

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2023 - Thèse n° 073

**UTILISATION DE L'ÉCHOGRAPHIE DOPPLER DANS LE
DOMAINE DE LA REPRODUCTION CHEZ LA JUMENT**

THESE

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

Et soutenue publiquement le 20 octobre 2023
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

ABGRALL Coline

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2023 - Thèse n° 073

**UTILISATION DE L'ÉCHOGRAPHIE DOPPLER DANS LE
DOMAINE DE LA REPRODUCTION CHEZ LA JUMENT**

THESE

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

Et soutenue publiquement le 20 octobre 2023
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

ABGRALL Coline

Liste des enseignants

Pr	ABITBOL	Marie	Professeur
Dr	ALVES-DE-OLIVEIRA	Laurent	Maître de conférences
Pr	ARCANGIOLI	Marie-Anne	Professeur
Dr	AYRAL	Florence	Maître de conférences
Pr	BECKER	Claire	Professeur
Dr	BELLUCO	Sara	Maître de conférences
Dr	BENAMOU-SMITH	Agnès	Maître de conférences
Pr	BENOIT	Etienne	Professeur
Pr	BERNY	Philippe	Professeur
Pr	BONNET-GARIN	Jeanne-Marie	Professeur
Dr	BOURGOIN	Gilles	Maître de conférences
Dr	BRUTO	Maxime	Maître de conférences
Dr	BRUYERE	Pierre	Maître de conférences
Pr	BUFF	Samuel	Professeur
Pr	BURONFOSSE	Thierry	Professeur
Dr	CACHON	Thibaut	Maître de conférences
Pr	CADORÉ	Jean-Luc	Professeur
Pr	CALLAIT-CARDINAL	Marie-Pierre	Professeur
Pr	CHABANNE	Luc	Professeur
Pr	CHALVET-MONFRAY	Karine	Professeur
Dr	CHANOIT	Guillaume	Professeur
Dr	CHETOT	Thomas	Maître de conférences
Pr	DE BOYER DES ROCHES	Alice	Professeur
Pr	DELIGNETTE-MULLER	Marie-Laure	Professeur
Pr	DJELOUADJI	Zorée	Professeur
Dr	ESCRIOU	Catherine	Maître de conférences
Dr	FRIKHA	Mohamed-Ridha	Maître de conférences
Dr	GALIA	Wessam	Maître de conférences
Pr	GILOT-FROMONT	Emmanuelle	Professeur
Dr	GONTHIER	Alain	Maître de conférences
Dr	GREZEL	Delphine	Maître de conférences
Dr	HUGONNARD	Marine	Maître de conférences
Dr	JOSSON-SCHRAMME	Anne	Chargé d'enseignement contractuel
Pr	JUNOT	Stéphane	Professeur
Pr	KODJO	Angeli	Professeur
Dr	KRAFFT	Emilie	Maître de conférences
Dr	LAABERKI	Maria-Halima	Maître de conférences
Dr	LAMBERT	Véronique	Maître de conférences
Pr	LE GRAND	Dominique	Professeur
Pr	LEBLOND	Agnès	Professeur
Dr	LEDOUX	Dorothée	Maître de conférences
Dr	LEFEBVRE	Sébastien	Maître de conférences
Dr	LEFRANC-POHL	Anne-Cécile	Maître de conférences
Dr	LEGROS	Vincent	Maître de conférences
Pr	LEPAGE	Olivier	Professeur
Pr	LOUZIER	Vanessa	Professeur
Dr	LURIER	Thibaut	Maître de conférences
Dr	MAGNIN	Mathieu	Maître de conférences
Pr	MARCHAL	Thierry	Professeur
Dr	MOSCA	Marion	Maître de conférences
Pr	MOUNIER	Luc	Professeur
Dr	PEROZ	Carole	Maître de conférences
Pr	PIN	Didier	Professeur
Pr	PONCE	Frédérique	Professeur

Pr	PORTIER	Karine	Professeur
Pr	POUZOT-NEVORET	Céline	Professeur
Pr	PROUILLAC	Caroline	Professeur
Pr	REMY	Denise	Professeur
Dr	RENE MARTELLET	Magalie	Maître de conférences
Pr	ROGER	Thierry	Professeur
Dr	SAWAYA	Serge	Maître de conférences
Pr	SCHRAMME	Michael	Professeur
Pr	SERGETET	Delphine	Professeur
Dr	TORTEREAU	Antonin	Maître de conférences
Dr	VICTONI	Tatiana	Maître de conférences
Dr	VIRIEUX-WATRELOT	Dorothee	Chargé d'enseignement contractuel
Pr	ZENNER	Lionel	Professeur

Remerciements au jury

A Madame le Professeur Muriel DORET-DION,

De l'Université Claude Bernard Lyon 1, Faculté de médecine de Lyon,
Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de ma thèse,
Pour le temps consacré à l'évaluation de ce travail et à la préparation de la soutenance,
Hommages respectueux.

A Madame le Docteur Anne-Cécile LEFRANC-POHL,

De VetAgro Sup, Campus vétérinaire de Lyon,
Pour m'avoir proposé ce sujet de thèse après discussion sur mes intérêts personnels
et m'avoir fait l'honneur d'encadrer ce travail,
Pour sa gentillesse, sa disponibilité, sa rigueur et son aide précieuse tout au long de
l'élaboration de cette thèse,
Mes sincères remerciements.

A Monsieur le Professeur Jean-Luc Cadoré,

De VetAgro Sup, Campus vétérinaire de Lyon,
Pour avoir accepté de prendre part au jury de cette thèse,
Pour le temps consacré à l'évaluation de ce travail et à la préparation de la soutenance,
Mes sincères remerciements.

Table des matières

Liste des figures	11
Liste des tableaux	15
Liste des abréviations	17
Introduction	19
Partie 1	21
Généralités	21
I. Généralités sur la technique de l'échographie Doppler	21
1. Principes de l'échographie	21
a. Principes physiques.....	21
b. Matériel.....	22
c. Propagation de l'onde ultrasonore.....	23
d. Formation de l'image	24
e. Qualité de l'image	25
▪ Pénétration et atténuation.....	25
▪ Résolution.....	25
f. Réglages possibles.....	26
▪ Fréquence.....	26
▪ Puissance	26
▪ Gain étagé.....	26
g. Artéfacts.....	26
h. Réalisation de l'examen échographique en reproduction équine	29
2. Principes spécifiques de l'échographie Doppler	32
a. Principes physiques de l'effet Doppler et application à l'échographie Doppler ...	32
b. Modes utilisables en échographie Doppler	35
c. Artéfacts.....	37
▪ Artéfacts causés par le mouvement.....	37
▪ L'effet « aliasing »	37
▪ Artéfact de réverbération Doppler ou artéfact d'image-miroir	40
▪ Décalage temporel entre l'image 2D et l'image Doppler.....	40
d. Paramètres étudiés	40
▪ Vitesse du flux sanguin.....	40

▪	Indice de résistance ou « resistance index » (IR)	41
▪	Indice de pulsatilité ou « pulsability index » (IP).....	41
▪	Mesure de l'aire colorée	41
II.	Généralités sur la physiologie de la reproduction chez la jument.....	42
1.	Physiologie de la reproduction chez la jument non-gestante.....	42
a.	Le cycle œstral chez la jument	42
b.	Ovulation.....	45
2.	Physiologie de la reproduction chez la jument gestante	46
a.	La période embryonnaire (de la fécondation à l'implantation)	46
b.	Premier tiers de gestation (à partir de l'implantation).....	46
c.	Deuxième et troisième tiers de gestation	47
d.	Poulinage.....	48
3.	Rappels anatomiques et étude préalable de la vascularisation utérine et ovarienne	49
a.	Anatomie de l'utérus	49
▪	Topographie.....	50
▪	Moyens de fixité	50
▪	Structure.....	50
b.	Anatomie de l'ovaire.....	51
▪	Topographie.....	51
▪	Histologie.....	52
▪	Moyens de fixité	53
▪	Vascularisation.....	54
c.	Structure du follicule et du corps jaune.....	55
d.	Etude de la vascularisation utérine et ovarienne	57
▪	Vascularisation de l'ovaire et de ses organites.....	57
▪	Vascularisation de l'oviducte	58
▪	Vascularisation de l'utérus	59
e.	Visualisation pratique en échographie Doppler des vaisseaux de choix.....	62
Partie 2.....		67
Intérêts de l'échographie Doppler dans la mise à la reproduction d'une jument		67
I.	Suivi du cycle en situation physiologique	67
1.	Images échographiques classiques.....	67

2.	Plus-value de l'échographie Doppler.....	71
a.	Par analyse du flux artériel utérin.....	71
b.	Par analyse du flux au niveau de l'artère ovarienne	73
c.	Par analyse du flux artériolaire au niveau de la thèque folliculaire	75
d.	Par analyse du flux artériolaire au niveau de la thèque lutéale	82
II.	Suivi Doppler pour la détection des pathologies en reproduction de la jument non-gestante	87
1.	Endométrites	87
2.	Kystes utérins et ovariens.....	89
3.	Intérêt lors du suivi thérapeutique.....	90
Partie 3.....		91
Intérêt de l'échographie Doppler chez la jument gestante		91
I.	Intérêt de l'échographie Doppler pour la compréhension du mécanisme du signal de reconnaissance maternelle de la gestation.....	91
II.	Intérêt de l'échographie Doppler pour le diagnostic précoce de gestation	92
1.	Réalisation usuelle du diagnostic de gestation chez la jument et images échographiques classiques	92
2.	Plus-value de l'échographie Doppler.....	94
III.	Intérêt de l'échographie Doppler pour le suivi de la période embryonnaire (jusqu'à 40 jours de gestation)	97
1.	Images échographiques classiques.....	97
2.	Plus-value de l'échographie Doppler.....	98
IV.	Intérêt de l'échographie Doppler pour le suivi de la période fœtale.....	102
1.	Images échographiques classiques.....	102
a.	Évaluation de la position fœtale	103
b.	Mesures réalisables permettant de suivre le développement fœtal	103
c.	Sexage en échographie conventionnelle	106
d.	Évaluation du placenta.....	108
e.	Évaluation des liquides fœtaux.....	111
2.	Plus-value de l'échographie Doppler.....	115
a.	Évaluation de la viabilité fœtale via le rythme cardiaque et les mouvements du fœtus	115
b.	Sexage par méthode Doppler	116
c.	Examen des flux sanguins utérin et ombilical.....	117

d. Examen du flux sanguin carotidien.....	121
V. Intérêt de l'échographie Doppler pour le suivi post-partum.....	123
1. Images échographiques classiques.....	123
2. Plus-value de l'échographie Doppler.....	124
Conclusion	125
Bibliographie	127

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Comportement de l'onde ultrasonore sur une interface acoustique (Boon 1998).	23
Figure 2 - Exemple d'artéfact de réverbération visible par échographie transrectale (Ginther 1995a).....	27
Figure 3 - Représentation schématique des causes d'artefact de cône d'ombre acoustique (d'après Ginther 1995a).	27
Figure 4 - Exemples d'artéfacts de cône d'ombre acoustique (Ginther 1995a).	28
Figure 5 - Exemples d'artéfacts de réverbération et de cône d'ombre acoustique (d'après Ginther 1995a).	29
Figure 6 - Représentation schématique d'un examen échographique systématique de l'appareil génital de la jument (d'après Ginther 1995b).....	31
Figure 7 - Représentation schématique des coupes échographiques d'ovaires chez la jument (d'après Ginther 1995b).	32
Figure 8 - Illustration de l'effet Doppler (Chetboul et al. 2005).....	34
Figure 9 - Explications schématiques de l'effet « aliasing » (Ginther, Utt 2004).....	38
Figure 10 - Représentation schématique de la régulation hormonale ovarienne chez la jument (Blanchard et al. 2005).....	43
Figure 11 - Concentrations sanguines des différentes hormones au cours du cycle œstral chez la jument et influence sur la fonction ovarienne (Blanchard et al. 2005).	44
Figure 12 - Représentation schématique de l'appareil génital de la jument en vue dorsale (Blanchard et al. 2005).	49
Figure 13 - Représentation schématique de l'ovaire, de sa vascularisation et de ses moyens de fixités (d'après Barone, Tagand 1954).	52
Figure 14 - Représentation schématique des différentes structures composant l'ovaire chez la jument en coupe sagittale médiane (d'après Ginther 1995b).	53
Figure 15 - Représentation schématique des attaches de l'ovaire (d'après Barone, Tagand 1954).....	54
Figure 16 - Dessin d'un ovaire en vue latérale et des structures associées chez la jument (Ginther 1995b).	55
Figure 17 - Paroi d'un follicule en maturation chez la jument (Barone, Tagand 1954).....	56
Figure 18 - Représentation schématique de la vascularisation placentaire chez la jument (d'après Blanchard et al. 2005).	61
Figure 19 - Représentation schématique de la vascularisation artérielle et veineuse du tractus génital chez la jument (Barone, Tagand 1954).	62
Figure 20 - Topographie artérielle de la région pelvienne de la jument (d'après Bollwein et al. 1998).....	63
Figure 21 - Schéma des artères du bassin chez la jument (d'après Barone 2021).	64
Figure 22 - Exemple d'images échographiques d'utérus et d'ovaire chez une jument en dioestrus (d'après Blanchard et al. 2005).	68

Figure 23 - Différentes phases de follicules en croissance, de morphologies et de diamètres différents, visualisés par échographie bidimensionnelle chez la jument (Ginther 1995b).	69
Figure 24 - Exemple d'images échographiques d'utérus et d'ovaire chez une jument en œstrus (d'après Blanchard et al. 2005).	70
Figure 25 - Indice de résistance (RI) de l'artère utérine sur six juments en fonction du jour du cycle (Bollwein et al. 1998)	71
Figure 26 - Graphique montrant les résultats d'une étude mesurant la moyenne des valeurs du flux utérin pendant l'œstrus et le diœstrus par Doppler puissance chez les juments et les ânesses non atteintes d'endométrites (Da Silva-Álvarez et al. 2022).	73
Figure 27 - Valeurs de l'indice de pulsativité des artères ovariennes dominantes et non dominantes (Bollwein et al. 2002).	74
Figure 28 - Valeurs de l'indice de pulsativité ovarienne et diamètres du corps jaune entre les jours 0 et 15 et du follicule ovulatoire entre les jours -6 et -1. (Bollwein et al. 2002)	75
Figure 29 - Échographies séquentielles en mode B des follicules pré-ovulatoires de deux juments montrant un épaissement de la granulosa et l'apparition d'une bande hypoéchogène dans la paroi folliculaire au fil du temps (Gastal et al. 2006).....	77
Figure 30 - Échographies séquentielles en Doppler couleur des follicules pré-ovulatoires d'une jument témoin illustrant l'augmentation du flux artériolaire thécal à l'approche de l'ovulation (Gastal et al. 2006).	78
Figure 31 - Échographies sélectionnées en mode B (A et B) et Doppler couleur (C et D) des follicules pré-ovulatoires de quatre juments témoins illustrant la diminution des signaux Doppler dans les 4 heures précédant l'ovulation (Gastal et al. 2006).....	79
Figure 32 - Moyenne \pm erreur type des paramètres quantifiant les signaux Doppler couleur de la paroi du follicule pré-ovulatoire dans les groupes témoin et traité par hCG pendant la période post-traitement (heures 0–36 ; n = 8–14), la période pré-ovulatoire (heures -36 à -12 ; n = 8–14) et la période d'ovulation imminente (heures -4 à -1 ; n = 4–8) (Gastal et al. 2006).....	80
Figure 33 - Représentation schématique des observations échographiques visibles une heure avant ovulation sur la paroi d'un follicule à durée d'ovulation normale (d'après Ginther et al. 2007)).	81
Figure 34 - Images par échographie Doppler de follicules pré-ovulatoires (Ginther et al. 2007).....	82
Figure 35 - Capture des images les plus représentatives du corps jaune par échographie Doppler à flux de puissance (Ferreira et al. 2020).	83
Figure 36 - Section transversale du corps jaune (A, nombre de pixels en échelle de gris), concentration de progestérone (B, ng/ml) et vascularisation (C, nombre de pixels de couleur) chez les juments receveuses à différents stades après le transfert d'embryons (Brogan et al. 2016).....	85
Figure 37 - Valeurs moyennes de l'aire de circulation sanguine dans chaque phase du cycle œstral mesurées par Doppler puissance chez les juments (saines et atteintes d'endométrite) (Da Silva-Álvarez et al. 2022).....	88
Figure 38 - Images de diagnostics de gestation avec visualisation d'une vésicule embryonnaire à partir du 10 ^{ème} jour post-ovulation par échographie bidimensionnelle par voie transrectale chez la jument (Ginther 1995b).	93

Figure 39 - Images de vésicules embryonnaires à différents stades de croissance après immobilisation, visualisées par échographie bidimensionnelle par voie transrectale chez la jument (d'après Blanchard et al. 2005).....	98
Figure 40 - Images échographiques illustrant l'épaississement dorsal de l'endomètre en partie dorsale autour d'une vésicule embryonnaire de 16 jours (Silva, Ginther 2006).....	100
Figure 41 - Images échographiques illustrant la détection d'un signal Doppler précoce au niveau du pôle embryonnaire d'une vésicule au cours du temps (Silva, Ginther 2006).	101
Figure 42 - Echographie de l'aorte d'un fœtus de 302 jours par voie transabdominale (Vincze et al. 2019).....	106
Figure 43 - Images illustrant l'identification du sexe du fœtus entre 60 à 70 jours de gestation par échographie bidimensionnelle par voie transrectale chez la jument gestante (d'après Ginther 1995b).	107
Figure 44 - Exemples d'images échographiques obtenues par voie transrectale et transabdominale permettant la mesure de l'ECUP chez la jument gestante (Renaudin, Bruyas 2017).....	109
Figure 45 - Représentation schématique de la position classique du fœtus à différents stades et des liquides fœtaux (d'après Ginther 1995b).	112
Figure 46 - Exemple de détermination du sexe fœtal par échographie Doppler couleur (Ortega-Ferrusola et al. 2022).....	117
Figure 47 - Flux sanguin de l'artère utérine ipsilatérale au conceptus par échographie Doppler et mise en évidence d'une encoche diastolique (Bollwein et al. 2004).....	119
Figure 48 - Echographie Doppler de l'artère carotide commune fœtale par voie transrectale chez un fœtus de 230 jours (Bucca et al. 2020).....	122

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I - Vitesse de propagation du son selon le milieu (Ginther 1995a; Chetboul et al. 2005).....	22
Tableau II - Fréquence de la sonde à appliquer en fonction de la profondeur d'exploration souhaitée chez la jument (Ginther 1995a).....	24
Tableau III - Vitesses maximales mesurables en fonction de la fréquence d'émission des ultrasons par la sonde et de la profondeur d'exploration (Boon 1998).	39
Tableau IV - Tableau des valeurs seuils du flux endométrial en fonction de l'âge et du jour post-ovulation pour le diagnostic de gestation. (Nieto-Olmedo et al. 2020).....	96
Tableau V - Moyenne des diamètres orbitaires fœtaux combinés selon le mois de gestation (d'après Bucca et al. 2005).	104
Tableau VI - Valeurs normales et anormales de l'ECUP par échographie transrectale chez des juments Quarter Horse (d'après Renaudin et al. 1997 ; Renaudin, Bruyas 2017).....	110

LISTE DES ABREVIATIONS

Bpm : battements par minute

CJ : corps jaune

eCG : equine chorionic gonadotropin (gonadotrophine chorionique équine)

ECUP : épaisseur combinée de l'utérus et du placenta

FSH : follicule-stimulating hormone (hormone folliculo-stimulante)

GnRH : gonadotropin-releasing hormone (Gonadolibérine)

IP : indice de pulsatilité

IR : indice de résistance

LH : luteinising hormone (hormone lutéinisante)

MHz : Méga Hertz

min : minute

mm : millimètre

PGF2 α : prostaglandine F2 α

PRF : pulse repetition frequency (fréquence de répétition des impulsions)

RCP : rapport cérébro-placentaire

s : seconde

INTRODUCTION

Avec l'essor récent des biotechnologies de la reproduction dans l'espèce équine et les enjeux économiques sous-jacents, une optimisation dans la mise à la reproduction de la jument est attendue de la part de l'éleveur ou du propriétaire. Cela implique notamment une attention particulière à agir le plus précocement possible. Pour ce faire, un suivi rigoureux des cycles sexuels par le vétérinaire équin est nécessaire autant pour un suivi dans l'optique d'une insémination artificielle (réfrigérée ou congelée) que d'une monte naturelle (par exemple pour les purs-sangs anglais).

Ainsi, lors d'insémination avec de la semence congelée, de par la valeur économique le plus souvent très élevée de la semence et sa durée de vie courte dans le tractus génital, il est indispensable de réaliser une insémination de manière la plus rapprochée possible de l'ovulation. Le vétérinaire est alors contraint d'effectuer des examens répétés de palpation et d'échographie transrectale de manière très rapprochée durant l'œstrus de la jument. À l'heure actuelle, il n'y a aucun moyen de prédire avec exactitude le moment de l'ovulation chez la jument. De nombreuses études décrivent les modifications morphologiques et échographiques des follicules pré-ovulatoires, mais avec une précision faible.

En plus des aspects économiques et d'optimisation de la mise à la reproduction, la compréhension des mécanismes inhérents à la gestation chez la jument (comme le signal de reconnaissance maternelle de l'embryon, par exemple), l'évaluation de la viabilité du fœtus *in utero* et la détection précoce d'éventuelles anomalies nécessitent encore d'être étudiées de manière plus approfondie en médecine vétérinaire.

En médecine humaine, les techniques d'échographie sont de plus en plus poussées et l'échographie Doppler est largement utilisée pour le suivi gynécologique. Ainsi, l'objectif de cette thèse est d'évaluer la plus-value que pourrait apporter l'échographie Doppler, notamment par rapport à l'étude clinique classique et à l'échographie bidimensionnelle, actuellement couramment utilisées dans le domaine de la reproduction chez la jument.

Dans cette étude bibliographique, les principes physiques généraux de l'échographie Doppler, ainsi que les bases anatomiques et physiologiques nécessaires à l'examen échographique Doppler du tractus génital chez la jument seront tout d'abord présentés. Dans une seconde partie, cette étude évaluera l'utilité de l'échographie Doppler lors de la mise à la reproduction d'une jument. Enfin, dans une troisième partie, l'utilité de l'échographie Doppler sera étudiée lors du suivi de la gestation chez la jument.

PARTIE 1

GENERALITES

I. Généralités sur la technique de l'échographie Doppler

1. Principes de l'échographie

a. Principes physiques

L'échographie est une technique d'imagerie utilisant des ondes ultrasonores, c'est-à-dire des ondes mécaniques avec une fréquence dans les valeurs non audibles par l'oreille humaine, soit entre 20 kHz et 1 GHz.

Ces ondes mécaniques se propagent, par définition, dans un milieu matériel par des phénomènes de compression et relaxation successifs des molécules composant ce milieu (Powis 1986; Fish 1990; Bushong, Archer 1991; Ginther 1995a; Boon 1998; Chetboul et al. 2005).

Une onde acoustique possède une fréquence et une longueur d'onde qui lui est propre. Sa **vitesse** (notée « C ») est calculable par la formule suivante :

$$C = F \times \lambda$$

avec « F » la fréquence et « λ » la longueur d'onde.

Sa vitesse dépend des propriétés du milieu (compressibilité, densité) selon la formule suivante :

$$C = \sqrt{\frac{1}{X_s \rho}}$$

avec ρ la masse volumique, S l'entropie constante, et X_s le coefficient de compressibilité isentropique exprimé par : $X_s = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_S$, avec P, la pression.

Ainsi, plus le milieu est dense, plus la vitesse de propagation augmente. (Cf. *Tableau I*)

En échographie, on considère que la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore est constante et est celle des tissus mous, soit environ $C = 1540$ m/s

environ (Powis 1986; Fish 1990). Cela est néanmoins source d'artéfacts, du fait de la variabilité des tissus traversés (Cf. *Tableau I*).

Tableau I - Vitesse de propagation du son selon le milieu (Ginther 1995a; Chetboul et al. 2005).

Milieu	Vitesse de propagation du son (C en m/s)
Air	330
Graisse	1450
Eau	1480
Tissus mous	1540
Os	4080

Plus le milieu est dense, plus la vitesse de l'onde ultrasonore est importante.

b. Matériel

La **sonde d'échographie est un transducteur**, c'est-à-dire un matériel (ici des cristaux piézo-électriques) capables de transformer une forme d'énergie en une autre forme.

Le transducteur est émetteur de salves durant 1 % du temps : par l'effet piézo-électrique, il transforme une énergie électrique en énergie mécanique (les ultrasons émis).

La sonde constitue également un élément receveur des ondes réfléchies dans 99 % du temps : l'énergie mécanique des ultrasons est alors transformée en énergie électrique, correspondant après amplification à un signal visible sur l'oscilloscope (Powis 1986; Bushong, Archer 1991; Ginther 1995a).

Lors d'échographie transrectale du tractus génital de la jument, la manipulation de la sonde se doit d'être atraumatique (Palmer, Driancourt 1980). Des sondes linéaires avec une fréquence entre 5 et 7,5 MHz sont alors le plus souvent utilisées (Ginther 1995b).

Le signal électrique obtenu après réception des ondes réfléchies est retranscrit sur l'échographe. L'image formée représente à chaque instant les tissus traversés sous forme d'un plan de coupe (Bushong, Archer 1991; Ginther 1995a; Chetboul et al. 2005).

En reproduction équine, on utilise très souvent la fonction d'enregistrement des images échographiques ainsi que la mesure précise de la taille du follicule. L'appareil doit donc en être doté. De plus, en pratique ambulatoire, un échographe facilement maniable et avec une batterie portable est conseillé (Ginther 1995a).

c. Propagation de l'onde ultrasonore

La propagation de l'onde ultrasonore dans un milieu donné est dépendante de **l'impédance acoustique (Z)**, soit la résistance du milieu à la propagation de l'onde (Boon 1998). Elle est calculée par la formule suivante :

$$Z = \rho \times C$$

avec ρ la masse volumique et C la vitesse de l'onde dans le milieu.

On parle d'interface acoustique pour désigner la limite entre deux milieux dont les impédances acoustiques sont différentes (par exemple, l'interface entre les tissus mous et l'air, ou encore entre les tissus mous et les tissus osseux).

Lors du passage de l'onde ultrasonore au niveau d'une interface acoustique, le phénomène de réflexion et réfraction de l'onde s'applique selon les **lois de Descartes**, tout comme une onde lumineuse (Powis 1986; Fish 1990; Boon 1998). Ceci est décrit par la figure suivante.

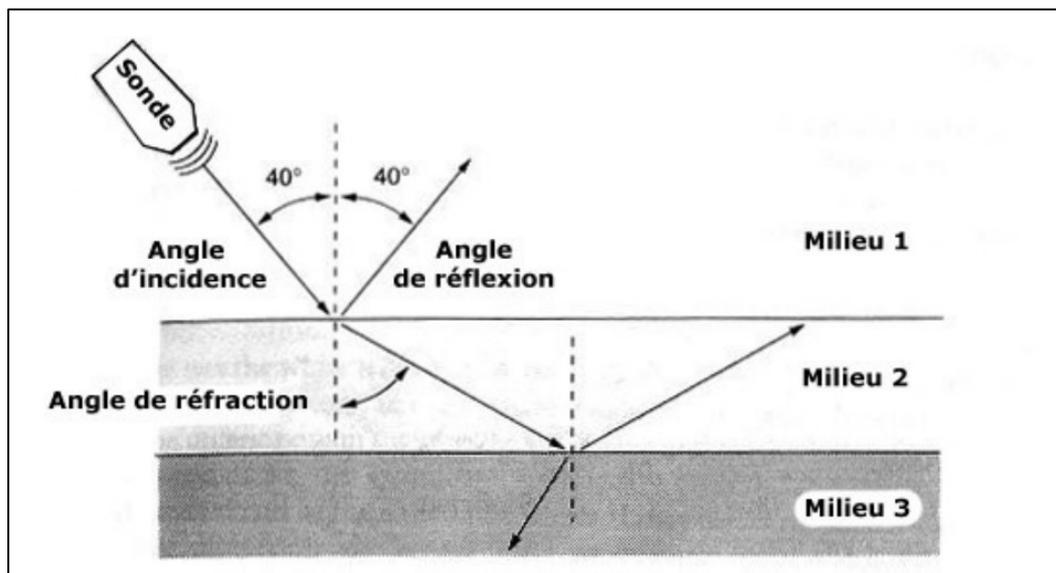


Figure 1 - Comportement de l'onde ultrasonore sur une interface acoustique (Boon 1998).

Arrivée à la surface de séparation entre deux milieux, l'onde ultrasonore est réfléchie et réfractée. À noter que l'angle d'incidence est toujours égal à l'angle de réflexion et que l'angle de réfraction est d'autant plus grand que les deux milieux ont une impédance acoustique différente.

d. Formation de l'image

Au fur et à mesure du passage de l'onde ultrasonore par différentes interfaces acoustiques, la sonde reçoit les ondes réfléchies successivement, ce qui permet par exemple, même sur des tissus mous dont la différence d'impédance est minime, de visualiser sur l'écran les différentes structures sous-jacentes (Powis 1986; Boon 1998). À noter que pour les surfaces très hétérogènes ou rugueuses, la réflexion est alors multidirectionnelle (par exemple, pour un tissu parenchymateux) : en fonction de la réflexion obtenue, il est possible de distinguer plusieurs textures de tissus et donc de distinguer différents parenchymes (par exemple, le foie, le rein et la rate).

Pour obtenir l'image la plus nette possible, le faisceau d'ultrasons doit être le plus perpendiculaire possible à la structure : de ce fait, l'angle de réflexion est moins important, permettant de minimiser le nombre d'ondes réfléchies que la sonde ne pourra pas capter en retour (Boon 1998; Chetboul et al. 2005).

De plus, il est nécessaire d'adapter la fréquence de l'onde émise en fonction de la profondeur des tissus à observer : **diminuer la fréquence d'émission permet d'augmenter la profondeur d'exploration**, avec toutefois de plus en plus de faisceaux perdus au fil des différentes interfaces acoustiques parcourues donc avec une moins bonne résolution de l'image (Cf. *Tableau II*).

Tableau II - Fréquence de la sonde à appliquer en fonction de la profondeur d'exploration souhaitée chez la jument (Ginther 1995a).

Fréquence d'émission de l'onde ultrasonore par la sonde (MHz)	Profondeur d'exploration maximale (cm)
2,5-3,5	> 15
5	10
7,5	5-6
10	2-3

Plus la structure à observer est profonde, plus il est nécessaire de baisser la fréquence de l'onde émise par la sonde.

Pour la reconstitution de l'image après réception, la distance entre la sonde et l'interface acoustique est calculée par la vitesse de propagation dans les tissus mous. Le transducteur retranscrit l'onde mécanique reçue en onde électromagnétique.

Différents modes peuvent être utilisés :

- **Le mode A**, ou mode « amplitude », donne l'intensité de retour des ultrasons en fonction de la profondeur. Il est très peu utilisé actuellement.
- **Le mode B**, ou mode « brillance », présente l'intensité du signal par un point affiché en nuances de gris à l'écran : plus la surface est échogène (donc réfléchit bien les ultrasons), plus le point sera brillant (ou blanc).
- **Le mode B (2D)** est une variante du mode B classique et diffère uniquement par le fait que la sonde envoie plusieurs faisceaux d'ultrasons, qui peuvent être parallèles (sonde linéaire) ou multidirectionnels (sonde sectorielle). Une image en plan (2D) de la structure observée est alors visualisable.
- Enfin, **le mode TM**, ou mode « temps mouvement », consiste en l'analyse d'un même faisceau en continu et permet de visualiser les mouvements d'une structure mobile (par exemple le cœur) en fonction du temps (Ginther 1995a; Boon 1998; Chetboul et al. 2005).

e. Qualité de l'image

▪ Pénétration et atténuation

A mesure que les ultrasons pénètrent dans les tissus, l'intensité du faisceau diminue du fait des phénomènes de réflexion, dispersion (réflexion multidirectionnelle), réfraction et absorption (transformation de l'énergie mécanique en énergie thermique) (Powis 1986; Ginther 1995a; Boon 1998; Chetboul et al. 2005).

▪ Résolution

La résolution est la capacité de l'échographe à différencier deux points très proches spatialement l'un de l'autre. On distingue deux formes de résolution : la résolution axiale et la résolution latérale.

La **résolution axiale** est la capacité du transducteur à différencier deux points situés dans l'axe d'émission des ultrasons. Plus la fréquence de l'onde ultrasonore est importante, plus la résolution axiale est bonne.

La **résolution latérale** est la capacité du transducteur à différencier deux points adjacents situés à la même profondeur. Elle dépend de la capacité de focalisation de la sonde ainsi que de la fréquence de l'onde : la résolution latérale est d'autant meilleure que la zone de focalisation est étroite et que la fréquence de l'onde est importante (Boon 1998; Chetboul et al. 2005).

f. Réglages possibles

- *Fréquence*

En vue de la meilleure résolution possible, on privilégie la plus haute fréquence possible pour une profondeur d'exploration voulue. Pour la visualisation des ovaires chez la jument, la profondeur est réglée entre 5 à 10 cm (Ginther 1995a; 1995b).

- *Puissance*

La puissance correspond à l'amplification du signal à l'émission (et non à la réception). Sur l'écran, cela se traduit par l'ajustement de la brillance générale de l'image (Ginther 1995a; 1995b).

- *Gain étagé*

Le gain étagé correspond à l'amplification de la captation par la sonde des ultrasons réfléchis sur des zones étagées, avec une intensité d'émission inchangée. Sur l'écran, cela se traduit par l'ajustement de la brillance de l'image sur une profondeur donnée. Il est utile pour pallier l'atténuation du signal à mesure que la profondeur augmente (Chetboul et al. 2005).

g. Artéfacts

En reproduction équine, on peut retenir essentiellement trois artéfacts : l'artéfact de réverbération, le renforcement postérieur et le cône d'ombre acoustique (Bushong, Archer 1991; Ginther 1995a; Boon 1998; Chetboul et al. 2005).

L'artéfact de réverbération se retrouve lorsque les ultrasons rencontrent deux interfaces parallèles très réfléchissantes (par exemple, entre les tissus mous et l'air) : les ultrasons sont alors piégés entre les deux surfaces et réalisent des allers-retours et une petite partie des ultrasons revient à la sonde après chaque aller-retour, d'où une image obtenue avec la succession de lignes échogènes parallèles entre elles. Ceci se retrouve par exemple en reproduction équine par la présence d'air entre la sonde et la muqueuse rectale lors de l'échographie par voie transrectale (*Cf. Figure 2*).

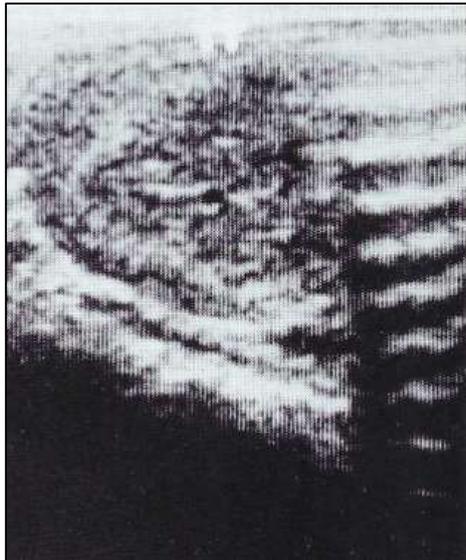


Figure 2 - Exemple d'artéfact de réverbération visible par échographie transrectale (Ginther 1995a).

Artéfact dû ici à des matières fécales restées entre la sonde échographique et la muqueuse rectale lors d'échographie par voie transrectale.

Le cône d'ombre acoustique apparaît lors de la présence d'une interface très réfléchissante (par exemple, entre l'air et les tissus mous ou encore entre l'os et les tissus mous). Arrivés sur cette interface, les ultrasons sont presque entièrement réfléchis, et les structures plus profondes ne sont plus traversées, ce qui résulte par la formation d'un cône d'ombre sur l'image échographique (Cf. Figure 3, Figure 4).

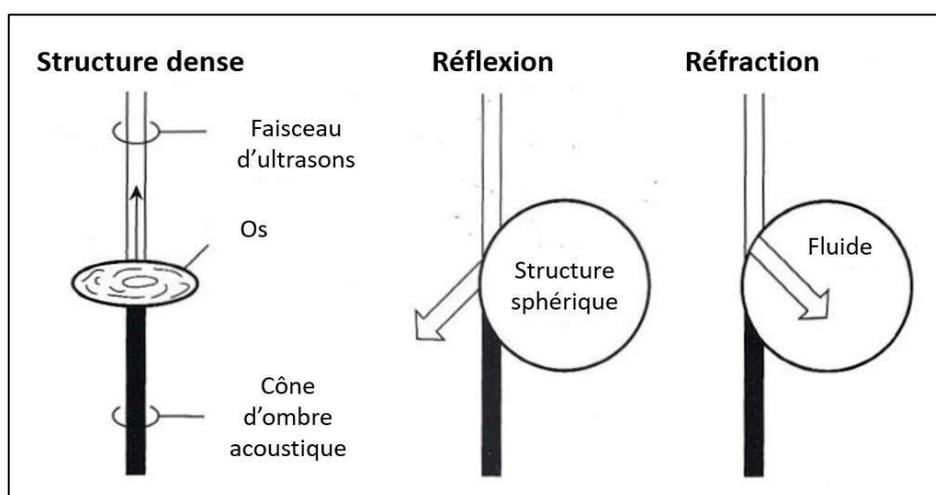


Figure 3 - Représentation schématique des causes d'artéfact de cône d'ombre acoustique (d'après Ginther 1995a).

On peut par exemple observer cet artéfact en cas de matériel fécal resté entre la sonde et la muqueuse rectale lors d'un examen échographique par voie transrectale. Une perte d'informations par perte du faisceau d'ondes ultrasonores peut aussi avoir lieu via le phénomène de réflexion/réfraction sur une surface sphérique telle qu'un follicule ou un corps jaune (Cf Figure 3, Figure 5).

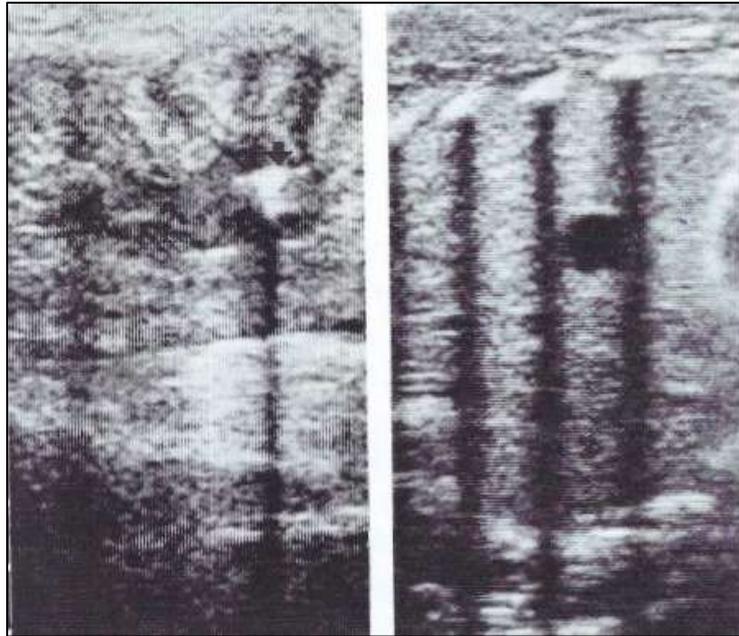


Figure 4 - Exemples d'artéfacts de cône d'ombre acoustique (Ginther 1995a).

À gauche : artéfact de cône d'ombre acoustique du fait de débris osseux fœtaux visibles par échographie de l'utérus lors d'un avortement.

À droite : artéfact de cône d'ombre acoustique du fait des côtes du fœtus âgé de 120 jours.

Enfin, **le renforcement postérieur** se retrouve lors de la traversée par les ultrasons d'une structure liquidienne (par exemple en reproduction équine, un kyste ou un follicule de diamètres conséquents). En effet, dans une structure liquidienne, les ondes ne subissent aucune atténuation et donc arrivent en très grand nombre sur la structure sous-jacente, qui ressort alors très hyperéchogène sur l'image échographique (Cf. Figure 5).

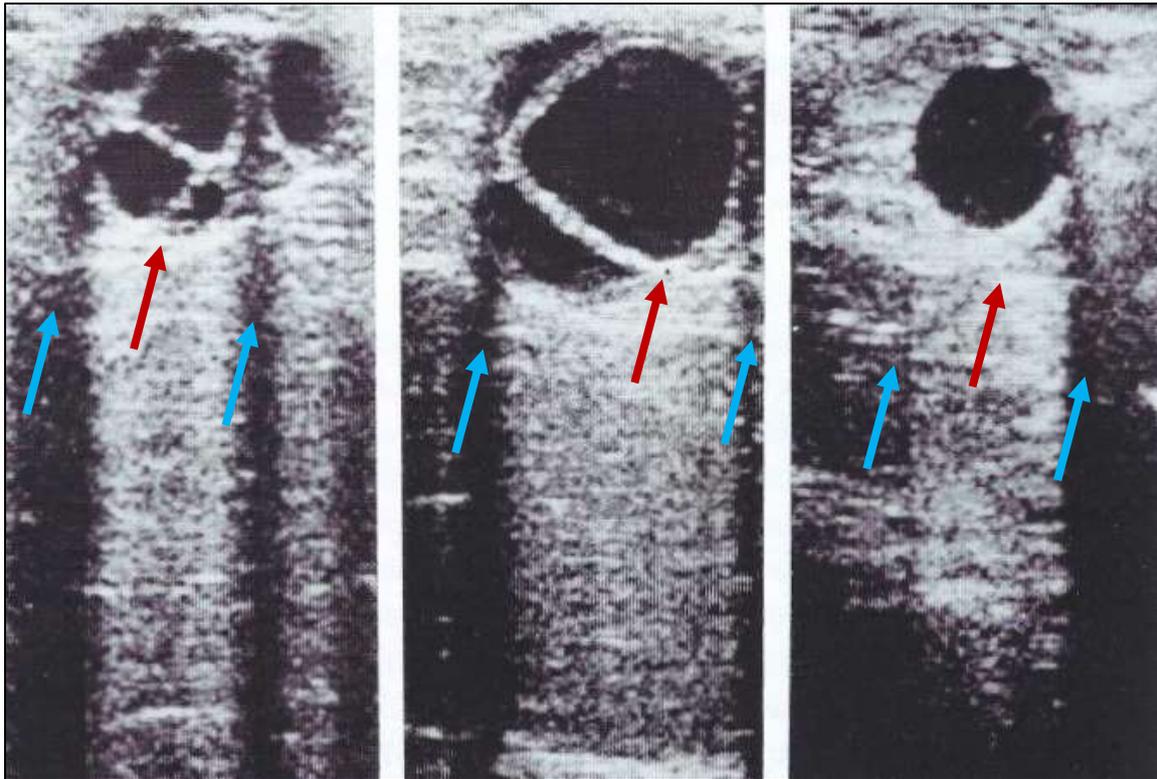


Figure 5 - Exemples d'artéfacts de réverbération et de cône d'ombre acoustique (d'après Ginther 1995a).

Les images de renforcement postérieur sont indiquées par une flèche rouge et celles de cône d'ombre acoustique, par une flèche bleue. Ainsi, les structures sphériques et liquidiennes sont souvent responsables de ces deux types d'artéfact conjointement.

*À gauche : multiples petits follicules.
 Au milieu : follicule de plus gros diamètre.
 À droite : vésicule embryonnaire de 14 jours.*

h. Réalisation de l'examen échographique en reproduction équine

Dans les années 1980, les premières utilisations de l'échographie bidimensionnelle par voie transrectale en reproduction équine sont rapportées. Le premier rapport date de 1980 (Palmer, Driancourt 1980) puis cette technique se développe largement dans le domaine de la reproduction chez la jument, notamment pour le diagnostic de gestation (Chevalier, Palmer 1982; Rantanen et al. 1982; Simpson et al. 1982) et la visualisation du fœtus (O'Grady et al. 1981).

Pour des raisons de sécurité et afin de permettre la réalisation d'un examen dans les conditions idéales, la jument est placée dans un travail sur un sol propre et non glissant. Dans le cas d'une jument suitée, le poulain est placé à proximité de la tête de la jument dans une stalle lui étant réservé ou en liberté devant la jument afin

de réduire le stress de la jument. Une sédation légère peut être réalisée avant l'entrée dans le travail en cas de comportement très anxieux de l'animal (Ginther 1995a; Blanchard et al. 2005).

La queue de la jument est bandée ou placée dans un gant de palpation transrectale puis fixée en hauteur à une barre de travail via une corde avec un nœud rapidement dénouable. Cette manipulation préalable permet d'éviter l'entrée de crins dans le rectum et donc de léser la muqueuse rectale (Ginther 1995a; Blanchard et al. 2005).

Ensuite, pour le manipulateur, une lubrification du gant de palpation transrectale à l'aide d'un gel adapté est nécessaire pour éviter toute abrasion de la muqueuse rectale. Le rectum est préalablement délicatement vidé de ses crottins. Une palpation transrectale de l'ensemble de l'appareil génital est alors réalisée et précède systématiquement l'examen échographique (Palmer, Driancourt 1980; Squires et al. 1988; Ginther 1995a; Blanchard et al. 2005).

Enfin, la sonde est délicatement introduite dans le rectum : le manipulateur recouvre alors la sonde par sa main lubrifiée pour éviter tout traumatisme et avance délicatement son bras, sans forcer contre le péristaltisme. Il est nécessaire de déposer une quantité suffisante de gel sur la sonde afin d'éviter tout artéfact de réverbération à cause de la potentielle présence d'air entre la sonde et la muqueuse rectale (Palmer, Driancourt 1980; Squires et al. 1988; Ginther 1995a; Blanchard et al. 2005).

L'appareil génital de la jument examinée est alors observé de manière systématique (*Cf. Figure 6*). Après passage du col de l'utérus, le corps utérin est observé sur toute sa longueur avec un balayage latéral de la sonde afin d'observer toute la largeur du corps utérin. À la jonction entre le corps utérin et les cornes utérines, la sonde est déplacée latéralement vers la droite ou vers la gauche tout en maintenant une direction crânio-caudale, afin de balayer chacune des cornes utérines. Au bout de la corne utérine, la sonde est avancée dans la direction donnée par la corne, soit le long du ligament propre de l'ovaire, et l'ovaire est alors observable à environ 0 - 5 cm de la corne utérine, en fonction des forces exercées par les intestins sur l'ovaire. Les deux cornes utérines et les deux ovaires sont successivement observés (Ginther 1995b).

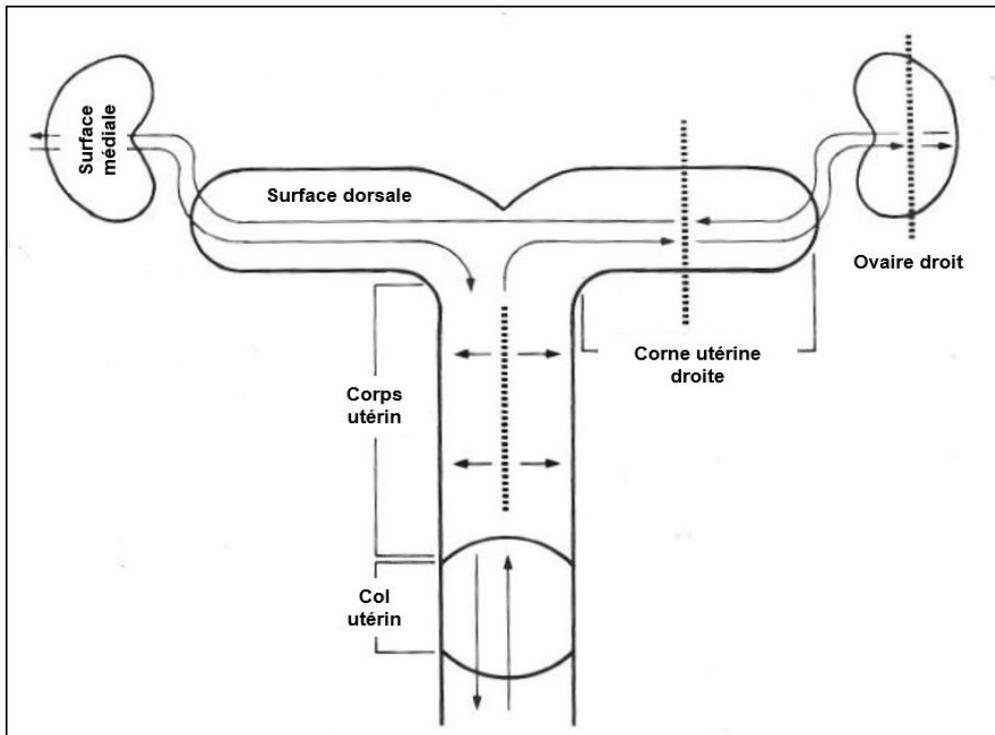


Figure 6 - Représentation schématique d'un examen échographique systématique de l'appareil génital de la jument (d'après Ginther 1995b).

Les flèches représentent le trajet de la sonde, le long des structures observées.

Deux coupes échographiques des ovaires sont classiquement réalisées : la sonde est balayée au niveau de la surface médiale de l'ovaire puis sur la courbure dorsale de l'ovaire (Cf. Figure 7). Ainsi, l'ovaire est alors visualisé dans son intégralité (deux coupes perpendiculaires balayées), permettant ainsi de limiter la perte d'information (par exemple, un follicule).

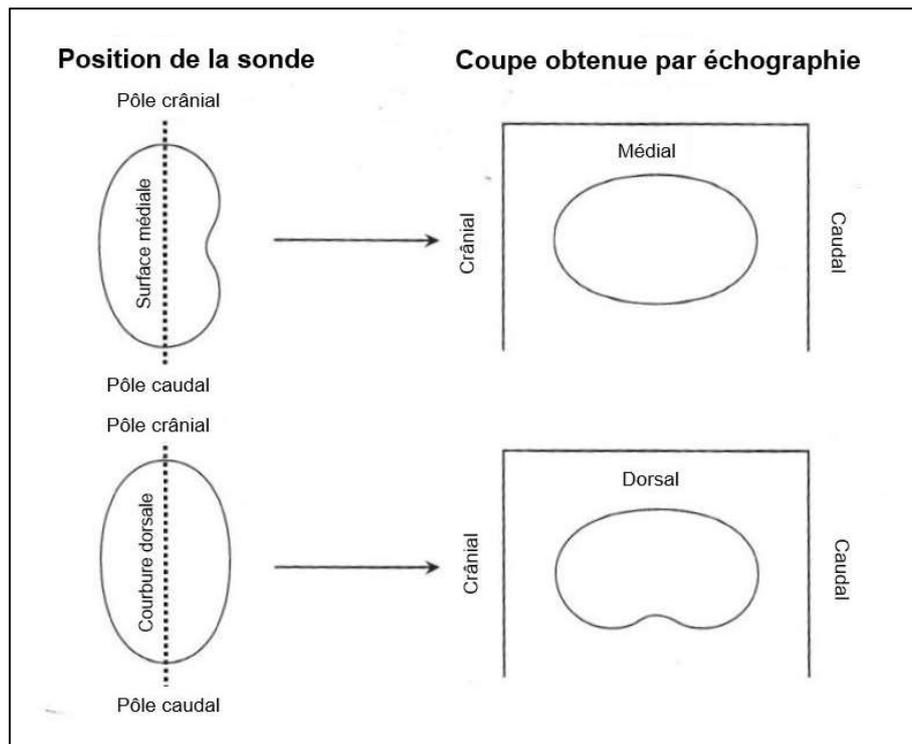


Figure 7 - Représentation schématique des coupes échographiques d'ovaires chez la jument (d'après Ginther 1995b).

Ainsi, dans cette partie, les principes physiques de l'échographie bidimensionnelle ont été présentés. Dans la partie suivante, les principes spécifiques de l'échographie Doppler seront abordés.

2. Principes spécifiques de l'échographie Doppler

En plus de l'échographie bidimensionnelle et temps-mouvement fréquemment utilisées en médecine vétérinaire, l'échographie Doppler est apparue dans les années 1980 et participe à une grande avancée pour l'étude hémodynamique des organes richement vascularisés, comme les organes reproducteurs de la jument.

a. Principes physiques de l'effet Doppler et application à l'échographie Doppler

L'échographie Doppler se base sur le principe physique Doppler, décrit pour la première fois en 1842 par le physicien autrichien Johann Christian Doppler en étudiant l'effet du mouvement des étoiles par rapport à la terre sur leur onde lumineuse (Doppler 1942; Schuster 2005).

On rappelle qu'une onde est définie par sa longueur d'onde. Lorsque l'onde se déplace dans un milieu homogène depuis un émetteur fixe vers un récepteur fixe, sa longueur d'onde λ_0 et donc sa fréquence F_0 sont stables dans le temps et peuvent être exprimées par la formule suivante :

$$\lambda_0 = C \times T_0 \text{ et } F_0 = 1/T_0$$

avec C la célérité ou vitesse de propagation de l'onde dans ce milieu et T_0 la période de l'onde (Boon 1998; Chetboul et al. 2005).

Cependant, en cas de déplacement de l'émetteur ou du récepteur, la longueur d'onde λ_0 et, par conséquent, la fréquence F_0 sont modifiées : c'est **l'effet Doppler**. Ceci est facilement observable sur la route : lorsque le klaxon d'un véhicule (par exemple un véhicule d'ambulance) se rapproche d'un individu fixe, le son du klaxon paraît plus de plus en plus aigu, et il devient de plus en plus grave lorsque le véhicule a dépassé l'individu et s'en éloigne.

La fréquence F_0 est alors augmentée lorsque l'émetteur se déplace vers un récepteur fixe (donc λ_0 est diminuée) et F_0 est diminuée lorsque l'émetteur s'éloigne du récepteur (donc λ_0 est augmentée).

Cette modification de longueur d'onde dépend entre autres de la vitesse V de la structure mobile (émetteur ou récepteur). Ainsi, il est possible de déterminer la vitesse de l'élément mobile grâce à la variation de fréquence entre l'onde émise et l'onde reçue, aussi appelée **glissement de fréquence ou fréquence Doppler** (Doppler shift en anglais).

Ce principe physique est applicable dans le domaine hémodynamique : après émission des ondes ultrasonores, la sonde échographique représente le récepteur fixe de l'onde sonore réfléchi par des éléments mobiles (les globules rouges en circulation dans les vaisseaux sanguins). Lorsque le flux sanguin est dans la direction de la sonde, les globules rouges se dirigent vers la sonde et la fréquence des ultrasons réfléchis augmente. Au contraire, lorsque le flux sanguin est dans la direction opposée à la direction des ondes émises par la sonde, les globules rouges s'éloignent de la sonde et la fréquence des ultrasons réfléchis diminue (*Cf. Figure 8*).

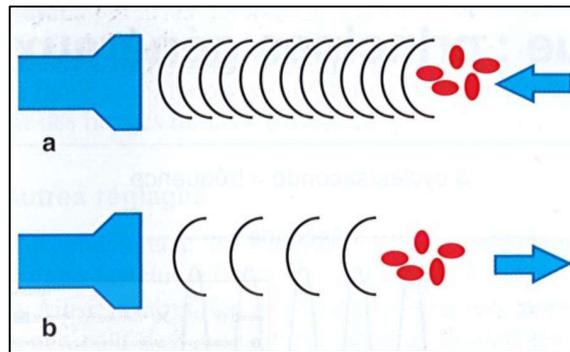


Figure 8 - Illustration de l'effet Doppler (Chetboul et al. 2005).

La fréquence ultrasonique des échos réfléchis par les globules rouges en mouvement est modifiée par rapport à la fréquence d'émission initiale. Lorsque les globules rouges se rapprochent de la sonde, cette fréquence augmente (a). Lorsqu'ils s'en éloignent, cette fréquence diminue (b).

Cette variation de fréquence peut être exprimée en fonction de la fréquence initiale d'émission F_0 et la vitesse V du flux sanguin selon la formule suivante :

$$\Delta F = \frac{2F_0 V \cos \theta}{C}$$

avec F_0 la fréquence d'émission de l'onde ultrasonore par la sonde, V la vitesse du flux sanguin échographié, C la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans le milieu donné et θ l'angle entre le faisceau émis et la ligne de direction du flux sanguin (Chetboul et al. 2005).

La vitesse des globules rouges, donc du flux sanguin, peut être alors écrite selon la formule suivante :

$$V = \frac{\Delta F C}{2F_0 \cos \theta}$$

Grâce à cette formule, le calcul de la vitesse V du flux dépend de l'angle entre la direction de la sonde et la direction du vaisseau sanguin. Avec un angle θ trop grand, la vitesse V du flux sanguin est sous-estimée de manière artificielle. Par exemple, un angle de 20° provoque une erreur de 6 % par rapport au flux réel.

Ainsi, si le faisceau d'ultrasons doit être le plus perpendiculaire possible à la surface des tissus examinés lors d'une échographie bidimensionnelle (2D, mode B), la sonde doit être parallèle possible aux parois vasculaires examinées lors d'une échographie Doppler. En pratique, un angle entre 0° et 20° est toléré pour l'analyse des flux.

Lorsque les structures adjacentes doivent être toutefois correctement observables, un compromis entre la bonne résolution de l'image en mode B et l'obtention de signaux

Doppler francs est nécessaire, alors un angle situé entre 30 ° et 60 ° semble adéquat (Kurjak, Fleischer 1998).

Le glissement de fréquence peut être exprimé par un signal auditif, graphique ou colorimétrique :

- Le **signal auditif** est utile lors de l'étude cardiovasculaire, afin d'écouter des flux laminaires ou turbulents, par exemple, ou encore le son proche d'une valve. En effet, la variation de fréquence est souvent comprise dans l'intervalle des fréquences audibles par l'oreille humaine, soit entre 20 et 20 000 Hz. Après amplification, un son correspondant est émis.

- **L'analyse graphique** permet de représenter de manière analytique la vitesse du flux en fonction du temps de deux manières possibles :
 - Représentation de la moyenne des vitesses en fonction du temps : cette méthode génère des erreurs dans le cas où il existe des flux avec des directions opposées car la moyenne des flux sera alors nulle et ne reflètera donc par la réalité hémodynamique du vaisseau.
 - Représentation de l'ensemble des vitesses en fonction du temps : les vitesses sont rapportées par leur valeur absolue, auxquelles il est rajouté un signe négatif si le flux est rétrograde (les globules rouges s'éloignent de la sonde) et un signe positif si le flux est antérograde (les globules rouges se rapprochent de la sonde). Cette représentation est aussi appelée Doppler spectral, par opposition à la représentation des flux sous forme de couleur.

- **L'analyse colorimétrique** présente ces données sous forme d'une image colorée. En cas de flux laminaire, les flux antérogrades sont représentés en rouge, et d'intensité lumineuse proportionnelle à la valeur absolue de la vitesse, et les flux rétrogrades sont représentés en bleu. En cas de flux turbulent, la couleur associée est le vert (Boon 1998; Chetboul et al. 2005).

b. Modes utilisables en échographie Doppler

Il existe 3 modes principaux en échographie Doppler, chacun ayant leurs intérêt et usage distincts : le Doppler continu, le Doppler pulsé et le Doppler couleur (Boon 1998; Chetboul et al. 2005).

Le **Doppler continu** est caractérisé par une sonde contenant deux cristaux, un cristal émetteur d'ondes ultrasonores de façon continue et un cristal récepteur qui

réceptionne en continu les ondes ultrasonores réfléchies. L'avantage d'avoir une émission séparée physiquement de la réception est qu'il n'y a pas de perte d'information : toutes les vitesses sont alors mesurées, y compris les vitesses élevées, sans effet « aliasing » (effet décrivant la perte d'informations, surtout en cas de vitesses élevées, illustré ci-dessous par la *Figure 9*). Cependant l'inconvénient de ce mode est le manque de résolution spatiale par l'impossibilité à détecter avec précision la profondeur des tissus réfléchissants. Cette technique est très fréquemment associée à l'imagerie bidimensionnelle.

Le **Doppler pulsé** est caractérisé par une sonde ne contenant qu'un seul cristal, à la fois émetteur et récepteur de façon alternative. Cette technique est caractérisée par la fréquence de répétition, soit la fréquence à laquelle la sonde envoie un nouveau signal ou encore le nombre d'émissions par seconde, aussi appelée **PRF (Pulse Repetition Frequency)**. On choisit la PRF en fonction de la profondeur à observer : plus la profondeur du flux sanguin à observer est élevée, plus on doit baisser la PRF. Ceci a l'avantage de permettre une localisation précise du signal, notamment de la profondeur. Néanmoins, du fait du double rôle de la sonde, une perte d'information des signaux réfléchis a lieu lorsque la sonde émet des signaux. Ainsi, les signaux à vitesses élevées sont plus facilement manqués malgré le système « anti-aliasing ». De plus, le coût de l'appareil est plus élevé.

Le **Doppler couleur**, est une technique particulière du Doppler pulsé qui cartographie les flux par Doppler pulsé grâce à un codage en couleur des signaux Doppler. L'image couleur est superposée à l'image échographie bidimensionnelle. Elle a l'avantage de fournir une vision spatiale des flux mais présente les mêmes inconvénients que le Doppler pulsé.

Plus récemment, le mode **Doppler puissance** est apparu. Il permet de détecter des flux sanguins plus petits, de plus faible énergie et dans toutes les directions. Un codage en couleur de la puissance du flux sanguin est réalisé. Cette puissance correspond au nombre de globules rouges qui passent à un instant donné dans un volume donné et est alors indépendante de la vitesse et de la direction des globules rouges. Cette technique est aussi indépendante de l'angle de la sonde par rapport au vaisseau et s'affranchit de l'effet « aliasing ». Ce mode Doppler est donc particulièrement intéressant pour quantifier et caractériser le niveau de vascularisation d'un organe ou d'une structure. Du fait de sa capacité à détecter des flux de faible intensité, il est particulièrement utile pour étudier la micro-vascularisation, comme celle du corps jaune, des follicules ou encore de l'endomètre. Il peut alors être couplé aux autres modes pour une caractérisation plus fine du flux sanguin (Chetboul et al. 2005).

c. Artéfacts

Il existe plusieurs artéfacts à connaître afin d'interpréter au mieux les images issues de l'échographie Doppler. Certains sont communs avec l'échographie bidimensionnelle précédemment cités, d'autres sont spécifiques de l'échographie Doppler et sont détaillés ci-dessous.

- *Artéfacts causés par le mouvement*

Ces artéfacts sont encore plus fréquents en médecine vétérinaire qu'en médecine humaine de par la difficulté d'obtenir une immobilité totale et sur une longue période de l'animal.

Il est alors parfois intéressant de le tranquilliser. Par ailleurs, en équine, et spécialement lors d'une première mise à la reproduction, l'examen transrectal dans un travail peut s'avérer relativement stressant pour la jument. Une tranquillisation et un accompagnement de la jument par renforcement positif sont conseillés.

Les organes, physiologiquement en mouvement dans la cavité abdominale, génèrent également un possible autre artéfact. Le péristaltisme intestinal peut notamment rendre plus difficile l'observation de l'appareil génital.

En échographie Doppler couleur, du fait des mouvements, il sera parfois observable de manière artéfactuelle des plages de couleurs autour des organes d'intérêt, correspondant à l'analyse d'ondes réfléchies par un organe en mouvement et non aux ondes réfléchies par l'appareil vasculaire (Ginther, Utt 2004).

- *L'effet « aliasing »*

Cet effet « aliasing », ou effet d'ambiguïté de vitesses, est présent lors de l'utilisation du Doppler pulsé. Dans cette technique, le caractère alternant de la sonde (entre son rôle d'émettrice ou de réceptrice d'ultrasons) induit la perte d'ultrasons réfléchis pour les hautes vitesses. L'effet « aliasing » vient du fait que les ultrasons aux vitesses les plus hautes ne sont plus détectés en Doppler pulsé. En effet, pour explorer une structure à une profondeur donnée, la fréquence de répétition (PRF) du Doppler pulsé est limitée, ce qui limite par conséquent la fréquence Doppler et donc la vitesse maximale mesurable.

Or, plus la PRF est élevée, plus la vitesse maximale mesurable est haute (Cf. Figure 9).

Or, en cas de PRF basse, une inversion de couleur peut être observée avec un flux présenté sur l'écran avec une direction inversée par rapport à sa direction réelle. Cela donne lieu à des possibles erreurs lors de l'interprétation des flux sanguins (Ginther, Utt 2004).

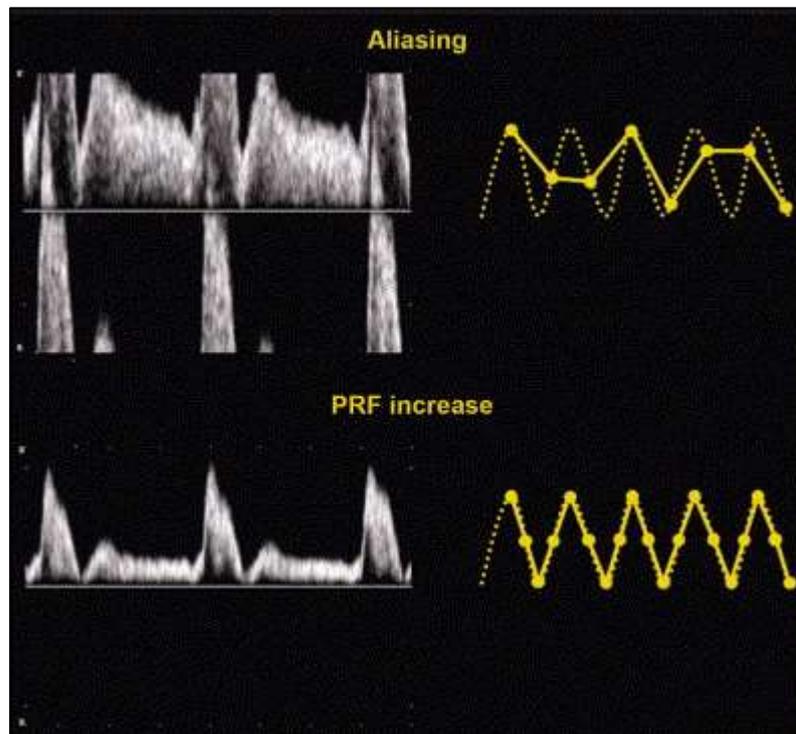


Figure 9 - Explications schématiques de l'effet « aliasing » (Ginther, Utt 2004).

Cette illustration permet d'expliquer l'artéfact « d'aliasing » et illustre le fait qu'avec une PRF basse, il y a un risque de perte d'informations, surtout pour les ondes de grande vitesse.
« PRF increase » = augmentation de la PRF.

Afin d'éliminer cet artéfact, il faut respecter la **limite de Nyquist**, c'est-à-dire opter pour une PRF supérieure ou égale à deux fois la fréquence Doppler (Chetboul et al. 2005). En effet, la PRF limite la fréquence Doppler maximum mesurable (F_{dmax}) et donc la vitesse maximale mesurable du flux (V_{max}) selon la formule suivante :

$$F_{dmax} = PRF / 2$$

ce qui équivaut également à :

$$2 \times D_{max} = C \times T$$

Avec D_{max} la profondeur maximale observable et T la période d'impulsion ($T = 1/PRF$).

L'effet « aliasing » a lieu le plus souvent lors de l'observation d'une structure profonde où la PRF doit être basse. Ainsi, la vitesse maximale mesurable pour écarter cet artéfact est limitée.

Or, la vitesse maximale mesurable du flux sanguin (V_{max}) s'exprime selon la formule suivante :

$$V_{max} = \frac{C \times F_{dmax}}{2F_0}$$

Avec C la célérité de l'onde ultrasonore, F_{dmax} la fréquence Doppler maximale et F_0 la fréquence d'émission initiale de l'onde ultrasonore.

En combinant les deux équations précédentes, on peut établir la formule suivante :

$$V_{max} = \frac{C \times C}{8F_0 D_{max}}$$

Cette formule permet d'établir des seuils de vitesses maximales de flux sanguin observables. Ainsi, le tableau ci-dessous un tableau montre les vitesses maximales mesurables en fonction de la profondeur d'observation et de la fréquence d'émission de l'onde ultrasonore par la sonde (Cf. *Tableau III*).

Tableau III - Vitesses maximales mesurables en fonction de la fréquence d'émission des ultrasons par la sonde et de la profondeur d'exploration (Boon 1998).

Fréquence (MHz)	Vitesse maximale mesurable à 7 cm de profondeur (m/s)	Vitesse maximale mesurable à 12 cm de profondeur (m/s)	Vitesse maximale mesurable à 20 cm de profondeur (m/s)
7,5	0,56	0,33	0,20
5,0	0,85	0,49	0,30
3,5	1,21	0,71	0,42
2,5	1,70	0,99	0,59

PA noter avec ce tableau que plus la fréquence d'émission est élevée, moins la vitesse maximale mesurable est grande.

Plus la profondeur est élevée, moins la vitesse maximale mesurable est grande.

Lorsqu'il est impossible de s'affranchir de cet artéfact (par exemple lorsque les flux à observer sont très rapides), il est recommandé d'utiliser le Doppler continu pour mesurer les vitesses (Boon 1998).

- *Artéfact de réverbération Doppler ou artéfact d'image-miroir*

Cet artéfact a lieu lorsque le gain est élevé ou lorsque l'angle d'incidence par rapport au vaisseau étudié est élevé (proche de 90 °). L'image Doppler obtenue montre un signal (vitesses ou couleur) de part et d'autre de la ligne de base, avec une image réelle au-dessus de la ligne de base, et une image miroir artéfactuelle en-dessous de la ligne de base (tout de même distinguable par sa plus faible intensité) (Ginther, Utt 2004).

- *Décalage temporel entre l'image 2D et l'image Doppler*

Il peut parfois exister un décalage dans le temps entre l'image 2D et l'image Doppler. C'est, par exemple, le cas en échocardiographie : lors de fréquence cardiaque élevée, il est possible d'observer des images de Doppler couleur représentant les flux qui ne sont plus localisés dans les cavités (Boon 1998; Chetboul et al. 2005).

d. Paramètres étudiés

- *Vitesse du flux sanguin*

Après détection de la fréquence Doppler, cette valeur est convertie en vitesse de flux sanguin et affiché sur l'écran en Doppler spectral ou sous forme d'intensité de pixels en Doppler couleur.

Grâce au spectre Doppler, il est possible de distinguer :

- La vitesse maximale du flux sanguin, correspondant, lors d'un flux laminaire, au pic de vitesse systolique (PSV, « peak systolic velocity » ou vitesse systolique maximale) ;
- La vitesse minimale du flux sanguin, correspondant à la vitesse du sang en fin de diastole (EDV, « end diastolic velocity » ou vitesse diastolique finale) ;
- La moyenne des vitesses maximales sur plusieurs cycles cardiaques.

Ces valeurs sont alors utiles pour calculer les indices suivants et pour comparer rapidement et facilement des données (Ginther, Utt 2004).

- *Indice de résistance ou « resistance index » (IR)*

Il s'exprime selon la formule suivante :

$$IR = \frac{PSV - EDV}{PSV}$$

Il existe une corrélation négative entre la résistance des tissus et la perfusion vasculaire du tissu échographié : plus l'IR est élevé, moins le tissu est perfusé (Ginther, Utt 2004).

- *Indice de pulsativité ou « pulsability index » (IP)*

Il s'exprime selon la formule suivante :

$$IP = \frac{PSV - EDV}{\text{moyennes des vitesses maximales}}$$

L'augmentation de l'IP correspond également à une diminution de la perfusion vasculaire du tissu échographié (Ginther, Utt 2004).

Les deux indices sont hautement corrélés (coefficient de corrélation > 0,9) donc le paramètre étudié sera choisi par l'opérateur en fonction des études réalisées et de ses préférences. Une augmentation de leur valeur sera associée à une diminution de la perfusion tissulaire et inversement, une diminution de leur valeur sera associée à une augmentation de la perfusion tissulaire (Ginther, Utt 2004).

Ces indices sont donc très utiles pour comparer de manière chiffrée les variations de perfusions recherchées au niveau de l'appareil génital de la jument pendant le cycle œstral ou pendant la gestation.

- *Mesure de l'aire colorée*

Enfin, afin de cartographier la perfusion tissulaire, il est possible d'utiliser le Doppler couleur et de calculer l'aire colorée ou de sauvegarder les images pour les comparer à un examen ultérieur.

Ainsi, les principes spécifiques de l'échographie Doppler ont été présentés dans cette partie. En pratique, les mesures de l'indice de résistance (IR), de l'indice de pulsatilité (IP) et de l'aire colorée sont aujourd'hui largement utilisées dans le domaine de la recherche en reproduction chez la jument afin de quantifier les variations de perfusion observées.

Pour la réalisation d'un examen échographique Doppler adéquat chez la jument, il est nécessaire de connaître la physiologie de la reproduction chez la jument ainsi que les bases anatomiques nécessaires à l'examen échographique. Ceci est présenté dans la partie suivante.

II. Généralités sur la physiologie de la reproduction chez la jument

1. Physiologie de la reproduction chez la jument non-gestante

a. Le cycle œstral chez la jument

La jument est une espèce polyœstrienne saisonnière à jours longs : elle est cyclée pendant les jours longs (de mars à septembre environ dans l'hémisphère Nord). Chaque cycle dure environ 21 jours. Néanmoins, il existe 20 à 25 % des juments qui sont cyclées toute l'année à cause des conditions de détention (lumière toute la journée dans les boxes, par exemple). La durée de gestation est de 335 à 342 jours, soit d'environ 11 mois (Rowlands et al. 1975; Blanchard et al. 2005), avec des poulinages généralement au printemps pour une mise à la reproduction qui peut être annuelle.

Le cycle œstral est la période située entre deux ovulations chez une jument. Il comprend une phase folliculaire et une phase lutéale. Durant la phase folliculaire a lieu l'œstrus qui dure 4 à 7 jours avec l'ovulation qui intervient un à deux jours avant la fin de l'œstrus. Durant l'œstrus, la jument peut montrer des signes de chaleur (acceptation de l'étalon, queue relevée, position campée en lordose, urines fréquentes, clignotement de la vulve). L'ovulation est spontanée, c'est-à-dire non déclenchée par stimulation coïtale. Après l'œstrus, se trouve la phase de dioœstrus qui dure 14 à 15 jours et pendant laquelle la jument se met généralement à refuser le mâle. À la fin de cette phase, une régression du corps jaune a lieu en l'absence de fécondation (Rowlands, Allen, Rossdale 1975).

Ces phases sont régulées par des modifications hormonales.

Durant l'œstrus, l'hypothalamus produit de la GnRH (Gonadotropin-Releasing Hormone) qui stimule la libération de FSH (Follicule-Stimulating Hormone) et de LH (Luteinsing Hormone) par l'hypophyse. Circulant dans le sang, ces hormones stimulent l'activité ovarienne : la FSH permet la maturation des follicules tandis que la LH provoque l'ovulation du follicule dominant et la formation du corps jaune. Ces mécanismes sont soumis à plusieurs rétrocontrôles : les follicules en cours de maturation libèrent des œstrogènes qui exercent un rétrocontrôle positif sur la production de LH lorsque la progestérone est basse (absence de corps jaune), ce qui stimule l'ovulation d'un follicule dominant. De plus, les œstrogènes et l'inhibine produits par les follicules exercent un rétrocontrôle négatif sur la production de FSH. Enfin, après l'ovulation et la formation d'un corps jaune, ce dernier produit de la progestérone qui exerce un rétrocontrôle négatif sur la libération de LH (Cf. Figure 10).

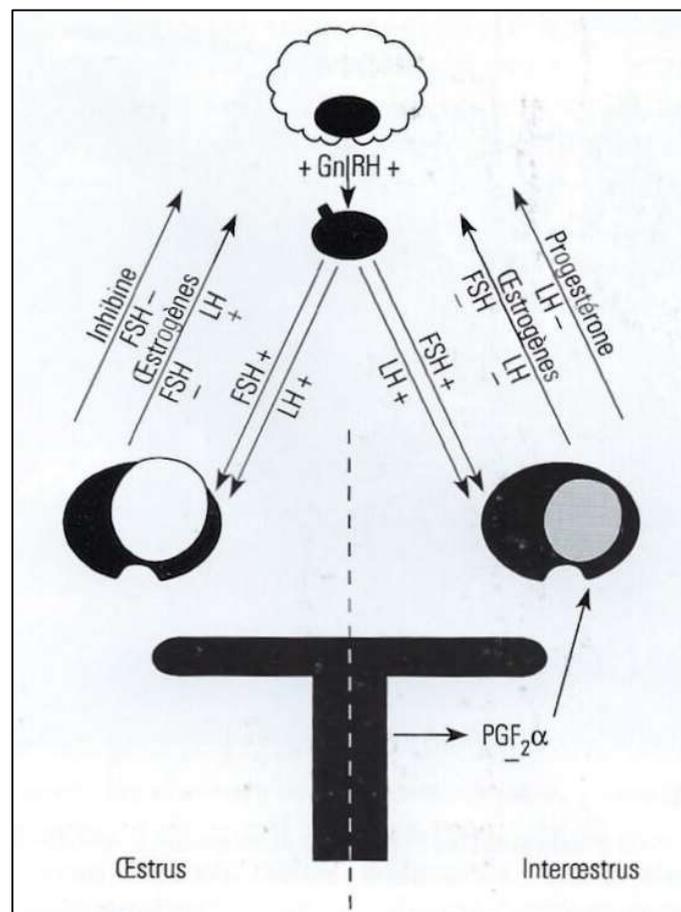


Figure 10 - Représentation schématique de la régulation hormonale ovarienne chez la jument (Blanchard et al. 2005).

FSH : Follicule-Stimulating hormone (hormone folliculo-stimulante)

PGF₂α : Prostaglandin F₂α (prostaglandine F₂α)

LH : Luteinising Hormone (hormone lutéinisante)

Pendant l'œstrus, la maturation des follicules et la formation d'un follicule dominant se déroulent en une à deux vagues folliculaires chez la jument. Le folliculaire pré-ovulatoire atteint un diamètre allant de 30 mm à 70 mm de diamètre, le plus souvent entre 40 mm et 45 mm de diamètre. L'ovulation a lieu généralement entre 24 et 48 heures avant la fin des chaleurs (Blanchard et al. 2005).

En phase de diœstrus, ou phase lutéale, un corps jaune sécrétant de la progestérone est formé et est à l'origine du comportement de refus de l'étalon par la jument. En l'absence de fécondation, le corps jaune est lysé entre le 13^e et le 16^e jour post-ovulation sous l'effet de la PGF₂α (Prostaglandine F₂α) libérée par l'endomètre (Blanchard et al. 2005).

En résumé de ce paragraphe, se trouve ci-dessous un schéma représentant les concentrations hormonales étudiées en fonction du jour dans le cycle chez la jument et leur influence sur la fonction ovarienne (Cf. Figure 11).

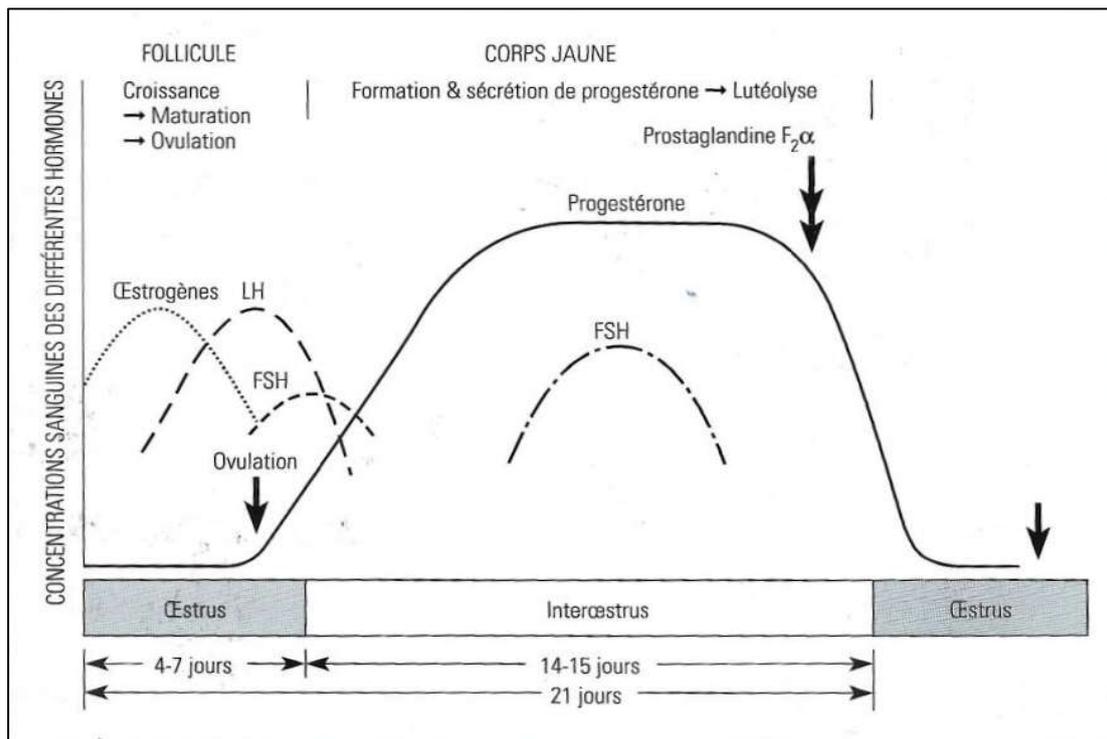


Figure 11 - Concentrations sanguines des différentes hormones au cours du cycle œstral chez la jument et influence sur la fonction ovarienne (Blanchard et al. 2005).

FSH : Follicule-Stimulating hormone (hormone folliculo-stimulante)
 PGF₂α : Prostaglandin F₂α (prostaglandine F₂α)
 LH : Luteinising Hormone (hormone lutéinisante)

Le cycle œstral de la jument est influencé par la photopériode : durant la période des jours courts (l'hiver dans l'hémisphère Nord), l'épiphyse produit une quantité importante de mélatonine qui exerce un rétrocontrôle négatif sur la production de GnRH par l'hypothalamus, ce qui entraîne un arrêt de la cyclicité chez la jument. La jument est alors en anœstrus saisonnier. Quand les jours rallongent, la production de mélatonine par l'épiphyse baisse, ce qui permet une levée d'inhibition de la production de GnRH : l'activité hormonale reprend et la jument cycle de nouveau (Sharp, Cleaver 1993; McKinnon et al. 2011).

b. Ovulation

La prédiction du moment exact de l'ovulation est difficile chez la jument et représente un intérêt majeur, notamment lors d'insémination avec de la semence congelée (Blanchard et al. 2005).

Durant les chaleurs, des changements physiologiques interviennent :

- La jument présente des signes comportementaux de chaleur : acceptation de l'étalon, queue relevée, position campée en lordose, urines fréquentes, clignotement de la vulve. Ces signes ne sont cependant pas systématiques, notamment avec des jeunes juments non expérimentées et potentiellement apeurées en présence de l'étalon.
- Le col devient flasque à la palpation, s'ouvre progressivement d'environ 1 à 3 doigts, prend une couleur rose et s'affaisse sur le plancher du vagin ;
- L'utérus devient flasque à l'examen de palpation transrectale et présente un aspect hétérogène, de par l'œdème utérin, à la l'échographie (*Cf. Figure 24*).
- Au niveau ovarien, un ou plusieurs follicules augmentent de taille jusqu'à ce qu'un ou plusieurs follicule(s) deviennent dominants. Ils sont alors plus souples à la palpation transrectale et peuvent devenir douloureux peu de temps avant le moment de l'ovulation. L'échographie ovarienne montre alors un (ou plusieurs) follicule(s) avec un diamètre supérieur à 35 mm et une absence de corps jaune. Les contours du follicule peuvent également s'épaissir et pointer vers la fosse ovulatoire pour prendre une forme allongée en « poire » (*Cf. Figure 24*).

En deuxième partie de thèse, les images échographiques classiques du suivi du cycle œstral chez la jument seront présentées puis l'efficacité de la technique d'échographie Doppler sera évaluée, notamment concernant la prédiction de l'ovulation chez la jument.

2. Physiologie de la reproduction chez la jument gestante

a. La période embryonnaire (de la fécondation à l'implantation)

Si une fécondation a lieu dans l'oviducte, le corps jaune n'est pas lysé 14 à 15 jours après l'ovulation et persiste, ce qui entraîne un maintien du taux élevé de progestérone, nécessaire au bon déroulement de la gestation (Rowlands et al. 1975; Blanchard et al. 2005).

Après la fécondation, les premières divisions cellulaires se déroulent dans l'oviducte et l'embryon, alors au stade morula ou de blastocyste, entre dans la cavité utérine vers le sixième jour post-ovulation.

La vésicule embryonnaire est alors mobile dans la cavité utérine jusqu'au 16^{ème} jour et passe d'une corne à l'autre, ainsi que dans le corps utérin (Ginther 1983; Stout, Allen 2001). Le maintien de la gestation est à ce moment-là assuré par le corps jaune gestatif primaire.

Au 16^{ème} jour post-ovulation, la vésicule embryonnaire s'immobilise à la base d'une corne utérine du fait de l'augmentation en volume de cette vésicule, freinant ainsi sa mobilité (Ginther 1983).

La vésicule continue alors sa croissance à la base d'une des cornes utérines.

Une ceinture chorionique (cellules trophoblastiques hyperplasiques et invasives) se met en place autour de l'embryon pour préparer l'implantation future (Blanchard et al. 2005).

Dans la troisième partie de cette thèse sera notamment discutée la possibilité d'un diagnostic de gestation précoce par échographie Doppler.

b. Premier tiers de gestation (à partir de l'implantation)

La vésicule embryonnaire continue de se développer entourée par sa ceinture chorionique et autour du **35^{ème} jour post-ovulation a lieu la phase d'implantation embryonnaire** avec liaison entre les microvillosités de la surface cellulaire trophoblastique et l'épithélium utérin par formation de cupules endométriales et

production par les cupules d'eCG (*equine Chorionic Gonadotropin*). L'eCG permet la formation des corps jaunes secondaires et le maintien du corps jaune primaire (Murphy, Martinuk 1991).

Entre le 40^{ème} jour et le 45^{ème} jour de gestation a lieu la placentation du conceptus, marquant le passage du stade d'embryon au stade de fœtus. Il y a alors développement de microplacentomes, formés de microcotylédons fœtaux et de microcaroncules maternelles. Grâce aux sécrétions hypophysaires et à celles des cupules endométriales, plusieurs ovulations ont lieu entre le 40^{ème} jour et le 70^{ème} jour de gestation, menant à la formation des **corps jaunes secondaires**. De plus, la formation des **corps jaunes accessoires** résulte de la lutéinisation de follicules entre le 40^{ème} jour et le 150^{ème} jour de gestation. La sécrétion de progestérone par le corps jaune primaire, ainsi que par les corps jaunes secondaires et accessoires, assure le maintien de la gestation jusqu'au 5^{ème} mois de gestation environ (entre le 150^{ème} et le 200^{ème} jour de gestation), cette sécrétion étant ensuite uniquement assurée par le placenta (Ginther 1979; Blanchard et al. 2005).

On note l'importance des cupules et des corps jaunes secondaires dans le maintien d'une gestation et la gestion de la mise à la reproduction : une jument ayant avorté naturellement ou ayant reçu une (ou plusieurs) injection(s) de prostaglandine F2 α (PGF2 α), avant le 40^{ème} jour de gestation, pourra revenir en chaleur (Savage, Liptrap 1987), alors que si ces avortement ou injection(s) interviennent après la formation des cupules endométriales, les corps jaunes secondaires sont maintenus via la sécrétion d'eCG et la jument ne peut ainsi pas revenir en chaleur pour une durée supplémentaire de 3 mois environ, à savoir jusqu'au moment de la résorption des cupules endométriales (Blanchard et al. 2005).

En parallèle du développement placentaire, les annexes fœtales se développent avec le sac allantoïdien qui, notamment, se développe et s'étend, à 60 jours, de l'extrémité crâniale de la corne gravide jusqu'à la base de l'autre corne utérine (Ginther 1998).

c. Deuxième et troisième tiers de gestation

La jument présente une **placentation épithéliochoriale diffuse**. Vers 100 jours de gestation, les microcotylédons se développent. Le placenta n'assure la totalité de la production de progestérone qu'à partir de 150 jours de gestation (Rowlands et al. 1975).

Jusqu'à 70 jours de gestation, le fœtus est très mobile. Il est attaché au placenta par le cordon ombilical.

Après 70 jours de gestation, du fait du fort poids des annexes fœtales, l'utérus plonge dans l'abdomen (Ginther 1979). Le fœtus poursuit sa croissance et, au fur et à mesure, les mouvements possibles sont réduits du fait de l'augmentation importante de sa taille.

Au 7^{ème} mois de gestation, les membres postérieurs s'étendent dans la corne utérine gravide et deviennent piégés dans cette dernière du fait de leur taille si bien qu'en situation physiologique, le fœtus est maintenu dans plus de 99 % des cas en présentation crâniale et décubitus dorsal au 9^{ème} mois de gestation (Ginther 1998).

d. Poulinage

La mise-bas se déroule généralement entre 335 et 342 jours de gestation. La date de mise-bas est très variable chez cette espèce et dépend de nombreux paramètres, notamment de la saison à laquelle est prévue la mise-bas (liée au temps d'éclairage : en fin d'hiver ou début de printemps, la durée de gestation est souvent rallongée de 5 à 10 jours par rapport à un poulinage prévu au milieu du printemps ou en été), de la race, du sexe du fœtus, de l'alimentation, de l'environnement, du degré de stress subi par la jument pendant la gestation (Blanchard et al. 2005)...

Le poulinage se déroule en 3 phases :

- Durant la première phase, ou phase de préparation au poulinage (entre 10 minutes et 4 heures), la jument montre des signes d'inconfort et les contractions utérines débutent. Le poulain passe (en situation physiologique) d'une présentation antérieure dorso-pubienne à une présentation antérieure dorso-sacrée et entre dans la filière pelvienne ;
- Durant la deuxième phase, ou phase d'expulsion du poulain (entre 20 à 30 minutes), la jument se couche, réalise des efforts expulsifs, permettant l'avancée du poulain (commençant par les sabots antérieurs puis la tête) et permettant la rupture de l'allantoïde puis de l'amnios avec le début de respiration du poulain ;
- Durant la troisième phase, ou phase d'expulsion des annexes (dans les 30 minutes), le placenta doit être expulsé et entier (Card, Hillman 1993; McKinnon et al. 2011).

3. Rappels anatomiques et étude préalable de la vascularisation utérine et ovarienne

Nous aborderons ici uniquement sur les éléments anatomiques de l'appareil génital de la jument utiles pour l'examen échographique dans le domaine de la reproduction (Barone, Tagand 1954; Ginther 1995a; 1995b; Blanchard et al. 2005; McKinnon et al. 2011; Barone 2021).

a. Anatomie de l'utérus

Nous nous baserons sur ce schéma pour décrire l'anatomie de l'utérus utile à l'exploration de cet organe par échographie Doppler (Cf. Figure 12).

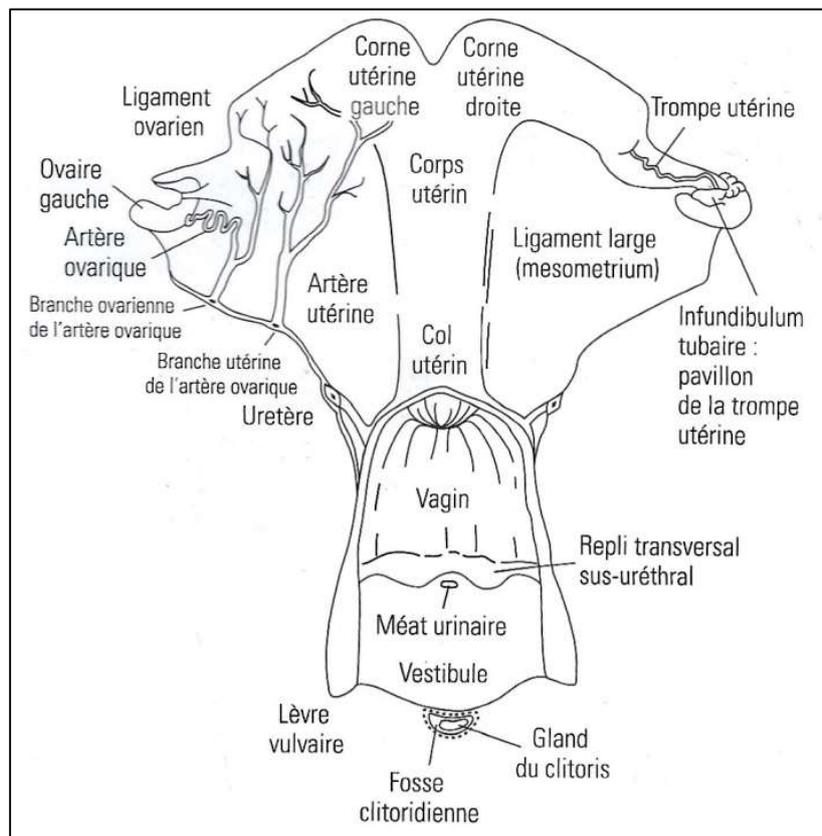


Figure 12 - Représentation schématique de l'appareil génital de la jument en vue dorsale (Blanchard et al. 2005).

- *Topographie*

L'utérus de la jument est bicorné. Il est composé en sa partie postérieure d'un col et d'un corps, qui se prolonge en deux cornes.

Les cornes peuvent être décrites selon leurs deux faces latérales, leur grande courbure et leur petite courbure, et leur apex sur lequel s'attache l'oviducte, le mésosalpinx, le ligament utéro-ovarien et le mésovarium.

Le corps utérin forme un cylindre, avec une face dorsale sur laquelle s'attache le ligament large, une face ventrale et deux bords latéraux. Sur sa partie antérieure, le fundus correspond à la bifurcation des deux cornes. Sur sa partie postérieure se trouve le col utérin, qui forme un rétrécissement cylindrique plus ferme à la palpation (Barone 2020; 2021).

- *Moyens de fixité*

L'utérus est attaché par deux ligaments larges, un à droite et un à gauche, à la partie dorsale de la cavité abdominale.

Le ligament large soutient l'ovaire, l'oviducte et une partie de l'utérus, ainsi que les nerfs et vaisseaux correspondants. Il s'attache, en son bord supérieur, au bord latéral de la voûte lombo-sacrée, et l'utérus s'étend jusqu'à son bord inférieur en soutenant la bourse ovarique et jusqu'en arrière de la petite courbure de la corne utérine correspondante, puis sur la face dorsale du corps et enfin sur la partie antérieure du vagin. Son bord antérieur correspond à l'attache lâche de l'ovaire et forme le ligament suspenseur de l'ovaire. De sa face externe en portion ovarienne se détache le mésosalpinx (Barone 2020; 2021).

- *Structure*

L'utérus est composé de nombreux plis, eux-mêmes composés d'une séreuse, d'une musculuse et d'une muqueuse, ou endomètre, dont le développement varie grandement en fonction du cycle. L'endomètre possède notamment un réseau microvasculaire très développé et muable, qui sera étudié ultérieurement (Barone, Tagand 1954; Barone 2021).

b. Anatomie de l'ovaire

▪ Topographie

En fonction de la relative laxité du ligament large, l'ovaire est situé entre 0 et 5 cm de la corne utérine associée et cette position varie en fonction de la position des intestins. Cela correspond généralement à une position située entre la 4^{ème} et 5^{ème} vertèbre lombaire, au contact de la paroi lombaire et généralement proche du pôle postérieur des reins (Barone, Tagand 1954; Ginther 1995b).

Selon la taille de l'animal, les ovaires se trouvent entre 50 et 60 centimètres crânialement par rapport à la vulve.

L'ovaire droit est en regard de la crosse du cæcum. L'ovaire gauche est en contact avec le colon descendant (Barone, Tagand 1954; Ginther 1995b).

L'ovaire peut être découpé dans l'espace en deux faces (interne et externe), deux bords (dorsal et ventral) et deux pôles (antérieur et postérieur). La partie convexe de l'ovaire est dorsale et la partie concave est ventrale.

Les deux faces sont recouvertes par le péritoine et une vascularisation veineuse qui converge vers le bord dorsal de l'ovaire. Ce dernier est attaché au mésovarium (Ginther 1995b).

Sur le bord ventral se trouve la fosse ovulatoire, qui est en lien avec le pavillon de la trompe utérine sur la partie antérieure de la fosse ovulatoire : l'épithélium germinatif de la fosse se soude à l'épithélium du pavillon.

Au niveau des pôles ovariens se trouvent les attaches de l'ovaire : au niveau du pôle antérieur s'attache l'oviducte et au niveau du pôle postérieur s'attachent le ligament large et le ligament utéro-ovarien (Cf. *Figure 13*).

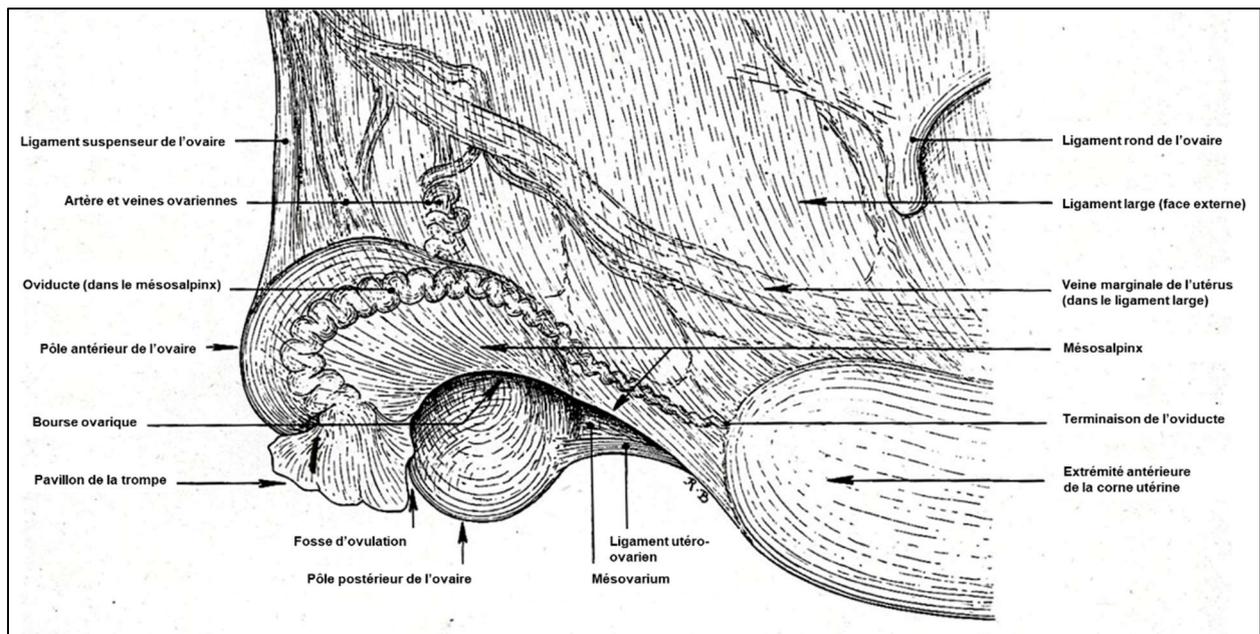


Figure 13 - Représentation schématique de l'ovaire, de sa vascularisation et de ses moyens de fixités (d'après Barone, Tagand 1954).

▪ Histologie

Chez la jument, la structure histologique de l'ovaire est inversée : la médulla, structure la plus vascularisée et responsable de la fonction endocrine de l'ovaire, est aussi la structure la plus superficielle (Barone, Tagand 1954; Ginther 1995b). Elle entoure le cortex, qui correspond au parenchyme de l'ovaire contenant les follicules et est responsable de la fonction gamétogène (mais aussi endocrine) de l'ovaire. Le cortex est superficiel uniquement au niveau de la fosse ovulatoire où il est uniquement recouvert par un épithélium appelé épithélium germinatif, soit au niveau du bord ventral de l'ovaire, permettant ainsi l'ovulation (Cf. Figure 14).

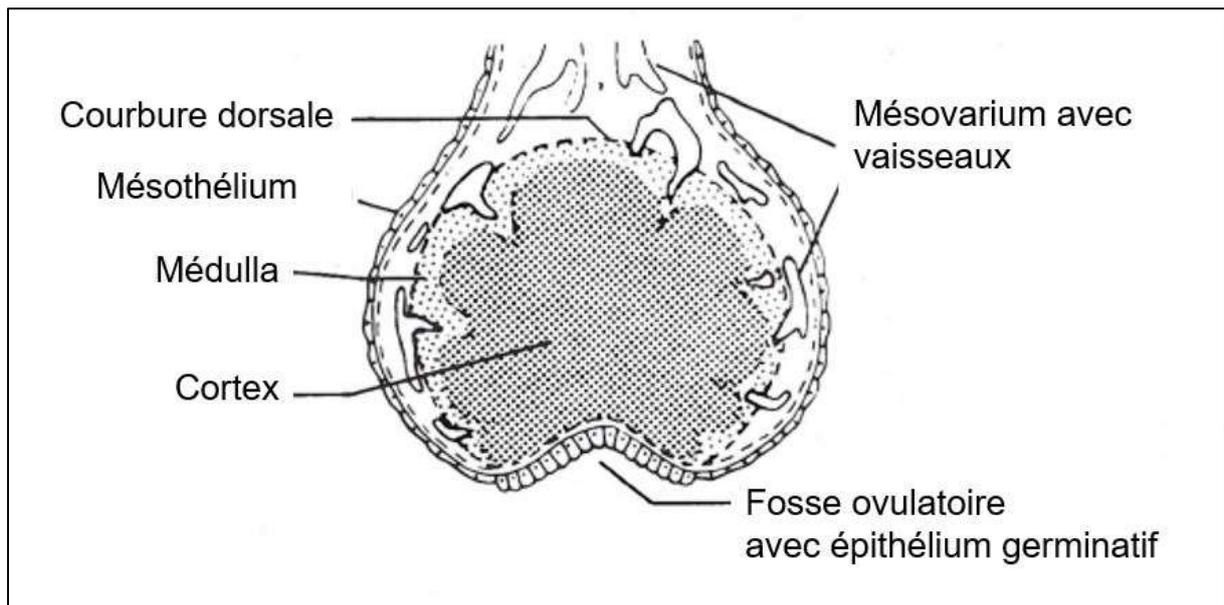


Figure 14 - Représentation schématique des différentes structures composant l'ovaire chez la jument en coupe sagittale médiane (d'après Ginther 1995b).

- Moyens de fixité

L'ovaire est entouré et maintenu par la bourse ovarique, issu du ligament large de l'ovaire qui forme deux lames, une lame interne appelée le mésovarium et une lame externe appelée le mésosalpinx (Cf. Figure 15).

Le mésovarium est le méso propre de l'ovaire. Il s'attache sur le bord dorsal et au pôle postérieur de l'ovaire et se prolonge sur l'extrémité antérieure de la corne utérine.

Le mésosalpinx porte l'oviducte. Il s'attache sur le pôle antérieur et sur le bord dorsal de l'ovaire et se prolonge sur l'extrémité antérieure de la corne utérine (Barone, Tagand 1954).

Trois ligaments sont également responsables de la fixité de l'ovaire (Barone, Tagand 1954).

Le ligament suspenseur de l'ovaire est un tissu très fibreux, donc renforcé, issu du bord antérieur du ligament large de l'ovaire. Il s'attache au niveau du pôle antérieur de l'ovaire et sur la voûte lombaire proche du pôle postérieur du rein.

Le ligament utéro-ovarien longe le bord inférieur du mésovarium.

Le ligament tubo-ovarien est issu du mésosalpinx. Il s'attache sur une partie du pavillon de la trompe qu'il longe jusqu'au bord antérieur de la fosse ovulatoire où il s'y attache (Cf. Figure 15).

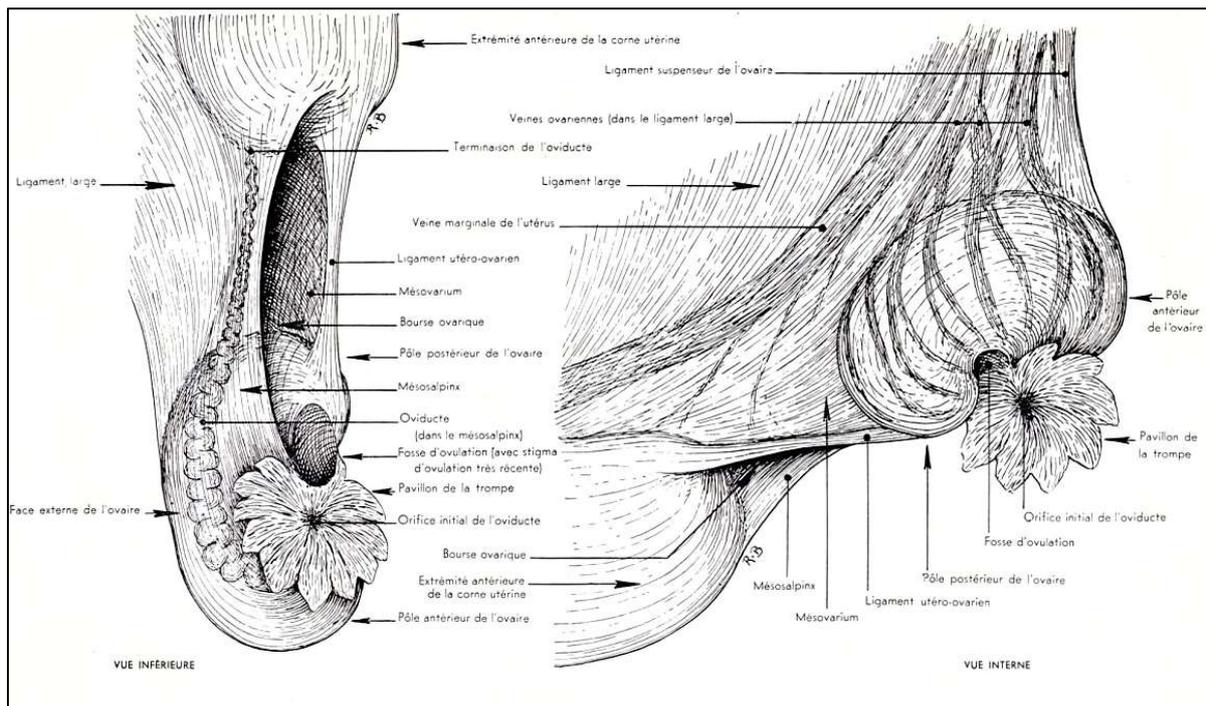


Figure 15 - Représentation schématique des attaches de l'ovaire (d'après Barone, Tagand 1954).

■ Vascularisation

La vascularisation de l'ovaire s'initie depuis le ligament large de l'ovaire et irrigue d'abord la partie dorsale de l'ovaire puis toute sa surface médullaire (Ginther 1995b). La grande mobilité de l'ovaire induite par l'attache très relâchée de l'ovaire par le ligament large, ainsi que la présence d'une masse graisseuse importante environnante, rendent l'échographie vasculaire de cette zone complexe (Cf. Figure 16).

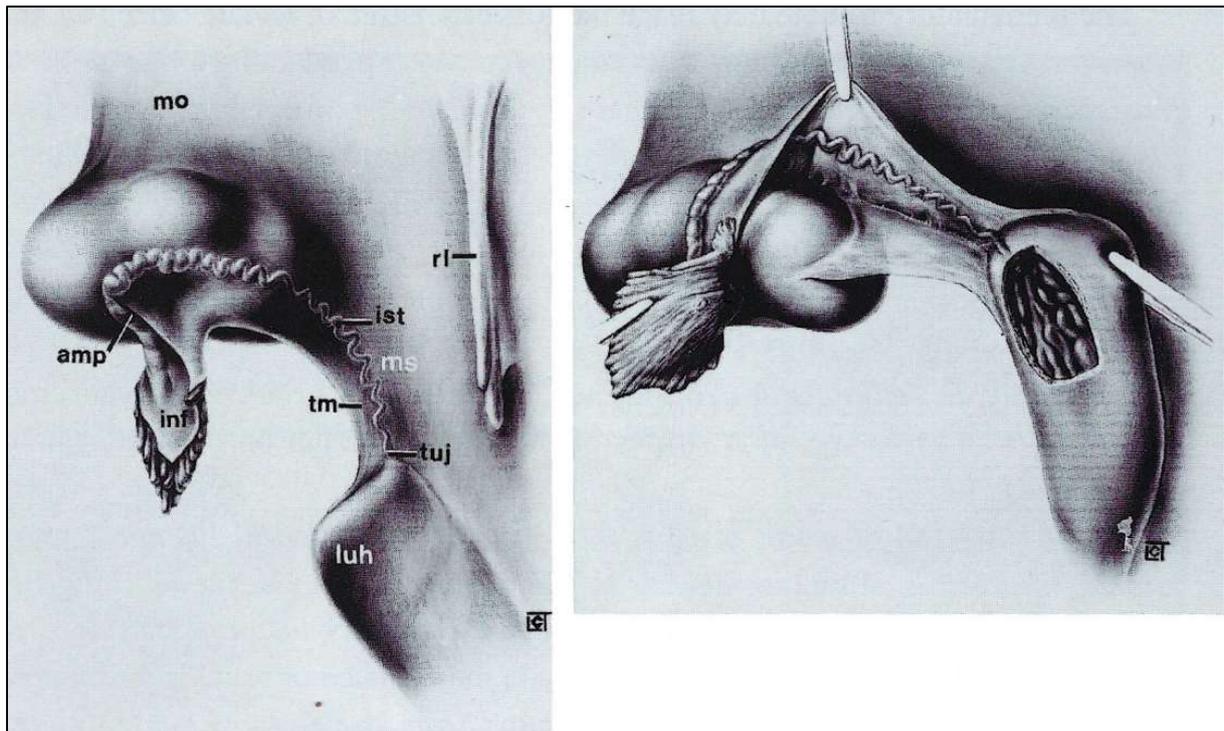


Figure 16 - Dessin d'un ovaire en vue latérale et des structures associées chez la jument (Ginther 1995b).

Amp = ampoule, inf = infundibulum, ist = isthme
 luh = corne utérine gauche (left uterine horn), mo = mésovarium, ms = mésosalpinx
 rl = ligament rond, tm = membrane tubaire, tuj = jonction utéro-tubaire

c. Structure du follicule et du corps jaune

Il existe deux types de follicules : les follicules évolutifs qui, au cours du cycle, se développent jusqu'au stade potentiel de déhiscence, et les follicules involutifs, dont le développement s'arrête et pour lesquels la fonction gamétogène est perdue mais la fonction endocrine est conservée.

Au cours de la croissance folliculaire, les follicules évolutifs passent par plusieurs stades : follicule primordial, follicule plein, follicule cavitaire, follicule mûr puis follicule déhiscent (Barone, Tagand 1954).

Au fil de l'exsudation d'un liquide intercellulaire et de l'accumulation de cellules folliculaires, le follicule devient cavitaire et se compose de différents tissus cités ici du centre vers la périphérie (Cf. Figure 17) :

- La cavité folliculaire, ou antrum, constituée d'un liquide qui est détectée par une plage hypoéchogène lors de l'échographie ;

- Cette cavité est entourée par son enveloppe, la granulosa, formée par un amas de plusieurs petites cellules folliculaires rondes ou polyédriques qui s'accumulent au fil du développement folliculaire ;
- Au stade de l'ovule, la granulosa est recouverte par une couche épaissie de grosses cellules granuleuses formant la couronne radiée ou corona radiata ;
- La vitrée est la couche faisant la distinction entre la granulosa, d'origine épithéliale et avasculaire, et les couches suivantes, d'origine conjonctive ;
- Ainsi, la vitrée est entourée par la thèque interne, un premier tissu conjonctif responsable notamment de la production de folliculine ou œstrone ;
- Enfin la thèque externe est la dernière couche de la paroi folliculaire, et est en contact direct avec le cortex. La thèque externe est le tissu conjonctif porteur des capillaires folliculaires permettant la vascularisation du follicule. Ces capillaires atteignent au cours du développement folliculaire la thèque interne mais ne dépassent jamais la vitrée. L'évolution de cette vascularisation sera étudiée à l'approche de l'ovulation (Cf. Partie 2. I.).



Figure 17 - Paroi d'un follicule en maturation chez la jument (Barone, Tagand 1954).

Coupe histologique de follicule visualisé au microscope x350.

- 1 – Antrum
- 2 – Granulosa
- 3 – Vitrée
- 4 – Thèque interne
- 5 – Thèque externe

Après maturation, la déhiscence du follicule avec libération de l'ovule a lieu au niveau de la fosse ovulatoire.

Le follicule déhiscent se transforme alors en corps jaune après l'ovulation. Il y a une organisation progressive du corps jaune jusqu'à six à huit heures après l'ovulation. Grâce à de nombreuses travées conjonctivo-vasculaires, il exerce sa fonction sécrétoire en produisant de la progestérone, hormone rendant le tractus génital propice à la nidation et à la gestation. La période d'état du corps jaune dure jusqu'au 14^{ème} jours après l'ovulation et régresse totalement jusqu'au 19^{ème} jour post-ovulation par une dégénérescence des cellules conjonctives, laissant place peu à peu à un tissu fibreux appelé corps blanc ou corps fibreux (Ginther 1979).

En cas de fécondation, le corps progestatif est maintenu et devient un corps gestatif qui assure seul le maintien de la gestation jusqu'au 40^{ème} jour. Du 40^{ème} au 150^{ème} jour de gestation, le corps jaune primitif régresse progressivement et sa fonction est remplacée par des corps jaunes secondaires issus des métaplasies progestatives (soit la transformation des follicules en corps jaune sans déhiscence) ou issus d'une ovulation ayant eu lieu pendant la gestation. À mi-gestation débute la régression de tous les corps jaunes gestatifs et le relai placentaire de progestérone. Lors des dernières semaines de gestation, l'ovaire est au repos complet avec quelques restes de corps gestatifs fibreux et de très petits follicules (Ginther 1979).

d. Etude de la vascularisation utérine et ovarienne

▪ Vascularisation de l'ovaire et de ses organites

L'ovaire est irrigué par **l'artère ovarienne** provenant de l'artère utéro-ovarienne. L'artère ovarienne est portée par le ligament large, puis le mésovarium, et atteint le bord dorsal de l'ovaire en sa partie moyenne. Ensuite, elle présente de nombreuses flexuosités en surface de l'ovaire jusqu'à rejoindre son pôle postérieur. Le trajet de l'artère ovarienne présente ensuite une inflexion de 180° en contournant le pôle postérieur de l'ovaire, puis en suivant la courbure dorsale jusqu'à contourner le pôle antérieur pour arriver juste en avant de la fosse ovulatoire. Son trajet se finit alors au pôle antérieur de l'ovaire (Barone, Tagand 1954; Barone 2021) (*Cf. Figure 19*).

Sur son chemin se forment plusieurs artères collatérales avec de multiples flexuosités ainsi que de multiples artérioles très tortueuses. Ces artérioles issues de l'artère ovarienne sont responsables de l'irrigation plus profonde de l'ovaire, jusqu'à l'irrigation thécale des follicules. Chaque follicule est irrigué par un réseau d'artérioles et de capillaires qui lui est propre et qui se développe et régresse avec lui (Barone, Tagand 1954; Barone 2021).

Au-delà de la vascularisation propre de l'ovaire, l'artère ovarienne donne naissance à des artérioles irrigant le ligament large et la bourse ovarique, à l'artère irrigant le pavillon de la trompe et à l'artère tubaire antérieure qui irrigue la partie antérieure de l'oviducte (Barone, Tagand 1954; Barone 2021).

À noter que chez certaines juments, l'artère ovarienne se divise dès son origine en deux branches, dont l'une irrigue le pôle antérieur de l'ovaire et l'autre se dirige vers le pôle postérieur de l'ovaire.

Concernant la vascularisation veineuse, les multiples veinules thécales rejoignent progressivement le bord dorsal de l'ovaire et se joignent au niveau des veinules issues du pavillon, de l'oviducte, de la bourse ovarique et du ligament large pour s'unir en trois à quatre grosses veines formant un **plexus** comparable au plexus pampiniforme décrit chez l'espèce humaine. De ce plexus peuvent se distinguer la **grande veine ovarienne**, qui se jette dans la veine utéro-ovarienne ou directement dans la veine cave postérieure, et la **petite veine ovarienne** qui remonte le long de l'artère ovarienne, reçoit la veine tubo-utérine et se jette dans la veine marginale de l'utérus (Barone, Tagand 1954; Barone 2021) (*Cf. Figure 19*).

L'ovaire porte un fort réseau lymphatique, notamment au niveau des thèques folliculaires et lutéales, et gagne les ganglions lombo-aortiques et sous-lombaires en suivant le trajet de la grande veine ovarienne (Barone, Tagand 1954; Barone 2021).

L'innervation de l'ovaire est apportée par le plexus ovarien, avec une partie sensitive et une partie contrôlant la vasomotricité artérielle et veineuse, le trophisme des organites folliculaires et les sécrétions (Barone, Tagand 1954; Barone 2021).

▪ *Vascularisation de l'oviducte*

L'oviducte est irrigué par les artères de la trompe, aussi appelées artères tubaires, et sont au nombre de trois (*Cf. Figure 19*) :

- **L'artère antérieure**, issue de l'artère ovarienne, irrigue la région du pavillon,
- **L'artère moyenne**, issue de l'artère tubo-utérine, suit l'oviducte dans toute sa longueur et l'irrigue via de multiples branches
- **L'artère postérieure** irrigue la partie terminale du salpinx.

Ce complexe se divise en un réseau sous-séreux d'artérioles, puis entre les deux plans de la musculature et sous l'épithélium de l'oviducte. Le drainage veineux est assuré par des capillaires veineux jusqu'aux veines tubaires, satellites des artères (Barone, Tagand 1954).

▪ Vascularisation de l'utérus

L'utérus est très richement vascularisé et innervé afin d'assurer la nidation et le maintien de la gestation. Ce réseau se caractérise également par son extrême plasticité, s'adaptant ainsi aux variations pendant le cycle œstral et à la croissance rapide de l'utérus pendant la gestation (Barone, Tagand 1954; Barone 2021).

L'irrigation utérine est assurée par 3 artères principales, l'artère tubo-utérine, l'artère utérine propre et l'artère cervico-utérine, comme décrit ci-dessous (*Cf. Figure 19*) :

- **L'artère tubo-utérine** correspond à la branche terminale postérieure de l'artère utéro-ovarienne, présente des flexuosités dans le ligament large et se termine par deux branches : l'artère du fond de la corne (qui donne naissance aux artères tubaires moyenne et postérieure et irrigue l'extrémité ovarienne de la corne utérine) et l'artère antérieure de la corne utérine (qui irrigue la petite courbure de l'utérus et essentiellement la face interne de l'utérus) ;
- **L'artère utérine** donne naissance, 5 à 10 cm avant sa terminaison, à l'artère moyenne de la corne utérine qui irrigue la petite courbure de l'utérus et en majorité la face externe de l'utérus. Plus en arrière, à environ 5 cm de la corne utérine, l'artère utérine se divise en deux branches : l'artère postérieure de la corne, qui irrigue le quart postérieur de la corne, surtout en face externe, et l'artère du corps utérin qui irrigue le corps de l'utérus au niveau de l'insertion du ligament large et plutôt en face interne de l'utérus ;
- Enfin, **l'artère cervico-utérine**, issue de l'artère vaginale, débute dans la partie postérieure du ligament large et arrive en arrière du col utérin où elle se divise en deux branches : l'artère dorsale du col utérin, qui irrigue la moitié postérieure des faces latérale et dorsale du corps utérin ainsi que le col utérin, et l'artère utéro-vésicale qui irrigue la face inférieure du corps utérin, le col utérin, la partie antérieure du vagin et le col vésical.

Les artères décrites précédemment se divisent en artérioles qui forment le réseau vasculaire du myomètre dans la couche moyenne du myomètre ainsi qu'un réseau muqueux dans l'endomètre (Barone, Tagand 1954).

Le réseau veineux de l'utérus est composé de la veine marginale de l'utérus, de la veine utéro-ovarienne, de la veine utérine et de la veine cervico-utérine, comme décrit ci-dessous (*Cf. Figure 19*) :

- La **veine marginale** draine la majorité des veinules issues de la matrice utérine organisées en réseaux sous-muqueux et sous-séreux jusqu'à converger dans le myomètre où ils forment les sinus veineux utérins ;

- La **veine utéro-ovarienne** est la continuation de la veine marginale de l'utérus après l'abouchement de la petite veine ovarienne sur son trajet. Elle finit son trajet dans la veine cave postérieure. À noter que la grande veine ovarienne aboutit soit dans la veine utéro-ovarienne, soit directement dans la veine cave postérieure ;
- La **veine utérine** est une veine de petit diamètre (environ 4 mm) dont les racines et affluents sont satellites de l'artère du même nom et qui présente de nombreuses anastomoses avec la veine marginale de l'utérus. Elle se jette dans le tronc veineux pelvi-crural ;
- Enfin, la **veine cervico-utérine**, satellite de l'artère du même nom, draine la partie postérieure du corps utérin mais aussi le col utérin et la partie antérieure du vagin. Elle forme, avec la veine vaginorectale, la veine vaginale qui se termine dans la veine honteuse interne (Barone, Tagand 1954).

Le drainage lymphatique de l'utérus est assuré par un nombre considérable de vaisseaux lymphatiques dans la paroi utérine, qui se drainent le long du ligament large jusqu'au ganglion utérin parfois existant, ou dans les ganglions lombo-aortiques et sous-lombaires (Barone, Tagand 1954).

À noter que l'innervation de l'utérus est assurée par le plexus nerveux utérin d'où partent également des faisceaux en direction de la vessie, du vagin et de l'oviducte (Barone, Tagand 1954).

Lors de la gestation, la vascularisation utérine est grandement modifiée et caractérisée par un riche réseau placentaire. La **placentation** de la jument est dite **épithéliochoriale** diffuse, à savoir que l'épithélium de la muqueuse maternelle persiste intégralement et le trophoblaste y est simplement apposé, comme illustré sur le schéma suivant (*Cf. Figure 18*).

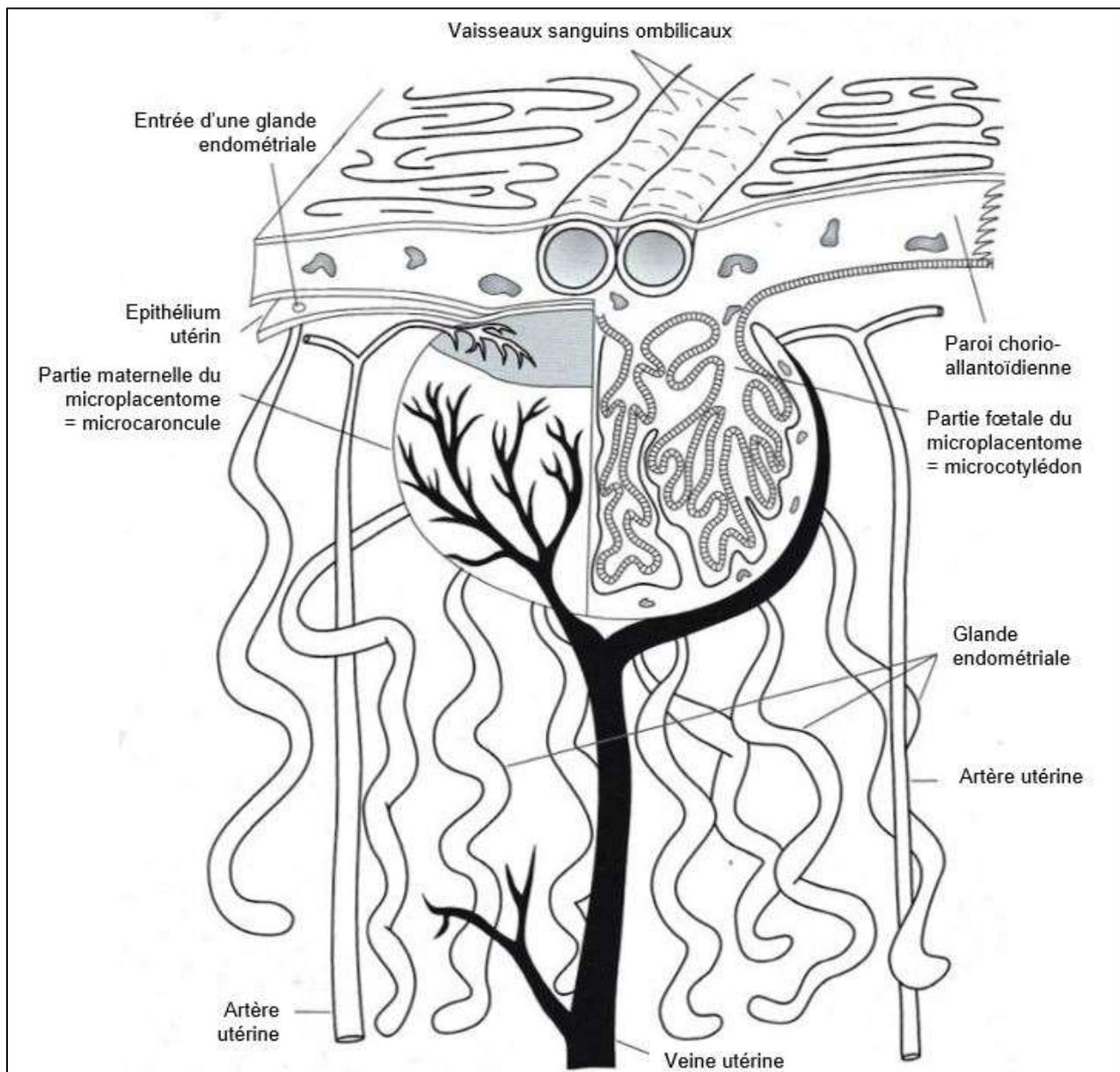


Figure 18 - Représentation schématique de la vascularisation placentaire chez la jument (d'après Blanchard et al. 2005).

Un microplacentome est formé de sa partie fœtale (microcotylédon) et de sa partie maternelle (microcaroncule).

En conclusion de l'étude de la vascularisation du tractus génital chez la jument, le schéma ci-dessous est présenté (Cf. Figure 19).

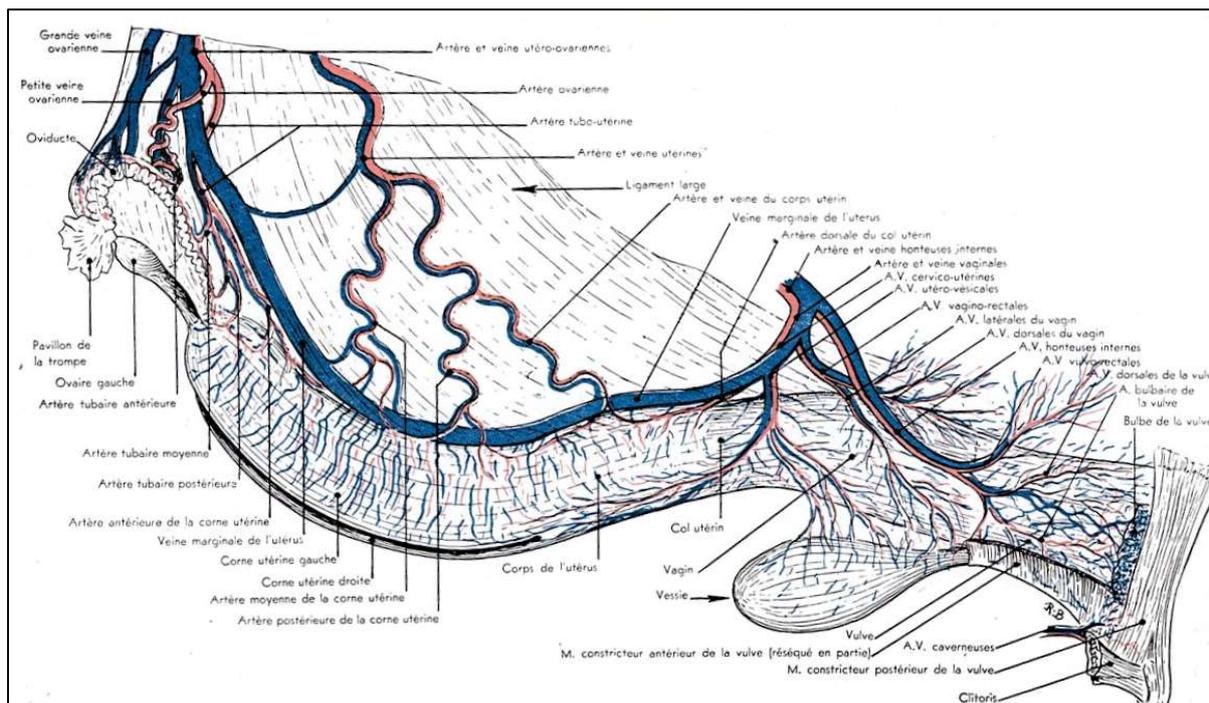


Figure 19 - Représentation schématique de la vascularisation artérielle et veineuse du tractus génital chez la jument (Barone, Tagand 1954).

Vue latérale gauche.

e. Visualisation pratique en échographie Doppler des vaisseaux de choix

Lors d'un examen échographique Doppler en reproduction équine, les flux artériels et artériolaires sont étudiés.

La vascularisation utérine peut être observée chez la jument par l'échographie Doppler des deux artères utérines (droite et gauche). Pour les localiser facilement avec la sonde échographique, il est nécessaire de connaître leur localisation anatomique comme décrite précédemment.

L'aorte est facilement repérable avec la sonde après l'entrée dans le bassin, en orientant la sonde dorsalement. Ensuite, la bifurcation aortique, ainsi que les artères iliaques externe et interne sont repérables en bougeant la sonde caudalement. Il est alors nécessaire de repérer l'artère iliaque externe qui se dirige vers le corps de l'ilium. L'artère utérine naît de l'artère iliaque externe (Bollwein et al. 1998, Cf. Figure 20, Figure 21).

La vascularisation utérine peut également être estimée lors de la gestation par la mesure du flux endométrial en observant par échographie Doppler la micro-vascularisation endométriale.

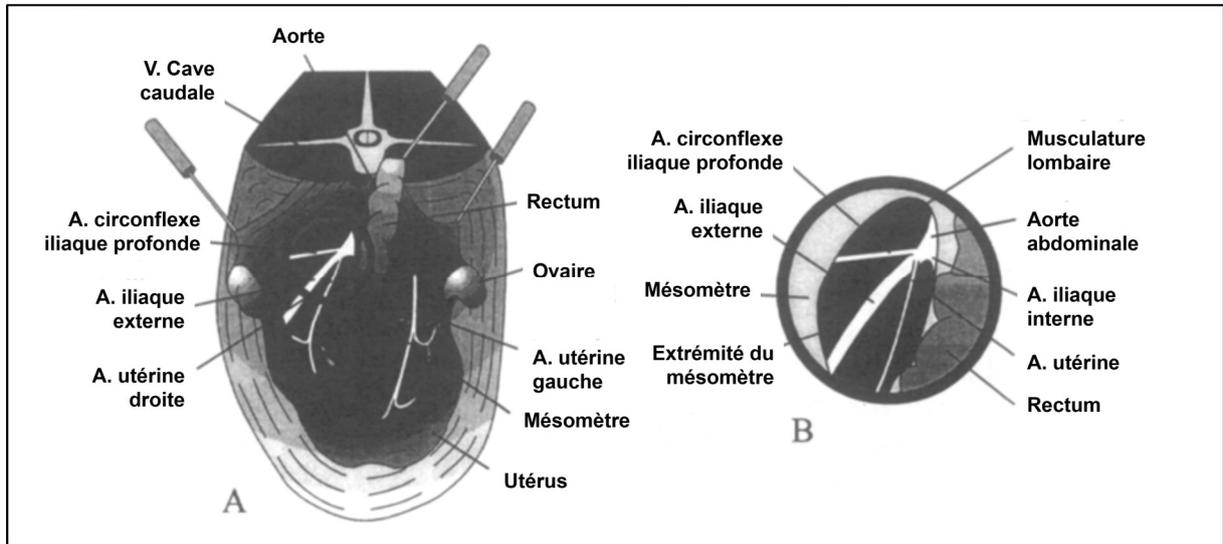


Figure 20 - Topographie artérielle de la région pelvienne de la jument (d'après Bollwein et al. 1998).

*A : vue crâniale de la région pelvienne de la jument – B : zoom sur la partie entourée du schéma A
« A. » : artère, « V. » : veine*

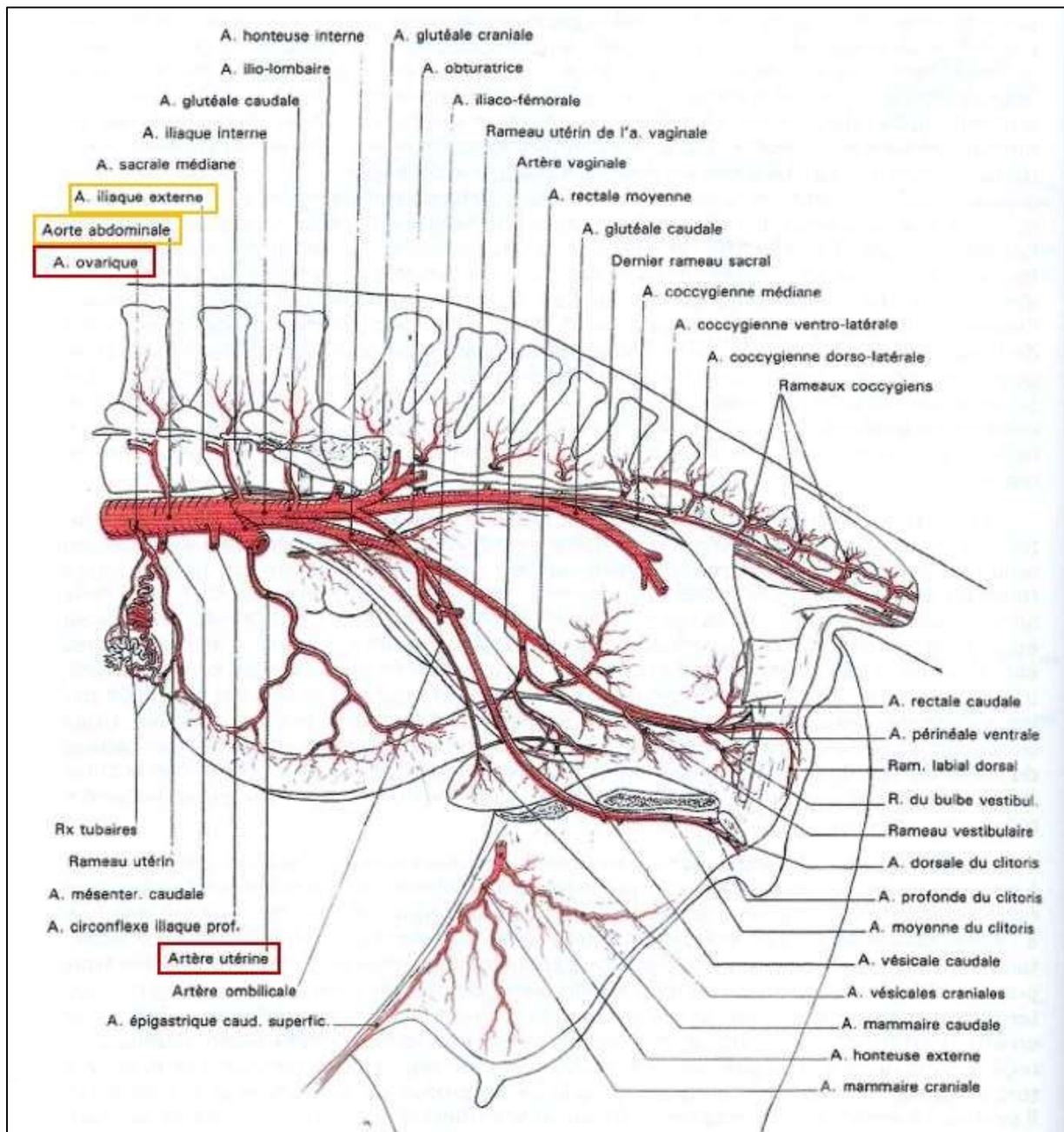


Figure 21 - Schéma des artères du bassin chez la jument (d'après Barone 2021).

À noter le départ de l'artère utérine depuis l'artère iliaque externe et le départ de l'artère ovarique depuis l'aorte abdominale.

Concernant la recherche de la bifurcation des deux artères ovariennes, elle naît légèrement plus en amont, directement depuis l'aorte en abdominale (Cf. Figure 21).

Enfin, il est également utile d'étudier les micro-vascularisations, comme la vascularisation folliculaire ou lutéale, notamment la partie thécale des follicules ovariens ou des corps jaunes, ou encore la micro-vascularisation de l'endomètre évoquée précédemment.

En conclusion de cette première partie, il est nécessaire d'avoir des connaissances sur les principes physiques de l'échographie et notamment de l'échographie Doppler dans le suivi du cycle chez la jument ainsi que dans le suivi de la gestation.

La description anatomique précise de la vascularisation des organes génitaux chez la jument permet un suivi adéquat par échographie Doppler de la jument dans le domaine de la reproduction, notamment avant la gestation comme il sera abordé dans la deuxième partie, et pendant la gestation comme décrit dans la troisième partie.

PARTIE 2

INTERETS DE L'ECHOGRAPHIE DOPPLER DANS LA MISE A LA REPRODUCTION D'UNE JUMENT

I. Suivi du cycle en situation physiologique

1. Images échographiques classiques

En période d'anœstrus saisonnier, l'ovaire est de petite taille et contient de petits follicules. Aucun corps jaune n'est détectable à l'échographie (Ginther 1995b; Blanchard et al. 2005).

Passée cette période, il est possible de prédire par échographie transrectale, avec plus ou moins de précision, dans quelle phase du cycle se trouve la jument. Ceci passe par l'analyse conjointe des images échographiques de l'utérus et des deux ovaires (Ginther 1995b; Blanchard et al. 2005).

En phase de diœstrus, l'utérus est caractérisé par une échogénicité homogène et ne présente pas d'œdème de l'endomètre. Au niveau des ovaires, un corps jaune est présent sur un ou les deux ovaire(s) et des follicules de taille variable sont visibles (*Cf. Figure 22*).

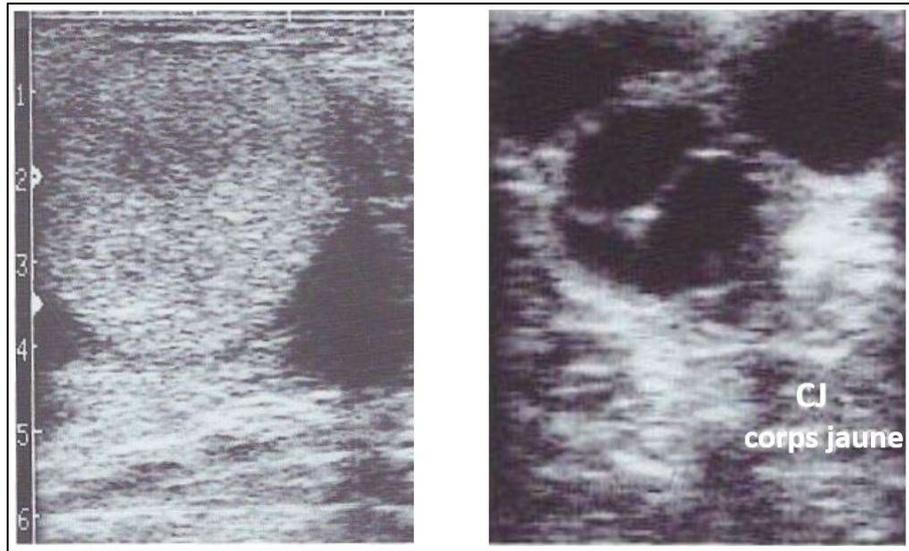


Figure 22 - Exemple d'images échographiques d'utérus et d'ovaire chez une jument en dioestrus (d'après Blanchard et al. 2005).

A gauche : image d'une coupe transversale de corne utérine d'échogénicité homogène et sans œdème de l'endomètre visible.

A droite : image issue de l'échographie d'un des deux ovaires, présentant de petits follicules (structures circulaires anéchogènes) et un corps jaune en dégénérescence, chez une jument en fin de dioestrus.

En phase d'œstrus, les follicules entrent dans une période de croissance (Cf. *Figure 23*).

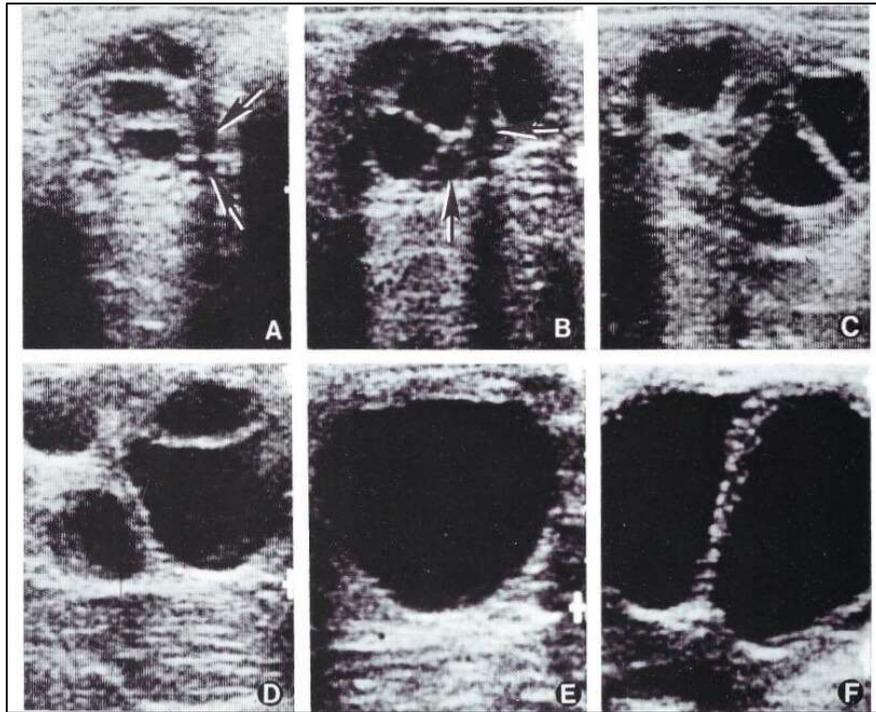


Figure 23 - Différentes phases de follicules en croissance, de morphologies et de diamètres différents, visualisés par échographie bidimensionnelle chez la jument (Ginther 1995b).

A : quatre follicules de 3 à 10 mm de diamètre en début de diœstrus.

B : quatre follicules dont deux de 10 à 15 mm de diamètre et deux de 3 à 4 mm de diamètre, en fin de diœstrus.

C : trois follicules de 15 à 20 mm de diamètre, deux de 4 à 6 mm de diamètre et plusieurs autres petits, en début d'œstrus.

D : un follicule dominant de 30 mm de diamètre et trois follicules de 15 à 18 mm de diamètre, en début d'œstrus.

E : follicule pré-ovulatoire de 40 mm de diamètre juste avant ovulation.

F : deux follicules pré-ovulatoires d'environ 35 mm de diamètre juste avant ovulation.

Après la phase de croissance folliculaire, à l'approche de l'ovulation, le follicule dominant présente un diamètre variant entre 40 mm et 50 mm. À noter que l'ovulation est possible pour un diamètre inférieur, et ceci est d'autant plus fréquent lors d'une double ovulation sur un même ovaire (Ginther 1995b; Blanchard et al. 2005). De plus, d'autres signes de l'imminence de l'ovulation en échographie bidimensionnelle sont, dans les 24 heures précédant l'ovulation, l'épaississement de la paroi du follicule qui prend un aspect festonné, et la déformation du follicule qui devient légèrement piriforme, avec son sommet à proximité de la fosse ovulatoire (Cf. Figure 24).

De plus, sous imprégnation œstrogénique, l'utérus présente un œdème endométrial de plus en plus important, visualisable par échographie bidimensionnelle par un aspect en « quartiers d'orange » (Cf. Figure 24).

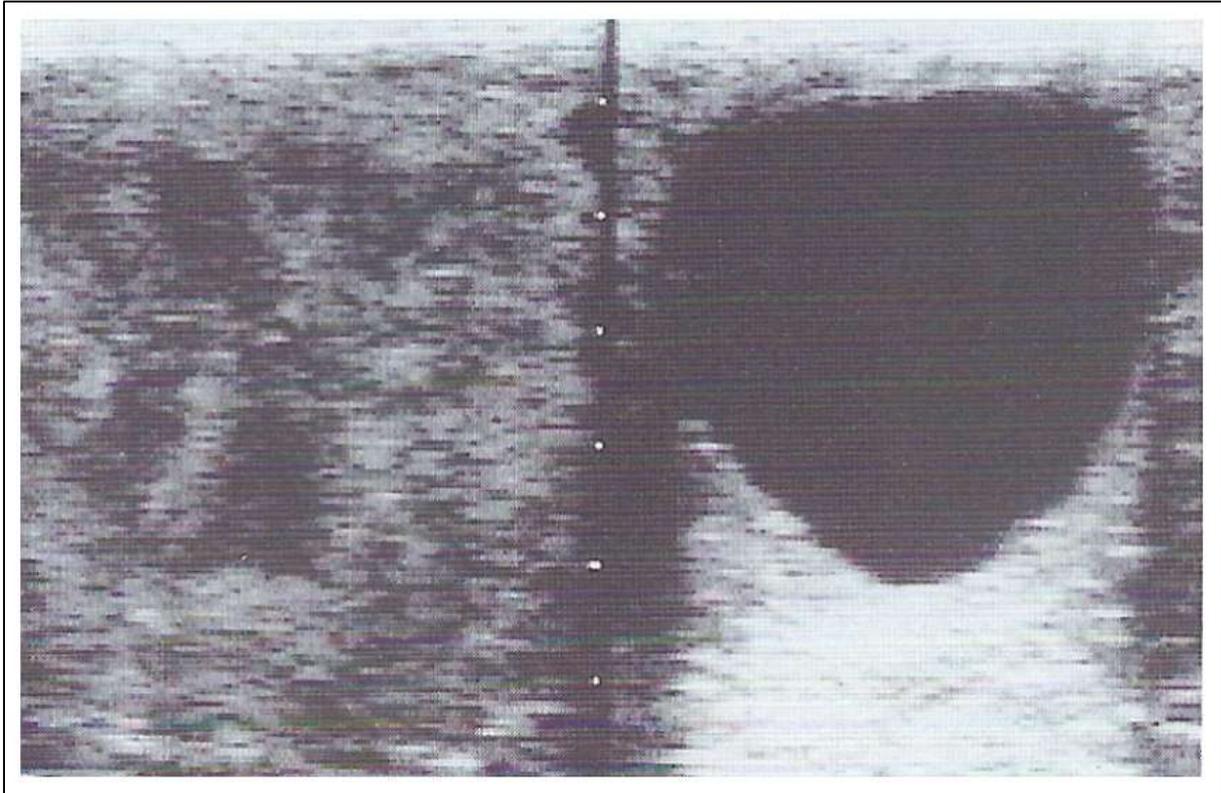


Figure 24 - Exemple d'images échographiques d'utérus et d'ovaire chez une jument en œstrus (d'après Blanchard et al. 2005).

*A gauche : image d'une coupe transversale de corne utérine avec un fort œdème de l'endomètre.
A droite : image d'un follicule pré-ovulatoire de 45 mm de diamètre avec une paroi festonnée et un aspect piriforme.*

Ainsi, lors de l'examen par échographie bidimensionnelle, il est possible de suivre le cycle œstral et de prédire l'imminence de l'ovulation chez la jument dans les 24 heures qui la précèdent.

Dans la partie suivante, nous discuterons de l'échographie Doppler en termes d'efficacité et de précision dans le suivi du cycle œstral chez la jument, et notamment dans la prédiction du moment de l'ovulation.

2. Plus-value de l'échographie Doppler

a. Par analyse du flux artériel utérin

L'analyse Doppler **du flux artériel au niveau de l'artère utérine** peut aider à mieux comprendre les variations de flux sanguin lors du cycle œstral, comme le suggère une étude de 1998 par H. Bollwein (Bollwein et al. 1998). Cette étude, réalisée sur 6 juments cyclées, a étudié le flux sanguin au niveau de l'artère utérine pendant 4 cycles œstraux en se basant sur l'indice de résistance (IR) par échographie Doppler couleur. Aucune différence significative n'a été notée entre l'indice de résistance à droite et à gauche. La moyenne du flux des deux artères a alors été étudiée. Une corrélation entre le flux utérin et le jour au sein du cycle œstral a été relevée. **En effet, l'IR est plus élevé (indiquant une perfusion moindre) au moment de l'ovulation et à 10 jours post-ovulation qu'à 5, 15 et 20 jours post-ovulation (Cf. Figure 25).** Néanmoins, cette étude devrait être répétée sur un plus grand nombre de juments.

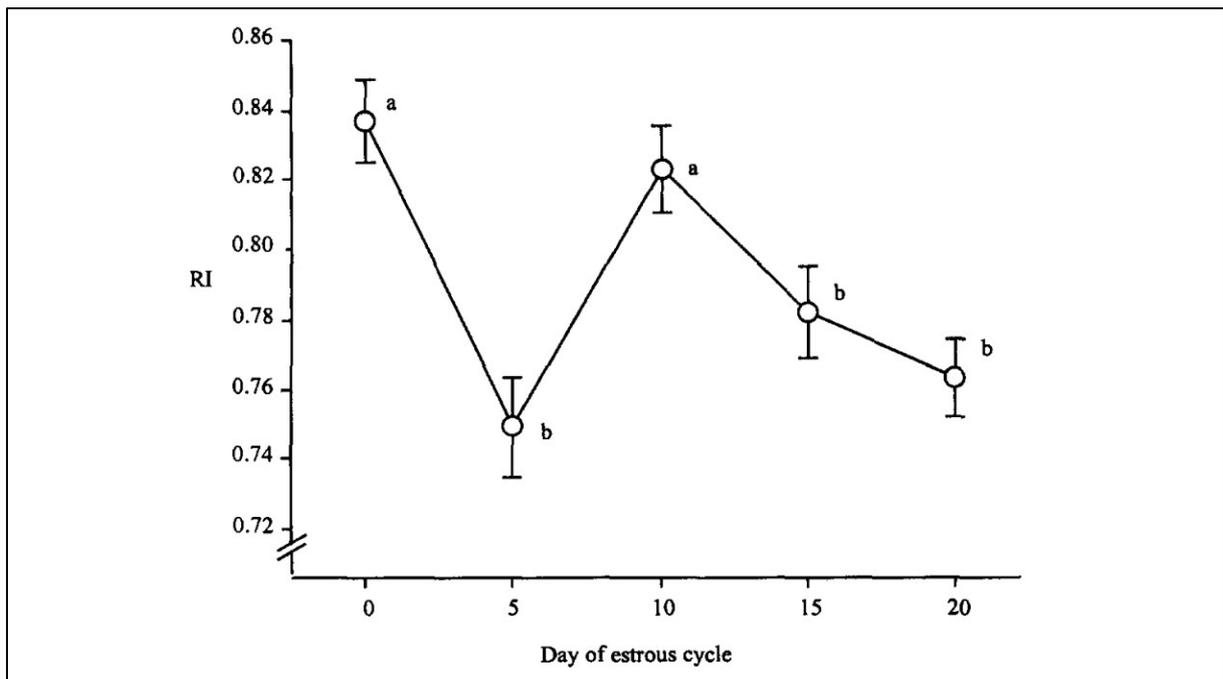


Figure 25 - Indice de résistance (RI) de l'artère utérine sur six juments en fonction du jour du cycle (Bollwein et al. 1998)

Sont exprimées ici les moyennes +/- erreur type des RI sur les six juments et sur quatre cycles œstraux, avec jour 0 correspondant au jour de l'ovulation. Les valeurs dont les indices (a ou b) sont différents sont significativement différentes ($p < 0.05$). « Day of estrous cycle » : jour du cycle œstral.

Une autre étude s'est concentrée sur l'analyse des flux utérin et ovarien pendant le cycle œstral (Bollwein et al. 2002). Cette étude, réalisée sur 4 juments au cours de 2 cycles œstraux consécutifs et échographiées avec la méthode Doppler couleur par voie transrectale, s'est intéressée aux flux utérins et ovariens pendant le cycle œstral et leurs potentiels liens avec les hormones stéroïdiennes (notamment œstrogènes et progestérone). L'indice de pulsatilité (IP) a été utilisé pour objectiver le flux sanguin. Après avoir écarté un biais par biopsie utérine et par des résultats cytologiques et bactériologiques négatifs, cette étude a décrit ces différents résultats :

- Les valeurs de l'IP ne sont pas significativement différentes entre l'artère utérine ipsilatérale et celle controlatérale, comme déjà montré préalablement (Bollwein et al. 1998).
- Néanmoins, les valeurs d'IP varient de manière significative pendant le cycle œstral sous forme de « vague » : les valeurs d'IP au niveau des artères utérines sont les plus élevées le jour de l'ovulation et au 11^{ème} jour post-ovulation, et les plus basses au 5^{ème} jour post-ovulation et à 2 jours avant l'ovulation, **ce qui concorde avec les résultats préalablement évoqués** (Bollwein et al. 1998).

Ces observations ont été confirmées par une étude plus récente étudiant par échographie Doppler puissance la vascularisation utérine chez des juments atteintes d'endométrite et chez des juments saines (Da Silva-Álvarez et al. 2022). Chez les juments saines, la **vascularisation utérine, objectivée par la puissance du flux utérin ou BFA (« blood flow area ») est significativement plus haute pendant l'œstrus que pendant le diœstrus** (Cf. Figure 26).

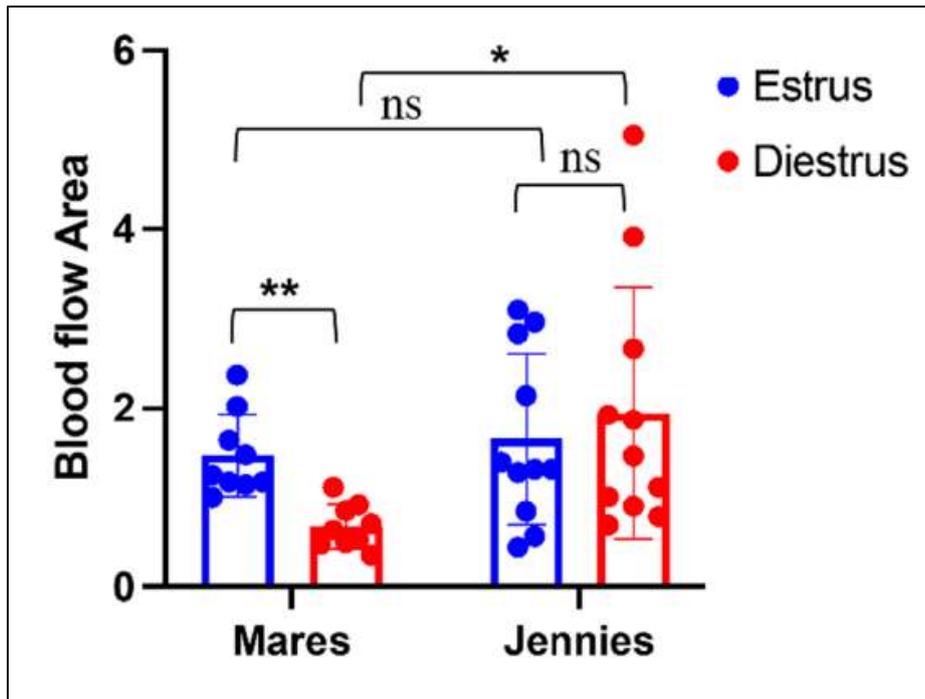


Figure 26 - Graphique montrant les résultats d'une étude mesurant la moyenne des valeurs du flux utérin pendant l'œstrus et le diœstrus par Doppler puissance chez les juments et les ânesses non atteintes d'endométrites (Da Silva-Álvarez et al. 2022).

« ns » = non significatif pour la comparaison des valeurs entre juments et ânesses et pour celles entre l'œstrus et le diœstrus chez les ânesses.

« Estrus » = œstrus, « diestrus » = diœstrus, « blood flow area » = BFA ou flux utérin, « mares » = jument, « jennies » = ânesses

Ainsi, l'étude Doppler de l'évolution du flux utérin pendant le cycle œstral peut être une aide partielle pour s'approcher de l'ovulation.

b. Par analyse du flux au niveau de l'artère ovarienne

Dans l'étude de H. Bollwein précédemment évoquée, l'évolution du flux au niveau de l'artère ovarienne au cours du cycle œstral est également observée (Bollwein et al. 2002).

Contrairement aux artères utérines, les **artères ovariennes** pendant le diœstrus (jours 0 à 15 post-ovulation) **présentent un flux significativement plus fort** (IP significativement plus faible) **sur le côté ipsilatéral que controlatéral au corps jaune**. Aucune différence significative n'est cependant objectivée pendant l'œstrus (jours -6 à -1, soit 6^{ème} à 1^{er} jour avant ovulation), avec tout de même **une augmentation significative du flux ovarien bilatéral pendant l'œstrus** (Cf. Figure 27).

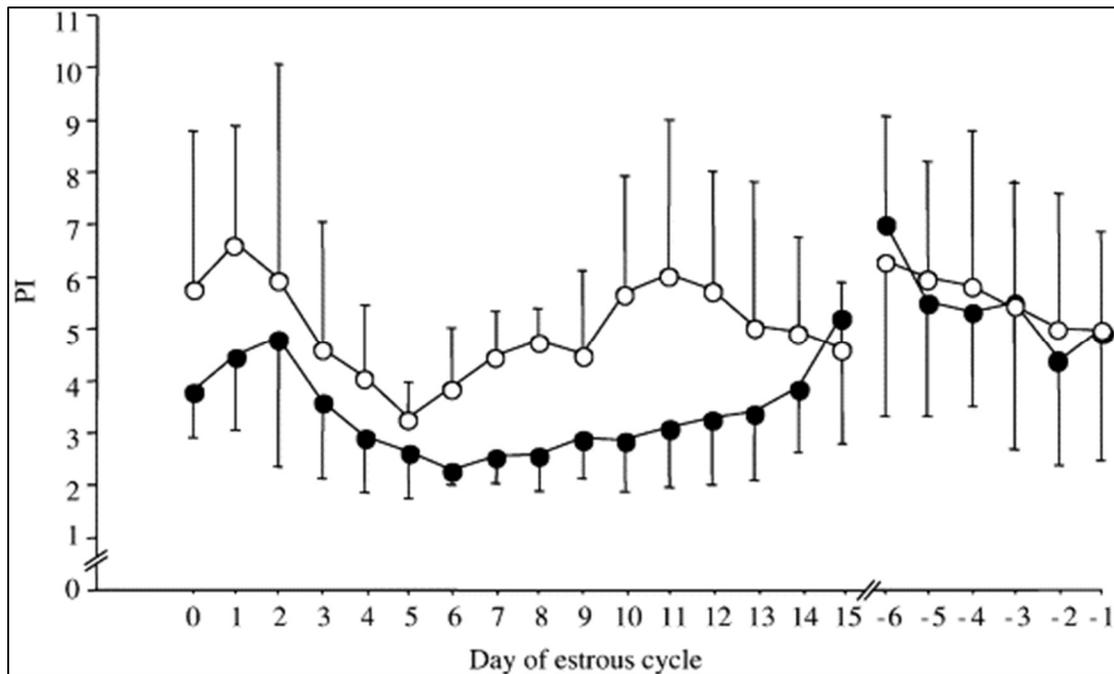


Figure 27 - Valeurs de l'indice de pulsativité des artères ovariennes dominantes et non dominantes (Bollwein et al. 2002).

Les valeurs sont des moyennes \pm écart-type de quatre juments au cours de deux cycles œstraux.

Artères ovariennes dominantes = (●)

Artères ovariennes non dominantes = (○)

« PI » = indice de pulsativité, « Days of estrous cycle » = jours du cycle œstral

Concernant la relation entre la taille du corps jaune et le flux ovarien ipsilatéral pendant le diœstrus, aucune corrélation n'a été mise en évidence. Néanmoins, pendant l'œstrus, une **corrélation négative entre la taille du follicule ovulatoire et l'IP au niveau de l'artère ovarienne ipsilatérale a été objectivée** (Cf. Figure 28).

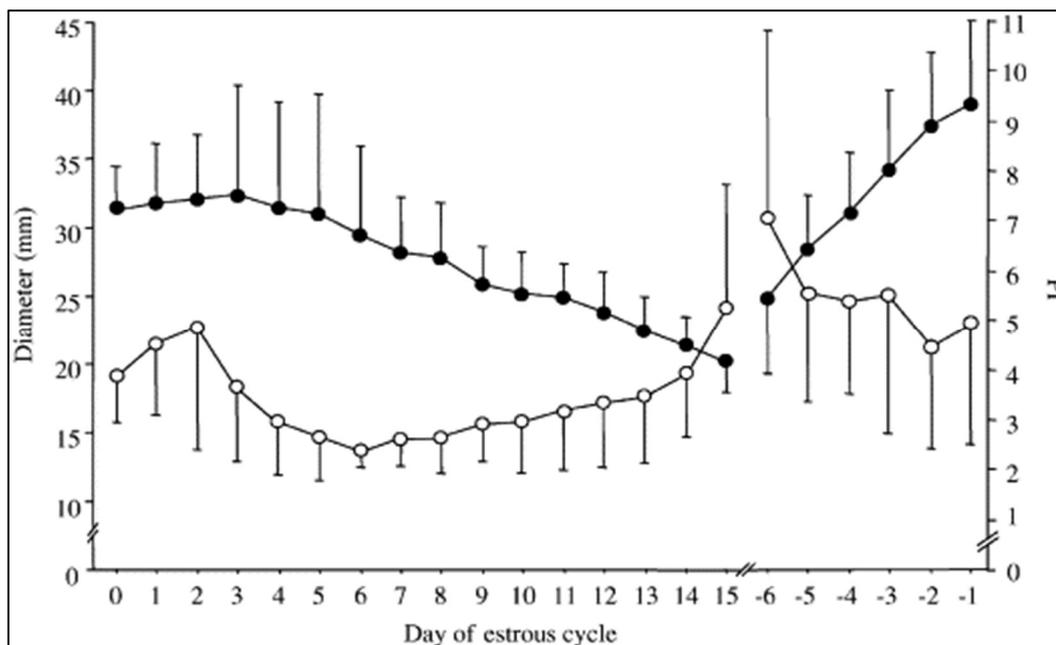


Figure 28 - Valeurs de l'indice de pulsativité ovarienne et diamètres du corps jaune entre les jours 0 et 15 et du follicule ovulatoire entre les jours -6 et -1. (Bollwein et al. 2002)

Les valeurs sont des moyennes \pm SD de quatre juments tout au long de deux cycles œstraux.

Indice de pulsativité = (○)

Diamètre du corps jaune entre les jours 0 et 15 et du follicule ovulatoire entre les jours -6 et -1= (●)

« Diameter » = diamètre, « Days of estrous cycle » = jours du cycle œstral

Enfin, à propos du lien entre flux utérin et ovarien et des hormones stéroïdiennes comme l'œstrogène et la progestérone, il existe, pendant le dioestrus, une corrélation négative entre les taux plasmatiques de progestérone et les valeurs d'IP au niveau de l'artère ovarienne ipsilatérale. Pendant l'œstrus, on retrouve cette corrélation négative, cette fois-ci entre l'œstrogène et les valeurs d'IP au niveau de l'artère ovarienne ipsilatérale ainsi qu'aux valeurs d'IP pour les artères utérines.

c. Par analyse du flux artériolaire au niveau de la thèque folliculaire

Concernant la **micro-vascularisation folliculaire**, il a été montré que les follicules dominants possèdent une surface vasculaire au niveau thécale plus importante que pour les follicules non ovulatoires, et cela avant même la différenciation entre ces deux types de follicules en termes de taille (Acosta et al. 2004).

Une fois que le follicule dominant est identifié, il semble intéressant de suivre **l'évolution du flux thécal** dans le but d'estimer plus précisément le moment de

l'ovulation (Gastal et al. 2006). Gastal et al. (2006) ont réalisé une étude en double aveugle sur deux groupes de 16 juments, un groupe recevant une injection d'hCG (human Chorionic Gonadotrophin) et un groupe témoin avec injection de sérum physiologique dès que le diamètre du follicule dominant échographié était supérieur ou égal à 35 mm.

Une échographie des ovaires et de l'endomètre a ensuite été réalisée toutes les 12 heures jusqu'à 36 heures post-injection, puis toutes les heures entre 36 heures et 48 heures (moment où l'ovulation induite par l'injection de la hCG est la plus probable), et enfin toutes les 12 heures après l'ovulation. Le diamètre du follicule, la circonférence de la paroi folliculaire, l'échogénicité et l'épaisseur de la granulosa, l'épaisseur de la bande anéchogène retrouvée entre les deux thèques et enfin **l'intensité du flux artériolaire de la paroi folliculaire** ont été étudiés. L'œstradiol a également été dosé toutes les 12 heures.

Cette étude avait pour but d'étudier par la méthode d'échographie Doppler couleur l'échostructure et l'évolution du flux artériolaire sur le follicule à l'approche de l'ovulation, d'évaluer le possible lien avec l'évolution du taux d'œstradiol durant cette période et enfin de comparer les observations rapportées entre une ovulation naturelle et une ovulation induite par l'induction d'hCG.

Il en est ressorti que l'épaisseur et l'échogénicité de la granulosa ont augmenté à l'approche de l'ovulation sur les deux groupes (Cf. Figure 29). Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la sécrétion de muco-substances avant l'ovulation, ce qui résulte en une augmentation de l'épaisseur de la granulosa, ainsi que par un espacement plus important des cellules de la granulosa entraînant une augmentation des surfaces de réflexion, et par conséquent une augmentation de l'échogénicité.

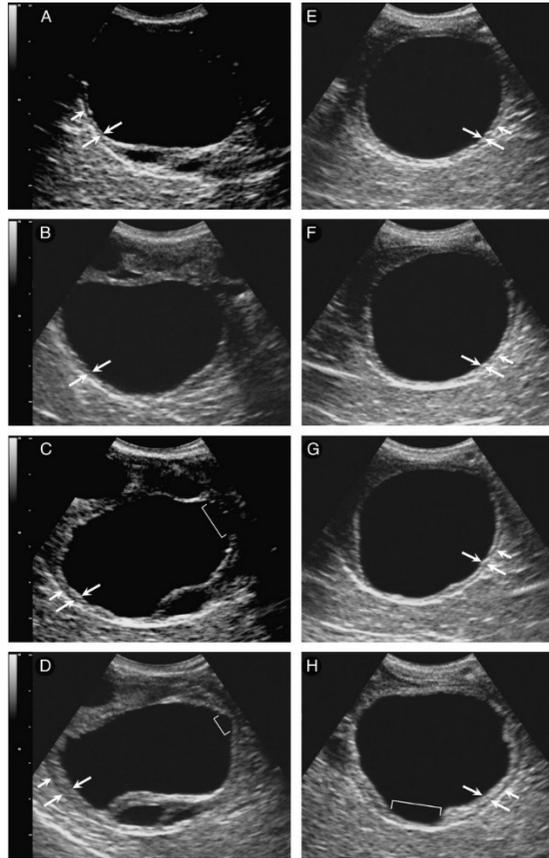


Figure 29 - Échographies séquentielles en mode B des follicules pré-ovulatoires de deux juments montrant un épaississement de la granulosa et l'apparition d'une bande hypoéchogène dans la paroi folliculaire au fil du temps (Gastal et al. 2006).

Dans les échographies de la colonne de gauche, les follicules d'une jument témoin sont représentés aux heures 0 (A), 12 (B), 36 (C) et 40 (D) après que le plus gros follicule a atteint un diamètre ≥ 35 mm. L'ovulation a été détectée à l'heure 41.

Dans la colonne de droite, les follicules d'une jument traitée à l'hCG sont affichés aux heures 0 (E), 12 (F), 24 (G) et 37 (H) après le traitement à l'heure 0. L'ovulation a été détectée à l'heure 39.

Au fur et à mesure que l'ovulation approchait (de haut en bas) pour chaque jument, la granulosa (grandes flèches opposées) devenait plus épaisse. Des segments de la paroi folliculaire avec une bande hypoéchogène (flèches courtes simples) sont représentés pour les deux juments. L'épaisseur de la granulosa a diminué dans la zone apicale (crochets) par rapport à la granulosa opposée plus épaisse.

De plus, **l'intensité du flux artériolaire a augmenté avant l'ovulation sur les deux groupes** jusqu'à 4 heures avant l'ovulation (Cf. Figure 30, Figure 32).

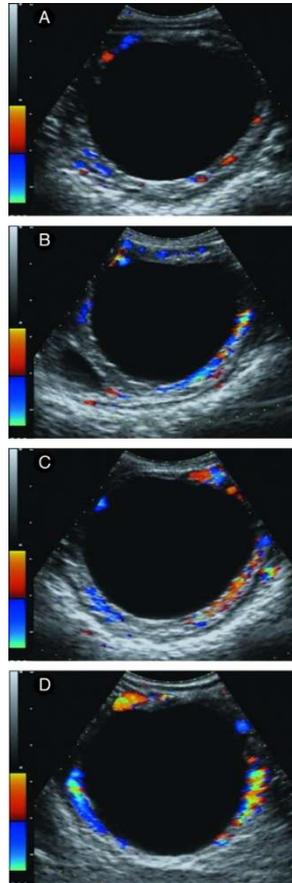


Figure 30 - Échographies séquentielles en Doppler couleur des follicules pré-ovulatoires d'une jument témoin illustrant l'augmentation du flux artériolaire thécal à l'approche de l'ovulation (Gastal et al. 2006).

Images à 36h (A), 38h (B), 44h (C) et 60 h (D) après que le plus gros follicule a atteint un diamètre \geq 35 mm. L'ovulation a été détectée à l'heure 84. Les signaux Doppler couleur (quantité de points de couleur et intensité) ont augmenté à mesure que le follicule mûrissait (de haut en bas). La plupart des signaux Doppler couleur sont situés à l'intérieur ou s'étendent au-delà de la largeur de la bande anéchoïque de la paroi folliculaire. La distance entre les graduations (à gauche) est de 1 cm.

Enfin, le plus novateur dans cette étude, est l'observation d'une diminution des signaux Doppler ainsi que de la prééminence de la bande hypoéchogène à partir de 4 heures avant ovulation (Cf. Figure 31 et Figure 32).

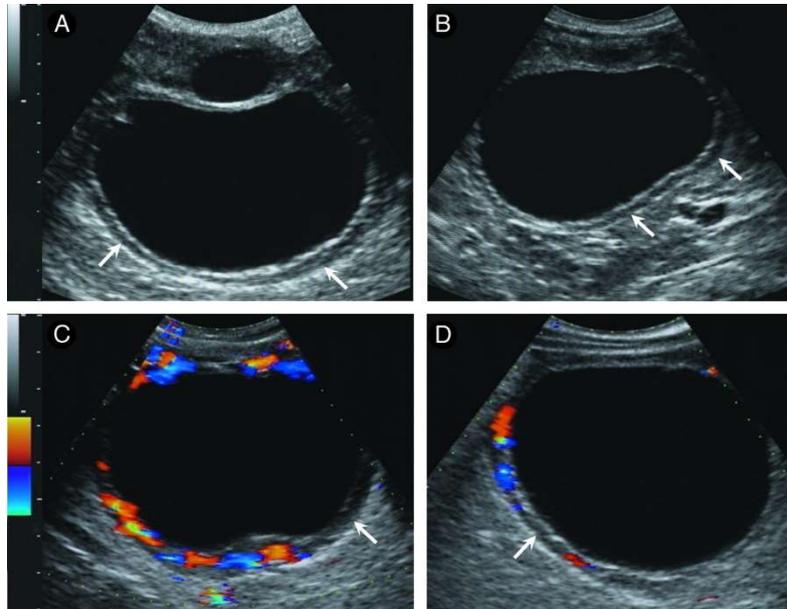


Figure 31 - Échographies sélectionnées en mode B (A et B) et Doppler couleur (C et D) des follicules pré-ovulatoires de quatre juments témoins illustrant la diminution des signaux Doppler dans les 4 heures précédant l'ovulation (Gastal et al. 2006)

(A et B) Échographies 2 jours après que le plus gros follicule a atteint un diamètre ≥ 35 mm (durée du traitement) et 1 jour avant l'ovulation. (C) Échographie 4 jours après que le plus gros follicule a atteint ≥ 35 mm et 2 jours avant l'ovulation. (D) Échographie à 4 jours après que le plus gros follicule a atteint ≥ 35 mm et 3 h avant l'ovulation. Les images des panneaux A et D ont été agrandies pour améliorer la visibilité de la bande anéchoïque. Notez la bande anéchoïque (flèches) et les signaux Doppler couleur situés dans ou s'étendant au-delà de la largeur de la bande anéchoïque. La distance entre les graduations (à gauche) est de 1 cm. Les signaux Doppler diminuent dans les 4 heures précédant l'ovulation (D). Les signaux sont plus importants au niveau de la base qu'au niveau de l'apex du follicule (D).

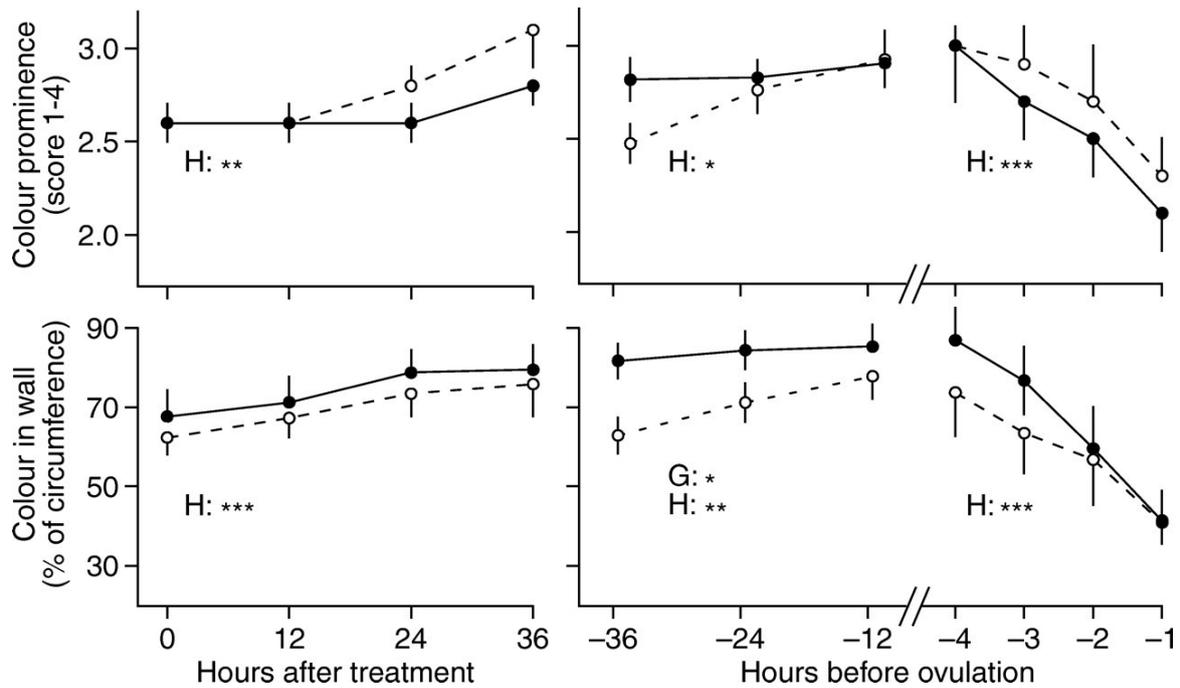


Figure 32 - Moyenne \pm erreur type des paramètres quantifiant les signaux Doppler couleur de la paroi du follicule pré-ovulatoire dans les groupes témoin et traité par hCG pendant la période post-traitement (heures 0–36 ; n = 8–14), la période pré-ovulatoire (heures -36 à -12 ; n = 8–14) et la période d'ovulation imminente (heures -4 à -1 ; n = 4–8) (Gastal et al. 2006).

Les astérisques indiquent les effets principaux significatifs de l'heure (H) ou du groupe (G) comme suit : * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$. Il n'y a pas eu d'interactions avec la GH.

Groupe témoin = (●)

Groupe traité par hCG = (○)

Le score de « colour prominence » retranscrit l'intensité et l'épaisseur du signal Doppler couleur visible autour du follicule, sur une échelle de 1 à 4.

Le « colour in wall » est un paramètre quantifiant les signaux Doppler couleur de la paroi folliculaire, exprimés par un pourcentage de la circonférence (« % of circumference ») en trois dimensions de la paroi folliculaire.

« Hours after treatment » = heures après traitement ; « Hours before ovulation » = heures avant ovulation.

Ainsi, par un suivi échographique précis par la méthode Doppler couleur, **cet article évoque la possibilité de prédire le moment de l'ovulation à moins de quatre heures de l'évènement** (Gastal et al. 2006). Il est toutefois à noter que l'effectif utilisé dans cette étude est faible (n = 16).

Les signaux Doppler semblent également plus importants au niveau de la base du follicule qu'au niveau de l'apex à l'approche de l'ovulation : une diminution du flux artériolaire est observée en zone apicale à l'approche de l'ovulation (Cf. Figure 31). Une étude expérimentale sur 26 juments complète ces premières données (Ginther et al. 2007) : une **heure avant l'ovulation, une dentelure de la granulosa, ainsi**

qu'une vascularisation thécale, sont visibles au niveau de la base du follicule et non visibles au niveau de l'apex du follicule (Cf. Figure 33 et Figure 34). À noter que l'apex du follicule est détectable chez les 26 juments au moins une heure avant ovulation par un diamètre rétréci. Ces observations faites par échographie Doppler peuvent ainsi permettre d'affiner la prédiction du moment de l'ovulation.

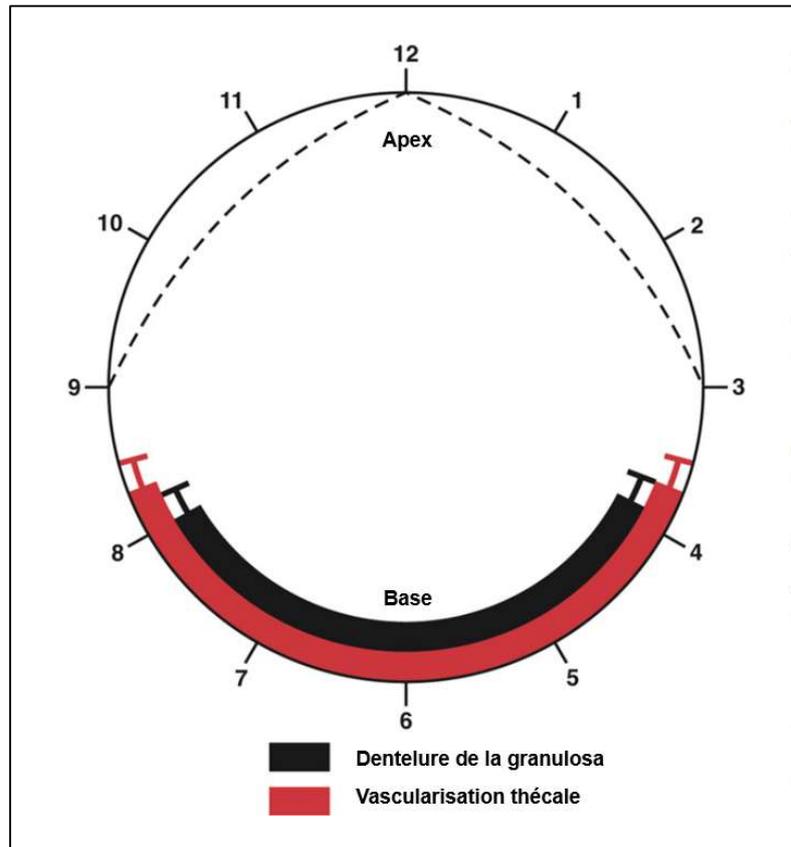


Figure 33 - Représentation schématique des observations échographiques visibles une heure avant ovulation sur la paroi d'un follicule à durée d'ovulation normale (d'après Ginther et al. 2007).

Néanmoins, il existe des ovulations retardées (ovulation durant plus de 3h) dans lesquelles une persistance de la vascularisation apicale a alors été notée ((Ginther et al. 2007), (Cf. Figure 34)).

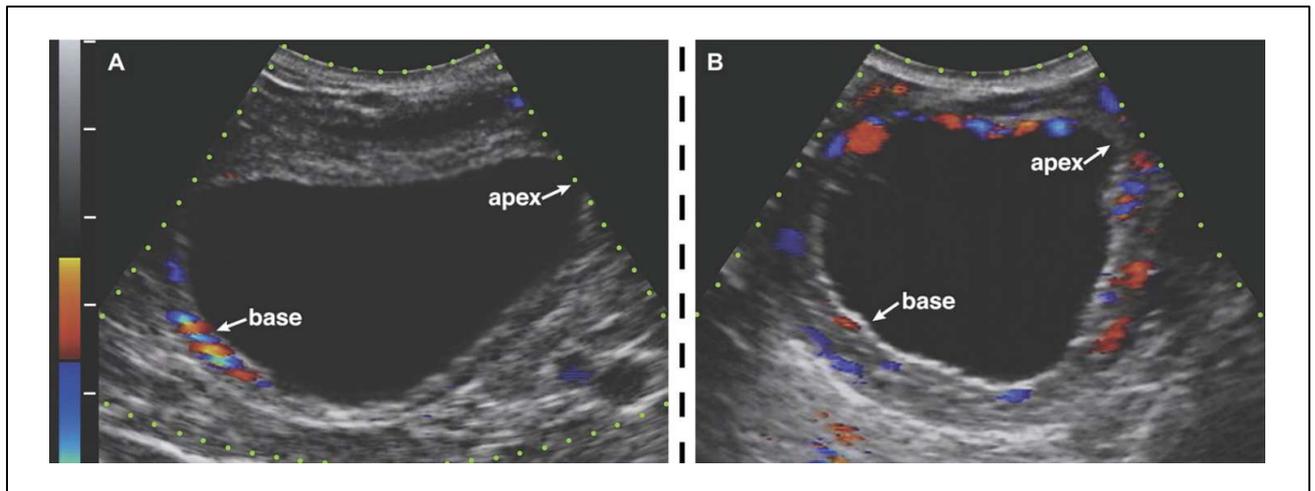


Figure 34 - Images par échographie Doppler de follicules pré-ovulatoires (Ginther et al. 2007).

L'image A est prise une heure avant ovulation (ovulation normale) et montre des signaux Doppler uniquement à la base du follicule

L'image est issue d'un follicule à ovulation retardée (> 3 heures) et comporte à la fois des signaux Doppler à la base et à l'apex du follicule.

Ainsi, l'échographie Doppler semble permettre de prédire le moment de l'ovulation avec une précision à 1 heure près, ce qui peut être très utile, notamment dans le cadre de programmes d'insémination artificielle en semence congelée.

Enfin, l'étude par échographie Doppler de la vascularisation folliculaire autour du moment de l'ovulation a aussi pour **but d'éviter une gestation gémellaire en détectant des possibles doubles ovulations et de distinguer un follicule ovulatoire d'un follicule hémorragique non ovulatoire** (Ortega-Ferrusola et al. 2022).

d. Par analyse du flux artériolaire au niveau de la thèque lutéale

Au niveau du corps jaune, l'échographie Doppler semble utile notamment pour la technique de transfert embryonnaire. En effet, une étude de Ferreira et al. (2020), propose la mesure du flux sanguin au niveau de l'artère utérine comme moyen indirect d'évaluer la fonctionnalité du corps jaune sur la jument potentielle receveuse de l'embryon (Ferreira et al. 2020). Le flux au niveau des artères utérines a été mesuré par Doppler spectral, ce qui permet d'analyser des artères tortueuses du fait de l'indépendance du Doppler spectral à l'angle d'incidence (Cf. Figure 35).

La micro-vascularisation lutéale a été mesurée par Doppler puissance, méthode plus sensible qui permet de détecter de faibles vitesses de flux.

En ressort de cette étude qu'un **indice de résistance autour de 1 au niveau de l'artère utérine est corrélé à un corps jaune bien vascularisé et un taux de progestérone optimal pour recevoir une gestation.**

De plus, l'analyse de la micro-vascularisation au niveau du corps jaune après transfert embryonnaire **montre qu'un flux important au niveau du corps jaune de la jument receveuse est associé à un taux de progestérone haut pendant le transfert embryonnaire et pendant le début de gestation**, ce qui semble être propice au bon maintien de la gestation.

Enfin, il ressort de cet article que la mesure subjective de la vascularisation du corps jaune par Doppler puissance est corrélée positivement à la mesure objective, signant qu'un examen subjectif rapide de la vascularisation lutéale pourrait également présenter un intérêt dans la sélection d'une jument receveuse (Ferreira et al. 2020).

Ces observations par échographie Doppler peuvent ainsi permettre de choisir la jument receveuse la plus adaptée au transfert. D'autres études sur les réussites effectives du transfert embryonnaire seraient alors à mener afin de confirmer ces observations.

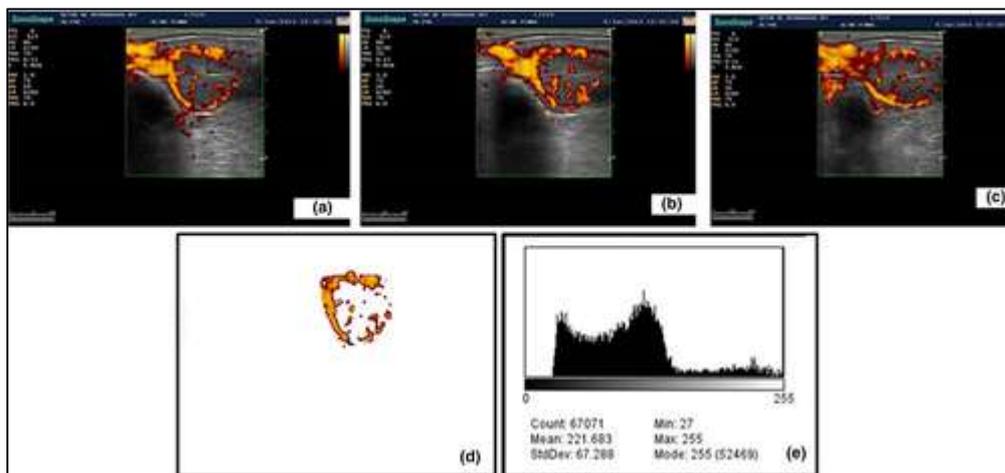


Figure 35 - Capture des images les plus représentatives du corps jaune par échographie Doppler à flux de puissance (Ferreira et al. 2020).

(a, b, c) sont des images figées d'une vidéo représentant les plus grandes zones lutéales contenant les plus grandes quantités de signaux colorés ; (d) image modifiée par LE PROGRAMME ADOBE PHOTOSHOP CS2® pour supprimer les signes de couleur indésirables ; (e) image d'histogramme modifiée par PHOTOSHOP pour calculer la quantité de pixels dans l'image.

Enfin, à l'heure actuelle, il est nécessaire de réaliser une palpation transrectale et une échographie bidimensionnelle sur les juments receveuses pour vérifier l'absence d'anomalies utérines ou ovariennes et pour déterminer à quelle étape du cycle œstral elles se situent. L'ovulation de la jument receveuse doit avoir lieu entre un jour avant et maximum 4 jours après l'ovulation de la jument donneuse (Brogan et al. 2016).

Idéalement, le taux plasmatique avant réception d'un embryon devrait être dosé et être supérieur à 2 ng/mL pour accueillir une gestation dans les meilleures conditions, mais, en pratique, cela n'est pas réalisé du fait du coût élevé de cette démarche.

Ainsi, le flux sanguin lutéal par l'échographie Doppler couleur comme moyen indirect et instantané d'évaluer la fonctionnalité du corps jaune a été étudié (Brogan et al. 2016).

Il ressort de cette étude une **corrélation positive entre l'évolution après transfert embryonnaire du taux de progestérone chez les receveuses et l'évolution de la taille du corps jaune mesuré par échographie en mode B tout comme l'évolution du flux lutéal mesuré par Doppler couleur (Cf. Figure 36)**. De plus, il a été démontré une corrélation positive entre l'évolution de ce flux et l'évolution de la taille du corps jaune.

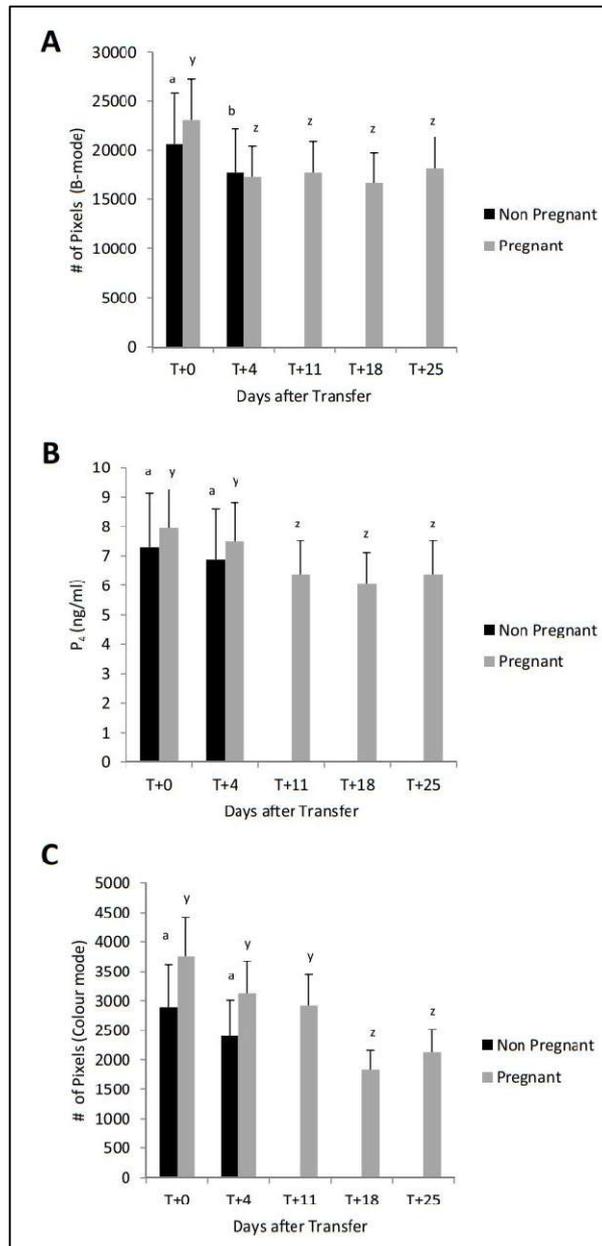


Figure 36 - Section transversale du corps jaune (A, nombre de pixels en échelle de gris), concentration de progestérone (B, ng/ml) et vascularisation (C, nombre de pixels de couleur) chez les juments receveuses à différents stades après le transfert d'embryons (Brogan et al. 2016).

Il n'y avait pas de différences significatives ($P > 0,05$) entre les juments qui sont devenues gestantes et celles qui ne l'ont pas été. Données présentées sous forme de valeurs moyennes \pm erreur standard de la moyenne.

« Days after Transfer » = jours après transfert embryonnaire, « Pregnant » = gestante, « Non Pregnant » = non gestante, « P_4 » = progestérone, « Pixels » = pixels, « B-mode » = mode B, « Colour mode » = mode couleur.

Cependant, dans cette étude, aucune preuve n'a montré que l'étude Doppler du corps jaune est un indicateur plus fiable que l'étude de la taille lutéale par

échographie bidimensionnelle : ce sont deux techniques possibles pour évaluer la fonction lutéale chez des receveuses dans le cadre d'un transfert embryonnaire.

À noter tout de même un intérêt de la méthode Doppler par rapport à l'échographie bidimensionnelle dans la **détection précoce de la lutéolyse chez une jument receveuse**, la vascularisation lutéale diminuant plus précocement que la taille lutéale en cas de lutéolyse (Ginther et al. 2007). De plus, il serait intéressant de poursuivre l'étude en analysant les résultats du transfert embryonnaire (maintien de l'embryon ou non).

Ainsi, l'étude de 2016 suggère que la taille du corps jaune, ainsi que le flux sanguin lutéal sont corrélés positivement avec le taux circulant de progestérone au moment du transfert embryonnaire et en début de gestation après transfert (Brogan et al. 2016). L'échographie Doppler par suivi de la vascularisation lutéale pourrait donc être utile pour optimiser un programme de transfert embryonnaire.

En conclusion, l'échographie Doppler montre de nombreux atouts pour le suivi du cycle chez la jument et surtout pour la prédiction précoce de l'ovulation, par l'analyse des flux artériels utérin et ovarien mais aussi des flux artériolaires au niveau de la paroi folliculaire ou lutéale. Cette technique s'avère également utile dans le cadre d'un transfert embryonnaire.

Cependant, nous nous sommes concentrés ici uniquement sur le cycle œstral dans son déroulement physiologique. Ainsi, nous allons désormais aborder la potentielle utilité de l'échographie Doppler dans la détection de pathologies durant le cycle œstral chez la jument.

II. Suivi Doppler pour la détection des pathologies en reproduction de la jument non-gestante

L'échographie Doppler est également utile pour la **détection et le suivi des pathologies utérines**.

1. Endométrites

L'endométrite est une affection fréquente chez la jument qui peut avoir de grandes conséquences sur la réussite de la reproduction, avec des problèmes d'infertilité ou d'hypofertilité, des avortements ou encore un raccourcissement de la durée du cycle œstral.

Elle peut classiquement être détectée par une échographie en mode B, avec des signes d'accumulation de liquide intra-utérin ou d'œdème utérin, mais cela n'est pas toujours visible.

Une étude d'Abdelnaby et al., publiée en 2020, décrit une **vascularisation utérine accrue en cas d'endométrite** visible au Doppler pulsé et Doppler couleur (Abdelnaby et al. 2020). De plus, selon Lüttgenau et al. en 2021, ce flux est augmenté chez les juments sensibles à l'endométrite persistante induite par la mise à la reproduction (« persistent breeding-induced endometritis » ou PBIE) avant insémination (Lüttgenau et al. 2021). Ces juments présentent des vitesses de flux sanguin utérin plus élevées que chez les juments non sensibles jusqu'à un jour avant l'insémination, et un IP plus élevé deux jours après l'insémination. Cependant, ces deux études ont été réalisées par la technique de Doppler pulsé, ce qui nécessite une grande précision du manipulateur et un certain temps consacré à l'examen.

Ainsi, l'étude de Da Silva-Álvarez et al., publiée en 2022, suggère un intérêt du Doppler puissance et de l'analyse informatisée des images échographiques dans le diagnostic de l'endométrite chez les juments (Da Silva-Álvarez et al. 2022). Le Doppler pulsé permet, par ailleurs, une moindre exigence en termes de précision de manipulation. De plus, cette technique est plus sensible donc permet de détecter des flux de plus faible intensité, comme la micro-vascularisation endométriale. La BFA (« Blood Flow Area » = aire de circulation sanguine) a été comparée chez 7 juments atteintes d'endométrites (diagnostiquées par cytologie) aux 8 juments saines. Ainsi, il a été relevé une **augmentation significative de la puissance du flux utérin sur les juments atteintes d'endométrites par rapport aux juments témoins** (œstrus : 2,42

$\pm 0,46$ pour les juments atteintes contre $1,44 \pm 0,44$ pour les juments saines avec $p < 0,0001$; diœstrus : $2,29 \pm 0,69$ pour les juments atteintes contre $0,67 \pm 0,24$ pour les juments saines avec $p < 0,00001$) (Cf. Figure 37).

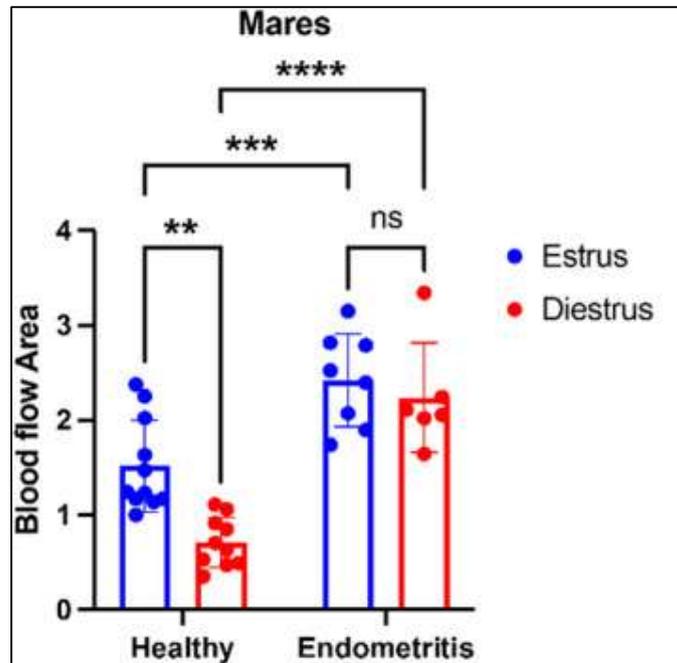


Figure 37 - Valeurs moyennes de l'aire de circulation sanguine dans chaque phase du cycle œstral mesurées par Doppler puissance chez les juments (saines et atteintes d'endométrite) (Da Silva-Álvarez et al. 2022).

« ns » = non significatif

« Blood Flow Area » = aire de circulation sanguine, « mares » = juments, « estrus » = œstrus, « diestrus » = dioœstrus, « healthy » = saines, « endometritis » = endométrite.

Ainsi, la BFA est un marqueur fiable pour détecter une endométrite sur la jument. Ces observations peuvent s'expliquer par l'état hyperhémique présent lors d'endométrite du fait de l'inflammation présente dans la muqueuse utérine. Ainsi, cet article souligne l'intérêt de d'utiliser ce marqueur Doppler dans la détection des endométrites chez la jument et notamment dans le diagnostic des endométrites subcliniques.

2. Kystes utérins et ovariens

L'échographie Doppler peut également aider pour le diagnostic et le suivi des pathologies kystiques de l'utérus selon une étude de Ferreira et al. datant de 2008. En effet, cette publication a **montré que la perfusion utérine chez les juments ayant des kystes utérins est significativement diminuée par rapport aux juments saines. Localement, il existe une perturbation de l'hémodynamique utérine avec un indice de pulsatilité diminuée autour du kyste.** Cette perturbation hémodynamique est d'autant plus importante que le kyste est de taille importante (Ferreira et al. 2008).

Les kystes endométriaux sont de deux types : glandulaires, souvent associés à de la fibrose péri-glandulaire utérine, ou lymphatiques. Leur prévalence augmente avec la parité et l'âge de la jument, avec une moyenne située entre 13 % et 22 % des juments dans une population mixte. Ils sont localisés à différents endroits de l'endomètre, principalement au niveau du corps utérin et de la jonction entre le corps utérin et les cornes utérines, et moins fréquemment dans les cornes utérines (Stanton et al. 2004). Cette localisation est, par ailleurs, la plus problématique car il s'agit de l'endroit où les vésicules embryonnaires se fixent.

En cas de proéminence dans la lumière utérine, les kystes peuvent gêner la migration embryonnaire et donc la reconnaissance maternelle de l'embryon, pouvant ainsi mener à un échec de gestation. De plus, ils constituent un facteur prédisposant aux avortements précoces car, en cas de fixation de l'embryon proche d'un kyste, la vascularisation autour de l'embryon est inhabituelle (PI diminué localement autour du kyste) et l'apport en nutriments est alors inadapté. Plus tardivement dans la gestation, les kystes endométriaux peuvent réduire la surface placentaire et mener à un défaut d'apport vasculaire du fœtus (Stanton et al. 2004).

Leur diagnostic peut être établi par échographie transrectale avec une cavité contenant un matériel hypoéchogène, suivie éventuellement par une hystéroscopie (Stanton et al. 2004).

Différentes options thérapeutiques peuvent être proposées en fonction du nombre, de la taille, de la localisation et des conséquences de ces kystes en termes de fertilité : l'électrocoagulation, l'ablation mécanique ou encore l'ablation par thérapie laser ou par photoablation (Stanton et al. 2004).

Cette pathologie est à mettre en lien avec d'autres pathologies en lien avec la sénilité, comme les endométrites. Par exemple, cette diminution de perfusion

endométriale n'est pas retrouvée dans l'article de Nieto-Olmedo et al. (2020), où les juments gestantes âgées présentent une augmentation significative du flux endométrial comparées aux juments gestantes jeunes (Nieto-Olmedo et al. 2020). Dans cette publication, ce phénomène semble potentiellement explicable par la prévalence d'endomérites subcliniques plus importante chez les juments âgées, surtout en cas de lavages utérins répétés dans la technique de transfert embryonnaire. Cependant, aucune analyse histologique n'a été réalisée dans cette étude pour confirmer la présence effective d'endomérite subclinique pouvant expliquer cette augmentation de flux endométrial, et la prévalence de kystes endométriaux n'a pas été relevée.

3. Intérêt lors du suivi thérapeutique

Enfin, l'échographie Doppler peut être utile pour le **suivi de l'efficacité d'un traitement** (Ortega-Ferrusola et al. 2022).

Par exemple, dans le traitement de l'endomérite, certains traitements visent à améliorer la perfusion utérine et ovarienne, tels que l'utilisation de PRP (plasma riche en plaquettes) par voie locale ou la complémentation en L-arginine et pentoxifylline. Comme réalisé dans plusieurs études, un suivi de la perfusion utérine et ovarienne par échographie Doppler est alors utile (Bailey et al. 2012; Kelley et al. 2014; Mesa et al. 2015; Farghali et al. 2022).

Ces observations rentrent dans le cadre de recherche de causes d'infertilité. L'échographie Doppler peut alors être utilisée en complément d'autres méthodes (données cliniques, données biomédicales...) dans l'exploration d'une infertilité chez la jument. Toutefois, les données étant encore parfois contradictoires, d'autres études sont nécessaires sur l'échographie Doppler pour la mise en pratique.

Après avoir discuté de l'utilité de l'échographie Doppler dans le suivi de la jument non gestante et notamment dans le cadre de sa mise à reproduction, nous nous centrerons à présent sur l'utilité de cette technique pour le suivi de gestation.

PARTIE 3

INTERET DE L'ECHOGRAPHIE DOPPLER CHEZ LA JUMENT GESTANTE

Ces dernières années, de nombreux progrès sont advenus dans le domaine des biotechnologies en reproduction équine, avec pour but d'améliorer les performances de reproduction. Cela a conduit à l'obtention de meilleurs taux de conception, notamment sur des populations parfois peu fertiles. Cependant, peu d'avancées ont été réalisées dans le domaine de la compréhension des mécanismes au cours de la gestation et du suivi clinique de la gestation (Bucca et al. 2020). C'est ce dont il est alors discuté ci-dessous.

I. Intérêt de l'échographie Doppler pour la compréhension du mécanisme du signal de reconnaissance maternelle de la gestation

La reconnaissance maternelle de la gestation est la phase précoce de gestation située entre l'entrée de l'embryon dans la cavité utérine (6^{ème} jour après ovulation) et son implantation sur la paroi utérine (au 16^{ème} jour après l'ovulation environ). Pendant cette période, l'embryon est mobile dans les cornes utérines et dans le corps utérin. Cette phase de reconnaissance maternelle de la présence embryonnaire permet la persistance du corps jaune, et par conséquent, la production de progestérone et le maintien de la gestation.

Plusieurs études ont étudié les mécanismes en cause, mais cette phase n'est, à l'heure actuelle, pas encore comprise dans sa globalité.

Durant la phase de reconnaissance maternelle de la présence embryonnaire, la synthèse d'éléments vasoactifs et stimulant les contractions utérines est observée (œstradiol, prostaglandine F2 α , relaxine...). Ils sont responsables de la propre mobilité de l'embryon jusqu'à son implantation (Nieto-Olmedo et al. 2020). Des études sur les mécanismes moléculaires de régulations, notamment par microARN, existent mais il

n'a pas été mis en évidence actuellement de schéma global de régulation permettant d'expliquer la reconnaissance maternelle de la présence embryonnaire dans son ensemble (Smits et al. 2020).

Cette mobilité embryonnaire joue un rôle crucial dans le maintien de la gestation puisque une diminution expérimentale de cette mobilité par une ligature des cornes utérines induit un arrêt de la gestation (McDowell et al. 1988).

Concernant la possibilité d'éclairer les mécanismes à l'origine de la reconnaissance maternelle de la gestation par échographie Doppler, très peu de données existent. Ainsi, une augmentation du flux endométrial est détectable à l'échographie Doppler en mode puissance dès 7 jours après l'ovulation en cas de gestation (Nieto-Olmedo et al. 2020). Cela représente un des indices embryonnaires reconnaissables à l'heure actuelle dans la phase de reconnaissance maternelle sans que l'embryon ne soit visualisable par échographie bidimensionnelle.

II. Intérêt de l'échographie Doppler pour le diagnostic précoce de gestation

1. Réalisation usuelle du diagnostic de gestation chez la jument et images échographiques classiques

Concernant les techniques de diagnostic de gestation, il est possible de détecter par palpation transrectale de l'utérus une augmentation de la tonicité utérine et la présence d'un col utérin fermé à partir du 18^{ème} jours de gestation et, à partir du 35^{ème} jour de gestation, un épaissement focal au niveau d'une corne utérine, correspondant à l'embryon (Blanchard et al. 2005; McKinnon et al. 2011).

Afin d'être plus précis, un examen échographique, qui va de pair avec la palpation transrectale préalable, est réalisé. Il permet un diagnostic plus précoce, à partir du **10^{ème} jour de gestation minimum, mais en pratique il est fréquemment réalisé au 14^{ème} jour post-ovulation pour plus de certitude (Cf. Figure 38).**

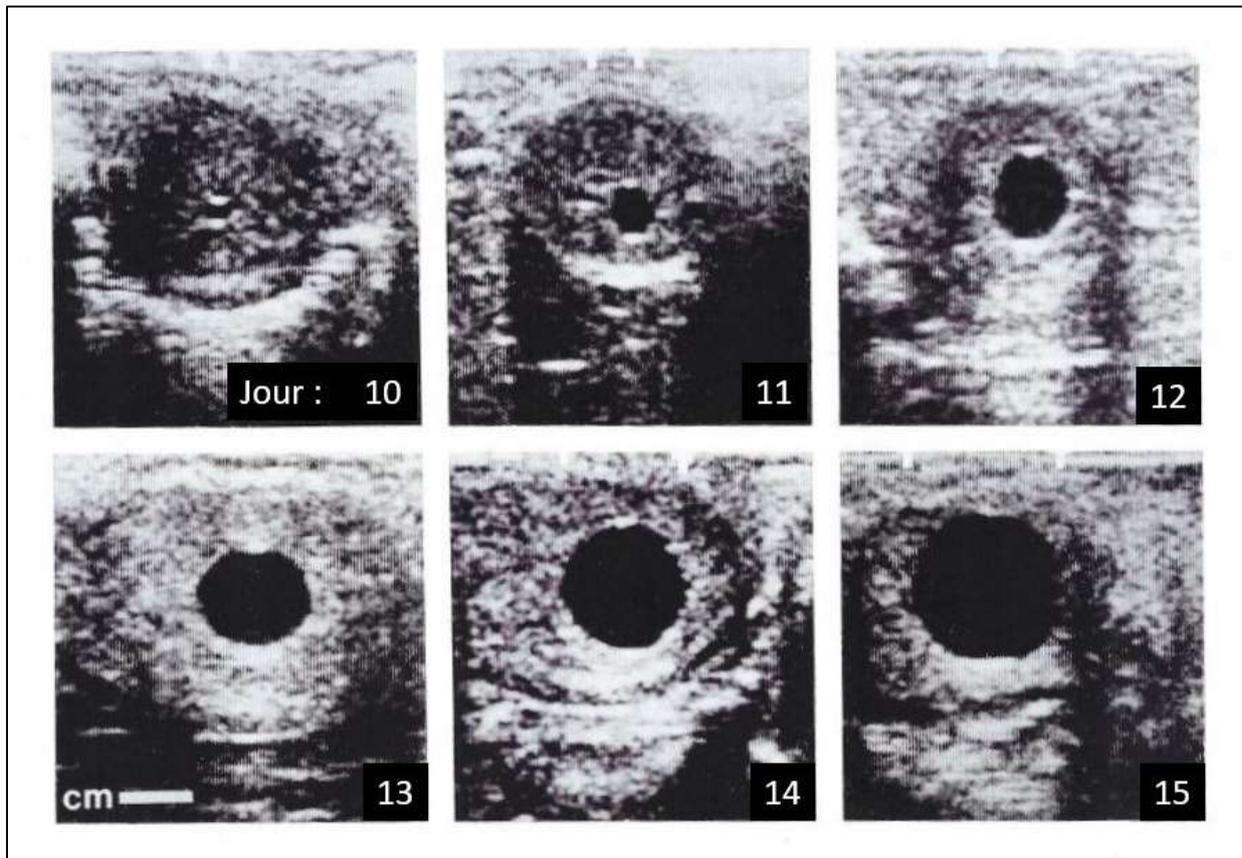


Figure 38 - Images de diagnostics de gestation avec visualisation d'une vésicule embryonnaire à partir du 10^{ème} jour post-ovulation par échographie bidimensionnelle par voie transrectale chez la jument (Ginther 1995b).

Avant le 16^{ème} jour post-ovulation, la vésicule embryonnaire est mobile, donc visualisable à n'importe quel emplacement dans l'utérus. L'immobilisation de la vésicule se réalise ensuite autour du 16^{ème} jour, fréquemment au niveau de la jonction entre une corne et le corps utérin.

Des **dosages rapides d'eCG** (equine Chorionic Gonadotrophin) réalisés entre 40 et 120 jours de gestation sont également disponibles mais il existe des faux positifs (lors d'avortement après la formation des cupules endométriales, par exemple) et de nombreux faux négatifs (test réalisé trop tôt avec un taux d'eCG encore trop faible, ou trop tard avec un taux d'eCG en baisse du fait de la régression des cupules endométriales vers 120 jours). Enfin, le **dosage des œstrogènes sanguins, urinaires ou fécaux** produits par l'embryon dès le 12^{ème} jour post-ovulation, et ensuite par le placenta, est un moyen indirect d'évaluer la viabilité fœtale au cours de la gestation. En pratique, cela est rarement utilisé du fait de la vulgarisation de l'examen échographique (Blanchard et al. 2005).

Nous verrons dans la partie qui suit si la méthode Doppler peut apporter une plus-value concernant le diagnostic de gestation, autant sur sa précocité que sur sa précision.

2. Plus-value de l'échographie Doppler

Un diagnostic de gestation précoce peut être intéressant pour augmenter l'efficacité de la mise à la reproduction, par exemple en évitant une perte de temps si la première insémination artificielle n'est pas fructueuse. De surcroît, pour un transfert embryonnaire réussi (entre 7 à 8 jours post-ovulation), un diagnostic de gestation précoce serait utile pour rendre plus efficace la technique (Nieto-Olmedo et al. 2020).

En effet, le taux de perte précoce lors de mise à la reproduction est relativement important dans l'espèce équine, avec des taux de pertes de gestation entre 5 et 15 % chez les jeunes juments fertiles et jusqu'à 20 % chez les juments plus âgées. Ces pertes sont d'autant plus préoccupantes que l'utilisation de biotechnologies complexes est de plus en plus fréquente dans la mise à la reproduction équine (insémination en semence congelée ou transfert embryonnaire, par exemple). Ainsi, détecter précocement une gestation ou une perte de gestation a un intérêt afin de diminuer le délai entre deux tentatives de mise à la reproduction (Nieto-Olmedo et al. 2020).

Une étude préliminaire datant de 2003 utilise le Doppler couleur pour mesurer le flux au niveau des artères utérines (droite et gauche) après l'ovulation suite à une mise à la reproduction. Il en ressort que la **perfusion utérine (via la mesure du flux artériel utérin) est significativement plus importante chez les juments gestantes au cours de la 2^{ème} semaine de gestation** par rapport aux juments non gestantes. Plus précisément, le flux artériel utérin est détecté comme significativement augmenté par Doppler couleur à partir du 11^{ème} jour post-ovulation chez les juments gestantes. L'hypothèse avancée est que **la migration embryonnaire semble stimuler le flux sanguin utérin**. De plus, ce flux est significativement plus important dans la corne ipsilatérale à la vésicule embryonnaire par rapport à la corne controlatérale entre le 15^{ème} jour et le 29^{ème} jour post-ovulation (Bollwein, Mayer, Stolla 2003).

Une autre étude datant de 2005, étudiant cette fois-ci le flux endométrial par Doppler couleur autour de la phase de mobilité embryonnaire et autour de la phase de fixation, **n'objective une différence de flux endométrial qu'à partir du 12^{ème} jour post-ovulation : pendant la mobilité embryonnaire**, à partir du 12^{ème}, le flux endométrial a été significativement plus important chez les juments gestantes par rapport aux juments non gestantes, et ce flux a été significativement plus important

dans la corne ipsilatérale par rapport à la corne controlatérale du 12^{ème} jour au 16^{ème} jour post-ovulation. **Concernant la phase de fixation, il a été observé dans cette étude que le flux endométrial était significativement plus élevé localement dans la zone de l'endomètre entourant la vésicule embryonnaire** que dans une portion moyenne de la corne gestante (Silva et al. 2005).

Cependant, il est à noter que ces deux études ne sont pas récentes et utilisent toutes deux la technique du Doppler couleur, qui est moins sensible pour la détection de flux de faible intensité, comme le flux endométrial, par rapport à la méthode du Doppler puissance. Ainsi, nous verrons si un matériel plus récent et performant permet de détecter encore plus précocement une gestation chez la jument.

Une étude plus récente de Nieto-Olmedo et al., datant de 2020, a utilisé la technique du Doppler puissance, plus sensible dans la détection de micro-flux, sur 52 juments, afin d'étudier la différence de puissance du flux utérin (BFA) entre les juments gestantes et non gestantes au jour du lavage utérin en vue d'un transfert embryonnaire, soit entre 7 et 8 jours post-ovulation (Nieto-Olmedo et al. 2020).

En évaluant les flux endométriaux au **7^{ème} et 8^{ème} jour post-ovulation**, ils ont mis en évidence une **différence de flux sanguin au niveau de l'endomètre entre les juments gestantes et les juments non gestantes, avec une augmentation du flux endométrial en cas de gestation**, sans augmentation significative du flux en cas de présence de deux embryons par rapport à un embryon unique. En réalisant une analyse statistique de l'aire sous la courbe, cette étude stipule que la mesure du flux endométrial représente un bon indicateur pour la détection d'une gestation précoce.

De plus, le flux endométrial est plus important au 8^{ème} jour post-ovulation qu'au 7^{ème} jour : une évaluation le 8^{ème} jour semble donc plus précise.

Enfin, il existe une différence au niveau du flux endométrial selon l'âge de la mise à la reproduction : ce flux est significativement plus important chez les juments d'âge moyen à âgé (> 6 ans) par rapport aux jeunes juments. Une explication plausible à cette augmentation du flux sanguin serait l'existence d'endométrites subcliniques chez les juments d'âge moyen à âgées, hypothèse toutefois non étudiée dans cette étude par une analyse histologique de l'endomètre, par exemple.

Ainsi, des valeurs seuils ont été établis en fonction de l'âge et du jour (7 ou 8) post-ovulation pour le diagnostic de gestation, comme présenté dans le tableau suivant (Cf. *Tableau IV*).

Tableau IV - Tableau des valeurs seuils du flux endométrial en fonction de l'âge et du jour post-ovulation pour le diagnostic de gestation. (Nieto-Olmedo et al. 2020)

Description du type de juments		Jour 7	Jour 8
Jeunes juments (de 2 à 5 ans)	Jument non gestante	19,70 +/- 1,78	13,91 +/- 1,30
	Jument gestante	36,29 +/- 3,28	55,03 +/- 5,04
	Valeur seuil	25,40	21,02
Juments plus âgées (> 6 ans)	Jument non gestante	31,80 +/- 1,87	26,33 +/- 3,10
	Jument gestante	54,06 +/- 2,98	70,31 +/- 4,98
	Valeur seuil	35,55	41,36

Moyennes +/- écarts types des flux endométriaux en mm²

Ainsi, la technique d'échographie Doppler puissance, combinée à l'analyse assistée par ordinateur des images, semble être utile pour la détection d'une gestation précoce avant lavage utérin et récupération de l'embryon. Toutefois, cette technique présente actuellement l'inconvénient que les résultats ne sont pas disponibles en instantané, le logiciel de traitement d'images n'étant pas intégré à l'échographe. Plus d'études seraient ainsi nécessaires afin de confirmer l'utilité de cette technique et de développer un outil adapté rentable commercialement.

Cette étude ouvre également d'autres perspectives de réflexions, notamment sur la **notion de réceptivité utérine à l'implantation de l'embryon et de l'étude du signal embryonnaire permettant la reconnaissance maternelle de la gestation.**

Il semble, en effet, que ce soit l'embryon mobile qui soit responsable de l'augmentation globale du flux endométrial, augmentation propice à l'implantation et au maintien de la gestation ultérieure.

Ainsi, l'échographie Doppler puissance semble être utile pour détecter précocement une gestation à partir du 7^{ème} jour post-ovulation.

Nous verrons ensuite les apports potentiels de l'échographie Doppler dans le suivi de la croissance embryonnaire.

III. Intérêt de l'échographie Doppler pour le suivi de la période embryonnaire (jusqu'à 40 jours de gestation)

1. Images échographiques classiques

En début de gestation, l'échographie conventionnelle permet un **suivi** de la croissance embryonnaire, une **détection précoce d'une potentielle gestation gémellaire**, ceci afin de réaliser le plus tôt possible l'écrasement d'une des deux vésicules embryonnaires, et une évaluation de la **viabilité** de l'embryon via l'observation des battements cardiaques (Blanchard et al. 2005).

Dans cette phase embryonnaire, le développement de l'allantoïde dans la vésicule embryonnaire, qui prend une place de plus en plus importante au détriment du sac vitellin initial, est suivi. Par ailleurs, l'embryon, d'abord situé sur le plancher de la vésicule embryonnaire (au niveau de son pôle ventral) vers le 21^{ème} jour de gestation, se déplace jusqu'à atteindre son pôle dorsal vers le 38^{ème} jour de gestation. (Cf. Figure 39).

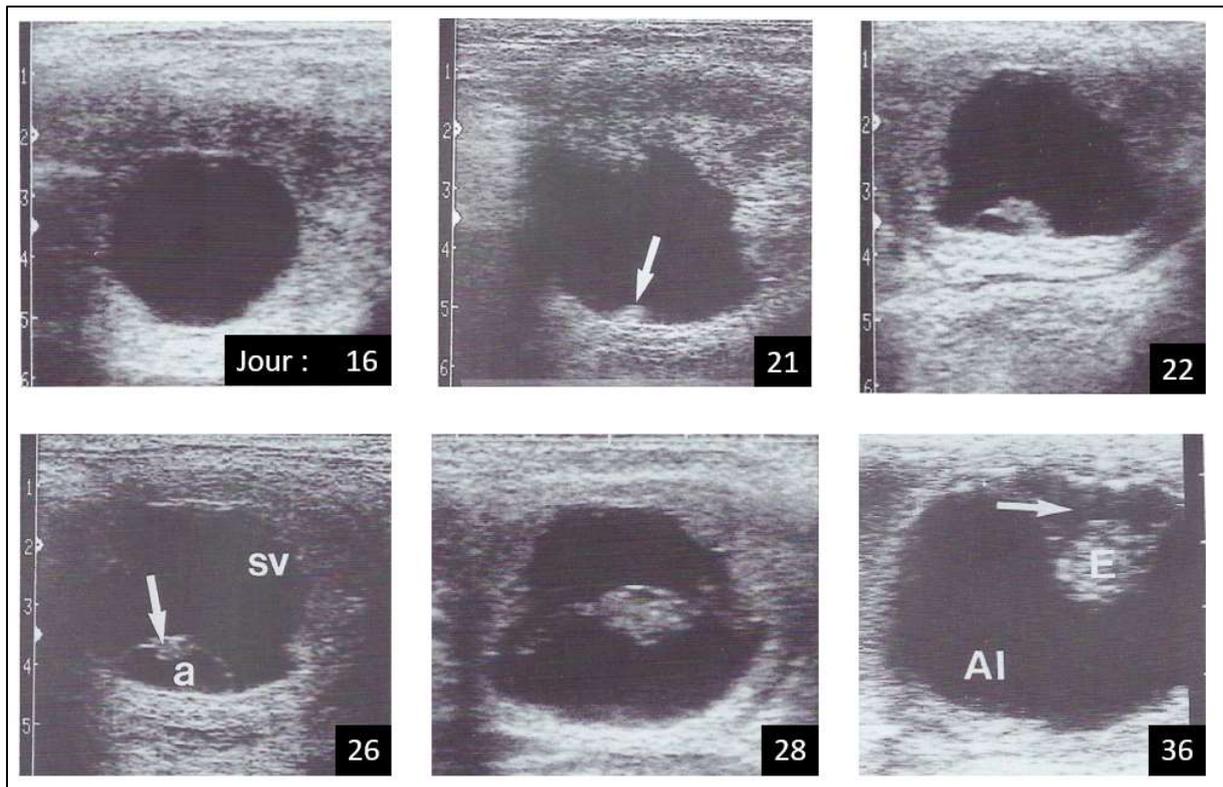


Figure 39 - Images de vésicules embryonnaires à différents stades de croissance après immobilisation, visualisées par échographie bidimensionnelle par voie transrectale chez la jument (d'après Blanchard et al. 2005).

Jour 16 : vésicule embryonnaire après immobilisation, à la base d'une corne utérine et de forme sphérique.

Jour 21 : vésicule embryonnaire à la base d'une corne utérine ayant perdu sa forme sphérique du fait de l'hypertrophie de la paroi dorsale de l'endomètre utérin.

Jour 22 : embryon visible sur le plancher de la vésicule. Début de développement de l'allantoïde.

Jour 26 : l'embryon et l'allantoïde (a) continuent leur développement au pôle ventral de la vésicule embryonnaire alors que le sac vitellin (sv) se trouve en face dorsale.

Jour 28 : l'embryon remonte en direction du pôle dorsal et se trouve, sur l'image, au centre de la vésicule. L'allantoïde continue son développement alors que le sac vitellin est en cours de régression.

Jour 36 : l'embryon se trouve au niveau du plafond de la vésicule (pôle dorsal) et est entouré par l'allantoïde (AI) qui occupe presque la totalité de la vésicule tandis que la régression du sac vitellin (flèche) est quasiment terminée.

2. Plus-value de l'échographie Doppler

Il est possible d'étudier plus précisément les phases de migration, fixation et orientation de l'embryon par échographie Doppler.

Concernant tout d'abord la phase de mobilité, il existe des signes visualisables par échographie Doppler, notamment par des **modifications de la vascularisation**

endométriale qui concordent avec la localisation de la vésicule embryonnaire à un instant donné (Silva et al. 2005). Durant la phase de mobilité accrue (12 à 14 jours après ovulation), **la perfusion vasculaire endométriale est plus importante au niveau de la corne contenant l'embryon** qu'au niveau de celle vide (Silva et al. 2005). Ces observations se poursuivent également après fixation de la vésicule embryonnaire. De plus, la perfusion vasculaire endométriale est localement plus importante autour de la vésicule après fixation qu'au milieu de la corne de fixation de la vésicule (Silva et al. 2005).

Concernant la fixation et l'orientation de l'embryon, l'étude de Silva et al. (2006) suggère que l'épaississement de l'endomètre lors de gestation se produit avant l'orientation de l'embryon dans la vésicule embryonnaire et que l'orientation a lieu juste après la fixation de la vésicule embryonnaire (Silva, Ginther 2006).

En effet, deux observations principales ont été validées par cette étude et sont présentées ci-dessous.

- Tout d'abord, **un épaississement de l'endomètre autour de la vésicule embryonnaire est visible par échographie avant même la fixation** de cette dernière dans la corne utérine où s'implantera l'embryon. **Cet épaississement est visible un jour avant la fixation et est plus important au niveau dorsal**, ou zone mésométriale, qu'au niveau ventral, ou zone anti-mésométriale, où se fixe l'embryon (*Cf. Figure 40*). Ceci est objectivé dans l'étude par le « rapport d'envahissement endométrial » (ou **EER** pour « endometrial encroachment ratio » en anglais) qui correspond au rapport entre l'épaisseur dorsale de l'endomètre autour de la vésicule et l'épaisseur ventrale. Après fixation, ce rapport continue d'augmenter jusqu'à plus de quatre à trois jours post fixation. Cela signifie qu'au troisième jour après fixation, l'épaisseur de l'endomètre en partie dorsale est quatre fois plus importante que son épaisseur ventrale.

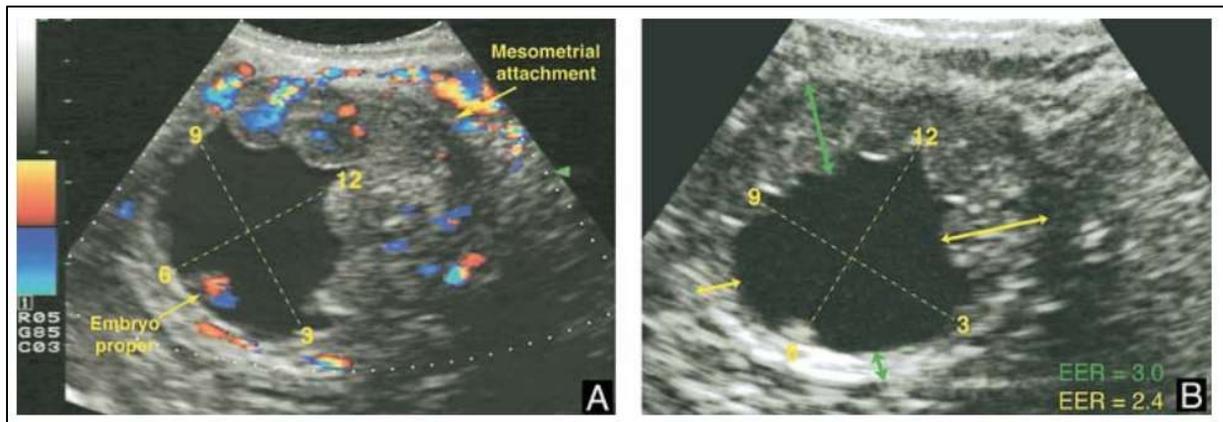


Figure 40 - Images échographiques illustrant l'épaississement dorsal de l'endomètre en partie dorsale autour d'une vésicule embryonnaire de 16 jours (Silva, Ginther 2006).

Images issues d'une vésicule après fixation.

L'image Doppler permet d'orienter la vésicule avec l'attache mésométriale (dorsalement) et le pôle embryonnaire (ventralement).

Le EER est calculée selon la méthode de l'horloge entre les valeurs de 10h30 et 4h30 d'une part (EER = 3,0) et les valeurs de 1h30 et 7h30 (EER = 2,4), donnant une moyenne de 2,7.

- Ensuite, l'orientation de l'embryon au sein de la vésicule embryonnaire est détectable indirectement par un signal Doppler précoce se situant ventralement à la vésicule (Cf. Figure 41). En effet, un signal Doppler est en moyenne détectable au niveau du pôle ventral de la vésicule moins d'un jour après fixation (moyenne de 0,5 jours) et 2.5 jours avant même que l'embryon en lui-même ne soit visible par échographie bidimensionnelle. Cependant, il n'est pas déterminé si le signal Doppler visible précocement s'apparente à un signal issu des vaisseaux endométriaux ou des vaisseaux embryonnaires en tout début de développement. Ainsi, ce signal permettrait d'évaluer précocement la bonne orientation de l'embryon, avec chez la jument, un pôle embryonnaire se trouvant physiologiquement sur la partie anti-mésométriale de la vésicule.

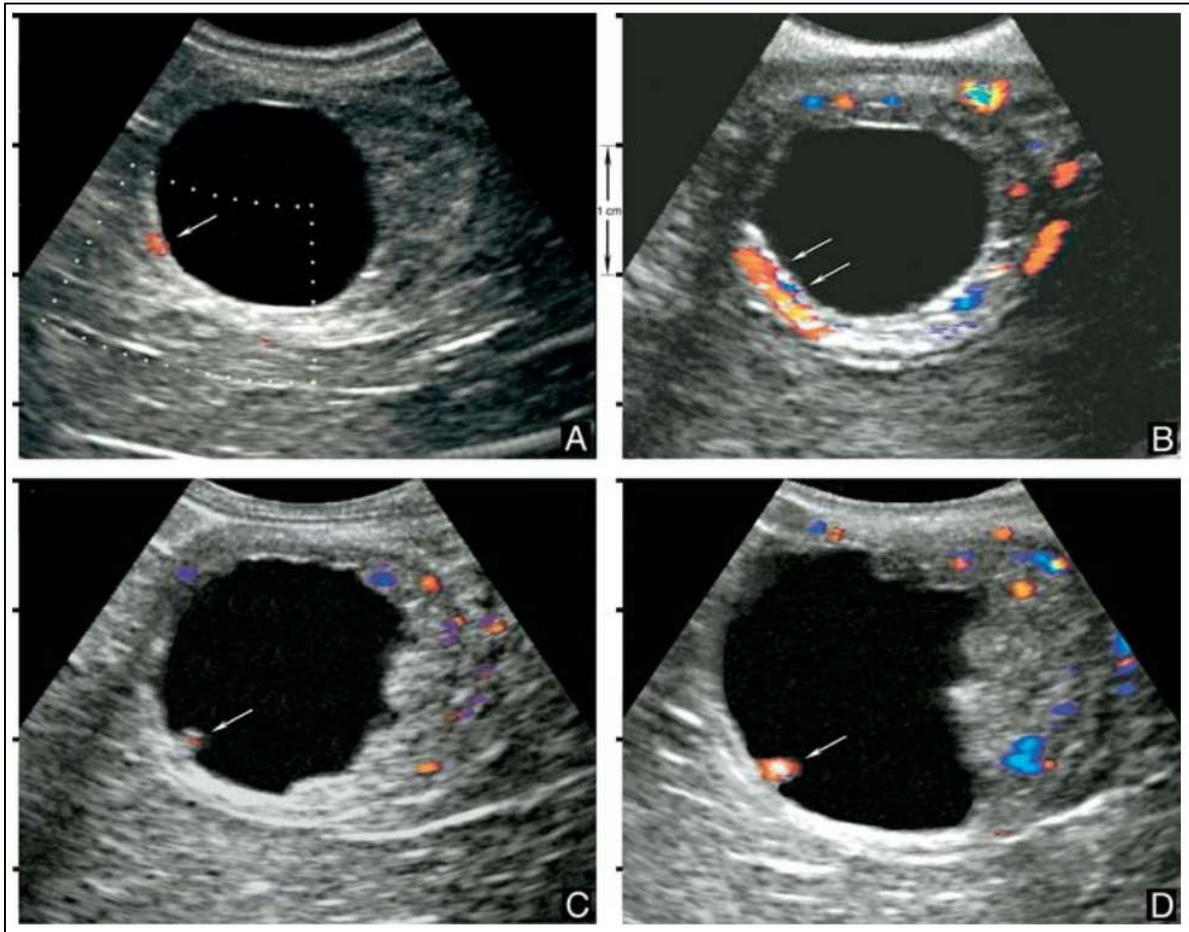


Figure 41 - Images échographiques illustrant la détection d'un signal Doppler précoce au niveau du pôle embryonnaire d'une vésicule au cours du temps (Silva, Ginther 2006).

Les flèches représentent le signal Doppler étudié.

Les images A et B illustrent un signal Doppler visible avant même la détection de l'embryon.

Sur l'image C se superposent le signal Doppler et l'embryon détectable.

Sur l'image D se superposent le signal Doppler et l'embryon de plus grosse taille.

Après fixation, la viabilité embryonnaire est évaluable **par l'observation précoce des battements cardiaques visibles par échographie bidimensionnelle couplée à l'échographie Doppler dès 17 à 20 jours** (Silva, Ginther 2006), soit deux jours plus tôt que par échographie bidimensionnelle avec un appareil à bonne résolution (Ginther 1995b). L'échographie Doppler couleur permet de confirmer qu'il s'agit bien de battements cardiaques par la visualisation de flux sanguins pulsatiles.

Ainsi, l'échographie Doppler présente un intérêt majeur dans la compréhension des mécanismes intervenant en début de gestation, notamment au moment de la fixation et de l'orientation de la vésicule embryonnaire. Elle permet aussi un suivi plus précoce et précis de la viabilité embryonnaire que celui réalisable par échographie en mode B.

Dans la sous-partie suivante, nous nous intéresserons au suivi du fœtus.

IV. Intérêt de l'échographie Doppler pour le suivi de la période fœtale

Traditionnellement, en reproduction équine, l'examen échographique est très répandu pour le diagnostic de gestation, la vérification de l'absence de gestation gémellaire, ainsi que pour l'évaluation de la viabilité fœtale via l'observation des battements cardiaques. En pratique, le suivi de la jument tout au long de la gestation, et notamment du second trimestre jusqu'au poulinage, n'est pas encore réalisé de manière systématique, contrairement à la médecine humaine (Fernandes 2012). Cette partie a pour but de mettre en exergue et de discuter de l'intérêt d'un suivi échographique régulier de l'unité fœto-placentaire durant la période fœtale chez la jument.

1. Images échographiques classiques

Il est conseillé de réaliser au cours de la gestation plusieurs examens échographiques pour un bon suivi du fœtus (Blanchard et al. 2005).

A noter qu'entre le **3^{ème}** et le **6^{ème}** mois de gestation, **l'évaluation de la viabilité fœtale se fait par voie transabdominale** car le fœtus devient non atteignable par voie transrectale pour l'examineur (Blanchard et al. 2005). Les battements cardiaques, le flux sanguin au niveau du cordon ombilical et les mouvements du fœtus sont notamment évalués et seront présentés dans les sous-parties suivantes.

a. Évaluation de la position fœtale

L'évaluation de la position fœtale par échographie en mode B est indiquée afin de vérifier la bonne présentation du fœtus ou de prévoir une potentielle dystocie : classiquement, il est noté une régression de la mobilité du fœtus dans la corne utérine après le 4^{ème} mois de gestation, puis la présentation finale antérieure du fœtus reste identique après le 9^{ème} mois de gestation (elle changera au moment de la mise-bas pour permettre l'expulsion facilitée du poulain) (Ginther, Griffin 1993). Ces résultats sont confortés par une étude plus récente (Bucca et al. 2005) ayant enregistré une position antérieure identique jusqu'au terme à partir du 270^{ème} jour de gestation (9^{ème} mois de gestation), et stipulant qu'une détection d'une position postérieure pendant les deux derniers mois de gestation est certes rare mais très probable de rester telle quelle jusqu'au terme.

b. Mesures réalisables permettant de suivre le développement fœtal

Par ailleurs, **des valeurs de référence** ont été établies expérimentalement pour différents paramètres, afin de détecter de manière objective une anomalie ou un défaut de croissance fœtale. (Bucca et al. 2005) ont relevé, sur 150 gestations au cours de trois ans, et pour une période allant de six mois de gestation jusqu'au poulinage, la présentation fœtale (antérieure, transversale, postérieure), la fréquence cardiaque moyenne au repos et durant l'activité fœtale, la durée relative des mouvements fœtaux, le diamètre aortique fœtal, le diamètre orbitaire fœtal, l'épaisseur utéroplacentaire combinée, la profondeur du liquide fœtal, la mesure de la taille de l'estomac, du thorax, des reins, des gonades, de la trachée, de l'ombre cardiaque et de la longueur entre la couronne des postérieurs et la croupe. Ces mesures par échographies transrectale et transabdominale ont été confrontées dans cette étude à des mesures réelles en abattoir des organes étudiés. Une corrélation positive entre les deux types de mesures a été mise en évidence, ce qui permet de valider la technique par échographie dans l'évaluation du bien-être fœto-placentaire. Il est important de noter que, du fait de la grande taille du fœtus dans cette espèce, notamment en fin de gestation, il est préférable de mesurer des structures petites comme le diamètre orbitaire, afin d'obtenir des mesures qui peuvent être réalisées dans leur intégralité malgré l'âge avancé du fœtus.

En échographie bidimensionnelle, la mesure de **l'orbite fœtale** est un indicateur intéressant pour suivre la croissance fœtale (Kähn, Leidl 1987; Renaudin et al. 2000; Bucca et al. 2005). Cette structure est facilement localisable et, dans cette étude, l'orbite fœtale était mesurable par échographie transrectale chez toutes les

juments étudiées avec un fœtus en présentation antérieure de 150 jours de gestation jusqu'au terme (Bucca et al. 2005). Les mesures trouvées sont résumées dans le tableau suivant et apparaissent ainsi comme utiles pour détecter un retard de croissance en cas de valeur mesurée bien inférieure aux valeurs moyennes (Cf. *Tableau V*).

Tableau V - Moyenne des diamètres orbitaires fœtaux combinés selon le mois de gestation (d'après Bucca et al. 2005).

Mois de gestation	Moyenne des diamètres de l'orbite fœtale +/- écart type (mm)
6	41,3 ± 2,0
7	48.9 ± 1.0
8	52.2 ± 4.6
9	57.4 ± 4.9
10	64.3 ± 2.9
11	68.1 ± 3.6
12	70.3 ± 2.7

Il existe une relation significative selon l'étude présentée entre la taille de l'orbite fœtale et l'âge du fœtus, avec une taille orbitaire qui augmente au fil de la gestation.

Le développement fœtal peut aussi être estimé via la mesure du **diamètre aortique fœtal**, facilement repérable en échographie bidimensionnelle.

Par visualisation rapide des flux sanguins, l'échographie Doppler couleur peut faciliter et rendre plus rapide cette technique. Nous verrons dans la partie suivante, si l'analyse Doppler du flux aortique fœtal apporte des renseignements supplémentaires dans le suivi du développement fœtal.

Une étude de Reef et al. rapporte un **diamètre aortique fœtal moyen lors du dernier examen avant poulinage de de 2,28 ± 0,22 cm chez des fœtus sains** de race Pur-sang et Trotteur américain (Reef et al. 1995).

Le même auteur a étudié un an plus tard ce paramètre lors de conditions pathologiques afin d'identifier si l'étude du diamètre aortique fœtal peut être un indicateur de détection des pathologies chez le fœtus. Un groupe de juments gestantes sans complication lors du poulinage a été comparé à un groupe de juments atteintes de maladies intercurrentes à la gestation (placentite, par exemple), ou ayant eu un poulinage compliqué (présentation postérieure, dystocies...) ou ayant connu des problèmes néonataux (désordres multi-systémiques, septicémie, prématurité,

mortinatalité, gémellité...). Il ressort de cette étude une corrélation significative entre le diamètre aortique fœtal et le poids du poulain dans le groupe des gestations compliquées ($P < 0,0001$, $r = 0,85$), **suggérant que le diamètre aortique fœtal peut être utilisé comme un indicateur de suspicion de conditions défavorables au développement fœtal** (Reef et al. 1996).

Plus largement, cette étude rentre dans le cadre de la tentative d'établissement d'un « **profil biophysique** » du fœtus équin, utilisant **6 paramètres** (fréquence cardiaque fœtale, activité fœtale, diamètre aortique fœtal, profondeurs maximales des fluides fœtaux, contact utéroplacentaire et épaisseur utéroplacentaire), comptabilisé ensuite sous forme d'un score total de 12. Ainsi, ce profil s'avère utile pour évaluer le bien-être fœtal, la mortalité périnatale et la morbidité périnatale, avec un score faible indiquant de manière significative la naissance d'un poulain présentant des anomalies à la naissance. Cependant, il n'a pas été montré dans cette étude qu'un score élevé est significativement associé à la naissance d'un poulain sain.

Une étude plus récente vise à alléger les manipulations nécessaires à la réalisation du profil biophysique équin, **en utilisant seulement trois paramètres** : la fréquence cardiaque du fœtus, le diamètre aortique fœtal (*Cf. Figure 42*) et l'ECUP (Vincze et al. 2019). La sensibilité, spécificité et précision des deux profils ont été calculées dans cette étude, et sont globalement similaires, voire légèrement plus importantes pour le nouveau profil (respectivement pour l'ancien profil et le nouveau, une sensibilité de 81,48% et 85,19%, une spécificité de 83,3% et 87,25% et une précision de 82,95% et 86,82%). Dans cette étude, sur 129 juments gestantes suivies deux fois pendant le dernier mois de gestation, 27 poulains sont morts avant six semaines de vie (résultat classé comme « anormal » par rapport aux 102 poulains asymptomatiques) : avortements, poulains morts nés, asphyxie et maladies néonatales telles qu'une pneumonie, septicémie, entérocolite...

Ainsi, il en ressort que les deux profils biophysiques équins sont utilisables en pratique vétérinaire équine pour détecter des anomalies pouvant compromettre la viabilité du poulain, et ainsi permettre de mettre en place un suivi plus rapproché des poulinières (Vincze et al. 2019). À noter que l'analyse Doppler des flux sanguins observés (intracardiaques, aortiques par exemple) n'est que très peu développée dans ces études.

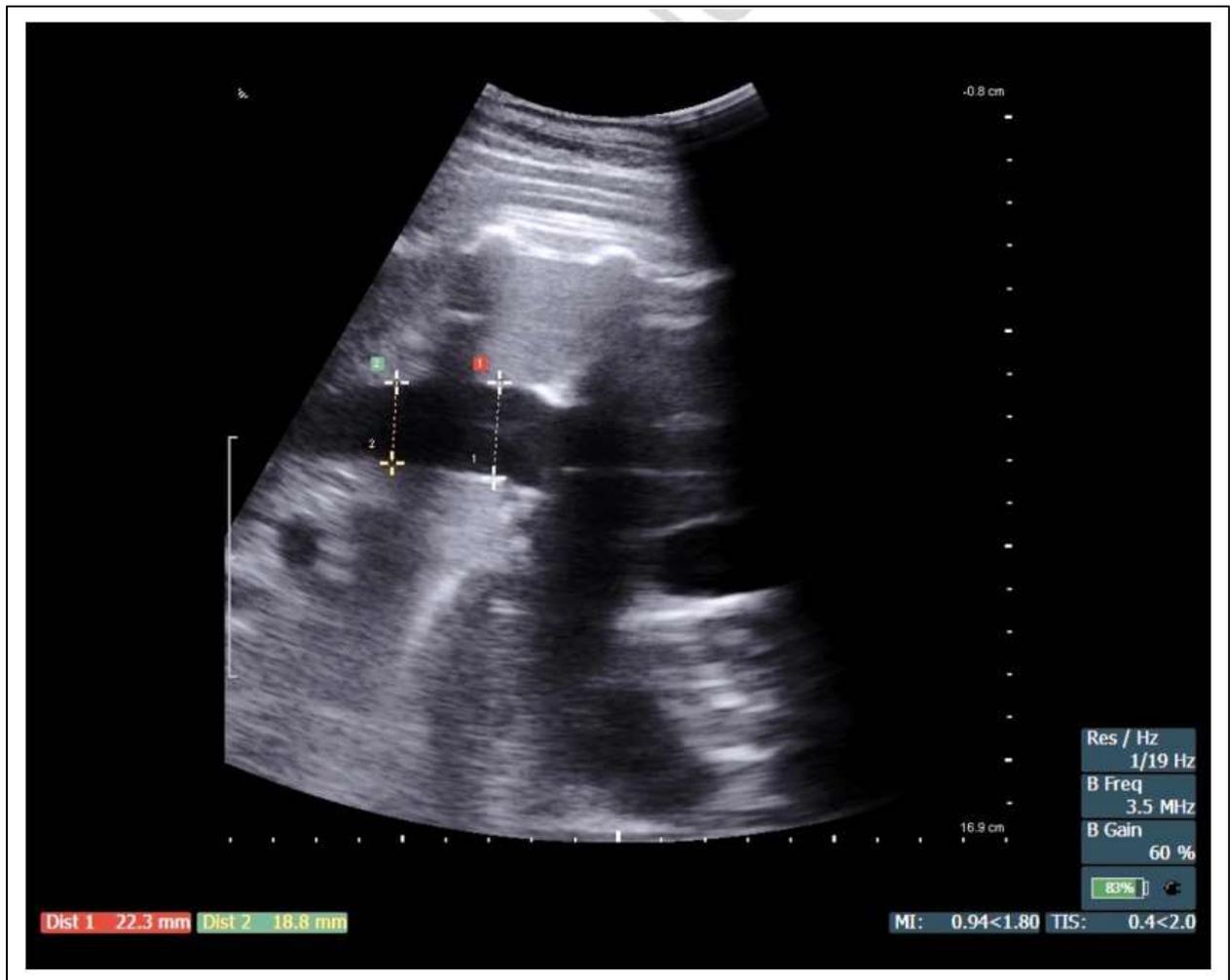


Figure 42 - Echographie de l'aorte d'un fœtus de 302 jours par voie transabdominale (Vincze et al. 2019).

Image réalisée avec une sonde micro-convexe, à la fréquence de 3,5MHz.
La mesure du diamètre de l'aorte fœtale est réalisée deux fois : 22,3 mm de diamètre (« dist 1 ») au plus proche du cœur et 18,8 mm de diamètre (« dist 2 ») un peu plus éloignée du cœur.

c. Sexage en échographie conventionnelle

La **détection du sexe fœtal** est réalisable par voie transrectale via différentes méthodes de détection en fonction de l'avancée dans la gestation (Blanchard et al. 2005). La méthode de sexage la plus précoce par échographie bidimensionnelle repose sur la localisation du **tubercule génital**, structure embryonnaire hyperéchogène et généralement bilobée donnant lieu par la suite au clitoris de la femelle ou au pénis du mâle (Blanchard et al. 2005; Ginther 1995b).

Entre 60 à 70 jours de gestation, le tubercule génital a migré en fonction du sexe du fœtus et se situe proche du cordon ombilical chez le mâle, contrairement à la femelle, chez laquelle il se situe proche de l'anus (*Cf. Figure 43*).

Le sexage par cette technique peut également être réalisé après 70 jours de gestation mais sa réalisation en sera compliquée par la taille importante du fœtus et les modifications de positions du fœtus qui rendent la détection d'une structure précise plus longue et fastidieuse (Blanchard et al. 2005; Ginther 1995b).

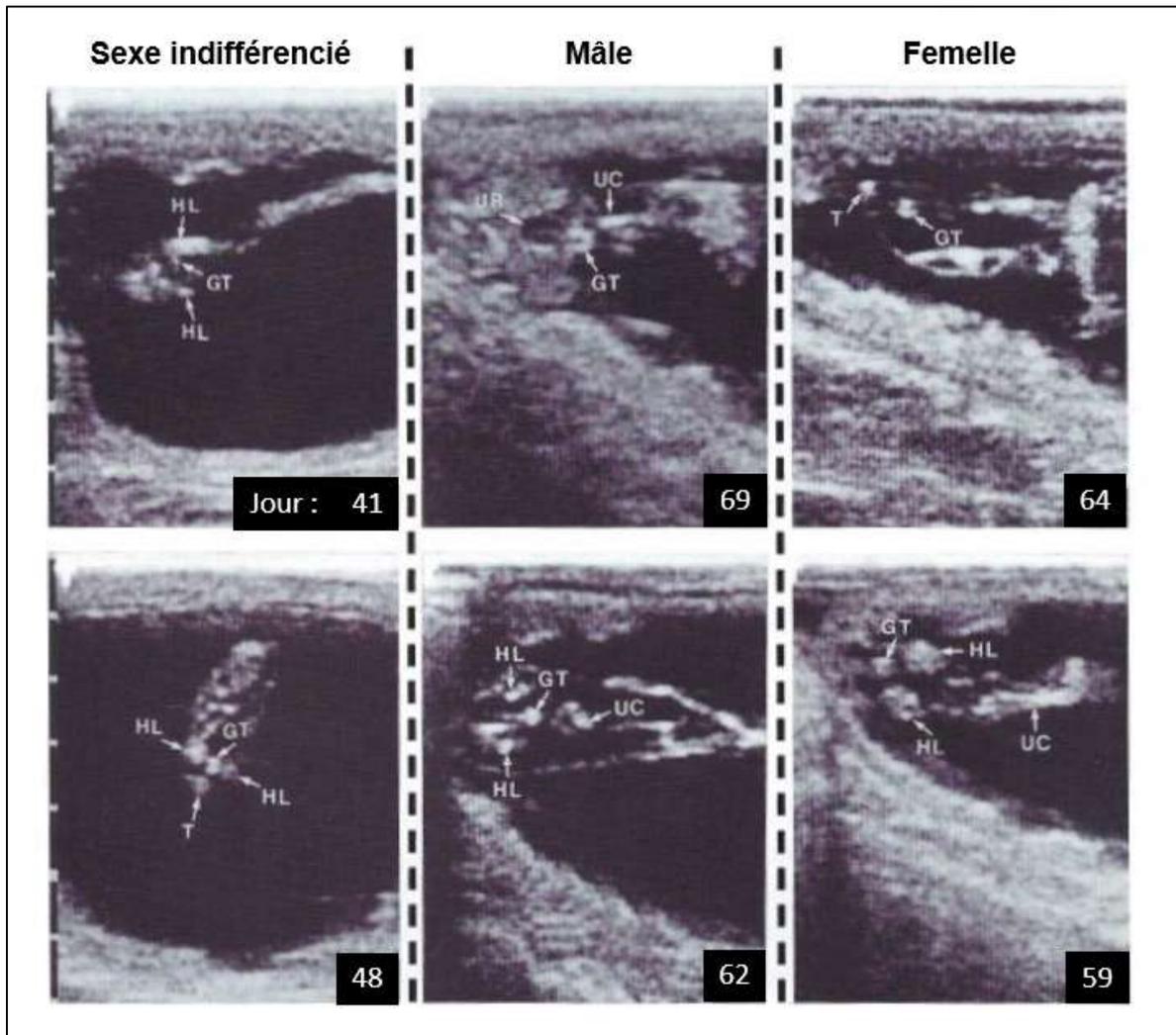


Figure 43 - Images illustrant l'identification du sexe du fœtus entre 60 à 70 jours de gestation par échographie bidimensionnelle par voie transrectale chez la jument gestante (d'après Ginther 1995b).

GT = tubercule génital (« genital tubercle ») ; HL = membres postérieurs (« hind limbs ») ; T = queue (« tail ») ; UC = cordon ombilical ; UR = ouraque (« urachus »).

On note qu'à partir de 60 jours de gestation, le tubercule génital chez la femelle se trouve dans un triangle formé par les os longs des deux membres postérieurs (HL) et par les vertèbres coccygiennes (T).

Chez le mâle, le tubercule génital se situe plus proche du cordon ombilical (UC).

Après 80 jours de gestation, le sexage peut se faire via la détection d'autres organes sexuels qui se sont développés. En effet, il est par exemple possible d'échographier le prépuce et le scrotum chez le mâle juste caudalement au cordon ombilical à partir de 100 jours de gestation. Chez la femelle, les bourgeons mammaires ainsi que leur tétines peuvent être détectées dès 120 jours de gestation juste caudalement aux membres postérieurs (Blanchard et al. 2005 ; Buisson 2005).

d. Évaluation du placenta

Au dernier tiers de gestation, il est recommandé d'échographier par voie transrectale le placenta : une mesure de l'ECUP (épaisseur combinée de l'utérus et du placenta) est souvent réalisée (Blanchard et al. 2005; Renaudin, Bruyas 2017). Cet examen est réalisable par voie transrectale ou transabdominale grâce à une sonde linéaire de 5MHz après préparation de la jument (retrait des crottins et utilisation d'un gel et d'un gant de palpation transrectale, ou tonte éventuelle et application d'alcool sur la peau pour la voie transabdominale). Par voie transrectale, la sonde est placée à la jonction placentocervicale, alors que par voie transabdominale, la sonde est positionnée contre l'abdomen ventral en avant des mamelles et déplacée crânialement et latéralement. Les images échographiques obtenues sont présentées ci-dessous via les deux voies (*Cf. Figure 44*).

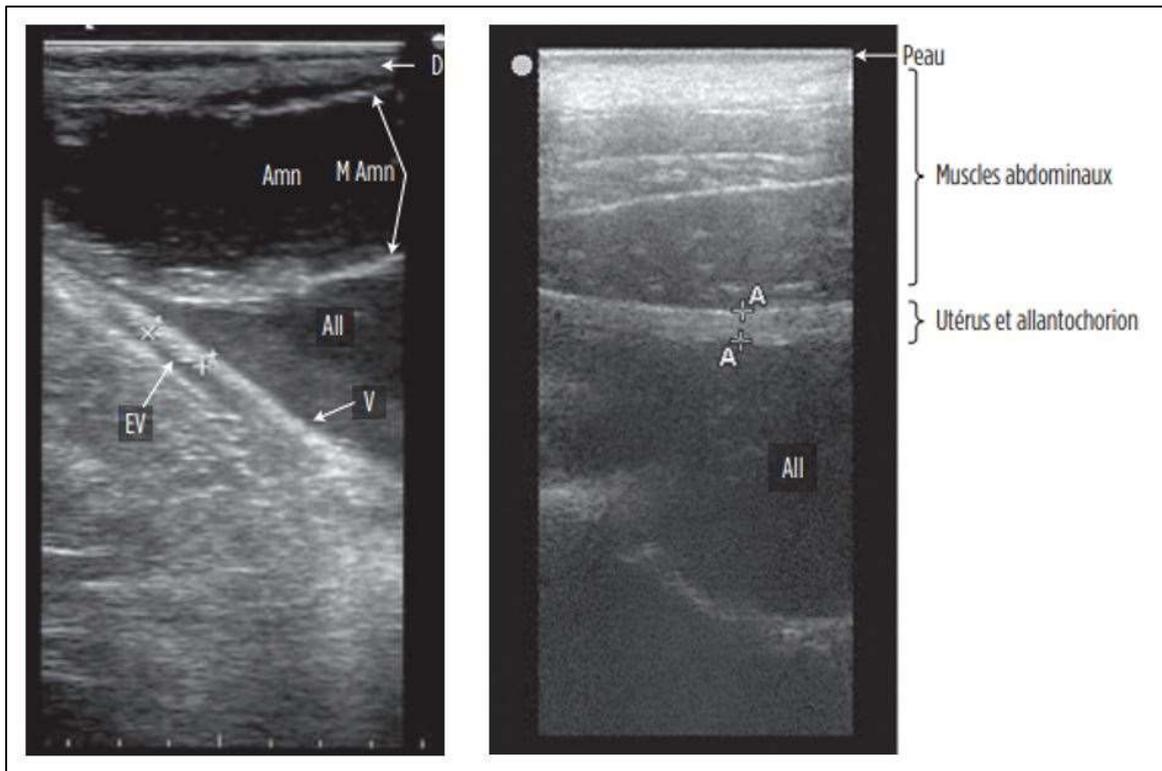


Figure 44 - Exemples d'images échographiques obtenues par voie transrectale et transabdominale permettant la mesure de l'ECUP chez la jument gestante (Renaudin, Bruyas 2017).

A gauche : image échographique normale par voie transrectale au niveau de la jonction placentocervicale. L'ECUP est mesurée sur la partie ventrale du corps de l'utérus. Liquide allantoïdien = All, liquide amniotique = Amn, membrane amniotique = M Amn, partie ventrale du corps utérin = V, partie dorsale du corps de l'utérus = D, espace vasculaire contenant la branche moyenne de l'artère utérine = EV.

A droite : image échographique normale par voie transabdominale de l'utérus à 100 jour de gestation. Sur les deux images, l'ECUP est représentée par l'épaisseur entre les deux croix.

Une augmentation anormale de l'ECUP, ou la visualisation d'un décollement entre l'utérus et le placenta avec accumulation de liquide, doit faire suspecter une placentite (Renaudin et al. 1997; Betsch 2009; Renaudin, Bruyas 2017).

Par voie transrectale, des valeurs anormalement augmentées d'ECUP impliquent des mesures supérieures à 8 mm entre 271 et 300 jours (10^{ème} mois de gestation), à 10 mm entre 301 et 330 jours (11^{ème} mois de gestation) et à 13 mm au-delà de 330 jours, comme présenté dans le tableau ci-dessous (Renaudin et al. 1997; Renaudin, Bruyas 2017, Cf. Tableau VI).

Tableau VI - Valeurs normales et anormales de l'ECUP par échographie transrectale chez des juments Quarter Horse (d'après Renaudin et al. 1997 ; Renaudin, Bruyas 2017).

Mois de gestation	Moyenne de l'ECUP	Intervalle de confiance à 95%		ECUP anormale
		Limite inférieure	Limite supérieure	
4 (91 à 120 jours)	3,98 mm	3,81 mm	4,47 mm	> 7 mm
5 (121 à 150 jours)	3,58 mm	3,50 mm	3,81 mm	> 7 mm
6 (151 à 180 jours)	3,84 mm	3,78 mm	4,04 mm	> 7 mm
7 (181 à 210 jours)	3,91 mm	3,86 mm	4,07 mm	> 7 mm
8 (211 à 240 jours)	4,33 mm	4,21 mm	4,69 mm	> 7 mm
9 (241 à 270 jours)	4,38 mm	4,28 mm	4,66 mm	> 7 mm
10 (271 à 300 jours)	5,84 mm	5,53 mm	6,77 mm	> 8 mm
11 (301 à 330 jours)	7,35 mm	6,93 mm	8,54 mm	> 10 mm
12 (331 à 360 jours)	9,52 mm	8,51 mm	11,77 mm	> 13 mm

Par voie transabdominale, un plus grand nombre de sites fœto-placentaires peut être observé, ce qui permet de ne pas passer à côté d'une anomalie relativement localisée. Cette technique présente néanmoins l'inconvénient d'être moins rapide, et moins précise dans la comparaison des valeurs d'une période à une autre, du fait de la variabilité des sites placentaires observés (Bucca et al. 2005). Une moyenne des mesures d'ECUP réalisées sur plusieurs sites est alors conseillée. À noter que par voie transabdominale, les valeurs d'ECUP sont généralement inférieures ou égales à celles obtenues au niveau de la jonction placento-cervicale (Renaudin et al. 1997; Renaudin, Bruyas 2017).

En cas de mesure d'ECUP anormalement élevée, une placentite doit être suspectée. Par échographie transrectale, une placentite ascendante, située généralement crânialement au col utérin, sera suspectée en priorité. Il existe aussi des placentites diffuses ou multifocales, le plus souvent d'origine hémotogène, qui sont localisées au niveau du corps utérin ou de la bifurcation des cornes utérines, et qui sont plus facilement diagnostiquées par échographie transabdominale.

Une placentite peut induire également un décollement placentaire visible à l'échographie : ceci s'explique par l'exsudat produit, qui induit un décollement du placenta par rapport à l'endomètre.

Il est conseillé de réaliser la mesure de l'ECUP en cas de prodromes d'avortements ou de suspicion de placentite (gonflement mammaire prématuré, lactation prématurée, écoulement vulvaire purulent voire contractions utérines). De plus, le suivi régulier de l'ECUP est conseillé chez les juments prédisposées aux placentites ascendantes, c'est-à-dire des juments avec des antécédents de placentite ou d'avortement, les juments présentant une mauvaise conformation périnéale ou encore les juments présentant une maladie respiratoire obstructive. Sur ces juments prédisposées, un suivi de l'ECUP par voie transrectale est conseillé tous les mois et à partir de 7 mois de gestation (Renaudin, Bruyas 2017).

Classiquement, le traitement d'une placentite est composé d'une antibiothérapie, d'un traitement anti-inflammatoire (flunixin-méglumine, par exemple) et de progestagènes (altrénogest, par exemple). Si après la mise en place du traitement, l'ECUP continue d'augmenter rapidement, cela signifie que le traitement ne fonctionne pas et qu'il est nécessaire de l'adapter (Buisson 2005; LeBlanc 2010; Renaudin, Bruyas 2017).

Ainsi, en cas de placentite avérée, le suivi de l'ECUP chez la jument traitée permet de suivre l'efficacité du traitement et de l'adapter si besoin.

Plus rarement, un œdème placentaire peut être diagnostiqué par échographie bidimensionnelle, avec la visualisation d'un épaissement et d'une hypoéchogénicité de l'unité utéro-placentaire. Cette affection induit un risque d'hypoxie chez le fœtus (Buisson 2005).

e. Évaluation des liquides fœtaux

Les liquides fœtaux comprennent le liquide amniotique et le liquide allantoïdien, dont les volumes augmentent progressivement au cours de la gestation (*Cf. Figure 45*). Au début de gestation, le liquide allantoïdien est majoritaire puis, au milieu de gestation, le volume du liquide amniotique augmente plus rapidement que le volume de liquide allantoïdien (Bucca et al. 2005). En fin de gestation, les deux fluides fœtaux représentent alors environ 3 à 5 litres chacun (Arthur 1969; Bucca et al. 2005)

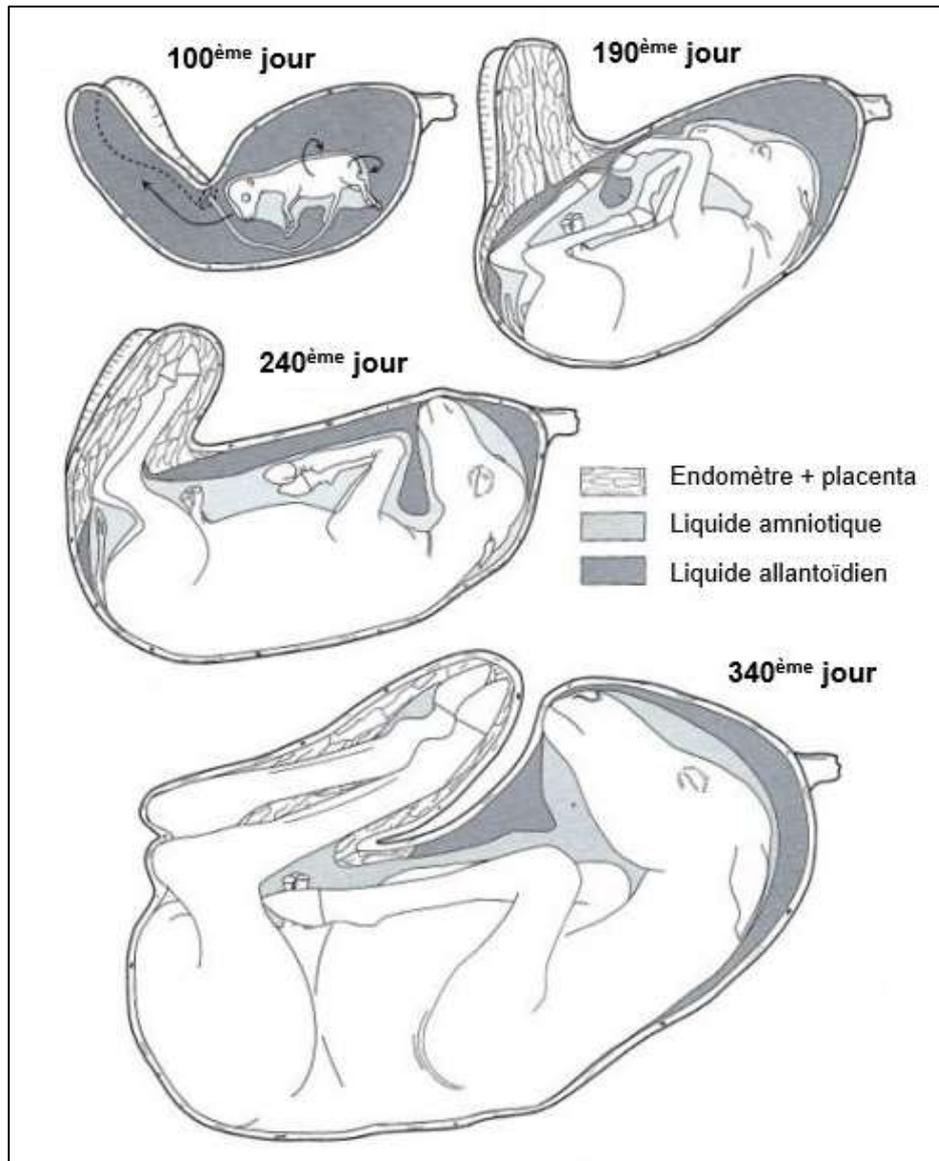


Figure 45 - Représentation schématique de la position classique du fœtus à différents stades et des liquides fœtaux (d'après Ginther 1995b).

Les mesures de profondeur des liquides allantoïdien et amniotique ont été étudiées par Reef et al. dans l'établissement d'un profil biophysique équin (Reef et al. 1996). Des valeurs anormales d'épaisseur du liquide allantoïdien ont été mesurées entre 47 mm et 221 mm (avec une moyenne à 134 +/- 44 mm). Pour le liquide amniotique, les valeurs normales étaient comprises entre 8 mm et 149 mm, avec une moyenne de 79 +/- 35 mm (Reef et al. 1995).

Les fluides fœtaux sont le reflet de la viabilité fœtale car ils constituent un équilibre entre la production de fluides, via la fonction pulmonaire et rénale du fœtus, et la réabsorption par déglutition des fluides par le fœtus. Or, chez le fœtus

humain, une diminution de la production d'urine fœtale est corrélée à un état d'hypoxie chronique (Manning et al. 1991). Ainsi, une quantité insuffisante de fluides fœtaux peut-être un indicateur d'hypoxie chronique chez le fœtus. Il est également nécessaire de rechercher d'autres causes de diminution des liquides fœtaux comme l'existence d'une déchirure placentaire ou des membranes (Manning et al. 1991).

Une accumulation excessive d'un des deux liquides peut s'avérer être pathologique et représente un risque accru pour la viabilité fœtale, avec des signes de souffrance fœtale observés, comme une bradycardie (Reimer 1997).

L'hydro-allantoïde se caractérise par une accumulation rapide (de quelques jours à deux semaines) de liquide allantoïdien du fait d'un défaut de fonction placentaire. Après suspicion par des signes cliniques divers (inconfort abdominal, difficulté respiratoire, œdème ventral, hernie inguinale possible, possible rupture tendon prépubien...) et par palpation transrectale, le diagnostic est confirmé par échographie, avec un liquidien allantoïdien représentant plus de 30 cm de profondeur dans l'utérus (LeBlanc 2008; McKinnon et al. 2011; Josson, Buff 2017).

L'hydramnios se caractérise par l'accumulation excessive de liquide amniotique. Il est bien plus rare que l'hydro-allantoïde et compromet très fortement la viabilité du fœtus (LeBlanc 2008; McKinnon et al. 2011; Josson, Buff 2017).

Ces deux affections sont regroupées sous le terme d'hydropisie des enveloppes fœtales. Cette accumulation excessive de liquide dans l'une ou les deux enveloppes fœtales peut atteindre jusqu'à plus de 200 litres (McKinnon et al. 2011; Moreau 2013; Paul-Jeanjean 2014). Cette affection peut générer de sévères complications comme la rupture du tendon prépubien, une hernie inguinale, une rupture utérine, un choc hypovolémique, un avortement ou encore une inertie utérine importante entraînant une dystocie ou une rétention des annexes fœtales. Seul un cas de poulain né vivant est rapporté dans la littérature (Christensen et al. 2006). Le suivi régulier des fluides fœtaux est alors important. En effet, cette affection est parfois sous-diagnostiquée ou diagnostiquée tardivement du fait de l'accumulation généralement progressive de liquide. En cas de diagnostic d'hydropisie, un drainage très lent des fluides fœtaux en excès est alors recommandé. Cela permet de sauver la jument mais induit un avortement. La jument est ensuite écartée de la reproduction (Buisson 2005; Slovis et al. 2013).

Enfin, lors de l'observation des fluides fœtaux, l'analyse de leur échogénéité, en plus de la quantité, peut être réalisée. Physiologiquement, les liquides fœtaux contiennent des particules hyperéchogènes en suspension en fin de gestation,

résultant de l'accumulation des sécrétions fœtales (Arthur 1969; Reef et al. 1995; Bucca et al. 2005).

Le **liquide amniotique** est formé par l'urine fœtale, les débris cellulaires issus de l'épithélium de la membrane amniotique et de la peau du fœtus (notamment le vernix, substance grasse servant à imperméabiliser la peau du fœtus pendant la gestation), la salive du fœtus et les sécrétions issues du nasopharynx fœtal. L'accumulation de ces particules au cours de la gestation, et notamment du vernix, participe à l'augmentation de l'échogénicité du liquide amniotique au fur et à mesure que la gestation avance (Vaala, Sertich 1994).

Le **liquide allantoïdien** est composé de l'urine fœtale collectée au cours de la gestation. L'accumulation de calcium issu de l'urine fœtale engendre donc une augmentation de l'échogénicité du liquide allantoïdien au cours de la gestation (Jainudeen, Hafez 2000).

À partir de 4 mois de gestation, le liquide amniotique est physiologiquement plus échogène que le liquide allantoïdien du fait de la mise en suspension des particules par les mouvements fœtaux (Pipers, Adams-Brendemuehl 1984; Bucca et al. 2005; Renaudin, Conley 2023). Cependant, une hyperéchogénicité accrue est rapportée comme anormale et peut être due à l'excrétion de méconium *in utero*, reflet d'une hypoxie fœtale, à une hémorragie, alertant d'un potentiel décollement placentaire, ou encore à des débris inflammatoires, pouvant signaler une placentite (Vaala, Sertich 1994). Une hyperéchogénicité précoce des liquides fœtaux (vers 60 jours de gestation) a aussi été rapportée comme signe de mort fœtale précoce (Powel 2011). Ces observations nécessitent un suivi régulier des liquides fœtaux afin d'avoir des moyens de comparaison entre deux observations.

Ainsi, l'échographie bidimensionnelle par voie transrectale ou par voie transabdominale (plus fréquemment utilisée en milieu et fin de gestation) permet de visualiser le fœtus, d'évaluer sa position et sa croissance, de visualiser les battements cardiaques pour détecter une éventuelle souffrance fœtale, de prédire son sexe, ainsi que de visualiser le placenta et les liquides utérins.

Dans la partie suivante, nous discuterons de la plus-value de l'échographie Doppler dans le suivi du milieu et fin de gestation.

2. Plus-value de l'échographie Doppler

a. *Évaluation de la viabilité fœtale via le rythme cardiaque et les mouvements du fœtus*

L'échographie Doppler par voie transabdominale permet d'évaluer la viabilité du fœtus, **notamment par l'étude de l'activité cardiaque du fœtus** (Blanchard et al. 2005; Bucca et al. 2005).

Certaines études portent tout d'abord sur l'évaluation du **rythme cardiaque moyen à un âge fœtal donné**. Pour ce faire, il est possible de visualiser l'activité cardiaque en échographie bidimensionnelle avec le mode B. Pour compléter l'examen, un échocardiogramme sur le fœtus en utilisant le mode Doppler TM (temps-mouvement) est réalisé. Par cette méthode, une fréquence cardiaque fœtale basale moyenne en fin de gestation de 75 ± 7 battements par minute chez des fœtus de race Pur-sang et Quater Horse a été rapportée (Reef et al. 1995).

Il est également possible de visualiser des **anomalies de fréquence ou de rythme**, comme une tachycardie fœtale persistante, une bradycardie ou encore des arythmies cardiaques. Une tachycardie fœtale persistante est rapportée comme signe prémonitoire d'avortement, de mortinaissance ou encore de dystocie (Reef et al. 1996). Une bradycardie fœtale semble être un critère fiable de détection de souffrance fœtale marquée, fréquemment associée à de l'hypoxie fœtale. Elle est considérée par certains auteurs comme le signe le plus fiable pour suspecter une mort fœtale imminente (Colles et al. 1978; Reef et al. 1996).

Enfin, il semble intéressant de **combinaison de l'analyse du rythme cardiaque à l'analyse des mouvements fœtaux**. En effet, une étude menée en Floride sur des juments en fin de gestation par électrocardiographie fœtale et échographie Doppler transabdominale suggère qu'en situation physiologique, les mouvements fœtaux s'accompagnent d'une augmentation du rythme cardiaque allant de plus 25 à plus 40 battements par minute (sur un rythme au repos entre 60 et 92 battements par minute). Il est ensuite suggéré qu'une **diminution des mouvements fœtaux associée à une non-augmentation du rythme cardiaque** lors de ces mouvements peut être le signe d'une **hypoxie fœtale**. Cette équipe américaine suggère alors de suivre régulièrement le rythme cardiaque fœtal sur des séquences de 10 minutes afin d'évaluer la réponse cardiaque aux mouvements du fœtus (Adams-Brendemuehl, Pipers 1987; Blanchard et al. 2005). En médecine humaine, la méthode de tocodynamométrie est utilisée afin de suivre les contractions utérines et la réponse cardiaque du fœtus pendant l'accouchement et d'agir rapidement en cas de bradycardie détectée (Bakker et al. 2013). Disponible dans l'espèce canine (Davidson 2015), aucune étude n'est

disponible dans le domaine de la jument pour discuter de l'intérêt de la tocodynamométrie autour du poulinage.

Concernant l'analyse des **mouvements fœtaux** seuls, ceux-ci reflètent le fonctionnement du système nerveux central du fœtus. Des mouvements simples sont détectables à partir de 90 jours de gestation et se complexifient surtout pendant les trois derniers mois de gestation. L'observation d'une phase d'inactivité persistante (sachant qu'il existe des phases de dormance physiologiques généralement de moins de 10 minutes) ou au contraire d'hyperactivité fœtale doivent alerter et peuvent être évocatrices d'une souffrance fœtale (Fraser et al. 1975; Pipers, Adams-Brendemuehl 1984; Adams-Brendemuehl, Pipers 1987; Reef et al. 1996).

b. Sexage par méthode Doppler

Dans la revue publiée en 2022 d'Ortega-Ferrusola et al., l'échographie Doppler montre une utilité pour rendre plus fiable le sexage du fœtus, notamment par l'évaluation de la vascularisation des gonades entre 120 et 150 jours de gestation (Ortega-Ferrusola et al. 2022). Cette technique peut permettre de confirmer le sexe suspecté par échographie bidimensionnelle entre 60 et 70 jours de gestation, étape qui peut être parfois difficile en cas de mouvements importants du fœtus, d'un volume relatif important de liquide allantoïdien ou encore lors de la présence d'un corps ombilical très long.

De récentes études montrent que l'utilisation de l'échographie Doppler couplée au mode B est plus efficace dans la détermination du sexe que l'utilisation de l'échographie en mode B uniquement au milieu et fin de gestation (Resende et al. 2014; Mebarki et al. 2019).

Par ailleurs, cette technique est présentée comme plus abordable pour un manipulateur débutant par l'observation des gonades et la détection rapide de leurs vaisseaux via le Doppler couleur du milieu à la fin de gestation, **soit du plexus pampiniforme et de la veine testiculaire chez le fœtus mâle (Cf. Figure 46), soit de la vascularisation médullaire sous forme d'anneau au niveau de l'ovaire chez le fœtus femelle** (Resende et al. 2014).

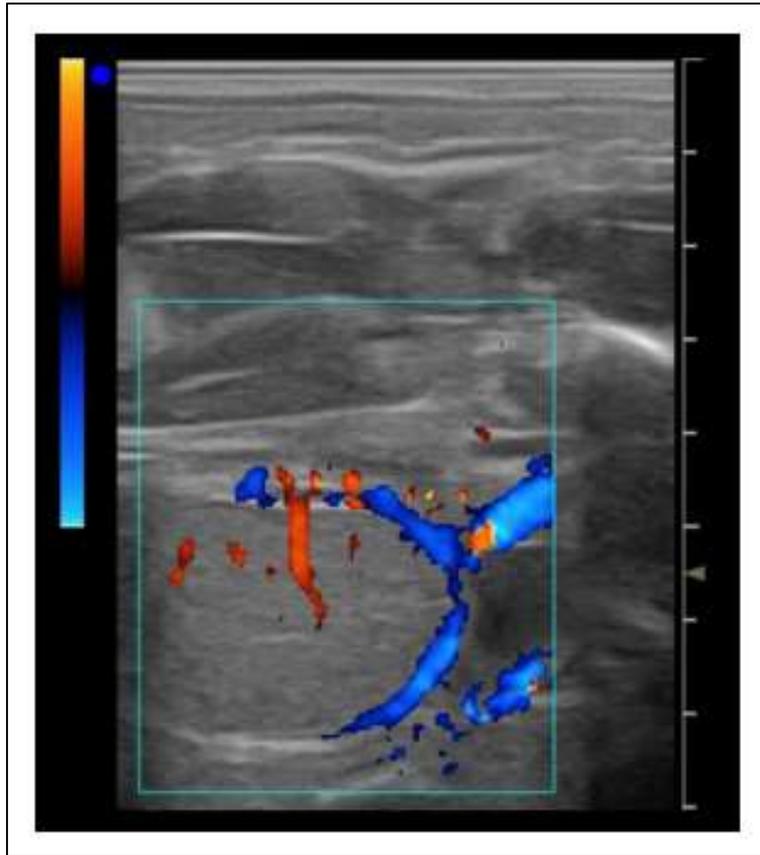


Figure 46 - Exemple de détermination du sexe fœtal par échographie Doppler couleur (Ortega-Ferrusola et al. 2022).

Image issue d'échographie Doppler couleur par voie transabdominale à 240 jours de gestation. En bleu sont visualisables le plexus pampiniforme et la veine testiculaire. En rouge est visible le flux sanguin de l'artère testiculaire.

À noter que la technique Doppler peut récemment être couplée avec une analyse échographique en trois dimensions (3D) pour gagner en efficacité et certitude mais également pour réaliser un suivi 3D pendant la gestation (Kotoyori et al. 2012; Van de Velde et al. 2018).

c. Examen des flux sanguins utérin et ombilical

Bollwein a étudié par Doppler couleur le flux sanguin utérin et ombilical tout au long de la gestation sur quatre juments afin d'établir des valeurs de référence pour pouvoir détecter ultérieurement des éventuellement anormalités pendant la gestation (Bollwein et al. 2004). En effet, en médecine humaine, le Doppler couleur est fréquemment utilisé pour détecter une grossesse à risque, car un lien a été montré entre un débit utérin et fœtal en dessous des valeurs seuils et un taux plus important

d'avortements (Campbell et al. 1986; Abuhamad et al. 2002; Alfirevic, Stampalija, Dowswell 2017; Redline, Ravishankar 2018).

Chez la jument, il ressort de l'étude de Bollwein une **augmentation de la vascularisation utérine tout au long de la gestation**, avec un indice de résistance moyen diminué de moitié pendant la gestation et un débit sanguin utérin moyen multiplié par 400. Une explication plausible à ces observations est l'existence concomitante d'une dilatation vasculaire, d'une infiltration trophoblastique des artères spiralées au cours du développement du conceptus et d'une augmentation des besoins nutritionnels du conceptus en croissance. Cependant, dans une étude plus récente, aucune différence significative n'a été mise en évidence dans le suivi des indices de résistance du flux au niveau de l'artère utérine au cours de la gestation. Un profil à faible indice de résistance et à haut débit sanguin est néanmoins visible, de 4 mois de gestation jusqu'au terme, confirmant l'existence d'une forte perfusion utérine au cours de la gestation (Bucca et al. 2020).

Le flux au niveau de l'artère utérine a également été étudié dans la détection précoce des placentites ascendantes. Une étude a comparé la mesure de l'ECUP par échographie en mode B à l'évaluation du flux artériel utérin chez six juments avec une placentite expérimentalement induite et cinq juments saines (témoins). Contrairement aux mesures d'ECUP, les valeurs d'IP et d'IR n'ont présenté aucune différence significative entre les deux groupes (Bailey et al. 2012).

Une autre étude de 2015 suggère toutefois une légère augmentation de l'indice de résistance au niveau du flux artériel utérin chez les juments atteintes de placentite lors de la première moitié de gestation (Klewitz et al. 2015). Seulement, l'effectif des juments atteintes de placentite dans cette étude est trop restreint pour conclure sur l'intérêt réel de l'échographie Doppler.

En conclusion de ces observations, et au vue des données actuelles, l'étude de la perfusion utérine par échographie Doppler ne semble pas apporter de plus-value franche dans la détection précoce des placentites ascendantes chez la jument.

Le flux artériel utérin a également été étudié dans la **détection d'avortements** : un profil général d'augmentation de ce flux semble avoir lieu en cas d'avortements mais **ces données ne sont pas significativement interprétables** (Klewitz et al. 2015). D'autres études sur un plus grand nombre de cas d'avortements chez la jument seraient nécessaires.

En plus de l'analyse du flux utérin, il est possible d'analyser la cartographie de l'onde Doppler utérine : une encoche diastolique au niveau du flux sanguin utérin peut parfois être mise en évidence dans l'onde Doppler au début de la diastole (Cf. Figure 47). Elle reflète la résistance du lit vasculaire placentaire sur l'écoulement du sang artériel utérin (Mo et al. 1988; Thaler et al. 1992).

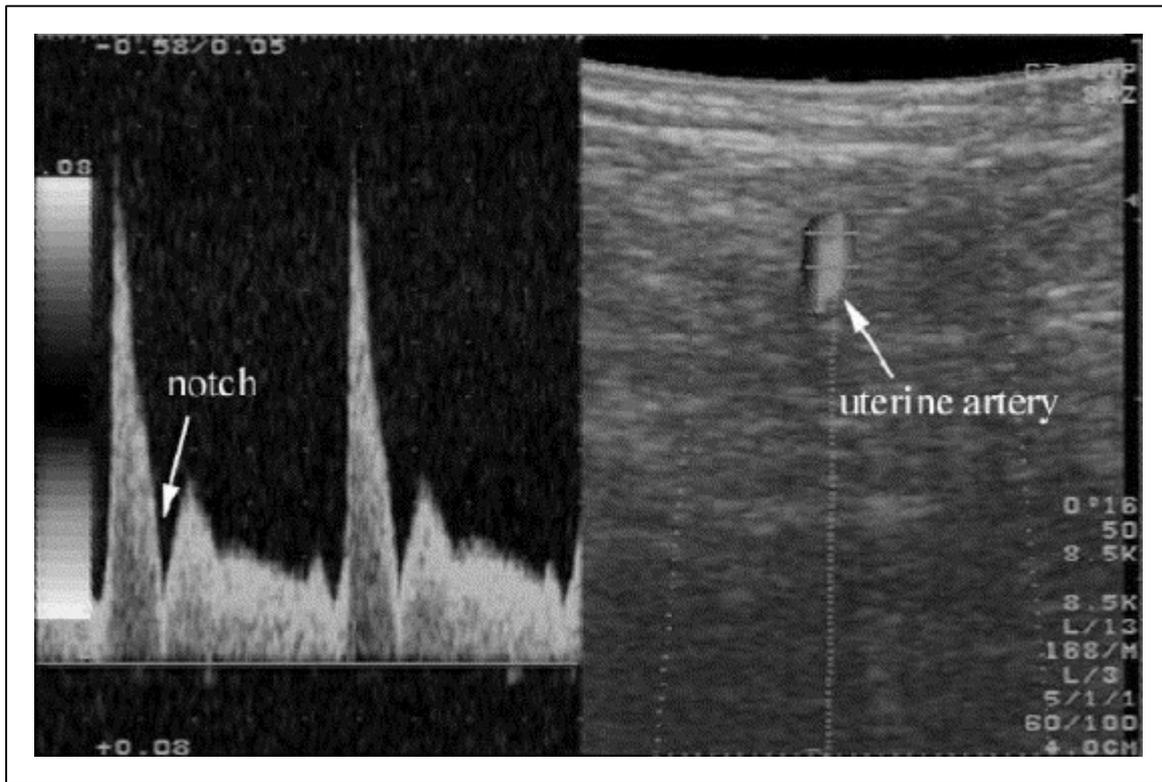


Figure 47 - Flux sanguin de l'artère utérine ipsilatérale au conceptus par échographie Doppler et mise en évidence d'une encoche diastolique (Bollwein et al. 2004).

Images issues d'une échographie Doppler sur une jument à 2 semaines de gestation.
« Notch » = encoche, « uterine artery » = artère utérine

Dans cette étude, l'encoche diastolique précoce de l'onde Doppler était présente chez toutes les juments dès la 14^{ème} semaine de gestation et a disparu dès 18 à 26 semaines de gestation, selon les juments. Cela peut être expliqué par la diminution des résistances vasculaires fœtales au fil de la gestation, avec un développement et une vasodilatation au niveau des microcotylédons qui se déroulent physiologiquement jusqu'à 22 semaines de gestation environ.

Ainsi, l'article suggère qu'une absence de disparition de cette encoche serait le signe d'un maintien d'une forte résistance vasculaire placentaire contre le flux artériel utérin, et donc un développement moindre du fœtus, avec

supposément un risque accru d'avortements, de pathologies associées à des anomalies du cordon ou de sous-développement fœtal (Bollwein et al. 2004).

En humaine, la présence de cette encoche diastolique est associée par exemple à des anomalies du cordon et du placenta (Abuhamad et al. 2002; Hackmon et al. 2005). Certaines de ces observations sont retrouvées chez la jument dans une étude de 2015 portant sur 51 juments : une disparition tardive (après 150 à 210 jours de gestation) de l'encoche diastolique dans l'onde Doppler issue de l'étude de l'artère utérine est repérée chez les juments atteintes de placentite (Klewitz et al. 2015).

Enfin, concernant l'analyse Doppler du **flux ombilical** au cours de la gestation, l'indice de résistance du flux ombilical diminue jusqu'au milieu de gestation, en accord avec d'autres études, reste bas après le milieu de gestation puis augmente lors des dernières semaines avant le poulinage. Cette dernière observation peut paraître étonnante, car associée à une potentielle diminution de la perfusion fœtale lors des dernières semaines de gestation (McGladdery et al. 1993). Cependant, une possible explication serait qu'il est nécessaire de tenir compte en parallèle de la pression artérielle propre au fœtus, qui augmente progressivement au cours de la gestation sous contrôle du système nerveux autonome et génère des modifications hémodynamiques possiblement à l'origine d'une augmentation de résistance au niveau de l'artère ombilicale. De plus, les mesures au niveau de l'artère ombilicale devraient être répétées sur un plus grand nombre de juments car ces données sont moins fiables du fait du trajet très tortueux de l'artère ombilicale, ce qui complique les manipulations. En effet, une étude plus récente de McGladdery montre que l'artère ombilicale est difficilement visualisable après 250 jours de gestation et que les résultats issus de l'échographie Doppler de cette zone lors du dernier tiers de gestation sont alors à moduler (McGladdery, Ousey 2016). En 2020, l'étude de Bucca et al. a conforté ces résultats : l'indice de résistance et l'indice de pulsatilité sont corrélés négativement à l'âge gestationnel de 4 mois à 7 mois de gestation. Après 7 mois de gestation, les mesures n'étaient pas systématiquement réalisables de manière fiable (Bucca et al. 2020). C'est pourquoi les résultats évoqués précédemment (augmentation de l'IP ombilical en fin de gestation) doivent être discutés et peuvent être critiqués (McGladdery et al. 1993).

D'autres études seraient ainsi nécessaires chez la jument afin de confronter les résultats et déterminer si l'évaluation des flux utérin et ombilical par échographie Doppler est une méthode efficace dans l'évaluation de la viabilité fœtale.

d. Examen du flux sanguin carotidien

L'étude de l'évolution du flux carotidien s'avère être plus fiable dans l'évaluation de la viabilité fœtale au cours de la gestation (Bucca et al. 2020).

En humaine, la viabilité fœtale est notamment évaluée par l'étude de la perfusion cérébrale via l'échographie Doppler de l'artère cérébrale moyenne (« middle-cerebral artery » en anglais ou « MCA »), une branche de l'artère carotide.

En équine, l'artère carotide est préférentiellement étudiée : l'échographie Doppler de ce vaisseau est facilement réalisable par voie transrectale dès que le fœtus se trouve en présentation antérieure (Cf. Figure 48). Les branches externe et interne, ainsi que l'artère carotide commune, sont distinguables. Une étude de Bucca et al. vise à établir des valeurs de référence en situation physiologique pour les indices de résistance au niveau de l'artère carotide fœtale au cours de la gestation afin d'évaluer la viabilité fœtale et, par exemple, détecter un potentiel défaut de perfusion cérébrale du fœtus en cas de valeur anormale (Bucca et al. 2020).

Il en résulte une diminution significative de l'impédance du flux carotidien au cours de la gestation, suggérant un mécanisme permettant de privilégier la fonction cérébrale du fœtus (Bucca et al. 2020).

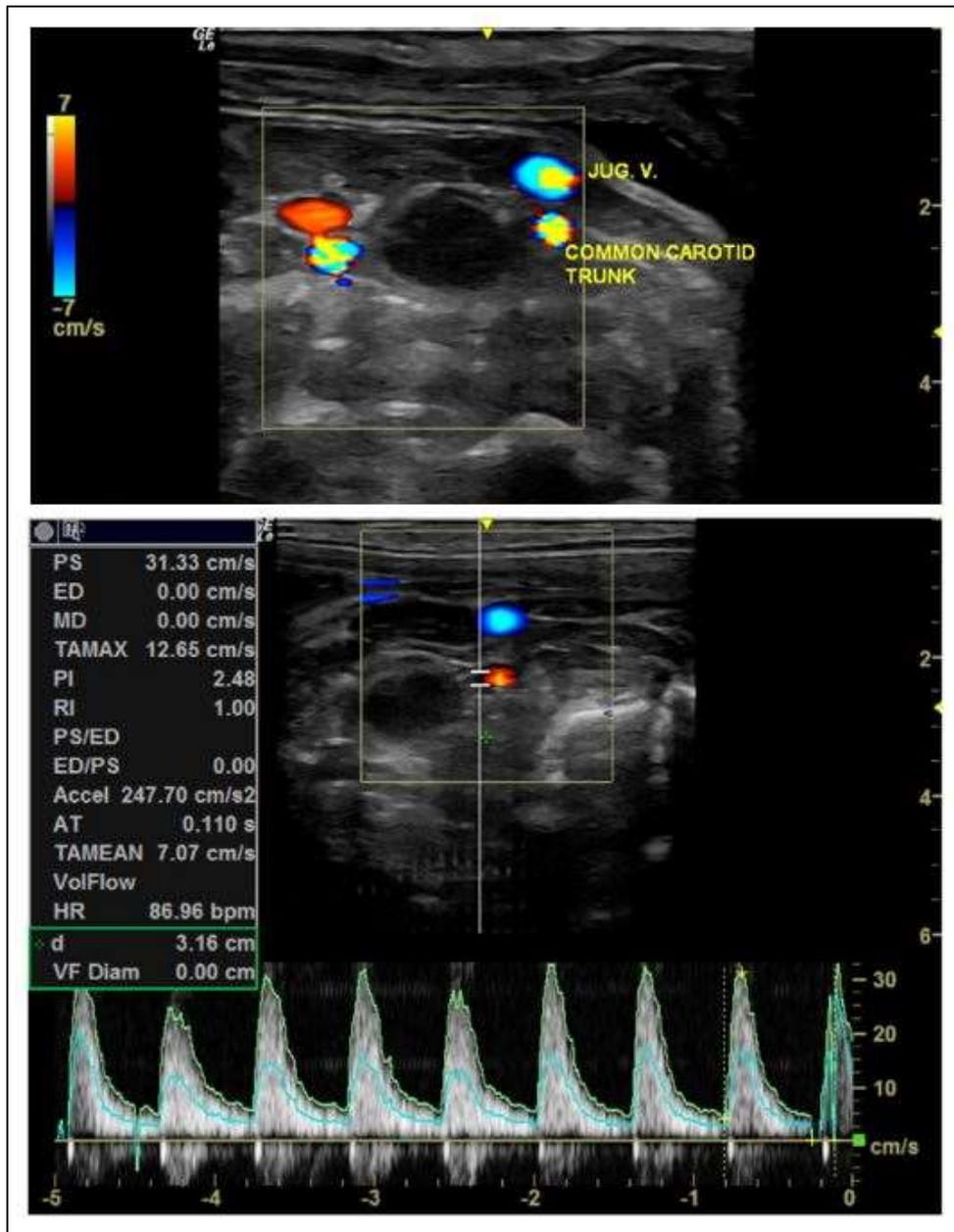


Figure 48 - Echographie Doppler de l'artère carotide commune fœtale par voie transrectale chez un fœtus de 230 jours (Bucca et al. 2020).

De part et d'autre de la trachée, sont observées par Doppler couleur, la veine jugulaire (« jug v. ») et l'artère carotide commune (« common carotid trunk »). Sur la photo du dessous sont représentées les données à la fois par Doppler couleur et par Doppler spectral, permettant de calculer les IP et IR.

Ainsi, cette étude montre que la mesure Doppler du flux carotidien fœtal peut être un outil utile dans l'évaluation de la viabilité fœtale. Pour affiner cette exploration initiale, d'autres études sont nécessaires, notamment par l'étude du **rapport cérébro-placentaire** (abrégé par *RCP*) chez le fœtus équin.

Ce rapport se calcule selon l'équation suivante :

$$\text{Rapport cérébroplacentaire} = \frac{IP (\text{artère cérébrale moyenne})}{IP (\text{artère ombilicale})}$$

En effet, en humaine, ce rapport est très utilisé. Un RCP faible est un facteur prédictif de complications lors de la gestation et est un signe d'une redistribution du flux sanguin fœtal, épargnant en priorité le cerveau du fœtus (Baschat, Gembruch 2003; Ebbing et al. 2007).

Ainsi, d'autres études chez le fœtus équin seraient nécessaires afin d'étudier le rapport cérébro-placentaire comme indicateur de la viabilité fœtale.

V. Intérêt de l'échographie Doppler pour le suivi post-partum

1. Images échographiques classiques

Après le poulinage et jusqu'à la première ovulation post-partum, il est nécessaire de vérifier l'absence de rétention placentaire, de déchirure utérine ou d'hémorragie interne. Un suivi de l'involution utérine est également réalisé par palpation transrectale et par échographie bidimensionnelle (Blanchard et al. 2005; Lemes et al. 2017). Une réduction conséquente du diamètre utérin est observée dans les sept premiers jours après le poulinage. Après le septième jour, l'involution utérine a lieu à un rythme moindre et se termine au 21^{ème} jour post-partum pour la corne non gravide et au 24^{ème} jour post-partum pour la corne gravide (Griffin, Ginther 1991; Lemes et al. 2017).

Il est nécessaire de suivre également la présence de liquides intra-utérins. Dans la même étude, sur des juments présentant un post-partum sans anomalie, la quantité de fluides a diminué drastiquement jusqu'au septième jour et aucun fluide n'a été observable après 16 jours post-partum (Lemes et al. 2017).

Les signes échographiques d'endométrite sont également à surveiller, comme détaillés précédemment (Cf. *Partie 2*).

2. Plus-value de l'échographie Doppler

Durant la période du post-partum, il est possible de décrire des modifications physiologiques de la perfusion vasculaire utérine (Lemes et al. 2017). Dans leur étude, Lemes et al. ont utilisé l'échographie Doppler couleur pour mesurer la perfusion endométriale et mésométriale.

Au tout début du post-partum, les vascularisations endométriale et mésométriale augmentent de manière significative (du premier jour au quatrième jour après le poulinage pour l'endomètre et les deux premiers jours pour le mésomètre).

La perfusion vasculaire du tissu endométrial reste ensuite stable tandis que la perfusion vasculaire du tissu mésométrial diminue de manière significative du deuxième jour au dixième jour après le poulinage.

Les perfusions endométriale et mésométriale redeviennent similaires à celles décrites dans la partie 2 lors du suivi du cycle œstral dès la première ovulation post-partum.

Ainsi, en conditions physiologiques, un retour rapide aux conditions de perfusion utérine avant gestation est observé chez la jument (Lemes et al. 2017).

De ce fait, connaître ces variations physiologiques de perfusion utérine durant le post-partum permet par la suite de détecter certaines anomalies. En effet, en présence d'une situation pathologique, l'échographie Doppler peut permettre de diagnostiquer plus précocement des signes d'endométrite (*Cf. Partie 2*).

En conclusion de cette partie, l'échographie Doppler apporte une plus-value importante dans le suivi de la jument gestante, dans la détection précoce d'une gestation, dans l'échographie précoce de l'embryon, dans le suivi de la viabilité fœtale et la détection d'éventuelles anomalies durant cette phase fœtale et enfin dans la gestation du post-partum chez la jument. Des études supplémentaires doivent néanmoins être menées afin d'affiner l'utilisation pratique de ces différentes observations.

CONCLUSION

Face aux enjeux économiques et de par l'utilisation plus fréquente de biotechnologies dans le domaine de la reproduction équine (insémination artificielle en semence congelée, transfert embryonnaire...), la mise à la reproduction d'une jument se doit d'être réalisée de manière efficiente. Pour ce faire, de nouvelles techniques sont étudiées, comme celle de l'échographie Doppler. Cette technique récente se développe chez la jument afin d'affiner le suivi d'une jument mise à la reproduction (par l'étude des variations de perfusion vasculaire, notamment utérine et ovarienne), d'améliorer l'évaluation de la viabilité fœtale en cas de gestation (par l'étude de la perfusion vasculaire du fœtus) et de contrôler le retour à une perfusion utérine optimale en période post-partum.

L'échographie Doppler est, tout d'abord, un outil utile dans le suivi du cycle œstral et, ainsi, dans **l'optimisation des performances de mise à la reproduction**.

L'étude de la micro-vascularisation de la thèque folliculaire par un examen échographique Doppler permet notamment de suivre le follicule pendant l'œstrus jusqu'à se rapprocher le plus possible du moment de l'ovulation (jusqu'à une heure), augmentant ainsi les chances de fécondation en cas d'insémination artificielle en semence congelée, par exemple.

Ensuite, dans le cadre du transfert embryonnaire, le suivi de la micro-vascularisation lutéale permet une sélection plus efficace des juments receveuses par l'observation d'une corrélation positive entre le flux sanguin lutéal et le taux de progestérone.

De plus, les performances de reproduction peuvent aussi être optimisées par un diagnostic de gestation précoce, qui permet, en cas de diagnostic négatif, de remettre la jument plus rapidement à la reproduction. L'étude du flux sanguin endométrial par échographie Doppler permet en effet un diagnostic de gestation dès le 7^{ème} à 8^{ème} jour après l'ovulation contre 10 jours lors d'un examen par échographie bidimensionnelle.

Enfin, l'évaluation du flux sanguin utérin complète l'examen échographique conventionnel dans le diagnostic d'endométrites subcliniques ou de kystes utérins et permet ainsi d'affiner le suivi thérapeutique de ces pathologies.

Par ailleurs, au-delà des enjeux d'efficience lors de la mise à la reproduction, l'échographie Doppler présente un **intérêt durant les périodes de gestation et de post-partum**.

Durant la gestation, l'échographie Doppler apporte des informations supplémentaires à la compréhension des mécanismes de « reconnaissance maternelle de la gestation », ou encore des mécanismes de migration, fixation et orientation de l'embryon.

De plus, certains paramètres de perfusion fœtale, tels que le flux sanguin ombilical ou le flux carotidien, sont des indicateurs permettant d'améliorer l'évaluation de la viabilité fœtale.

Enfin, le retour à une perfusion utérine normale rapide et les signes d'endométrite peuvent être surveillés par échographie Doppler lors de la période du post-partum.

Toutes ces observations tendent à montrer que l'échographie Doppler présente un intérêt dans le cadre de l'amélioration du suivi global lors de la mise à la reproduction et lors de la gestation chez la jument, à l'instar de la femme. Si la technique d'échographie Doppler s'est récemment développée dans le domaine de la reproduction équine, cet examen ne va actuellement de pair qu'avec une poursuite des examens habituellement réalisés (examen général clinique approfondi, examen échographique bidimensionnel par voie transrectale ou par voie transabdominale, ...).

Par ailleurs, des études complémentaires seraient souhaitables afin de confirmer les observations faites par échographie Doppler sur de plus grands effectifs et d'évaluer la praticabilité de ces observations. En effet, les paramètres suivants rendent actuellement cet examen moins praticable sur le terrain : le coût important du matériel, le temps supplémentaire à l'analyse des données Doppler et la formation nécessaire du vétérinaire équin afin d'obtenir un examen interprétable.

BIBLIOGRAPHIE

ABDELNABY, E. A., EMAM, I. A., SALEM, N. Y., RAMADAN, E. S., KHATTAB, M. S., FARGHALI, H. A. et ABD EL KADER, N. A., 2020. Uterine hemodynamic patterns, oxidative stress, and chromoendoscopy in mares with endometritis. *Theriogenology*. 2020. Vol. 158, pp. 112-120.

ABUHAMAD, A., SCLATER, A. J., CARLSON, E. J., MORIARITY, R. P. et AGUIAR, M. A., 2002. Umbilical artery Doppler waveform notching: is it a marker for cord and placental abnormalities? *Journal of Ultrasound in Medicine: Official Journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine*. 2002. Vol. 21, n° 8, pp. 857-860.

ACOSTA, T. J., GASTAL, E. L., GASTAL, M. O., BEG, M. A. et GINTHER, O. J., 2004. Differential blood flow changes between the future dominant and subordinate follicles precede diameter changes during follicle selection in mares. *Biology of Reproduction*. 2004. Vol. 71, n° 2, pp. 502-507.

ADAMS-BRENDEMUEHL, C. et PIPERS, F. S., 1987. Antepartum evaluations of the equine fetus. *Journal of Reproduction and Fertility. Supplement*. 1987. Vol. 35, pp. 565-573.

ALFIREVIC, Z., STAMPALIJA, T. et DOWSWELL, T., 2017. Fetal and umbilical Doppler ultrasound in high-risk pregnancies. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2017. Vol. 6, n° 6, pp. 1-129.

ARTHUR, G. H., 1969. The fetal fluids of domestic animals. *Journal of Reproduction and Fertility*. 1969. Vol. Supplement 9, pp. 45-52.

BAILEY, C. S., HEITZMAN, J. M., BUCHANAN, C. N., BARE, C. A., SPER, R. B., BORST, L. B., MACPHERSON, M., ARCHIBALD, K. et WHITACRE, M., 2012. B-mode and Doppler ultrasonography in pony mares with experimentally induced ascending placentitis. *Equine Veterinary Journal Supplement*. 2012. Vol. Déc, n° 43, pp. 88-94.

BAILEY, C. S., SPER, R. B., SCHEWMAKER, J. L., BUCHANAN, C. N., BEACHLER, T. M., POZOR, M. A. et WHITACRE, M. D., 2012. Uterine artery blood flow remains unchanged in pregnant mares in response to short-term administration of pentoxifylline. *Theriogenology*. 2012. Vol. 77, n° 2, pp. 430-436.

BAKKER, J. J. H., JANSSEN, P. F., VAN HALEM, K., VAN DER GOES, B. Y., PAPATSONIS, D. N. M., VAN DER POST, J. A. M. et MOL, B. W. J., 2013. Internal versus external tocodynamometry during induced or augmented labour. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2013. N° 12, pp. 1-20.

BARONE, R., 2020. *Anatomie comparée des mammifères domestiques*. Paris : ACV, 886 p.

BARONE, R., 2021. *Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 5 Angiologie*. Paris : ACV, 908 p.

- BARONE, R. et TAGAND, R., 1954. *Anatomie des équidés domestiques. Tome II. Splanchnologie et angiologie. Fascicule III. Appareil uro-génital et péritoine.* Lyon : Laboratoire d'anatomie, École nationale vétérinaire, 1010 p.
- BASCHAT, A. A. et GEMBRUCH, U., 2003. The cerebroplacental Doppler ratio revisited. *Ultrasound in Obstetrics & Gynecology: The Official Journal of the International Society of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology.* 2003. Vol. 21, n° 2, pp. 124-127.
- BETSCH, J. M., 2009. Les placentites chez la jument. *Pratique Vétérinaire Equine.* 2009. Vol. 41, n° 164, pp. 13-19.
- BLANCHARD, T. L., VARNER, D. D., SCHUMACHER, J., LOVE, Ch. C., BRINSKO, S. P. et RIGBY, S. L., 2005. *Manuel de reproduction équine.* Paris : Maloine, 340 p.
- BOLLWEIN, H., MAIERL, J., MAYER, R. et STOLLA, R., 1998. Transrectal color doppler sonography of the A. uterina in cyclic mares. *Theriogenology.* 1998. Vol. 49, n° 8, pp. 1483-1488.
- BOLLWEIN, H., MAYER, R. et STOLLA, R., 2003. Transrectal Doppler sonography of uterine blood flow during early pregnancy in mares. *Theriogenology.* 2003. Vol. 60, n° 4, pp. 597-605.
- BOLLWEIN, H., WEBER, F., KOLBERG, B. et STOLLA, R., 2002. Uterine and ovarian blood flow during the estrous cycle in mares. *Theriogenology.* 2002. Vol. 57, n° 8, pp. 2129-2138.
- BOLLWEIN, H., WEBER, F., WOSCHÉE, I. et STOLLA, R., 2004. Transrectal Doppler sonography of uterine and umbilical blood flow during pregnancy in mares. *Theriogenology.* 2004. Vol. 61, n° 2, pp. 499-509.
- BOON, J. A., 1998. *Manual of veterinary echocardiography.* Baltimore : Williams & Wilkins, 478 p.
- BROGAN, P. T., HENNING, H., STOUT, T. A. E. et DE RUIJTER-VILLANI, M., 2016. Relationship between colour flow Doppler sonographic assessment of corpus luteum activity and progesterone concentrations in mares after embryo transfer. *Animal Reproduction Science.* 2016. Vol. 166, pp. 22-27.
- BUCCA, S., DE OLIVEIRA, I. R. S., CUNANAN, J. C., VINARDELL, T. et TROEDSSON, M. H. T., 2020. Doppler indices of the equine fetal carotid artery throughout gestation. *Theriogenology.* 2020. Vol. 156, pp. 196-204.
- BUCCA, S., FOGARTY, U., COLLINS, A. et SMALL, V., 2005. Assessment of feto-placental well-being in the mare from mid-gestation to term: Transrectal and transabdominal ultrasonographic features. *Theriogenology.* 2005. Vol. 64, n° 3, pp. 542-557.
- BUISSON, S., 2005. Le suivi échographique de la fin de la gestation par voie transrectale. *Le Nouveau Praticien vétérinaire équine.* 2005. N° 3, pp. 16-20.
- BUSHONG, S. C. et ARCHER, B. R., 1991. *Diagnostic Ultrasound: Physics, Biology, and Instrumentation.* USA : Mosby-Year Book, 177 p.

- CAMPBELL, S., PEARCE, J. M., HACKETT, G., COHEN-OVERBEEK, T. et HERNANDEZ, C., 1986. Qualitative assessment of uteroplacental blood flow: early screening test for high-risk pregnancies. *Obstetrics and Gynecology*. 1986. Vol. 68, n° 5, pp. 649-653.
- CARD, C. E. et HILLMAN, R. B., 1993. Chapter 66 : Parturition. In : MCKINNON, A. O., VOSS, J. L., *Equine Reproduction*. Lea & Febiger Ed., 1993. pp. 567-573.
- CHETBOUL, V., POUCHELON, J.-L., TESSIER-VETZEL, D., BUREAU-AMAGLIO, S., BLOT, S., COTARD, J.-P., SIMON, M. et TAINURIER, D., 2005. *Échographie et doppler du chien et du chat: thorax, abdomen, oeil et système nerveux : atlas en couleur*. Paris : Masson, 453 p.
- CHEVALIER, F. et PALMER, E., 1982. Ultrasonic echography in the mare. *Journal of Reproduction and Fertility. Supplement*. 1982. Vol. 32, pp. 423-430.
- CHRISTENSEN, B. W., TROEDSSON, M. H. T., MURCHIE, T. A., POZOR, M. A., MACPHERSON, Margo L., ESTRADA, A. H., CARRILLO, N. A., MACKAY, R. J., ROBERTS, G. D. et LANGLOIS, J., 2006. Management of hydrops amnion in a mare resulting in birth of a live foal. *Journal of the American Veterinary Medical Association*. 2006. Vol. 228, n° 8, pp. 1228-1233.
- COLLES, C. M., PARKES, R. D. et MAY, C. J., 1978. Foetal Electrocardiography in the Mare. *Equine Veterinary Journal*. 1978. Vol. 10, n° 1, pp. 32-37.
- DA SILVA-ÁLVAREZ, E., GÓMEZ-ARRONES, V., MARTÍN-CANO, F. E., GAITSKELL-PHILLIPS, G., ORTIZ-RODRÍGUEZ, J. M., CARRASCO, J. J., GIL, M. C., PEÑA VEGA, F. J. et ORTEGA FERRUSOLA, C., 2022. Endometrial area of the blood flow as a marker of endometritis in equine. *Reproduction in Domestic Animals*. 2022. Vol. 57, n° Suppl 5, pp. 98-102.
- DAVIDSON, A. P., 2015. Tocodynamometry detects preterm labor in the bitch before luteolysis. *Topics in Companion Animal Medicine*. 2015. Vol. 30, n° 1, pp. 2-4.
- DOPPLER, J. C., 1942. Sur la lumière colorée des étoiles doubles et de quelques autres astres du ciel : essai d'une théorie plus générale incluant le théorème d'aberration de Bradley comme partie intégrante. In : *Traité de la Société royale des sciences de Bohême*. 1845. Royaume de Bohême. pp. 1165-1210.
- EBBING, C., RASMUSSEN, S. et KISERUD, T., 2007. Middle cerebral artery blood flow velocities and pulsatility index and the cerebroplacental pulsatility ratio: longitudinal reference ranges and terms for serial measurements. *Ultrasound in Obstetrics & Gynecology: The Official Journal of the International Society of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*. 2007. Vol. 30, n° 3, pp. 287-296.
- FARGHALI, H. A., ABDELKADER, N. A., FATHI, M., EMAM, I. A., ABUBAKR, H. O., ALIJUAYDI, S. H., SALEM, N. Y., KHATTAB, M. S., SALAMA, A., RAMADAN, E. S., YEHIA, Shima G. et ABDELNABY, E. A., 2022. The efficiency of intrauterine infusion of platelet-rich plasma in the treatment of acute endometritis as assessed by endoscopic, Doppler, oxidative, immunohistochemical, and gene expression alterations in jennies. *Theriogenology*. 2022. Vol. 181, pp. 147-160.

FERNANDES, C. B., 2012. Monitoring of the last third of gestation and peripartum disorders. *Animal Reproduction*. 2012. Vol. 9, n° 3, pp. 173-181.

FERREIRA, C. S. C., MORAIS, R. C. L., DE ANDRADE, A. B. P., BALARO, M. F. A., RIBAS, J. A. S., GOMES, G. M. et PINNA, A. E., 2020. Spectral Doppler ultrasound in selecting an equine embryo receiver. *Reproduction in Domestic Animals*. 2020. Vol. 55, n° 6, pp. 747-752.

FERREIRA, J. C., GASTAL, E. L. et GINTHER, O. J., 2008. Uterine blood flow and perfusion in mares with uterine cysts: effect of the size of the cystic area and age. *Reproduction*. 2008. Vol. 135, n° 4, pp. 541-550.

FISH, P., 1990. *Physics and Instrumentation of Diagnostic Medical Ultrasound*. Michigan : Wiley, 268 p.

FRASER, A. F., HASTIE, H., CALLICOTT, R. B. et BROWNLIE, S., 1975. An exploratory ultrasonic study on quantitative foetal kinesis in the horse. *Applied Animal Ethology*. 1975. Vol. 1, n° 4, pp. 395-404.

GASTAL, E. L., GASTAL, M. O. et GINTHER, O. J., 2006. Relationships of changes in B-mode echotexture and colour-Doppler signals in the wall of the preovulatory follicle to changes in systemic oestradiol concentrations and the effects of human chorionic gonadotrophin in mares. *Reproduction (Cambridge, England)*. 2006. Vol. 131, n° 4, pp. 699-709.

GINTHER, O. J., 1979. *Reproductive biology of the mare : basic and applied aspects*. Cross Plains, WI : Equiservices Publishing, 413 p.

GINTHER, O. J., 1983. Mobility of the early equine conceptus. *Theriogenology*. 1983. Vol. 19, n° 4, pp. 603-611.

GINTHER, O. J., 1995a. *Ultrasonic imaging and animal reproduction. Book 1: Fundamentals*. Cross Plains, WI : Equiservices Publishing, 225 p.

GINTHER, O. J., 1995b. *Ultrasonic imaging and animal reproduction. Book 2: Horses*. Cross Plains, WI : Equiservices Publishing, 394 p.

GINTHER, O. J., 1998. Equine pregnancy : physical interactions between the uterus and conceptus. In : *Proceedings of the 44th AAEP Annual Convention*. Baltimore, American Association of Equine Practitioners. 1998. pp. 73-104.

GINTHER, O. J., GASTAL, E. L. et GASTAL, M. O., 2007. Spatial Relationships between Serrated Granulosa and Vascularity of the Preovulatory Follicle and Developing Corpus Luteum. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2007. Vol. 27, n° 1, pp. 20-27.

GINTHER, O. J., GASTAL, E. L., GASTAL, M. O., UTT, M. D. et BEG, M. A., 2007. Luteal blood flow and progesterone production in mares. *Animal Reproduction Science*. 2007. Vol. 99, n° 1, pp. 213-220.

GINTHER, O. J. et GRIFFIN, P. G., 1993. Equine fetal kinetics: Presentation and location. *Theriogenology*. 1993. Vol. 40, n° 1, pp. 1-11.

- GINTHER, O. J. et UTT, M. D., 2004. Doppler ultrasound in equine reproduction: principles, techniques, and potential. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2004. Vol. 24, n° 12, pp. 516-526.
- GRIFFIN, P. G. et GINTHER, O. J., 1991. Uterine morphology and function in postpartum mares. *Journal of Equine Veterinary Science*. 1991. Vol. 11, n° 6, pp. 330-339.
- HACKMON, R., BARNHARD, Y., LESCALE, K. B., LUCIANO, D. E., FERBER, A. et DIVON, M. Y., 2005. Is Notching in the Umbilical Artery Doppler Waveform a Benign Finding? *Journal of Ultrasound in Medicine*. 2005. Vol. 24, n° 11, pp. 1561-1564.
- JAINUDEEN, M.R. et HAFEZ, E. S. E., 2000. Chapter 10: Gestation, Prenatal Physiology, and Parturition. In : *HAFEZ, B., HAFEZ, E. S. E., Reproduction in Farm Animals, Wiley, 2000.* pp. 140-155.
- JOSSON, A. et BUFF, S., 2017. Les affections de la gestation chez la jument. *Pratique Vétérinaire Equine*. 2017. N° Spécial 2017, pp. 33-37.
- KÄHN, W. et LEIDL, W., 1987. Ultrasonic biometry of horse fetuses in utero and sonographic representation of their organs. *Deutsche tierärztliche Wochenschrift*. 1987. Vol. 94, n° 9, pp. 509-515.
- KELLEY, D., LEBLANC, M. M., WARREN, L. K. et MORTENSEN, C. J., 2014. Influence of L-arginine supplementation on reproductive blood flow and embryo recovery rates in mares. *Theriogenology*. 2014. Vol. 81, n° 5, pp. 752-757.
- KLEWITZ, J., STRUEBING, C., ROHN, K., GOERGENS, A., MARTINSSON, G., ORGIES, F., PROBST, J., HOLLINSHEAD, F., BOLLWEIN, H. et SIEME, H., 2015. Effects of age, parity, and pregnancy abnormalities on foal birth weight and uterine blood flow in the mare. *Theriogenology*. 2015. Vol. 83, n° 4, pp. 721-729.
- KOTOYORI, Y., YOKOO, N., ITO, K., MURASE, H., SATO, F., KOROSUE, K. et NAMBO, Y., 2012. Three-dimensional ultrasound imaging of the equine fetus. *Theriogenology*. 2012. Vol. 77, n° 7, pp. 1480-1486.
- KURJAK, A. et FLEISCHER, A. C., 1998. *Doppler ultrasound in gynecology*. New York : Parthenon Publ. Group, 166 p.
- LEBLANC, M., 2008. Common Peripartum Problems in the Mare. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2008. Vol. 28, pp. 709-715.
- LEBLANC, M. M., 2010. Ascending placentitis in the mare: an update. *Reproduction in Domestic Animals*. 2010. Vol. 45, pp. 28-34.
- LEMES, K. M., SILVA, L. A., ALONSO, M. A., CELEGHINI, E. C. C., PUGLIESI, G., CARVALHO, H. F., AFFONSO, F. J., SILVA, D. F., LEITE, T. G. et DE ARRUDA, R. P., 2017. Uterine Vascular Perfusion and Involution During the Postpartum Period in Mares. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2017. Vol. 51, pp. 61-69.

- LÜTTGENAU, J., IMBODEN, I., WELLNITZ, O., ROMER, R., SCARAVAGGI, I., NEVES, A. P., BOREL, N., BRUCKMAIER, R. M., JANETT, F. et BOLLWEIN, H., 2021. Intrauterine infusion of killed semen adversely affects uterine blood flow and endometrial gene expression of inflammatory cytokines in mares susceptible to persistent breeding-induced endometritis. *Theriogenology*. 2021. Vol. 163, pp. 18-30.
- MANNING, F. A., HARMAN, C. R., MENTICOLOU, S. et MORRISON, I., 1991. Assessment of fetal well-being with ultrasound. *Obstetrics and Gynecology Clinics of North America*. 1991. Vol. 18, n° 4, pp. 891-905.
- MCDOWELL, K. J., SHARP, D. C., GRUBAUGH, W., THATCHER, W. W. et WILCOX, C. J., 1988. Restricted conceptus mobility results in failure of pregnancy maintenance in mares. *Biology of Reproduction*. 1988. Vol. 39, n° 2, pp. 340-348.
- MCGLADDERY, A. L., OUSEY, J. C. et ROSSDALE, P. D., 1993. Serial Doppler ultrasound studies of the umbilical artery during equine pregnancy. In : *Proceedings of the Third Conference of the International Veterinary Perinatology Society*. Davis. 1993. pp. 37.
- MCGLADDERY, A.J. et OUSEY, J.C., 2016. Vascular impedance of the umbilical cord artery during equine pregnancy. *Equine Veterinary Journal*. 2016. N° 48, pp. 1-30.
- MCKINNON, A. O., SQUIRES, E. L., VAALA, W. E. et VARNER, D. D., 2011. Part III: The Mare. In : *Equine Reproduction, 2nd Edition*. Royaume-Uni : John Wiley & Sons. pp. 1577-2867.
- MEBARKI, M., KAIDI, R., AZIZI, A. et BASBACI, M., 2019. Comparative efficacy of two-dimensional mode and color Doppler sonography in predicting gender of the equine fetus. *Veterinary World*. 2019. Vol. 12, n° 2, pp. 325-330.
- MESA, A. M., WARREN, L. K., SHEEHAN, J. M., KELLEY, D. E. et MORTENSEN, C. J., 2015. L-Arginine supplementation 0.5% of diet during the last 90 days of gestation and 14 days postpartum reduced uterine fluid accumulation in the broodmare. *Animal Reproduction Science*. 1 août 2015. Vol. 159, pp. 46-51.
- MO, L. Y., BASCOM, P. A., RITCHIE, K. et MCCOWAN, L. M., 1988. A transmission line modelling approach to the interpretation of uterine Doppler waveforms. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 1988. Vol. 14, n° 5, pp. 365-376.
- MOREAU, P., 2013. L'hydropisie des annexes foétales : démarche diagnostique et thérapeutique (série de 4 cas). In : *Congrès de l'AVEF*. Deauville. 2013.
- MURPHY, B. D. et MARTINUK, S. D., 1991. Equine chorionic gonadotropin. *Endocrine Reviews*. 1991. Vol. 12, n° 1, pp. 27-44.
- NIETO-OLMEDO, P., MARTÍN-CANO, F. E., GAITSKELL-PHILLIPS, G., ORTIZ-RODRÍGUEZ, J. M., PEÑA, F. J. et ORTEGA-FERRUSOLA, C., 2020. Power Doppler can detect the presence of 7-8 day conceptuses prior to flushing in an equine embryo transfer program. *Theriogenology*. 2020. Vol. 145, pp. 1-9.

- O'GRADY, J. P., YEAGER, C. H., FINDLETON, L., BROWN, J. et ESTRA, G., 1981. In utero visualization of the fetal horse by ultrasonic scanning. *Equine Pract.* 1981. N° 3, pp. 45-49.
- ORTEGA-FERRUSOLA, C., GÓMEZ-ARRONES, V., MARTÍN-CANO, F. E., GIL, M. C., PEÑA, F. J., GAITSKELL-PHILLIPS, G. et DA SILVA-ÁLVAREZ, E., 2022. Advances in the ultrasound diagnosis in equine reproductive medicine: New approaches. *Reproduction in Domestic Animals.* 2022. Vol. 57, n° Suppl 5, pp. 34-44.
- PALMER, E. et DRIANCOURT, M. A., 1980. Use of ultrasonic echography in equine gynecology. *Theriogenology.* 1980. Vol. 13, n° 3, pp. 203-216.
- PAUL-JEANJEAN, S., 2014. L'hydropisie des annexes fœtales chez la jument. *La Semaine Vétérinaire.* 2014. N° 1577, pp. 55.
- PIPERS, F. S. et ADAMS-BRENDEMUEHL, C. S., 1984. Techniques and applications of transabdominal ultrasonography in the pregnant mare. *Journal of the American Veterinary Medical Association.* 1984. Vol. 185, n° 7, pp. 766-771.
- POWEL, D. G., 2011. Mare reproductive loss syndrome. In : MCKINNON, A. O., SQUIRES, E. L., VAALA, W. E., et al. *Equine reproduction.* John Wiley & Sons, 2011. pp. 2410-2417.
- POWIS, R. L., 1986. Ultrasound science for the veterinarian. *The Veterinary Clinics of North America. Equine Practice.* 1986. Vol. 2, n° 1, pp. 3-27.
- RANTANEN, N. W., TORBECK, R. L. et DUMOND, S. S., 1982. Early pregnancy diagnosis in the mare using transrectal ultrasound scanning techniques: A preliminary report. *Journal of Equine Veterinary Science.* 1982. Vol. 2, n° 1, pp. 27-29.
- REDLINE, R. W. et RAVISHANKAR, S., 2018. Fetal vascular malperfusion, an update. *APMIS: acta pathologica, microbiologica, et immunologica Scandinavica.* 2018. Vol. 126, n° 7, pp. 561-569.
- REEF, V. B., VAALA, W. E., WORTH, L. T., SERTICH, Pa. L. et SPENCER, P. A., 1996. Ultrasonographic assessment of fetal well-being during late gestation: development of an equine biophysical profile. *Equine Veterinary Journal.* 1996. Vol. 28, n° 3, pp. 200-208.
- REEF, V. B., VAALA, W. E., WORTH, L. T., SPENCER, P. A. et HAMMETT, B., 1995. Ultrasonographic evaluation of the fetus and intrauterine environment in healthy mares during late gestation. *Veterinary Radiology and Ultrasound.* 1995. Vol. 36, n° 6, pp. 533-541.
- REIMER, J. M., 1997. Use of Transcutaneous Ultrasonography in Complicated Latter-Middle to Late Gestation Pregnancies in the Mare: 122 Cases. In : *Proceedings of the Annual Convention of the American Association of Equine Practitioners.* 1997. pp. 259-261.
- RENAUDIN, C. et BRUYAS, J.-F., 2017. ECUP : mesure et application pratique chez la jument. *Pratique Vétérinaire Equine.* 2017. N° Spécial 2017, pp. 24-28.
- RENAUDIN, C. et CONLEY, A. J., 2023. Pregnancy monitoring in mares: Ultrasonographic and endocrine approaches. *Reproduction in Domestic Animals.* 2023.

RENAUDIN, C. D., GILLIS, C. L., TARANTAL, A. F. et COLEMAN, D. A., 2000. Evaluation of equine fetal growth from day 100 of gestation to parturition by ultrasonography. *Journal of Reproduction and Fertility. Supplement*. 2000. N° 56, pp. 651-660.

RENAUDIN, C. D., TROEDSSON, M. H. T., GILLIS, C. L., KING, V. L. et BODENA, A., 1997. Ultrasonographic evaluation of the equine placenta by transrectal and transabdominal approach in the normal pregnant mare. *Theriogenology*. 1997. Vol. 47, n° 2, pp. 559-573.

RESENDE, H. L., CARMO, M. T., RAMIRES NETO, C. et ALVARENGA, M. A., 2014. Determination of equine fetal sex by Doppler ultrasonography of the gonads. *Equine Veterinary Journal*. 2014. Vol. 46, n° 6, pp. 756-758.

ROWLANDS, I. W., ALLEN, W. R. et ROSSDALE, P. D., 1975. *Equine Reproduction: Proceedings of the First International Symposium on Equine Reproduction*. Royaume-Uni : Blackwell Scientific Publications, 746 p.

SAVAGE, N. C. et LIPTRAP, R. M., 1987. Induction of ovulation in cyclic mares by administration of a synthetic prostaglandin, fenprostalene, during oestrus. *Journal of Reproduction and Fertility*. 1987. Vol. Supplement, n° 35, pp. 239-243.

SCHUSTER, P. M., 2005. *Moving the Stars: Christian Doppler, His Life, His Works and Principle, and the World After*. Royaume-Uni : Living Edition, 236 p.

SHARP, D. C. et CLEAVER, B. D., 1993. Chapter 11 : Melatonin. In : MCKINNON, A. O., VOSS, J. L., *Equine Reproduction*. Lea & Febiger Ed., 1993. pp. 100-107.

SILVA, L. A., GASTAL, E. L., BEG, M. A. et GINTHER, O. J., 2005. Changes in vascular perfusion of the endometrium in association with changes in location of the embryonic vesicle in mares. *Biology of Reproduction*. 2005. Vol. 72, n° 3, pp. 755-761.

SILVA, L. A. et GINTHER, O. J., 2006. An early endometrial vascular indicator of completed orientation of the embryo and the role of dorsal endometrial encroachment in mares. *Biology of Reproduction*. 2006. Vol. 74, n° 2, pp. 337-343.

SIMPSON, D. J., GREENWOOD, R. E., RICKETTS, S. W., ROSSDALE, P. D., SANDERSON, M. et ALLEN, W. R., 1982. Use of ultrasound echography for early diagnosis of single and twin pregnancy in the mare. *Journal of Reproduction and Fertility*. 1982. Vol. Supplement, n° 3, pp. 431-439.

SLOVIS, N.M., LU, K.G., WOLFSDORF, K.E. et ZENT, W.W., 2013. How to Manage Hydrops Allantois/Hydrops Amnion in a Mare. In : *AAEP Annual Convention*. Nashville : AAEP Proceedings. 2013. pp. 34-39.

SMITS, K., GANSEMANS, Y., TILLEMANS, L., VAN NIEUWERBURGH, F., VAN DE VELDE, M., GERITS, I., VERVERS, C., ROELS, K., GOVAERE, J., PEELMAN, L., DEFORCE, D. et VAN SOOM, A., 2020. Maternal Recognition of Pregnancy in the Horse: Are MicroRNAs the Secret Messengers? *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21, n° 2, pp. 1-17.

- SQUIRES, E. L., MCKINNON, A. O. et SHIDELER, R. K., 1988. Use of ultrasonography in reproductive management of mares. *Theriogenology*. 1988. Vol. 29, n° 1, pp. 55-70.
- STANTON, M. B., STEINER, J. V. et PUGH, D. G., 2004. Endometrial cysts in the mare. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2004. Vol. 24, n° 1, pp. 14-19.
- STOUT, T. A. et ALLEN, W. R., 2001. Role of prostaglandins in intrauterine migration of the equine conceptus. *Reproduction*. 2001. Vol. 121, n° 5, pp. 771-775.
- THALER, I., WEINER, Z. et ITSKOVITZ, J., 1992. Systolic or diastolic notch in uterine artery blood flow velocity waveforms in hypertensive pregnant patients: relationship to outcome. *Obstetrics and Gynecology*. 1992. Vol. 80, n° 2, pp. 277-282.
- VAALA, W. E. et SERTICH, P. L., 1994. Management strategies for mares at risk for periparturient complications. *The Veterinary Clinics of North America. Equine Practice*. 1994. Vol. 10, n° 1, pp. 237-265.
- VAN DE VELDE, M., ROELS, K., VERVERS, C., GERITS, I. et GOVAERE, J., 2018. Equine foetal gender determination in mid- to late gestational mares: A practical inquiry. *Reproduction in Domestic Animals*. 2018. Vol. 53, n° 5, pp. 1027-1032.
- VINCZE, B., BASKA, F., PAPP, M. et SZENCI, O., 2019. Introduction of a new fetal examination protocol for on-field and clinical equine practice. *Theriogenology*. 2019. Vol. 125, pp. 210-215.

UTILISATION DE L'ÉCHOGRAPHIE DOPPLER DANS LE DOMAINE DE LA REPRODUCTION CHEZ LA JUMENT

Auteur

ABGRALL Coline

Résumé

Face à l'essor important des biotechnologies et des outils à disposition du vétérinaire, de nombreux enjeux économiques et sanitaires sont à prendre en considération dans le domaine de la reproduction équine. L'échographie Doppler est un des moyens récemment étudiés afin d'optimiser la mise à la reproduction et le suivi d'une jument. Selon les données actuelles, l'étude de la perfusion vasculaire utérine, ovarienne, folliculaire et lutéale, et, en cas de gestation, de la perfusion vasculaire du fœtus, est utile. Elle permet d'une part, d'augmenter les chances de gestation, et, d'autre part, d'avoir un suivi plus précoce et précis de la santé maternelle et fœtale en cas de gestation avérée. Les notions de praticité et de répétabilité de cet examen sont toutefois discutées.

Dans cette étude bibliographique, sont présentés tout d'abord les principes physiques généraux de l'échographie Doppler ainsi que les bases anatomiques et physiologiques nécessaires à cet examen chez la jument en reproduction. Cette étude évalue l'utilité de l'échographie Doppler dans la mise à la reproduction d'une jument, dans une seconde partie, et dans le suivi de la gestation chez la jument, dans une troisième partie.

Mots-clés

Echographie, Doppler, Reproduction, Equine, Jument

Jury

Président du jury : Pr DORET-DION Muriel

Directeur de thèse : Dr LEFRANC-POHL Anne-Cécile

2ème assesseur : Pr CADORE Jean-Luc