RI) des taureaux de race INRA 95 (n=5) et de race Blonde d'Aquitaine (n=9) dont l'âge est compris entre 18 et 25 mois (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz).....	58
Figure 28 : Vitesses au pic systolique du flux sanguin dans l'artère testiculaire mesurées le 31/05/23 (trait plein et affixe 1) et le 06/09/23 (trait pointillé et affixe 2) sur 6 taureaux (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). La lettre au-dessus de chaque boîte correspond à l'identification du taureau.	59
Figure 29 : Vitesses en fin de diastole du flux sanguin dans l'artère testiculaire mesurées le 31/05/23 (trait plein et affixe 1) et le 06/09/23 (trait pointillé et affixe 2) sur 6 taureaux (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz)	60
Figure 30 : Index de résistance vasculaire de l'artère testiculaire mesurées le 31/05/23 (trait plein et affixe 1) et le 06/09/23 (trait pointillé et affixe 2) sur 7 taureaux (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz)	60

Figure 31 : Vitesses moyennes maximales du flux sanguin dans l'artère testiculaire mesurées le 31/05/23 (trait plein et affixe 1) et le 06/09/23 (trait pointillé et affixe 2) sur 6 taureaux (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz)	61
Figure 32 : Index de pulsatilité de l'artère testiculaire mesurées le 31/05/23 (trait plein et affixe 1) et le 06/09/23 (trait pointillé et affixe 2) sur 6 taureaux (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz).	61
Figure 33 : Caractéristiques de la production de semence du taureau q, classé comme mauvais producteur, sur la période du 2 mai au 15 septembre. La production et la qualité sont variables : le nombre de doses produites est faible (a), la motilité progressive est faible (b) et le nombre d'anomalies des spermatozoïdes est régulièrement élevé (c) (pourcentage de spermatozoïdes normaux compris entre 80 et 95%)	63
Figure 34 a, b et c : Caractéristiques de la production de semence du taureau k, classé comme bon producteur, sur la période du 2 mai au 15 septembre. Le nombre de doses produites est élevé (a), la motilité progressive est élevée (b) et le pourcentage de spermatozoïdes normaux est toujours supérieur à 93% (c).	64
Figure 35 a, b et c : Caractéristiques de la production de semence du taureau j, classé comme bon producteur avec une dégradation à partir de mi-août. Le nombre de doses produites par éjaculat est correcte jusqu'au 24 août (a), la motilité progressive est élevée jusqu'à mi-août puis nous observons une diminution de cette dernière (b), de même pour le pourcentage de spermatozoïdes normaux qui se dégrade fortement à partir du 21 août (c).	65
Figure 36 : Index de résistance des taureaux de race Blonde d'Aquitaine (n=4) et INRA 95 (n=2) en fonction de leur score de production spermatique (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz).	66
Figure 37 : Index de résistance mesurés en mai (trait plein) et en septembre (trait pointillés) sur des taureaux de race Blonde d'Aquitaine (n=4) et INRA 95 (n=2) en fonction de leur score de production spermatique (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz).	67
Tableau 1 : Paramètres hémodynamiques du flux sanguin évalué en mode doppler pulsé. ...	27
Tableau 2 : Synthèse bibliographique des index de résistance et de pulsatilité ainsi que des vitesses au pic systolique (PSV) et en fin de diastole (EDV) obtenus par échographie Doppler de l'artère testiculaire dans sa partie funiculaire sauf mention contraire. * : écart-type ; ** : erreur type à la moyenne.	29
Tableau 3 : Synthèse bibliographique des facteurs influençant l'hémodynamique testiculaire et son évaluation échodoppler chez différentes espèces domestiques, chiens, équidés et ruminants	31
Tableau 4 : Conséquences de pathologies testiculaires sur les paramètres hémodynamiques et sur la semence	35
Tableau 5 : Présentation de l'identification, de l'âge au moment des mesures, de la date des mesures et du rythme de collecte des taureaux utilisés dans cette étude.	37
Tableau 6 : Description des taureaux utilisés dans l'objectif de la mise au point de la méthode	38
Tableau 7 : Description des taureaux utilisés dans l'objectif de déterminer l'effet de l'âge sur la résistance vasculaire.	38

Tableau 8 : Description des taureaux utilisés dans l'objectif de déterminer l'effet de la race sur la résistance vasculaire.	39
Tableau 9 : Description des taureaux utilisés dans l'objectif de déterminer l'effet d'un stress thermique sur une période prolongé sur les paramètres hémodynamiques testiculaires.	39
Tableau 10 : Vitesses maximales du flux sanguin au pic systolique, vitesses du flux sanguin en fin de diastole, moyennes des vitesses maximales et index de pulsativité de l'artère testiculaire mesurés à deux saisons, sur 7 taureaux (taureaux i à p) le 31 mai et sur 7 taureaux (taureaux i à q) le 6 septembre (moyenne \pm écart-type)	53
Tableau 11 : Index de résistance vasculaire de l'artère testiculaire mesurés à trois saisons, sur 15 taureaux (indiqués par des lettres, de b à q) dont 6 taureaux le 30 novembre (taureaux b à h), 8 taureaux le 31 mai (taureaux i à p) et 8 taureaux le 6 septembre (taureaux i à q) (moyenne \pm écart-type).	54

LISTE DES ABBREVIATIONS

CGP : cellules germinales primordiales
THI : index de température – humidité relative
Fe : fréquence d'émission
Fr : fréquence de réception
 ΔF : glissement de fréquence ou Doppler shift
PRF : pulse repetition frequency ou fréquence de récurrence
PSV : vitesse au pic systolique
EDV : vitesse en fin de diastole
TAMV : vitesse maximale moyenne
PI : index de pulsatilité vasculaire
RI : index de résistance vasculaire
hCG : hormone chorionique gonadotrope humaine
LH : hormone lutéinisante
FSH : hormone folliculo-stimulante

INTRODUCTION

La fertilité du taureau a un impact majeur sur les résultats de reproduction du troupeau. L'examen de l'appareil reproducteur du taureau est donc essentiel, il permet d'évaluer les capacités de reproduction des mâles, d'identifier une potentielle cause d'infertilité et de sélectionner les mâles présentant le meilleur potentiel reproducteur. L'avancée de la sélection génomique implique une sélection toujours plus précoce des taureaux sur leur valeur génétique, à condition qu'ils soient capables de produire de la semence de bonne qualité, ce qui nécessitent le développement de nouveaux marqueurs de fertilité. Le flux sanguin testiculaire transporte des nutriments, de l'oxygène, des hormones et joue également un rôle important dans la thermorégulation testiculaire. Dans un contexte de réchauffement climatique global, l'adaptation au stress thermique, et particulièrement la capacité de thermorégulation testiculaire, devient un enjeu majeur dans la sélection des taureaux. En effet, certaines caractéristiques morphologiques testiculaires permettent une meilleure thermorégulation par dissipation de chaleur et donc un meilleur maintien de la production spermatique lors de stress thermique.

L'échographie Doppler est d'ores et déjà utilisée en reproduction bovine pour l'évaluation de la vascularisation de l'appareil génital femelle et notamment du corps jaune (Viana et al., 2013). En effet, la vascularisation de l'appareil génital femelle varie au cours du cycle œstral et de la gestation. L'échographie Doppler de l'artère testiculaire a fait l'objet de recherche clinique pour évaluer le flux sanguin testiculaire. Cependant, à ce jour, cette technique n'est pas utilisée sur le terrain pour investiguer l'origine de l'infertilité ou dans le cadre de l'évaluation de la fonction sexuelle du taureau.

Quelques études, réalisées principalement en Amérique du Sud et pays subtropicaux, montrent l'influence de paramètres physiologiques et pathologiques sur les paramètres hémodynamiques testiculaires. Cependant, il existe très peu de données sur des taureaux de race européenne. Notre étude a pour but :

- de mettre au point une technique d'évaluation des caractéristiques du flux sanguin testiculaire par échographie Doppler,
- d'obtenir des données hémodynamiques testiculaires sur des taureaux de races européennes et
- d'établir la relation entre la vascularisation testiculaire et les caractéristiques des taureaux (âge, race et la production spermatique) ou de l'environnement (variations de température).

Dans une première partie bibliographique, nous rappellerons le déroulement de la spermatogenèse et la régulation de la thermorégulation testiculaire ainsi que le principe de l'échographie Doppler. Puis, nous ferons une synthèse des connaissances actuelles sur l'évaluation des paramètres hémodynamiques testiculaires par échographie Doppler ainsi que leurs variations physiologiques et pathologiques

Dans une seconde partie expérimentale, nous présenterons les matériels et les méthodes de notre étude. Nos résultats seront ensuite exposés et discutés.

I. Thermorégulation et spermatogenèse

A. Effet du stress thermique sur la spermatogenèse

La spermatogenèse désigne le processus de développement des spermatozoïdes à partir de cellules germinales primordiales (CGP). Chez les taureaux, la spermatogenèse se déroule selon trois phases distinctes comprenant la spermatocytogenèse, la méiose et la spermiogenèse, d'une durée respective de 21, 23 et 17 jours, soit au total 61 à 62 jours (Hochereau et al., 1964 ; Rahman et al., 2018). Durant la spermatocytogenèse, des mitoses successives à partir des CGP conduisent à la formation des spermatogonies de type A1, A2, A3, A4, intermédiaires puis B (Figure 1).

Toutes ces divisions sont réalisées dans la partie basale des tubules séminifères (Figure 2). Les spermatogonies de type B se divisent par mitose au moins une ou deux fois pour former les spermatocytes primaires.

La méiose se déroule en 2 étapes : durant la méiose I, les spermatocytes primaires répliquent leur ADN puis durant la méiose II, les spermatocytes secondaires subissent une seconde division méiotique pour former des cellules haploïdes : les spermatides (Rahman et al., 2018). Enfin, la spermiogenèse consiste en la différenciation des spermatides en cellules mobiles hautement spécialisées, les spermatozoïdes. Ainsi, lors de la spermiogenèse, la chromatine nucléaire est condensée, l'acrosome est formé, le cytoplasme est éliminé sous forme de gouttelette cytoplasmique proximale et le flagelle est formé. Les spermatozoïdes migrent alors vers l'épididyme où ils finissent leur maturation et sont stockés, ce transit épидидymaire dure environ 8 jours (Hochereau et al., 1964 ; Jégou et al., 2014 ; Rahman et al., 2018).

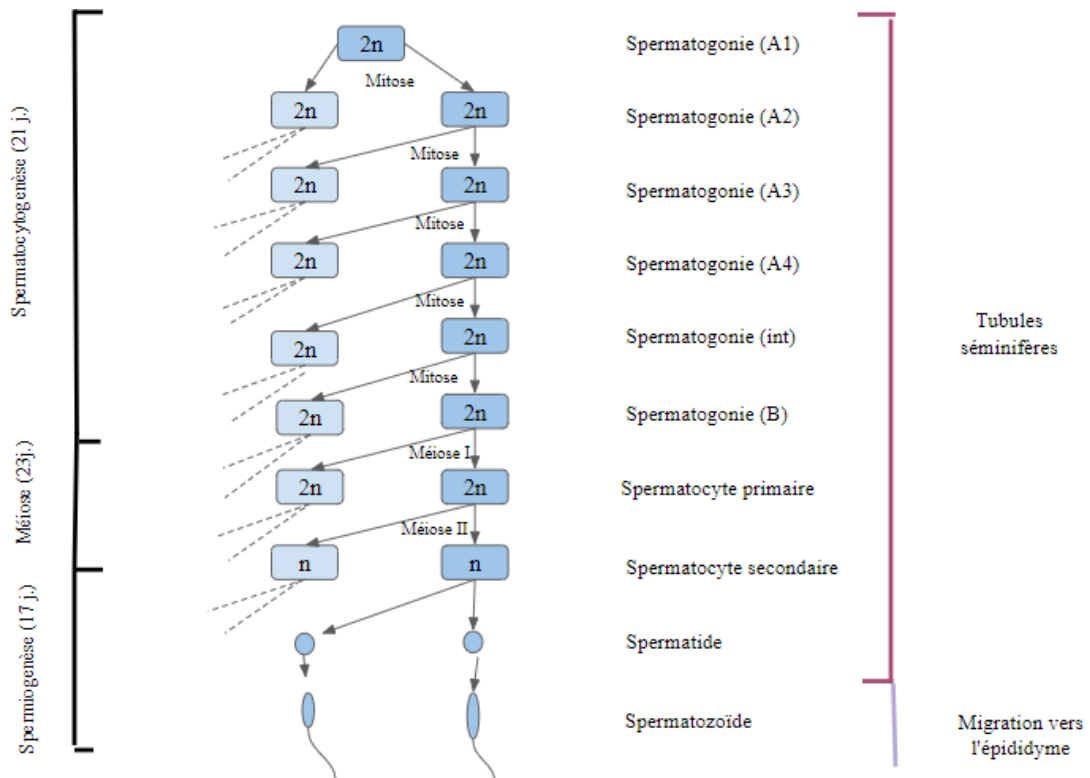


Figure 1 : Étapes de la spermatogenèse chez le taureau d'après Rahman et al. 2018

Durant la spermatocytogenèse, des mitoses successives des cellules germinales primordiales conduisent à la formation des spermatogonies de type A1, A2, A3, A4, intermédiaires puis B. Les spermatogonies de type B se divisent par mitose pour former les spermatocytes primaires.

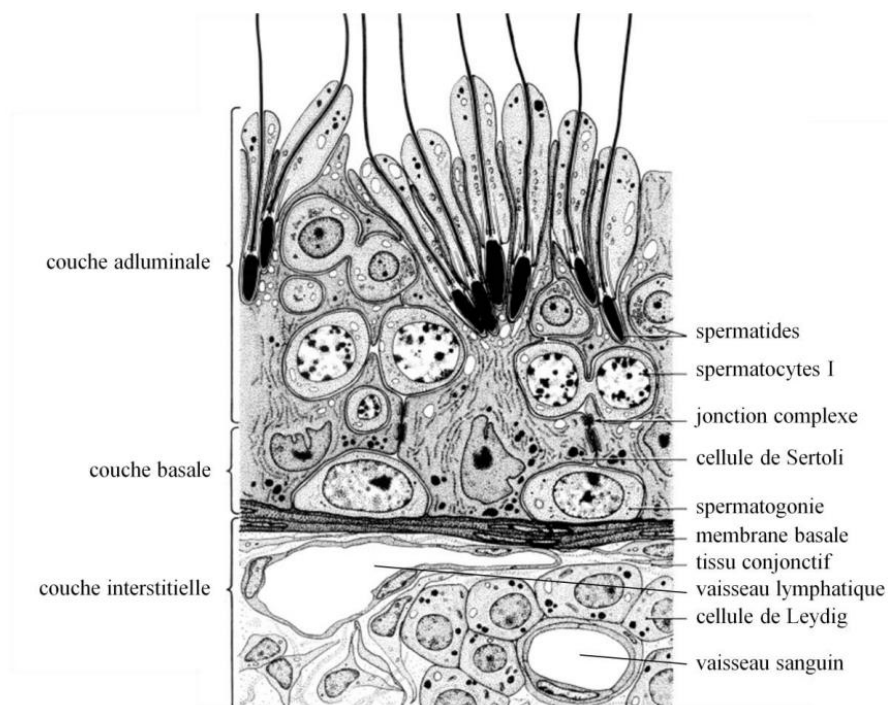


Figure 2 : Schéma d'une coupe histologique transversale de tubes séminifères de bovin illustrant la localisation des différents stades de cellules germinales au sein des tubes séminifères (Amann et al., 1983)

Une augmentation de la température testiculaire peut avoir différentes origines :

- Syndrome fébrile
- Défaut de thermorégulation lié à :
 - Une hyperkératose scrotale,
 - Un décubitus prolongé,
 - Un engraissement excessif avec dépôt de tissu adipeux dans le scrotum associé à une alimentation avec un fort apport énergétique (Kastelic et al., 2018).

Par ailleurs, une augmentation importante de la température ambiante et de l'humidité relative peut entraîner un stress thermique, causant ainsi un dépassement des mécanismes physiologiques de thermorégulation et conduisant à une altération de la spermatogenèse. Le stress thermique peut être évalué chez les bovins par l'index température-humidité relative (THI) calculé selon la formule suivante (Kendall et al., 2009) :

$$THI = (1.8T + 32) - ((0.55 - 0.0055H)(1.8T - 26))$$

avec T, la température ambiante en degrés Celsius et H l'humidité relative en %. Une classification du stress thermique a pu être établie pour des vaches laitières en production en prenant en compte les effets du THI sur la température corporelle, la production laitière et la fréquence respiratoire (Burgos-Zimbelman et Collier, 2011) :

- Stress thermique très léger : THI > 68 ; température rectale > 38,5°C
- Stress thermique léger : THI > 72 ; température rectale > 39°C
- Stress thermique modéré : THI > 80 ; température rectale > 40°C
- Stress thermique sévère : THI > 90 ; température rectale > 41°C
- Stress thermique très sévère : THI > 98 ; mort

Les conséquences d'une augmentation de la température ambiante sur les paramètres séminologiques des taureaux ont été évaluées chez différentes races dans des centres de production de semence du sud-ouest de la France et sur une période de 10 ans (Garrigue, 2017).

L'étude a montré que pour les taureaux de races allaitantes, l'augmentation de l'index de stress thermique entraînait une augmentation du pourcentage de spermatozoïdes présentant des anomalies morphologiques, une diminution de la motilité et une diminution de la résistance des spermatozoïdes à la congélation. Cependant, le stress thermique ne modifie pas la quantité de semence produite. Ainsi, l'effet délétère de la température ou de la saison est observé essentiellement sur la qualité de la semence mais pas ou peu sur la quantité de production (Kastelic et al., 2018).

Pour les taureaux de races laitières, les résultats sont plus difficiles à interpréter. Dans certaines études, aucun effet de la température ou de la saison n'a été mis en évidence sur les paramètres séminologiques. A l'inverse, dans d'autres études, les températures élevées ou la saison chaude ont entraîné une augmentation du pourcentage des anomalies morphologiques et une diminution de la motilité des spermatozoïdes.

Par ailleurs, les zébus (*Bos taurus indicus*) présentent une meilleure résistance au stress thermique que les taureaux (*Bos taurus taurus*) (Nichi et al. 2006 ; Koivisto et al. 2009) ou que les mâles croisés zébus-taureaux charolais (Brito et al. 2003). Ainsi, les effets du stress thermique sur les paramètres séminologiques sont plus marqués chez *Bos taurus*, avec un retour à une production spermatique normale plus tardif en comparaison aux zébus (Johnston et al., 1963).

B. Mécanismes de thermorégulation des testicules

Chez la plupart des mammifères, la spermatogenèse se déroule dans les testicules à une température inférieure de 4 à 6°C à la température corporelle (Cook et al., 1994). Les mécanismes de thermorégulation sont donc essentiels pour maintenir les testicules à une température adéquate, quelles que soient les conditions climatiques.

Différentes caractéristiques anatomiques permettent de réguler la température testiculaire (Figure 3). La faible couverture adipeuse du scrotum, le relâchement des muscles dartos et crémaster permettant d'éloigner les testicules du corps en cas d'augmentation de la température ambiante et la présence de glandes sudoripares qui sécrètent un sébum contribuant aux pertes de chaleur par évaporation (Collier et al., 2015). Par ailleurs, le cône vasculaire du cordon spermatique contribue à la thermorégulation grâce à un système d'échange de chaleur à contre-courant. En effet, le flux sanguin artériel est la principale source de chaleur au niveau du testicule. Le sang artériel est donc refroidi par des échanges avec le sang veineux.

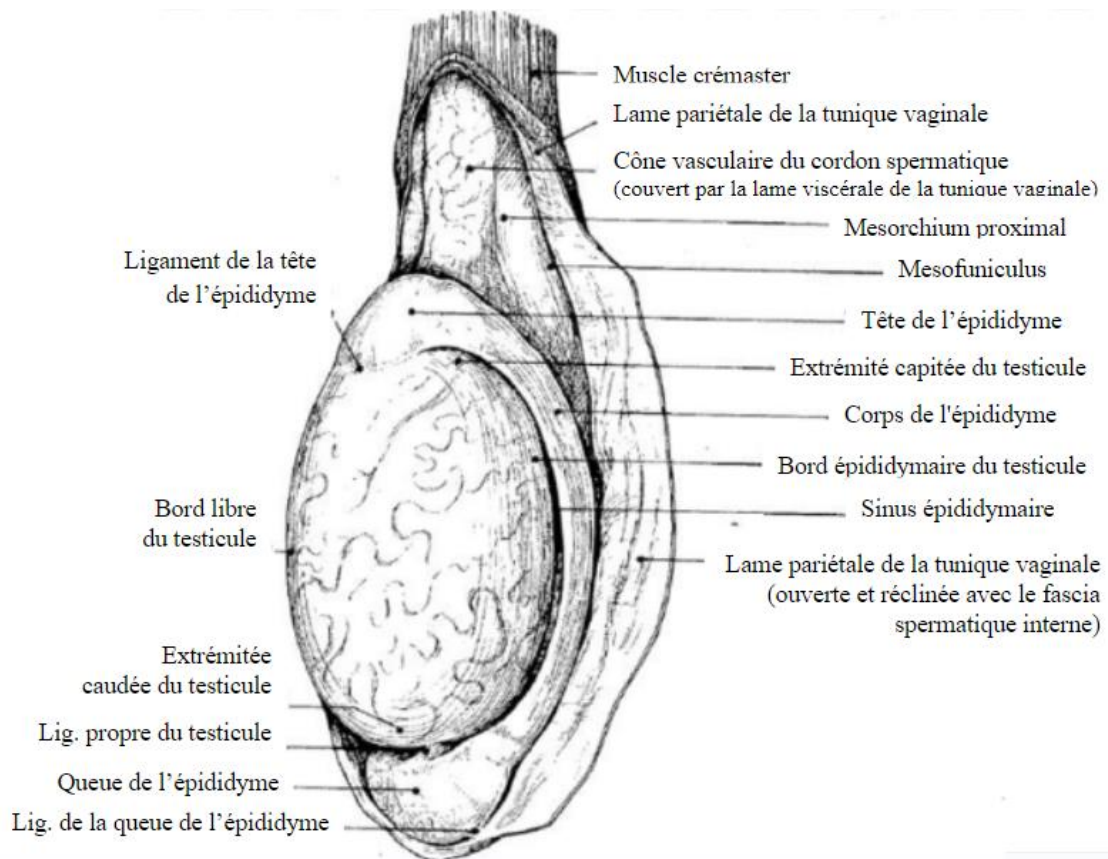


Figure 3 : Vue caudale du testicule gauche illustrant certaines caractéristiques anatomiques du testicule permettant sa thermorégulation : muscle crémaster et cône vasculaire.

Sources : Robert Barone, *Anatomie comparée des mammifères domestiques*, Paris, France, Vigot Frères, 1965

Le cône vasculaire se compose des veines testiculaires, très ramifiées avec de nombreuses anastomoses veino-veineuses formant le plexus pampiniforme, entourant l'artère testiculaire (Figure 4). L'efficacité du transfert de chaleur dépend de la surface d'échange, des températures du sang veineux et artériel et du débit sanguin.

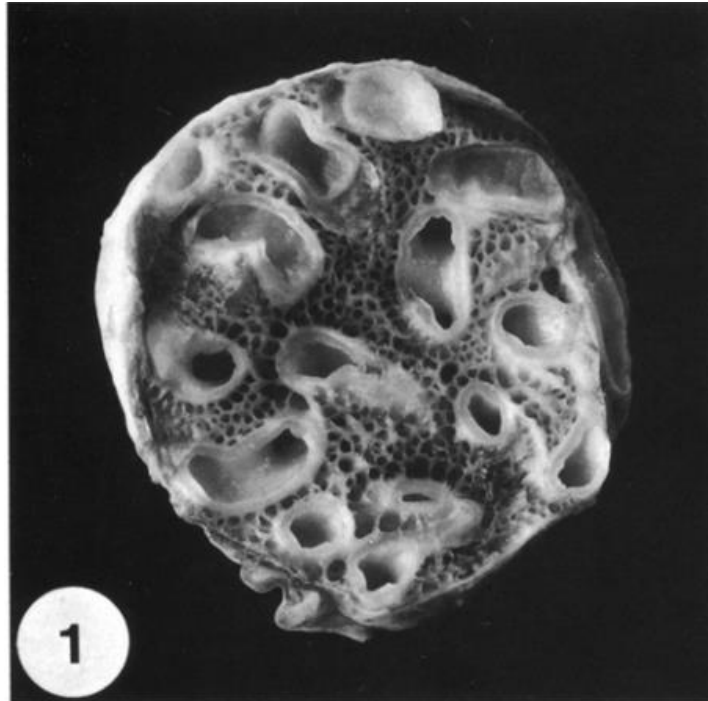


Figure 4 : Coupe transversale du cordon spermatique de taureau. Les différentes coupes de vaisseaux de plus large diamètre correspondent à l'artère testiculaire circonvolutionnée, elle est entourée par le plexus pampiniforme d'aspect spongieux (Hees et al., 1984)

Le plexus pampiniforme est composé de veines de 3 diamètres différents qui s'anastomosent fréquemment. Le réseau veineux forme un manteau recouvrant la surface de l'artère testiculaire (Figure 5) (Hees et al., 1984).

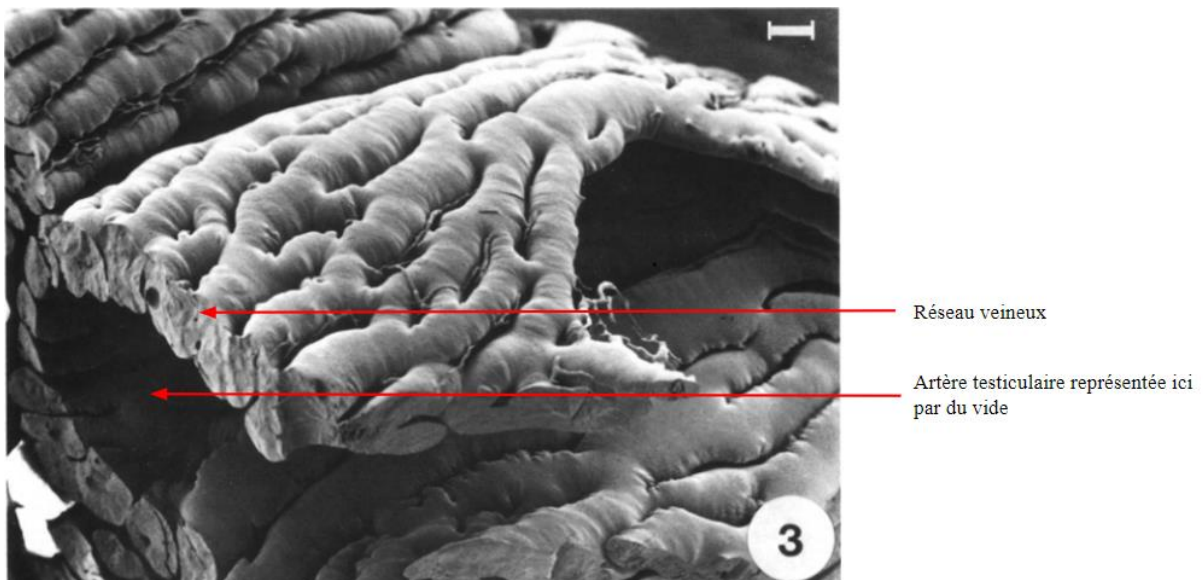


Figure 5 : Représentation du plexus veineux formant de nombreuses anastomoses et entourant l'artère. Les veines peuvent atteindre un diamètre minimal de 10 μ m (Hees1 et al., 1984).

L'artère testiculaire forme de nombreuses convolutions tout en conservant une lumière de diamètre constant, comprise entre 2,2 et 3,8 mm chez le buffle (Sary et al., 2020) et 1,6 et 2,0

mm chez le taureau (Hees et al., 1984). Elle peut être divisée en 3 portions abdominale, funiculaire et marginale (Sary et al., 2020, Figure 6) :

- La partie abdominale s'étend de l'aorte abdominale à l'anneau inguinal. Elle ne forme pas de circonvolution et ne se divise pas.
- La partie funiculaire est comprise entre l'anneau inguinal et la partie capitée du testicule. Elle effectue des spirales irrégulières avec de nombreux tours formant une structure en forme de cône couvrant l'extrémité capitée. Des branches émanent de cette portion, alimentant ainsi l'épididyme (via l'artère épидидymaire), le tissu adipeux, le fascia spermatique, le muscle crémaster et la tunique vaginale.
- La partie marginale continue distalement jusqu'à l'extrémité caudée du testicule où elle se divise en portion latérale et médiale chacune se divisant en 7 à 9 branches aux tracés sinueux. Ces branches, adhérentes entre elles, forment la tunique artérielle.

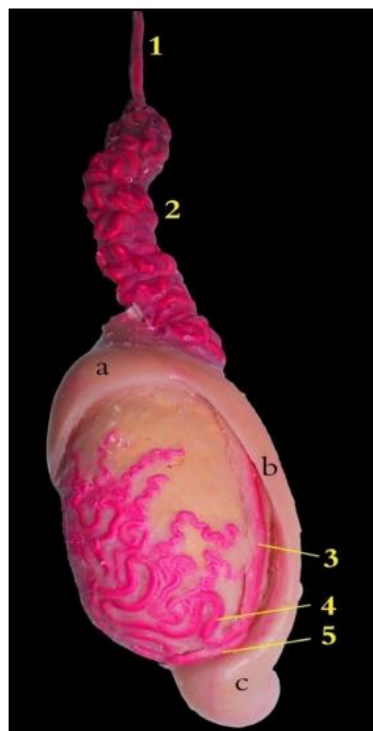


Figure 6 : Testicule de buffle (visualisation de l'artère testiculaire par injection de latex)

Légende : (1) partie abdominale de l'artère testiculaire, (2) partie funiculaire de l'artère testiculaire, (3) partie marginale de l'artère testiculaire, (4) artère testiculaire latérale, (5) tunique artérielle. (a) tête (b) corps et (c) queue de l'épididyme (Sary et al., 2020).

Les mécanismes de thermorégulation testiculaire peuvent varier en fonction de la conformation du contenu scrotal et donc de la race. L'efficacité de la thermorégulation dépend :

- De la longueur et du volume de l'artère testiculaire
- De la distance entre l'artère et les veines testiculaires dans le plexus pampiniforme

- Des circonvolutions plus importantes de l'artère dans sa partie funiculaire entraînent une diminution de la vitesse du flux sanguin (Sary et al., 2020).

Une question importante est de savoir si les différences anatomiques du système vasculaire testiculaire, permettant de diminuer la température testiculaire, sont associées à une meilleure production spermatique.

La production spermatique est dégradée lors de stress thermique cependant les caractéristiques morphologiques de certaines espèces permettent un meilleur maintien de cette production en période chaude. Par exemple, la production spermatique des zébus est moins affectée par l'augmentation de température ambiante que les taureaux ou les mâles croisés taureaux-zébus (Brito et al., 2004), en raison de l'enchevêtrement plus important entre l'artère et les veines testiculaires et de l'augmentation de la longueur et du volume des artères testiculaires chez les zébus.

De plus, l'étude menée par Brito en 2004 sur des zébus, des taureaux et des croisés zébus-taureaux montre qu'une distance réduite entre l'artère et la veine, une paroi artérielle plus fine, une peau scrotale plus fine et un rapport entre le volume artériel et le volume testiculaire plus élevé sont associés à une meilleure production de semence. Enfin chez les taureaux, la diminution de la distance entre l'artère et la veine testiculaire augmente la proportion de spermatozoïdes morphologiquement normaux et la diminution de la distance entre le cône vasculaire et la peau augmente la proportion de spermatozoïdes mobiles (Cook et al., 1993 ; Kastelic et al., 2018). En effet, ces caractéristiques morphologiques permettent une meilleure dissipation de la chaleur provenant du sang artériel.

Certains auteurs ont émis l'hypothèse selon laquelle l'altération de la spermatogenèse lors d'augmentation de la température testiculaire est due à une hypoxie associée à une augmentation du métabolisme et donc une surconsommation de dioxygène (Waites et al., 1964). Toutefois, lors d'une augmentation de la température ambiante à 30°C, le débit sanguin testiculaire augmente, ce qui conduit à accroître les échanges de chaleur (Barros Adwell et al., 2018). De plus, l'apport et la consommation de dioxygène augmentent sans augmentation des lactates sanguins (Brito et al., 2004, Rizzotto et al., 2020), ce qui conduit à réfuter l'hypothèse selon laquelle l'altération de la spermatogenèse lors d'augmentation de la température testiculaire est due à une hypoxie. Ainsi, les effets du stress thermique sur la spermatogenèse seraient donc essentiellement dus à une augmentation de température testiculaire et non à une hypoxie testiculaire.

II. Apport de l'échographie Doppler à l'examen de l'appareil reproducteur du taureau

A. L'échographie Doppler (Grataloup-Oriez, 1999)

1. Principe de l'échographie Doppler

Lorsqu'un faisceau d'ondes ultrasonores, émis par une source, traverse des tissus biologiques, il rencontre un certain nombre de cibles, ou interfaces fixes. La fréquence réfléchiée par des cibles fixes est identique à la fréquence émise. Cependant, nous observons un changement de fréquence d'une source d'ondes lorsqu'il y a déplacement relatif de la source ou de l'observateur : c'est le principe de l'effet Doppler (Grenier, 2013).

Lorsqu'un faisceau d'ultrasons émis par une source rencontre un objet immobile, la fréquence réfléchiée par cet objet est identique à la fréquence émise. Quand l'objet se déplace, la fréquence réfléchiée est différente de la fréquence émise : elle augmente si la source ou l'observateur se rapproche, elle diminue dans le cas contraire. Cette différence (ΔF) entre la fréquence d'émission (F_e) et la fréquence de réception (F_r) constitue l'effet Doppler et est appelée glissement de fréquence ou Doppler shift, elle est exprimée en Hertz (Hz) et est située dans un spectre audible (entre 20Hz et 20kHz) (Figure 7).

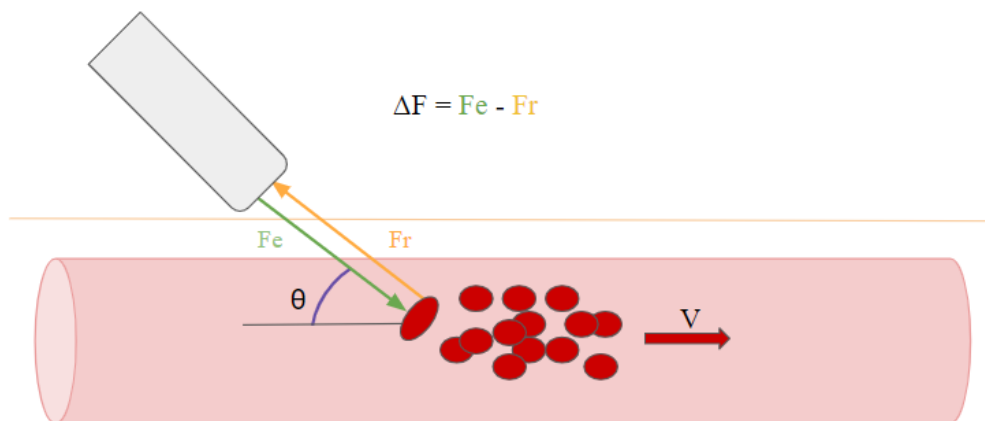


Figure 7 : Schéma du principe de l'effet doppler : la fréquence de l'onde réfléchiée F_r par des hématies en mouvement dans un vaisseau sanguin est différente de celle de l'onde incidente F_e , θ étant l'angle formé par les faisceaux d'ultrasons et le vaisseau sanguin et V la vitesse des hématies (d'après Grataloup-Oriez et al., 1999)

Ainsi, l'effet Doppler permet de détecter les mouvements au sein des tissus, notamment le mouvement des hématies dans un vaisseau. L'effet Doppler ΔF , s'exprime par la relation suivante :

$$\Delta F = \frac{2 F_e V \cos \theta}{c}$$

Avec : F_e : fréquence d'émission de l'onde émise par la sonde (entre 2-10 MHz) ; V : vitesse des éléments figurés dans le vaisseau ; θ : angle entre l'axe du vaisseau et l'axe du faisceau d'ondes ultrasonores ; c : vitesse moyenne des ultrasons dans les tissus mous (1540 m/s).

L'angle θ est un paramètre clé de l'effet Doppler. En effet, pour un angle de 90° entre le vaisseau et le faisceau d'ondes ultrasonores, $\cos \theta = 0$, ce qui signifie que ΔF est nulle et le signal Doppler absent. Au contraire, si l'onde émise est dans l'axe du vaisseau sanguin, $\cos \theta = 1$, l'effet Doppler est maximal.

2. Les différents modes Doppler

a) Le Doppler continu

Le Doppler continu utilise une émission en continu des ultrasons, avec une sonde à deux cristaux, l'un émetteur, l'autre récepteur. La variation de fréquence du faisceau incident résulte de la sommation de tous les flux sanguins rencontrés sur le trajet du faisceau ultrasonore (Dauzat, 2012). Le mode Doppler continu peut donc être utilisé pour mesurer des vitesses très élevées ou très lente cependant il ne permet pas de différenciation de profondeur. Son coût est faible.

b) Le Doppler pulsé

Le Doppler pulsé est constitué d'une sonde qui, alternativement, émet une onde ultrasonore et reçoit le faisceau réfléchi (Figure 8). Entre deux impulsions, le signal réfléchi est analysé pendant une durée très courte appelée "fenêtre d'écoute". Connaissant la vitesse des ondes ultrasonores dans les tissus mous il est possible de régler la profondeur de l'échantillon étudié en enregistrant que les fréquences réfléchies à la profondeur définie (Chetboul, 2012). La fréquence de répétition ou PRF (*pulse repetition frequency*) correspond au nombre de signaux émis par seconde et détermine la profondeur du champ d'exploration, car il faut attendre le retour de tous les échos avant d'émettre une nouvelle impulsion :

$$PRF = \frac{c}{2d}$$

avec c la vitesse des ultrasons dans les tissus mous (soit en moyenne 1540 m/s) et d , la profondeur du vaisseau exploré.

L'avantage du Doppler pulsé est sa résolution spatiale qui permet de focaliser l'examen sur un vaisseau à analyser. Ceci nécessite de coupler l'analyse Doppler et échographique en mode B, ce qui est possible avec des systèmes duplex. Le système duplex permet un repérage spatial morphologique sous la forme d'une image échographique permettant l'identification du

vaisseau sanguin cible. Pour cela, les fréquences d'émission sont différentes et alternées, la fréquence d'émission pour le Doppler étant plus basse que la fréquence de la sonde pour le mode B (par exemple : 10 MHz sonde échographique, 5 MHz pour le Doppler).

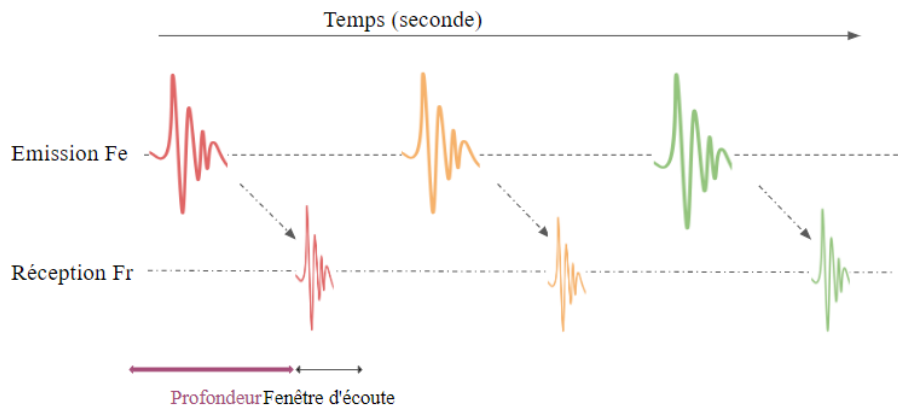


Figure 8 : Schéma d'un doppler pulsé. L'émission spectrale du signal Fe est discontinue. Le nombre de signaux émis par seconde est la PRF (d'après Dauzat, 2012)

c) Le Doppler couleur

Le Doppler couleur permet une analyse Doppler en tout point de l'image échographique et effectue une analyse spectrale du signal pour obtenir un codage couleur. Conventionnellement, les flux allant vers la sonde sont codés en rouge et ceux s'en éloignant sont codés en bleu. Ce mode Doppler peut être assimilé à un système Doppler pulsé multiporte et multiligne. Le procédé d'analyse du signal appelé l'autocorrélation permet d'obtenir l'information Doppler sur toute la longueur d'une ligne, après deux impulsions, en analysant les modifications de la phase entre les deux signaux. Cependant, le rapport signal/bruit est très faible, ce qui implique de répéter les impulsions entre 16 et 32 fois pour chacune des lignes échantillonnées (Grenier, 2013). Les vitesses obtenues seront donc d'autant plus précises que la fenêtre d'échantillonnage est réduite. Les flux turbulents ont un spectre de vitesses plus larges que des flux laminaires, cette variance est représentée par un codage couleur vert ou jaune (Chetboul, 2012)

3. Signal Doppler et analyse spectrale

Le signal Doppler peut être obtenu sous différentes formes : le signal auditif, le signal spectral graphique et le signal en codage couleur. Seule l'analyse spectrale est développée ci-dessous.

Le signal graphique correspond à l'analyse spectrale par transformation rapide de Fourier de tous les glissements de fréquence. Il prend en compte la fréquence, le temps et l'intensité, correspondant à l'énergie qui augmente avec la densité des globules rouges à l'origine de cette valeur de glissement de fréquence. Une enveloppe de vitesse évoluant en fonction du temps est ainsi obtenue.

Le spectre peut être modifié selon :

- La position et la taille du volume sanguin évalué : les gammes de vitesses au centre du vaisseau sanguin ne sont pas identiques à celles près de la paroi ou incluant la paroi. Il est donc nécessaire de limiter l'analyse au centre du vaisseau sanguin pour obtenir une gamme de vitesses plus homogène
- Le gain : le niveau du gain spectral détermine l'apparition ou non de points à faible énergie sur la courbe spectrale
- Les filtres de parois : un filtre "passe-haut", élimine les basses fréquences liées aux mouvements des parois vasculaires qui ne correspondent pas à du flux. Plus ce seuil est élevé, plus les basses fréquences d'origine circulatoire vont être éliminées
- La PRF : son niveau détermine l'échelle de fréquences de l'analyse spectrale, elle est fonction de la vitesse du flux sanguin et de la profondeur du vaisseau analysé. La PRF détermine également la sensibilité aux flux. Une PRF basse est nécessaire pour explorer en profondeur et détecter des flux lents. Une PRF élevée est nécessaire pour bien analyser les flux rapides.

4. Réglages et optimisation

a) Sonde

Comme en mode B, la fréquence d'émission de la sonde doit être adaptée à la région étudiée. Pour les vaisseaux profonds, les sondes utilisées sont de 3 MHz, voire de 2 MHz alors que pour les vaisseaux superficiels, les fréquences varient de 5 à 13 MHz. L'artère testiculaire étant superficielle, la fréquence des ondes ultrasonores utilisée est de 5 MHz.

b) Gamme de vitesses

Une gamme de vitesses échantillonnées trop élevée entraîne un phénomène d'aliasing gênant l'interprétation. Si la fréquence d'échantillonnage est inférieure au double de la fréquence analysée, il existe un codage « inversé » des fréquences élevées et apparaît alors le phénomène d'aliasing.

La fréquence maximale ΔF_{max} qui peut être évaluée, aussi appelée limite de Nyquist correspond donc à la moitié de la PRF (Chetboul, 2012).

En analyse spectrale, l'échelle utilisée doit être bien adaptée aux vitesses afin de ne pas faire d'erreur d'interprétation sur la forme du spectre, notamment sur la mesure du temps de montée systolique.

c) Filtres de paroi

Les parois des vaisseaux sanguins réfléchissent les ondes échographiques, ce qui génère un signal de basse fréquence et de haute intensité. Afin d'éliminer ces basses fréquences des filtres "passe-haut" sont utilisés. Cependant, les filtres doivent être ajustés au minimum nécessaire, car ils éliminent également les fréquences Doppler basses étudiées, ce qui peut constituer un

biais. Le filtre de paroi doit être parfaitement adapté au vaisseau étudié, pour ne pas masquer les fréquences basses utiles.

d) Gain

Le gain spectral et le gain couleur doivent être également adaptés afin de limiter le « bruit de fond » spectral ou coloré. Plus le gain est faible plus les points de faible intensité vont disparaître du spectre.

e) Taille de la fenêtre couleur

Pour conserver une cadence d'images satisfaisante, la taille de la fenêtre couleur ne doit pas être trop importante et restreinte au vaisseau étudié notamment pour la profondeur afin de ne pas diminuer la cadence d'images en analysant inutilement des profondeurs trop élevées.

5. Facteurs limitants et artéfacts

a) Limites liées à l'angle entre le faisceau ultrasonore et l'axe du vaisseau

Nous avons vu que l'angle θ entre l'axe du faisceau ultrasonore et celui du vaisseau étudié est un paramètre clé du signal Doppler. Il faut donc s'attacher, au cours d'un examen Doppler, à avoir un angle θ le plus proche de 0° possible (40° maximum) pour avoir une évaluation de la vitesse la plus exacte (Chetboul, 2012). Un angle supérieur à 40° n'est pas acceptable, compte tenu de l'erreur qu'il entraîne sur le calcul de la vitesse lorsqu'une erreur de 10° est effectuée dans l'appréciation de l'angle θ (plus de 22 % d'erreur relative sur la vitesse) (Grataloup-Oriez, 1999). Par exemple, lorsque l'angle θ réglé passe de 10° à 60° l'erreur relative passe de 4,8% à 32% (Figure 9).

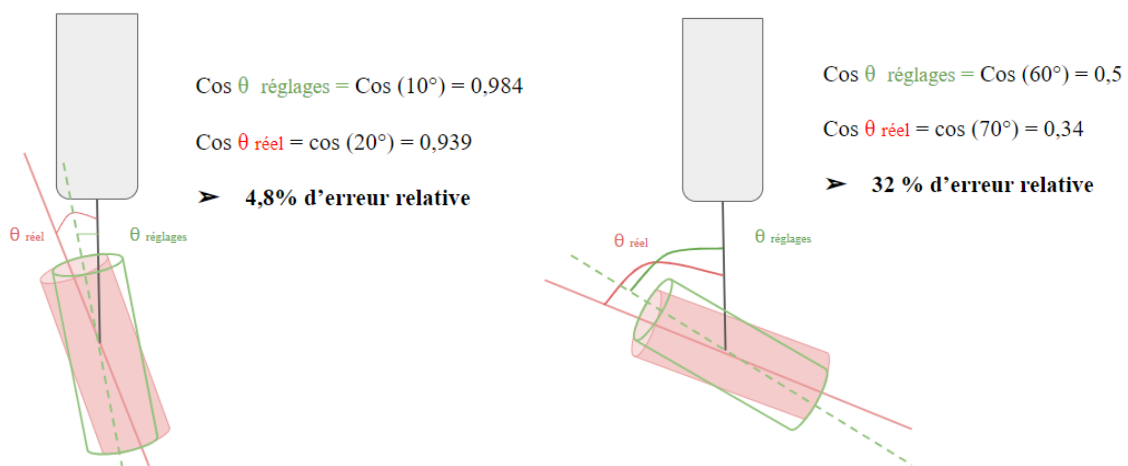


Figure 9 : Exemples de l'erreur relative liée à un angle θ réglé de 10° ou 60° .

b) Limites liées à la mesure des vitesses élevées : le phénomène d'aliasing

Le Doppler pulsé comprend un délai entre deux émissions de salves d'ondes ultrasonores, correspondant à la PRF. Le temps dédié à l'écoute des ondes réfléchies limite les vitesses maximales étudiables. Si la PRF est trop faible (inférieure au double de la fréquence analysée), les fréquences élevées apparaissent inversées, ce que l'on appelle le phénomène d'aliasing. Pour supprimer ce phénomène d'aliasing, on peut déplacer la ligne de zéro vers le bas, augmenter la PRF, diminuer la fréquence de la sonde (pour diminuer ΔF) ou utiliser la technique de Doppler en haute fréquence de répétition des impulsions dite de « *highPRF* ». Le transducteur est alors en position d'émission et de réception quasi continue, se rapprochant ainsi du mode Doppler continu, et n'est donc plus restreint par la fréquence de Nyquist.

c) Limites liées à la profondeur d'exploration

Lorsque la PRF est élevée, les signaux ultrasons provenant de vaisseaux profonds et parvenant à la sonde tardivement sont récupérés après le départ du pulse suivant (Figures 10 a et b). On observe alors un mélange de signaux correspondant à des vaisseaux profonds et superficiels ou l'apparition d'un flux superficiel "fantôme" qui correspond en fait à un vaisseau profond. Lorsqu'on suspecte cet artéfact la PRF doit être diminuée.

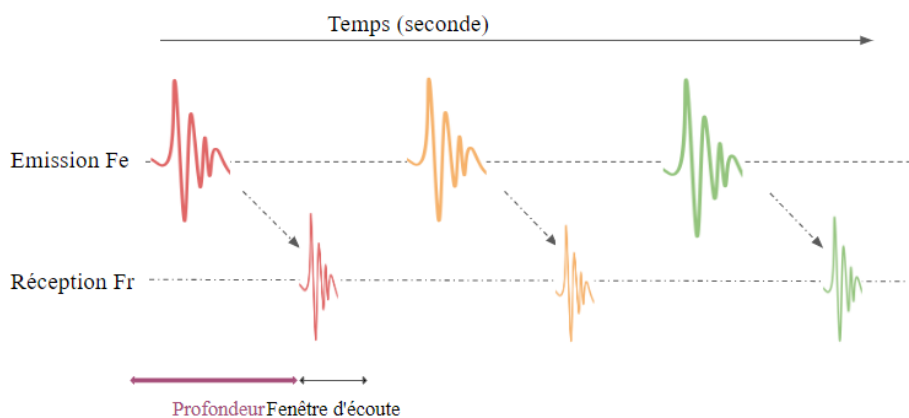


Figure 10a. : Une PRF faible permet la réception du signal ultrason Fr avant l'émission d'un nouveau pulse Fe (d'après Dauzat, 2012)

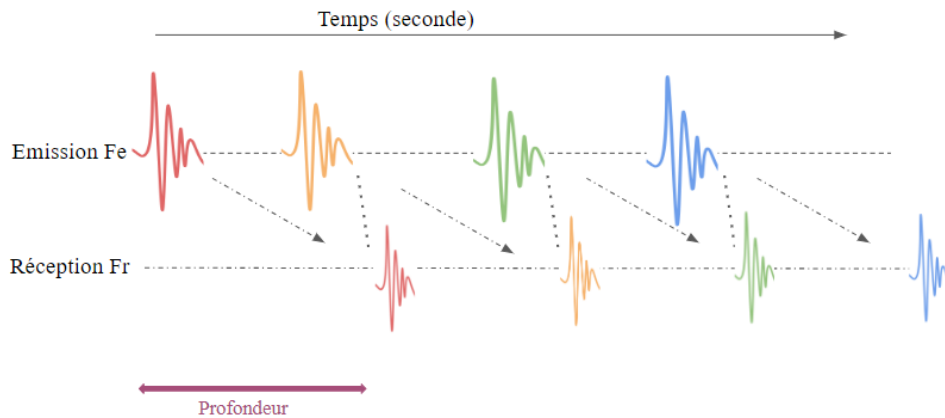


Figure 10b. : Lorsque la PRF est trop élevée la réception du signal ultrason Fr est effectuée après l'émission d'un nouveau pulse Fe (d'après Dauzat, 2012)

6. Principaux index de mesure

On distingue différents types d'artères :

- Artères à basse résistance : ce sont des artères dont le flux a une composante diastolique positive importante (artère carotide interne, artère rénale, artère hépatique, artère splénique...)
- Artères à haute résistance : ce sont des artères dont le flux diastolique est nul, voire inversé (artères des membres...)
- Artères à résistance moyenne, comme la carotide primitive dont le flux diastolique est modéré

L'artère testiculaire est considérée comme une artère à basse résistance.

L'artère à basse résistance se caractérise par un flux positif en diastole comme en systole. L'analyse de la courbe de vitesse permet de déterminer plusieurs paramètres caractérisant le flux sanguin (Tableau 1).

Les vitesses systolique et diastolique sont directement mesurées sur la courbe obtenue (Figure 11). L'index de résistance est un critère diagnostique permettant d'évaluer les résistances présentes en aval.

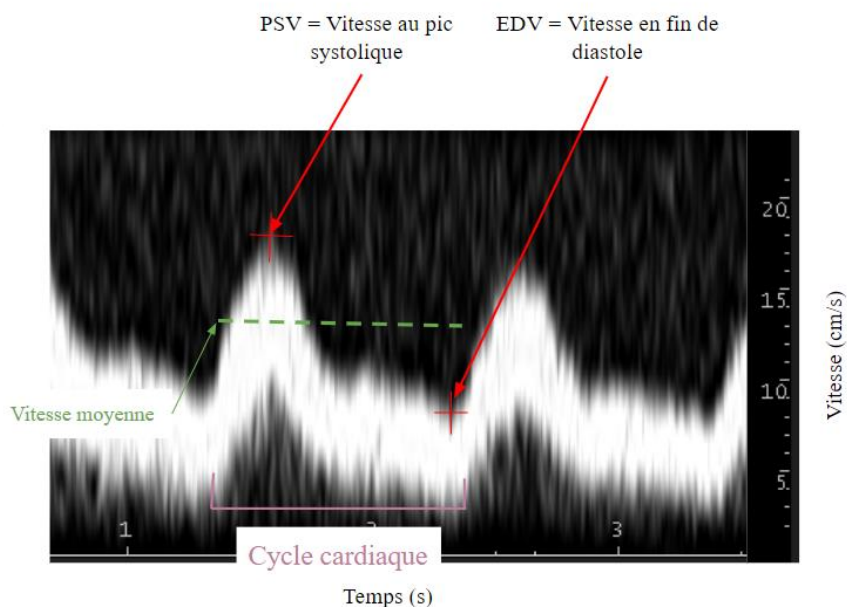


Figure 11 : Courbe de vitesses du flux sanguin. Les valeurs de vitesse au pic systolique et en fin de diastole sont mesurées sur la courbe.

Paramètres	Description
PSV	Vitesse au pic systolique
EDV	Vitesse en fin de diastole
TAMV	Vitesse maximale moyenne dans le temps = vitesse moyenne
Index de pulsatilité (PI)	$(PSV-EDV) / TAMV$. Il représente la vélocité moyenne du sang durant un cycle cardiaque.
Index de résistance vasculaire (RI)	$(PSV-EDV) / PSV$. Il représente du vaisseau au passage du sang. Plus elle augmente et moins la structure est vascularisée.
Flux sanguin artériel total (TABF)	Diamètre de l'artère x TAMV

Tableau 1 : Paramètres hémodynamiques du flux sanguin évalué en mode doppler pulsé.

B. L'échographie Doppler de l'artère testiculaire

Les paramètres hémodynamiques des flux sanguins de l'artère testiculaire ont été évalués par échodoppler chez différentes espèces : chiens, ânes, chevaux, boucs mais aussi sur l'homme.

1. Valeurs usuelles des paramètres hémodynamiques évalués par échographie doppler

Les études menées sur différentes espèces ont évalué les vitesses systoliques et diastoliques ainsi que pour les index RI et PI de l'artère testiculaire (Tableau 2).

Résultats obtenus	Espèce et effectif	Sources
RI : 0,87, 0,82 et 0,67 respectivement dans le plexus pampiniforme, la zone suprastestriculaire et la capsule testiculaire PI : 2,87, 2,36 et 1,27 respectivement dans le plexus pampiniforme, la zone suprastestriculaire et la capsule testiculaire PSV : 72,43, 56,51 et 29,14 cm/s respectivement dans le plexus pampiniforme, la zone suprastestriculaire et la capsule testiculaire EDV : 8,24, 8,56 et 8,87 cm/s respectivement dans le plexus pampiniforme, la zone suprastestriculaire et la capsule testiculaire	5 ânes catalans de 3 à 9 ans	Gacem et al., 2020
PI : $0,49 \pm 0,02$ * RI : $0,51 \pm 0,2$ * PSV : $16,33 \pm 3,84$ cm/s * EDV : $7,98 \pm 3,83$ cm/s *	29 taureaux croisés Nelore x Hereford de 12 mois	Claus et al., 2021
PI : $0,32 \pm 0,16$ * RI : $0,40 \pm 0,15$ * PSV : $19,00 \pm 6,00$ cm/s * EDV : $11,37 \pm 4,15$ cm/s *	19 taureaux croisés Nelore x Hereford de 24 mois	Claus et al., 2021
RI : $0,61 \pm 0,01$ * PSV : $13,95 \pm 4,4$ cm/s * EDV : $5,45 \pm 2,1$ cm/s *	18 taureaux Brune des Alpes	Gloria et al., 2018
RI : $0,41 \pm 0,02$ ** ; PI : $0,32 \pm 0,02$ ** Vitesse moyenne : $10,57 \pm 0,77$ **	57 taureaux Angus de 24 (n=33) à 28 mois (n=24)	Junior et al., 2018

RI : $0,38 \pm 0,01^{**}$; PI : $0,31 \pm 0,02^{**}$ Vitesse moyenne : $12,33 \pm 0,05^{**}$	94 taureaux Braford de 36 mois	
RI : $0,36 \pm 0,02^{**}$; PI : $0,30 \pm 0,02^{**}$ Vitesse moyenne : $16,28 \pm 1,02^{**}$	29 taureaux Brangus de 24 mois	
RI : $0,44 \pm 0,01^{**}$; PI : $0,35 \pm 0,02^{**}$ Vitesse moyenne : $13,09 \pm 0,57^{**}$	109 taureaux Hereford de 18 (n=94) et 24 mois (n=15)	
RI : $0,43 \pm 0,02^{**}$; PI : $0,35 \pm 0,02^{**}$ Vitesse moyenne : $8,76 \pm 0,40^{**}$	45 zébus Nelore de 30 mois	
RI : $0,55 \pm 0,05^{*}$; PI : $0,82 \pm 0,08^{*}$ PSV : $15,95 \pm 1,77^{*}$ EDV : $7,21 \pm 1,27^{*}$	5 chiens	Zelli et al., 2013
RI : $0,51 \pm 0,06^{**}$; PI : $0,82 \pm 0,23^{**}$ PSV : $19,7 \pm 2,8 \text{ cm/s}^{**}$ EDV : $8,3 \pm 0,4 \text{ cm/s}^{**}$	16 chiens adultes de différentes races	Gloria et al., 2020

Tableau 2 : Synthèse bibliographique des index de résistance et de pulsativité ainsi que des vitesses au pic systolique (PSV) et en fin de diastole (EDV) obtenus par échographie Doppler de l'artère testiculaire dans sa partie funiculaire sauf mention contraire. * : écart-type ; ** : erreur type à la moyenne.

Les index RI et PI varient en fonction de la portion d'artère testiculaire, de l'âge (Claus et al., 2021) et la race des animaux. Les taureaux (*Bos taurus*, Angus et Hereford), les zébus (*Bos indicus*) et les croisés (*Bos taurus x Bos indicus*) présentent un index de résistance compris entre $0,36 \pm 0,02$ et $0,51 \pm 0,2$. Nous remarquons que peu de mesures ont été réalisées sur des taureaux de races communément élevés en France et l'étude menée par Gloria en 2018 sur des taureaux de race Brune des Alpes montre un RI plus élevé ($0,61 \pm 0,01$).

Les vitesses systoliques et diastoliques sont des paramètres hémodynamiques plus variables que les index de résistance et de pulsativité, pour une même espèce et race et dans la même tranche d'âge. Cependant, pour l'espèce bovine, la vitesse systolique est comprise entre $13,95 \pm 4,4 \text{ cm/s}$ et $16,33 \pm 3,84 \text{ cm/s}$, en moyenne et la vitesse diastolique entre $5,45 \pm 2,1 \text{ cm/s}$ et $11,37 \pm 4,15 \text{ cm/s}$.

2. Facteurs physiologiques influençant les paramètres hémodynamiques testiculaires

Différents facteurs peuvent influencer le flux sanguin testiculaire. Ils sont résumés sur la figure 12.

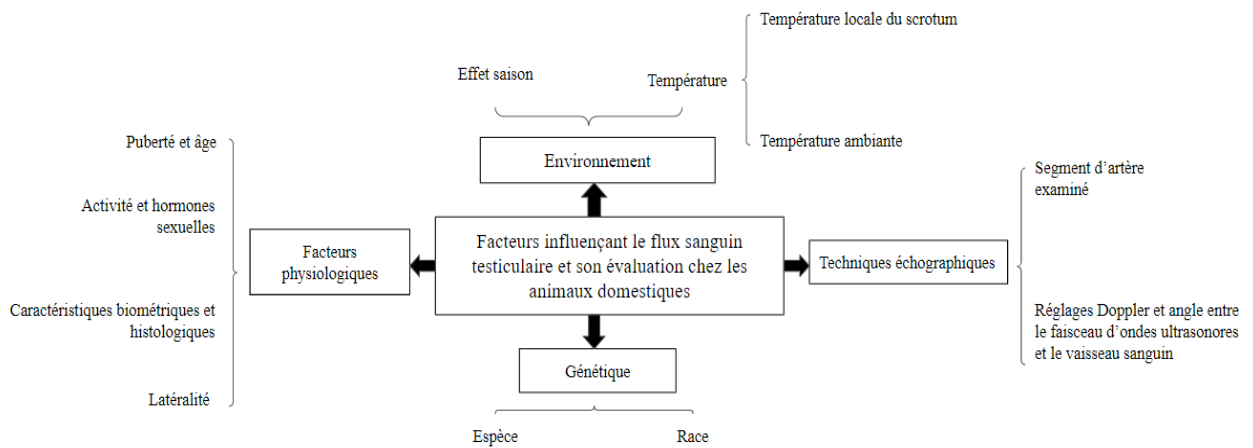


Figure 12 : Facteurs influençant l'hémodynamique testiculaire et son évaluation par échographie Doppler (d'après Samir et al., 2022)

Une synthèse des études sur les facteurs influençant l'hémodynamique testiculaire est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 3).

Facteurs	Variation des paramètres hémodynamiques de l'artère testiculaire	Espèces	Sources
Augmentation de température ambiante de 5°C à 35°C Augmentation THI	<ul style="list-style-type: none"> ● Augmentation du flux sanguin ● Pas d'effet sur la RI ● Corrélation positive avec la vitesse moyenne du flux sanguin artériel 	20 taureaux Angus 28 taureaux Angus et Polled Hereford de 12 à 18 mois	Barros-Adwell et al., 2018 Favaro et al., 2020
Augmentation localisée de la température testiculaire de 34°C à 40°C par rayonnement Augmentation de la température du scrotum	<ul style="list-style-type: none"> ● Augmentation du flux sanguin, pas de différence de PI et RI ● Augmentation de la vitesse moyenne du flux sanguin artériel 10 minutes après le début du traitement thermique du scrotum 	18 taureaux (9 Angus et 9 buffles Nelore) Taureaux Braford	Rizzotto et al., 2020 Junior et al., 2020
Saison	<ul style="list-style-type: none"> ● Le flux sanguin augmente au printemps ● Le flux sanguin augmente lors de la saison de reproduction ● L'index de résistance est corrélé négativement au volume testiculaire qui augmente lors de la saison de reproduction ● Aucune variation des paramètres hémodynamiques testiculaires n'a été observée sur 6 mois pour un même animal ● Le flux sanguin augmente lorsque 	Etalons Béliers Boucs 5 chiens de race Beagle Etalons	Pozor et al., 2007 Hedia et al., 2019 Strina et al., 2016 Carrillo et al., 2012 Ortega et al., 2014

	l'activité sexuelle augmente		
Race	<ul style="list-style-type: none"> • Les taureaux de race Hereford possède un RI plus élevé et les taureaux de race Brangus ont une vitesse moyenne plus élevée par rapport à des taureaux de races Nelore, Hereford, Aberdeen Angus, Braford et Brangus • Les index PI et RI sont plus élevées chez des taureaux de race Nelore par rapport à des taureaux de race Caracu 	<p>Taureaux de race Aberdeen Angus (n=57), Braford (n=94), Brangus (n=29), Hereford (n=109) et buffles Nelore (n=45)</p> <p>179 taureaux âgés de 12 à 15 mois (137 Nelore et 42 Caracu) et 103 taureaux âgés de >22 mois (66 Nelore et 37 Caracu)</p>	<p>Junior et al., 2018</p> <p>Rodrigues et al., 2020</p>
Âge et puberté	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune différence significative n'a été observée entre les paramètres hémodynamiques de jeunes taureaux et de taureaux adultes • Les taureaux de 12 mois ont une vitesse diastolique plus faible et des index PI et RI plus élevés par rapport à des taureaux de 24 mois • L'âge n'a pas d'effet significatif sur les paramètres hémodynamiques mais il semblerait que les étalons âgés ont un RI plus élevé 	<p>18 taureaux Brune des Alpes de 17 à 24 mois (n=9) et de 4 à 7 ans (n=9)</p> <p>48 Buffles croisés Hereford de 12 mois (n=29) et de 24 mois (n=19)</p> <p>Etalons</p>	<p>Gloria et al., 2018</p> <p>Claus et al., 2021</p> <p>Pozor et al., 2004</p>
Caractéristiques biométriques et histologiques testiculaires	<ul style="list-style-type: none"> • L'index de résistance est plus élevé et les vitesses plus faibles pour des testicules de forme longue et moyennement épais (L/O) par rapport à des testicules globuleux 	<p>38 taureaux L/O (n=10) et M/O (n=28)</p>	<p>Claus et al., 2021</p>

	<p>(M/O)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● La vitesse systolique est corrélée positivement au volume testiculaire ● Les index de pulsatilité (PI) et de résistivité (RI) sont en lien avec les caractéristiques histologiques des testicules : ils sont corrélés négativement à l'épaisseur de l'épithélium des tubes séminifères et au ratio de l'aire des tubes séminifères sur l'aire totale ● Pas de différence des paramètres hémodynamiques entre testicule gauche et droit 	<p>5 chiens</p> <p>16 chiens adultes de différentes races</p> <p>5 ânes catalans de 3 à 9 ans</p>	<p>Zelli et al., 2013</p> <p>Gloria et al., 2020</p> <p>Gacem et al., 2020</p>
<p>Activité et hormones sexuelles</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Le flux sanguin augmente 8h après l'injection intraveineuse d'hCG et les index RI et PI diminuent, respectivement, 6 et 10h après l'injection 	<p>Taureaux</p>	<p>Abdelnaby et al., 2022</p>

Tableau 3 : Synthèse bibliographique des facteurs influençant l'hémodynamique testiculaire et son évaluation échodoppler chez différentes espèces domestiques, chiens, équidés et ruminants

Les paramètres hémodynamiques varient en fonction de la race, l'âge, de la saison sexuelle, de la température et de la morphologie testiculaire. Ainsi une augmentation de la température ambiante ou de la température au niveau du scrotum entraîne une augmentation du flux sanguin sans modification des index de résistance et de pulsatilité. La saison influe également sur les paramètres hémodynamiques testiculaires : en saison sexuelle, c'est-à-dire pendant la période d'activité sexuelle, le flux sanguin testiculaire augmente chez les béliers et étalons et l'index de résistance diminue chez les béliers. De plus, chez l'espèce bovine le flux sanguin testiculaire augmente et les index RI et PI diminuent après une injection intraveineuse d'hCG. L'âge et les caractéristiques biométriques et histologiques ont un impact sur les paramètres hémodynamiques et notamment sur les index de résistance et de pulsatilité. Cela signifie que la thermorégulation testiculaire pourrait être plus efficace chez certaines races, et chez des individus présentant des caractéristiques morphologiques spécifiques, comme des testicules plus allongés. Par ailleurs, les paramètres vasculaires de l'artère testiculaire pourraient constituer un indicateur des capacités de thermorégulation et du fonctionnement testiculaire, et par conséquent de la production spermatique.

Ces paramètres hémodynamiques testiculaires peuvent également être modifiés par des facteurs pathologiques et pourraient ainsi permettre d'identifier des pathologies testiculaires.

3. Facteurs pathologiques influençant les paramètres hémodynamiques testiculaires

L'échographie Doppler permet d'identifier des pathologies testiculaires impliquant une modification du flux sanguin (Bumin et al., 2007). Depuis une vingtaine d'années, l'échographie doppler est utilisée chez l'homme pour le diagnostic différentiel des affections génitales en évaluant les caractéristiques du flux sanguin (Tableau 4) mais aussi pour déterminer l'origine obstructive ou non d'une azoospermie (Biagiotti et al., 2002). De plus, il a été démontré que pour des hommes possédant des volumes testiculaires, des concentrations en LH, FSH et testostérone identiques, un RI > 0,6 était corrélée à une oligoasthénospermie, c'est-à-dire une faible concentration et une faible mobilité des spermatozoïdes (Pinggera et al., 2008).

Pathologie	Clinique	Modification des paramètres de flux sanguin	Conséquences sur la semence	Source bibliographique (Espèce étudiée)
Orchite	↗ volume testiculaire ; palpation douloureuse	↗ du flux sanguin artériel, flux sanguin veineux devient détectable	Oligo à azoospermie ; tératospermie ; Augmentation de température du testicule controlatéral	Dubinski et al. 1998 (Homme)
Varicocèle	Déformation au niveau du cordon testiculaire	Stase sanguine ↗ RI et PSV	Dégénérescence testiculaire avec calcification ⇒ anomalies spermatiques : gouttelettes cytoplasmiques proximales	Biagiotti et al. 2002 (Hommes) Koivisto et al. 2002 (Zébu)
Torsion testiculaire	↗ volume testiculaire ; palpation douloureuse puis dégénérescence	Occlusion vasculaire ⇒ baisse du flux sanguin	Oligo à azoospermie ; tératospermie si évolution > 4-8h	Dubinsky et al. 1998 Ortega-Ferrusola et al. 2014 (Étalon)
Hernie inguinale	↗ volume testiculaire ; palpation non douloureuse	Compression possible des veines ; ↘ retour veineux ; ↗ RI	Possible tératospermie	Ortega-Ferrusola et al. 2014 (Étalon)

Tableau 4 : Conséquences de pathologies testiculaires sur les paramètres hémodynamiques et sur la semence

4. Relations entre les paramètres hémodynamiques de l'artère testiculaire et la qualité de la semence

Chez le chien, les vitesses systolique et diastolique sont corrélées positivement à la concentration spermatique et les index de pulsatilité et de résistance sont corrélés négativement à l'intégrité de la membrane spermatique (Lemos et al., 2020).

Ainsi, les paramètres du flux sanguin, particulièrement RI et PI pourraient constituer de bons indicateurs de la qualité de la semence, en effet la RI mesurée dans la partie marginale de l'artère testiculaire est corrélée au nombre de spermatozoïdes par éjaculat et au pourcentage de spermatozoïdes immatures, anormaux (Portugal, 2014 ; Gloria et al. 2018). En outre, des zébus de race Nelore dont la fertilité en monte naturelle est élevée (taux de gestation de 84%) présentent des index de pulsatilité et de résistivité (PI = 0,93 et RI = 0,57) supérieurs à ceux de taureaux dont la fertilité est plus faible (taux de gestation de 66 % ; PI = 0,69 et RI = 0,48) (Gomes et al. 2022). L'index de résistance vasculaire (RI) semble donc être le paramètre de choix pour l'évaluation du flux sanguin et la prédiction de la production spermatique. De plus cet index est répétable pour un même taureau et indépendant de l'angle formé par le faisceau d'ultrasons et de la portion d'artère testiculaire ; il peut donc être évalué sur la partie funiculaire de l'artère testiculaire où l'artère effectue des circonvolutions (Gloria et al. 2018).

L'échographie Doppler constitue donc une aide au diagnostic pour les affections génitales impliquant une modification du flux sanguin mais aussi pour mettre en évidence des caractéristiques histologiques impliquant une dégradation de la fertilité (Gloria et al. 2020)

Cette étude a donc pour but d'établir une technique d'échographie Doppler de l'artère testiculaire afin d'obtenir des valeurs usuelles des paramètres hémodynamiques pour des taureaux couramment élevés en France, puis d'étudier les corrélations entre ces paramètres hémodynamiques, les paramètres séminologiques et l'évolution de ces derniers lors de stress thermique.

III. Matériel et méthodes

A. Animaux

Les 17 taureaux inclus dans l'étude sont de race Blonde d'Aquitaine et INRA 95. Ils étaient âgés de 18 à 40 mois au moment de l'étude et étaient hébergés au centre AURIVA (taurellerie des Nauzes 81850 SOUAL). Leurs identifications, âges, rythmes de collecte et dates d'examens sont présentés dans le tableau 5.

Identification	Age (mois)	Race	Date d'examen (THI)	Rythme de collecte
a	25,2	INRA 95	30.11.22 (46,4)	2 fois par semaine (mardi, vendredi)
b	26,6	INRA 95	30.11.22 (46,4)	2 fois par semaine (mardi, vendredi)
c	26,8	INRA 95	30.11.22 (46,4)	2 fois par semaine (lundi, jeudi)
d	27	INRA 95	30.11.22 (46,4)	2 fois par semaine (mardi, vendredi)
e	38,8	INRA 95	30.11.22 (46,4)	3 fois par semaine (lundi, jeudi, vendredi)
f	39	INRA 95	30.11.22 (46,4)	2 fois par semaine (mardi, vendredi)
g	39,2	INRA 95	30.11.22 (46,4)	2 fois par semaine (mardi, vendredi)
h	40,4	INRA 95	30.11.22 (46,4)	2 fois par semaine (mardi, vendredi)
i	18,0 21,3	INRA 95	31.05.23 (68,6) 06.09.2023(75,7)	3 fois par semaine (lundi, mardi, vendredi)
j	19,5 22,8	Blonde d'Aquitaine	31.05.23 (68,6) 06.09.2023(75,7)	2 fois puis 3 fois par semaine à partir du 01/08 (lundi, mardi, vendredi)
k	20,3 23,5	INRA 95	31.05.23 (68,6) 06.09.2023(75,7)	2 fois par semaine (mardi, vendredi)
l	20,6 23,9	Blonde d'Aquitaine	31.05.23 (68,6) 06.09.2023(75,7)	2 fois puis 1 fois par semaine
m	20,8	Blonde d'Aquitaine	31.05.23 (68,6)	2 fois par semaine (lundi, jeudi)
n	21,1 24,3	Blonde d'Aquitaine	31.05.23 (68,6) 06.09.2023(75,7)	2 fois puis 3 fois par semaine à partir du 01/08 (lundi, mardi, vendredi)
o	21,2 24,4	Blonde d'Aquitaine	31.05.23 (68,6) 06.09.2023(75,7)	2 fois par semaine (lundi, jeudi)
p	32,3 35,5	Blonde d'Aquitaine	31.05.23 (68,6) 06.09.2023(75,7)	3 fois par semaine (lundi, jeudi, vendredi)
q	25,3	INRA 95	06.09.2023(75,7)	2 fois par semaine

Tableau 5 : Présentation de l'identification, de l'âge au moment des mesures, de la date des mesures et du rythme de collecte des taureaux utilisés dans cette étude.

Les objectifs de cette étude étaient dans un premier temps la mise au point de la méthode puis l'évaluation des effets de l'âge, de la race ainsi que d'une période de stress thermique sur les paramètres hémodynamiques. Les objectifs et matériels de ces études sont présentés dans les tableaux 6 à 9.

Objectif	Race	Date des mesures	Effectifs	Age (mois)	Taureaux
Mise au point de la méthode	INRA 95	30/11/2022	N= 8	25,2 ;26,6 ;26,8 ; 28 ; 38,8 ; 39 ; 39,2 ; 40,4	a, b, c, d, e, f, g, h

Tableau 6 : Description des taureaux utilisés dans l'objectif de la mise au point de la méthode

Dans un premier temps, nous avons donc mesuré les paramètres hémodynamiques de 8 taureaux de race INRA et d'âge varié. Ces mesures ont pour but de mettre en lumière les difficultés potentielles liées à la méthode et ainsi de l'améliorer pour être plus efficace et plus fiable.

Objectifs	Race	Date des mesures	Effectif	Age (mois)	Taureaux
Détermination de l'effet de l'âge sur les paramètres hémodynamiques (RI)	INRA 95	30/11/2022	N=6	26,6 ; 26,8 ; 28 ; 38,8 ; 39,2 ; 40,4	b, c, d, e, g, h
		31/05/2023	N=2	18 ; 20,3	i, k
		06/09/2023	N=3	21,3 ; 23,5 ; 25,3	i, k, q
	Blonde d'Aquitaine	31/05/2023	N=6	19,5 ;20,6 ;20,8 ; 21,1 ; 21,2 ; 32,3	j, l, m, n, o, p
		06/09/2023	N=5	22,8 ;23,9 ;24,3 ;24,4 ; 35,5	j, l, n, o, p

Tableau 7 : Description des taureaux utilisés dans l'objectif de déterminer l'effet de l'âge sur la résistance vasculaire.

Dans un second temps nous avons pour objectif de déterminer si des paramètres physiologiques comme l'âge ou la race peuvent avoir un effet sur des paramètres d'hémodynamique testiculaire. Afin d'obtenir des effectifs plus grands nous avons décidé de nous concentrer sur les effets des paramètres physiologiques sur l'index de résistance qui permet de s'affranchir du réglage de l'angle θ . Ainsi des taureaux utilisés pour le premier objectif d'étude sont également utilisés dans celui-ci car la qualité et la fiabilité des mesures effectuées sur ces taureaux ont été rétrospectivement validées.

Objectifs	Race	Date des mesures	Effectifs	Age	Taureaux
Détermination de l'effet de la race sur les paramètres hémodynamiques (RI)	INRA 95	31/05/2023	N=2	18,6 ;20,3	i, k
		06/09/2023	N=3	21,3 ;23,5 ;25,3	i, k, q
	Blonde d'Aquitaine	31/05/2023	N=5	19,5 ;20,6 ;20,8 ; 21,1 ;21,2	j, l, m, n, o
		06/09/2023	N=4	22,8 ;23,9 ;24,3 ; 24,4	j, l, n, o

Tableau 8 : Description des taureaux utilisés dans l'objectif de déterminer l'effet de la race sur la résistance vasculaire.

De même que pour l'âge, nous nous intéressons aux effets de la race sur l'index de résistance afin d'avoir un effectif plus grand. Les taureaux utilisés dans cet objectif d'étude sont âgés de 18 à 25 mois car dans cette classe d'âge l'effet de l'âge sur l'index de résistance est minimisé ($R^2 = 0,14$).

Objectifs	Race	Date des mesures	Effectifs	Age	Taureaux
Détermination de l'effet d'un THI >70 sur une période prolongée sur les paramètres hémodynamiques (RI, PSV, EDV, PI)	INRA 95	31/05/2023	N=2	18,6 ;20,3	i, k
		06/09/2023	N=2	21,3 ;23,5	i, k
	Blonde d'Aquitaine	31/05/2023	N=4	19,5 ;21,1 ;21,2 ;32,3	j, n, o, p
		06/09/2023	N=4	22,8 ;24,3 ;24,4 ;35,5	j, n, o, p

Tableau 9 : Description des taureaux utilisés dans l'objectif de déterminer l'effet d'un stress thermique sur une période prolongée sur les paramètres hémodynamiques testiculaires.

Les paramètres hémodynamiques (PSV ; EDV ; RI ; PI) de 6 taureaux ont été mesurés le 31/05/2023 puis le 06/09/2023 après une période avec un THI>80 pendant 52 jours entre ces deux dates. Seuls les taureaux pour lesquels les mesures de vitesses étaient correctes avec un angle θ correct ont été conservés.

Avant leur entrée au centre de collecte de semence, les taureaux ont séjourné pendant 2 mois à la station de quarantaine des Nauzes. Ils ont été progressivement habitués à la collecte de sperme au vagin artificiel.

Les taureaux ont reçu une ration à base de foin de bonne qualité à volonté (en moyenne 10 kg de foin distribué par taureau et par jour) complétée par des concentrés et une pierre à lécher. Les aliments concentrés, à base de maïs, d'orge et de soja, incluant l'aliment minéral vitaminé, ont été distribués trois fois par jour et la ration a été adaptée à l'état d'entretien des animaux. La quantité de concentrés est d'environ 5 kg par jour pour ces jeunes taureaux en croissance.

Tous les taureaux ont à disposition dans leur box un abreuvoir automatique à niveau constant et chauffant.

Le site des Nauzes présente 84 places pour un nombre de 70 à 85 taureaux présents en moyenne sur l'année. Le paillage est réalisé une fois par jour (8-11 kg/animal/jour) pour les taureaux en production. Les boxes sont nettoyés et désinfectés toutes les 2 à 3 semaines. Tous les taureaux en production sont hébergés dans des boxes individuels. Des ventilateurs sont disposés dans les couloirs de certains bâtiments et sont utilisés toute l'année afin de limiter les variations de température. L'été, ces ventilateurs sont utilisés pour renouveler l'air et les bâtiments sont arrosés. L'hiver, ils sont utilisés pour assécher les litières en éliminant l'humidité ambiante. Cependant les taureaux utilisés dans cette étude pour les mesures de mai et septembre sont hébergés dans des bâtiments qui ne possèdent pas de ventilateur.

B. Collecte de sperme et examen de la semence

Les collectes de sperme sont réalisées 4 jours par semaine au centre AURIVA. Selon les taureaux en production, la fréquence de collecte est d'une à trois fois par semaine.

Avant la collecte, les taureaux sont amenés dans la salle de monte. Leur libido est stimulée lors de l'attente, par voyeurisme et par le conditionnement lié à la reconnaissance des bruits et des odeurs. La préparation active des taureaux consiste à promener le taureau et à l'amener au contact des boutes en train (taureaux réformés pour des raisons génétiques). Avant la collecte de semence, le taureau effectue quelques fausses montes sur le boute en train. Au moment de la collecte de sperme, le préleveur s'accole au taureau et dévie le pénis vers le vagin artificiel en le saisissant à travers le fourreau. Ce contact avec le vagin artificiel permet en général de déclencher l'éjaculation qui ne dure que quelques secondes.

L'examen séminologique est réalisé immédiatement après la récolte. Il permet d'évaluer la qualité de la semence afin de déterminer si celle-ci pourra être conservée et utilisée pour l'insémination artificielle. L'éjaculat est maintenu à 37°C durant toutes ces étapes, et jusqu'à sa dilution, avant la mise en paillettes.

Sur la semence fraîche, les paramètres séminologiques suivant sont mesurés :

- Le poids de l'éjaculat
- La concentration en spermatozoïdes
- Le % de spermatozoïdes fléchants
- Un score de motilité massale (note de 0 à 5)

Après congélation, la semence est évaluée avec un analyseur d'image (IVOS) qui permet d'évaluer les caractéristiques morphologiques et cinétiques des spermatozoïdes. Les paramètres suivants sont déterminés : concentration, % de spermatozoïdes vivants, % de

spermatozoïdes progressifs, % d'anomalies spermatiques par catégorie (flagelles coudés, flagelles courbés, gouttelettes distales, flagelles retro versés, gouttelettes proximales, spermatozoïdes normaux)

Le volume de l'éjaculat est mesuré par double pesée.

La couleur et la viscosité de l'éjaculat sont évaluées par simple observation dans le tube de collecte ; un sperme normal est de couleur blanchâtre à blanc-jaunâtre et de consistance laiteuse à crémeuse.

La motilité massale est évaluée à 37°C dans les dix minutes après l'éjaculation. Une goutte de sperme pur est observée au microscope optique à platine chauffante. L'intensité des vagues provoquées par le déplacement des spermatozoïdes est évaluée et notée de 0 à 5 :

- Note 0 : absence de mouvement des spermatozoïdes
- Note 1 : léger mouvement perceptible, pas de tourbillon
- Note 2 : tourbillons peu nombreux
- Note 3 : tourbillons nombreux
- Note 4 : tourbillons rapides et intenses
- Note 5 : tourbillons très rapides

La motilité individuelle est évaluée sur deux gouttes de semence diluée au 1/10^e et placées entre lame et lamelles sur une plaque microscopique à 37°C. La proportion de spermatozoïdes fléchants, c'est-à-dire traversant le champ du microscope avec une trajectoire rectiligne est évaluée. Seuls les éjaculats avec une motilité individuelle supérieure à 40%, sont conservés. Cette évaluation est systématiquement réalisée sur la semence fraîche et après décongélation des paillettes.

La concentration en spermatozoïdes de l'éjaculat (exprimée en milliards par millilitre) est mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre étalonné, sur du sperme dilué au 80^eme. La concentration moyenne en spermatozoïdes d'un éjaculat de taureau est de 1 milliard/mL, mais peut varier de 0,3 à 3 milliards/mL.

Deux fois par an ou lors de diminution de la qualité de la semence, un examen morphologique des spermatozoïdes colorés à l'éosine-nigrosine, peut être réalisé sur un frottis. Les anomalies morphologiques sont évaluées à l'aide de systèmes semi-automatisés d'analyse du sperme. Le pourcentage de spermatozoïdes anormaux est en moyenne de 6.5 à 9.5%.

Pour chaque collecte sont indiquées les caractéristiques du taureau et de la collecte suivantes :

- Nom taureau
- Numéro national
- Race
- Date de naissance
- Date des collectes
- Numéro de saut (pour les collectes comprenant deux sauts consécutifs), et le cas échéant, le refus de saut

Pour chaque collecte ayant permis le recueil d'un éjaculat, la base de données contient les paramètres sémiologiques suivants :

- Volume de l'éjaculat
- Concentration de l'éjaculat en spermatozoïdes
- Pourcentage de spermatozoïdes mobiles avant congélation
- Pourcentage de spermatozoïdes mobiles après décongélation
- Nombre de doses produites pour chaque collecte et le cas échéant pour le deuxième saut

Les éjaculats ont été éliminés pour les valeurs seuils des paramètres séminologiques suivantes :

- Concentration en spermatozoïdes inférieure à 300 millions de spermatozoïdes par millilitre.
- Pourcentage de spermatozoïdes mobiles dans l'éjaculat frais inférieur à 50%
- Pourcentage de spermatozoïdes mobiles après décongélation inférieur à 35%

Lorsque la qualité de la semence est conforme, les doses sont stockées dans l'azote liquide pendant une période de 30 jours, puis distribuées aux centres de mise en place de la semence en fonction des besoins.

Dans notre étude, nous avons collecté les paramètres séminologiques concomitant de l'examen échodoppler. Pour les taureaux examinés le 30.11.22 nous avons étudié les paramètres séminologiques des mois d'octobre et novembre 2022, pour les taureaux examinés en mai et septembre 2023 nous avons étudié les paramètres séminologiques de juin, juillet et août 2023, ces taureaux ayant débuté leurs productions en mai.

C. Examens testiculaires

1. Contention de l'animal

Afin de faciliter l'accès à la région postérieure une contention adaptée est utilisée : le taureau est placé dans une cage de contention individuelle avec cornadis. Le taureau est également attaché par un anneau relié aux cornes. L'opérateur est placé derrière afin d'accéder aux testicules.

2. Volume testiculaire et circonférence scrotale

La circonférence scrotale est mesurée avec un mètre ruban (Figure 13). Le plus grand diamètre scrotal est mesuré en maintenant les testicules au fond du scrotum. Le mètre ruban est apposé sur le scrotum sans exercer de pression.

Les hauteurs et largeurs testiculaires sont mesurées par deux opérateurs à l'aide d'un pied à coulisse apposé sans exercer de pression. Chaque testicule est individualisé manuellement afin de réaliser les mesures.

Le volume testiculaire est calculé en considérant le testicule comme un cylindre (Claus et al. 2021) selon la formule :

$$V = \pi \times \text{Rayon}^2 \times \text{Hauteur}$$



Figure 13 : Mesure de la circonférence scrotale à l'aide d'un mètre ruban

Ce volume est de $168.76 \pm 47.96 \text{ cm}^3$ pour des taureaux âgés de 12 mois et de $499.73 \pm 129.24 \text{ cm}^3$ pour des taureaux âgés de 24 mois (Claus et al. 2021).

3. Examens échographiques

Les échographies testiculaires ont été réalisées par deux opérateurs, avec un échographe MyLab One (Esaote) et une sonde linéaire utilisée à la fréquence de 10MHz en mode B et 5MHz en mode Doppler.

a) Echographie du parenchyme testiculaire

Les testicules sont examinés par échographie selon un plan sagittal (avant-arrière), la sonde étant appliquée latéralement au scrotum (Figure 14). Pour balayer toute la structure, l'opérateur fait varier l'angle de la sonde, suivant son axe longitudinal, ce qui lui permet de visualiser la paroi du scrotum, le parenchyme testiculaire et le rete testis au centre. Cet examen permet d'évaluer la présence éventuelle de lésions testiculaires, notamment des lésions de fibrose qui sont fréquentes chez les taureaux (Barth et al. 2008).



Figure 14 : Echographie du parenchyme testiculaire. Positionnement de la sonde (à gauche) et image échographique correspondante d'une coupe longitudinale du testicule (à droite)

b) Echographie Doppler de l'artère testiculaire

La sonde est placée sur la face postérieure du scrotum, à 2 à 3 cm de la partie dorsale du testicule, elle est positionnée avec un angle proche de 5 à 10° par rapport au plan horizontal. Elle est maintenue avec l'index de la main droite, la main gauche, placée dorsalement au testicule, maintient le testicule au fond des bourses (Figure 15). L'artère testiculaire est visualisée dans sa partie funiculaire (Junior et al. 2018).



Figure 15 : Positionnement de la sonde pour la caractérisation du flux sanguin de l'artère testiculaire par échographie Doppler.

Les réglages de l'appareil ont été standardisés pour tous les examens : la fréquence échographique est de 10MHz, la fréquence Doppler est de 5MHz, la PRF est de 1,5kHz le gain de couleur est de 70%, la taille du volume sanguin mesuré pour examen Doppler est de 1mm, le caliper est placé au centre de la lumière de l'artère, cette dernière faisant entre 1,6 et 2,0 mm chez le taureau (Hees et al.1984). Le filtre paroi est de 100 Hz (Junior et al. 2018) et la profondeur d'examen est de 5 cm. L'orientation du faisceau d'ultrasons est adaptée à la position de la portion de l'artère évaluée afin d'obtenir un angle θ entre l'axe du faisceau ultrasonore et celui de la portion de l'artère testiculaire inférieur à 40°.

Un gel de transmission ultrasonographique a été utilisé.

Les mesures du flux sanguin ont été effectuées sur la portion la plus large de l'artère testiculaire, le calliper est alors positionné au centre de la lumière de l'artère et l'analyse spectrale du signal doppler est effectuée.

Chaque mesure spectrale est effectuée sur au moins 3 cycles cardiaques. La vitesse systolique maximale (PSV m/s : peak systolic velocity) et la vitesse diastolique en fin de diastole (EVD : end-diastolic velocity) sont ensuite mesurées graphiquement, comme indiquées sur la Figure 16.

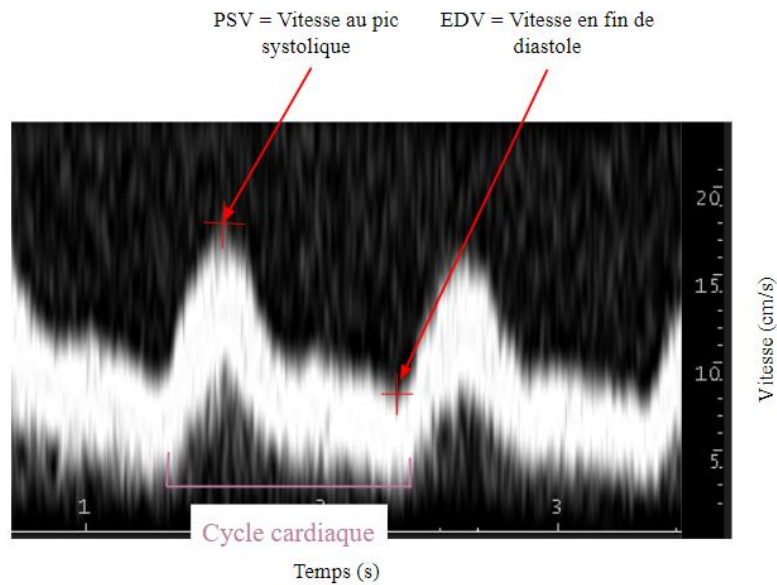


Figure 16 : Analyse spectrale du flux sanguin de l'artère testiculaire du taureau (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). Les vitesses systolique et diastolique sont mesurées par l'échographe à l'aide d'un caliper positionné par l'opérateur sur chaque courbe obtenue.

Les paramètres suivants ont été calculés a posteriori à partir de l'analyse spectrale selon les formules :

- Index de résistance (RI) = $(PSV - EDV) / PSV$
- Vitesse moyenne (TAMV) (encore appelée TAMF, pour time-averaged maximum frequency shift). Elle correspond à l'aire sous la courbe de la vitesse de l'onde pour un cycle cardiaque. Cette valeur est obtenue en utilisant un logiciel de traitement d'image "image J"
- Index de pulsatilité = $(PSV - EDV) / \text{vitesse moyenne}$

Les résultats obtenus sont exprimés sous la forme : moyenne \pm écart-type.

IV. Résultats et discussion

A. Mise au point de la méthode d'échographie Doppler de l'artère testiculaire

1. Réglage et mesures

La première série de mesures effectuée a mis en évidence certaines difficultés liées à la méthode et notamment au faible diamètre et aux circonvolutions de l'artère testiculaire. Ces caractéristiques anatomiques ont des implications sur le positionnement du calliper et sur l'exactitude des mesures hémodynamiques (Figures 17 à 23).

L'artère testiculaire est très circonvolutionnée (Figure 17), ce qui a rendu difficile le réglage de l'angle θ . Afin de réduire l'erreur relative sur les vitesses systoliques ou diastoliques, l'angle θ entre le faisceau ultrasonore et la direction de l'artère, doit être proche de 0° comme cela est le cas sur la figure 18

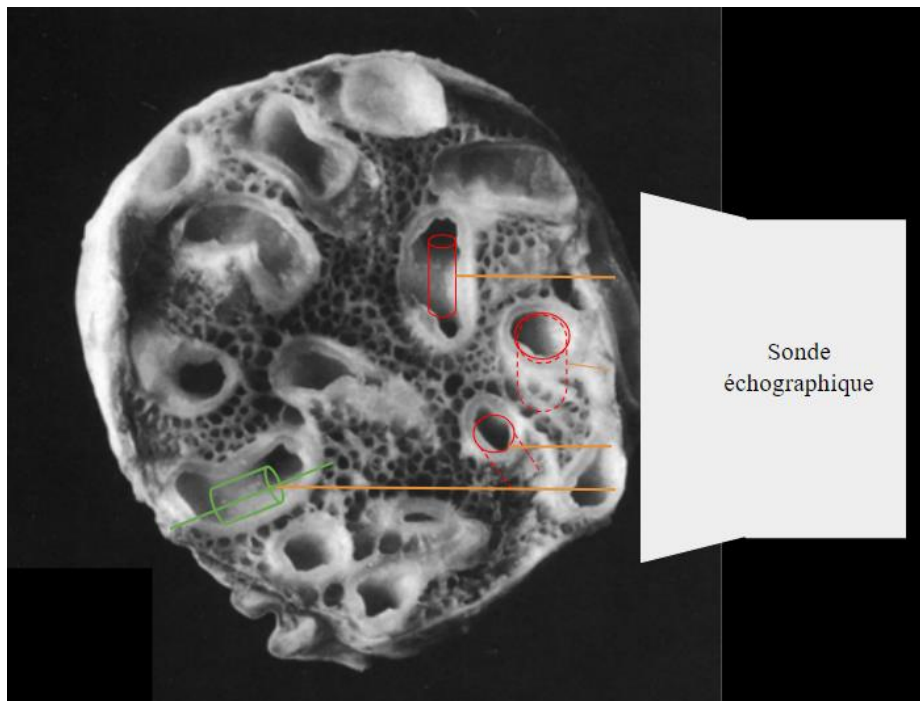


Figure 17 : Coupe transversale du cordon spermatique de taureau. Les différentes coupes de vaisseaux de plus large diamètre correspondent à l'artère testiculaire circonvolutionnée, elle est entourée par le plexus pampiniforme d'aspect spongieux (Hees et al., 1984). Les traits orange correspondent à la direction du faisceau d'ondes ultrasonores, la portion d'artère dont la direction est indiquée en vert est celle formant un angle θ correct avec les ondes ultrasonores, alors que l'angle formé avec les portions d'artères en rouge sont trop grands, ce qui conduit à une surestimation des vitesses du flux sanguin.

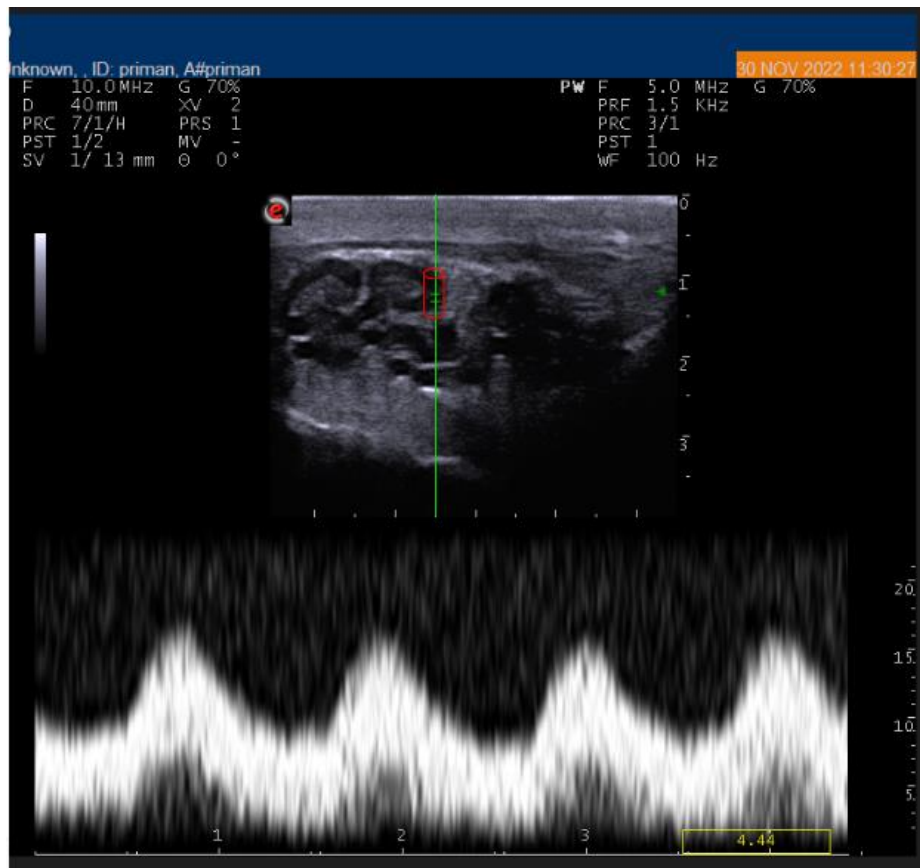


Figure 18 : Image d'échographie Doppler de l'artère testiculaire du taureau (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). L'angle θ entre le faisceau d'ondes ultrasonores et le vaisseau sanguin est de 0° la mesure est donc correcte. Les vitesses au pic systoliques sont comprises entre 15,5 et 16,8 cm/s, les vitesses en fin de diastole entre 9,5 et 10,3 cm/s et l'index de résistance entre 0,35 et 0,40.

Au contraire, lorsque l'angle entre le faisceau d'ultrasons et le vaisseau sanguin est trop important, la mesure des vitesses n'est pas exacte (Figure 19).

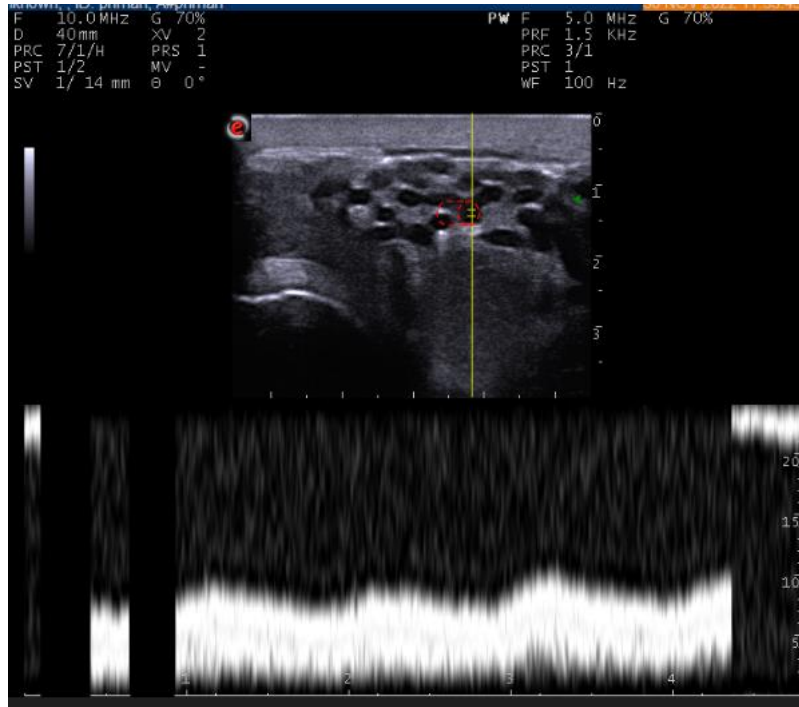


Figure 19 : Échographie Doppler de l'artère testiculaire du taureau (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). L'angle θ entre la portion d'artère évaluée et le faisceau d'ultrasons est trop élevé. Le profil doppler est très tassé et les valeurs de vitesses obtenues (PSV = 9,87 cm/s ; EDV = 8,66 cm/s) ne peuvent donc pas être retenues.

Dans un deuxième temps, afin de maximiser l'exactitude des mesures hémodynamiques, la direction du faisceau d'ondes ultrasonores a été ajustée à la direction de l'artère testiculaire, de façon à diminuer l'angle θ . Cependant, en raison du diamètre réduit de l'artère testiculaire et de la durée d'acquisition des mesures, il est compliqué de conserver le calliper dans la portion du vaisseau sanguin correspondant à l'angle θ déterminé (Figure 20).

C'est la raison pour laquelle, nous avons fixé la direction du faisceau d'ultrasons verticale et nous avons ensuite sélectionné une portion d'artère testiculaire qui avait une position verticale, afin de minimiser l'angle θ .

Cependant, comme l'angle θ n'a pas d'influence sur le calcul de les index de résistance et de pulsatilité, nous avons analysé dans notre étude les valeurs d'index de résistance obtenus à partir de courbes de vitesses, même si l'angle θ réel n'était pas proche de 0° .

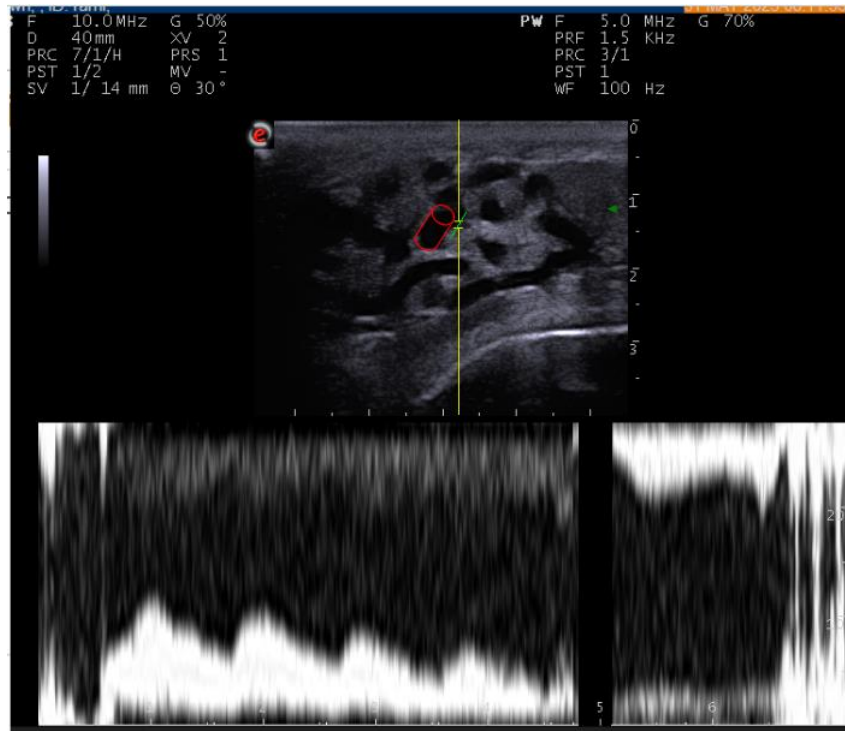


Figure 20 : Échographie Doppler de l'artère testiculaire du taureau (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). L'angle θ est adapté à la portion de l'artère testiculaire dans laquelle le flux sanguin est mesuré. Cependant, le maintien du calliper sur plusieurs cycles cardiaques, au sein d'une portion déterminée est compliqué. A titre d'illustration, sur ce tracé doppler, seuls les deux premiers cycles sont exploitables et l'image échodoppler montre que le calliper n'est plus dans la portion de l'artère testiculaire.

Les premiers essais ont également montré l'importance de la prise en compte du sens du flux sanguin. En effet, certains profils spectraux présentaient des courbes de vitesses inversées, ce qui ne nous permettait pas de mesurer les vitesses. Ces courbes correspondaient à des flux sanguins s'éloignant de la sonde échographique (Figure 21).

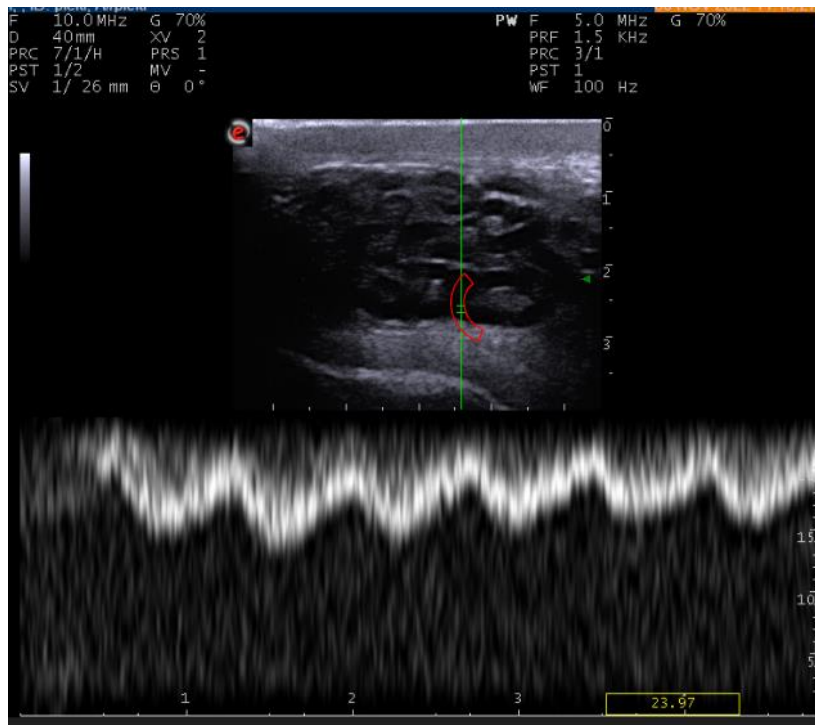


Figure 21 : Échographie Doppler de l'artère testiculaire du taureau (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). Le flux sanguin mesuré dans la portion de l'artère testiculaire s'éloigne de la sonde. La courbe de vitesse est inversée et difficilement interprétable.

Pour pallier ce problème, nous avons, lors de la deuxième série de mesures, effectué une sélection du vaisseau cible dont le flux sanguin était dirigé vers la sonde à l'aide du mode Doppler couleur (Figure 22).

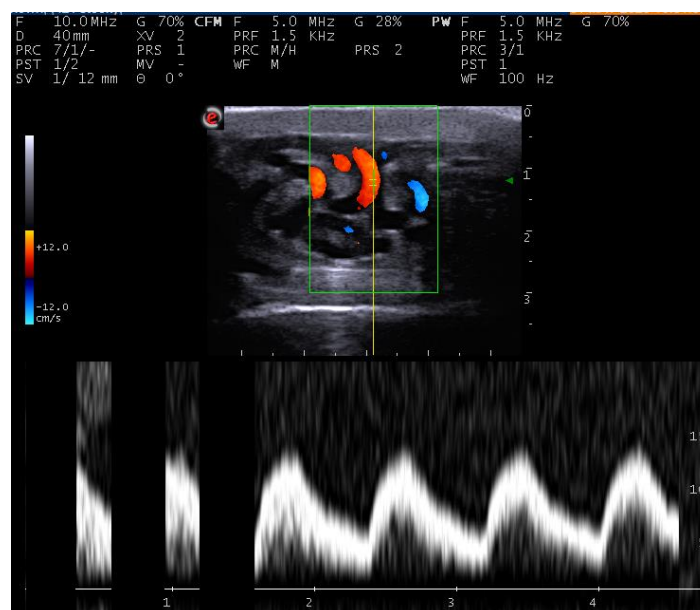


Figure 22 : Échographie Doppler couleur de l'artère testiculaire du taureau (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). La portion d'artère testiculaire évaluée est prévisualisée par échographie Doppler couleur afin de sélectionner une portion dont le sens du flux sanguin va en direction de la sonde (rouge).

Proche des parois le flux sanguin est turbulent, le signal spectral est donc de plus faible intensité (Figure 23). Le volume sanguin évalué doit donc être limité et positionné au centre de l'artère afin d'être le plus homogène possible.

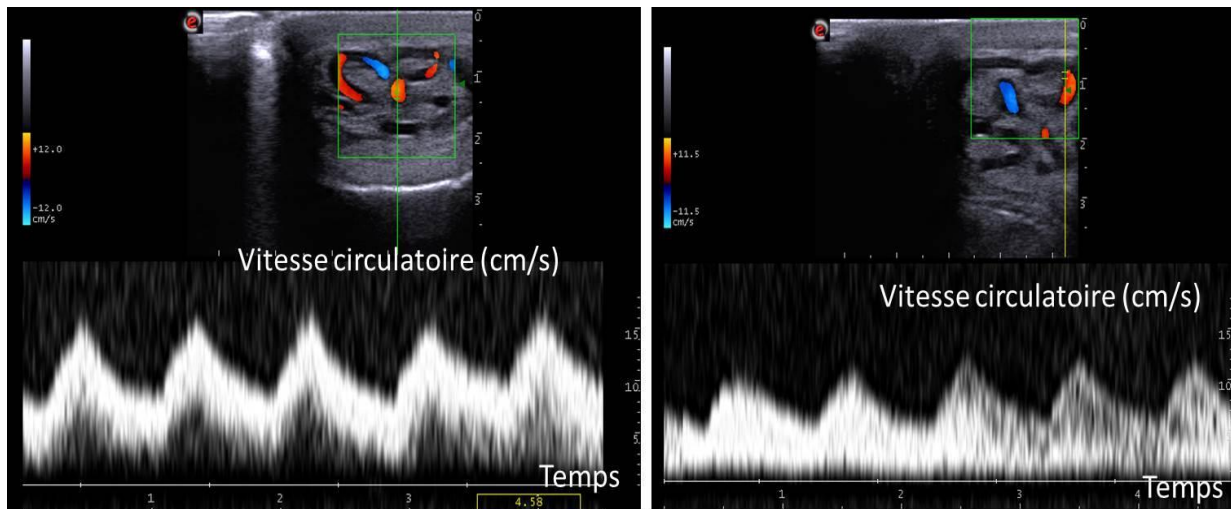


Figure 23 : Échographie Doppler de l'artère testiculaire du taureau en fonction du positionnement du volume sanguin évalué (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). Quand la mesure est effectuée au centre de l'artère testiculaire, les gammes de fréquence sont plus homogènes (à gauche), comparativement à un positionnement trop proche d'une paroi (à droite), l'échantillon n'est donc pas homogène, le spectre obtenu est de faible intensité.

2. Répétabilité des mesures hémodynamiques

La répétabilité intra-opérateur de l'index de résistance vasculaire des mesures du 30/11/2022, 31/05/2023 et du 06/09/2023 a été évaluée par analyse de variance. Le coefficient de variation est inférieur à 15% pour tous les taureaux avec une moyenne de 11,17%. La répétabilité inter-opérateur est également correcte : les mesures effectuées par 2 opérateurs ont un coefficient de variation inférieur à 15% pour tous les taureaux avec une moyenne de 12,71%. La répétabilité intra- et inter-opérateur des vitesses au pic systolique et en fin de diastole a également été évaluée pour 5 taureaux. Pour la vitesse au pic systolique, les coefficients de variation pour la répétabilité intra- et inter-opérateurs sont, respectivement, de 4,28% et 7,86%. Pour la vitesse en fin de diastole, ces coefficients de variation sont, respectivement, de 10,58% et 11,57%.

L'ensemble des essais réalisés et les réglages nous permettent d'avoir une mesure répétable et fiable des paramètres hémodynamiques de l'artère testiculaire.

B. Evaluation des paramètres hémodynamiques testiculaires

Les vitesses du flux sanguin dans l'artère testiculaire au pic systolique, en fin de diastole ainsi que les moyennes des vitesses maximales et les index de pulsatilité sont présentés dans le tableau 10.

Dates des mesures	31 mai				6 septembre			
Paramètres hémodynamiques	PSV	EDV	TAMV	PI	PSV	EDV	TAMV	PI
I	13,18±2,35	5,35±1,54	9,19±1,65	0,88±0,12	14,77±3,09	3,73±0,75	9,25±1,85	1,18±0,10
J	11,69±1,06	6,08±0,70	8,88±0,86	0,63±0,04	15,76±3,54	8,55±1,82	12,69±2,38	0,65±0,13
K	15,25±2,09	5,45±1,28	10,35±0,69	0,93±0,26	20,70±0,60	9,47±0,40	15,09±0,38	0,74±0,04
M	15,57±0,74	10,52±0,48	13,05±0,58	0,38±0,03				
N	13,65±1,5	7,36±0,95	10,83±2,32	0,76±0,15	18,29±2,25	5,99±1,44	11,97±1,66	1,03±0,13
O	12,69±2,16	8,37±1,14	9,80±1,08	0,40±0,08	17,44±1,90	11,47±1,38	15,81±1,46	0,44±0,05
P	11,90±3,66	5,36±1,97	8,63±2,78	0,74±0,12	13,63±1,97	6,84±1,97	10,24±1,87	0,68±0,16
Q					14,72±3,05	5,97±1,15	10,60±2,06	0,87±0,14
Moyenne	13,52±2,37	6,89±2,18	10,10±2,06	0,72±0,23	16,76±3,08	8,46±2,90	12,23±2,73	0,79±0,29

Tableau 10 : Vitesses maximales du flux sanguin au pic systolique, vitesses du flux sanguin en fin de diastole, moyennes des vitesses maximales et index de pulsatilité de l'artère testiculaire mesurés à deux saisons, sur 7 taureaux (taureaux i à p) le 31 mai et sur 7 taureaux (taureaux i à q) le 6 septembre (moyenne ± écart-type).

La vitesse du flux sanguin dans l'artère testiculaire au pic systolique est de $15,06 \pm 3,25$ cm/s toutes mesures confondues. Cette vitesse est du même ordre de grandeur que celles rapportées pour des mâles croisés zébus ($16,33 \pm 3,84$ cm/s à $19,00 \pm 6,00$ cm/s selon l'âge) (Claus et al., 2021), et celle de taureaux de race Brune des Alpes ($13,95 \pm 4,4$ cm/s) (Gloria et al., 2018).

La vitesse du flux sanguin de l'artère testiculaire en fin de diastole est de $7,585 \pm 2,369$ cm/s toutes mesures confondues. Cette vitesse est du même ordre de grandeur que celles rapportées dans d'autres études pour des mâles croisés zébus ($7,98 \pm 3,83$ cm/s à $11,37 \pm 4,15$ cm/s selon l'âge) (Claus et al., 2021), et celles de taureaux de race Brune des Alpes, de $5,45 \pm 2,1$ cm/s (Gloria et al., 2018).

La moyenne des vitesses maximales est de $11,075 \pm 2,489$ cm/s toutes mesures confondues. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celles rapportées dans la littérature. Une étude de Junior et al. (2018) rapporte des moyennes des vitesses maximales de $8,76 \pm 0,40$ cm/s pour les zébus, comprises entre $10,57 \pm 0,77$ et $13,09 \pm 0,57$ cm/s pour des taureaux de race Hereford et Angus âgés de 18 à 28 mois et comprises entre $12,33 \pm 0,05$ et $16,28 \pm 1,02$ cm/s pour des taureaux croisés zébus âgés de 24 à 36 mois.

L'index de pulsatilité de l'artère testiculaire est de $0,75 \pm 0,26$ pour l'ensemble des mesures effectuées. Ce paramètre est plus variable que l'index de résistance, avec un coefficient de variation de 34% versus 25%. Par ailleurs, l'index de pulsatilité que nous avons calculé est plus élevé que ceux rapportés par la littérature pour l'espèce bovine. En effet, l'index de pulsatilité pour des taureaux de race Angus et Hereford, croisés zébus et les zébus est compris entre

0,30±0,02 et 0,49±0,02 (Junior et al., 2018 ; Claus et al., 2021). Cette différence pourrait être liée à la race des taureaux étudiée ou à l'évaluation difficile de la vitesse en fin de diastole sur certains tracés hémodynamiques de faible intensité. Pour les autres espèces, un index de pulsativité plus élevé a été rapporté, de 0,82±0,23 pour des chiens (Gloria et al., 2020) et entre 1,27 et 2,87 selon la portion d'artère testiculaire échographiée, pour des ânes catalans (Gacem et al., 2020).

Les index de résistance vasculaire sont présentés dans le tableau 11.

Date des mesures	30 novembre	31 mai	6 septembre
b	0,45±0,04		
c	0,68±0,04		
d	0,51±0,04		
e	0,36±0,02		
g	0,45±0,05		
h	0,37±0,02		
i		0,60±0,07	0,72±0,05
j		0,48±0,02	0,52±0,10
k		0,63±0,11	0,54±0,02
l		0,56±0,01	0,70±0,08
m		0,32±0,02	
n		0,54±0,08	0,69±0,06
o		0,33±0,06	0,54±0,08
p		0,45±0,06	0,55±0,08
q			0,59±0,07
Moyenne	0,47±0,11	0,50±0,13	0,58±0,13

Tableau 11 : Index de résistance de l'artère testiculaire mesurés sur 15 taureaux (indiqués par des lettres, de b à q) à trois périodes, dont 6 taureaux le 30 novembre (taureaux b à h), 8 taureaux le 31 mai (taureaux i à p) et 8 taureaux le 6 septembre (taureaux i à q).

L'index de résistance vasculaire est pour l'ensemble des mesures, quelle que soit la saison, de $0,52 \pm 0,13$. Cet index est du même ordre de grandeur que les index de résistance rapportés dans la littérature pour des taureaux de race Hereford ($0,41 \pm 0,02$), Angus ($0,44 \pm 0,01$) (Junior et al., 2018) ou Brune des Alpes ($0,61 \pm 0,01$) (Gloria et al., 2018) ou pour des zébus ou croisés zébus dont les index sont compris entre $0,40 \pm 0,15$ et $0,51 \pm 0,2$ (Junior et al., 2018 ; Claus et al., 2021).

Pour chaque taureau, les corrélations entre l'index de résistance et l'index de pulsativité sont présentées sur la figure 24.

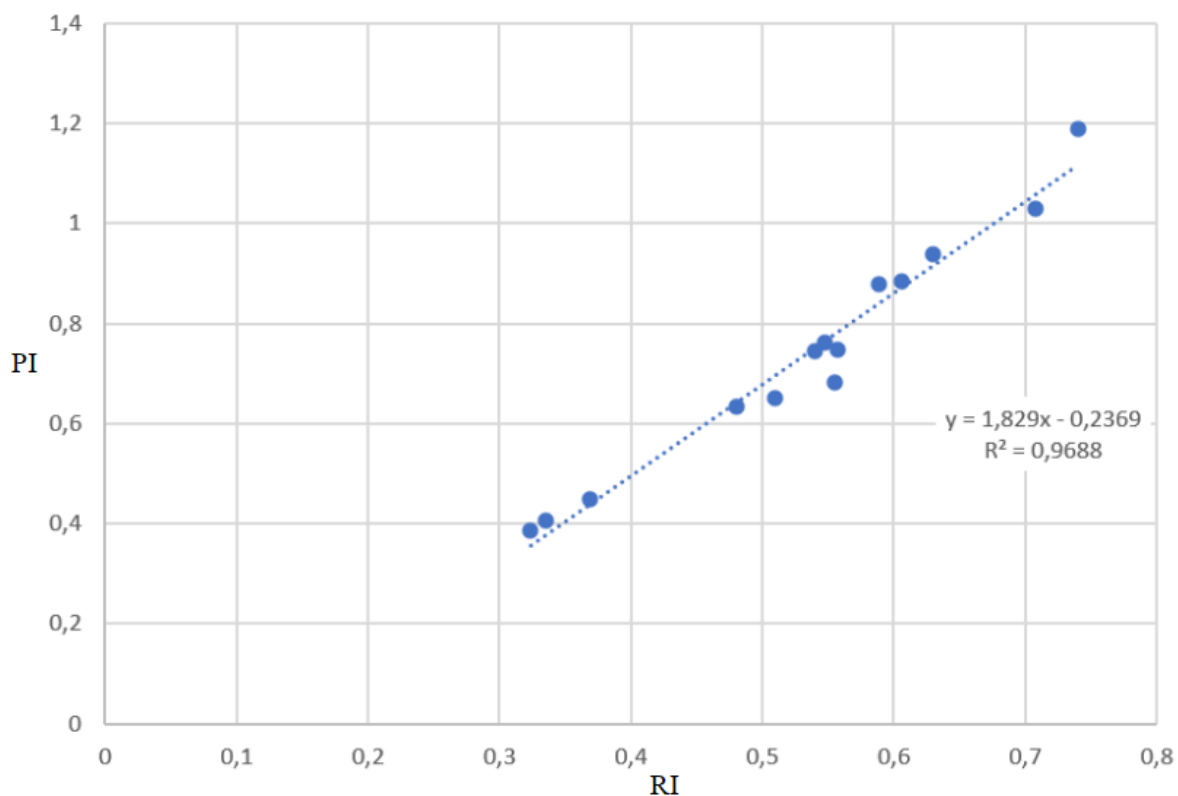


Figure 24 : Relation entre les index de résistance vasculaire (RI) et les index de pulsatilité (PI) de l'artère testiculaire, évalués sur 14 taureaux par échographie Doppler (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz)

L'index de résistance est corrélé positivement à l'index de pulsatilité ($R^2 = 0,969$), ce qui signifie qu'il y a une relation entre la TAMV et la PSV. Les données de littérature rapportent également une relation entre les index de résistance et de pulsatilité avec un coefficient de corrélation R^2 de 0,69 (Favaro et al., 2020) ou de 0,96 (Claus et al., 2021).

En définitive, les paramètres d'hémodynamiques testiculaires obtenus sur les taureaux de race Blonde d'Aquitaine et INRA 95, excepté l'index de pulsatilité, sont similaires à ceux obtenus pour des taureaux de race Hereford, Angus ou Brune des Alpes, seule race bovine d'origine européenne sur laquelle une étude a été menée et pour des zébus et des mâles issus de croisement avec des zébus. L'ensemble de ces données permet d'établir des normes de paramètres hémodynamiques sur les taureaux sains, pour ensuite détecter un dysfonctionnement testiculaire associé à un défaut de vascularisation ou évaluer la capacité de thermorégulation testiculaire d'un taureau.

Cependant, il est également nécessaire d'évaluer si les caractéristiques du taureau ou environnementales sont susceptibles de faire varier les paramètres hémodynamiques testiculaires.

1. Influence de l'âge sur l'index de résistance

Les index de résistance de l'artère testiculaire pour chaque taureau en fonction de son âge et de sa race sont présentés dans les figures 25 et 26.

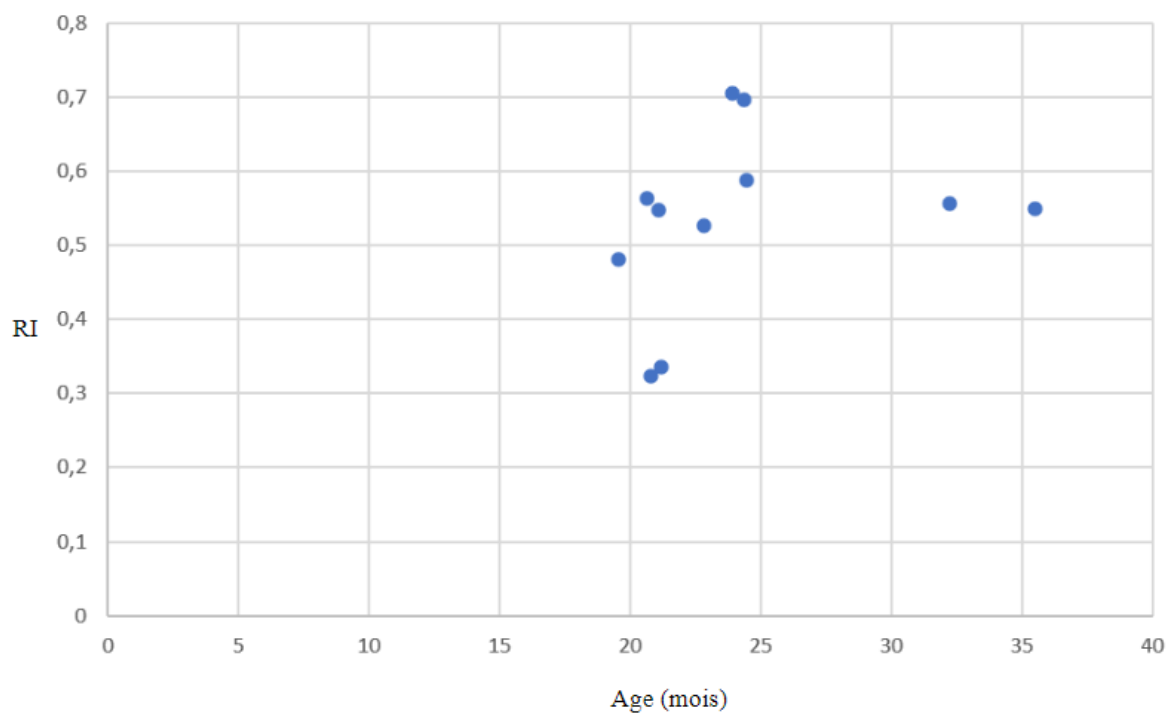


Figure 25 : Index de résistance (RI) de l'artère testiculaire en fonction de l'âge pour les 11 taureaux de race Blonde d'Aquitaine (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz)

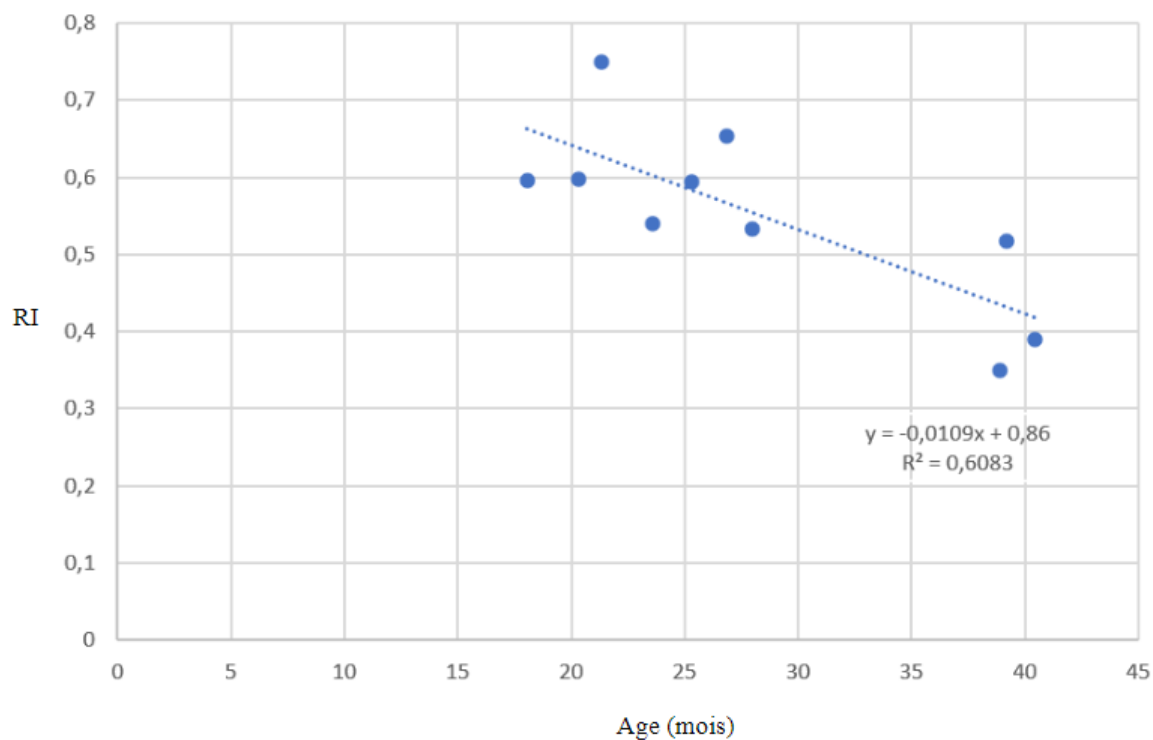


Figure 26 : Index de résistance (RI) de l'artère testiculaire en fonction de l'âge pour les 11 taureaux de race INRA 95 (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz)

Pour les taureaux de race INRA 95, âgés de 18 à 40 mois, l'âge explique 61% de la variation de l'index de résistance, les taureaux plus jeunes ayant un RI plus élevé que les taureaux plus âgés. En revanche, pour les taureaux de race Blonde d'Aquitaine, nous n'avons pas mis en évidence de relation entre l'âge et l'index de résistance vasculaire ($R^2=0,053$), en raison notamment d'un intervalle d'âge trop limité (19-24 mois pour 9 des 11 taureaux).

Sur des taureaux de race Brune des Alpes, les paramètres hémodynamiques de taureaux âgés de 17 à 24 mois ($n=9$) sont similaires à ceux de taureaux âgés de 4 à 7 ans ($n=9$) (Gloria et al. 2018). Cependant, des mâles Nelore (*Bos taurus indicus*) croisés Hereford (*Bos taurus taurus*) de 12 mois ($n=29$) ont des index de résistance et de pulsatilité plus élevés que ceux âgés de 24 mois ($n=19$) (Claus, 2021), ce qui est en accord avec nos observations.

2. Influence de la race sur l'index de résistance

L'effet de la race (Blonde d'Aquitaine et INRA95) sur l'index de résistance a été évalué sur les taureaux âgés de 18 à 25 mois (Figure 27).

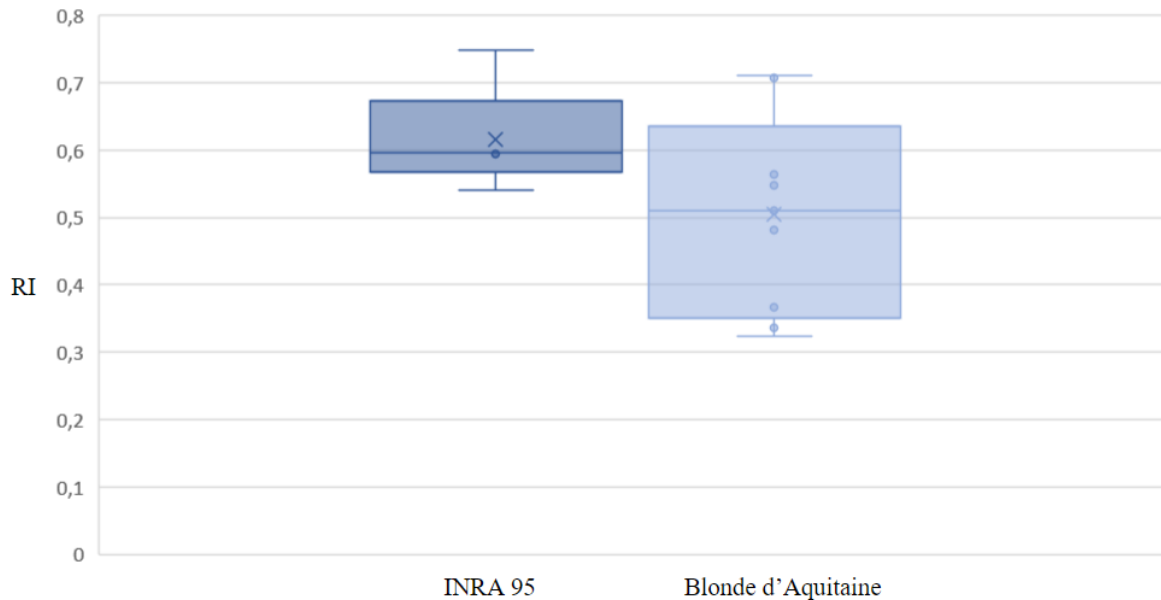


Figure 27 : Index de résistance de l'artère testiculaire (RI) des taureaux de race INRA 95 (n=5) et de race Blonde d'Aquitaine (n=9) dont l'âge est compris entre 18 et 25 mois (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz)

Nous n'avons pas mis en évidence de différence significative de l'index de résistance de l'artère testiculaire entre les taureaux Blond d'Aquitaine et INRA95 (t-test, $p > 0,05$).

Des différences de paramètres hémodynamiques entre les races ou des sous espèces ont été rapportées dans des études réalisées avec des effectifs de taureaux plus importants. Ainsi, les index PI et RI sont plus élevées chez des taureaux de race Nelore (*Bos taurus indicus*, respectivement $0,76 \pm 0,02$ et $0,51 \pm 0,01$) (n=203) par rapport à des taureaux de race Caracu (*Bos taurus taurus*, descendants de taureaux du sud-ouest de la France et de la côte nord-africaine, respectivement $0,53 \pm 0,03$ et $0,39 \pm 0,01$) (n=79) (Rodrigues, 2020). De la même façon, des taureaux de race Hereford (n=109) ont un index de résistance vasculaire plus élevé que des taureaux de race Angus (n=57), des zébus de race Nelore (=45) ou des croisés Nelore et Hereford ou Angus (n=123) (Junior, 2018).

Une étude avec des effectifs plus importants, et éventuellement sur plusieurs années dans un centre de collecte, serait donc nécessaire pour évaluer l'effet éventuel de la race sur les paramètres hémodynamiques pour les races de taureaux les plus représentées en France.

3. Influence des paramètres biométriques sur l'index de résistance

Afin de déterminer le volume testiculaire, nous avons mesuré la hauteur et largeur de chaque testicule à l'aide d'un pied à coulisse. La difficulté de la mesure et sa faible répétabilité ne nous ont pas permis d'évaluer l'effet de la conformation testiculaire sur les paramètres hémodynamiques. L'évaluation du volume testiculaire pourrait donc être effectuée par mesure de la différence de volume avant et après immersion des testicules dans un récipient d'eau.

Cette mesure ne permet toutefois pas de caractériser la forme allongée ou globuleuse des testicules.

4. Influence de la saison sur les paramètres hémodynamiques

Les paramètres hémodynamiques (index de résistance, index de pulsatilité, vitesse au pic systolique, vitesse en fin de diastole et vitesse maximale moyenne) ont été comparés pour les 6 taureaux âgés de 18 à 32 mois (au 31/05/2023) et dont l'examen échodoppler a été réalisé le 31/05/2023 et le 06/09/2023. Il y a eu, sur la période du 31 mai au 31 août, 52 jours pour lesquels le THI maximal a dépassé 80, équivalant à un stress thermique sévère pour les bovins. De plus, le THI du 6 septembre à 11h était de 75,7 et donc plus élevé que celui du 31 mai à la même heure, qui était de 68,6.

Les vitesses du flux sanguin au pic systolique sont significativement plus faibles en mai, comparativement au mois de septembre ($13,063 \pm 2,380$ cm/s versus $16,769 \pm 3,085$ cm/s, test t apparié, $p=0,0014$) (Figure 28).

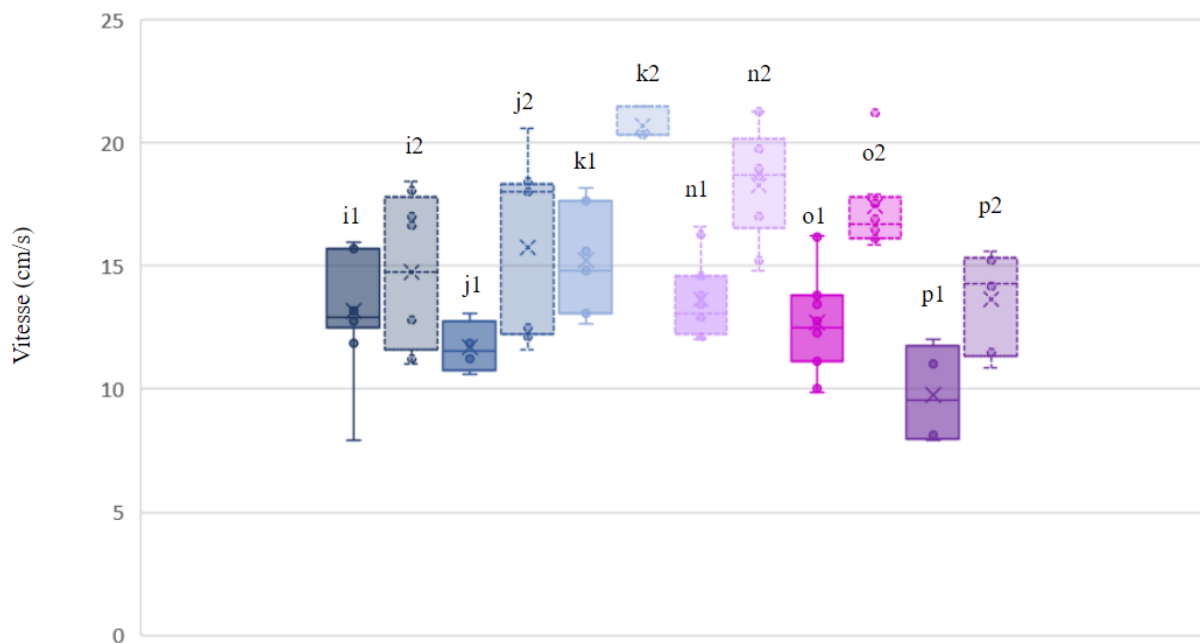


Figure 28 : Vitesses au pic systolique du flux sanguin dans l'artère testiculaire mesurées le 31/05/23 (trait plein et affixe 1) et le 06/09/23 (trait pointillé et affixe 2) sur 6 taureaux (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). La lettre au-dessus de chaque boîte correspond à l'identification du taureau.

Les vitesses du flux sanguin en fin de diastole mesurées en mai ne sont pas significativement différentes de celles de septembre ($7,399 \pm 1,789$ cm/s versus $8,468 \pm 2,907$ cm/s, test t apparié, $p>0,05$) (Figure 29).

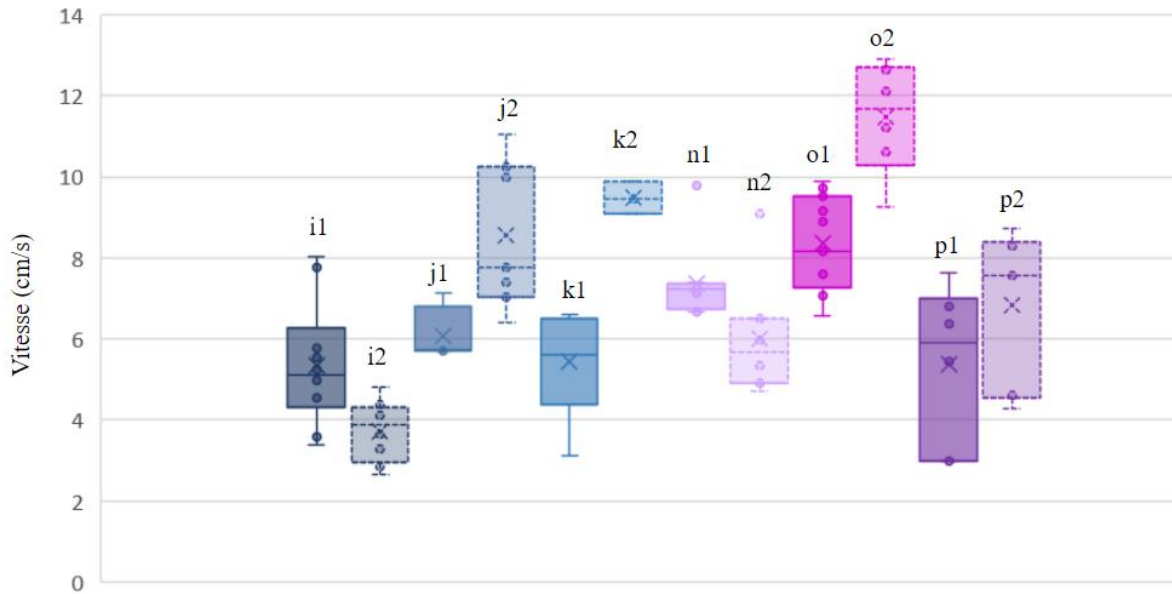


Figure 29 : Vitesses en fin de diastole du flux sanguin dans l'artère testiculaire mesurées le 31/05/23 (trait plein et affixe 1) et le 06/09/23 (trait pointillé et affixe 2) sur 6 taureaux (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). La lettre au-dessus de chaque boîte correspond à l'identification du taureau.

Les index de résistance de l'artère testiculaire mesurés en mai ne sont pas significativement différents de ceux mesurés en septembre ($0,531 \pm 0,124$ versus $0,590 \pm 0,139$, test t apparié) (Figure 30).

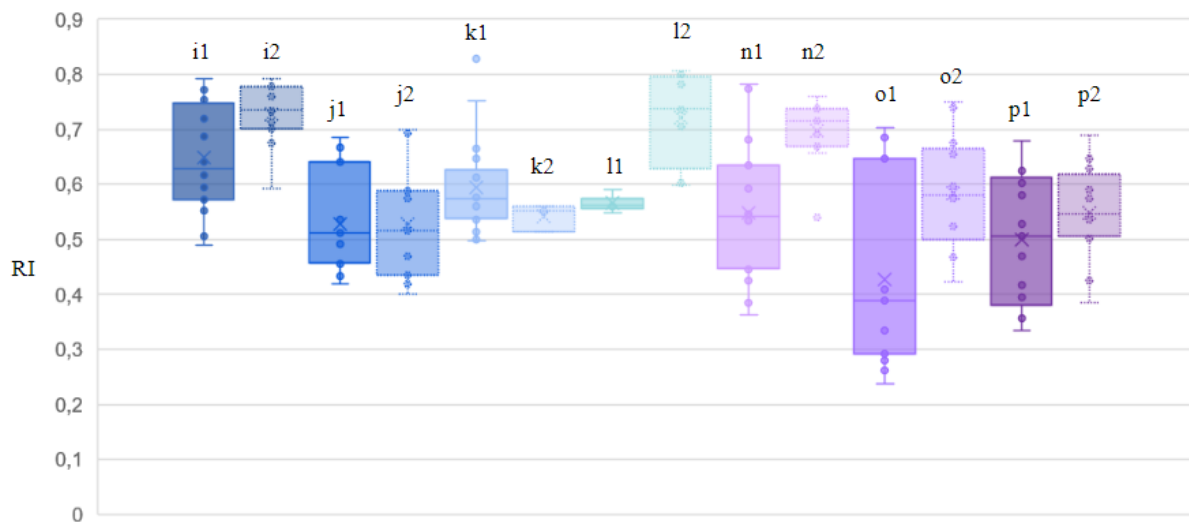


Figure 30 : Index de résistance de l'artère testiculaire mesurés le 31/05/23 (trait plein et affixe 1) et le 06/09/23 (trait pointillé et affixe 2) sur 7 taureaux (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). La lettre au-dessus de chaque boîte correspond à l'identification du taureau.

Les vitesses moyennes maximales du flux sanguin de l'artère testiculaire sont significativement plus élevées en mai ($12,51 \pm 2,734$ cm/s) comparativement en septembre ($9,678 \pm 1,877$ cm/s) (Figure 31).

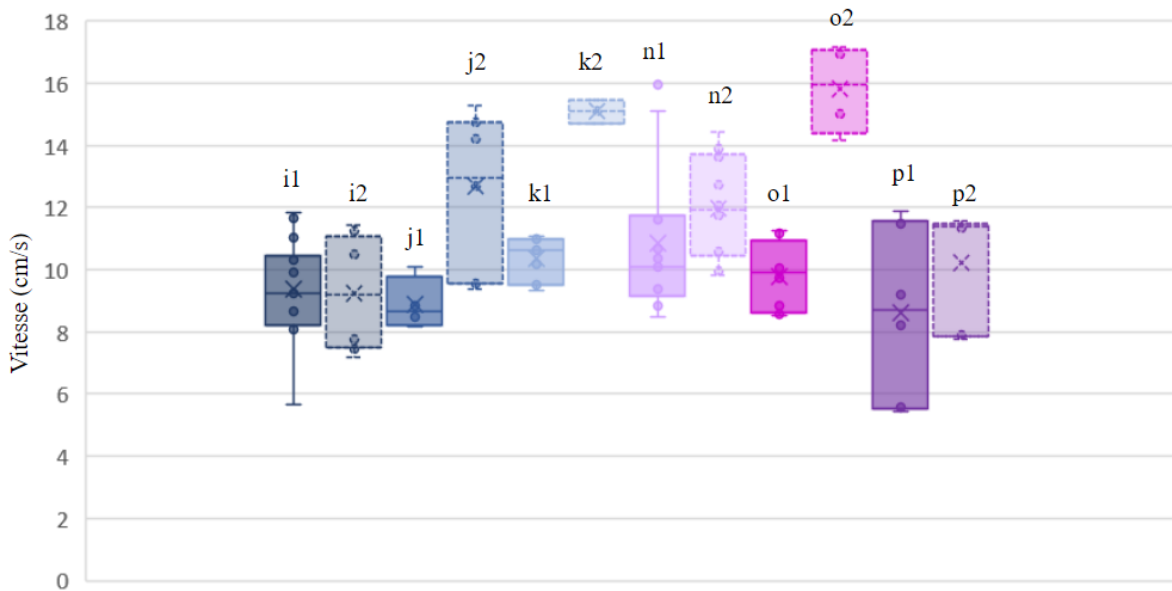


Figure 31 : Vitesses moyennes maximales du flux sanguin de l'artère testiculaire mesurées le 31/05/23 (trait plein et affixe 1) et le 06/09/23 (trait pointillé et affixe 2) sur 6 taureaux (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). La lettre au-dessus de chaque boîte correspond à l'identification du taureau.

Les index de pulsatilité de l'artère testiculaire ne sont pas significativement différents en fonction de la saison ($0,728 \pm 0,232$ pour les mesures réalisées le 31/05/2023 et $0,791 \pm 0,293$ pour les mesures réalisées le 06/09/2023) (test t apparié, Figure 32).

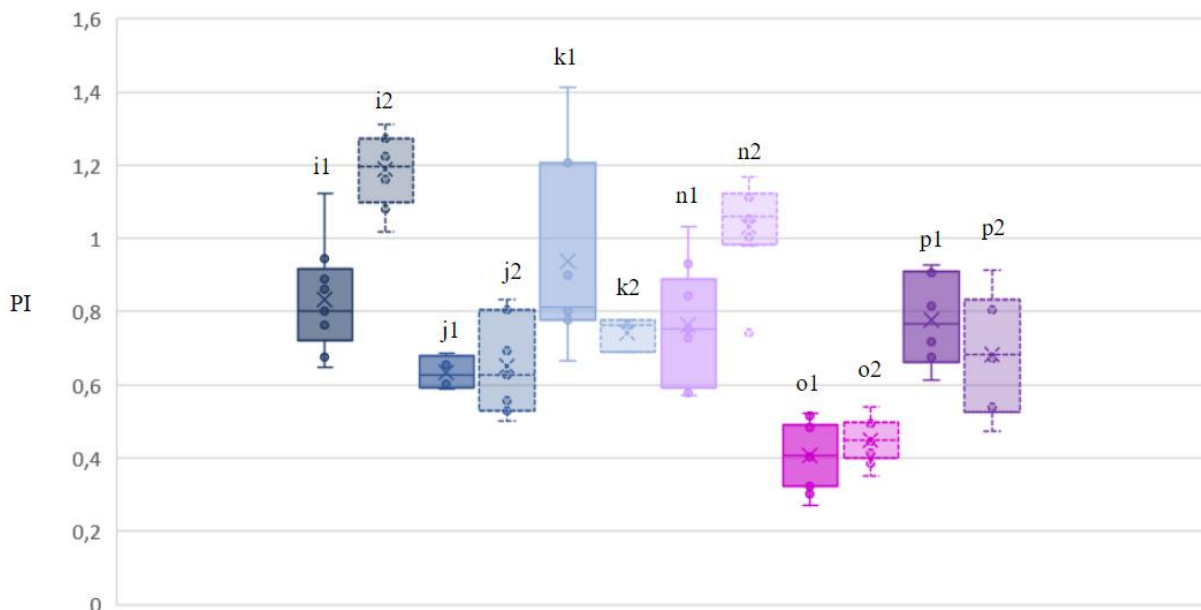


Figure 32 : Index de pulsatilité de l'artère testiculaire mesurés le 31/05/23 (trait plein et affixe 1) et le 06/09/23 (trait pointillé et affixe 2) sur 6 taureaux (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz). La lettre au-dessus de chaque boîte correspond à l'identification du taureau.

En définitive, les vitesses du flux sanguin dans l'artère testiculaire (vitesse au pic systolique et des vitesses moyennes maximales) sont augmentées après une période de stress thermique, comparativement à une période plus tempérée. Ces résultats sont en accord avec une autre étude qui montre que la vitesse moyenne du flux sanguin de l'artère testiculaire de taureaux Angus et Polled Hereford (n=28) est augmentée lorsque le THI du jour est plus élevé (Favaro et al., 2020).

Dans notre étude, nous n'avons pas observé d'effet du stress sur les index de pulsatilité et de résistance. Cependant, l'étude de Favaro et al. (2020) indique que l'index de pulsatilité augmente si le THI est plus faible et le THI des 60 jours précédant les mesures n'a pas d'effet sur ces 2 paramètres. L'effet du stress thermique sur ces paramètres hémodynamiques correspondant à des rapports de vitesse et qui prennent en compte des variations de vitesse au cours du cycle cardiaque sont plus difficiles à interpréter.

Une température ambiante élevée entraîne une augmentation du flux sanguin testiculaire rapporté à 100g de testicule, de 4,9mL/min à 5°C contre 8,2mL/min à 35°C (Barros-Adwell et al., 2018). De la même façon, une augmentation locale de la température des testicules de 34°C à 40°C pendant 45 minutes entraîne une accélération du flux sanguin, de l'apport et de la consommation de dioxygène (Rizzoto et al., 2020 ; Junior et al., 2020).

Il serait intéressant d'évaluer s'il existe une relation entre la capacité des taureaux à augmenter leur flux sanguin testiculaire, en réponse au stress thermique, et la diminution de la production de semence en période estivale.

5. Relation entre les paramètres hémodynamiques testiculaires et la production de semence

Nous avons classé les taureaux selon leur production spermatique en trois catégories : les « bons » producteurs, les « mauvais » producteurs et les « bons » producteurs donc la production de semence s'est dégradée à partir du 17 août. Les critères de classification sont fondés sur plusieurs critères : le nombre moyen de doses produites par éjaculat sur la période de mai à septembre, la diminution de ce nombre de doses produites à partir de mi-août, la motilité progressive et le pourcentage de spermatozoïdes normaux. Les éjaculats pour lesquels la concentration en spermatozoïde est inférieure à 300 millions par mL et/ou la motilité est inférieure à 50% sur la semence fraîche sont détruits et correspondent donc à des éjaculats pour lesquels le nombre de doses produites est de 0.

Les taureaux classés comme mauvais producteurs sont les taureaux l, p et q. La moyenne de doses produites par éjaculat est inférieure à 82. Les données de production du taureau q représentatif de ce groupe sont présentées sur la figure 33.

Les taureaux classés comme « bons » producteurs sont les taureaux i, k et m. Leur moyenne de doses produites par éjaculat est supérieure à 122 et le nombre de doses produites par éjaculat est régulier sur la période du 2 mai au 15 septembre. Les données de production du taureau k, représentatif de ce groupe, sont présentées sur la figure 34.

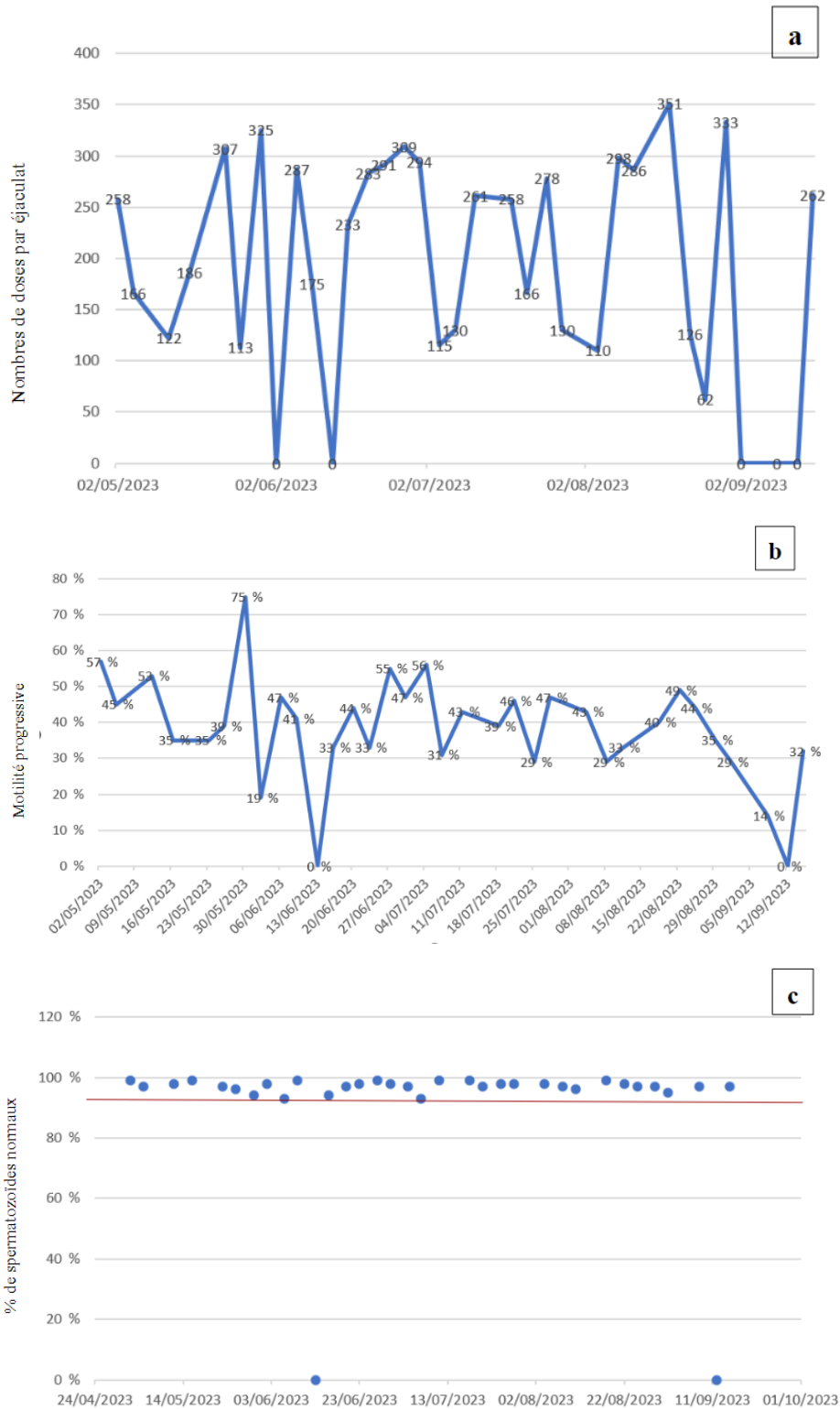
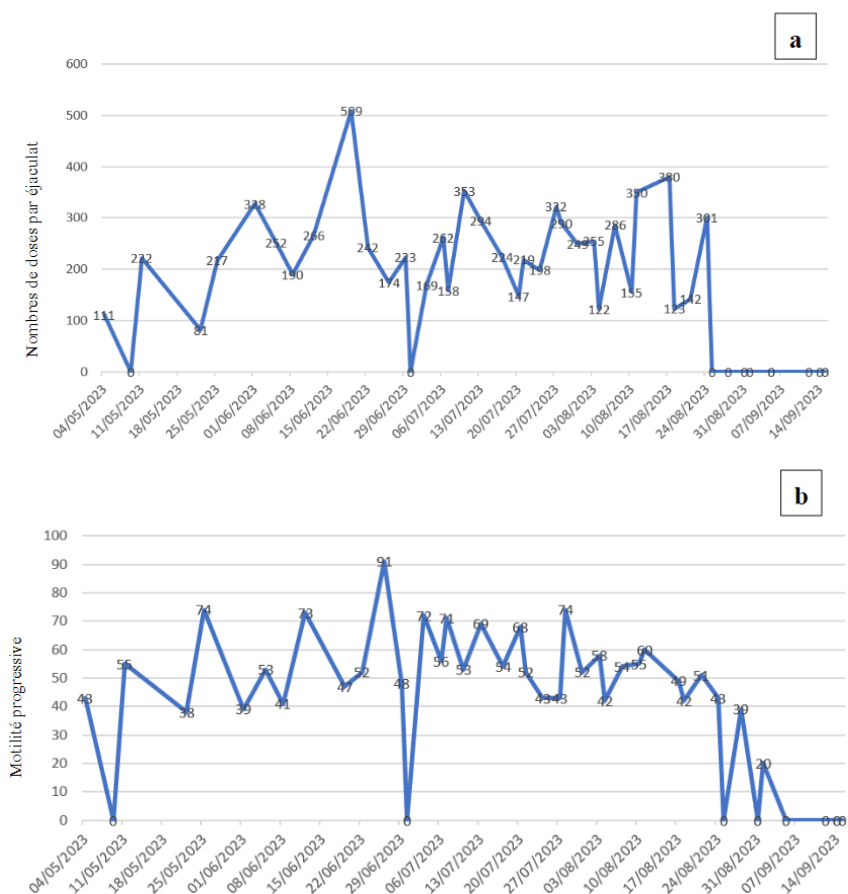


Figure 34 a, b et c : Caractéristiques de la production de semence du taureau k, classé comme bon producteur, sur la période du 2 mai au 15 septembre. Le nombre de doses produites est élevé et régulier (a), la motilité progressive est élevée (b) et le pourcentage de spermatozoïdes normaux est toujours supérieur à 93% (c).

Les taureaux classés comme « bons » producteurs mais dont la production se dégrade après le 17 août sont les taureaux j, n et o. Le nombre de doses produites par éjaculat est compris entre 89 et 197 mais avec une diminution à partir de mi-août. Les données de production du taureau j représentatif de ce groupe, sont présentées sur la figure 35. La dégradation des paramètres spermatiques est observée deux mois après une période de quatre jours pendant lesquels le THI a été supérieur à 80 (du 23 au 27 juin) et concomitamment à une période de quatorze pendant lesquels le THI a été supérieur à 80 dont cinq jours avec un THI supérieur à 90 (du 19 au 24 août).



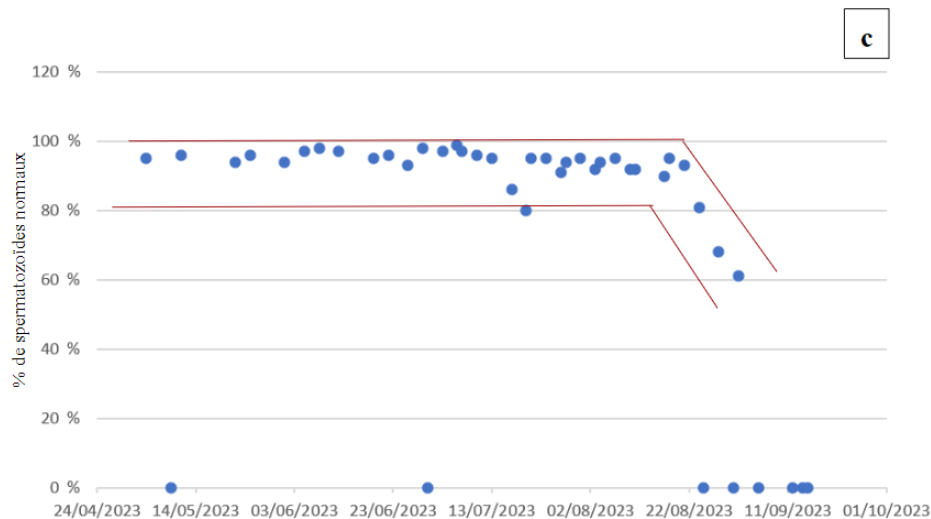


Figure 35 a, b et c : Caractéristiques de la production de semence du taureau j, classé comme bon producteur avec une dégradation à partir de mi-août. Le nombre de doses produites par éjaculat est correct jusqu'au 24 août (a), la motilité progressive est élevée et chute à partir de mi-août (b), de même, le pourcentage de spermatozoïdes normaux qui se dégrade fortement à partir du 21 août (c).

Les index de résistance de l'artère testiculaire ne sont pas différents entre ces trois groupes de taureaux (t-test) (figure 36).

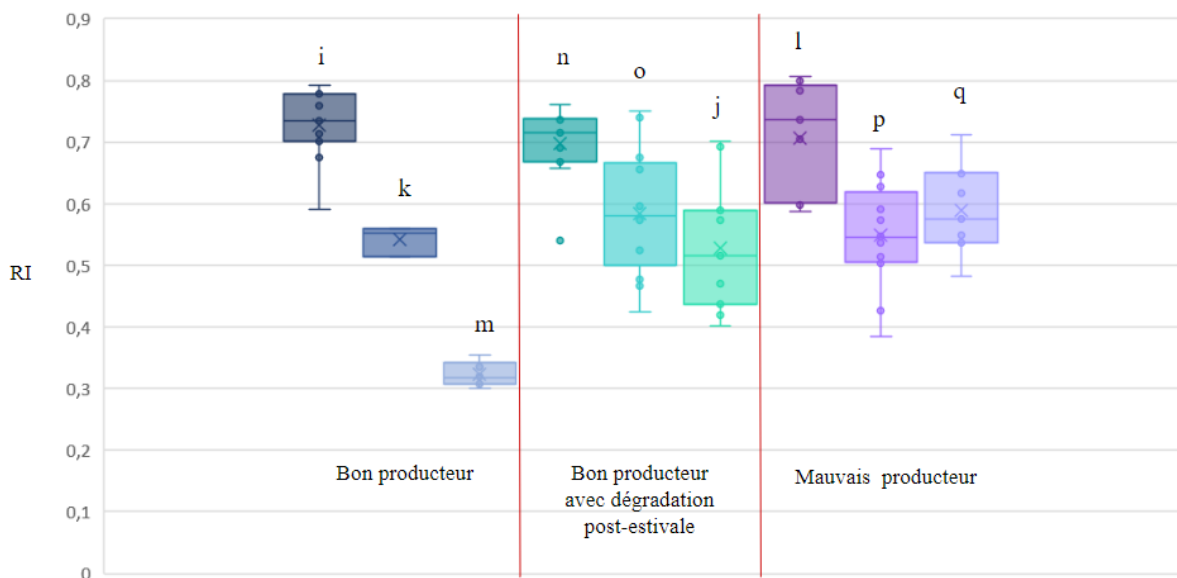


Figure 36 : Index de résistance de l'artère testiculaire des taureaux de race Blonde d'Aquitaine (n=4) et INRA 95 (n=2) en fonction de leur score de production spermatique (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz).

Dans un deuxième temps, la relation entre la différence entre l'index de résistance mesuré au mois de mai et celui mesuré au mois de septembre et le score de production de semence a été évaluée (figure 37).

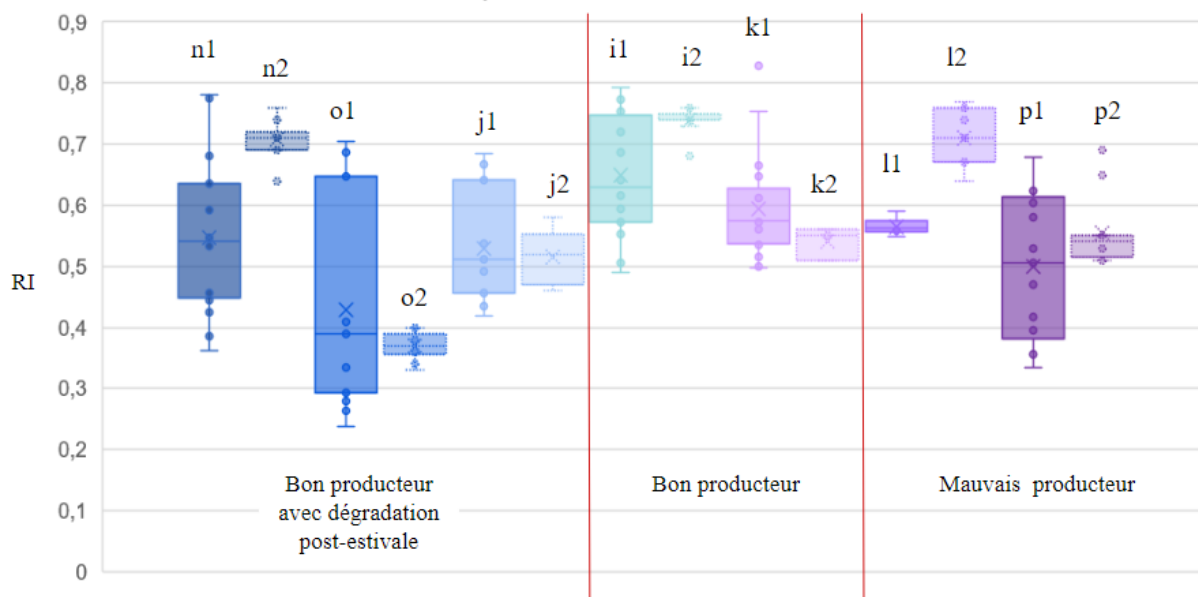


Figure 37 : Index de résistance de l'artère testiculaire mesurés en mai (trait plein) et en septembre (trait pointillés) sur des taureaux i à p de race Blonde d'Aquitaine (n=4) et INRA 95 (n=2) classés en fonction de leur score de production spermatique (fréquence Doppler : 5MHz ; PRF : 1,5kHz).

Les variations des index de résistance de l'artère testiculaire entre septembre et mai ne sont pas différentes entre ces trois groupes de taureaux. Cela signifie que les index de résistance de l'artère testiculaire et leur évolution à la suite d'une période avec un THI > 80 pendant 52 jours ne sont pas corrélés aux paramètres séminologiques dans cette étude. De même, les variations des vitesses au pic systolique et des vitesses moyennes maximales de l'artère testiculaire entre septembre et mai ne sont pas différentes entre ces trois groupes de taureaux

La relation entre les paramètres hémodynamiques de l'artère testiculaire et séminologiques a été peu étudiée chez le taureau et certaines études se contredisent. D'après Portugal (2014), les taureaux ayant une bonne qualité de semence (n=6) ont des index de résistance et de pulsatilité plus faibles que les taureaux ayant une semence de qualité médiocre (n=6). Cependant, des zébus de race Nelore dont la fertilité en monte naturelle est élevée (taux de gestation de 84%, n=9) présentent des index de pulsatilité et de résistance de l'artère testiculaire (PI = 0,93 et RI = 0,57) significativement supérieurs à ceux de taureaux dont la fertilité est plus faible (taux de gestation de 66 % ; n=10 ; PI = 0,69 et RI = 0,48) (Gomes, 2022).

Chez le chien, les vitesses systolique et diastolique sont corrélées positivement à la concentration spermatique et les index de pulsatilité et de résistance sont corrélés négativement à l'intégrité de la membrane spermatique (Lemos, 2020). De plus, Zelli et al. (2013) ont observé que les premières étapes de la spermatogénèse sont sensibles à une réduction du flux sanguin, qui conduit à un défaut d'apport en énergie pour les cellules.

La dégradation de la qualité de la semence lors d'une période de stress thermique a été bien démontrée. Dans une étude menée par Casady et al. (1953), deux taureaux *Bos taurus* ont été exposés à une température de 37°C avec 81% d'humidité relative pendant 12 heures par jour pendant 17 jours consécutifs. Les éjaculats récoltés concomitamment à cette exposition

présentaient 30 à 40 % de spermatozoïdes morphologiquement anormaux (principalement des flagelles courbés ou rétroversés et des têtes détachées) associés à une forte diminution du nombre total de spermatozoïdes, de leur concentration et de leur motilité. Dans une autre étude, des taureaux *Bos taurus* (Friesland) et *Bos indicus* (Afrikaner) ont été exposés à une température ambiante de 40 °C avec 35 à 45 % d'humidité relative pendant 12 heures. Une baisse significative de la motilité et du pourcentage de spermatozoïdes vivants ainsi qu'une augmentation significative du pourcentage de spermatozoïdes morphologiquement anormaux ont été observés (Skinner, 1996). Dans notre étude, l'altération de la production spermatique, avec une diminution de la motilité et du pourcentage de spermatozoïdes normaux, observée à partir du 17 août chez certains taureaux est certainement liée à l'épisode de stress thermique concomitant. Cependant, cet effet du stress thermique n'a pas été observé sur tous les taureaux.

V. Conclusion et perspectives

Notre étude a permis de développer une méthode d'échographie Doppler de l'artère testiculaire du taureau répétable et reproductible permettant d'évaluer l'index de résistance mais aussi les vitesses au pic systolique, en fin de diastole, l'index de pulsatilité et la vitesse moyenne maximale. La mesure des vitesses au pic systolique et en fin de diastole doit être réalisée de manière rigoureuse, en minimisant l'erreur relative liée à un angle θ trop important entre la direction de la portion de l'artère testiculaire et le faisceau d'ultrasons. Cependant, l'index de résistance est indépendant de l'angle θ et peut donc être évalué quel que soit l'angle θ .

Cette méthode a permis d'évaluer les paramètres hémodynamiques sur 17 taureaux de race Blonde d'Aquitaine et INRA 95 dont 6 ont été échographiés deux fois, en mai et en septembre, et dont la production spermatique des 2 à 3 mois précédant les mesures a été évaluée. Or, ces taureaux relativement jeunes ont commencé leur production en mai 2023 et nous savons que la qualité de la production de semence (volume d'éjaculat, concentration en spermatozoïdes) peut être plus variable après la période d'habituation des taureaux. La dégradation de la qualité de la production lors de la période estivale, et donc l'effet du stress thermique, a donc pu être sous-estimée, chaque taureau étant son propre témoin. Il serait donc nécessaire d'évaluer l'effet du stress thermique sur des taureaux matures sexuellement et de comparer les données de production obtenues soixante jours après un stress thermique (en septembre ou octobre) à celles obtenues en hiver.

Pour les taureaux de race INRA 95, l'index de résistance vasculaire diminue avec l'âge. Les paramètres hémodynamiques n'étaient pas différents pour les deux races étudiées, Blond d'Aquitaine et INRA95. La période de stress thermique prolongée a conduit à une augmentation de la vitesse systolique et de la vitesse moyenne maximale.

L'échographie Doppler de l'artère testiculaire pourrait donc constituer un examen complémentaire intéressant pour mettre en évidence une perturbation du flux sanguin qui pourrait entraîner des conséquences sur la production spermatique et sur la capacité des taureaux à résister au stress thermique. En effet, l'index de résistance vasculaire est corrélé à la qualité de la semence chez les taureaux et zébus (Portugal, 2014 ; Gomes et al., 2022). Il pourrait ainsi constituer un bon indicateur de la qualité de production spermatique des taureaux. Par ailleurs, même si les paramètres séminologiques sont relativement bien corrélés au pouvoir fécondant de la semence, d'autres caractéristiques biologiques telles que la réaction acrosomique, la pénétration de la zone pellucide, peuvent influencer la fertilité des taureaux (Garrigue, 2017). Il serait intéressant d'étudier la relation entre la fertilité du taureau, en termes de réussite à l'insémination, et les paramètres hémodynamiques du taureau.

L'étude devra être poursuivie pour définir les intervalles de confiance des paramètres hémodynamiques des taureaux élevés en France et en Europe et pour évaluer les principaux facteurs de variation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdelnaby E.A. Testicular haemodynamics, plasma testosterone and oestradiol concentrations, and serum nitric oxide levels in the Egyptian buffalo bull after a single administration of human chorionic gonadotropin. *Reproduction in domestic animals*, 2022, Vol.57, p.754–760.

Amann R.P. Endocrine changes associated with onset of spermatogenesis in Holstein bulls. *Journal of Dairy Science*, 1983, Vol. 66, p.2606-2622.

Barone, R. – Anatomie comparée des mammifères domestiques – Tome 4 : Splanchnologie _.
Paris : Vigot, 1990. 501p.

Barros Adwell C.M.Q., Brito L.F.C., Oba E., Wilde R.E., Rizzoto G., Thundathil J.C., Kastelic J.P. Arterial blood flow is the main source of testicular heat in bulls and higher ambient temperatures significantly increase testicular blood flow. *Theriogenology*, août 2018, Vol 116, p.12-16

Barth A.D., Alisio L., Aviles M., Arteaga A.A., Campbell J.R., Hendrick S.H. Fibrotic lesions in the testis of bulls and relationship to semen quality. *Animal Reproduction Science*, 2008, Vol. 106, p.274–288.

Biagiotti G., Cavallini G., Modenini F., Vitali G., Gianoroli L. Spermatogenesis and spectral echo-colour Doppler traces from the main testicular artery. *BJU International*, 2002, Vol. 90, p.903–908.

Brito L.F.C., Silva Antonio E.D.F, Barbosa Rogerio T., Kastelic J.P. Testicular thermoregulation in *Bos indicus*, crossbred and *Bos taurus* bulls : relationship with scrotal, testicular vascular cone and testicular morphology, and effects on semen quality and sperm production. *Theriogenology*, 2004, Vol 61, p. 511-528.

Brito L.F.C., Silva Antonio E.D.F, Barbosa Rogerio T., Kastelic J.P. Effects of scrotal insulation on sperm production, semen quality, and testicular echotexture in *Bos indicus* and *Bos indicus* x *Bos taurus* bulls. *Animal Reproduction Science*, novembre 2003, Vol.79, Issue 1-2, p.1-15.

Bumin A., Kaya M., Kiba M. Gray-scale, colour and power Doppler sonography of scrotal disorders in dogs. *Revue de Médecine Vétérinaire*, mars 2007, p. 128-133.

Burgos-Zimbelman R., Collier R.J. Feeding strategies for high-producing dairy cows during periods of elevated heat and humidity. *Tri-State Dairy Nutrition Conference*, avril 2011.

Carrillo J.D., Soler M., Lucas X., Agut A. Colour and Pulsed Doppler Ultrasonographic Study of the Canine Testis. *Reproduction in Domestic Animals*, 2012, Vol. 47. p. 655-659

Casady R.B., Myers R.M., Legates J.E.. The effect of exposure to high ambient temperature on spermatogenesis in the dairy bull. *Journal of Dairy Science*, janvier 1953, Vol. 36, Issue 1, p.14-23.

Chetboul V., 2012. Vues normales : modes 2D, TM, Doppler spectral et couleur. In : Chetboul V., Bussadori C., de Madron E., *Echocardiographie clinique du chien et du chat*. Editions Elsevier-Masson, Issy-les-Moulineaux, p.3-18.

Claus L.A.M., Barca Junior F.A., Junior C.K., Pereira G.R., Fávoro P.D.C., Ferreira F.P., Galdioli V.H.G., Seneda M.M., Ribeiro E.L.A. Testicular shape, scrotal skin thickness and testicular artery blood flow changes in bulls of different ages. *Reproduction in Domestic Animals*, 2021, Vol. 56, p. 1034-1039.

Cook R.B., Coulter G.H., Kastelic J.P. The testicular vascular cone, scrotal thermoregulation and their relationship to sperm production and seminal quality in beef bulls. *Theriogenology*, 1994, Vol. 41, p. 653-671.

Collier R.J., Gebremedhin K.G.. Thermal Biology of Domestic Animals. *Annual Review of Animal Biosciences*, février 2015, Vol.3, p. 513-532.

Dauzat M., Pérez-Martin A., Schuster I., Boge G., Laroche J-P. Détection et mesure du flux sanguin par ultrasonographie. *DIU Echographie et techniques ultrasonores*, Service d'Exploration & Médecine Vasculaire - CHU de Nîmes EA 2992 – UFR de Médecine de Montpellier – Site de Nîmes, présenté à Nîmes en janvier 2012.

Dubinsky, T., Chen, P., Maklad, N. Color-flow and power Doppler imaging of the testes. *World Journal of Urology*, 1998, Vol. 16, p.35-40.

Dudea S., Ciurea A., Chiorean A., Botar-Jid C. Doppler applications in testicular and scrotal disease. *Medical Ultrasonography* 2010, Vol. 12, p.43-45.

Favaro da Cruz P., Ribas Pereira G., Junior Barca F.A., Adona P.R., Victalina Franco E.M., da Silva Dias I., Marcondes Seneda M. Koetz Junior C. Hemodynamic evaluation of the suprastesticular artery in bulls. *Livestock Science*, novembre 2020, Vol. 241, 104210.

Gacem S., Papas M., Catalan J., Miro J. Examination of jackass (*Equus asinus*) accessory sex glands by B-mode ultrasound and of testicular artery blood flow by color pulsed-wave Doppler ultrasound: Correlations with semen production. *Reproduction in Domestic Animals*, février 2020, Vol. 55, p. 181-188.

Garrigue M., 2017. Effet du stress thermique sur les paramètres séminologiques de taureaux de centre d'insémination. Thèse pour obtenir le grade de Docteur Vétérinaire. Soutenue à Toulouse : Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse.

Gloria A., Carluccio A., Wegher L., Robbe D., Valorz C., Contri A. Pulse wave Doppler ultrasound of testicular arteries and their relationship with semen characteristics in healthy bulls. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2018, Vol. 9, art.14.

Gloria A., Di Francesco L., Marruchella G., Robbe D., Contri A. Pulse-wave Doppler pulsatility and resistive indexes of the testicular artery increase in canine testis with abnormal spermatogenesis. *Theriogenology*, décembre 2020, Vol. 158, p. 454-460.

Gomes-Fernandes L.G., Borges M.S., Silva M.O., Rodrigues N.N., Vicentini R.R., Crespilho A.M. Use of auxiliary techniques for assessing the reproductive capacity of natural service Nelore bulls. *Animal Reproduction in Science*, décembre 2012, Vol. 247, 107090.

Gonçalves, A.A., Garcia, A.R., Rolim Filho, S.T., da Silva, J.A.R., de Melo, D.N., Guimarães, T.C., Tavares, H.R., Silva, T.V.G., de Souza, E.B., Santos, S.d.S.D. Scrotal Thermoregulation and Sequential Sperm Abnormalities in Buffalo Bulls (*Bubalus Bubalis*) under Short-Term Heat Stress. *Journal of Thermal Biology*, 2021, Vol. 96, 102842.

Grataloup-Oriez C., Charpentier A. Principes et techniques de l'échographie-doppler. *Encycl Méd Chir (Elsevier, Paris), Radiodiagnostic – Principes et techniques d'imagerie*, 35-003-C-10, 1999, p.10

Grenier M., Claudon N. Bases physiques du Doppler, DIU Echographie et techniques ultrasonores, Hopital Pellegrin – Bordeaux, Hopital Brabois – Nancy, présenté en janvier 2013 à Paris.

Hansen P.J.. Effects of heat stress on mammalian reproduction. *Philosoph. Trans. Roy. Soc. B.*, novembre 2009, Vol. 364, p. 3341-3350.

Hedia M.G., El-Belely M.S., Ismail S.T., Amal M.. Monthly changes in testicular blood flow dynamics and their association with testicular volume, plasma steroid hormones profile and semen characteristics in rams. *Theriogenology*, janvier 2019, Vol. 123, p.68-73.

Hees H., Leiser R., Kohler T., Wrobel K.H. Vascular morphology of the bovine spermatic cord and testis. *Cell and tissue research*, 1984, Vol. 237, p.31-38.

Hochereau, M. T. et al. – Durée de la spermatogenèse chez le taureau : étude par autoradiographie testiculaire. *5th. Int. Congr. Anim. Reprod. Artif. Insem.* 1964. 3 :541.

Jégou B., Rolland A.D., Albert O. Le testicule. In : Saint Dizier M, Chastant-Maillard S. *La reproduction animale et humaine*, éditions Quae 2014. p. 87-117.

Junior Barca F.A., Junior C.K., Da Cruz Fávoro P., Pereira GR., Morotti F., Oliveira Menegassi S.R., Jardim Barcellos J.O., Marcondes Seneda M. Effect of breed on testicular blood flow dynamics in bulls. *Theriogenology*, septembre 2018, Vol.118, p.16-21.

Junior Barca F.A., Junior C.K., Da Cruz Fávoro P., Pereira GR., Morotti F., Oliveira Menegassi S.R., Jardim Barcellos J.O., Marcondes Seneda M. Infrared thermography and Doppler ultrasonography to evaluate the effects of scrotal insulation on testicular blood flow dynamics in bulls. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, juillet/août 2020, Vol. 41, n.4, p.1267-1278.

Johnston J.E., Naelapaa H., Frye J.B.. Physiological responses of Holstein, Brown Swiss and Red Sindhi crossbred bulls exposed to high temperatures and humidities. *Journal of Animal Science*, mai 1963, Vol. 22, Issue 2, p.432-436.

Kastelic J. P., Rizzoto G., Thundathil J. Review: Testicular vascular cone development and its association with scrotal thermoregulation, semen quality and sperm production in bulls. *Animal*, 2018, s133-s141.

Kendall, P. E., Webster J. R. Season and physiological status affects the circadian body temperature rhythm of dairy cows. *Livestock Science*, 2009, Vol.125, p.155–160.

Koivisto M., Costa M., Perri S., Vicente W.. The effect of season on semen characteristics and freezability in *Bos Indicus* and *Bos Taurus* bulls in the southeastern region of Brazil. *Reproduction in Domestic Animals*, Août 2009, Vol. 44, no. 4, p.587–592.

Lemos H., Dorado J., Hidalgo M., Gaivao I., Martins-Bessa A.. Assessment of dog testis perfusion by colour and pulsed-Doppler ultrasonography and correlation with sperm oxidative DNA damage. *Topics in Companion Animal Medicine*, novembre 2020, Vol.41, 100452.

Nichi M., Bols P.E.J., Zuge R.M., Barnabe V.H., Goovaerts I.G.F. Barnabe R.C., Cortada C.N.M.. Seasonal variation in semen quality in *Bos indicus* and *Bos taurus* bulls raised under tropical conditions. *Therionology*, septembre 2006, Vol. 66, Issue 4, p.822-828.

Ortega-Ferrusola C, Gracia-Calvo LA, Ezquerro J, Pena FJ. Use of colour and spectral Doppler ultrasonography in stallion andrology. *Reprod Domest Anim*. octobre 2014, Vol.49 Suppl 4,p.88-96.

Pinggera G-M., Mitterberger M., Bartsch G., Strasser H., Gradl J., Aigner F., Pallwein L. Frauscher F.. Assessment of the intratesticular resistive index by colour Doppler ultrasonography measurements as a predictor of spermatogenesis. *BJU International*, mars 2008, Vol.101(6): p. 722-726.

Portugal dos Santos E. Termografia e ultrassonografia doppler do plexo pampiforme e termografia do escroto de touros : correlacao com a qualidade do sêmen, 2014. Thèse pour

l'obtention du grade de docteur vétérinaire. Jaboticabal : Université Estadual Paulista ; Faculté de science agricole et vétérinaire.

Pozor M. Evaluation of Testicular Vasculature in Stallions. *Clinical techniques in equine practice*, décembre 2007, Vol. 6, p. 271-277.

Rahman M.B., Schellander K., Llamas Luceno N., Van Soom A. Heat stress responses in spermatozoa: Mechanisms and consequences for cattle fertility. *Theriogenology*, juin 2018, Vol. 113, p. 102-112.

Rizzoto G., Ferreira J.C.P., Mogollón Garcia H.D., Teixeira-Neto F.J., Bardella L.C., Martins L.C., Silva J.R.B., Thundathil J.C., Kastelic J.P. Short-term testicular warming under anesthesia causes similar increases in testicular blood flow in *Bos taurus* versus *Bos indicus* bulls, but no apparent hypoxia. *Theriogenology*, mars 2020, Vol. 145, p. 94-99.

Rodrigues N.N., Rossi G.F., Vrisman D.P., Taira A.R.Souza L.L., Zorzetto M.F., Bastos M.N. Ultrasonographic characteristics of the testes, epididymis and accessory sex glands and arterial spectral indices in peri- and post-pubertal Nelore and Caracu bulls. *Animal reproduction science*, janvier 2020, Vol. 212, 106235.

Samir H., ElSayed M., Radwan F., Hedia M., Hendawy H. An updated insight on testicular hemodynamics: Environmental, physiological, and technical perspectives in farm and companion animals. *Veterinary Research Communications*, novembre 2023, Vol. 47, p.323-345.

Sary R.G., Mohamed R.H., Khalil K.M., Al-lethie A., Hussein H.A. Relationship between angioarchitecture of the testicular artery and spermogram parameters in Egyptian buffalo bulls (*bubalus bubalis*). *Reproduction in Domestic Animals*, 2020, Vol. 55, p.343–350

Skinner J.D., Louw G.N. Heat stress and spermatogenesis in *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle. *Journal of Applied Physiology*, novembre 1996, Vol. 21, p.1784-1790.

Strina A., Corda A., Nieddu S., Solinas G., Lilliu M., Zedda M. T., Paul S., Ledda S. Annual variations in resistive index (RI) of testicular artery, volume measurements and testosterone levels in bucks. *Comparative clinical pathology*, 2016, Vol. 25, p.409-413.

Viana, J.H., Urashiro, E.K., Siqueira, L.G., Ghetti, A., Areas, V., Guimarães, C.R., Palhão, M.P., Camargo, L.S.A., Fernandes, C.A. Doppler ultrasonography as a tool for ovarian management. *Animal Reproduction*, 2013, Vol.10, p.215–222.

Waites G.M.H., Setche B.P. Effect of local heating on blood flow and metabolism in the testis of the conscious ram. *Reproduction*, Décembre 1964, Vol.8, p.339-349.

Zelli R., Troisi A., Elad Ngonput A., Cardinali L., Polisca A. Evaluation of testicular artery blood flow by Doppler ultrasonography as a predictor of spermatogenesis in the dog. *Research in Veterinary Science*, octobre 2013, Vol. 95, p.632-637.

Toulouse, octobre 2023

NOM : Bassalert

PRÉNOM : Julie

TITRE : L'ÉCHOGRAPHIE DOPPLER DE L'ARTÈRE TESTICULAIRE DU TAUREAU : MISE AU POINT DE LA MÉTHODE ET CORRÉLATION AVEC LES PARAMÈTRES PHYSIOLOGIQUES ET SEMINOLOGIQUES

RÉSUMÉ :

L'échographie doppler de l'artère testiculaire permet d'évaluer les paramètres hémodynamiques et apporte donc des informations sur la vascularisation testiculaire, importante pour la thermorégulation, l'artère testiculaire constituant l'unique apport sanguin du testicule.

L'objectif de cette étude est, dans un premier temps, la mise au point de la technique et l'optimisation des réglages de l'écho doppler testiculaire puis, dans un second temps, l'évaluation des relations entre les paramètres hémodynamiques testiculaires (vitesse au pic systolique, vitesse en fin de diastole, résistance vasculaire etc.) et l'âge et la race des taureaux, leur qualité spermatique et la résistance à la chaleur. Cette étude a été réalisée sur 16 taureaux de races INRA 95 et Blonde d'Aquitaine de l'unité de sélection AURIVA. C'est l'une des premières études réalisées incluant des taureaux de races et souches françaises, l'échographie doppler testiculaire ayant été principalement réalisées en Amérique du Sud. La résistance vasculaire de l'artère testiculaire varie entre 0,342 et 0,648 pour ces deux races et diminue avec l'âge.

Mots clés : échographie, doppler, artère testiculaire, qualité spermatique

TITLE : DOPPLER ULTRASOUND OF THE TESTICULAR ARTERY IN BULLS: METHOD DEVELOPMENT AND CORRELATION WITH PHYSIOLOGICAL AND SEMINOLOGICAL PARAMETERS

ABSTRACT :

Doppler ultrasonography of the testicular artery is used to assess hemodynamic parameters and therefore provides information on testicular vascularization, which is important for thermoregulation, as the testicular artery constitutes the sole blood supply to the testicle.

The aim of this study was, firstly, to fine-tune the technique and optimize testicular Doppler ultrasound settings and, secondly, to evaluate the relationships between testicular hemodynamic parameters (peak systolic velocity, end-diastolic velocity, vascular resistance, etc.) and bull age and breed, sperm quality and heat resistance. This study was carried out on 16 bulls of the INRA 95 and Blonde d'Aquitaine breeds from the AURIVA selection unit. This is one of the first studies including bulls of French breeds and strains, as testicular Doppler ultrasound has mainly been carried out in South America. The resistance index of testicular artery varies between 0.342 and 0.648 for these two breeds, and decreases with age.

Key words : ultrasound, doppler, testicular artery, sperm quality