

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2022 - Thèse n° 054

SPECIFICITES DE L'ALIMENTATION LORS DE LA MISE A LA REPRODUCTION DES GENISSES

THESE

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

Et soutenue publiquement le 12 octobre 2022
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

ROBERT Céline

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2022 - Thèse n° 054

**SPECIFICITES DE L'ALIMENTATION LORS DE LA MISE
A LA REPRODUCTION DES GENISSES**

THESE

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

Et soutenue publiquement le 12 octobre 2022
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

ROBERT Céline

Liste des enseignants du Campus vétérinaire de Lyon (26-01-2022)

Mme	ABITBOL	Marie	Professeur
M.	ALVES-DE-OLIVEIRA	Laurent	Maître de conférences
Mme	ARCANGIOLI	Marie-Anne	Professeur
Mme	AYRAL	Florence	Maître de conférences
Mme	BECKER	Claire	Maître de conférences
Mme	BELLUCO	Sara	Maître de conférences
Mme	BENAMOU-SMITH	Agnès	Maître de conférences
M.	BENOIT	Etienne	Professeur
M.	BERNY	Philippe	Professeur
Mme	BONNET-GARIN	Jeanne-Marie	Professeur
M.	BOURGOIN	Gilles	Maître de conférences
M.	BRUTO	Maxime	Maître de conférences Stagiaire
M.	BRUYERE	Pierre	Maître de conférences
M.	BUFF	Samuel	Professeur
M.	BURONFOSSE	Thierry	Professeur
M.	CACHON	Thibaut	Maître de conférences
M.	CADORÉ	Jean-Luc	Professeur
Mme	CALLAIT-CARDINAL	Marie-Pierre	Professeur
M.	CHABANNE	Luc	Professeur
Mme	CHALVET-MONFRAY	Karine	Professeur
M.	CHAMEL	Gabriel	Maître de conférences
M.	CHETOT	Thomas	Maître de conférences Stagiaire
Mme	DE BOYER DES ROCHES	Alice	Maître de conférences
Mme	DELIGNETTE-MULLER	Marie-Laure	Professeur
Mme	DJELOUADJI	Zorée	Professeur
Mme	ESCRIOU	Catherine	Maître de conférences
M.	FRIKHA	Mohamed-Ridha	Maître de conférences
M.	GALIA	Wessam	Maître de conférences
M.	GILLET	Benoit	AERC
Mme	GILOT-FROMONT	Emmanuelle	Professeur
M.	GONTHIER	Alain	Maître de conférences
Mme	GREZEL	Delphine	Maître de conférences
Mme	HUGONNARD	Marine	Maître de conférences
Mme	JOSSON-SCHRAMME	Anne	Chargé d'enseignement contractuel
M.	JUNOT	Stéphane	Professeur
M.	KODJO	Angeli	Professeur
Mme	KRAFFT	Emilie	Maître de conférences
Mme	LAABERKI	Maria-Halima	Maître de conférences
Mme	LAMBERT	Véronique	Maître de conférences
Mme	LE GRAND	Dominique	Professeur
Mme	LEBLOND	Agnès	Professeur
Mme	LEDOUX	Dorothée	Maître de conférences
M.	LEFEBVRE	Sébastien	Maître de conférences
Mme	LEFRANC-POHL	Anne-Cécile	Maître de conférences
M.	LEGROS	Vincent	Maître de conférences
M.	LEPAGE	Olivier	Professeur
Mme	LOUZIER	Vanessa	Professeur
M.	LURIER	Thibaut	Maître de conférences Stagiaire
M.	MAGNIN	Mathieu	Maître de conférences Stagiaire
M.	MARCHAL	Thierry	Professeur
Mme	MOSCA	Marion	Maître de conférences
M.	MOUNIER	Luc	Professeur
Mme	PEROZ	Carole	Maître de conférences
M.	PIN	Didier	Professeur
Mme	PONCE	Frédérique	Professeur
Mme	PORTIER	Karine	Professeur
Mme	POUZOT-NEVORET	Céline	Maître de conférences
Mme	PROUILLAC	Caroline	Professeur
Mme	REMY	Denise	Professeur
Mme	RENE MARTELLET	Magalie	Maître de conférences
M.	ROGER	Thierry	Professeur
M.	SAWAYA	Serge	Maître de conférences
M.	SCHRAMME	Michael	Professeur
Mme	SERGENTET	Delphine	Professeur
M.	TORTEREAU	Antonin	Maître de conférences
Mme	VICTONI	Tatiana	Maître de conférences
M.	VIGUIER	Eric	Professeur
Mme	VIRIEUX-WATRELOT	Dorothée	Chargé d'enseignement contractuel
M.	ZENNER	Lionel	Professeur

Remerciements

A Monsieur le Professeur Olivier MONNEUSE

De l'Université Claude Bernard – Lyon I, Faculté de médecine de Lyon
Qui m'a fait *l'honneur* d'accepter la présidence de mon jury de thèse,
Mes hommages respectueux.

A Monsieur le Docteur Laurent ALVES DE OLIVEIRA

De VetAgro-Sup, Campus vétérinaire de Lyon
Pour avoir accepté la direction de cette thèse,
Pour votre aide et vos conseils,
Mes plus sincères remerciements.

A Madame la Professeure Marie-Anne ARCANGIOLI

De VetAgro -Sup, Campus vétérinaire de Lyon
Pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse,
Mes sincères remerciements.

Table des matières

Table des annexes.....	13
Tables des figures.....	15
Tables des tableaux.....	17
Liste des abréviations.....	19
Introduction.....	21
I. La mise à la reproduction des génisses	23
A. Physiologie de la reproduction	23
1. Physiologie de la reproduction de la vache adulte	23
a) Le cycle ovarien	23
(1) Dynamique folliculaire : les vagues folliculaires.....	23
(2) Dynamique du corps jaune	24
b) Reconnaissance maternelle et maintien de la gestation	24
2. Mise en place de la fonction de reproduction chez la génisse	24
a) Définition de la puberté.....	24
b) Modification des organes reproducteurs	25
(1) Les ovaires	25
(2) Le tractus génital	25
c) Régulation hormonale de la puberté	25
(1) Modèle hormonal lors de la prépuberté.....	25
(2) Induction de la puberté : la péripuberté.....	26
(3) Rôle des courtes phases lutéales	26
d) Facteurs influençant l'apparition de la puberté.....	28
(1) Race et génétique	28
(2) Nutrition, poids et taux de croissance	28
(3) Saison	29
(4) Environnement social	30
(5) Exposition aux progestatifs.....	30
B. Objectifs zootechniques	30
1. Objectifs de croissance et de reproduction	30
a) Choix du moment de la mise à la reproduction	30
b) Objectifs de croissance selon l'âge au premier vêlage	32
(1) En élevage laitier	32
(a) Pour un premier vêlage à 2 ans	32
(b) Pour un premier vêlage à 3 ans	32
(c) Lien entre la croissance et la production laitière	34
(2) En élevage allaitant.....	35

(a)	Pour un premier vêlage à 2 ans	35
(b)	Pour un premier vêlage à 3 ans	35
(3)	Intérêt de la croissance compensatrice	36
2.	Etat des lieux des performances de reproduction des génisses en France	37
a)	Génisses laitières	37
b)	Génisses allaitantes	38
II.	Spécificité de l'alimentation des génisses lors de la mise à la reproduction	39
A.	Etat d'engraissement.....	39
B.	Energie	39
1.	Recommandations.....	39
2.	Effets des différents niveaux d'apports énergétiques	42
a)	Restriction énergétique	42
(1)	Restriction énergétique et fonction ovarienne	42
(2)	Restriction énergétique et survie embryonnaire	43
(3)	Cas particuliers du transfert embryonnaire et de la superovulation	44
b)	Augmentation des apports énergétiques	44
(1)	Flushing.....	44
(2)	Cas de la mise au pâturage	45
(3)	Réalimentation après un anœstrus induit par une restriction énergétique	45
(4)	Effet d'une augmentation des apports énergétiques de longue durée	46
3.	Effets des sources d'énergie	46
a)	Apports de glucides	46
b)	Apport de lipides	47
(1)	Augmentation de la teneur en matière grasse de la ration	47
(2)	Nature des acides gras	47
(3)	Intérêt des lipides protégés du rumen.....	48
B.	Protéines	48
1.	Rappels sur la digestion de la matière azotée	48
2.	Recommandations.....	49
3.	Effets de la quantité et de la nature des protéines.....	52
a)	Insuffisance d'azote	52
b)	Excès de protéines alimentaires	52
c)	Excès d'azote fermentescible	52
(1)	Activité ovarienne.....	52
(2)	Fertilité et fécondité	53
(a)	Réussite à l'IA.....	53

(b)	Taux de gestation.....	53
(c)	Qualité et survie des embryons	54
D.	Minéraux.....	55
1.	Macro-éléments	56
a)	Calcium.....	56
(1)	Apports recommandés	56
(2)	Importance lors de la mise à la reproduction	56
b)	Phosphore	57
(1)	Apports recommandés	57
(2)	Importance lors de la mise à la reproduction	57
c)	Magnésium.....	58
(1)	Apports recommandés	58
(2)	Importance lors de la mise à la reproduction	58
d)	Sodium.....	58
(1)	Apports recommandés	58
(2)	Importance lors de la mise à la reproduction	59
e)	Potassium.....	59
(1)	Apports recommandés	59
(2)	Importance lors de la mise à la reproduction	59
f)	Chlore	60
(1)	Apports recommandés	60
(2)	Importance lors de la mise à la reproduction	60
g)	Soufre	60
(1)	Apports recommandés	60
(2)	Importance lors de la mise à la reproduction	60
2.	Microéléments	63
a)	Cuivre	64
(1)	Apports recommandés	64
(2)	Importance lors de la mise à la reproduction	64
b)	Zinc.....	65
(1)	Apports recommandés	65
(2)	Importance lors de la mise à la reproduction	65
c)	Sélénium.....	66
(1)	Apports recommandés	66
(2)	Importance lors de la mise à la reproduction	66
d)	Manganèse.....	67

(1) Apports recommandés	67
(2) Importance lors de la mise à la reproduction	67
e) Cobalt	68
(1) Apports recommandés	68
(2) Importance lors de la mise à la reproduction	68
f) Iode.....	69
(1) Apports recommandés	69
(2) Importance lors de la mise à la reproduction	69
g) Effet des formes d'oligoéléments	69
h) Apports d'un mélange d'oligoéléments.....	70
(1) Mélange donné <i>per os</i>	70
(2) Apport par voie injectable	70
E. Vitamines.....	72
1. Vitamines hydrosolubles	73
a) Les vitamines B	73
(1) Apports recommandés	73
(2) Intérêt en reproduction	73
(a) Vitamine B1	74
(b) Vitamine B2	74
(c) Vitamine B3	74
(d) Vitamine B5	74
(e) Vitamine B6	74
(f) Vitamine B8	74
(g) Vitamine B9	74
(h) Vitamine B12	75
b) Vitamine C	75
(1) Apports recommandés	75
(2) Intérêt en reproduction	75
2. Vitamines liposolubles.....	75
a) Vitamine A et β -carotène	75
(1) Apports recommandés	76
(2) Intérêt en reproduction	76
(a) Effet de la vitamine A.....	76
(b) Effet du β -carotène.....	77
(i) Activité ovarienne	77
(ii) Fertilité et fécondité	78

b)	Vitamine D	78
(1)	Apports recommandés	79
(2)	Intérêt en reproduction	79
c)	Vitamine E	79
(1)	Apports recommandés	80
(2)	Intérêt en reproduction	80
d)	Vitamine K	81
(1)	Apports recommandés	81
(2)	Intérêt en reproduction	81
III.	Exemples de rations lors de la mise à la reproduction	82
A.	Les principes du rationnement	82
1.	Caractéristiques des animaux	82
a)	La capacité d'ingestion	83
b)	Les besoins alimentaires	85
(1)	Besoins d'entretien	85
(2)	Besoins de production	85
(a)	Besoins de croissance	85
(b)	Besoins de gestation	86
(c)	Besoins de lactation	86
2.	Caractéristiques des aliments pour les génisses	86
B.	Exemples de rations pour les génisses lors de la mise à la reproduction	86
1.	Génisses laitières	86
a)	Vêlage 2 ans	86
b)	Vêlage 3 ans	87
2.	Génisses allaitantes	88
a)	Vêlage 2 ans	88
b)	Vêlage 3 ans	88
3.	Particularité des besoins en minéraux et vitamines	89
a)	Choix de l'AMV	89
(1)	Exemples d'AMV utilisables avec les rations proposées	89
(2)	Choix de l'AMV à partir du rapport phosphocalcique	90
b)	Verification des apports en oligoéléments et vitamine	90
(1)	Apport en oligoéléments	90
(2)	Apport en vitamines	91
	Conclusion	93
	Bibliographie	95
	Annexes	109

Table des annexes

Annexe 1 : Exemple de courbes de croissance de génisses laitière (BROCARD et LECLERC, 2010).....	109
Annexe 2 : Exemple de courbes de croissance de génisses allaitantes (CHAMBRE D'AGRICULTURE DES PAYS DE LA LOIRE, 2010).....	110
Annexe 3 : Grille d'évaluation de la Note d'Etat Corporelle (NEC) (traduit de EDMONSON, 1989).....	114
Annexe 4 : Apports énergétiques recommandés, besoins PDI, capacité d'ingestion et DERm en fonction du poids et du GMQ pour des génisses allaitantes (INRA, 2018).....	115
Annexe 5 : Apports énergétiques recommandés, besoins PDI, capacité d'ingestion et DERm en fonction du poids et du GMQ pour des génisses laitières (INRA, 2018).....	116
Annexe 6 : Besoins alimentaires des génisses allaitantes (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000).....	117
Annexe 7 : Besoins alimentaires des génisses laitières (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).....	118
Annexe 8 : Principales fonctions physiologiques des minéraux essentiels (INRA, 2018).....	120
Annexe 9 : Principales fonctions physiologiques des oligoéléments (INRA, 2018).....	121
Annexe 10 : Principales fonctions physiologiques des vitamines (INRA, 2018).....	122

Tables des figures

Figure 1 : Inversion du rétrocontrôle de l'œstradiol sur l'hypothalamus (d'après ATKINS et al, 2013; NOAKES et al., 2019)	27
Figure 2 : Relation entre le GMQ depuis la naissance et l'âge à la puberté (LE COZLER et al., 2009, d'après TROCCON ET PETIT, 1989).....	29
Figure 3 : Courbes de croissance des génisses laitières selon l'âge au premier vêlage et le poids adulte (d'après BROCARD et LECLERC, 2010).....	33
Figure 4 : Production laitière en première lactation en fonction du GMQ prépubère (ZANTON et HEINRICH, 2005).....	34
Figure 5 : Cinétique de développement de la glande mammaire (LE COZLER, 2015).....	35
Figure 6 : Courbes de croissance des génisses allaitantes selon l'âge au premier vêlage et le poids adulte (d'après AGABRIEL et al., 2014).....	36
Figure 7 : Schéma simplifié de la digestion de la matière azotée et des glucides (d'après INRA, 2010; McDONALD et al., 2022).....	49
Figure 8 : Principe de la manifestation des carences en oligoéléments (d'après MESCHY, 2017).....	63
Figure 9 : Evolution de la constitution du gain lors de la croissance chez les bovins (LE COZLER et al, 2009).....	85

Table des tableaux

Tableau I : Modifications hormonales conduisant à la puberté (d'après YOUNGQUIST et THRELFALL, 2007).....	27
Tableau II : Les facteurs influençant la puberté et leurs effets	30
Tableau III : Objectifs de croissance chez les génisses laitières selon l'âge au premier vêlage.....	33
Tableau IV : Objectifs de croissance chez les génisses allaitantes selon l'âge au premier vêlage.....	36
Tableau V : Performances de reproduction des génisses laitières en France, données du reproducteur (d'après INSTITUT DE L'ELEVAGE, 2020).....	37
Tableau VI : Performances de reproduction des génisses allaitantes en France, données du reproducteur (d'après INSTITUT DE L'ELEVAGE, 2020).....	38
Tableau VII : Apports énergétiques recommandés pour les génisses laitières et allaitantes selon le poids vif et le GMQ (d'après INRA, 2018).....	41
Tableau VIII : Besoins en PDI pour les génisses laitières et allaitantes en fonction du poids vif et du GMQ (d'après INRA, 2018).....	51
Tableau IX : Besoins en macroéléments pour les génisses laitières en fonction du poids et du GMQ (d'après INRA, 2018; MESCHY, 2017; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001).....	61
Tableau X : Besoins en macroéléments pour les génisses allaitantes en fonction du poids et du GMQ (d'après INRA, 2018; MESCHY, 2017; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001).....	62
Tableau XI : Teneurs physiologiques, valeurs seuils de carence et seuils de toxicité des macroéléments (d'après INRA, 2018; MESCHY, 2017; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001).....	62
Tableau XII : Apports journaliers recommandés, seuils de carence et limites de toxicité des oligoéléments chez les génisses (INRA, 2018; MESCHY, 2017).....	71
Tableau XIII : Teneurs physiologiques, valeurs seuils de carence et seuils de toxicité des microéléments (d'après BURNETT, 2017; INRA, 2018; MESCHY, 2017; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001).....	72
Tableau XIV : Le complexe des vitamines B (d'après MCDOWELL, 2000 ; WU, 2018).....	73
Tableau XV : Apports journaliers recommandés en vitamine pour les génisses selon le poids et le type de production (BROCARD & LECLERC, 2010; INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE, 2018; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001).....	82
Tableau XVI : Capacité d'ingestion (CI) et densité énergétique minimale de la ration (DER _m) pour les génisses laitières et allaitantes en fonction du poids vif et du GMQ (d'après (INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE, 2018).....	84
Tableau XVII : Exemples de rations pour des génisses laitières lors de la mise à la reproduction avec un objectif de premier vêlage à 2 ans.....	87

Tableau XVIII : Exemples de rations pour des génisses laitières lors de la mise à la reproduction avec un objectif de premier vêlage à 3 ans.....	87
Tableau XIX : Exemples de rations pour des génisses allaitantes lors de la mise à la reproduction avec un objectif de premier vêlage à 2 ans.....	88
Tableau XX : Exemples de rations pour des génisses allaitantes lors de la mise à la reproduction avec un objectif de premier vêlage à 3 ans.....	89
Tableau XXI : Teneurs minimales de l'AMV en soufre et oligoéléments.....	90
Tableau XXII : Teneurs minimales en vitamines de l'AMV.....	91

Liste des abreviations

AG = Acide Gras

AGV = Acide Gras Volatile

AMV = Aliment Minéral et Vitaminique

ATP = Adénosine Triphosphate

BCS = Body Condition Score

BPR = Balance Protéique Ruminale

Ca = Calcium

Ca_{abs} = Calcium absorbable

CI = Capacité d'Ingestion

Cl = Chlore

Co = Cobalt

Cu = Cuivre

DERm = Densité Energétique minimale de la Ration

EffPDI = Efficacité d'utilisation des PDI

Fe = Fer

FSH = Follicle Stimulating Hormone = Hormone folliculostimulante

GH = Growth Hormone

GMQ = Gain Moyen Quotidien

GnRH = Gonadotropin-Releasing Hormone = Gonadolibérine

I = Iode

IA = Insémination Artificielle

IFN = Interféron

IGF = Insuline-like Growth Factor

INRA = Institut National de la Recherche Agronomique

K = Potassium

LH = Luteizing Hormone = Hormone Lutéinisante

Mg = Magnésium

Mn = Manganèse

Mo = Molybdène

MP = Metabolisable Protein = Protéine Métabolisable

MS = Matière Sèche

MSI = Matière Sèche Ingérée

Na = Sodium

NEC = Note d'Etat Corporelle

NH₃ = Ammoniac

NRC = National Research Council

P = Phosphore

P_{abs} = Phosphore absorbable

PB = Protéine Brute

PDI = Protéines Digestibles dans l'Intestin

PDIA = Protéines Digestibles dans l'Intestin d'origine Alimentaire

PDIM = Protéines Digestibles dans l'Intestin d'origine Microbienne

PGF2 α = Prostaglandine F2 α

PV = Poids Vif

RDP = Ruminally Degraded Protein = protéines dégradables dans le rumen

RUP = Ruminally Undegraded Protein = protéines non dégradables dans le rumen

S = Soufre

Se = Sélénium

UEB = Unité d'Encombrement Bovin

UF = Unité Fourragère

UFL = Unité Fourragère Lait

UI = Unité Internationale

Zn = Zinc

Introduction

La reproduction est un enjeu majeur en élevage bovin quelque soit le type de production. En effet, en élevage laitier, la production laitière est conditionnée par la naissance d'un veau et en élevage allaitant ce sont les veaux qui assurent un revenu à l'éleveur. Les performances de reproduction sont donc essentielles pour la rentabilité d'un élevage. A l'image de celle des vaches adultes, il est primordial que la reproduction des génisses soit maîtrisée. Ainsi, une mise à la reproduction précoce et réussie permet de réduire la durée de la période improductive des génisses et par conséquent d'apporter un revenu plus rapidement à l'éleveur.

Parmi les paramètres déterminant pour la fonction de reproduction, l'importance de l'alimentation fait désormais consensus. Celle-ci influence l'ensemble des paramètres de reproduction : cyclicité, fécondité, fertilité et développement embryonnaire. Or le pré-troupeau étant souvent considéré comme un atelier secondaire, l'alimentation des génisses n'est pas aussi bien maîtrisée que celle des vaches adultes bien que ce poste représente le principal coût d'élevage des génisses.

Cette thèse a pour objectif de faire un état des lieux des pratiques alimentaires à privilégier lors de la mise à la reproduction des génisses allaitantes et laitières afin d'optimiser les performances de reproduction.

La première partie rappellera brièvement la physiologie de la reproduction et de l'acquisition de la puberté ainsi que les objectifs zootechniques liés à la croissance et la reproduction des génisses. Ensuite, la deuxième partie détaillera les recommandations actuelles et les effets des variations d'apport en énergie, protéines, minéraux et vitamines lors de la mise à la reproduction sur les performances de reproduction des génisses. Pour finir, la troisième partie présentera des rations types pouvant être distribuées aux génisses en période de reproduction.

I. La mise à la reproduction des génisses

A. Physiologie de la reproduction

1. Physiologie de la reproduction de la vache adulte

La compréhension des mécanismes de l'acquisition de la puberté chez les génisses nécessite un rappel de la physiologie sexuelle de la vache adulte.

a) *Le cycle ovarien*

Le cycle ovarien dure entre 18 et 24 jours (avec une moyenne de 21 jours) et est divisé en deux phases : la phase folliculaire et la phase lutéale (FORDE *et al.*, 2011 ; NOAKES *et al.*, 2019).

La phase folliculaire, divisée en pro-œstrus et œstrus, dure de la lutéolyse à l'ovulation du follicule dominant soit 4 à 6 jours.

La phase lutéale quant-à-elle, est divisée en metœstrus et dioœstrus et correspond à la période d'activité du corps jaune qui suit l'ovulation. Elle dure entre 14 et 18 jours.

Le cycle ovarien est régulé par différentes hormones qui interviennent dans des boucles de rétrocontrôle positif ou négatif. Les principales hormones du cycle ovarien sont la Gonadotropin-Releasing Hormone (GnRH) ou gonadolibérine produite par l'hypothalamus, l'hormone folliculostimulante (FSH) et l'hormone lutéinisante (LH) produites par l'hypophyse, l'œstradiol produit par les follicules ovariens, la progestérone produite par le corps jaune et la prostaglandine F2 α (PGF2 α) produite par l'utérus (FORDE *et al.*, 2011).

(1) *Dynamique folliculaire : les vagues folliculaires*

Les cycles ovariens sont caractérisés par la présence de deux à trois vagues folliculaires avec chacune trois phases : une phase de recrutement, une phase de sélection et une phase de dominance (HOPPER, 2021).

Selon le nombre de vagues folliculaires et la durée du cycle, une nouvelle vague débute tous les 7 à 10 jours.

La phase de recrutement correspond au développement d'une cohorte de 5 à 20 petits follicules d'au moins 5 mm. Elle est initiée par une augmentation transitoire de la concentration en FSH.

La phase de sélection est régulée par la LH et la FSH. Les follicules en croissance synthétisent de l'œstradiol et de l'inhibine qui ont un rétrocontrôle négatif sur l'axe hypothalamo-hypophysaire ce qui aboutit à une réduction de la sécrétion de FSH. Parmi la cohorte de follicule, un follicule de taille supérieure aux autres possède des récepteurs à LH : il s'agit du follicule dominant. Ce follicule peut donc poursuivre sa croissance sous influence de la LH et en l'absence de FSH. Les follicules non dominants s'atrophient par manque de stimulation hormonale.

La phase de dominance correspond à la maturation du follicule dominant jusqu'au stade pré-ovulatoire. Le devenir du follicule dominant dépend du corps jaune : il y a ovulation en l'absence de corps jaune et atrophie du follicule dominant si le corps jaune est présent.

En phase lutéale, l'activité du corps jaune maintient une concentration élevée en progestérone qui, lorsqu'elle est couplée à une concentration élevée en œstradiol produit par le follicule, exerce un rétrocontrôle négatif sur l'axe hypothalamo-hypophysaire, empêchant ainsi le pic de LH nécessaire à l'ovulation.

En phase folliculaire, il n'y a pas de corps jaune donc la concentration en progestérone est faible. L'œstradiol exerce alors un rétrocontrôle positif sur l'axe hypothalamo-hypophysaire. Lorsque la

concentration en œstradiol dépasse un certain seuil, la GnRH est libérée en quantité suffisante pour permettre le pic de LH nécessaire à l'ovulation du follicule dominant.

(2) Dynamique du corps jaune

A la suite de l'ovulation, le follicule qui a ovulé devient un corps jaune après lutéinisation des cellules de la thèque et de la granulosa sous l'action de la LH. Une fois fonctionnel, le corps jaune produit de la progestérone qui par son rétrocontrôle négatif sur l'axe hypothalamo-hypophysaire empêche l'ovulation durant toute la phase lutéale (FORDE *et al.*, 2011).

En l'absence de gestation, la progestérone perd sa capacité à bloquer la synthèse d'œstrogènes par les follicules ce qui permet une amplification de l'expression des récepteurs à l'ocytocine. L'ocytocine se lie à ses récepteurs ce qui stimule la libération de PGF2 α par l'endomètre de l'utérus grâce à un rétrocontrôle positif entre l'ocytocine et la PGF2 α . La lutéolyse se produit quand la concentration en PGF2 α dépasse un seuil critique (FORDE *et al.*, 2011).

b) Reconnaissance maternelle et maintien de la gestation

Si l'ovocyte libéré lors de l'ovulation est fécondé, l'établissement et le maintien de la gestation nécessite la persistance d'une concentration élevée en progestérone donc du corps jaune pendant toute la durée de la gestation (NOAKES *et al.*, 2019). La durée pendant laquelle la progestérone est nécessaire à la gestation est supérieure à la durée du cycle œstral. Il est alors essentiel que la reconnaissance maternelle de la gestation soit précoce. Le signal de la reconnaissance maternelle est de l'interféron (IFN)- τ , il est sécrété par l'embryon (HOPPER, 2021).

La sécrétion de l'IFN- τ est maximale entre les jours 16 et 19 de gestation et dure jusqu'au 38^{ème} jour de la gestation (NOAKES *et al.*, 2019).

Une production inadéquate ou une réponse insuffisante de l'endomètre à l'IFN- τ est responsable d'un échec de la gestation à cause de l'absence de rétrocontrôle négatif sur la production de PGF2 α par l'endomètre conduisant ainsi à la lyse du corps jaune (HOPPER, 2021).

La reconnaissance maternelle de la gestation a lieu bien avant l'implantation de l'embryon qui a lieu pendant la troisième semaine de gestation (HOPPER, 2021).

2. Mise en place de la fonction de reproduction chez la génisse

a) Définition de la puberté

La puberté est classiquement définie comme le processus par lequel un animal devient capable de se reproduire. Chez les bovins femelles cela correspond à la transition d'un état où les ovaires sont inactifs vers un état où les ovaires ovulent de manière régulière (MORAN *et al.*, 1989).

Chez les génisses non pubères, les chaleurs et l'ovulation peuvent être asynchrones (ATKINS *et al.*, 2013).

La première ovulation est souvent silencieuse, c'est-à-dire qu'elle peut ne pas être accompagnée d'un comportement de chaleurs. Elle a généralement lieu 7 à 10 jours avant l'oestrus ovulatoire (ATKINS *et al.*, 2013).

De la même manière, le premier œstrus n'est pas forcément le marqueur de la puberté car 13 à 63% des génisses prépubères ont un œstrus anovulatoire appelé œstrus non pubertaire (ATKINS *et al.*, 2013 ; YOUNGQUIST et THRELFALL, 2007). La détection de la puberté ne peut donc pas reposer uniquement sur la détection des premières chaleurs.

Finalement, la puberté peut être définie de manière plus précise comme le premier œstrus ovulatoire suivi d'une phase lutéale de durée normale (ATKINS *et al.*, 2013 ; BALL et PETERS, 2004 ; YOUNGQUIST et THRELFALL, 2007).

La puberté survient entre 6 et 24 mois (HOPPER, 2021). Les modalités et facteurs d'apparition de la puberté expliquant la taille de cet intervalle sont présentés dans les parties I.A.2.c et I.A.2.d.

b) Modification des organes reproducteurs

La mise en place de la fonction de reproduction implique diverses modifications des organes reproducteurs afin qu'ils acquièrent les caractéristiques nécessaires au déroulement des cycles ovariens et de la gestation. La maturation des organes reproducteurs commence dès la naissance et se poursuit après la puberté (ATKINS *et al.*, 2013).

(1) Les ovaires

Les ovaires grossissent 3 fois plus rapidement que le corps (MORAN *et al.*, 1989). Leur croissance est biphasique avec une première phase de croissance rapide entre la naissance et 5 mois et une seconde phase de croissance plus lente entre 8 et 12 mois (ATKINS *et al.*, 2013). A la naissance, les ovaires contiennent 150 000 follicules primordiaux qui commencent leur croissance rapidement après la naissance (NOAKES *et al.*, 2019). Le nombre de follicules en croissance augmente fortement pendant les 3-4 premiers mois de vie sans augmentation du nombre de follicules antraux (ATKINS *et al.*, 2013 ; HOPPER, 2021 ; MORAN *et al.*, 1989). Ces derniers deviennent plus nombreux et de plus grande taille avec l'approche de la puberté (ATKINS *et al.*, 2013).

(2) Le tractus génital

Le tractus génital croît à la même vitesse que le corps jusqu'à 6 mois puis de manière accélérée jusqu'à la puberté (HOPPER, 2021 ; KINDER *et al.*, 1995 ; MORAN *et al.*, 1989 ; NOAKES *et al.*, 2019).

Concernant l'utérus, l'augmentation de son diamètre est variable dans le temps. Il augmente rapidement entre 2 et 10 semaines (9 à 14 mm) puis plus lentement jusqu'à 24 semaines (16 mm) avant de réaugmenter rapidement entre 32 et 60 semaines (16 à 21 mm). Le poids de l'utérus augmente de la naissance à 12 mois où il pèse 150 g. la croissance utérine est corrélée avec la croissance du plus grand follicule donc avec la concentration en œstradiol (ATKINS *et al.*, 2013).

c) Régulation hormonale de la puberté

L'acquisition de la puberté est inhérente à des modifications hormonales qui permettent la maturation de l'axe hypothalamo-pituitaire-gonadique. Cette maturation se déroule pendant la péripuberté soit pendant les 50 jours précédant la puberté. Elle correspond à la transition entre la prépuberté et la maturité sexuelle (KINDER *et al.*, 1995).

La prépuberté est définie comme la phase d'état entre la naissance et 50 jours avant la puberté où le système neuroendocrinien est actif mais non fonctionnel sur le plan reproducteur.

(1) Modèle hormonal lors de la prépuberté

Les vagues folliculaires débutent dès l'âge de 2 semaines mais l'absence de stimulation hormonale suffisante engendre l'atrésie des follicules dominants (BALL et PETERS, 2004 ; LARSON, 2007). Le diamètre du plus gros follicule et le nombre de follicules par vague augmentent progressivement au cours des vagues (KINDER *et al.*, 1995 ; LARSON, 2007 ; YOUNGQUIST et THRELFALL, 2007). La phase de prépuberté n'est donc pas une phase d'inactivité de l'axe hypothalamo-pituitaire-gonadique mais une phase où il n'est pas suffisamment mature pour permettre le déroulement normal des cycles ovariens.

Chez les génisses dont la première ovulation se produit à 9 mois, les concentrations en LH et FSH augmentent de la naissance à 3 mois, déclinent jusqu'à 6 mois et augmentent à nouveau jusqu'à l'ovulation (BALL et PETERS, 2004 ; MORAN *et al.*, 1989).

La baisse des concentrations en gonadotrophines observée après 3 mois correspond à l'établissement d'un effet inhibiteur de l'œstradiol sur l'hypothalamus (HOPPER, 2021 ; MORAN *et al.*, 1989).

En effet, pendant la période prépubère, l'œstradiol exerce un rétrocontrôle négatif sur l'hypothalamus. La libération pulsatile de GnRH est donc limitée ce qui ne permet pas la sécrétion suffisante de LH pour induire l'ovulation (NOAKES *et al.*, 2019 ; YOUNGQUIST et THRELFALL, 2007). On parle de théorie gonadostatique (KINDER *et al.*, 1995 ; MORAN *et al.*, 1989 ; YOUNGQUIST et THRELFALL, 2007).

La prépuberté correspond donc à une phase où l'hypothalamus est immature : sa réponse à l'œstradiol est l'inverse de celle attendue chez les vaches matures. Une inversion de la réponse de l'hypothalamus à l'œstradiol est nécessaire pour la mise en place de la puberté.

A l'inverse, l'hypophyse et les ovaires sont fonctionnels bien avant la puberté : l'hypophyse est capable de libérer de la LH en réponse à de la GnRH exogène dès 4 mois et les ovaires répondent aux gonadotrophines exogènes et endogènes par une augmentation de la production d'œstradiol (KINDER *et al.*, 1995 ; YOUNGQUIST et THRELFALL, 2007).

(2) Induction de la puberté : la péripuberté

La péripuberté commence 50 jours avant la puberté. Cela correspond au début du déclin de la sensibilité de l'axe hypothalamo-hypophysaire à l'œstradiol et est associé à une diminution du nombre de récepteur à l'œstradiol dans l'hypothalamus (HOPPER, 2021).

En période péripubertaire, la sensibilité de l'hypothalamus au rétrocontrôle négatif de l'œstradiol diminue ce qui permet l'augmentation des fréquences de pulsation de GnRH. L'augmentation de la concentration en GnRH induit une augmentation des fréquences de pulsation de LH et FSH ce qui stimule la croissance folliculaire et la production d'œstradiol. (LARSON, 2007 ; NOAKES *et al.*, 2019 ; YOUNGQUIST et THRELFALL, 2007). Ce processus continue jusqu'à ce que la concentration en œstradiol soit suffisamment élevée pour stimuler le générateur d'impulsion de GnRH de l'hypothalamus et induire le pic de LH nécessaire à l'ovulation (ATKINS *et al.*, 2013 ; LARSON, 2007). La fréquence de la sécrétion pulsatile de LH augmente pendant les 50 jours précédant la première ovulation. Elle passe ainsi de 1 à 4 pulsations par 24 h en période prépubère (YOUNGQUIST et THRELFALL, 2007) à 1 pulsation par heure avant l'ovulation (KINDER *et al.*, 1995 ; MORAN *et al.*, 1989).

L'hypothalamus est le dernier composant de l'axe hypothalamo-pituitaire-gonadique à mûrir. (ATKINS *et al.*, 2013). Cette maturation est due à un changement dans les récepteurs à œstrogènes et à kisspeptines. En effet, l'action inhibitrice de l'œstradiol sur la sécrétion de GnRH est indirecte. La baisse de la sensibilité du rétrocontrôle négatif de l'œstradiol sur l'hypothalamus s'explique par une diminution du nombre de récepteurs à l'œstradiol (ATKINS *et al.*, 2013 ; KINDER *et al.*, 1995 ; MORAN *et al.*, 1989)

Une voie des kisspeptines fonctionnelle est indispensable pour l'apparition de la puberté. Lorsqu'elles se lient à leurs récepteurs hypothalamiques, les kisspeptines permettent la libération de GnRH. L'augmentation de la concentration d'œstrogènes a un rétrocontrôle positif sur les kisspeptines (ATKINS *et al.*, 2013 ; NOAKES *et al.*, 2019). Ainsi les kisspeptines agissent comme un médiateur entre les stéroïdes ovariens et la GnRH.

(3) Rôle des courtes phases lutéales

En fin de péripuberté, une ovulation silencieuse se produit. La lutéinisation du follicule ovulatoire induite est à l'origine de la formation d'un corps jaune et donc de l'augmentation transitoire de la concentration en progestérone (HOPPER, 2021 ; KINDER *et al.*, 1995). Ce corps jaune est de petite taille et a une durée de vie courte (NOAKES *et al.*, 2019).

La lutéolyse de ce corps jaune est suivie d'un comportement œstral associé à une ovulation suivie du développement d'un corps jaune avec une durée de vie normale : il s'agit de l'ovulation pubertaire (KINDER *et al.*, 1995).

La lutéolyse précoce du premier corps jaune est causée par les $PGF2\alpha$ sécrétées par l'endomètre et est favorisée par la présence de nombreux récepteurs à l'ocytocine sur l'endomètre (HOPPER, 2021). A la suite de l'exposition à la progestérone pendant la vie du premier corps jaune, le nombre de récepteurs à l'ocytocine décroît ce qui permet aux cycles suivant d'être de durée normale. (HOPPER, 2021)

L'ensemble des modifications hormonales aboutissant à la puberté sont synthétisées dans le Tableau I et la Figure 1.

Tableau I : Modifications hormonales conduisant à la puberté (d'après Youngquist et Threlfall, 2007)

	Prépuberté (de la naissance à 50 jours avant la puberté)	Péripuberté (50 jours avant la puberté)			Puberté
Sécrétion d'œstradiol					
Rétrocontrôle de l'œstradiol sur l'hypothalamus					
Sécrétion de GnRH					
Sécrétion de LH					

Légende : Les flèches rouges avec un moins indiquent un rétrocontrôle négatif, la flèche verte avec un plus indique un rétrocontrôle positif et la largeur des flèches représente l'intensité du rétrocontrôle.

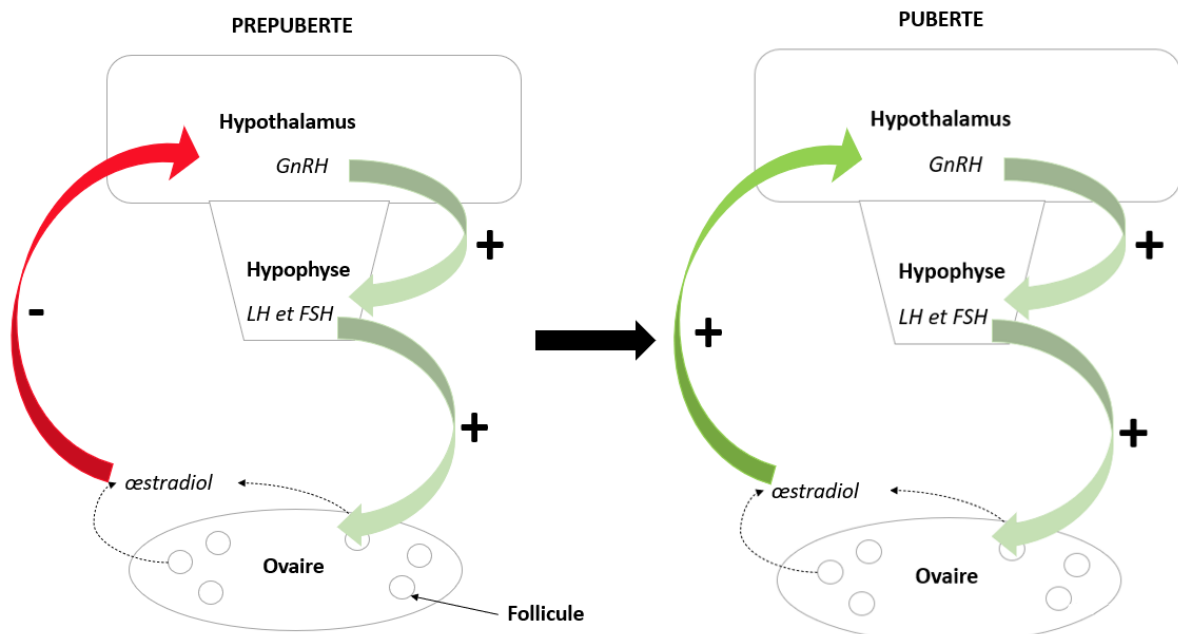


Figure 1 : Inversion du rétrocontrôle de l'œstradiol sur l'hypothalamus (d'après (ATKINS et al., 2013 ; NOAKES et al., 2019). Les flèches vertes avec un plus indique une action stimulatrice et la flèche rouge avec un moins une action inhibitrice.

d) Facteurs influençant l'apparition de la puberté

Les génisses sont pubères entre 6 et 24 mois. Cette grande variation dans l'âge à la puberté s'explique par la pluralité des facteurs qui affectent l'apparition de la puberté. Ces facteurs et leurs effets sont résumés dans le tableau II en fin de la partie I.A.2.d.

(1) Race et génétique

La race est un important élément de détermination de l'âge à la puberté. De manière générale, les génisses de race laitière sont pubères plus précocement que celles de race allaitante, avec une moyenne de 10 à 12 mois et 15 à 18 mois respectivement (BALL et PETERS, 2004).

Il existe également des variations entre les races pour un type de production donnée : les génisses de race Prim'Holstein sont pubères plus jeunes (10-12 mois) que les génisses de race Normande ou Montbéliarde (15-16 mois) (LE COZLER *et al.*, 2009).

De plus, la puberté des génisses issues d'un croisement entre différentes races est plus précoce que chez les génisses de race pure (MORAN *et al.*, 1989 ; YOUNGQUIST et THRELFALL, 2007) et la consanguinité retarde le début de la puberté (YOUNGQUIST et THRELFALL, 2007).

L'héritabilité de l'âge à la puberté est estimée entre 0,41 et 0,64 pour les races laitières et 0,5 pour les races allaitantes : il est donc possible d'intégrer l'âge à la puberté dans les critères de sélection génétique (KINDER *et al.*, 1995 ; YOUNGQUIST et THRELFALL, 2007).

Il existe une corrélation négative entre l'âge à la puberté et la production laitière : lorsque l'âge à la puberté diminue, la production laitière augmente (KINDER *et al.*, 1995). La sélection sur le critère de l'âge à la puberté permet indirectement de favoriser des génisses à haut potentiel laitier.

De manière plus anecdotique, l'âge à la puberté des génisses est liée positivement à la circonférence scrotale des taureaux à l'âge d'un an ce qui permet d'intégrer ce paramètre dans les critères de sélection des taureaux reproducteurs (HOPPER, 2021).

(2) Nutrition, poids et taux de croissance

Le poids et le taux de croissance sont les paramètres clefs de la survenue de la puberté car pour une race donnée, la puberté intervient à un poids constant. Ainsi, la puberté est fortement influencée par la vitesse de croissance de la génisse.

Pour les races laitières et allaitantes, la puberté est acquise à respectivement 40-50 % et 55-60 % du poids adulte ce qui représente un poids de 250 à 270 kg pour les génisses de races Prim'Holstein, 275 à 295 kg pour les génisses Normandes, 380 kg pour les Charolaise (LE COZLER *et al.*, 2009 ; TROCCON et PETIT, 1989).

La vitesse de croissance est liée au plan de nutrition : un apport alimentaire élevé permet une croissance rapide et donc un avancement de la puberté comme illustré dans la figure 2. Ainsi la puberté est atteinte à 9-10 mois chez des génisses Prim'Holstein dont le GMQ (Gain Moyen Quotidien) est de 850 à 900 g/j (LE COZLER *et al.*, 2009 ; TROCCON et PETIT, 1989). Une puberté avancée avant 9 mois est rapportée pour un GMQ supérieur à 900 g/j voire même à 5-6 mois lors de plans alimentaires encore plus élevés (BALL et PETERS, 2004). En revanche, de faibles GMQ (inférieurs à 350 g/j) retardent la puberté à 18-20 mois (LE COZLER *et al.*, 2009).

Il y a donc une relation négative entre l'âge à la puberté et le GMQ (BALL et PETERS, 2004 ; SCHILLO *et al.*, 1992). En outre, des génisses d'une même race ayant des taux de croissance différents seront pubères à des âges différents mais à des stades de développement physique similaires (YOUNGQUIST et THRELFALL, 2007).

La source d'apport énergétique joue un rôle dans l'apparition de la puberté. Les génisses nourries avec des rations riches en amidon sont plus légères et par conséquent plus jeunes à la puberté par rapport aux génisses nourries avec un régime isoénergétique et isocalorique riche en fibre (LARSON, 2007).

L'influence de la nutrition sur la puberté semble médiée par des hormones comme l'IGF-I (Insuline Growth Factor) et l'IGF-II, l'insuline et la leptine car leurs concentrations varient avec le statut nutritionnel mais les mécanismes par lesquelles elles interviennent ne sont actuellement pas établis (BALL et PETERS, 2004 ; HOPPER, 2021). La leptine semble être le lien entre la condition corporelle et le système reproducteur. Si elle n'est pas le signal déclenchant la puberté, elle apparaît comme étant une condition nécessaire à la mise en place de la fonction de reproduction (NOAKES *et al.*, 2019).

Actuellement la seule certitude concernant le rôle de la nutrition sur l'induction de la puberté est qu'elle influence le moment de la diminution du rétrocontrôle négatif de l'œstradiol sur l'hypothalamus. En effet, des études ont mis en évidence qu'une ration faiblement énergétique retarde la diminution de l'effet inhibiteur de l'œstradiol tandis qu'une ration fortement énergétique l'avance (DAY et ANDERSON, 1998 ; HOPPER, 2021 ; SCHILLO *et al.*, 1992).

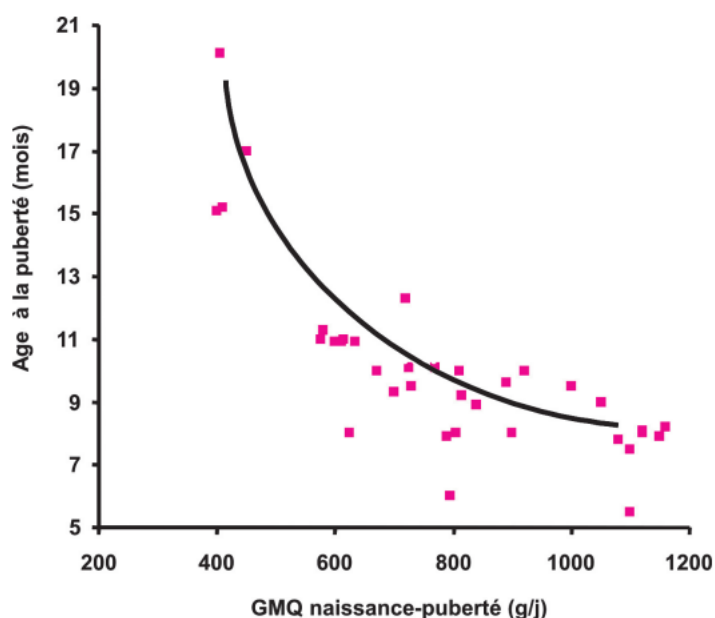


Figure 2 : relation entre le GMQ depuis la naissance et l'âge à la puberté (Le Cozler *et al.*, 2009, d'après Troccon et Petit, 1989)

(3) Saison

Bien que les bovins n'aient pas une reproduction saisonnée, la saison influence le moment de la puberté par la photopériode et la température.

L'augmentation de la photopériode réduit l'âge d'apparition de la puberté. Les effets d'une exposition prolongée à la lumière seraient aussi efficaces qu'un plan de nutrition élevé (BALL et PETERS, 2004). A l'inverse des ovins, ce sont les jours longs qui, par l'intermédiaire de la mélatonine, stimulent la puberté chez les bovins (KINDER *et al.*, 1995).

Dans une moindre mesure, les différences de température entre les saisons modifient l'apparition de la puberté. Il a été montré que la chaleur avance la puberté tant que les conditions ne sont pas extrêmes (SCHILLO *et al.*, 1992).

Finalement, un environnement hivernal (jours courts et températures faibles) au moment de la puberté retarde celle-ci.

L'effet de la saison de naissance sur l'âge à la puberté est plus nuancé et les études montrent des résultats contradictoires : pour certaines, les génisses nées au printemps sont pubères plus jeunes que celles nées à l'automne alors que d'autres concluent l'inverse (HOPPER, 2021 ; MORAN *et al.*, 1989 ; SCHILLO *et al.*, 1992).

(4) Environnement social

Les effets de la présence de taureaux adultes ou de vaches adultes cyclées sur l'apparition de la puberté ne font pas consensus. Si certaines études montrent une précocité dans l'âge à la puberté des génisses traitées par voie oronasale à l'urine de taureau par rapport à celles traitées à l'eau, d'autres n'ont pas réussi à prouver l'influence de la présence d'un taureau sur la puberté (BALL et PETERS, 2004 ; KINDER *et al.*, 1995 ; MORAN *et al.*, 1989 ; PATTERSON *et al.*, 1992).

(5) Exposition aux progestatifs

Une exposition prolongée aux progestatifs induit la puberté chez les génisses si elles sont en phase péripubère car l'augmentation de la concentration en progestérone est un prérequis pour la mise en place d'un cycle œstral normal (HOPPER, 2021 ; SPRINGMAN, 2017).

Tableau II : Les facteurs influençant la puberté et leurs effets

Facteur	Effet
Race	Laitière plus précoce qu'allaitante
	Croisée plus précoce que race pure
Age à la puberté de la mère	Puberté précoce de la mère → puberté précoce chez la fille
Circonférence scrotale du père	Plus elle est élevée plus les génisses sont pubères jeunes
Nutrition et taux de croissance	GMQ élevé avance la puberté
Environnement hivernal	Photopériode réduite et température froide retardent la puberté
Saison de naissance	Absence de consensus
Présence d'un taureau	Avance la puberté ?
Exposition prolongée aux progestatifs	Avance la puberté

B. Objectifs zootechniques

La mise à la reproduction est liée à des objectifs zootechniques propres à chaque type de production et à chaque élevage.

1. Objectifs de croissance et de reproduction

a) Choix du moment de la mise à la reproduction

L'objectif est de choisir le moment où la fertilité est maximale et où les génisses sont suffisamment développées pour mener à terme une gestation. Ce choix dépend essentiellement de la race (et du poids à la puberté pour cette race), des objectifs de l'éleveur (âge au premier vêlage et période de mise bas souhaités).

Il a été montré que la fertilité augmente avec le nombre d'œstrus dans les premiers mois suivant la puberté (LARSON, 2007 ; LE COZLER *et al.*, 2009). Les génisses saillies à l'œstrus pubertaire ont une fertilité diminuée de 15 à 21 % par rapport à celles saillies lors du troisième œstrus (ATKINS *et al.*, 2013 ; HOPPER, 2021 ; LE COZLER *et al.*, 2008). Il est ainsi conseillé de retarder la mise à la reproduction d'un à trois mois après la puberté.

Il est cependant inutile de trop retarder la mise à la reproduction des génisses. En effet, chez les génisses Prim'Holstein la fertilité baisse de 10 % après l'âge de 2 ans (LE COZLER *et al.*, 2009).

Le moment de la mise à la reproduction dépend surtout de l'âge au premier vêlage souhaité. En élevage laitier comme en élevage allaitant, deux modèles existent classiquement : les vêlages

précoces, où le premier vêlage à lieu à deux ans et les vêlages tardifs où le premier vêlage à lieu à trois ans. Un vêlage à 2 ans implique une mise à la reproduction à entre 13 et 15 mois et un vêlage à 3 ans une mise à la reproduction entre 24 et 27 mois.

Dans le cas des vêlages groupés, qui est la situation classique en élevage allaitant, la mise à la reproduction se raisonne plus en fonction de la période de vêlage que de l'âge au vêlage. Il est d'usage que les génisses mettent bas en début de saison de vêlage pour une meilleure surveillance des vêlages et pour qu'elles ne prennent pas de retard pour la saison suivante car l'intervalle vêlage-vêlage est plus long chez les génisses (GRIMARD *et al.*, 2017). Ainsi les génisses sont mises à la reproduction 2 à 3 semaines avant les vaches ce qui implique que les génisses doivent être pubères 6 à 10 semaines avant le début de la saison de reproduction des vaches (ATKINS *et al.*, 2013).

La mise à la reproduction implique également la notion de poids cible : au-delà même de l'âge, c'est le poids lors de la mise à la reproduction qui importe le plus. Les recommandations actuelles de poids à la mise à la reproduction sont de 70 % du poids adulte pour les génisses de race allaitante et de 60 % du poids adulte pour les génisses de race laitière (GRIMARD *et al.*, 2017). Cet objectif de poids peut être limitant pour une mise à la reproduction en vue d'un vêlage précoce mais il l'est rarement pour les vêlages tardifs. Toutefois des études montrent que cet objectif de poids cible peut être réduit sans influence sur le taux de gestation final des animaux (SPRINGMAN, 2017).

La diminution de l'âge au premier vêlage permet de réduire la période de vie non productive et la productivité par jours de vie productive (les vaches allaitantes ont un veau supplémentaire et les vaches laitières produisent plus de lait dans leur carrière), d'avoir une classe d'âge en moins dans l'élevage et de bénéficier de l'amélioration génétique apportée par les génisses plus rapidement (DUDOUET, 2021 ; LAUMONNIER, 2013 ; LE COZLER, 2015 ; LE COZLER *et al.*, 2009 ; PERREAU, 2021). En élevage allaitant, cela permet également de valoriser l'effort d'alourdissement des génisses d'un an destinées à l'engraissement en faisant un lot unique avec l'ensemble des génisses. Cela permet également de sélectionner plus efficacement et plus rapidement les femelles destinées à la reproduction après un premier vêlage (DUDOUET, 2021).

Pour les génisses laitières, il convient de noter que la production laitière sur l'ensemble de la première lactation croît de 50 à 60 kg par mois d'âge au premier vêlage (TROCCON, 1996). La production en première lactation est ainsi légèrement réduite pour les vêlages précoces mais rapporté à la vie de l'animal la production laitière est augmentée lorsque le vêlage passe de 30-36 mois à 20-24 mois (LE COZLER *et al.*, 2008 ; TROCCON, 1996). Les données chez les Prim'Holstein montrent une augmentation de 3 kg, soit 40 %, de lait par jour de vie pour les vêlages à 24 mois par rapport à ceux à plus de 36 mois (LE COZLER, 2015).

A l'image des génisses laitières, les génisses allaitantes qui vêlent à deux ans produisent moins de lait, une alimentation stricte des mères et un suivi accru des veaux est donc nécessaire afin de s'assurer qu'ils aient un apport alimentaire suffisant (DUDOUET, 2021).

Finalement, une mise à la reproduction la plus précoce possible permet de réduire les frais d'élevage des génisses et d'augmenter le rendement économique de l'élevage (LARSON, 2007 ; LE COZLER, 2015), mais cela nécessite une excellente maîtrise de l'élevage des génisses et un suivi régulier de leur croissance. Le prix de revient d'une génisse laitière est plus élevé de 360€ si elle vêle à 32 mois plutôt qu'à 24 mois (ENNUYER et LAUMONNIER, 2013).

Le choix du moment de la mise à la reproduction est donc un choix propre à l'éleveur, à décider en fonction des paramètres propres à son élevage tels que les conditions environnementales, les bâtiments disponibles, la quantité et la qualité du fourrage et le modèle économique (SPRINGMAN, 2017 ; TROCCON, 1996).

b) Objectifs de croissance selon l'âge au premier vêlage

La mise à la reproduction devant être réalisée à un poids donné et l'apparition de la puberté étant dictée par le poids des génisses, des objectifs de croissance précis sont établis selon l'âge souhaité au premier.

De manière générale, un vêlage à deux ans nécessite un taux de croissance élevé sans engraissement de l'animal, il est donc à réserver aux animaux à haut potentiel de croissance alors que le vêlage à trois ans est applicable à tous les animaux.

Le potentiel de croissance n'est pas identique pendant toute la période d'élevage car le développement des différents tissus est asynchrone : le tissu musculaire se développe en premier et son potentiel de croissance est maximal au moment de la puberté alors que le développement du tissu adipeux est plus tardif et que son potentiel de croissance augmente avec l'âge (LE COZLER *et al.*, 2009 ; TROCCON et PETIT, 1989).

Il est important de respecter les objectifs de croissance car tout retard est difficile à compenser et ce d'autant plus qu'il a lieu dans le jeune âge (TROCCON, 1996). De plus des animaux trop maigres ou trop gras au vêlage sont plus à risque de dystocie et ont une longévité et une production diminuée (RISCO et MELENDEZ, 2011).

A noter que les objectifs énoncés ultérieurement sont définis pour des animaux de gabarit moyen, il convient donc de les adapter selon le gabarit des animaux dans chaque élevage.

De plus, il est possible de majorer légèrement les poids et GMQ donnés comme objectifs afin de se prémunir d'éventuels incidents de croissance.

(1) En élevage laitier

(a) Pour un premier vêlage à 2 ans

Pour un vêlage à 24 mois en race laitière à haut potentiel de croissance (Prim'Holstein de poids adulte 650 kg par exemple), les objectifs sont un poids de minimum 90 kg au sevrage et 200 kg à 6 mois (soit 30 % du poids adulte), ce qui nécessite une croissance rapide (900 g/j) de la naissance à 6 mois (LAUMONNIER, 2013 ; LE COZLER *et al.*, 2009 ; PERREAU, 2021). Un poids à 12 mois de plus de 300 kg est indiqué (les recommandations sont même de 330 kg en race Prim'Holstein). La mise à la reproduction se fait à 15 mois pour un poids de 400 kg (soit 60 % sur poids adulte), une hauteur au garrot et au sacrum de 135 cm et 130 cm respectivement et un périmètre thoracique de 170 cm (ENNUYER et LAUMONNIER, 2013). La Note d'Etat Corporelle (NEC) recommandée à la mise à la reproduction, qui représente l'état d'engraissement, est de 3 à 3,5. Ces objectifs sont atteints pour un GMQ compris entre 700 et 800 g/j de 6 mois à la mise à la reproduction (LAUMONNIER, 2013 ; LE COZLER *et al.*, 2009).

Le poids vif au vêlage doit être supérieur à 585kg (plus de 90% du poids adulte) ce qui correspond à un poids post partum de 530kg (LE COZLER *et al.*, 2009 ; TROCCON, 1996 ; VANDEHAAR, 2006). Le GMQ est alors de 700-900 g/j pendant la gestation, en portant attention à ne pas avoir des animaux trop gras au vêlage car cela augmente le risque de dystocie et de troubles métaboliques après le vêlage (LAUMONNIER, 2013 ; PERREAU, 2021 ; TROCCON, 1996).

(b) Pour un premier vêlage à 3 ans

Pour un vêlage tardif, le taux de croissance jusqu'à 6 mois doit être aussi élevé que pour un vêlage à 24 mois (900 g/j et 200 kg) car, comme mentionné précédemment, tout retard de croissance dans le jeune âge est difficilement compensé par la suite (LE COZLER *et al.*, 2009 ; PERREAU, 2021). Le poids à un an doit être de 290 à 300 kg soit un GMQ de 600 g/j entre le sevrage et un an. Le poids à 2 ans doit être de 500 kg. Le GMQ jusqu'au dernier tiers de la gestation doit être en moyenne de 500 g/j avec des modulations possibles selon la saison pour utiliser la croissance compensatrice comme expliqué en partie I.B.1.b.3 (INRA, 2010 ; LE COZLER *et al.*, 2009). Pendant le dernier tiers de gestation,

la croissance doit être modulée en fonction des besoins (comprise entre 700 et 900 g/j) pour atteindre 620 kg au vêlage soit 560 à 600 kg post-partum (PERREAU, 2021 ; TROCCON, 1996).

Le tableau III ci-dessous résume les objectifs de croissance pour les génisses laitières qui serviront de référence dans la suite de ce travail.

Tableau III : Objectifs de croissance chez les génisses laitières selon l'âge au premier vêlage

Génisse laitière (poids vif adulte de 650 kg)					
Vêlage précoce					
	Naissance	Sevrage	6 mois	Mise à la reproduction	Avant vêlage
Poids vif		90 kg	200 kg	400 kg	> 585 kg
% poids vif adulte			30%	60%	> 90%
GMQ	900 g/j		700-800g/j		800-900 g/j
Vêlage tardif					
Poids vif		90 kg	200 kg	485 kg	620 kg
% poids vif adulte			30%	75%	95%
GMQ	900 g/j		En moyenne 500 g/j jusqu'au dernier tiers de gestation (variable si utilisation de la croissance compensatrice), 800 g/j pendant le dernier tiers		

La figure 3 présente des courbes de croissance selon le poids adulte et l'âge au premier vêlage. Ces courbes de croissance sont établies avec des GMQ moyens et ne prennent pas en compte les variations de GMQ possible entre les périodes de pâturage et de stabulation. Des exemples de courbes de croissance avec mise à l'herbe sont présentées en annexe 1.

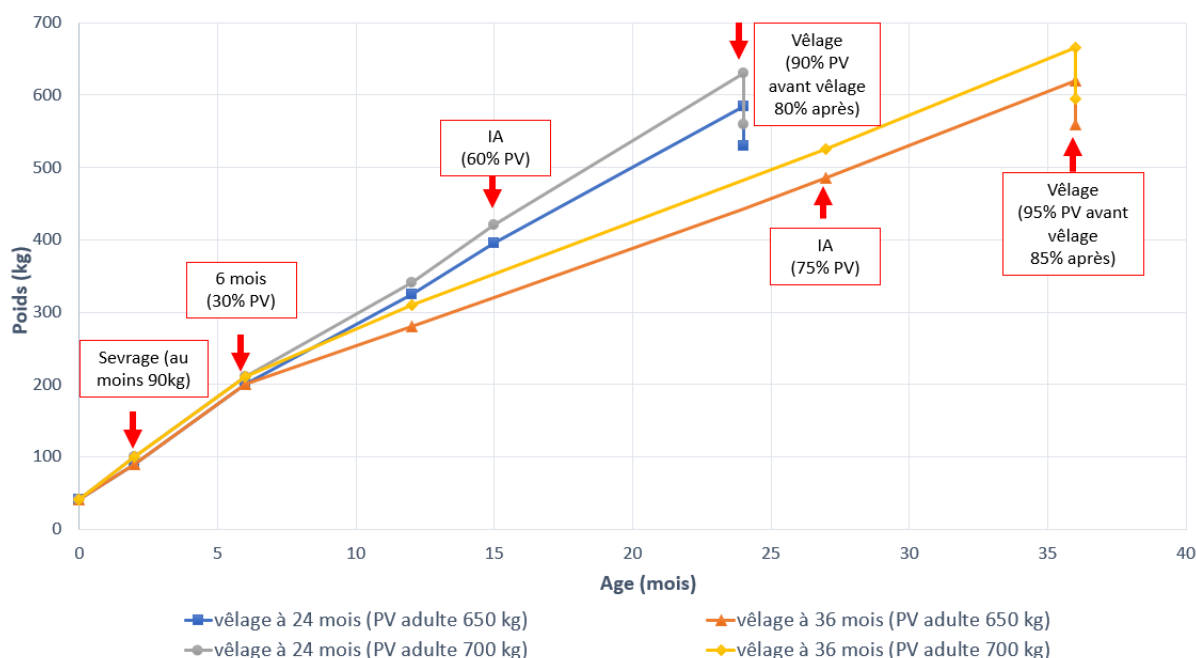


Figure 3 : Courbes de croissance des génisses laitières selon l'âge au premier vêlage et le poids adulte (d'après BROCARD et LECLERC, 2010)

De nombreuses études se sont intéressées à l'influence du taux de croissance sur la production laitière. La phase critique pour le développement mammaire se situe entre 3 mois et la puberté (VANDEHAAR, 2006).

Avant la puberté, un GMQ trop faible (< 400 g/j) ou trop élevé (>800 g/j) réduit la production laitière pendant plusieurs lactations (LAUMONNIER, 2013 ; LE COZLER *et al.*, 2008 ; TROCCON et PETIT, 1989). Comme illustré par la figure 4, il y a un risque de mauvais développement de la glande mammaire et de réduction de la production laitière si la croissance est mal maîtrisée : le croît optimal est de 800 g/j (ZANTON et HEINRICH, 2005).

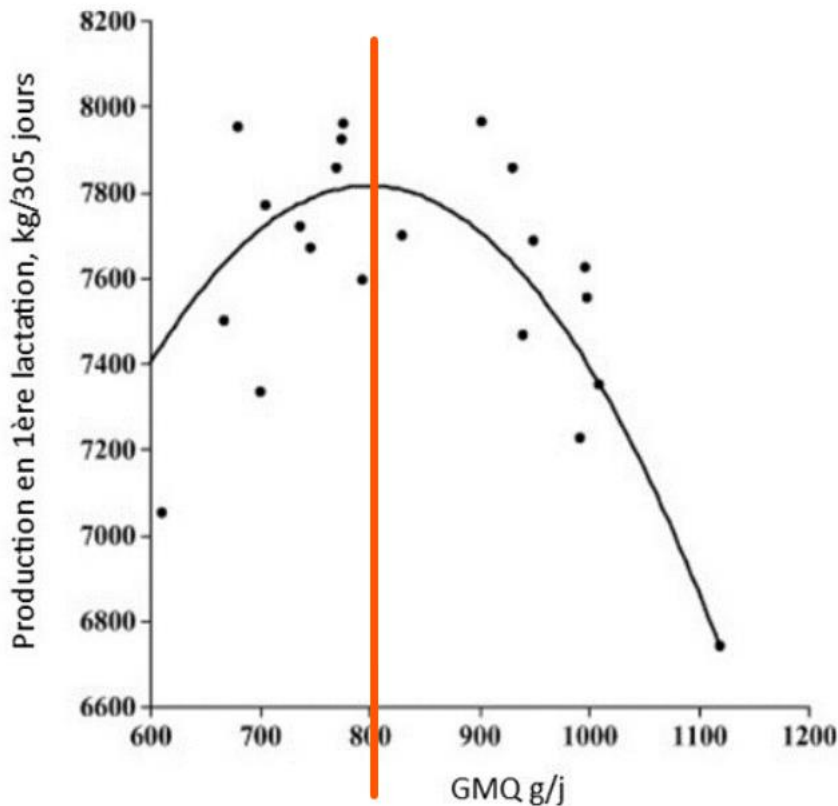


Figure 4 : Production laitière en première lactation en fonction du GMQ prépubère (ZANTON et HEINRICH, 2005)

L'équation de la courbe est : $y = 1135 + 16,7 * GMQ - 0,01 * GMQ^2$; $r^2 = 0,62$

Toutefois, l'influence d'un taux de croissance élevé semble moindre chez les génisses à haut potentiel laitier. En effet, il n'y a pas de réduction de la production laitière chez les futures hautes productrices si le GMQ prépubère approche 1000 g/j mais que la NEC est inférieure à 4 (LE COZLER *et al.*, 2008 ; TROCCON, 1996).

Finalement, le développement du parenchyme mammaire et la production laitière sont affectés par le croît prépubère mais pas par le croît post-pubère (LAUMONNIER, 2013 ; TROCCON, 1996). Ceci s'explique par la cinétique de développement de la glande mammaire présentée en figure 5. La phase critique de développement du parenchyme mammaire se situe lors de la croissance prépubère. Ainsi, des croîts trop élevés durant cette période favorise le dépôt de tissu adipeux au détriment du tissu sécréteur à l'origine d'un engraissement irréversible de la mamelle et donc d'une production lactée réduite (INRA, 2010, LAUMONNIER, 2013 ; LE COZLER, 2015 ; LE COZLER *et al.*, 2008 ; TROCCON et PETIT, 1989).

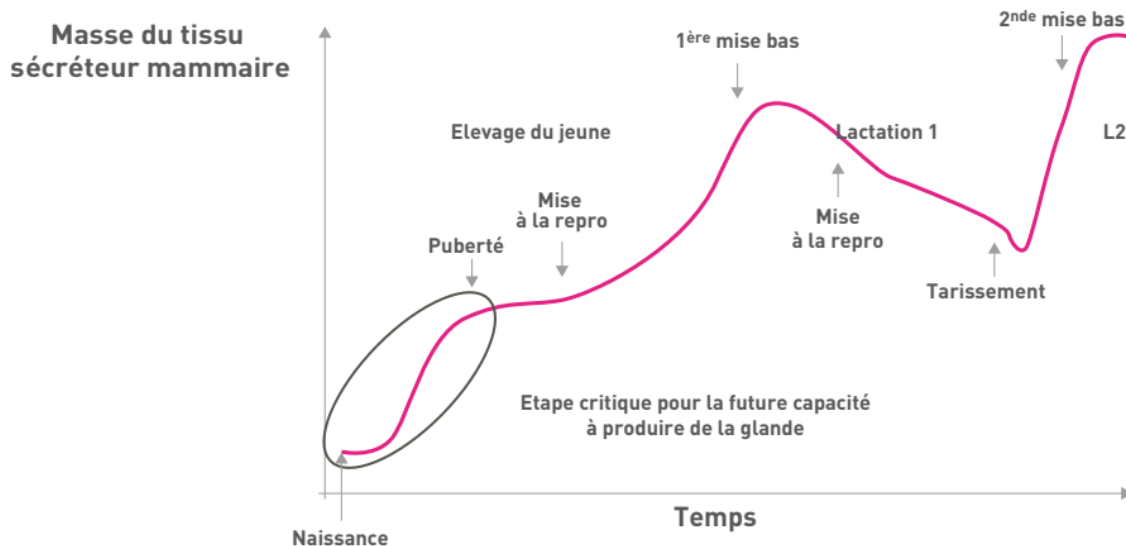


Figure 5 : Cinétique de développement de la glande mammaire (LE COZLER, 2015)

(2) En élevage allaitant

(a) Pour un premier vêlage à 2 ans

Comme en élevage laitier, un vêlage à 2 ans nécessite des taux de croissance élevés tout au long de la phase d'élevage. Ces objectifs sont parfaitement atteignables pour les races à haut potentiel de croissance comme la Charolaise, la Limousine, la Blonde d'Aquitaine ou la Rouge des prés. Il faut une croissance très élevée (supérieure à 1000 g/j) avant le sevrage pour atteindre un poids de 350 kg au sevrage à 9 mois. A la mise à la reproduction à 15 mois, la génisse doit avoir atteint 70 % du poids adulte (560 kg pour une charolaise faisant 800 kg à l'âge adulte) soit un GMQ de 600 à 900 g/j entre le sevrage et la mise à la reproduction (les génisses doivent peser 450 kg à un an). Elle doit peser 80 % du poids adulte au vêlage soit un GMQ de 500 à 900 g/j pendant la gestation (DUDOUET, 2021 ; GRIMARD *et al.*, 2017).

(b) Pour un premier vêlage à 3 ans

Là encore, le taux de croissance pendant la phase d'élevage sous la mère doit être identique à celui d'un vêlage précoce (GMQ > 1000 g/j pour 350 kg au sevrage), ce n'est qu'ensuite qu'il peut diminuer (GRIMARD *et al.*, 2017). Après le sevrage, le GMQ moyen doit être de 600 g/j avec un objectif de 600 kg à la mise à la reproduction pour un poids final au vêlage de 720 kg (DUDOUET, 2021 ; GRIMARD *et al.*, 2017).

Les objectifs de croissance pour les génisses allaitantes qui serviront de référence pour la suite sont résumés dans le tableau IV ci-dessous.

Tableau IV : Objectifs de croissance chez les génisses allaitantes selon l'âge au premier vêlage

Génisse allaitante (poids vif adulte de 800kg)				
Vêlage précoce				
	Naissance	Sevrage (9 mois)	Mise à la reproduction	Après vêlage
Poids vif		350 kg	560 kg	640 kg
% poids vif adulte		45%	70%	80%
GMQ	> 1000 g/j	600-900 g/j		500-900 g/j
Vêlage tardif				
Poids vif		350 kg	600 kg	720 kg
% poids vif adulte		45%	75%	90%
GMQ	> 1000 g/j	En moyenne 600 g/j, variable si utilisation de la croissance compensatrice		

La figure 6 présente des courbes de croissance selon le poids adulte et l'âge au premier vêlage. Elles sont établies avec des GMQ moyens et ne prennent pas en compte les variations liées à la saison de vêlage et aux périodes de pâturage. Des courbes de croissance prenant en compte ces différents paramètres sont présentées en annexe 2 pour les races Limousine et Charolaise.

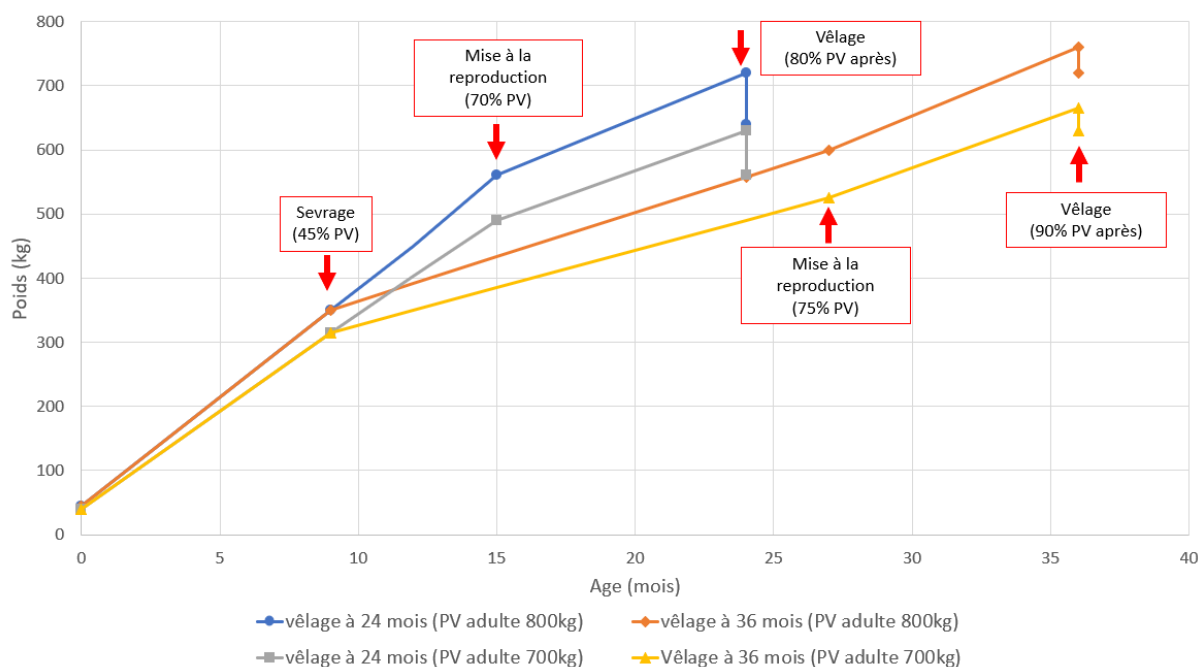


Figure 6 : Courbes de croissance des génisses allaitantes selon l'âge au premier vêlage et le poids adulte (d'après AGABRIEL *et al.*, 2014)

(3) Intérêt de la croissance compensatrice

La croissance compensatrice correspond à l'association de périodes de croissance lente inhérentes à une restriction alimentaire et des périodes de croissance rapide permises par une réalimentation. Cette stratégie utilisant des plans de nutrition en escalier améliore l'efficacité alimentaire (INRA, 2010).

Elle est intéressante si elle est bien menée : les périodes de restriction doivent être faites au bon moment (jamais avant l'âge de 3 mois) et les GMQ recommandés respectés. Cela permet d'avoir une fertilité et une croissance finale identique en faisant des économies sur les dépenses alimentaires (GRIMARD *et al.*, 2017 ; LE COZLER *et al.*, 2009). La croissance compensatrice permet d'optimiser les

ressources alimentaires : une application concrète est de réduire l'apport alimentaire l'hiver grâce à une ration à base de foin et d'un minimum de concentrés et de valoriser au mieux l'apport énergétique permis par le pâturage. Le GMQ sera donc réduit l'hiver et augmenté lors du pâturage pour un poids final identique à celui d'un plan d'alimentation permettant un GMQ constant.

Cette technique est adaptée pour les vêlages tardifs mais est plus compliquée à mettre en œuvre pour les vêlages précoces car ces derniers nécessitent un niveau de croissance élevé tout au long de la période d'élevage.

2. Etat des lieux des performances de reproduction des génisses en France

a) Génisses laitières

Si les performances laitières ont augmenté ces dernières décennies, la fertilité des génisses (et des vaches) a en revanche diminué (LE COZLER *et al.*, 2008).

Les données du contrôle laitiers indiquent que le taux de renouvellement et l'âge au premier vêlage n'ont quasiment pas baissé entre 1990 et 2010 alors qu'il est connu que la génétique et les techniques d'élevage actuelles permettent un vêlage précoce et que cette pratique est intéressante économiquement (LE COZLER *et al.*, 2009). En effet lors de la campagne 2018-2019, l'âge moyen au premier vêlage pour les génisses laitières toutes races confondues était de 31 mois et seulement 25 % des génisses ont vêlé avant 27 mois (INSTITUT DE L'ELEVAGE, 2020). Les statistiques sur les génisses mises à la reproduction indiquent un taux de réussite en première insémination de 60 %, un taux de génisses à 3 inséminations ou plus de 16 % et un nombre moyen d'inséminations par génisse de 1,67. Ces résultats sont similaires à ceux des campagnes précédentes comme l'indique le tableau V. Les données du reproducteur mettent en évidence des différences entre les races Prim'Holstein et Montbéliarde (qui sont les races laitières les plus représentées en France en terme d'effectif). Les génisses Prim'Holstein sont plus jeunes au premier vêlage que les Montbéliardes (30 mois contre 33 mois pour la dernière campagne) mais les Montbéliardes ont une meilleure fertilité en terme de rapport IA/IA fécondante et de réussite à la première IA (Insémination Artificielle).

En élevage laitier, les performances de reproduction attendues pour les génisses sont un taux de réussite supérieur à 70 % en première insémination et un nombre moyen d'inséminations nécessaire pour obtenir une insémination fécondante inférieur ou égal à 1,5 (PERREAU, 2021).

Tableau V : Performances de reproduction des génisses laitières en France, données du reproducteur (d'après INSTITUT DE L'ELEVAGE, 2020)

campagne	Génisses laitière Montbéliarde / Prim'Holstein						
	Âge au 1 ^{er} vêlage en mois (moyenne)*	Âge au 1 ^{er} vêlage en mois (25%)*	Âge au 1 ^{er} vêlage en mois (50%)*	Âge au 1 ^{er} vêlage en mois (75%)*	Nombre d'IA par génisse**	Taux de réussite à la première IA**	Pourcentage de génisse à 3 IA ou plus**
2013 – 2014	31 34 / 30	28 30 / 27	30 33 / 29	34 35 / 32	1,67 1,62 / 1,69	59 62 / 58	16 15 / 16
2014 – 2015	31 34 / 30	28 30 / 27	30 33 / 29	34 35 / 32	1,68 1,61 / 1,71	59 62 / 58	16 14 / 17
2015 – 2016	31 33 / 30	27 30 / 27	30 33 / 29	34 35 / 32	1,65 1,62 / 1,67	60 61 / 59	15 15 / 16
2016 – 2017	31 33 / 29	27 30 / 26	30 33 / 28	33 35 / 32	1,65 1,6 / 1,67	60 62 / 59	15 14 / 16
2017 – 2018	31 33 / 30	27 31 / 27	30 33 / 29	34 36 / 32	1,65 1,61 / 1,67	60 62 / 59	15 14 / 16
2018 - 2019	31 33 / 30	27 31 / 26	30 33 / 29	34 36 / 32	1,67 1,62 / 1,68	60 61 / 59	16 15 / 16

Dans chaque case, la première ligne indique les statistiques toutes races confondues et la deuxième

ligne les statistiques respectivement pour les Montbéliardes et les Prim'Holstein

*statistiques sur génisses vêlées

** statistiques sur génisses mise à la reproduction en IA

Il convient de noter que les performances liées à la fertilité sont probablement surestimées car les données ne prennent pas en compte le fait que certains élevages pratiquent la monte naturelle après un échec à l'IA.

b) Génisses allaitantes

La sélection génétique a permis de réduire l'âge à la puberté des génisses allaitantes de telle sorte que l'âge à la puberté n'est plus un véritable facteur limitant aux vêlages précoces. En effet, respectivement 30, 60 et 65 % des génisses limousines, charolaises et blonde d'Aquitaine sont cyclées à 15 mois (GRIMARD *et al.*, 2017), or lors de la campagne 2018-2019, l'âge moyen au premier vêlage était de 36 mois toutes races confondues et seulement 25% des génisses vèlent à moins de 34 mois alors que la moitié vèlent entre 34 et 37 mois ce qui indique que les vêlages à 3 ans sont toujours la norme en France. Les statistiques sur les génisses mises à la reproduction indiquent un taux de réussite en première insémination de 71 %, un taux de génisses à 3 inséminations ou plus de 8 % et un nombre moyen d'inséminations par génisse de 1,4 mais ces statistiques ne représentent que les génisses inséminées or seulement 30 % des veaux sont issus d'insémination artificielle en élevage allaitant (INSTITUT DE L'ELEVAGE, 2020, 2021). Les données du reproducteur, regroupées dans le tableau VI, montrent des performances similaires pour l'âge au premier vêlage entre les races Charolaise et Limousine (qui sont les races allaitantes à plus fort effectif sur le territoire français) mais une fertilité légèrement meilleures des génisses limousines.

Tableau VI : Performances de reproduction des génisses allaitantes en France, données du reproducteur (d'après INSTITUT DE L'ELEVAGE, 2020)

Génisses allaitantes Charolaise / Limousine							
campagne	Âge au 1 ^{er} vêlage en mois (moyenne)*	Âge au 1 ^{er} vêlage en mois (25%)*	Âge au 1 ^{er} vêlage en mois (50%)*	Âge au 1 ^{er} vêlage en mois (75%)*	Nombre d'IA par génisse**	Taux de réussite à la première IA**	Pourcentage de génisse à 3 IA ou plus**
2013 – 2014	36 36 / 36	34 34 / 34	35 35 / 35	37 36 / 37	1,41 1,42 / 1,36	71 69 / 74	8 9 / 7
2014 – 2015	36 36 / 36	34 34 / 34	35 35 / 35	37 36 / 37	1,41 1,43 / 1,36	71 69 / 74	8 9 / 7
2015 – 2016	36 36 / 36	34 34 / 34	35 35 / 35	37 36 / 37	1,41 1,43 / 1,38	71 69 / 73	8 9 / 7
2016 – 2017	36 36 / 36	33 34 / 33	35 35 / 35	36 36 / 36	1,41 1,43 / 1,38	71 69 / 73	8 9 / 8
2017 – 2018	36 36 / 36	34 34 / 34	35 35 / 35	37 36 / 37	1,4 1,42 / 1,36	71 70 / 74	8 9 / 7
2018 - 2019	36 36 / 36	34 34 / 34	35 35 / 35	37 36 / 37	1,4 1,42 / 1,38	71 70 / 73	8 9 / 7

Dans chaque case, la première ligne indique les statistiques toutes races confondues et la deuxième ligne les statistiques respectivement pour les Charolaises et les Limousines

*statistiques sur génisses vêlées

** statistiques sur génisses mise à la reproduction en IA

Il convient de noter que les performances liées à la fertilité sont probablement surestimées car les données ne prennent pas en compte le fait que certains élevages pratiquent la monte naturelle après un échec à l'IA.

Finalement, pour les races allaitantes comme pour les races laitières l'âge au premier vêlage est tardif alors que les génisses actuelles ont les capacités pour vèler à 2 ans.

II. Spécificité de l'alimentation des génisses lors de la mise à la reproduction

A. Etat d'engraissement

L'état d'engraissement est estimé par la Note d'Etat Corporelle (NEC) ou le Body Condition Score (BCS) dans le système anglo-saxon à l'aide d'une grille de notation allant de 1 à 5 ou 1 à 9 selon la grille utilisée (la note la plus basse correspondant à un état d'émaciation sévère et la note la plus haute un état de surengraissement sévère) (EDMONSON *et al.*, 1989). Les grilles de notation sont présentées en annexe 3.

L'état d'engraissement ne résulte pas directement de l'alimentation lors de la mise à la reproduction mais est une conséquence de la conduite alimentaire de l'ensemble de la période d'élevage de la génisse, il s'agit néanmoins d'un paramètre important à prendre en compte lors de la mise à la reproduction. En effet, l'ensemble des études décrites dans la suite de ce travail sont à mettre en relation avec l'état d'engraissement des animaux étudiés car indépendamment du rationnement, l'état d'engraissement module les performances de reproduction (TROCCON et PETIT, 1989).

Les meilleures performances de reproduction sont obtenues pour une NEC comprise entre 3 et 3,5/5 lors de la mise à la reproduction. Les performances de reproduction sont dégradées pour une NEC plus faible ou plus élevée (ENJALBERT, 2006). De la même manière, le taux de réussite en première insémination artificielle augmente jusqu'à un score corporel de 6/9 et diminue ensuite (LARSON, 2007).

Baishya et collaborateurs ont montré que l'ovulation échoue chez une proportion significativement plus importante de génisses en mauvais état corporel par rapport aux génisses en bon état (BAISHYA *et al.*, 1982). Dans la même étude, ils ont montré que le taux de réussite à l'IA est significativement inférieur pour les génisses en mauvais état corporel comparé aux génisses en moyen ou bon état (29% et 65% respectivement) mais que cette différence n'est plus significative si seules les génisses cyclées sont prises en compte. Ils concluent grâce à ces différentes données que la baisse de fertilité, observée chez les génisses dont l'état d'engraissement est insuffisant, est liée à une augmentation des échecs d'ovulation.

S'il existe un lien entre l'état d'engraissement et la fertilité, l'expression et la détectabilité de l'œstrus ne sont en revanche pas affectées par celui-ci (VILLA-GODOY *et al.*, 1990).

B. Energie

1. Recommandations

Deux modèles de rationnement sont étudiés : le modèle établi par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) utilisé en France et le modèle anglo-saxon établi par le National Research Council (NRC).

Dans le système INRA, les besoins énergétiques sont exprimés en Unité Fourragère (UF) où 1 UF correspond à l'énergie nette contenue dans 1kg d'orge standard. Pour les génisses lors de la mise à la reproduction, l'Unité Fourragère Lait (UFL) est utilisée, qu'il s'agisse de génisses laitières ou allaitantes car cette unité est utilisée pour les animaux en croissance jusqu'à un GMQ de 1000 g/j or les génisses ont un GMQ inférieur pendant la période de reproduction. Les données INRA de 2018 indiquent qu'une UFL correspond à 1760 kcal d'énergie nette (INRA, 2018).

Les valeurs qui suivent sont issues des dernières recommandations de l'INRA publiées en 2018 (INRA, 2018) et les poids et GMQ des animaux pris comme références correspondent à ceux définis en partie I.B.1.b.

Pour une génisse laitière de 650kg à l'âge adulte avec un objectif de premier vêlage à 2 ans, les besoins énergétiques lors de la mise à la reproduction sont de 6,3 UFL en considérant que la génisse pèse 400kg

et a un GMQ de 800 g/j. Les besoins sont de 6,12 UFL pour un vêlage à 3 ans avec un poids de 485 kg et un GMQ de 500 g/j à la mise à la reproduction.

Dans le cas d'une génisse allaitante, les besoins énergétiques sont de 7,72 UFL pour une premier vêlage à 2 ans en considérant une génisse avec un poids de 550 kg et un GMQ de 900 g/j. Pour un premier vêlage à 3 ans, les besoins sont de 7,19 UFL pour une génisse de 600 kg et avec un GMQ de 600 g/j lors de la mise à la reproduction.

Ces besoins sont à adapter en fonction du poids de l'animal mais aussi du GMQ souhaité. Les apports énergétiques recommandés en fonction du poids et du GMQ sont synthétisés dans le tableau VII et présentés de manière exhaustive en annexes 4 et 5.

Tableau VII : Apports énergétiques recommandés pour les génisses laitières et allaitantes selon le poids vif et le GMQ, d'après (INRA, 2018)

		Génisses laitières	Génisses allaitantes
Poids vif (kg)	GMQ (kg/j)	UFL	UFL
200	0,4	3,1	
	0,6	3,5	
	0,8	4,0	
	1,0	4,5	
250	0,4	3,6	
	0,6	4,1	
	0,8	4,6	
	1,0	5,1	
300	0,2	3,7	
	0,4	4,1	
	0,6	4,6	
	0,8	5,2	
	1,0	5,8	
350	0,2	4,1	4,12
	0,4	4,6	4,49
	0,6	5,1	4,92
	0,8	5,7	5,39
	1,0	6,4	5,91
400	0,2	4,6	4,53
	0,4	5,0	4,92
	0,6	5,6	5,38
	0,8	6,3	5,88
	1,0	7,0	6,44
450	0,2	5,0	4,94
	0,4	5,5	5,53
	0,6	6,1	5,83
	0,8	6,9	6,37
	1,0	7,7	6,97
500	0,2	5,4	5,33
	0,4	5,9	5,76
	0,6	6,6	6,28
	0,8	7,4	6,86
	1,0	8,4	7,52
550	0,2	5,8	5,72
	0,4	6,4	6,18
	0,6	7,1	6,73
	0,8	8,1	7,36
	1,0	9,2	8,08
600	0,2	6,2	6,09
	0,4	6,8	6,59
	0,6	7,7	7,19
	0,8	8,8	7,89
	1,0	10,0	8,67

Les recommandations en apport énergétique du système anglo-saxon (NRC) sont mentionnées à titre indicatif. En effet, ce modèle n'est pas utilisé en France mais la plupart des études portant sur l'alimentation des bovins sont réalisées avec ce modèle. Il est donc essentiel de connaître les apports préconisés par ce modèle afin de comprendre les résultats de ces études. Le détail des recommandations en fonction du poids et du GMQ est disponible en annexes 6 et 7. Les besoins énergétiques correspondent aux besoins en énergie nette et sont exprimés en Mcal.

En considérant les objectifs de poids vif et de GMQ lors de la mise à la reproduction définis précédemment, les besoins énergétiques journaliers d'une génisse laitière avec un poids adulte de 650kg dans un objectif de premier vêlage à 2 ans sont de 10,41 Mcal (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001). Cette valeur est légèrement inférieure à celle recommandée par l'INRA qui est de 6,3 UFL soit 11,1 Mcal (puisque la valeur de l'UFL est de 1760 kcal).

Pour une génisse allaitante (de race Angus) avec un poids adulte de 533 kg et un premier vêlage à deux ans, les apports journaliers recommandés sont de 9,23 Mcal (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000).

Ainsi, pour un poids et un GMQ identiques, les génisses laitières ont des besoins énergétiques plus élevés que les génisses allaitantes. Cette différence s'explique par une composition du gain supérieure en lipides pour les génisses de race laitière : elles déposent davantage de gras (INRA, 2010 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

2. Effets des différents niveaux d'apports énergétiques

De nombreuses études s'intéressent aux effets des niveaux d'apports énergétiques. Les conséquences des modifications d'apports énergétiques dépendent de différents paramètres dont les principaux sont le moment, la durée et l'importance du changement alimentaire et sont souvent des conséquences des modifications de poids engendrées.

Certaines hormones telles que l'insuline, le glucagon, l'IGF-I, la Growth Hormone (GH), la leptine et métabolites comme le glucose, les acides gras non estérifiés, le β -hydroxybutyrate jouent un rôle clef dans la médiation des effets des changements d'apports énergétiques sur la reproduction. Cependant, les mécanismes par lesquels la nutrition énergétique influence la reproduction ne sont pas connus à l'heure actuelle (BUTLER, 2003, 2005).

a) Restriction énergétique

Une restriction énergétique est à l'origine d'un déficit énergétique et s'accompagne d'une perte de poids. Le syndrome d'infertilité inhérent à une balance énergétique négative est une problématique récurrente en élevage bovin et plus particulièrement en élevage laitier après le part. Il est ainsi connu qu'une sous-alimentation des animaux adultes cause des anomalies de cyclicité, une diminution du taux de réussite à l'IA, une augmentation de la mortalité embryonnaire et des kystes ovariens (BUTLER, 2003 ; ENJALBERT *et al.*, 2012), toutefois les effets sur les génisses sont moins connus.

(1) Restriction énergétique et fonction ovarienne

De nombreuses études ont montré qu'une restriction énergétique sévère et/ou longue est à l'origine d'un anœstrus. Cet anœstrus serait la conséquence soit d'un défaut de lutéolyse (donc un corps jaune persistant), soit d'une absence d'ovulation après la lutéolyse (RHODES *et al.*, 1996).

Murphy et collaborateurs ont étudié les effets d'une dénutrition chronique sur la dynamique des vagues folliculaires en nourrissant des génisses allaitantes avec une quantité de matière sèche (MS) équivalent à 0,7 ou 1,1 % de poids vif pendant 10 semaines. Au bout de 5 semaines de ce régime, ils ont observé une réduction du diamètre de 1,9 mm et de la persistance de 2,1 jours du follicule dominant chez les génisses restreintes mais celles-ci ont continué à ovuler (MURPHY *et al.*, 1991). Ces résultats sont en adéquation avec ceux d'études plus récentes où il a été montré qu'une restriction

alimentaire chronique (avec des rations fournissant entre 45 et 64 % des besoins d'entretien) est à l'origine d'une diminution de la taille du corps jaune, du taux de croissance, du diamètre maximal et de la persistance du follicule dominant sans effet sur la durée des cycles et le pourcentage de génisses avec 2 ou 3 vagues folliculaires (BOSSIS *et al.*, 1999 ; DISKIN *et al.*, 2003 ; RHODES *et al.*, 1995 ; VANDEHAAR *et al.*, 1995 ; YUNG *et al.*, 1996). L'ensemble des auteurs notent une décroissance linéaire de la taille du follicule dominant et du corps jaune proportionnelle à la perte de poids.

L'anœstrus survient après une durée de restriction variable mais longue : l'intervalle entre le début de la restriction alimentaire et l'anœstrus est inversement proportionnel à la perte de poids mais il semble survenir lorsque que 20 à 24 % du poids initial est perdu selon les auteurs (DISKIN *et al.*, 2003 ; RHODES *et al.*, 1996). Il existe toutefois une grande variabilité individuelle (DISKIN *et al.*, 2003). Bien que la sous-nutrition induise un anœstrus, l'activité ovarienne n'est pas nulle car les vagues folliculaires persistent et sont semblables à celles observées chez les génisses prépubères et les vaches en post-partum : les follicules croissent et s'atréfont mais il n'y a pas d'ovulation (DISKIN *et al.*, 2003).

Les effets d'une dénutrition aiguë ont été étudiés par Mackey et collaborateurs dans deux études. Ils ont montré qu'une restriction alimentaire à 40 % des besoins d'entretien commençant un jour avant la fin d'un protocole de synchronisation des chaleurs à base de progestérone diminue le taux de croissance et le diamètre maximal du follicule dominant de la première vague folliculaire du cycle suivant et du follicule ovulatoire dès 3,5 jours de restriction. De plus, 60 % des génisses sont en anœstrus après 2 semaines de restriction mais la fertilité de celles qui ovulent n'est pas altérée (MACKEY *et al.*, 1999, 2000). Lents *et al.* indiquent quant à eux une proportion de génisses en anœstrus de 70 % après 30 jours de restriction énergétique à 40 % des apports recommandés (LENTS *et al.*, 2013).

Ainsi, une restriction aiguë a des effets délétères sur la dynamique folliculaire beaucoup plus rapidement qu'une restriction chronique. Les différences observées entre les restrictions chroniques et aiguës laissent supposer l'existence d'un seuil en dessous duquel la réponse physiologique à une carence nutritionnelle est rapide. Mackey et collaborateur proposent un seuil compris entre 40 et 60 % des besoins d'entretien (MACKEY *et al.*, 2000).

Les effets d'une sous-alimentation diffèrent selon l'état d'engraissement initial des animaux. Ainsi, pour un même degré de restriction énergétique, des génisses grasses restent cyclées plus longtemps que des génisses dont l'état d'engraissement est modéré. Par conséquent, des animaux gras supportent des périodes de stress énergétique plus longues sur le plan de la fonction de reproduction. Par ailleurs, le poids auquel survient l'anœstrus est identique quel que soit l'état d'engraissement initial (CASSADY *et al.*, 2009).

Enfin, la restriction énergétique est sans effet sur l'expression et la détectabilité de l'œstrus quand il y a œstrus (VILLA-GODOY *et al.*, 1990).

(2) Restriction énergétique et survie embryonnaire

Les effets d'une restriction alimentaire après l'IA sont sujets à controverse. Si les auteurs s'accordent sur un retard de développement, les effets sur la survie embryonnaire et le taux de gestation sont différents selon les études.

Une restriction alimentaire post-IA altère la qualité des embryons : ils ont un développement retardé, moins de blastomères et un pourcentage de blastomères vivants réduit (BRIDGES *et al.*, 2012 ; KRUSE *et al.*, 2017). Pour Doyle *et al.*, une restriction alimentaire à 60 % des besoins d'entretien immédiatement après l'IA divise la longueur de l'embryon par 2,5 (DOYLE *et al.*, 2019).

Certains chercheurs ont également montré une mortalité embryonnaire précoce et donc des taux de gestation réduits qu'ils expliquent par la qualité réduite des embryons des génisses restreintes (BRIDGES *et al.*, 2012). Dans une étude portant sur 269 génisses allaitantes, Dunne et collaborateurs ont montré que le taux de survie des embryons est réduit de plus de 30 points lors d'une réduction

des apports énergétiques de 2 à 0,8 fois les besoins d'entretien pendant 2 semaines après l'IA (DUNNE *et al.*, 1999).

Cette diminution de la survie embryonnaire et du taux de gestation n'a pas été mise en évidence par Doyle *et al.*, bien qu'ils aient constaté une altération de la qualité des embryons (DOYLE *et al.*, 2019).

Certains de ces auteurs suggèrent que l'altération des performances de reproduction à la suite d'une restriction alimentaire après l'IA soit la conséquence d'un effet direct de l'alimentation sur la qualité des sécrétions utérines, tandis que d'autres avancent l'hypothèse d'une modification de la concentration en progestérone (BRIDGES *et al.*, 2012). Toutefois, aucune étude mentionnée précédemment ne montre de lien entre restriction énergétique et progestérone.

Si les effets sur le taux de gestation restent à préciser, il existe un consensus sur le fait qu'une restriction alimentaire, même de courte durée, immédiatement après l'IA altère le développement embryonnaire précoce.

Dans le cas d'une restriction alimentaire qui débute avant l'IA et se poursuit ensuite, le taux de gestation est altéré. Ainsi, une restriction alimentaire entraînant une perte de poids de 0,22 à 0,13 kg/j pendant 6 semaines avant et après l'IA chez des génisses Holstein est à l'origine d'une baisse significative du taux de gestation à 25 jours (46 % pour le groupe restreint contre 69 % pour le groupe témoin) qui se confirme à 60 jours (BAISHYA *et al.*, 1982).

(3) Cas particuliers du transfert embryonnaire et de la superovulation

Au regard des résultats précédents, les données pour les génisses donneuses et receveuses d'embryons sont surprenant. En effet, une réduction de l'apport énergétique une à deux semaines avant et pendant un protocole de superovulation augmente le nombre de follicules et la qualité des embryons par rapport à une alimentation *ad libitum* (NOLAN *et al.*, 1998). Une réduction des apports énergétiques lors de protocoles de superovulation peut ainsi être envisagée pour maximiser la production d'embryons chez des animaux dont les apports énergétiques sont élevés.

En outre, aucun lien significatif n'a été montré entre la couverture des besoins énergétiques et la qualité des génisses receveuses d'embryons mais il semble tout de même qu'un déficit énergétique tende à diminuer le pourcentage de bonnes receveuses (CORLAY, 1998).

b) Augmentation des apports énergétiques

Il existe un nombre restreint d'études portant sur les effets d'une augmentation des apports énergétiques.

(1) Flushing

Le flushing est une technique consistant à augmenter significativement et brièvement la teneur énergétique de la ration grâce à l'apport de concentrés supplémentaires avant et après l'insémination. C'est une pratique courante et dont les bénéfices sont connus et documentés pour certaines espèces dont les ovins et les porcins mais peu répandue en élevage bovin.

Cette technique n'est bénéfique que pour les génisses maigres (dont la NEC est inférieure ou égale à 2) ou dont le GMQ est faible, et n'apporte pas de bénéfice voire est délétère pour la fécondité des génisses en état ou grasse (dont la NEC est supérieure ou égale à 3) (ENNUYER et LAUMONNIER, 2013 ; INRA, 2018 ; LE COZLER *et al.*, 2009 ; TROCCON et PETIT, 1989).

Par exemple, Troccon et Petit recommandent un apport supplémentaire de 2 UFL pendant 2 à 3 semaines après l'IA pour améliorer la fertilité des génisses maigres ou avec un faible GMQ (TROCCON et PETIT, 1989). L'INRA recommande un flushing de 6 semaines : 3 semaines avant et 3 semaines après la mise à la reproduction (INRA, 2010).

Le flushing augmente le recrutement des petits follicules mais cet effet n'est valable que pendant la phase de surnutrition. Un doublement des apports recommandés pour les besoins d'entretien 2 semaines avant les chaleurs jusqu'à 3 jours après augmente de 37 % le nombre de petits follicules (GUTIERREZ *et al.*, 1997).

Contrairement aux effets attendus, l'augmentation des apports énergétiques pendant 2 à 3 semaines avant et après l'IA permettant de passer d'un GMQ de nul à un GMQ de 700 g/j et 800g/j pour des génisses charolaises et laitières respectivement, en vue d'un premier vêlage à 3 ans n'a pas eu d'effet significatif sur les performances de reproduction (DOZIAS *et al.*, 2006 ; PECCATTE *et al.*, 2006).

Un flushing pendant 10 jours avant et 30 jours après l'IA réduit la croissance folliculaire et diminue le nombre d'embryons capables de se développer *in vitro* (YAAKUB *et al.*, 1999). Ces résultats sont cohérents avec ceux de la partie II.B.2.a.3 concernant les effets d'une restriction énergétique sur la qualité des embryons.

(2) Cas de la mise au pâturage

La perte de poids consécutive à la mise à l'herbe est un phénomène connu des éleveurs et des chercheurs et relativement bien décrit.

Les données de cette partie sont issues des différents travaux de Perry et collaborateurs (PERRY *et al.*, 2013, 2015, 2016).

Les auteurs indiquent que les génisses qui n'ont jamais pâture perdent du poids pendant la première semaine de pâturage. Si la mise à l'herbe de ces génisses « naïves » à lieu juste après l'IA, le taux de réussite à l'IA est réduit (ce qui concorde avec les effets décrits en partie II.B.2.a lors d'une perte de poids liée à une restriction alimentaire après l'IA).

La perte de poids des animaux n'ayant jamais pâture est liée à un manque de compétence de pâturage qui se traduit par une baisse du niveau d'ingestion et une augmentation des déplacements donc des dépenses énergétiques.

Ils ont montré que les taux de gestation des génisses élevées en parc d'engraissement et mises à l'herbe après l'IA sont supérieurs si celles-ci reçoivent une supplémentation de 2,2 kg/j de drèches de brasserie déshydratées pendant 42 jours. La supplémentation ainsi effectuée permet d'éviter la perte de poids rencontrée lors de la mise à l'herbe et les résultats de reproduction sont alors identiques à ceux rencontrés pour les génisses qui restent dans un parc à engraissement.

(3) Réalimentation après un anœstrus induit par une restriction énergétique

Les phénomènes d'anœstrus induit par une restriction alimentaire sont peu fréquents en France métropolitaine mais sont courants en zone tropicale.

Lors de la période de réalimentation chez des génisses en anœstrus induit par une restriction alimentaire, le taux de croissance, le diamètre maximal et la persistance du follicule dominant augmente. Selon les auteurs, cette augmentation est linéaire (BOSSIS *et al.*, 2000 ; RHODES *et al.*, 1995) ou d'autant plus rapide que le retour à une cyclicité normale avec ovulation approche (DISKIN *et al.*, 2003). Des phases lutéales courtes, similaires à celles observées à la puberté, précèdent la reprise de la cyclicité (BOSSIS *et al.*, 2000). L'ovulation se produit quand le follicule dominant atteint la taille du follicule dominant avant le début de la restriction énergétique (RHODES *et al.*, 1995).

Le degré d'apport énergétique est sans effet sur les caractéristiques de la vague folliculaire où se produit l'ovulation et sur les deux vagues précédentes mais la reprise de la cyclicité est plus rapide lors d'apports énergétiques élevés. Ainsi, des génisses allaitantes anovulatoires dont l'alimentation permettait un gain de poids de 1,5 kg/j ont recommencé à ovuler 23 jours plus tôt que celles dont l'alimentation permettait un gain de 0,6 kg/j soit respectivement 57 et 80 jours (BOSSIS *et al.*, 2000).

La reprise de la cyclicité œstrale ne dépend pas uniquement de la teneur énergétique de la ration lors de la réalimentation. Il faut également prendre en compte un poids et un état d'engraissement minimal. En effet, des chercheurs ont montré qu'à la reprise de la cyclicité, les

génisses sont plus lourdes et ont une NEC plus élevée que lors de l'apparition de l'anœstrus et ce quel que soit le l'état d'engraissement initial (CASSADY *et al.*, 2009). De plus, le degré d'adiposité nécessaire à la reprise des cycles est influencé par l'état d'engraissement avant la restriction alimentaire (CASSADY *et al.*, 2009).

(4) Effet d'une augmentation des apports énergétiques de longue durée

Une augmentation longue (10 semaines) des apports énergétiques n'a pas d'effet sur le taux de croissance ni sur le nombre de follicules (MURPHY *et al.*, 1991 ; SPICER *et al.*, 1991). Les effets sur le diamètre maximal du follicules dominants sont contradictoires selon les études (MURPHY *et al.*, 1991 ; SPICER *et al.*, 1991).

Aucune différence n'est observée sur le taux de réussite à l'IA lors d'une augmentation de 8 semaines ou plus avant l'IA de l'apport énergétique (LYONS *et al.*, 2016 ; MACKEY *et al.*, 1999). Toutefois les génisses de l'étude de Lyons *et al.*, même supplémentées, avait un GMQ inférieur à celui attendu pour leur âge. A l'inverse, une autre étude a montré que lors d'une supplémentation énergétique correspondant à un apport de 1,75 % du poids vif (PV) en MS supplémentaire débutant 3 mois avant l'introduction du taureau et se poursuivant pendant 80 jours ensuite, les performances de reproduction sont améliorées. En effet, les taux de gestation, de vêlage et le pourcentage de génisses vêlant dans les 21 premiers jours de la saison de vêlage sont significativement plus élevés pour les génisses supplémentées (MORIEL *et al.*, 2020).

3. Effets des sources d'énergie

L'énergie est apportée par les glucides et les lipides de la ration. En cas de déficit de ces deux éléments, les protéines peuvent également être une source d'énergie (les caractéristiques de l'alimentation protéique sont développées en partie II.C).

a) Apports de glucides

Il existe deux types de glucides : les glucides cytoplasmiques (tels que l'amidon) et les glucides pariétaux (tels que la cellulose). Ces derniers ne sont valorisés que chez les herbivores.

Lors de modifications du niveau d'apport énergétique par le biais des glucides, ce sont surtout les apports en glucides cytoplasmiques qui sont modulés. En effet, ce sont les principaux constituants des céréales qui sont utilisées comme compléments énergétiques à côté des fourrages grâce à leur valeur énergétique élevée (supérieure à 1 UFL/kg de MS).

Toutefois, le métabolisme des glucides est lié à celui des protéines (ce lien est détaillé en partie II.C.1). Quelques équipes de chercheurs se sont donc intéressées aux effets d'un déséquilibre entre l'apport protéique et l'apport énergétique. Une première expérimentation a montré que le déséquilibre causé par un apport supplémentaire de glucides fermentescibles pendant 50 jours et commençant 10 jours avant l'IA n'avait pas d'effet sur la survie des embryons à 40 jours (KENNY *et al.*, 2002). Une seconde étude a montré qu'une teneur en amidon élevée dans la ration pendant la période de développement folliculaire antral réduit la qualité des embryons (ROOKE *et al.*, 2009).

Face au faible nombre d'étude sur le sujet, il est difficile de conclure quant à l'effet du type de glucide utilisé pour augmenter les apports énergétiques d'une ration.

Une autre méthode pour augmenter la densité énergétique de la ration est d'ajouter du propylène glycol qui est un précurseur du glucose. Ainsi, Gamarra et collaborateurs ont comparé l'effet de l'utilisation de propylène glycol et de pulpe de betterave sucrière (riche en glucides cytoplasmiques) dans des régimes isoénergétiques pendant les 13 premiers jours du cycle œstral. Les résultats de l'étude montrent que l'utilisation de 300 g de propylène comme source d'énergie augmente la concentration de progestérone (reflet de l'activité du corps jaune) en phase lutéale et le nombre de petits follicules (2 à 3 mm) dans les 2 premiers jours du cycle. En revanche, le nombre de petits

follicules est inchangé plus tard dans le cycle et le nombre de follicules de taille moyenne et grande n'est pas affecté par la source d'énergie pendant toute la durée du cycle. Ils suggèrent alors que l'utilisation du propylène glycol peut être intéressante pour augmenter la production de follicules notamment si elle est combinée à un traitement hormonal stimulant la croissance folliculaire comme cela peut être le cas dans le cadre d'une superovulation en vue d'une transplantation embryonnaire (GAMARRA *et al.*, 2014).

b) Apport de lipides

Les lipides contiennent en moyenne 2 à 2,5 fois plus d'énergie que les glucides. Il s'agit donc d'une source d'énergie intéressante qui peut être utilisée pour apporter de l'énergie aux animaux (BROCARD et LECLERC, 2010 ; HESS *et al.*, 2008). Toutefois, les lipides sont présents en faible quantité dans les aliments (entre 2 à 5% de la MS) sauf pour les oléagineux dont les teneurs sont plus élevées. De plus, la matière grasse ne doit pas dépasser 20% de l'énergie métabolisable (HESS *et al.*, 2008). Ainsi les études s'intéressant aux effets de la nature des acides gras sur la reproduction concernent principalement les oléagineux comme source d'acides gras.

Les acides gras (AG) interviennent dans le métabolisme du cholestérol et de l'acide arachidonique qui sont des précurseurs respectifs des hormones stéroïdiennes et des prostaglandines essentielles à la fonction de reproduction (voir partie I.A.1 pour rappel).

(1) Augmentation de la teneur en matière grasse de la ration

Les génisses avec des carences nutritionnelles ont des performances de reproduction améliorées avec l'ajout de lipides dans la ration indépendamment de la source de lipide mais cette supplémentation n'a pas d'intérêt sur les génisses en état (FUNSTON, 2004 ; HESS *et al.*, 2008 ; LARSON, 2007).

Cordeiro et collaborateurs ont étudié l'influence de l'utilisation de lipides comme source d'acide gras. Ils ont constaté qu'à rations isoénergétiques et isoprotéiques, les génisses ayant reçu un concentré à base de graines de tournesol (riche en acide linoléique, un oméga-6) avec une teneur en matière grasse de 10,1 % de la MS pendant 3 semaines après un protocole de synchronisation des chaleurs, ont un taux de gestation supérieure à celui des génisses ayant reçu un concentré classique avec une teneur en matière grasse de 2,9 % (CORDEIRO *et al.*, 2015). Ces résultats suggèrent qu'une augmentation du taux de matière grasse dans la ration améliore les performances de reproduction et en particulier le taux de gestation. Ces résultats sont confirmés par la méta-analyse de Hess et collaborateurs : le taux de gestation est de 73,6 % pour les génisses supplémentées contre 63,8 % pour les génisses non supplémentées (HESS *et al.*, 2008). Cependant, il n'existe pas de consensus quant à la quantité de lipides à apporter et certains auteurs indiquent une absence d'effet de l'ajout de matière grasse dans la ration sur les taux de conception et de gestation (FUNSTON, 2004).

(2) Nature des acides gras

Plusieurs équipes de chercheurs se sont intéressées à l'influence de la nature des acides gras utilisés dans la ration sur la reproduction car certains auteurs suggèrent un rôle clé du rapport entre acide gras saturés, monoinsaturés et polyinsaturés dans la reproduction, plus encore que de la quantité d'acide gras elle-même (D'OCCHIO *et al.*, 2019 ; FUNSTON, 2004).

Doyle et collaborateurs ont ainsi comparé les effets des acides gras saturés et polyinsaturés, respectivement l'acide palmitique et les acides eicosapentaénoïque et docosahexaénoïque (des oméga-3 qui se trouvent dans les huiles de poisson en grande quantité), en utilisant des génisses nourries avec des rations isoénergétiques, isoazotées et isolipidiques pendant 28 jours avant l'IA. Ils ont montré que l'utilisation d'oméga-3 a un effet positif sur le développement embryonnaire (les embryons sont plus gros 16 jours après l'IA) mais pas sur le taux de gestation. Les résultats obtenus

sur les concentrations hormonales suggèrent une amélioration possible des performances de reproduction chez les génisses recevant des AG insaturés (LONG *et al.*, 2014). De plus, la modification des AG de la ration fait varier la composition en AG du liquide utérin, or les AG sont utilisés par l'embryon pour son développement ce qui peut expliquer l'impact des AG sur le développement embryonnaire (BRISSON, 2003).

Cependant, d'autres études concluent à une absence de différence d'effet des AG saturés et oméga-3 sur la production d'embryons (PONTER *et al.*, 2012 ; VELAZQUEZ, 2011).

Le type d'AG insaturé (oméga-3 ou oméga-6) n'influence pas la production et la qualité des embryons (PONTER *et al.*, 2006, 2012) ni le taux de réussite à l'IA (SCHOLLJEGERDES *et al.*, 2011).

(3) Intérêt des lipides protégés du rumen

Les lipides protégés du rumen, ou lipides bypass, sont des lipides qui ne sont pas dégradés dans le rumen par la flore ruminale.

L'utilisation de lipides bypass est proposée comme alternative pour limiter la baisse d'ingestion de matière sèche et de digestion de la matière organique potentiellement associées à une teneur en matière grasse supérieure à 5 % de la MS ingérée (FUNSTON, 2004). Lorsqu'ils sont donnés avant la mise à la reproduction, les lipides bypass améliorent le taux de gestation et le taux de réussite à la première IA (LONG *et al.*, 2007). Cependant, l'ajout de lipides bypass avant et après la mise à la reproduction n'a pas amélioré le taux de gestation chez des génisses pâturant une herbe de mauvaise qualité (BELLO-FARIA *et al.*, 2021) ou sous-développées (LONG *et al.*, 2014). Deux hypothèses peuvent expliquer cette différence de résultat : soit il y a un effet de la durée de la supplémentation sur la reproduction, soit l'ajout de lipide n'a d'intérêt que si la ration est de bonne qualité.

B. Protéines

1. Rappels sur la digestion de la matière azotée

Les besoins en protéines sont couverts par la matière azotée de la ration. Cette matière azotée peut être de nature protéique ou non protéique telle que les acides aminés libres, l'urée ou les sels d'ammoniac.

Chez les ruminants, une partie de la matière azotée est dégradée par la flore ruminale en ammoniac (ou NH₃) et sert à la synthèse protéique microbienne : il s'agit des protéines fermentescibles. Les protéines microbiennes sont ensuite digérées dans l'intestin grêle avec la partie de la matière azotée qui n'a pas été dégradée dans le rumen. Elles sont alors dégradées en acides aminés qui sont absorbés et passent dans la circulation sanguine ou excrétés dans les fèces. Ainsi les apports azotés des ruminants proviennent à la fois de l'alimentation et de la synthèse microbienne.

Néanmoins, la synthèse de protéines microbiennes nécessite de l'énergie. Les glucides alimentaires sont dégradés en acides gras volatiles (AGV) et en adénosine triphosphate (ATP) par la flore ruminale. Tandis que les acides gras volatiles sont utilisés par les ruminants, l'ATP est la forme d'énergie utilisée par le microbiote ruminal pour la protéosynthèse (figure 7).

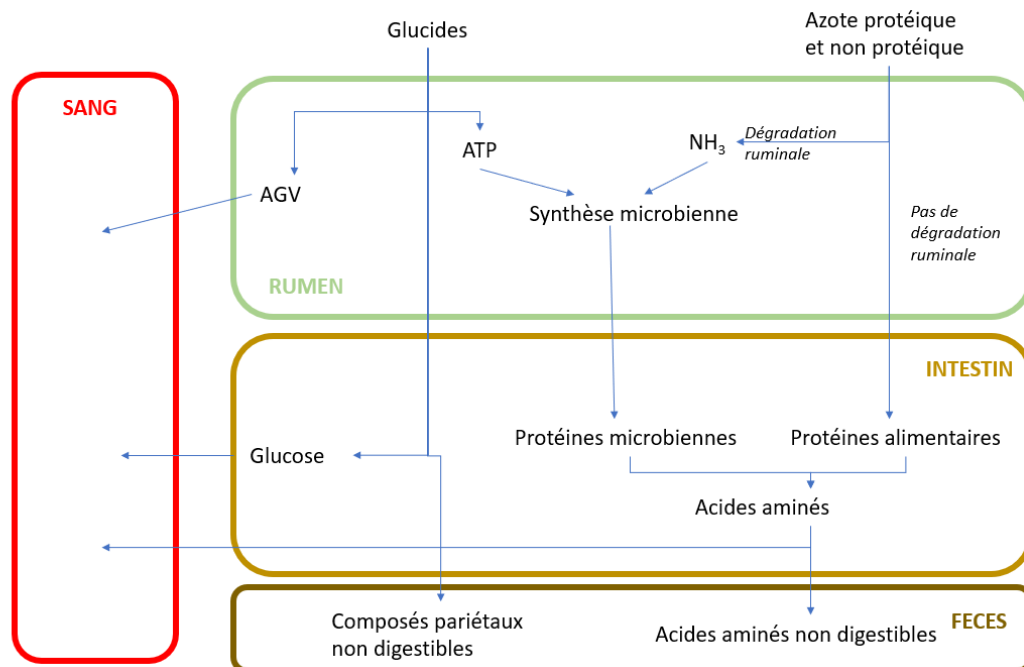


Figure 7 : Schéma simplifié de la digestion de la matière azotée et des glucides (d'après INRA, 2010 ; McDONALD et al., 2022)

Par la figure ci-dessus, on comprend qu'une augmentation de la part d'urée ou de protéines fermentescibles dans la ration se traduit par une hausse de la production d'ammoniac. Or, tout l'ammoniac n'est pas utilisé pour la synthèse microbienne : une partie passe dans la circulation porte et est transformée en urée par le foie. Ainsi, un ajout de protéines fermentescibles ou d'urée dans la ration peut être à l'origine d'une élévation de la concentration plasmatique en urée (McDONALD et al., 2022).

2. Recommandations

Les besoins en protéines sont exprimés en Protéines Digestibles dans l'Intestin (PDI) dans le système INRA. Cette valeur représente la quantité d'acides aminés absorbés dans l'intestin. Les PDI correspondent à deux catégories de protéines : les protéines d'origine alimentaire qui n'ont pas été dégradées dans le rumen (Protéines Digestibles dans l'Intestin d'origine Alimentaire ou PDIA) et les protéines d'origine microbienne qui ont été synthétisées par les microbes ruminants (Protéines Digestibles dans l'Intestin d'origine Microbienne ou PDIM). Comme l'indique la figure 7, la protéosynthèse dépend des quantités d'énergie et d'ammoniac issues de la ration. Par conséquent, on distingue les PDIMN lorsque l'azote est le facteur limitant de la synthèse protéique des PDIME lorsque le facteur limitant est l'énergie. La valeur de PDIM retenue pour un aliment est la plus petite de ces deux valeurs (BROCARD et LECLERC, 2010 ; INRA, 2010).

Le nouveau système INRA contient un indicateur qui reflète l'équilibre entre l'azote et l'énergie disponible pour la protéosynthèse microbienne : la Balance Protéique du Rumen (BPR en g/kg de MS). La BPR représente la différence entre la matière azotée ingérée et la matière azotée entrant dans le duodénum (hors NH₃). L'équilibre est atteint quand la BPR est nulle. Si la BPR est supérieure à zéro alors il y a un excès d'azote dégradable dans la ration et si elle est négative il y a un déficit d'azote (INRA, 2018). Les valeurs minimales acceptables de BPR en fonction du poids et du GMQ sont disponibles en annexes 4 et 5.

Les valeurs des besoins en PDI présentées par la suite sont issues des dernières recommandations INRA 2018 (INRA, 2018) et les poids et GMQ des animaux pris comme références

correspondent à ceux définis en partie I.B.1.b. Il convient de noter que ces valeurs correspondent à des besoins en PDI pour les apports énergétiques recommandés tels que définis en partie II.B.1. Pour une génisse laitière vêlant à 2 ans, les besoins en PDI lors de la mise à la reproduction sont de 624 g/j en considérant que la génisse pèse 400 kg et a un GMQ de 800 g/j. Les besoins sont de 606 g/j pour un vêlage à 3 ans avec un poids de 485 kg et un GMQ de 500 g/j à la mise à la reproduction. Dans le cas d'une génisse allaitante, les besoins en PDI sont de 645 g/j pour un premier vêlage à 2 ans, un poids de 550 kg et un GMQ de 900 g/j à la mise à la reproduction. Pour un premier vêlage à 3 ans, en considérant une génisse avec un poids de 600 kg et un GMQ de 600 g/j lors de la mise à la reproduction, les besoins en PDI sont de 604 g/j. Ces besoins sont à adapter en fonction du poids de l'animal mais aussi du GMQ souhaité et dépendent de la ration distribuée. Les besoins en PDI en fonction du poids et du GMQ pour une ration permettant un bilan énergétique nul sont synthétisés dans le tableau VIII et présentés de manière exhaustive en annexes 4 et 5. D'un point de vue de la ration l'INRA recommande entre 11 et 13% de la MS en protéines brutes (PB) (ENJALBERT *et al.*, 2012).

Tableau VIII : Besoins en PDI pour les génisses laitières et allaitantes en fonction du poids vif et du GMQ (d'après INRA, 2018)

Poids vif (kg)	GMQ (kg/j)	Génisses laitières		Génisses allaitantes	
		PDI (g/j)	PDI/UFL	PDI (g/j)	PDI/UFL
200	0,4	341	110		
	0,6	385			
	0,8	440			
	1,0	495			
250	0,4	387	107,5		
	0,6	440,75			
	0,8	494,5			
	1,0	548,25			
300	0,2	388,5	105		
	0,4	430,5			
	0,6	483			
	0,8	546			
	1,0	609			
350	0,2	418,2	102	358,44	87
	0,4	469,2		390,63	
	0,6	520,2		428,04	
	0,8	581,4		468,93	
	1,0	652,8		514,17	
400	0,2	455,4	99	389,58	86
	0,4	495		423,12	
	0,6	554,4		462,68	
	0,8	623,7		505,68	
	1,0	693		553,84	
450	0,2	490	98	417,43	84,5
	0,4	539		467,29	
	0,6	597,8		492,64	
	0,8	676,2		538,27	
	1,0	754,6		588,97	
500	0,2	523,8	97	442,39	83
	0,4	572,3		478,08	
	0,6	640,2		521,24	
	0,8	717,8		569,38	
	1,0	814,8		624,16	
550	0,2	580	100	477,62	83,5
	0,4	640		516,03	
	0,6	710		561,96	
	0,8	810		614,56	
	1,0	920		674,68	
600	0,2	644,8	104	511,56	84
	0,4	707,2		553,56	
	0,6	800,8		603,96	
	0,8	748	85	662,76	
	1,0	850		728,28	

Ainsi, à poids et GMQ identiques, les besoins en PDI des génisses laitières sont supérieurs à ceux des génisses allaitantes. Ceci s'explique par une efficacité d'utilisation des PDI (EffPDI) moindre pour les génisses laitières : elles ingèrent d'avantage et déposent moins de protéines (INRA, 2018).

Pour les mêmes raisons que l'énergie, les besoins en protéines du système anglo-saxon (NRC) sont mentionnés à titre indicatif. Les recommandations en fonction du poids et du GMQ sont disponibles en annexes 4 et 5. Les besoins en protéines sont exprimés en protéines dégradables dans le rumen (Ruminally Degraded Protein ou RDP) qui servent à la synthèse microbienne et en protéines non dégradables dans le rumen (Ruminally Undegraded Protein ou RUP) qui sont directement digérées dans l'intestin ou en protéines métabolisables (Metabolisable Protein ou MP) qui correspondent aux protéines digérées dans l'intestin. Les besoins en protéines sont exprimés en g/j.

En considérant les objectifs de poids vif et de GMQ lors de la mise à la reproduction définis précédemment, les besoins énergétiques journaliers d'une génisse laitière avec un poids adulte de 650 kg dans un objectif de premier vêlage à 2 ans sont de 850 g/j pour les RDP et 142 g/j pour les RUP (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

Pour une génisse allaitante (de race Angus) avec un poids adulte de 533 kg et un premier vêlage à deux ans, les apports journaliers recommandés sont de 485 g/j de MP (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000).

Les systèmes français et anglo-saxon sont très différents pour les protéines, il est donc difficile de comparer les recommandations entre les deux systèmes.

3. Effets de la quantité et de la nature des protéines

a) *Insuffisance d'azote*

Il n'existe pas d'études s'intéressant aux effets d'une insuffisance d'azote chez les génisses. Toutefois, un déficit d'azote fermentescible diminue la protéosynthèse microbienne et a les mêmes conséquences qu'une restriction énergétique (voir partie II.B.2.a).

b) *Excès de protéines alimentaires*

Seules deux études concernent les apports en protéines alimentaires (ou RUP dans le système anglo-saxon) et aucune de ces études ne s'intéresse directement aux effets des RUP sur la reproduction puisqu'elles portent sur les conséquences sur les gonadotrophines.

Une ration avec un haut niveau de protéines alimentaires diminue la synthèse, le stockage et la sécrétion de gonadotrophines par l'hypophyse ce qui engendre une baisse de croissance et de développement folliculaire (LARSON, 2007). En revanche, une augmentation modérée de la quantité de RUP (115 à 216 g) augmente la concentration basale en FSH donc peut potentiellement améliorer les performances de reproduction (KANE *et al.*, 2004).

c) *Excès d'azote fermentescible*

L'essentiel des expérimentations s'intéressant sur le lien entre la matière azotée de la ration et la reproduction portent sur les effets d'un excès d'azote fermentescible ou d'urée.

(1) *Activité ovarienne*

Les expérimentations de Maquivar et collaborateurs sur des génisses *Bos indicus* croisées *Bos taurus* ont montré que la supplémentation en protéines pendant 30 jours avant un protocole de synchronisation des chaleurs augmente de manière significative la proportion d'animaux avec un corps jaune et la réponse au protocole de synchronisation : la proportion de génisses ayant ovulé est améliorée par la supplémentation (77 % contre 57 %). Lorsque la teneur en protéine du supplément est augmentée de 5,5 à 13 %, la proportion de follicules supérieurs à 9 mm est augmentée : il y a donc

un effet positif sur la dynamique folliculaire (MAQUIVAR *et al.*, 2006). Toutefois, ces observations ne sont pas retrouvées chez des génisses superovulées recevant 250 g d'urée pendant les 10 jours précédant l'IA : le nombre de corps jaunes (donc de follicules ayant ovulés) est inchangé (GATH *et al.*, 2012).

En revanche, l'effet sur la durée du cycle œstral et des chaleurs est minime (BRISSON, 2003) voire nul (ELROD et BUTLER, 1993 ; MAQUIVAR *et al.*, 2006). Ces observations sont similaires à celles d'Amundson et collaborateurs qui n'ont pas mis en évidence de différences pour les durées de cycles œstraux et la durée de l'œstrus en comparant des groupes de 75 génisses nourries avec une ration à 10 ou 14 % de PB pendant toute la durée de la saison de reproduction (AMUNDSON *et al.*, 2016).

Le rôle de l'augmentation d'azote fermentescible sur la concentration en progestérone ne fait pas consensus. En effet, pour certains auteurs, elle est à l'origine d'une diminution de la concentration en progestérone (BRISSON, 2003 ; BUTLER, 2005 ; ENJALBERT *et al.*, 2012) alors que pour d'autres elle ne la réduit pas (BUTLER, 1998).

(2) Fertilité et fécondité

Là encore, l'influence d'un excès de protéines fermentescibles dans la ration sur les performances de reproduction ne fait pas consensus. Cependant, pour la majorité des auteurs, les effets sont délétères ou nuls.

(a) Réussite à l'IA

Un excès de protéines dans la ration (supérieur à 18 % de la MS) pendant la saison de reproduction et en début de gestation diminue la fertilité. Cet effet est majoré si l'apport en énergie est limité (LARSON, 2007). Une étude a également montré qu'un apport excédentaire de protéine avant l'IA est délétère : pour Elrod et Butler, le pourcentage de réussite à l'IA première est réduit à 61 % lorsque l'apport en RDP est majoré à 150 % des besoins pendant les 4 semaines précédant l'IA (contre 82 % si l'apport correspond aux apports recommandés) (ELROD et BUTLER, 1993).

En revanche, pour certains auteurs, un apport en azote supérieur aux besoins diminue le rapport IA/IA fécondante (BELLO-FARIA *et al.*, 2021 ; ENJALBERT, 2006).

Bello-Faria et collaborateurs ont ainsi montré que le taux de réussite en première IA est supérieur chez les génisses supplémentées en protéines. En effet, ils ont montré que les génisses Brahman recevant chaque jour 1 kg d'un complément à 45,3 % de PB pendant 57 jours avant le début de la saison de reproduction et pendant la saison de reproduction ont un taux de réussite à l'IA première de 57,9 % contre 29,4 % pour les génisses non supplémentées. Il convient toutefois de noter que la ration de base de ces génisses est du fourrage tropical peu riche en matière azotée (BELLO-FARIA *et al.*, 2021).

Enfin, Lyons et collaborateurs n'ont pas montré d'effet d'une hausse de la teneur en protéines de la ration sur le taux de réussite à l'IA (LYONS *et al.*, 2016).

(b) Taux de gestation

Les résultats des différentes études s'intéressant aux conséquences d'un ajout de protéines fermentescibles dans la ration sont cohérents et montrent l'absence d'effet sur le taux de gestation (AMUNDSON *et al.*, 2016 ; LANSFORD *et al.*, 2018 ; LYONS *et al.*, 2016 ; MAQUIVAR *et al.*, 2006, 2010).

Ainsi, Lyons et collaborateurs n'ont pas montré d'effet sur le taux de gestation des génisses recevant 500 g/j de concentré à 34 % de PB en comparaison aux génisses ne recevant pas ce complément (LYONS *et al.*, 2016). Ces résultats sont cohérents avec ceux de Lansford et collaborateurs qui n'ont pas montré d'effet sur le taux de gestation avec l'apport de 450 g/j d'un supplément à 32 % de PB durant les 2 semaines avant la mise à la reproduction et les 45 jours de la saison de reproduction (LANSFORD *et al.*, 2018). En revanche, dans cette étude, les veaux issus de génisses allaitantes supplémentées sont plus lourds de 11 kg au sevrage (LANSFORD *et al.*, 2018).

Les expérimentations de Maquivar et collaborateurs sur des génisses *Bos indicus* croisées *Bos taurus* ont montré que la supplémentation en protéines pendant 30 jours avant un protocole de synchronisation des chaleurs ne modifie pas les taux de gestation (MAQUIVAR *et al.*, 2006, 2010). Amundson et collaborateurs ont comparé les effets de 2 concentrations en PB sur le taux de gestation de 150 génisses qui ont été nourries avec une ration à 10 ou 14 % de PB pendant toute la durée de la saison de reproduction (AMUNDSON *et al.*, 2016). Ainsi, un régime riche en protéine n'a pas d'effets délétères sur la reproduction mais les rations distribuées dans cette étude correspondent à des apports protéiques que peuvent fournir certaines pâtures donc rencontrées en conditions normales (AMUNDSON *et al.*, 2016).

(c) Qualité et survie des embryons

Les conséquences de la hausse de protéines fermentescibles dans la ration sur la qualité et la survie des embryons sont variables d'une étude à l'autre.

Certaines études montrent l'absence de conséquence d'une ration riche en PB sur la qualité et la survie des embryons (AMUNDSON *et al.*, 2016 ; BUTLER, 2005 ; GATH *et al.*, 2012 ; KENNY *et al.*, 2002 ; VELAZQUEZ, 2011).

Ainsi, Amundson et collaborateurs n'ont pas observé de différences sur le nombre d'ovocytes collectés, le nombre d'ovocytes clivés, la quantité de blastocytes, le pourcentage d'ovocytes clivés ni le pourcentage de blastocytes présents (AMUNDSON *et al.*, 2016).

De plus, Kenny et collaborateurs n'ont pas montré d'effet d'une augmentation de la quantité de protéines fermentescibles (ajout de 240 g d'urée) sur la survie des embryons entre 10 jours avant et 40 jours après l'IA (KENNY *et al.*, 2002).

Chez les génisses superovulées, l'augmentation de la part de PB dans la ration (de 14 à 18 % de la MS) réduit la proportion d'embryons de mauvaise qualité. Toutefois, le nombre de corps jaunes et le nombre total d'embryons produits et transférables sont inchangés (VELAZQUEZ, 2011). La production d'embryons n'est pas affectée par un haut apport en protéine tant que la ration apporte suffisamment d'énergie (VELAZQUEZ, 2011).

Gath et collaborateurs se sont intéressés quant à eux aux conséquences d'une alimentation riche en urée lors de transplantation embryonnaire. Ils ont montré que le taux de gestation des génisses transplantées recevant 250 g d'urée quotidiennement pendant 19 jours avant la transplantation et 28 jours après est similaire à celui des génisses ne recevant pas d'urée (GATH *et al.*, 2012). Ainsi, les embryons de 7 jours n'ont pas été affectés par l'ajout d'urée.

A contrario, pour certains auteurs, un excès trop important de protéines fermentescibles est à proscrire car il augmente la mortalité embryonnaire, et ce d'autant plus que la ration est pauvre en énergie (BUTLER, 1998 ; ENJALBERT *et al.*, 2012).

Les effets néfastes d'un excès de protéines dans la ration ont été montré sur des ovocytes *in vitro* : les ovocytes issus de génisses nourries avec un excès de protéines ont un retard de développement (DUPONT *et al.*, 2014 ; SINCLAIR *et al.*, 2000). Ainsi, l'exposition à un taux élevé d'ammoniac ou d'urée pendant la phase de développement des follicules antraux compromet la capacité des ovocytes à se développer en blastocytes *in vitro* : le taux de clivage est réduit à 47,4 % et le taux de production de blastocytes à 10,9 % contre respectivement 62,4 et 20,6 % pour les génisses non supplémentées (SINCLAIR *et al.*, 2000).

Les auteurs suggèrent que les conséquences délétères d'un excès de protéines dans la ration résultent d'une modification des sécrétions utérines pendant la phase lutéale. En effet, l'ammoniac et l'urée altèrent l'environnement utérin via une diminution du pH utérin en phase lutéale ainsi qu'une diminution de la concentration en progestérone et une augmentation de la concentration en prostaglandines, ce qui réduit la survie et l'implantation embryonnaires. Ces auteurs suggèrent que l'embryon dans ses premiers stades de développements ne puisse pas s'adapter aux altérations de l'environnement utérin (AMUNDSON *et al.*, 2016 ; BRISSON, 2003 ; BUTLER, 1998, 2005 ; ENJALBERT

et al., 2012). Amundson et collaborateurs proposent également que la perte de fertilité observée lors de la non augmentation du pH utérin s'explique par le fait que la capacitation des spermatozoïdes nécessite une augmentation du pH utérin (AMUNDSON *et al.*, 2016)

Toutefois, si l'augmentation physiologique du pH utérin après l'œstrus n'est pas retrouvée chez les génisses nourries à 70 % des besoins énergétique mais avec un excès de protéines (ELROD et BUTLER, 1993), des génisses avec une balance énergétique positive et nourries avec un excédent d'azote uréique ont un pH utérin augmenté (GRANT *et al.*, 2013). Un lien entre statut énergétique et alimentation protéique n'est donc pas à exclure pour expliquer les conséquences de l'alimentation sur les performances de reproduction des génisses mais il manque d'études sur le sujet.

Finalement, plus que la quantité de protéines, c'est la nature des protéines qui a le plus de conséquences sur les performances de reproduction (BRISSON, 2003) et le ratio PDIE/PDIN.

D. Minéraux

Les minéraux sont des composants essentiels de la structure des organes et des tissus et agissent comme cofacteurs et activateurs d'enzymes et d'hormones mais aussi comme régulateurs de la différenciation et de la réplication cellulaire (SHARMA *et al.*, 2007). De manière générale, tous les minéraux sont utiles pour la reproduction, qu'ils aient ou non un rôle direct, car ils sont impliqués dans le métabolisme, l'entretien et la croissance cellulaire (HURLEY *et al.*, 1982).

Parmi les minéraux, il faut distinguer les macroéléments dont les apports journaliers s'expriment en g/kg de MS, des microéléments qui s'expriment en mg/kg de MS (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017).

Dans cette partie, seuls les minéraux avec un véritable intérêt dans la nutrition des bovins sont considérés. Ce sont tous des éléments essentiels, c'est-à-dire qu'ils sont nécessaires « pour maintenir l'intégrité fonctionnelle et structurelle des tissus, et pour assurer une croissance optimale, la santé et la productivité des animaux » (INRA, 2018). Ainsi, tout déséquilibre dans l'apport en minéraux entraîne des conséquences sur la santé et la production des animaux.

Le nombre d'études s'intéressant aux conséquences de l'alimentation minérale sur la reproduction des génisses est limité et encore plus pour l'alimentation minérale pendant la période de mise à la reproduction. Toutefois, les auteurs s'accordent sur le fait que le rôle des minéraux est identique chez les adultes et les génisses : les effets généraux des minéraux sur la reproduction sont donc extrapolés à partir de données disponibles pour les animaux en production sauf mention contraire. En revanche, les effets des variations d'apports par rapport aux recommandations ne seront étudiés que chez les génisses, car ils sont difficilement extrapolables depuis des données issues d'animaux adultes.

De la même manière que précédemment, les animaux pris en référence répondent aux critères définis en partie I.B.1.b. Dans le cas d'une génisse laitière avec un premier vêlage à 2 ans, elle pèse 400 kg et a un GMQ de 800 g/j lors de la mise à la reproduction. Si le premier vêlage est à 3 ans, son poids et son GMQ sont de respectivement 485 kg et 500 g/j.

Dans le cas d'une génisse allaitante, si le premier vêlage est à 2 ans, son poids est de 550 kg et son GMQ de 900 g/j tandis que si le premier vêlage est à 3 ans, son poids et son GMQ sont de 600 kg et 600 g/j respectivement.

1. Macro-éléments

Les macro-éléments, ou éléments majeurs, ont des rôles physiologiques variés mais seuls les aspects liés à la fonction de reproduction seront développés dans cette partie. L'ensemble des principaux rôles physiologiques des macro-éléments est disponible dans l'annexe 8.

Les tableaux IX et X en fin de partie détaillent les apports recommandés en fonction du type (laitier ou allaitant), du poids et du GMQ de la génisse.

Les teneurs physiologiques ainsi que les valeurs seuils de carence et d'excès de l'ensemble des macro-éléments sont regroupées dans le tableau XI également en fin de partie.

a) Calcium

(1) Apports recommandés

Dans le système INRA, les besoins (et les apports) en calcium (Ca) sont exprimés en grammes d'élément absorbables : cela correspond à la proportion de Ca ingérée dans la ration qui est réellement absorbée dans le tube digestif (INRA, 2010).

Pour une génisse laitière, l'apport journalier recommandé en calcium absorbable (Ca_{abs}) est de 15,4 g ou 12,9 g selon que le premier vêlage soit à 2 ou 3 ans (INRA, 2010 ; MESCHY, 2007, 2017). Les valeurs du NRC sont cohérentes avec celles de l'INRA.

Dans le cas d'une génisse allaitante, l'apport journalier recommandé est de 18,1 g pour un vêlage précoce et de 15,5 g sinon (INRA, 2010 ; MESCHY, 2007, 2017).

La teneur en calcium de la ration ne doit pas dépasser 15 g/kg de matière sèche ingérée (MSI) (INRA, 2018).

La valeur physiologique de la calcémie est de 2 à 3 mmol/L. En dessous de 2,0 mmol/L il y a une carence en calcium. Un excès de calcium correspond à une calcémie supérieure à 3-7,5 mmol/L (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

(2) Importance lors de la mise à la reproduction

Pour Brisson, il n'y a pas d'effet direct connu du calcium sur la reproduction (BRISSEON, 2003).

Une carence ou un excès de Ca altère la reproduction en favorisant l'apparition de kystes folliculaires (CHASTANT-MAILLARD, 2016). Chez la vache adulte, des troubles de la reproduction comme un retard d'involution utérine, un risque élevé de dystocie, de rétention placentaire ou de prolapsus utérin sont associés à une carence en Ca mais sont probablement des conséquences de la fièvre de lait associée à l'hypocalcémie (HURLEY *et al.*, 1982).

Un excès de Ca dans la ration peut être responsable de carences secondaires en certains minéraux dont le phosphore, le magnésium, le zinc et le cuivre par inhibition de leur absorption intestinale et donc altérer les performances de reproduction (HURLEY *et al.*, 1982). Les conséquences d'une carence de ces minéraux sont précisées dans les paragraphes relatifs à ceux-ci.

En outre, la synthèse des stéroïdes implique des mécanismes dépendant du calcium : un déséquilibre dans l'apport de calcium perturbe la stéroïdogenèse (HURLEY *et al.*, 1982).

Plus encore que la valeur de la teneur en Ca de la ration, c'est le rapport phosphocalcique qui importe car le métabolisme de ces deux minéraux est étroitement lié, et car les génisses sont en croissance lorsqu'elles sont mises à la reproduction (HURLEY *et al.*, 1982 ; MESCHY, 2017 ; SHARMA *et al.*, 2007). Zhou et collaborateurs se sont intéressés aux conséquences d'un ajout de Ca seul ou associé à du phosphore pendant les 30 jours précédant la saillie sur les taux de conception et vêlage de génisses yack. Les apports en Ca étaient supérieurs de 46 % à ceux recommandés par le NRC et n'ont pas amélioré les performances de reproduction lorsque seul du calcium était ajouté à la ration alors qu'elles étaient améliorées lors d'un ajout conjoint de calcium et de phosphore (ZHOU *et al.*, 2021).

b) Phosphore

(1) Apports recommandés

A l'image du calcium, les besoins en phosphore (P) sont exprimés en grammes d'élément absorbable (INRA, 2018).

Pour une génisse laitière avec un premier vêlage à 2 ans, l'apport journalier recommandé en P absorbable (P_{abs}) est de 12,3 g. Il est de 12 g dans le cadre d'un premier vêlage à 3 ans (INRA, 2010 ; MESCHY, 2017 ; MESCHY et RAMIREZ-PEREZ, 2005). Ces valeurs sont cohérentes avec les recommandations du NRC.

Pour une génisse allaitante, l'apport journalier est de 14,5 g ou 13,6 g pour un premier vêlage à 2 ou 3 ans (INRA, 2010 ; MESCHY, 2017 ; MESCHY et RAMIREZ-PEREZ, 2005).

La teneur en phosphore de la ration ne doit pas dépasser 7 g/kg MSI (INRA, 2018).

A cause de son implication dans la pollution environnementale (notamment l'eutrophisation des eaux), les recommandations récentes préconisent de limiter au maximum l'excès d'apport de phosphore dans l'alimentation (MESCHY et RAMIREZ-PEREZ, 2005) et ce d'autant plus que les teneurs en phosphore des aliments suffisent généralement à couvrir les besoins des animaux (BJELLAND *et al.*, 2011).

La valeur physiologique de la phosphatémie est de 1,3-2,6 mmol/L. En dessous de 1,3-1,5 mmol/L, il y a une carence en phosphore. Meschy propose un seuil de carence à 1 mmol/L. Un excès de P correspond à une phosphatémie supérieure à 2,6-3,9 mmol/L (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

Les carences en phosphore apparaissent essentiellement chez des bovins pâturant sur des sols pauvres en phosphore ou nourris avec des résidus de cultures contenant moins de 0,25 % de P dans la MS (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

(2) Importance lors de la mise à la reproduction

Une carence en phosphore est associée à une baisse de fertilité chez les bovins adultes : œstrus réduit ou irrégulier voire anœstrus, taux de conception réduit, formation de kystes folliculaires (BRISSEON, 2003 ; CHASTANT-MAILLARD, 2016 ; HURLEY *et al.*, 1982 ; SHARMA *et al.*, 2007 ; SUTTLE, 2010) mais les expérimentations menées sur des génisses en situations carencielles plus ou moins longues n'ont pas mis en évidence d'effet sur les performances de reproduction (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001). De plus, les observations chez les adultes ne semblent vérifiées qu'en situation de carence forte (MESCHY, 2017).

Il n'existe pas de preuve qu'un apport de phosphore excédentaire aux recommandations améliore les performances de reproduction (BRISSEON, 2003 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

Finalement, l'importance du phosphore dans la reproduction est limitée et les effets d'une carence sont mineurs, sauf en cas d'une situation fortement carencielle (MESCHY, 2017). Ainsi, plusieurs auteurs suggèrent que l'importance du phosphore pour la reproduction dans les pays développés est surestimée (BRISSEON, 2003 ; CHASTANT-MAILLARD, 2016).

S'il n'y a pas d'effet direct connu du phosphore sur la reproduction (BRISSEON, 2003), une carence en phosphore peut avoir des conséquences indirectes sur la reproduction, car elle induit une diminution de l'ingestion à l'origine d'un déficit énergétique (MESCHY, 2017). Les effets d'un déficit énergétique sur la reproduction sont détaillés en partie II.B.2.a.

L'étude de Zhou et collaborateurs sur les génisses yacks montre qu'un apport de phosphore permettant de combler le déficit en phosphore de l'herbe pâturée est associé à une augmentation significative du taux de conception (83 % contre 63,33 % pour le groupe ne recevant pas de phosphore) et du taux de vêlage (80 % contre 56,67 %) (ZHOU *et al.*, 2021).

Doyle et collaborateurs ont donné à des génisses allaitantes du phosphore en excès, à la dose de 18 g/j, pendant 75 jours avant le début d'une saison de reproduction de 45 jours. L'apport de phosphore a été poursuivi pendant les 45 jours de la saison de monte et 14 jours après la fin de celle-ci. Ils n'ont pas montré d'effet de la supplémentation en phosphore sur la concentration en phosphore de l'endomètre ni sur l'intervalle mise à la reproduction – saillie fécondante (DOYLE *et al.*, 1990). L'absence d'effet d'une modification de la teneur en phosphore de la ration sur les paramètres de reproduction a également été montré par Hurley et collaborateurs. Ils n'ont pas montré de différence sur les concentrations sanguines en progestérone, œstradiol et LH ni sur les caractéristiques de l'œstrus (durée entre la fin du protocole de synchronisation et le début des chaleurs, durée de l'œstrus, nombre de saillies par heure) en faisant varier le niveau d'apport en phosphore (0,19, 0,36 et 0,64 % de la MSI) chez des génisses laitières pendant 9 à 13 semaines avant le début d'un protocole de synchronisation des chaleurs avec différents (HURLEY *et al.*, 1982).

c) Magnésium

(1) Apports recommandés

Les formules pour calculer apports nécessaires en magnésium (Mg) sont différentes selon les auteurs : $0,011 \times PV + 0,4 \times GMQ$ (INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001) ou $0,008 \times PV + 0,4 \times GMQ$ (MESCHY, 2017) où PV est le poids vif en kilogrammes.

Pour une génisse laitière, les besoins journaliers en magnésium sont de 4,72 g pour un premier vêlage à 2 ans et de 5,54 g pour un premier vêlage à 3 ans (INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001). Les valeurs proposées par Meschy sont plus faibles : 3,52 g pour un premier vêlage à 2 ans et 4,08 g pour un premier vêlage à 3 ans (MESCHY, 2017).

Pour une génisse allaitante, ils sont de 6,41 et 6,84 g pour un premier vêlage à 2 et 3 ans respectivement (INRA, 2018). Les valeurs proposées par Meschy sont de 4,76 et 5,04 g (MESCHY, 2017).

La teneur en magnésium de la ration ne doit pas dépasser 4 à 6 g/kg MSI (INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000).

La valeur physiologique de la concentration plasmatique en Mg est de 0,7-1,4 mmol/L (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001). En dessous de 0,5 mmol/L il y a une carence en magnésium. Un excès de Mg correspond à une concentration plasmatique supérieure à 1,6 mmol/L (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017).

(2) Importance lors de la mise à la reproduction

Le lien entre le magnésium et la reproduction est peu documenté et aucune étude n'est disponible concernant les apports en magnésium chez les génisses lors de la mise à la reproduction.

A l'heure actuelle, aucun lien direct entre le magnésium et la reproduction n'a été mis en évidence chez les bovins (BRISSON, 2003 ; ENJALBERT *et al.*, 2012). Néanmoins, le magnésium influence l'absorption du calcium et du phosphore et pourrait donc être impliqué dans les troubles de la reproduction induits par une carence en phosphore ou en calcium (SHARMA *et al.*, 2007).

d) Sodium

(1) Apports recommandés

Les besoins en sodium (Na) se calculent avec la formule $0,015 \times PV + 1,4 \times GMQ$. Les besoins journaliers en sodium sont de 7,12 g pour une génisse laitière avec un premier vêlage à 2 ans, 7,98 g pour une génisse laitière avec un premier vêlage à 3 ans, 9,51 g pour une génisse allaitante avec un premier vêlage à 2 ans et 9,84 g pour une génisse allaitante avec un premier vêlage à 3 ans (INRA, 2018 ; MESCHY, 2007, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

La teneur en sodium de la ration ne doit pas dépasser 18 g/kg MSI (INRA, 2018).

La valeur physiologique de la natrémie est de 135-150 mmol/L. En dessous de 125 mmol/L il y a une carence en sodium. Un excès de Na correspond à une natrémie supérieure à 150 mmol/L (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

Les aliments des bovins ne contiennent pas assez de sodium pour couvrir les besoins donc la carence en sodium est fréquente en l'absence d'apports de sel (MESCHY, 2017).

(2) Importance lors de la mise à la reproduction

Il existe peu de données sur le lien entre le sodium et la reproduction : pour Enjalbert et Brisson, il n'y a pas d'effet du sodium sur la reproduction (BRISSEON, 2003 ; ENJALBERT *et al.*, 2012) tandis que pour Suttle, une carence en sodium est à l'origine d'un taux de conception réduit (SUTTLE, 2010).

Aucune étude n'a été menée sur les effets du sodium lors de la mise à la reproduction des génisses.

e) Potassium

(1) Apports recommandés

Pour une génisse laitière, les besoins journaliers en potassium (K) sont de 29,28 g pour un vêlage précoce et de 34,75 g pour un premier vêlage à 3 ans (INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

Pour une génisse allaitante, ils sont de 39,94 et 42,96 g pour un premier vêlage à 2 et 3 ans respectivement (INRA, 2018).

Les besoins sont plus élevés pour Meschy qui propose 43,28 g/j et 51,73 g/j pour une génisse laitière en vêlage précoce et tardif. Pour une génisse allaitante, il propose 59,19 g/j pour un vêlage précoce et 63,96 g/j pour un vêlage tardif (MESCHY, 2007, 2017). En effet, les auteurs utilisent des méthodes de calculs pour les besoins différentes : $0,07 \times PV + 1,6 \times GMQ$ pour l'INRA et $0,105 \times PV + 1,6 \times GMQ$ pour Meschy.

La teneur en potassium de la ration ne doit pas dépasser 30 g/kg MSI (MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000).

La valeur physiologique de la kaliémie est de 4-5 mmol/L. En dessous de 2,5 mmol/L il y a une carence en potassium. Un excès de K correspond à une kaliémie supérieure à 6-10 mmol/L (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

(2) Importance lors de la mise à la reproduction

Peu de données sont disponibles sur le rôle du potassium dans la reproduction et elles sont contradictoires. Certains auteurs indiquent qu'il n'existe pas de lien entre la reproduction et la reproduction (BRISSEON, 2003 ; ENJALBERT *et al.*, 2012) alors que d'autres décrivent une perturbation de la durée du cycle œstral et une réduction de la fertilité en cas d'excès en potassium (CHASTANT-MAILLARD, 2016).

Il n'existe pas d'études sur l'intérêt du potassium lors de la mise à la reproduction des génisses.

f) Chlore

(1) Apports recommandés

La formule pour calculer les apports journaliers recommandés est $0,023 \times PV + 1 \times GMQ$.

Les besoins journaliers en chlore (Cl) sont de 11,66 g pour une génisse laitière vêlant à 2 ans et 12 g si elle vêle à 3 ans.

Pour une génisse allaitante, les besoins journaliers s'élèvent à 13,55 g si elle vêle à 2 ans et 14,4 g si elle vêle à 3 ans (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

La teneur en chlore de la ration ne doit pas dépasser 27 g/kg MSI (INRA, 2018).

La valeur physiologique de la concentration plasmatique en chlore est de 90-110 mmol/L. En dessous de 70 mmol/L, il y a une carence en chlore. Un excès de Cl correspond à une concentration supérieure à 150 mmol/L (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

(2) Importance lors de la mise à la reproduction

Les quelques documents mentionnant l'importance du chlore pour la reproduction indiquent qu'aucun lien direct n'est actuellement connu (BRISSEON, 2003 ; ENJALBERT *et al.*, 2012).

g) Soufre

(1) Apports recommandés

Les besoins journaliers en soufre (S) sont dépendants de la quantité de MSI et correspondent à 2 g/kg de MSI (INRA, 2018 ; MESCHY, 2007, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001).

La teneur en soufre de la ration ne doit pas dépasser 3 à 5 g/kg MSI (INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000).

Les valeurs physiologiques, de carence et d'excès ne sont pas définies chez les bovins et sont extrapolées à partir des données disponibles chez les ovins. La valeur physiologique de la concentration plasmatique en soufre est de 20-50 mg/L. En dessous de 10 mg/L il y a une carence en soufre (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017).

(2) Importance lors de la mise à la reproduction

Le nombre de données sur le rapport entre le soufre et la fonction de reproduction est limité. Si certains auteurs suggèrent l'absence de lien (BRISSEON, 2003 ; ENJALBERT *et al.*, 2012), Meschy indique que soufre est un constituant essentiel de l'ocytocine : une carence en soufre pourrait donc être à l'origine de troubles de la reproduction (MESCHY, 2007).

De plus, un excès en soufre interfère avec l'absorption du cuivre et du sélénium (MESCHY, 2017 ; SPRINGMAN, 2017 ; SUTTLE, 2010). Ainsi les effets d'un excès de soufre sont ceux retrouvés lors de la carence en cuivre et en sélénium induite (voir partie II.D.2).

Il n'existe pas de données sur les effets du soufre chez les génisses lors de la mise à la reproduction.

Tableau IX : Besoins en macroéléments pour les génisses laitières en fonction du poids et du GMQ (d'après INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001)

Poids vif (kg)	GMQ (kg)	Ca _{abs} (g)	P _{abs} (g)	Mg (g)		Na (g)	K (g)		Cl (g)	S (g/kg MSI)
				0,011 x PV + 0,4 x GMQ	0,008 x PV + 0,4 x GMQ	0,015 x PV + 1,4 x GMQ	0,07 x PV + 1,6 x GMQ	0,105 x PV + 1,6 x GMQ	0,023 x PV + 1 x GMQ	
200	0,4	8,5	8	2,36	1,76	3,56	14,64	21,64	5	2
	0,6	11,2	8,6	2,44	1,84	3,84	14,96	21,96	5,2	2
	0,8	13,9	9,2	2,52	1,92	4,12	15,28	22,28	5,4	2
	1	16,7	9,9	2,6	2	4,4	15,6	22,6	5,6	2
250	0,4	9	8,7	2,91	2,16	4,31	18,14	26,89	6,15	2
	0,6	11,6	9,3	2,99	2,24	4,59	18,46	27,21	6,35	2
	0,8	14,2	10	3,07	2,32	4,87	18,78	27,53	6,55	2
	1	16,8	10,8	3,15	2,4	5,15	19,1	27,85	6,75	2
300	0,2	7	8,7	3,38	2,48	4,78	21,32	31,82	7,1	2
	0,4	9,5	9,3	3,46	2,56	5,06	21,64	32,14	7,3	2
	0,6	12	10	3,54	2,64	5,34	21,96	32,46	7,5	2
	0,8	14,5	10,8	3,62	2,72	5,62	22,28	32,78	7,7	2
	1	17	11,7	3,7	2,8	5,9	22,6	33,1	7,9	2
350	0,2	7,7	9,3	3,93	2,88	5,53	24,82	37,07	8,25	2
	0,4	10,1	9,9	4,01	2,96	5,81	25,14	37,39	8,45	2
	0,6	12,5	10,7	4,09	3,04	6,09	25,46	37,71	8,65	2
	0,8	14,9	11,6	4,17	3,12	6,37	25,78	38,03	8,85	2
	1	17,3	12,5	4,25	3,2	6,65	26,1	38,35	9,05	2
400	0,2	8,3	9,9	4,48	3,28	6,28	28,32	42,32	9,4	2
	0,4	10,7	10,5	4,56	3,36	6,56	28,64	42,64	9,6	2
	0,6	13	11,4	4,64	3,44	6,84	28,96	42,96	9,8	2
	0,8	15,4	12,3	4,72	3,52	7,12	29,28	43,28	10	2
	1	17,7	13,4	4,8	3,6	7,4	29,6	43,6	10,2	2
450	0,2	9	10,4	5,03	3,68	7,03	31,82	47,57	10,55	2
	0,4	11,3	11,1	5,11	3,76	7,31	32,14	47,89	10,75	2
	0,6	13,6	12	5,19	3,84	7,59	32,46	48,21	10,95	2
	0,8	15,9	13,1	5,27	3,92	7,87	32,78	48,53	11,15	2
	1	18,2	14,4	5,35	4	8,15	33,1	48,85	11,35	2
500	0,2	9,7	10,9	5,58	4,08	7,78	35,32	52,82	11,7	2
	0,4	12	11,7	5,66	4,16	8,06	35,64	53,14	11,9	2
	0,6	14,2	12,7	5,74	4,24	8,34	35,96	53,46	12,1	2
	0,8	16,4	14	5,82	4,32	8,62	36,28	53,78	12,3	2
	1	18,7	15,3	5,9	4,4	8,9	36,6	54,1	12,5	2
550	0,2	10,4	11,4	6,13	4,48	8,53	38,82	58,07	12,85	2
	0,4	12,6	12,3	6,21	4,56	8,81	39,14	58,39	13,05	2
	0,6	14,8	13,5	6,29	4,64	9,09	39,46	58,71	13,25	2
	0,8	17	14,8	6,37	4,72	9,37	39,78	59,03	13,45	2
	1	19,2	16,4	6,45	4,8	9,65	40,1	59,35	13,65	2
600	0,2	11,1	12	6,68	4,88	9,28	42,32	63,32	14	2
	0,4	13,3	13	6,76	4,96	9,56	42,64	63,64	14,2	2
	0,6	15,4	14,3	6,84	5,04	9,84	42,96	63,96	14,4	2
	0,8	17,6	15,8	6,92	5,12	10,12	43,28	64,28	14,6	2
	1	19,7	17,7	7	5,2	10,4	43,6	64,6	14,8	2

Tableau X : Besoins en macroéléments pour les génisses allaitantes en fonction du poids et du GMQ (d'après INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001)

Poids vif (kg)	GMQ (kg)	Ca _{abs} (g)	P _{abs} (g)	Mg (g)		Na (g)	K (g)		Cl (g)	S (g/kg MSI)
				0,011 x PV + 0,4 x GMQ	0,008 x PV + 0,4 x GMQ	0,015 x PV + 1,4 x GMQ	0,07 x PV + 1,6 x GMQ	0,105 x PV + 1,6 x GMQ	0,023 x PV + 1 x GMQ	
350	0,2	7,7	8,3	3,93	2,88	5,53	24,82	37,07	8,25	2
	0,4	10,1	8,9	4,01	2,96	5,81	25,14	37,39	8,45	2
	0,6	12,5	9,7	4,09	3,04	6,09	25,46	37,71	8,65	2
	0,8	15	10,6	4,17	3,12	6,37	25,78	38,03	8,85	2
	1	17,4	11,5	4,25	3,2	6,65	26,1	38,35	9,05	2
400	0,2	8,4	9	4,48	3,28	6,28	28,32	42,32	9,4	2
	0,4	10,7	9,7	4,56	3,36	6,56	28,64	42,64	9,6	2
	0,6	13,1	10,5	4,64	3,44	6,84	28,96	42,96	9,8	2
	0,8	15,4	11,4	4,72	3,52	7,12	29,28	43,28	10	2
	1	17,8	12,4	4,8	3,6	7,4	29,6	43,6	10,2	2
450	0,2	9	9,7	5,03	3,68	7,03	31,82	47,57	10,55	2
	0,4	11,3	10,4	5,11	3,76	7,31	32,14	47,89	10,75	2
	0,6	13,6	11,3	5,19	3,84	7,59	32,46	48,21	10,95	2
	0,8	15,9	12,2	5,27	3,92	7,87	32,78	48,53	11,15	2
	1	18,2	13,3	5,35	4	8,15	33,1	48,85	11,35	2
500	0,2	9,7	10,3	5,58	4,08	7,78	35,32	52,82	11,7	2
	0,4	12	11,1	5,66	4,16	8,06	35,64	53,14	11,9	2
	0,6	14,2	12	5,74	4,24	8,34	35,96	53,46	12,1	2
	0,8	16,5	13,1	5,82	4,32	8,62	36,28	53,78	12,3	2
	1	18,7	14,2	5,9	4,4	8,9	36,6	54,1	12,5	2
550	0,2	10,4	11	6,13	4,48	8,53	38,82	58,07	12,85	2
	0,4	12,6	11,8	6,21	4,56	8,81	39,14	58,39	13,05	2
	0,6	14,8	12,8	6,29	4,64	9,09	39,46	58,71	13,25	2
	0,8	17	13,9	6,37	4,72	9,37	39,78	59,03	13,45	2
	1	19,2	15,2	6,45	4,8	9,65	40,1	59,35	13,65	2
600	0,2	11,2	11,6	6,68	4,88	9,28	42,32	63,32	14	2
	0,4	13,3	12,5	6,76	4,96	9,56	42,64	63,64	14,2	2
	0,6	15,5	13,6	6,84	5,04	9,84	42,96	63,96	14,4	2
	0,8	17,6	14,8	6,92	5,12	10,12	43,28	64,28	14,6	2
	1	19,8	16,2	7	5,2	10,4	43,6	64,6	14,8	2

Tableau XI : Teneurs physiologiques, valeurs seuils de carence et seuils de toxicité des macroéléments (d'après INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001)

Élément	Limite de carence	Concentration physiologique dans le plasma	Seuil de toxicité	Teneur maximale dans l'alimentation
Calcium	2,0 mmol/L	2 – 3 mmol/L	3 – 7,5 mmol/L	15 g/kg MSI
Phosphore	1 – 1,5 mmol/L	1,3 – 2,6 mmol/L	2,6 – 3,9 mmol/L	7 g/kg MSI
Magnésium	0,5 mmol/L	0,7 – 1,4 mmol/L	1,6 mmol/L	4 – 6 g/kg MSI
Sodium	125 mmol/L	135 – 150 mmol/L	150 mmol/L	18 g/kg MSI
Potassium	2,5 mmol/L	4 – 5 mmol/L	6 – 10 mmol/L	30 g/kg MSI
Chlore	70 mmol/L	90 – 110 mmol/L	150 mmol/L	27 g/kg MSI
Soufre	10 mg/L	20 – 50 mg/L	/	3 – 5 g/kg MSI

2. Microéléments

A l'image des macroéléments, les microéléments, également appelés oligoéléments ou éléments traces, ont des rôles physiologiques variés. Ceux-ci sont présentés en annexe 9. Cette partie s'intéressera uniquement à leurs rôles dans la reproduction.

Le tableau XII en fin de partie détaille les apports recommandés en oligoéléments chez les génisses. Ces apports recommandés sont établis en prenant en compte une marge de sécurité entre les seuils de carence et de toxicité (également présentés dans le tableau XII). Elle permet de s'affranchir des variations entre animaux et entre aliments (MESCHY, 2007).

Pour l'ensemble des oligoéléments (hormis le manganèse dans les graminées), les besoins des ruminants sont supérieurs aux teneurs en microéléments des fourrages (MESCHY, 2017). Ainsi, les besoins en oligoéléments des bovins ne peuvent pas être couverts uniquement par les fourrages.

Les teneurs physiologiques ainsi que les valeurs seuils de carence et d'excès de l'ensemble des oligoéléments sont regroupées dans le tableau XIII également en fin de partie.

En cas de carence en oligoéléments, la fonction de reproduction est le premier paramètre perturbé lorsque les réserves ne permettent plus le maintien d'une concentration sanguine en oligoéléments suffisante (MESCHY, 2017). A la manière d'un iceberg, les manifestations « visibles » d'une carence en oligoéléments ne touchent qu'une faible partie des animaux dans un troupeau (figure 8).

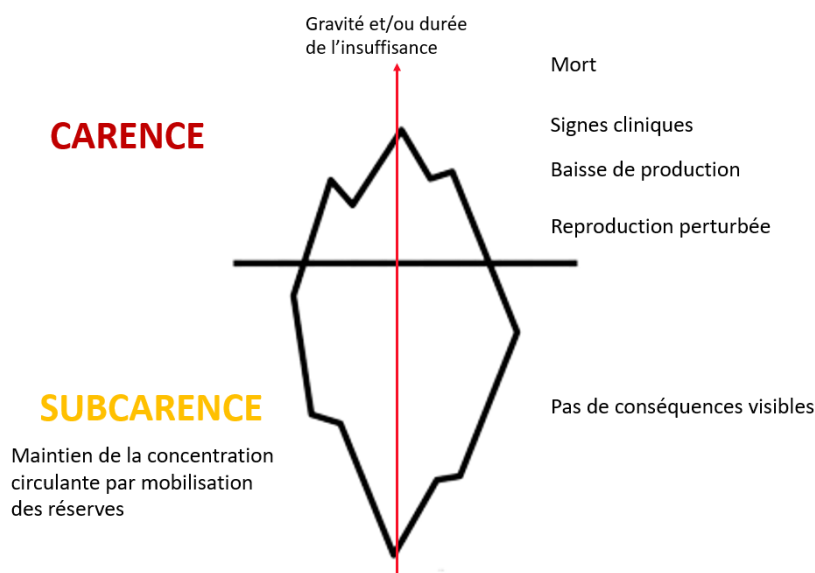


Figure 8 : Principe de la manifestation des carences en oligoéléments (d'après Meschy, 2017)

La prévalence des carences en oligoéléments semble augmenter. Ce phénomène est probablement lié à l'augmentation de la productivité des animaux (leurs besoins en oligoéléments sont accrus) et à une diminution de la teneur en oligoéléments dans l'alimentation inhérente à des choix de cultures plus productives mais moins riches en minéraux (LEQUEUX, 2016). De plus, l'alimentation des génisses est souvent moins bien surveillée que celle des vaches adultes, elles sont donc plus à risque de carences en minéraux (ENJALBERT *et al.*, 2012).

Les différents oligoéléments ont souvent des rôles et des voies métaboliques proches, par conséquent, un changement dans l'apport alimentaire d'un oligoélément peut avoir des conséquences sur d'autres éléments (HIDIROGLOU, 1979).

a) Cuivre

(1) Apports recommandés

Les besoins journaliers en cuivre (Cu) sont dépendant de la quantité de MSI et correspondent à 10 mg/kg de MSI (BURNETT, 2017 ; INRA, 2018 ; MESCHY, 2007, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000). Toutefois, ces besoins sont à moduler selon les teneurs en molybdène (Mo), fer et soufre de l'alimentation. En effet, ces trois éléments réduisent l'absorption du Cu. La recommandation de 10 mg/kg de MSI est valable uniquement pour des teneurs en soufre et en molybdène inférieures à 25 et 2 mg/kg de MSI respectivement (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001).

La teneur en cuivre de la ration ne doit pas dépasser 40-45 mg/kg MSI (BURNETT, 2017 ; INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001) voire 100 mg/kg selon les sources (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000) et elle doit contenir au moins 7 mg/kg MSI de cuivre (MESCHY, 2007).

Le statut en cuivre se détermine préférentiellement à partir d'un échantillon de foie afin d'éviter les artéfacts liés à la présence de protéines riches en cuivre dans le caillot sanguin.

La plage physiologique de teneur en cuivre dans le foie est de 25 – 100 mg/kg (MESCHY, 2017). Les valeurs de limite de carence sont différentes selon les auteurs : 3,7-11 mg/kg (INRA, 2010), 10 mg/kg (MESCHY, 2017) et 20 mg/kg (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

Les seuils de toxicité proposés sont 250-580 mg/kg (INRA, 2018) voire 1000 mg/kg (MESCHY, 2017).

Dans le plasma, la cuprémie est de 0,8 à 1,2 ou 1,5 mg/L (BURNETT, 2017 ; MESCHY, 2017). Le seuil de carence diffère selon les sources : de 0,10-0,35 mg/L (INRA, 2018) à 0,5 mg/L (MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001) voire 0,6 mg/L (BURNETT, 2017). Concernant le seuil de toxicité, les valeurs sont très variables selon les auteurs, allant de 0,7-0,9 mg/L (INRA, 2018) à 4-10 mg/L (MESCHY, 2017).

(2) Importance lors de la mise à la reproduction

Une carence en cuivre est à l'origine d'une réduction générale des performances de reproduction (BURNETT, 2017 ; ENJALBERT *et al.*, 2012 ; SHARMA *et al.*, 2007 ; SUTTLE, 2010) et plus particulièrement d'une fonction ovarienne anormale : un œstrus retardé et réduit (BRISSON, 2003 ; CHASTANT-MAILLARD, 2016 ; HURLEY *et al.*, 1982 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001 ; SMITH et AKINBAMIJO, 2000 ; SPRINGMAN, 2017), d'anovulation (LEQUEUX, 2016 ; MESCHY, 2017) et d'un taux de réussite en IA première diminué (SPRINGMAN, 2017).

Une carence en cuivre (primaire ou secondaire) est également à l'origine d'un défaut de nidation qui engendre de la mortalité embryonnaire (BRISSON, 2003 ; BURNETT, 2017 ; CHASTANT-MAILLARD, 2016 ; HIDIROGLOU, 1979 ; HURLEY et DOANE, 1989 ; MESCHY, 2017 ; SMITH et AKINBAMIJO, 2000).

Selon certains auteurs, les conséquences sur la reproduction d'une carence en cuivre modérée sont surestimées (MESCHY, 2017) et la prévalence des troubles de la reproduction associés à une carence en cuivre semble faible en France (CHASTANT-MAILLARD, 2016).

Le molybdène, le soufre, le fer (Fe) et le zinc (Zn) sont antagonistes du Cu donc un excès de Mo, S, Zn et Fe peut avoir les mêmes conséquences qu'une carence en Cu (ARTHINGTON et CORAH, 1993 ; BRISSON, 2003 ; HURLEY et DOANE, 1989 ; SMITH et AKINBAMIJO, 2000 ; SPRINGMAN, 2017 ; SUTTLE, 2010). Par exemple, l'effet antagoniste du molybdène et du soufre avec le cuivre est lié à la formation de complexes de thiomolybdate rendant le Cu indisponible pour les ruminants (ARTHINGTON et CORAH, 1993). Ainsi, certains auteurs suggèrent que les diminutions de performances de reproduction associées à une carence en cuivre soient plus liées à l'excès de molybdène qu'à l'insuffisance en cuivre induite (MESCHY, 2017 ; SUTTLE, 2010). Toutefois, l'effet d'un apport de Mo pendant une courte durée ne semble pas affecter les performances de reproduction de génisses avec une cuprémie dans les valeurs usuelles. En effet, Vaughan et collaborateurs n'ont pas

mis en évidence de baisse de performance de reproduction lors d'un ajout pendant 21 jours de Mo à la ration de génisses normocuprémiques (VAUGHAN *et al.*, 1994).

Vaughan et collaborateurs n'ont pas mis en évidence de modification du taux de gestation lors d'apport de cuivre sous forme de bolus ou sous forme injectable chez des génisses avec une cuprémie basse. Pourtant, la majorité des documents s'accordent sur le fait qu'une supplémentation en cuivre améliore la fertilité, notamment en situation carencielle (HURLEY et DOANE, 1989 ; MESCHY, 2017). Le seuil de 0,89 mg/L pour la concentration sanguine en cuivre est proposé par Garcia-Diaz et collaborateurs pour un intérêt à l'apport de cuivre. Ils ont étudié l'effet d'une supplémentation parentérale de 50 mg de Cu sur les performances de reproduction de génisses hypo et normocuprémiques. Les pourcentages de génisses en chaleurs et gestantes étaient augmentés chez les génisses ayant reçu une injection de Cu. Pour le groupe de génisses carencées, le taux de génisses manifestant des chaleurs et le taux de gestation étaient de respectivement 100 et 90 % pour les génisses supplémentées contre 55 et 30 % pour les autres. Pour les génisses non carencées, les valeurs étaient de 94 et 86 % pour les génisses supplémentées contre 78 et 57 % pour les autres et ces résultats étaient encore plus marqués si la cuprémie était inférieure à 0,89 mg/L (GARCIA-DIAZ *et al.*, 2012).

b) Zinc

(1) Apports recommandés

Les besoins journaliers en zinc sont dépendants de la quantité de MSI et varient du simple au double selon la source, allant de 30 à 60 mg/kg de MSI (BURNETT, 2017 ; INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000). Un apport compris entre 50 et 60 mg/kg de MSI semble être adéquat dans la majorité des situations (MESCHY, 2007, 2017).

La teneur en zinc de la ration ne doit pas dépasser 300 à 1000 mg/kg MSI selon les sources (INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001) et doit être supérieure à 45 mg/kg MSI (MESCHY, 2007).

La valeur physiologique de la concentration dans le sérum en Zn est de 0,8-1,4 mg/L. En dessous de 0,4 - 0,6 mg/L il y a une carence en zinc. Un excès de Zn correspond à une concentration supérieure à 3 mg/L (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

Les besoins en zinc ne peuvent pas être couverts par les fourrages français car leur teneur en zinc est trop faible sur une grande partie du territoire (MESCHY, 2017).

(2) Importance lors de la mise à la reproduction

Le rôle du zinc dans la reproduction est avant tout hypothétique (CHASTANT-MAILLARD, 2016). Le zinc est impliqué dans la production des hormones stéroïdiennes et l'hormone de croissance (HURLEY et DOANE, 1989 ; MESCHY, 2017). Il est nécessaire au fonctionnement des ovaires et à la synthèse de progestérone puisqu'il intervient dans la régulation de la synthèse d'acide arachidonique (un précurseur de la progestérone) donc une carence altère la phase lutéale du cycle ovarien et les performances de reproduction (BRISSON, 2003 ; ENJALBERT *et al.*, 2012 ; SMITH et AKINBAMIJO, 2000 ; SPRINGMAN, 2017 ; BRISSON, 2003).

Le zinc possède un rôle important dans le métabolisme énergétique via les enzymes dont il est un des constituants, ceci explique son importance pour le fonctionnement des ovaires puisque les ovaires sont le siège d'une forte activité de croissance et de division cellulaire (SMITH et AKINBAMIJO, 2000 ; SPRINGMAN, 2017).

Une carence en zinc serait à l'origine de mortalité embryonnaire (BURNETT, 2017) et d'altération de la durée des cycles (CHASTANT-MAILLARD, 2016).

Une carence en zinc est susceptible d'altérer l'ensemble des performances de reproduction directement ou indirectement. En effet, une carence en zinc est à l'origine d'une anorexie (SMITH et

AKINBAMIJO, 2000) qui peut induire un déficit énergétique dont les conséquences sont détaillées en partie II.B.2.a.

Certains auteurs suggèrent qu'une complémentation en zinc améliore de manière générale les performances de reproduction (BURNETT, 2017 ; HIDIROGLOU, 1979 ; HURLEY et DOANE, 1989 ; SHARMA *et al.*, 2007). Néanmoins, il n'existe pas d'études s'intéressant à l'intérêt d'un apport de zinc lors de la mise à la reproduction des génisses. La seule étude disponible est celle de Doyle et collaborateurs mais elle s'intéresse à l'apport de plusieurs oligoéléments dont le zinc : ils ont montré qu'un ajout de zinc augmente la teneur en zinc de l'endomètre lors de l'œstrus, suggérant ainsi un rôle dans la fonction de reproduction (DOYLE *et al.*, 1990). En l'absence de données sur les performances de reproduction cette étude ne permet pas de conclure quant à l'intérêt réel du zinc lors de la mise à la reproduction des génisses. Il n'est pas non plus possible de conclure quant à l'intérêt réel du zinc sur la reproduction chez les bovins car les différents articles mentionnant le lien entre le zinc et la reproduction ne repose pas sur des expérimentations mais sur des déductions à partir des rôles connus du zinc sur le métabolisme.

c) Sélénium

(1) Apports recommandés

Les apports journaliers recommandés en sélénium (Se) sont de 0,1 à 0,2 mg/kg MSI (BURNETT, 2017 ; INRA, 2018 ; MESCHY, 2007, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001). Les besoins en sélénium sont dépendants de ceux en vitamine E.

La teneur en sélénium de la ration ne doit pas dépasser 0,5 (MESCHY, 2007) ou 2 à 5 mg/kg MSI (INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000) selon les auteurs et doit être supérieure à 0,1 mg/kg MSI (MESCHY, 2007).

Le statut en sélénium se détermine idéalement à partir d'un échantillon de foie. La valeur physiologique de la teneur hépatique en Se est de 0,25-0,5 mg/kg (MESCHY, 2017) voire 0,8 mg/kg de foie frais (INRA, 2018). En dessous de 0,15 mg/kg il y a une carence en Se. Un excès de Se correspond à une teneur supérieure à 1,25 (MESCHY, 2017) ou 4 mg/kg (INRA, 2018).

Dans le sang, la valeur physiologique de la concentration de sélénium est comprise entre 0,2 et 1,2 mg/L. Les valeurs seuils de carence et d'excès sont de 0,10 et 10 mg/L (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017). Enfin, le statut en sélénium peut être déterminé par la mesure de l'activité de la glutathion peroxydase érythrocytaire, une enzyme séléno-dépendante, dont l'intervalle de valeur physiologique est de 20-40 $\mu\text{mol/mg}$ d'hémoglobine/min. Les seuils de carences et de toxicité sont de 10 et 150 $\mu\text{mol/mg}$ d'hémoglobine/min respectivement (MESCHY, 2017).

Toutefois, l'essentiel des sols français est carencé en Se, un apport de Se dans la ration est donc nécessaire pour couvrir les apports recommandés (MESCHY, 2017).

(2) Importance lors de la mise à la reproduction

Le rôle du sélénium dans la reproduction est indissociable de celui de la vitamine E. Ils agissent tous deux comme anti-oxydant et empêchent ainsi l'accumulation de radicaux libres dans les cellules, notamment les cellules utérines et ovariennes. Or les radicaux libres sont à l'origine de toxicité cellulaire lorsqu'ils s'accumulent en quantité importante (HURLEY et DOANE, 1989 ; SHARMA *et al.*, 2007 ; SMITH et AKINBAMIJO, 2000 ; SUTTLE, 2010). L'effet d'ajout de Se dans la ration dépend de l'apport en vitamine E concomitant (SUTTLE, 2010). Les particularités de l'alimentation en vitamine E sur la reproduction sont discutées en partie II.E.2.c.

Si les conséquences d'une carence en sélénium sur les maladies post-partum (métrite, rétention placentaire) sont bien connus, une carence en sélénium est également à l'origine de troubles du fonctionnement ovarien comme des kystes ovariens ou des chaleurs irrégulières (BURNETT, 2017 ;

CHASTANT-MAILLARD, 2016 ; HIDIROGLOU, 1979 ; LEQUEUX, 2016 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001 ; SMITH et AKINBAMIJO, 2000 ; SUTTLE, 2010), d'une fécondation et une fertilité altérées (BRISSON, 2003 ; SMITH et AKINBAMIJO, 2000) et de mortalité embryonnaire (BURNETT, 2017 ; SUTTLE, 2010).

La supplémentation en sélénium améliore le taux de réussite en première IA (MESCHY, 2017 ; SUTTLE, 2010) et prévient les irrégularités de cyclicité (BURNETT, 2017) mais ces affirmations ne font pas consensus (HIDIROGLOU, 1979 ; HURLEY et DOANE, 1989).

Toutefois, l'ajout de sélénium dans la ration n'améliore pas les performances de reproduction lorsque la ration initiale est suffisamment riche en sélénium (MESCHY, 2017). Une seule étude a été menée sur le Se à la mise à la reproduction des génisses : Ganie et collaborateurs ont montré que l'ajout de 0,2 ppm de Se dans la ration de génisses buffles pendant 120 jours augmentait le nombre d'animaux vue en chaleurs et améliorerait le taux de gestation (GANIE *et al.*, 2014). Toutefois, l'étude ne précise pas les statuts en Se des animaux.

Si l'apport supplémentaire de Se semble bénéfique, un apport excessif est cependant délétère pour la reproduction puisqu'associé à une infertilité et une réduction de la survie embryonnaire (SHARMA *et al.*, 2007).

Il est parfois difficile de savoir qui du Se ou de la vitamine E est en cause. La supplémentation en vitamine E et en sélénium a des effets variables sur les performances de reproduction selon les études mais il peut être intéressant d'apporter de la vitamine E et du sélénium dans les zones où les sols sont carencés (HURLEY *et al.*, 1982).

d) Manganèse

(1) Apports recommandés

Les besoins journaliers en manganèse (Mn) sont dépendants de la quantité de MSI et varient de 20 à 50 mg/kg de MSI selon les sources (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001). Les besoins en manganèse pour la reproduction sont plus élevés que pour la croissance, il est préférable de considérer que les besoins en manganèse lors de la mise à la reproduction sont compris entre 40 et 50 mg/kg de MSI (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000).

La teneur en manganèse de la ration ne doit pas dépasser 1000-2000 mg/kg MSI (BURNETT, 2017 ; INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000) et doit être supérieure à 45 mg/kg MSI (MESCHY, 2007).

La valeur physiologique de la concentration sanguine en Mn est de 70-90 µg/L. En dessous de 20 µg/L il y a une carence en manganèse (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017).

(2) Importance lors de la mise à la reproduction

Le manganèse est impliqué dans la fonction ovarienne : il est l'un des composants d'une des enzymes superoxyde dismutase qui participe à la régulation de la fonction lutéale et permet donc l'implantation et la survie de l'embryon (BURNETT, 2017 ; MESCHY, 2017). Il est également impliqué dans l'activation d'enzymes du métabolisme de la reproduction et dans la formation du cholestérol qui est un précurseur de la synthèse des hormones stéroïdes (BURNETT, 2017 ; SPRINGMAN, 2017). Ainsi une carence en manganèse induit une réduction de la production de cholestérol à l'origine de chaleurs retardées (BURNETT, 2017 ; SPRINGMAN, 2017). Cependant, cette hypothèse est réfutée par certains auteurs (SUTTLE, 2010).

Une carence en manganèse réduit les performances de reproduction et est responsable d'un comportement de chaleurs réduit voire de chaleurs silencieuses, d'une augmentation du rapport IA/IA fécondante, d'un risque de kystes folliculaires accru, d'un développement folliculaire perturbé et d'un taux de conception réduit (BRISSON, 2003 ; CHASTANT-MAILLARD, 2016 ; ENJALBERT *et al.*, 2012 ; HIDIROGLOU, 1979 ; HURLEY et DOANE, 1989 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001 ; SHARMA *et al.*, 2007). Toutefois, ces observations ont été faites lors de carences sévères (< 15 mg/kg MS) qui

est une situation assez rare en France donc le risque de troubles de la reproduction inhérents à une carence en manganèse est limité (CHASTANT-MAILLARD, 2016 ; HIDIROGLOU, 1979 ; HURLEY et DOANE, 1989 ; MESCHY, 2017).

A l'inverse, un excès de manganèse est délétère pour la reproduction : les avortements et les kystes ovariens sont augmentés (BURNETT, 2017 ; HIDIROGLOU, 1979). Des rations contenant plus de 200 mg/kg de MSI de manganèse peuvent entraîner une réduction de la fertilité si elles sont données sur du long terme (BURNETT, 2017).

Hormis l'étude de Doyle et collaborateurs, il n'existe pas d'études sur l'intérêt du manganèse lors de la mise à la reproduction des génisses. Pour le manganèse comme pour les autres minéraux, la concentration dans l'endomètre est plus élevée à l'œstrus lors d'apport de minéraux ce qui laisse penser que le manganèse peut avoir une influence sur la reproduction (DOYLE *et al.*, 1990).

e) Cobalt

(1) Apports recommandés

Les besoins journaliers en cobalt (Co) varient selon les auteurs entre 0,10 mg/kg de MSI (BURNETT, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001) et 0,3 mg/kg de MSI (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017).

La teneur en cobalt de la ration ne doit pas dépasser 10-25 mg/kg MSI (BURNETT, 2017 ; INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000) et doit être supérieure à 0,07 mg/kg MSI (MESCHY, 2007).

La matrice sur laquelle s'estime le statut en cobalt est source de controverses : certains auteurs privilégient le dosage de la vitamine B12 dans le foie alors que d'autres préfèrent le dosage sanguin de la vitamine B12 (ou du cobalt dans une moindre mesure).

La teneur physiologique en vitamine B12 dans le foie est de 700-2500 µg/kg de foie frais. Une teneur inférieure à 150-300 µg/kg est considérée comme carentielle (INRA, 2018). Sur sérum, la concentration en vitamine B12 est comprise entre 0,40 et 0,90 µg/L et le seuil de carence est de 50 - 200 ng/L (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017). La concentration sanguine en cobalt est comprise entre 0,15 et 0,5 mg/L, et les seuils de carence et de toxicité sont de 0,09 et 1,5 mg/L respectivement (MESCHY, 2017).

(2) Importance lors de la mise à la reproduction

Chez les ruminants, le cobalt sert essentiellement à la synthèse de la vitamine B12 par conséquent, le rôle du cobalt dans la fonction de reproduction est identique à celui de cette vitamine et il sera donc détaillé dans la partie correspondante (partie II.E.1.a.2.h). Il est également indispensable au bon fonctionnement ruminal, par conséquent une carence en cobalt a des effets similaires à une sous-nutrition énergétique tels que décrits en II.B.2.a.

Une carence en cobalt réduit les performances de reproduction en diminuant le taux de conception et est à l'origine d'irrégularité des cycles œstraux (BRISSON, 2003 ; BURNETT, 2017 ; CHASTANT-MAILLARD, 2016 ; HIDIROGLOU, 1979 ; SHARMA *et al.*, 2007 ; SUTTLE, 2010).

Aucune publication sur le rôle du cobalt lors de la mise à la reproduction chez les génisses n'est disponible.

f) Iode

(1) Apports recommandés

Les besoins journaliers en iode (I) sont dépendants de la quantité de MSI et correspondent à 0,4 à 0,5 mg/kg de MSI (BURNETT, 2017 ; INRA, 2018 ; MESCHY, 2007 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000).

Selon les sources, la teneur en iode de la ration ne doit pas dépasser 5 à 50 mg/kg MSI (BURNETT, 2017 ; INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001) et doit être supérieure à 0,15 mg/kg MSI (MESCHY, 2007).

La teneur physiologique en iode dans le sérum est de 100-400 µg/L. Une concentration inférieure à 80 µg/L est considérée comme carencielle et une concentration supérieure à 700 µg/L est considérée comme excessive (INRA, 2018 ; MESCHY, 2017).

(2) Importance lors de la mise à la reproduction

L'iode est un constituant des hormones thyroïdiennes qui sont impliquées dans de nombreux métabolismes dont ceux liés à la fonction de reproduction. Les hormones thyroïdiennes assurent le fonctionnement des ovaires et les synthèses des gonadotrophines (BURNETT, 2017 ; ENJALBERT *et al.*, 2012 ; LEQUEUX, 2016 ; MESCHY, 2017). Par conséquent, une carence en iode est responsable d'un dysfonctionnement thyroïdien dont les troubles de la reproduction sont une des conséquences (BRISSEON, 2003 ; HURLEY et DOANE, 1989).

Une carence en iode engendre une altération de la synthèse d'œstrogènes à l'origine d'une cyclicité irrégulière voire d'un anœstrus, un taux de conception réduit et une augmentation de taux de mortalité embryonnaire et fœtale et favorise les kystes ovariens (BURNETT, 2017 ; CHASTANT-MAILLARD, 2016 ; HIDIROGLOU, 1979 ; LEQUEUX, 2016 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001 ; SUTTLE, 2010).

Un excès d'iode est toxique et altère également les performances de reproduction (BRISSEON, 2003 ; HURLEY et DOANE, 1989)

g) Effet des formes d'oligoéléments

Lorsque la ration ne permet pas de couvrir les besoins en minéraux, il est possible d'ajouter directement des minéraux dans la ration. Ces minéraux peuvent être sous forme inorganique ou organique (SPRINGMAN, 2017 ; SUTTLE, 2010).

Les ions libres provenant des formes inorganiques forment des complexes avec d'autres composants alimentaires ce qui réduit leur biodisponibilité (McDONALD *et al.*, 2022).

Les minéraux chélatés, aussi appelés minéraux organiques (c'est-à-dire liés à une molécule organique, souvent un acide aminé), sont protégés de ces phénomènes de chélation et donc ont une biodisponibilité théoriquement meilleure (McDONALD *et al.*, 2022).

Si la biodisponibilité des minéraux organiques est meilleure que celle des minéraux inorganiques, leur prix élevé fait que la rentabilité économique de leur utilisation, par rapport à une majoration des apports en minéraux inorganiques, n'est pas établi (BRISSEON, 2003 ; McDONALD *et al.*, 2022 ; SPRINGMAN, 2017).

Il convient de préciser que les valeurs pour les apports recommandés en oligoéléments données précédemment correspondent aux valeurs pour des minéraux sous forme inorganique qui tiennent compte d'interactions et d'absorption moyennes.

Différentes études se sont intéressées à l'influence de la forme du minéral lorsque des minéraux sont donnés *per os* aux génisses. Néanmoins, une seule étude porte sur un apport de courte durée, les autres couvrant des périodes beaucoup plus longues. De manière générale, l'intérêt de la forme organique est nuancé par les résultats de ces études. Aucun effet n'a été montré sur le taux de

gestation lors d'un apport depuis le sevrage de Cu, Mn, Co et Zn sous forme organique comparé à la forme inorganique, mais le taux de survie embryonnaire entre 17 et 60 jours tend à être meilleur pour le groupe recevant des minéraux organiques (PERRY *et al.*, 2019). D'après une autre étude, le taux de réussite à l'IA tend à être meilleur pour la forme organique (WHITEHURST *et al.*, 2014). La seule étude de courte durée (23 jours) concerne la réponse à un protocole de superovulation. Celle-ci montre que la source d'oligoéléments n'influence pas le nombre et la qualité des embryons (CLIFF LAMB *et al.*, 2008). Une étude d'une durée intermédiaire (120 jours) a montré que l'apport en minéraux (Co, Cu, Mn et Zn) sous forme organique tendait à réduire la mortalité embryonnaire sans effet sur le taux de gestation (PERRY *et al.*, 2021).

Concernant les différentes formes inorganiques, il est connu que la biodisponibilité est différente selon la forme. A titre d'exemple, l'absorption du cuivre et du zinc est meilleure s'ils sont sous forme de carbonate que d'oxyde. Pour le Mn, l'absorption est meilleure pour la forme sulfate que les forme oxyde et carbonate (BRISSON, 2003).

Concernant le lien entre le type de forme inorganique et la reproduction, les deux études disponibles n'ont pas montré de différence sur la conception et la fertilité des génisses entre les formes sulfates et hydroxy (BURNETT, 2017 ; SPRINGMAN *et al.*, 2021).

Finalement, si la forme organique permet théoriquement une amélioration des performances de reproduction par rapport à la forme inorganique grâce à une meilleure biodisponibilité, les études réalisées sur des génisses montrent une différence limitée ou nulle. Toutefois, certains auteurs suggèrent un impact du statut en minéraux des animaux lors de la supplémentation : les animaux non carencés seraient moins sensibles à l'effet bénéfique des minéraux organiques (SPRINGMAN *et al.*, 2021).

h) Apports d'un mélange d'oligoéléments

Plusieurs études se sont intéressées à l'intérêt d'un apport d'un mélange d'oligoéléments lors de la mise à la reproduction des génisses.

(1) Mélange donné per os

L'ajout d'un mélange d'oligoéléments, à base de Zn, Cu et Mn, à la ration entraîne une augmentation des concentrations de ces oligoéléments dans le tissu endométrial pendant l'œstrus, ce qui suggère une influence des oligoéléments et du niveau d'apport de ceux-ci dans la fertilité et la survie embryonnaire (DOYLE *et al.*, 1990).

Story et collaborateurs n'ont pas montré d'effet d'un ajout de Cu, Co, Mn et Zn pendant 109 jours sur la phase lutéale (STORY *et al.*, 1999).

(2) Apport par voie injectable

Des spécialités injectables sont disponibles pour apporter des oligoéléments aux bovins. Cette formulation présente l'avantage, par rapport à la forme orale, de connaître précisément la quantité de minéraux apportés aux bovins (sauf s'ils sont distribués individuellement ou sous forme de bolus) et d'éviter les possibles défauts d'absorption : l'entière quantité d'oligoéléments injectée est disponible pour l'animal (SUTTLE, 2010).

L'intérêt de l'apport d'oligoéléments par voie injectable lors de la mise à la reproduction de génisses *a priori* non carencées dans le but d'améliorer les performances de reproduction ne fait pas consensus. En effet, certains chercheurs concluent que la supplémentation en oligoélément est inutile pour améliorer les performances de reproduction lorsque le statut en oligoélément est correct (SPRINGMAN *et al.*, 2018 ; WILLMORE *et al.*, 2015) alors que d'autres ont des résultats plus nuancés (BRASCHE, 2015 ; SALES *et al.*, 2011 ; STOKES *et al.*, 2017)

Ainsi, les travaux de Springman, sur 800 génisses de race Angus, n'ont pas mis en évidence de différences dans le taux de réussite à l'IA, ni dans le taux de gestation final entre les génisses ayant reçu une injection d'oligoéléments (cuivre, manganèse, sélénium et zinc) 33 jours avant l'IA et celles n'ayant rien reçu (SPRINGMAN *et al.*, 2018). Ces résultats sont cohérents avec ceux de Willmore et collaborateurs qui ne montrent pas d'amélioration des performances de reproduction (taux de réussite à l'IA première, à l'IA et taux de gestation après introduction d'un taureau) chez les génisses recevant les mêmes oligoéléments par voie parentérale par rapport au groupe témoin (WILLMORE *et al.*, 2015). Si le statut en oligoéléments de ces animaux n'est pas connu, la ration fournit du Cu, Mn, Se et Zn au-delà des apports journaliers recommandés donc l'hypothèse que les génisses ne soient pas carencées est probable.

Les travaux de Brasche et collaborateurs ont montré des effets inconstants de l'injection d'oligoéléments 37 à 33 jours avant IA sur les performances de reproduction de génisses de statut inconnu en oligoéléments mais dont l'alimentation couvre les besoins. En effet, si les résultats s'accordent sur le fait que le taux de réussite à l'IA n'est pas modifié, les conséquences sur le taux de gestation final sont plus mitigées puisque le taux de gestation final est significativement augmenté pour une partie des génisses (BRASCHE, 2015).

Des résultats variables ont également été obtenus par Stokes et collaborateurs. L'apport de Cu, Mn, Se et Zn injectables 33 jours avant l'IA tend à augmenter le taux de gestation issue d'IA pour un seul des groupes supplémentés en oligoéléments, sans effet sur le taux de gestation final. Ici aussi, la ration est formulée pour couvrir les besoins en minéraux (STOKES *et al.*, 2017). Les auteurs émettent l'hypothèse que d'autres paramètres sont à prendre en considération pour expliquer cette différence de résultats, tels que la race, la saison, la source en minéral ou la conduite d'élevage.

Sales et collaborateurs se sont intéressés à l'intérêt d'un apport d'oligoéléments sous forme injectable dans le cadre d'un protocole de transfert embryonnaire. Les génisses ont reçu une injection de Cu, Mn, Se et Zn 17 jours avant le transfert embryonnaire (soit au début du protocole). L'apport d'oligoéléments n'a pas amélioré la réussite du protocole de synchronisation mais est associé à une augmentation des taux de gestation (donc de survie embryonnaire) à 23 et 48 jours (SALES *et al.*, 2011). Toutefois, il convient de remarquer que le statut en oligoéléments de ces génisses était inconnu mais que la ration a été formulée pour respecter les recommandations du NRC.

Tableau XII : Apports journaliers recommandés, seuils de carence et limites de toxicité des oligoéléments chez les génisses (INRA, 2018 ; MESCHY, 2007, 2017)

Oligo-élément	Seuil de carence	Besoins	Limite de toxicité
Cuivre	7 mg/kg MSI	10 mg/kg MSI	40 – 45 mg/kg MSI voire 100 mg/kg MSI
Zinc	45 mg/kg MSI	50 – 60 mg/kg MSI	300 – 1 000 mg/kg MSI
Sélénium	0,1 mg/kg MSI	0,1 – 0,2 mg/kg MSI	0,5 – 5 mg/kg MI
Manganèse	45 mg/kg MSI	40 – 50 mg/kg MSI	1 000 – 2 000 mg/kg MSI
Cobalt	0,07 mg/kg MSI	0,1 – 0,3 mg/kg MSI	10 – 25 mg/kg MSI
Iode	0,15 mg/kg MSI	0,4 – 0,5 mg/kg MSI	5 – 50 mg/kg MSI

Tableau XIII : Teneurs physiologiques, valeurs seuils de carence et seuils de toxicité des microéléments (d'après BURNETT, 2017 ; INRA, 2018 ; MESCHY, 2017 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001)

Élément	Indicateur	Limite de carence	Concentration physiologique	Seuil de toxicité
Cuivre	Cu plasma (mg/L)	0,1 – 0,6	0,8 – 1,5	0,7 – 0,9 à 4 – 10
	Cu foie (mg/kg de foie)	3,7 – 20	25 – 100	250 – 1000
Zinc	Zn sérum (mg/L)	0,4 – 0,6	0,8 – 1,4	3
Sélénium	Se sang (mg/L)	0,10	0,2 – 1,2	10
	Se foie (mg/kg de foie)	0,15	0,25 – 0,8	1,25 – 4
	Glutathion peroxydase sang (µmol/mg Hb/min)	10	20 – 40	150
Manganèse	Mn sang (µg/L)	20	70 – 90	/
Cobalt	Co sang (mg/L)	0,09	0,15 – 0,5	1,5
	Vitamine B12 foie (µg/kg de foie)	150 – 300	700 – 2500	/
	Vitamine B12 sérum (ng/L)	50-200	400 – 900	/
Iode	I sérum (µg/L)	80	100 – 400	700

Finalement, de la production d'hormones à la fonction ovarienne et au développement embryonnaire, l'ensemble des performances de reproduction est affecté par les carences en minéraux (LEQUEUX, 2016). Hidiroglou indique qu'une augmentation générale de la teneur en minéraux dans l'alimentation améliore les performances de reproduction (HIDIROGLOU, 1979).

Le statut en minéraux n'est pas toujours connu et les situations de subcarences dont les seules conséquences sont une altération des performances zootechniques sont fréquentes. Ainsi, il peut être judicieux d'ajouter des minéraux dans la ration des génisses lorsque le statut en minéraux n'est pas connu afin de limiter au maximum le risque d'être en situation carencielle.

E. Vitamines

Les vitamines sont définies comme étant des molécules organiques requises en petites quantités (de l'ordre du microgramme au milligramme par jour) pour le fonctionnement général de l'organisme (McDONALD *et al.*, 2022 ; McDOWELL, 2000).

Elles sont classées en deux types selon leur solubilité : les vitamines hydrosolubles, représentées par les vitamines B et C, et les vitamines liposolubles qui correspondent aux vitamines A, D, E et K.

Dans l'organisme, les vitamines sont impliquées dans de nombreuses fonctions métaboliques et ont aussi un rôle important dans l'immunité et l'expression des gènes (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001). Seuls les rôles liés à la reproduction seront développés dans cette partie. Les principaux rôles de chaque vitamine sont résumés en annexe 10.

A l'image des minéraux, les données concernant les vitamines lors de la mise à la reproduction des génisses sont limitées. De ce fait, les effets généraux des vitamines sur la reproduction sont extrapolés à partir des informations disponibles chez les bovins adultes. Néanmoins, concernant les conséquences des variations d'apports, ne seront citées que les études portant sur des génisses.

1. Vitamines hydrosolubles

a) Les vitamines B

Les vitamines B regroupent 8 vitamines dont les noms sont présentés dans le tableau XIV. L'ensemble est désigné sous l'appellation « complexe des vitamines B » (McDOWELL, 2000 ; WU, 2018).

Tableau XIV : le complexe des vitamines B (d'après McDowell, 2000; Wu, 2018)

Vitamine	Appellation
Vitamine B1	Thiamine
Vitamine B2	Riboflavine
Vitamine B3	Niacine, vitamine PP
Vitamine B5	Acide pantothénique, coenzyme A
Vitamine B6	Pyridoxine, pyridoxol
Vitamine B8	Biotine, vitamine HG
Vitamine B9	Acide folique, acide ptéorylglutamique
Vitamine B12	Cobalamine

(1) Apports recommandés

Chez les ruminants, les vitamines B sont synthétisées par les microorganismes du rumen. Ainsi, tant que le rumen est fonctionnel, les bovins ne sont pas dépendants des vitamines B fournies par l'alimentation mais de l'apport des composés qui constituent celles-ci. Puisque la synthèse ruminale couvre les besoins, il n'existe pas de recommandations en terme d'apports alimentaires en vitamines B et les carences sont rares (HURLEY et DOANE, 1989 ; McDONALD *et al.*, 2022 ; McDOWELL, 2000 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001 ; WU, 2018).

Toutefois, l'augmentation des performances zootechniques des bovins accroît l'ensemble de leurs besoins dont ceux en vitamines : par conséquent le risque de carence est augmenté car les besoins peuvent dépasser les capacités de synthèse ruminale. Ainsi, l'amélioration des performances de production des animaux ne permet plus aujourd'hui d'affirmer de manière certaine que les synthèses ruminales suffisent entièrement à couvrir les besoins. Des recherches sont donc nécessaires pour déterminer les besoins en vitamines des bovins (INRA, 2018 ; WOLTER, 1988).

Le risque de carence en vitamine B12 est non négligeable même chez les génisses avec un rumen fonctionnel. En effet, les besoins en cobalamine sont couverts par la synthèse ruminale uniquement si l'apport en cobalt par la ration est suffisant car il est l'un des composant majeur de la cobalamine (McDOWELL, 2000 ; WU, 2018).

(2) Intérêt en reproduction

La littérature est limitée concernant les vitamines B et la reproduction chez les bovins, en particulier chez les génisses. Le faible intérêt pour la recherche dans ce domaine s'explique en partie car la reproduction n'est pas la fonction principale des vitamines B et par le fait que les bovins soient généralement considérés autonomes en vitamines B.

De manière générale, les vitamines B sont impliquées dans la majorité des voies métaboliques et dont celles liées à la fonction de reproduction et au développement fœtal (BRISSON, 2003).

(a) Vitamine B1

Aucune donnée n'est disponible concernant un éventuel lien entre la thiamine et la reproduction.

(b) Vitamine B2

Les données concernant la vitamine B2 et la reproduction chez les bovins sont peu nombreuses.

Une carence sévère en riboflavine est à l'origine de troubles de la reproduction (WU, 2018) et augmente le risque de mortalité embryonnaire (HURLEY et DOANE, 1989).

Un excès en riboflavine perturbe la fonction de reproduction (FRYE *et al.*, 1991).

(c) Vitamine B3

Une seule étude est disponible concernant le lien entre la niacine et la reproduction. Il s'agit d'une étude menée sur des vaches laitières et les auteurs n'ont pas observé d'effet significatif sur les paramètres de reproduction (HAVLIN *et al.*, 2018).

(d) Vitamine B5

Une carence en acide pantothénique augmenterait la fréquence de mortalité embryonnaire (HURLEY et DOANE, 1989) mais le risque de carence est faible du fait de la synthèse microbienne de vitamine B5.

(e) Vitamine B6

Il n'existe qu'une seule étude concernant les effets de la vitamine B6 sur la reproduction. Cette étude *in vitro* indique que l'ajout de pyridoxine dans le milieu de culture des oocytes améliore leur compétence et la qualité des embryons issus de ces oocytes par inhibition de la cathepsine B, une protéase impliquée dans divers processus de dégradation cellulaire (ABOELENAIN *et al.*, 2017).

Un défaut de pyridoxine serait à l'origine d'une interruption du cycle œstral et de mortalité embryonnaire (BRISSON, 2003).

(f) Vitamine B8

La biotine joue un rôle important pour le fonctionnement normal du tractus reproducteur (McDOWELL, 2000) mais il n'existe pas d'étude concernant l'effet de la vitamine B8 sur la reproduction.

(g) Vitamine B9

Une supplémentation en vitamine B9 lors du développement embryonnaire précoce est bénéfique pour la survie embryonnaire (McDONALD *et al.*, 2022).

Une carence en acide folique est associée à une augmentation de la mortalité embryonnaire (HURLEY et DOANE, 1989).

Une seule étude est disponible concernant l'effet de l'acide folique sur la reproduction mais elle porte sur les vaches laitières et non les génisses. Dans cette étude, les chercheurs ont mis en évidence une amélioration du taux de conception et taux de réussite en IA première lors de supplémentation en acide folique (LI *et al.*, 2016).

D'autres études ont été menées concernant les effets conjoints des vitamines B9 et B12 mais elles concernent des vaches laitières. Ces études révèlent une augmentation de l'activité ovarienne sans conséquences sur les performances de reproduction (DUPLESSI *et al.*, 2014 ; GAGNON *et al.*, 2015).

(h) Vitamine B12

Une carence en cobalamine entraînerait une augmentation de la fréquence d'arrêt de gestation (HURLEY et DOANE, 1989).

Il n'existe pas de publication concernant l'effet de la vitamine B12 sur les performances de reproduction chez les génisses. Deux études (mentionnées au paragraphe précédent) s'intéressent aux effets conjoints de la cobalamine et de l'acide folique chez les vaches laitières.

b) Vitamine C

La vitamine C est également appelée acide ascorbique.

(1) Apports recommandés

Les bovins, comme la majorité des mammifères hormis l'homme et le cochon d'inde, synthétisent eux même leur vitamine C dans le foie (McDOWELL, 2000).

(2) Intérêt en reproduction

La littérature concernant les effets directs de la vitamine C sur la reproduction chez les bovins est limitée et aucun texte ne concerne les génisses.

La vitamine C est essentielle dans la synthèse du collagène et d'hormones dont les hormones stéroïdiennes. Elle agit comme antioxydant : par ces fonctions elle est donc importante pour la fonction de reproduction (McDOWELL, 2000 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

Il semblerait que l'apport de vitamine C soit bénéfique pour la reproduction dans certains cas précis comme pour le maintien de la gestation chez les animaux qui ont des difficultés pour mener une gestation à terme, c'est-à-dire chez ceux dont le fonctionnement du corps jaune et/ou les processus d'implantation et de développement embryonnaires précoces sont déficients (HURLEY et DOANE, 1989). La vitamine C n'a pas d'effet en cas d'anomalies du cycle ou de morphologie ovarienne (HURLEY et DOANE, 1989).

2. Vitamines liposolubles

Les ruminants dépendent des apports alimentaires pour couvrir leurs besoins en vitamines liposolubles (WOLTER, 1988).

Les apports journaliers recommandés en vitamines sont exprimés en UI/kg MSI où la valeur de l'UI (Unité Internationale) est propre à chaque vitamine. Ces valeurs correspondent aux quantités en supplément à la ration, c'est-à-dire qu'elles ne prennent pas en compte la teneur initiale en vitamine de la ration.

a) Vitamine A et β -carotène

La vitamine A ou rétinol est considérée comme la vitamine la plus importante (McDOWELL, 2000 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000 ; WOLTER, 1988). Elle est synthétisée dans les entérocytes à partir de ses précurseurs, les caroténoïdes, dont le principal est le β -carotène, aussi appelé provitamine A (McDOWELL, 2000).

(1) Apports recommandés

Dans le cas de la vitamine A, 1 UI est égal à 0,300 µg de trans-rétinol ou 0,550 µg de palmitate de rétinol (INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

Les recommandation d'apport journalier en vitamine A sont de 80 UI/kg de PV pour une génisse laitière et 47 UI/kg de PV pour une génisse allaitante (INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001). Cela représente 2 200 UI/kg MSI pour une génisse allaitante (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000) et 3 000 UI/kg MSI pour une génisse laitière (BROCARD et LECLERC, 2010).

Pour les animaux cibles désignés en partie I.B.1.b, cela correspond à 32 000 UI par jour pour une génisse laitière avec un objectif de premier vêlage à 2 ans et 38 800 UI par jour pour un premier vêlage à 3 ans. Dans le cas d'une génisse allaitante, cela correspond à des apports journaliers de 25 850 et 28 200 UI pour un premier vêlage à respectivement 2 et 3 ans.

Les besoins détaillés en vitamine A selon le poids sont regroupés dans le tableau XV en fin de partie. Les apports ne doivent pas dépasser 30 fois la dose journalière recommandée (FRYE *et al.*, 1991) soit 66 000 UI/kg MSI (INRA, 2018 ; McDOWELL, 2000 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001), mais ils peuvent être majorés jusqu'à 1 000 000 voire 1 500 000 UI par génisse par jour en période de reproduction lors de cures de courte durée (McDOWELL, 2000). Toutefois les auteurs ne précisent pas la durée des cures ni le statut en vitamine des animaux, il est donc difficile de recommander ces cures dans ces conditions car le risque de toxicité n'est pas négligeable avec des apports aussi élevés en vitamines.

De nombreux aliments contiennent des provitamines A en quantité variable : l'apport de vitamine A ou de carotènes dans la ration peut ne pas être nécessaire mais c'est un choix risqué car la variabilité de la teneur en carotène de la ration n'assure pas un apport suffisant systématique. Le risque est encore plus élevé chez les animaux ne pâturant pas (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

La concentration physiologique en vitamine A dans le plasma est comprise entre 250 et 600 µg/L soit 833 à 2000 UI/L (FRYE *et al.*, 1991).

Une carence en vitamine A peut être secondaire à une carence en zinc car ce dernier intervient dans la synthèse de la protéine de liaison au rétinol impliquée dans le stockage hépatique du rétinol (McDOWELL, 2000).

(2) Intérêt en reproduction

(a) Effet de la vitamine A

La nécessité de la vitamine A pour le bon fonctionnement de la reproduction a été largement démontré et est communément admis, notamment concernant son rôle essentiel dans le maintien de l'intégrité des tissus épithéliaux et la survie embryonnaire (McDOWELL, 2000 ; WU, 2018).

Une carence en vitamine A engendre une kératinisation des tissus épithéliaux parmi lesquels l'épithélium vaginal, entraînant une perte de fonctionnalité du tractus génital à l'origine d'une diminution générale des performances de reproduction (FRYE *et al.*, 1991 ; McDONALD *et al.*, 2022 ; McDOWELL, 2000 ; SMITH et AKINBAMIJO, 2000 ; WU, 2018).

De plus, une carence en vitamine A ou en β-carotène résulte en une altération des fonctions hypophysaires et ovariennes (HURLEY *et al.*, 1982) qui altère la durée du cycle ovarien et réduit la fertilité (CHASTANT-MAILLARD, 2016 ; McDOWELL, 2000). Ainsi, un faible apport alimentaire en vitamine A est associé à un rapport saillie/saillie fécondante plus élevé (HEMKEN et BREMEL, 1982). Concernant l'activité ovarienne, il a été montré que l'ajout de 1 million d'UI de vitamine A pendant 4 semaines n'affecte pas la concentration systémique en progestérone lors de la phase lutéale du cycle œstral chez les génisses (THARNISH et LARSON, 1992).

Enfin, une carence en vitamine A est à l'origine d'une augmentation du risque de mortalité et de résorption embryonnaires et d'une réduction du taux de conception (FRYE *et al.*, 1991 ; HURLEY et DOANE, 1989 ; McDONALD *et al.*, 2022 ; McDOWELL, 2000 ; SMITH et AKINBAMIJO, 2000 ; WU, 2018). Dans ce sens, un essai a montré que l'ajout de rétinol dans le milieu de culture d'oocytes de génisses soumis à un stress thermique améliore la maturation de ceux-ci (MAYA-SORIANO *et al.*, 2013).

(b) Effet du β -carotène

Si le rôle du β -carotène dans la reproduction en tant que précurseur de la vitamine A est évident, certains auteurs suggèrent qu'il peut avoir une implication dans la fonction de reproduction indépendamment de la vitamine A. En effet, le β -carotène est un composant de la membrane des cellules lutéales (HURLEY *et al.*, 1982 ; McDONALD *et al.*, 2022). Certains troubles de la fertilité tels que des retards d'ovulation ou une mortalité embryonnaire précoce peuvent être liés à une carence en β -carotène (McDONALD *et al.*, 2022). Ainsi, une carence en β -carotène altère l'œstrus (FRYE *et al.*, 1991). Les animaux recevant un excès de β -carotène ont des chaleurs plus visibles, un taux de conception augmenté, et moins de kystes folliculaires (McDOWELL, 2000). Une carence en β -carotène entraîne une baisse d'activité ovarienne pouvant conduire à un arrêt du rétrocontrôle hypothalamo-hypophysaire (SMITH et AKINBAMIJO, 2000). Une telle carence est également associée à des kystes ovariens (ARIKAN et RODWAY, 2000), des chaleurs peu visibles ou silencieuses, une ovulation retardée, un taux de conception diminué et un retard dans la croissance du corps jaune (WANG *et al.*, 1982).

(i) Activité ovarienne

Dans les années 70, une série d'études germaniques, menée par Lotthammer et collaborateurs et rapportées par Hemken se sont intéressées au β -carotène et à la reproduction chez des génisses Holstein cyclées nourries avec du foin pauvre en β -carotène. La ration du groupe témoin contenait 220 UI de vitamine A /kg de poids vif et le groupe traité recevait 0,3 mg de β -carotène et 100 UI de vitamine A par kg de poids vif soit des quantités en vitamine A équivalentes entre les deux groupes puisque 1 mg de β -carotène équivaut à 400 UI de vitamine A (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001 ; WOLTER, 1988). Ainsi les différences observées entre les groupes sont liées à la présence (ou non) de β -carotène.

Les résultats de ces travaux sont variables selon les études (HEMKEN et BREMEL, 1982).

Une de ces études montre un effet délétère de la supplémentation en β -carotène : l'intervalle interoestrus est augmenté et la durée des chaleurs réduite lors d'ajout de β -carotène (LOTTHAMMER *et al.*, 1975).

Les autres études montrent des effets bénéfiques ou neutres. Ainsi, une des études menées par l'équipe de Lotthammer indique que l'intensité de l'œstrus est meilleure et la fréquence de kystes lutéaux moindre pour le groupe supplémenté (LOTTHAMMER *et al.*, 1978).

Deux études se sont intéressées aux effets sur les concentrations sanguines en hormones et ont conclu que la concentration sérique en β -carotène est liée à l'activité ovarienne : le pic de LH et l'intervalle entre celui-ci et l'ovulation est réduit pour les génisses recevant du β -carotène. En revanche, aucun lien n'a été montré entre la progestérone sanguine et l'apport de β -carotène (LOTTHAMMER *et al.*, 1977 ; LOTTHAMMER et AHLWEDE, 1977). Par ailleurs, les corps jaunes des génisses supplémentées en β -carotène contiennent plus de progestérone (LOTTHAMMER et AHLWEDE, s. d.).

Enfin, certaines études ne montrent aucun effet sur l'activité ovarienne. Folma et collaborateurs n'ont montré aucun effet d'une supplémentation en β -carotène chez des génisses dont les apports en vitamine A sont couverts sur les caractéristiques œstrales (durée des chaleurs et durée du cycle) et hormonales (concentration plasmatique en progestérone, LH et intervalle entre le pic de LH et l'ovulation). Il convient néanmoins de remarquer que cette étude porte sur un faible nombre de sujets puisque 20 génisses seulement ont été incluses dans ce travail (FOLMA *et al.*, 1979).

Wang et collaborateurs ont étudié l'impact du β -carotène sur le pourcentage de génisses cyclées, les changements de concentration en progestérone et LH, l'intervalle entre la fin de la synchronisation et

le début des chaleurs ou le pic de LH, l'intensité de l'expression des chaleurs. Ils n'ont montré aucun effet de l'apport de β -carotène à différents niveaux (0, 300 ou 600 mg/j) pendant 13 semaines chez des génisses dont l'alimentation couvrait les besoins en vitamine A (WANG *et al.*, 1988). Dans une précédente étude, ils avaient obtenu des résultats différents : l'intervalle entre la fin de la synchronisation et le début de l'oestrus, du pic de LH et de l'ovulation étaient réduits pour le groupe non supplémenté en β -carotène. Ainsi, la durée entre la fin du protocole de synchronisation et l'ovulation était de 69,3h pour le groupe témoin et 85,9h pour le groupe supplémenté. Les résultats pour les autres paramètres étaient similaires à ceux de l'étude de 1989 (WANG *et al.*, 1982).

(ii) Fertilité et fécondité

Concernant les paramètres de fertilité et de fécondité, les résultats des études montrent soit une absence d'effets, soit une amélioration des performances de reproduction lors d'ajout de β -carotène.

Le taux de réussite à la première saillie est de 68 % pour les génisses nourries avec du β -carotène contre 40 % pour celles n'en recevant pas (LOTTHAMMER *et al.*, 1976). Ces résultats sont cohérents avec les travaux de Bonsembiante et collaborateurs pour qui l'ajout de β -carotène à la ration de génisses nourries avec un excédent de vitamine A a augmenté le taux de réussite en IA première dans deux expériences (BONSEMBIANTE *et al.*, 1980, 1983). Les études allemandes ont également montré que le taux de conception est augmenté et le nombre d'insémination par fécondation réduit (1,42 contre 2 pour le groupe témoin) lorsque la ration contient un excès de β -carotène (LOTTHAMMER *et al.*, 1978).

Elecko et collaborateurs se sont intéressés aux effets du β -carotène sur la survie des spermatozoïdes et les caractéristiques de la glaire cervicale (quantité, ductilité, arborisation et pH). Les résultats de leur étude indiquent que la durée de survie des spermatozoïdes est significativement plus longue chez les génisses recevant du β -carotène. Ils ont également remarqué que les différences de quantité, ductilité et arborisation entre les génisses gestantes et celles dont l'IA a échoué sont réduites lors de l'ajout de β -carotène (ELECKO *et al.*, 1984). Ces résultats impliquent que les améliorations dans les paramètres de fécondation observées lors d'ajout de β -carotène peuvent être inhérentes à une modification de milieu utérin consécutif à l'ajout de β -carotène.

Par contre, une absence de conséquence lors d'ajout de β -carotène a été montrée sur le taux de gestation (BEKEOVA *et al.*, 1985) et sur le taux de conception en première saillie (WANG *et al.*, 1982, 1988). Ces résultats concordent avec ceux de Ducker et collaborateurs. Dans une étude incluant 160 génisses Holstein dont l'alimentation couvre les besoins en vitamine A, ils n'ont pas mis évidence d'effet de l'ajout de β -carotène sur l'ensemble des performances de reproduction (taux de gestation, taux de réussite à l'IA et nombre moyen d'IA par fécondation). Toutefois, ils ont remarqué que les génisses supplémentées en β -carotène avec les concentrations plasmatiques les plus élevées (supérieures à 5,75 mg/L) ont eu plus de réussite en IA première (69 % contre 47 % pour celles ne recevant pas de β -carotène). Ces données suggèrent que l'ajout de β -carotène n'améliore pas les performances de reproduction sauf s'il permet une augmentation de la concentration plasmatique en β -carotène au-delà d'un certain seuil (DUCKER *et al.*, 1984).

Finalement, les études indiquant un intérêt à la supplémentation en β -carotène pour la reproduction montrent des effets bénéfiques tels qu'une augmentation de l'intensité de l'oestrus, du taux de conception et une baisse du nombre de saillie par conception et de l'incidence des kystes ovariens. Concernant les paramètres après fécondation, le maintien de la gestation est meilleur : les taux de mortalité embryonnaire et d'avortements précoces sont réduits (HURLEY *et al.*, 1982).

b) Vitamine D

La vitamine D ou calciférol est en réalité représentée par 2 molécules distinctes : le cholécalférol (vitamine D3), d'origine endogène, et l'ergocalciférol (vitamine D2), d'origine alimentaire. Sa synthèse à partir des stérols nécessite l'action des ultra-violets (WOLTER, 1988).

(1) Apports recommandés

La vitamine D est synthétisée au niveau de la peau par les rayonnements solaires ce qui implique que l'apport alimentaire de vitamine D n'est pas nécessaire tant que l'exposition au soleil est suffisante : les animaux confinés sont donc à risque de carence (McDOWELL, 2000 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

Les carences en vitamine D sont rares chez les animaux exposés au soleil mais sont possibles l'hiver chez les animaux en bâtiments car les teneurs en vitamine D des fourrages sont très variables et le rayonnement lumineux hivernal ne suffit pas à synthèse de vitamine D3 (McDONALD *et al.*, 2022 ; WU, 2018).

Pour la vitamine D, la valeur de l'UI est 0,025 µg de cholécalciférol (INRA, 2018).

Les besoins en vitamine D sont de 30 UI/kg de PV par jour pour une génisse laitière (INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001), ce qui correspond à 12 000 UI par jour pour un vêlage à 2 ans et 14 550 UI pour un vêlage à 3 ans.

En élevage allaitant, les besoins quotidiens en vitamine D sont de 5,7 UI/kg de PV (INRA, 2018), soit 3 135 UI si le premier vêlage est à 2 ans et 3 420 UI sinon.

Les besoins sont détaillés selon le poids dans le tableau XIV en fin de partie.

En terme d'apport en kg de MSI, cela équivaut à 275 UI/kg MSI par jour pour une génisse allaitante (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000) et 750 UI/kg MSI pour une génisse laitière recevant une ration avec moins de 40 % de concentrés (BROCARD et LECLERC, 2010). La teneur maximale en vitamine D de la ration est variable selon les sources : les textes français indiquent qu'elle ne doit pas excéder 10 000 UI/kg MSI (BROCARD et LECLERC, 2010) alors que les textes anglo-saxons module cette recommandation en fonction de la durée d'excès. L'apport en vitamine D ne doit pas dépasser 2 200 UI/kg MSI si l'excès dure plus de 60 jours et 25 000 UI/kg MSI sinon (FRYE *et al.*, 1991 ; McDOWELL, 2000 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

L'apport en vitamine D doit être raisonné en parallèle de l'apport en P et Ca car leurs métabolismes sont liés (FRYE *et al.*, 1991).

Le statut en vitamine D s'évalue avec la concentration plasmatique en 25-hydroxyvitamine D, dont la concentration physiologique est de 25 – 50 ng/mL. Une concentration inférieure à 5 ng/mL indique une carence alors qu'une concentration supérieure à 200 – 300 ng/mL un excès (INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

(2) Intérêt en reproduction

La vitamine D joue un rôle central dans la régulation du métabolisme phosphocalcique donc les conséquences d'un déséquilibre en vitamine D sur la reproduction sont liées au modification de la calcémie et de la phosphatémie (WU, 2018).

La vitamine D est aussi impliquée directement dans la fonction de reproduction dans la mesure où des récepteurs à la vitamine D sont retrouvés dans certaines cellules ovariennes (McDOWELL, 2000). Ainsi, une carence sévère en vitamine D peut mener à un arrêt des cycles des œstraux (McDOWELL, 2000).

Il n'existe cependant pas de publication s'intéressant à la vitamine D pour la mise à la reproduction des génisses.

c) Vitamine E

La vitamine E correspond à deux types de molécules : les tocophérols et tocotriénols, la forme la plus importante étant l'α-tocophérol (McDOWELL, 2000).

(1) Apports recommandés

Pour la vitamine E, 1 UI est égal à 1 mg d'all-rac- α -tocophéryl acétate ou 0,67 mg de RRR- α -tocophérol.

La vitamine E est disponible dans nombre de composants de la ration en quantité variable : un apport supplémentaire en vitamine E n'est donc pas nécessairement requis. Toutefois, eu égard à la variabilité de la teneur en vitamine E des aliments, il est risqué de ne pas en ajouter à la ration et ce d'autant plus que l'accès au pâturage est réduit (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

L'apport recommandé en vitamine E pour les génisses laitières est de 0,8 UI/kg de PV et est réduit à 0,26 UI/kg de PV si elles sont au pâturage (INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001). Ainsi, une génisse avec un vêlage à 2 ans a besoin de 320 UI de vitamine E par jour, sauf si elle est à l'herbe où dans ce cas elle a besoin de 104 UI de vitamine E par jour. Pour un vêlage à 3 ans, cela correspond à 388 ou 126 UI selon le mode d'élevage.

Pour une génisse allaitante, les apports journaliers recommandés sont compris entre 0,31 et 1,25 UI/kg de PV (INRA, 2018), soit 170 à 687 UI pour un vêlage précoce et 186 à 750 UI pour un vêlage à trois ans. (INRA, 2018).

Pour une génisse laitière, ces apports représentent 20 UI/kg MSI au pâturage et 30 UI/kg MSI si elle est en stabulation (BROCARD et LECLERC, 2010). Pour une génisse allaitante, cela représente 15-60 UI/kg MSI (FRYE *et al.*, 1991 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000).

La teneur en vitamine E de la ration ne doit pas dépasser 2 000 UI/kg MSI (BROCARD et LECLERC, 2010). Les besoins en fonction du poids sont regroupés dans le tableau XV en fin de partie.

Les besoins en vitamine E dépendent des concentrations en antioxydants, acides aminés soufrés et en sélénium (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000).

Le statut en vitamine E s'évalue à partir de la concentration plasmatique en α -tocophérol dont la valeur physiologique est d'environ 3 μ g/mL (INRA, 2018).

(2) Intérêt en reproduction

La vitamine E joue un rôle essentiel dans la reproduction, essentiellement dû à son action antioxydante extra et intracellulaire (FRYE *et al.*, 1991 ; HURLEY et DOANE, 1989 ; McDOWELL, 2000 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001). Elle agit en synergie avec le sélénium qui a un rôle anti-oxydant intracellulaire. Il est donc parfois difficile de différencier le rôle du Se de celui de la vitamine E, d'autant plus que la majorité des études concerne l'action conjointe de la vitamine E et du sélénium et concerne des animaux gestants et non lors de la période de reproduction.

Si l'importance de la vitamine E dans la pathologie de la reproduction péri partum (rétention placentaire et métrite) est admis, son implication dans les autres paramètres de la reproduction ne fait pas consensus (ENJALBERT *et al.*, 2012 ; HURLEY et DOANE, 1989).

D'après certains auteurs, la vitamine E pourrait être impliquée dans la synthèse d'hormones ovariennes et utérines ainsi que la survie et le développement embryonnaire.

Ainsi, une carence en vitamine E serait responsable d'une altération du taux d'ovulation, de la motilité utérine, du taux de conception et de la survie embryonnaire (FRYE *et al.*, 1991 ; HURLEY et DOANE, 1989 ; SMITH et AKINBAMIJO, 2000 ; WU, 2018).

La supplémentation en vitamine E a des effets variables sur les performances de reproduction selon les études mais il peut être intéressant d'apporter de la vitamine E et du sélénium dans les zones où les sols sont carencés afin d'assurer la couverture des besoins en vitamine E (BRISSON, 2003 ; HURLEY et DOANE, 1989).

Seulement deux études portent sur l'intérêt de la vitamine E lors de la mise à la reproduction des génisses.

La première étude s'intéresse à l'intérêt d'ajouter de la vitamine E à la dose de 4 000 UI/kg MSI pendant 90 jours et n'a montré aucun effet sur la qualité et le développement des embryons, ni sur le poids des ovaires de génisses allaitantes superovulées (VELASQUEZ-PEREIRA *et al.*, 2002). Ces résultats sont confortés par ceux de Sales et collaborateurs. Ils ont apporté à des génisses Holstein par voie parentérale 500 ou 750 mg de vitamine E associée respectivement à 800 ou 1200 mg de β -carotène (car les métabolismes de ces deux vitamines sont liés) au début du protocole de synchronisation et de superovulation. Aucune amélioration de la qualité ou de la quantité d'embryons viables n'a été observée (SALES *et al.*, 2008).

Une troisième étude s'intéresse au rôle de la vitamine E sur la reproduction des génisses allaitantes mais la supplémentation commence au sevrage, soit 6 mois avant le début de la saison de reproduction. Les génisses ont reçu quotidiennement 1 g de vitamine E associé ou non à 1 g de sélénium et leurs performances de reproduction ont été comparées à celles de génisses ne recevant aucun complément. Les génisses complémentées ont eu un taux de gestation significativement augmenté puisqu'il était de 83,3 %, contre 33 % pour celles ne recevant aucune complémentation (LAFLAMME et HIDIROGLOU, 1991). Ainsi, la supplémentation de longue durée a amélioré le taux de gestation chez des génisses non carencées en vitamine E.

d) Vitamine K

La vitamine K existe sous deux formes : la phylloquinone (ou vitamine K1) et la ménaquinone (ou vitamine K2) qui sont des dérivées de la 2-méthyl-1,4-naphtoquinone (McDOWELL, 2000).

(1) Apports recommandés

La vitamine K sous sa forme ménaquinone est synthétisée par la flore ruminale et intestinale : les bovins ne requièrent donc pas d'apport alimentaire en vitamine K (McDOWELL, 2000 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001).

(2) Intérêt en reproduction

L'influence de la vitamine K en reproduction bovine n'a été étudiée que dans une seule étude réalisée par Baldoxeda et collaborateurs sur des embryons de vache *in vitro*. Ils ont observé une amélioration de la qualité des embryons : le pourcentage de blastocystes, l'activité mitochondriale et les caractéristiques morphologiques de ceux-ci étaient supérieurs après ajout de ménaquinone dans le milieu de culture (BALDOCEDA-BALDEON *et al.*, 2014).

Tableau XV : Apports journaliers recommandés en vitamine pour les génisses selon le poids et le type de production (BROCARD et LECLERC, 2010 ; INRA, 2018 ; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000, 2001)

Poids vif (kg)	Génisse laitière			Génisse allaitante		
	Vitamine A (UI) 80 UI/kg PV	Vitamine D (UI) 30 UI/kg PV	Vitamine E (UI) 0,26 – 0,8 UI/kg PV	Vitamine A (UI) 47 UI/kg PV	Vitamine B (UI) 5,7 UI/kg PV	Vitamine E (UI) 0,31 – 1,25 UI/kg PV
200	16 000	6 000	52 – 160			
250	20 000	7 500	65 – 200			
300	24 000	9 000	78 – 240			
350	28 000	10 500	91 – 280	16450	1995	108,5 – 437,5
400	32 000	12 000	104 – 320	18800	2280	124 – 500
450	36 000	13 500	117 – 360	21150	2565	139,5 – 562,5
500	40 000	15 000	130 – 400	23500	2850	155 – 625
550	44 000	16 500	143 – 440	25850	3135	170,5 – 687,5
600	48 000	18 000	156 - 480	28200	3420	186 - 750

Les situations de subcarences avec des conséquences discrètes sur les performances zootechniques et sans conséquences cliniques sont beaucoup plus fréquentes que les situations de carences sévères. Ainsi, si la teneur précise en vitamine de l'alimentation n'est pas connue, le risque de carence est possible et il peut donc être judicieux d'apporter des vitamines avec la ration afin de s'assurer d'avoir des apports optimaux et donc une reproduction performante.

En outre, si toutes les vitamines ne sont pas impliquées directement dans la fonction de reproduction, leurs rôles dans le métabolisme général font d'elles des éléments essentiels pour la reproduction. En effet, la reproduction est une des premières fonction altérées lorsque le fonctionnement général de l'organisme est atteint. En participant à l'intégrité des différentes fonctions de l'organisme, les vitamines permettent le maintien de la fonction de reproduction.

III. Exemples de rations lors de la mise à la reproduction

A. Les principes du rationnement

Le rationnement correspond au calcul des quantités d'aliments à donner aux animaux afin de couvrir leurs besoins (INRA, 2010).

Le rationnement nécessite de connaître les caractéristiques des animaux auxquels la ration va être distribuée et celles des aliments qui la constituent.

1. Caractéristiques des animaux

Il est essentiel de connaître les caractéristiques des animaux pour lesquels la ration doit être établie. En effet, la connaissance de leurs caractéristiques, telles que le type de production, la race, le sexe, l'âge, le poids, le GMQ et l'état corporel, permet d'évaluer leurs besoins en énergie, protéines, minéraux et vitamines (INRA, 2010).

a) *La capacité d'ingestion*

La capacité d'ingestion (CI) d'un animal correspond « aux quantités maximales qu'il est capable d'ingérer sur la base de l'encombrement de la ration » (INRA, 2018). Elle s'exprime en UEB (Unité d'Encombrement Bovin).

Chez les bovins en croissance, la CI dépend de différents paramètres parmi lesquels le poids vif, l'âge, l'état d'engraissement, la race et le passé nutritionnel (INRA, 2018).

Ainsi, la CI augmente avec le poids et l'âge grâce au développement de tube digestif et surtout celui du rumen : l'augmentation du poids et de la CI sont isométriques (INRA, 2010). Toutefois, elle est réduite pour les animaux gras.

De plus, les génisses laitières ont une CI 15% plus élevée que les génisses Charolaises et Salers et ces dernières ont une CI 10% supérieure aux génisses Limousines, à poids et rations identiques (INRA, 2018).

La capacité d'ingestion est fournie par les tables d'apports alimentaires INRA selon le poids de l'animal car elle permet le calcul de la densité énergétique minimale de la ration (DER_m). La DER_m représente l'apport énergétique minimal que doit fournir la ration et est définie comme le rapport entre l'apport énergétique recommandé donné par les tables INRA pour un type d'animal à un poids donné (en UFL) et la capacité d'ingestion. L'objectif est de distribuer une ration dont la densité énergétique est supérieure à la DER_m afin de s'assurer que les besoins énergétiques soient couverts. Les valeurs de CI et DER_m pour un poids et un GMQ donnés sont disponibles dans le tableau XVI ci-dessous et de manière exhaustive en annexe 4 et 5.

Tableau XVI : Capacité d'ingestion (CI) et densité énergétique minimale de la ration (DERm) pour les génisses laitières et allaitantes en fonction du poids vif et du GMQ (d'après INRA, 2018)

Poids vif (kg)	GMQ (kg/j)	Génisses laitières		Génisses allaitantes	
		CI (UEB)	DERm	CI (UEB)	DERm
200	0,4	4,6	0,68		
	0,6	4,6	0,77		
	0,8	4,6	0,87		
	1,0	4,6	0,98		
250	0,4	5,6	0,65		
	0,6	5,6	0,72		
	0,8	5,6	0,81		
	1,0	5,6	0,91		
300	0,2	6,6	0,56		
	0,4	6,6	0,62		
	0,6	6,6	0,69		
	0,8	6,6	0,78		
	1,0	6,6	0,87		
350	0,2	7,6	0,54	6,7	0,61
	0,4	7,6	0,60	6,7	0,67
	0,6	7,6	0,67	6,7	0,73
	0,8	7,6	0,75	6,7	0,80
	1,0	7,6	0,84	6,7	0,88
400	0,2	8,6	0,53	7,6	0,60
	0,4	8,6	0,59	7,6	0,65
	0,6	8,6	0,65	7,6	0,71
	0,8	8,6	0,73	7,6	0,77
	1,0	8,6	0,82	7,6	0,85
450	0,2	9,6	0,52	8,4	0,58
	0,4	9,6	0,57	8,4	0,63
	0,6	9,6	0,64	8,4	0,69
	0,8	9,6	0,72	8,4	0,75
	1,0	9,6	0,81	8,4	0,83
500	0,2	10,5	0,51	9,3	0,57
	0,4	10,5	0,56	9,3	0,62
	0,6	10,5	0,63	9,3	0,68
	0,8	10,5	0,71	9,3	0,74
	1,0	10,5	0,80	9,3	0,81
550	0,2	11,5	0,50	10,1	0,56
	0,4	11,5	0,56	10,1	0,61
	0,6	11,5	0,62	10,1	0,66
	0,8	11,5	0,71	10,1	0,73
	1,0	11,5	0,80	10,1	0,80
600	0,2	12,4	0,50	10,9	0,56
	0,4	12,4	0,55	10,9	0,60
	0,6	12,4	0,62	10,9	0,66
	0,8	12,4	0,71	10,9	0,72
	1,0	12,4	0,81	10,9	0,79

b) Les besoins alimentaires

Les besoins alimentaires correspondent aux apports nécessaires à la couverture des dépenses liées à l'entretien et à la production.

(1) Besoins d'entretien

Les besoins d'entretien sont définis comme les besoins fondamentaux nécessaires à la vie de l'animal et au fonctionnement normal de l'organisme. Ils comprennent les besoins liés au métabolisme basal (maintien de l'activité cellulaire et des fonctions vitales, thermorégulation), au maintien de la masse corporelle et à l'activité physique (station debout et déplacements). Ces besoins se retrouvent chez l'ensemble des animaux et sont exprimés en fonction du poids métabolique (PV à la puissance 0,75) (INRA, 2010).

(2) Besoins de production

Les besoins de production peuvent être de trois types : les besoins de croissance, de gestation et de lactation. Ils varient selon le stade physiologique de l'animal.

(a) Besoins de croissance

Les besoins de croissance correspondent aux besoins liés à l'augmentation de taille et de poids et sont essentiels pour les génisses puisqu'elles sont en pleine croissance, notamment lors de la mise à la reproduction où leurs GMQ est compris entre 500 et 900 g/j selon les objectifs d'âge au premier vêlage (INRA, 2010).

Toutefois, l'évaluation de ces besoins doit prendre en compte la composition du gain puisqu'il ne nécessite pas les mêmes nutriments selon qu'il est composé d'os, de viscères, de muscles ou de graisse. L'évolution de la composition du gain lors de la croissance des bovins est présentée en figure 9 (LE COZLER *et al.*, 2009).

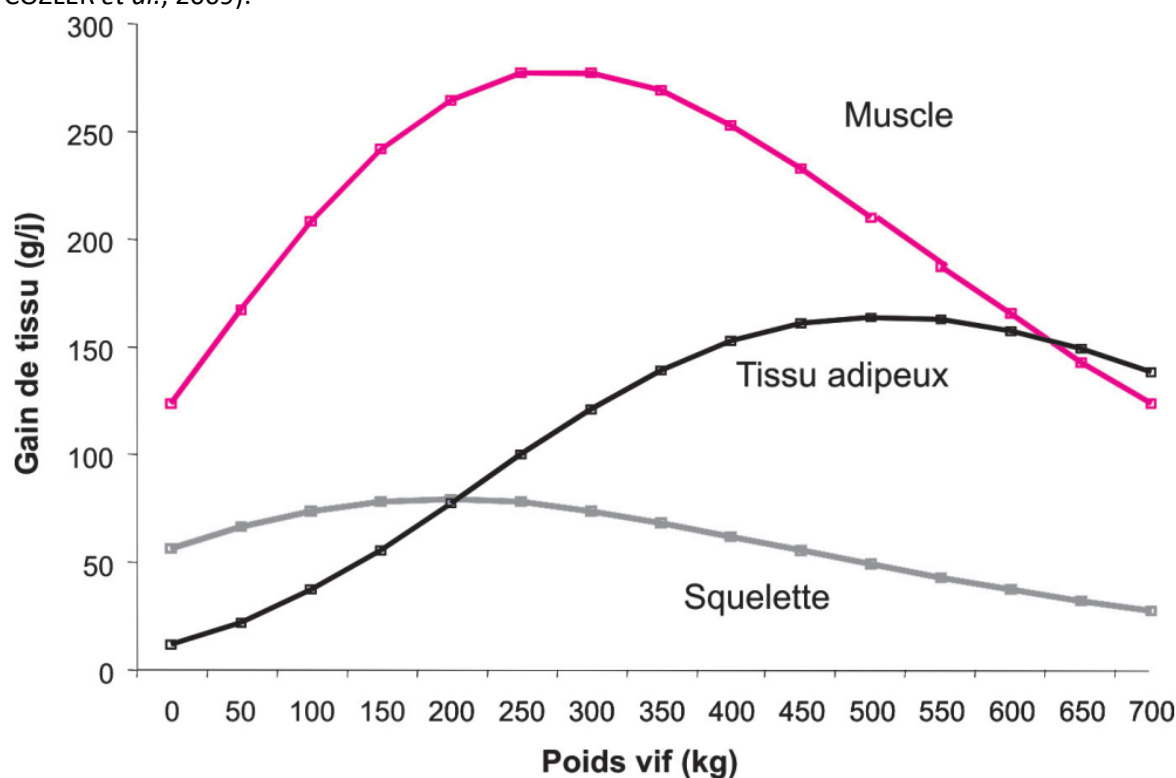


Figure 9 : Evolution de la constitution du gain lors de la croissance chez les bovins (Le Cozler *et al.*, 2009).

(b) Besoins de gestation

Les besoins de gestation dépendent de la croissance, du maintien du fœtus et du placenta et de l'accroissement de la mamelle en fin de gestation. Les besoins liés à la gestation sont négligeables pendant les cinq premiers mois de gestation et ne sont donc pas pris en compte pour les génisses en période de reproduction (INRA, 2010).

(c) Besoins de lactation

Les besoins de lactation sont liés à la quantité et de la qualité de la production laitière (INRA, 2010).

Les génisses ne produisant pas de lait, il n'existe pas de besoin de lactation pour celles-ci.

2. Caractéristiques des aliments pour les génisses

Les aliments distribués aux bovins sont répartis en trois catégories : les fourrages, les concentrés et les aliments minéraux et vitaminiques (AMV).

Les fourrages constituent la base de l'alimentation des génisses et des bovins de manière générale tandis que les concentrés permettent d'équilibrer la ration par leur richesse en énergie ou en azote. Enfin, les AMV permettent de corriger les déficits de la ration en minéraux et en vitamines.

Tous les aliments sont constitués de cinq substances nutritives (en plus de l'eau) en proportions variables : les glucides, les lipides, les matières azotées, les minéraux et les vitamines. La connaissance de ces teneurs permet d'établir la valeur nutritive d'un aliment donné, ce qui est essentiel à l'établissement d'une ration équilibrée et couvrant les besoins des animaux (AGABRIEL *et al.*, 2014 ; BROCARD et LECLERC, 2010 ; INRA, 2018).

Il est possible de distribuer aux génisses des aliments dont la qualité n'est pas suffisante pour être intégrés à la ration des vaches adultes. Toutefois, lors d'une conduite en vêlages précoces, les aliments doivent être d'une qualité suffisante pour permettre une croissance soutenue.

B. Exemples de rations pour les génisses lors de la mise à la reproduction

Le cas de l'eau n'est pas abordé dans ce travail, mais celle-ci doit être de bonne qualité et disponible en quantité suffisante.

Les rations présentées par la suite ont été calculées avec le logiciel LARELEV 2019 qui utilise les normes INRA 2018. Ces rations sont des exemples de rations pouvant être distribuées à des génisses en période de reproduction. Il convient d'adapter ces rations au cas par cas en fonction de la qualité des aliments disponibles dans l'élevage et du gabarit des génisses.

En outre, ces rations sont des rations pour des génisses en stabulation, sans accès au pâturage lors de la période de mise à la reproduction.

1. Génisses laitières

a) Vêlage 2 ans

Les rations présentées dans le tableau XVII sont adaptées pour des génisses laitières de 400 kg et de 800 g de GMQ avec un objectif de vêlage précoce.

Tableau XVII : Exemples de rations pour des génisses laitières lors de la mise à la reproduction avec un objectif de premier vêlage à 2 ans

	Aliment	Quantité
Ration 1	Foin de prairie permanente, demi montagne, fané au sol par beau temps, 1ere coupe, épiaison	8 kg
	Tourteau de soja 48% de protéine	0,2 kg
	AMV	A adapter
Ration 2	Foin de prairie permanente, demi montagne, fané au sol par beau temps, 1ere coupe, floraison	8,1 kg
	Tourteau de soja 48% de protéine	0,4 kg
	Blé tendre	1,5 kg
	AMV	A adapter
Ration 3	Foin de prairie permanente, demi montagne, fané au sol par beau temps, 1ere coupe, floraison	6,4 kg
	Tourteau de colza déshuilé	1,4 kg
	Ensilage de maïs, conditions normales de végétation, vitreux 35% MS	5 kg
	AMV	A adapter
Ration 4	Paille de blé (bonne qualité)	2,7 kg
	Ensilage de maïs, conditions normales de végétation, vitreux 35% MS	4,5 kg MS
	Tourteau de soja 48% de protéine	1,3 kg
	AMV	A adapter
Ration 5	Paille de blé (bonne qualité)	1,5 kg
	Ensilage de prairie permanente, demi montagne, brins courts, 1 ^{er} cycle épiaison	5 kg MS
	Tourteau de soja 48% de protéine	1,1 kg
	AMV	A adapter

b) Vêlage 3 ans

Le tableau XVIII présente des exemples de rations pouvant être distribuées à des génisses laitières lors de la mise à la reproduction pour un premier vêlage à 3 ans, c'est-à-dire pour des animaux pesant 485 kg et avec un GMQ de 500 g/j.

Tableau XVIII : Exemples de rations pour des génisses laitières lors de la mise à la reproduction avec un objectif de premier vêlage à 3 ans

	Aliment	Quantité
Ration 1	Foin de prairie permanente, demi montagne, fané au sol par beau temps, 1ere coupe, floraison	10 kg
	Tourteau de soja 48% de protéine	0,6 kg
	AMV	A adapter
Ration 2	Foin de prairie permanente, demi montagne, fané au sol par beau temps, 1ere coupe, floraison	8 kg
	Tourteau de colza déshuilé	0,6 kg
	Ensilage de maïs, conditions normales de végétation, vitreux 35% MS	1,9 kg MS
	AMV	A adapter
Ration 3	Paille de blé (bonne qualité)	5 kg
	Ensilage de maïs, conditions normales de végétation, vitreux 35% MS	8,6 kg
	Tourteau de soja 48% de protéine	1,5 kg
	AMV	A adapter
Ration 4	Paille de blé (bonne qualité)	3,7 kg
	Ensilage de prairie permanente, demi montagne, brins courts, 1 ^{er} cycle épiaison	18 kg
	Tourteau de soja 48% de protéine	1,3 kg
	AMV	A adapter

2. Génisses allaitantes

a) Vêlage 2 ans

Des rations types pour des génisses allaitantes élevées dans le but d'un vêlage précoce sont présentées dans le tableau XIX. Ces rations sont établies pour des génisses de 550 kg et un GMQ de 900 g/j lors de la mise à la reproduction.

Tableau XIX : Exemples de rations pour des génisses allaitantes lors de la mise à la reproduction avec un objectif de premier vêlage à 2 ans

	Aliment	Quantité
Ration 1	Foin de prairie permanente, demi montagne, fané au sol par beau temps, 1ere coupe, floraison	9,2 kg
	Tourteau de colza déshuilé	1,9 kg
	Blé tendre	0,8 kg
	AMV	A adapter
Ration 2	Foin de prairie permanente, demi montagne, fané au sol par beau temps, 1ere coupe, floraison	4 kg
	Tourteau de colza déshuilé	2 kg
	Blé tendre	0,3 kg
	Ensilage de prairie permanente, demi montagne, brins courts, 1 ^{er} cycle épiaison	4,4 kg MS
	AMV	A adapter
Ration 3	Paille de blé (bonne qualité)	3,8 kg
	Ensilage de maïs, conditions normales de végétation, vitreux 35% MS	12 kg
	Tourteau de soja 48% de protéine	1,9 kg
	Blé tendre	0,5 kg
	AMV	A adapter
Ration 4	Paille de blé (bonne qualité)	2,1 kg
	Ensilage de prairie permanente, demi montagne, brins courts, 1 ^{er} cycle épiaison	5,6 kg MS
	Tourteau de soja 48% de protéine	1,8 kg
	AMV	A adapter

b) Vêlage 3 ans

Les rations présentées dans le tableau XX sont établies pour la période de mise à la reproduction des génisses allaitantes en vêlage tardif, c'est-à-dire lorsqu'elles pèsent 600 kg et qu'elles ont un GMQ de 600 g/j.

Tableau XX : Exemples de rations pour des génisses allaitantes lors de la mise à la reproduction avec un objectif de premier vêlage à 3 ans

	Aliment	Quantité
Ration 1	Foin de prairie permanente, demi montagne, fané au sol par beau temps, 1ere coupe, floraison	10,5 kg
	Tourteau de colza déshuilé	1,7 kg
	AMV	A adapter
Ration 2	Foin de prairie permanente, demi montagne, fané au sol par beau temps, 1ere coupe, floraison	2 kg
	Tourteau de colza déshuilé	0,7 kg
	Ensilage de prairie permanente, demi montagne, brins courts, 1 ^{er} cycle épiaison	6,9 kg MS
	AMV	A adapter
Ration 3	Foin de prairie permanente, demi montagne, fané au sol par beau temps, 1ere coupe, floraison	2 kg
	Tourteau de colza déshuilé	0,5 kg
	Ensilage de prairie permanente, demi montagne, brins courts, 1 ^{er} cycle épiaison	2,8 kg MS
	Ensilage de maïs, conditions normales de végétation, vitreux 35% MS	5 kg MS
	AMV	A adapter
Ration 4	Paille de blé (bonne qualité)	4,9 kg
	Ensilage de maïs, conditions normales de végétation, vitreux 35% MS	11 kg
	Tourteau de soja 48% de protéine	1,9 kg
	AMV	A adapter
Ration 5	Paille de blé (bonne qualité)	3,5 kg
	Ensilage de prairie permanente, demi montagne, brins courts, 1 ^{er} cycle épiaison	22 kg
	Tourteau de soja 48% de protéine	1,6 kg
	AMV	A adapter

3. Particularité des besoins en minéraux et vitamines

Il est essentiel d'apporter des minéraux et des vitamines dans toute ration par le biais d'un AMV. La quantité à apporter pour les différents minéraux et vitamines correspond à la différence entre les besoins des génisses et les apports de la ration.

Il est possible de connaître les teneurs en minéraux et en vitamines des aliments en effectuant des analyses de laboratoire. Cependant, le coût de ces analyses ne permet pas d'en envisager un recours systématique.

Il existe une multitude d'AMV sur le marché, il faut donc choisir celui le plus adapté possible. Toutefois, il est impossible d'obtenir les teneurs exactes en vitamines et minéraux nécessaire pour couvrir les besoins. Le choix de l'AMV doit permettre de couvrir les besoins sans les dépasser de manière excessive (AGABRIEL *et al.*, 2014 ; BROCARD et LECLERC, 2010).

La suite de cette partie propose des valeurs cibles permettant d'évaluer la qualité d'un AMV .

a) Choix de l'AMV

Le premier critère de choix d'un AMV est la teneur en phosphore, calcium (et éventuellement magnésium) car ce sont les principaux constituants des AMV et car ce sont les éléments dont l'apport par l'AMV est le plus important (MESCHY, 2017). Ces teneurs correspondent aux deux (ou trois) chiffres caractérisant un AMV sous la forme P/Ca/Mg.

(1) Exemples d'AMV utilisables avec les rations proposées

Le logiciel LARELEV 2019 indique une formule d'AMV pour chaque ration calculée. Ainsi, il est possible d'utiliser un AMV 0/25/5 ou 0/30/5 pour les rations à base d'ensilage de maïs. Les rations à base de foin nécessitent quant à elles des AMV 0/21/5, 7/21/5, 0/25/5 ou encore 5/25/5.

(2) Choix de l'AMV à partir du rapport phosphocalcique

Dans son ouvrage de 2017, Meschy propose une méthode de calcul des teneurs en P et Ca à partir du rapport phosphocalcique, le principe étant « d'établir le rapport phosphocalcique des déficits [en phosphore et calcium] et de choisir un AM présentant un rapport similaire : égal ou un peu supérieur, un léger excès de calcium étant acceptable dès lors que le besoin en phosphore est satisfait » (MESCHY, 2017). Ce calcul nécessite de connaître les besoins en Ca et P et les apports de la ration en ces éléments. La quantité d'AMV journalière est calculée à partir de sa teneur en phosphore absorbable avec la formule :

$$\text{AMV(g/j)} = (\text{déficit en phosphore (g)} / \text{teneur en phosphore de l'AMV(g)}) \times 1000$$

Les besoins journaliers en calcium et phosphore sont exprimés en gramme d'élément absorbable mais la composition en minéraux de l'AMV est donnée en éléments totaux. La conversion entre ces deux unités s'effectue grâce aux formules $P_{\text{abs}} = P_{\text{total}} \times 0,65$ et $Ca_{\text{abs}} = Ca_{\text{total}} \times 0,40$. Ainsi, la conversion entre les formules de rapport phosphocalcique est permise par la formule :

$$(Ca_{\text{abs}}/P_{\text{abs}}) \times 1,62 = Ca/P$$

Un exemple de calcul de la formulation de l'AMV et de la quantité à distribuer est présenté ici. Il correspond à une génisse laitière de 400 kg et avec un GMQ de 800 g/j, élevée pour un premier vêlage à 2 ans et nourrie avec une ration à base de foin (ration 1 du tableau XV).

Ses besoins en P_{abs} sont de 12,3 g/j et ses besoins en Ca_{abs} sont de 15,4 g/j (d'après le tableau VII). Les apports par la ration sont de 10,1 g de P_{abs} et 10,5 g de Ca_{abs} (INRA, 2018), soit un déficit de 2,2 g de P_{abs} et de 4,9 g de Ca_{abs} . Le rapport $Ca_{\text{abs}}/P_{\text{abs}}$ des déficits est donc de 2,2 soit un rapport de déficits en éléments totaux de 3,6. Un AMV de formulation 5/23 est choisi.

La quantité à distribuer chaque jour est de 70 g.

b) Vérification des apports en oligoéléments et vitamine

Une fois l'apport nécessaire en Ca et P par l'AMV déterminé, il faut vérifier que les apports en oligoéléments et vitamines soient suffisants.

(1) Apport en oligoéléments

Les teneurs minimales de l'AMV en soufre et en oligoéléments que doit contenir l'AMV sont présentées dans le tableau XXI.

Ces valeurs sont établies pour un apport de 100 g d'AMV/j/génisse (cette quantité étant à moduler selon le gabarit des animaux), en considérant que l'AMV doit fournir 80% des apports journaliers en oligoéléments.

Tableau XXI : Teneurs minimales de l'AMV en soufre et oligoéléments

Elément	Génisse laitière	Génisse allaitante
Cuivre	720 mg/kg	800 mg/kg
Zinc	3 600 – 4 320 mg/kg	4 000 – 4 800 mg/kg
Sélénium	7,2 – 14, 4 mg/kg	8 – 16 mg/kg
Manganèse	2 880 – 3 600 mg/kg	3 200 – 4 000 mg/kg
Cobalt	7,2 – 21,6 mg/kg	8 – 24 mg/kg
Iode	28,8 – 36 mg/kg	32 – 40 mg/kg
Soufre	144 g/kg	160 g/kg

(2) Apport en vitamines

Le tableau XXII présente les teneurs minimales en vitamines que doit contenir l'AMV. De la même manière que précédemment, ces valeurs sont établies pour un apport quotidien de 100 g d'AMV (cette quantité étant à adapter au gabarit des animaux). Ces valeurs ont été calculées en considérant que l'AMV doit apporter l'ensemble des apports en vitamines (INRA, 2018).

Tableau XXII : Teneurs minimales en vitamines de l'AMV

		Génisse laitière	Génisse allaitante
Vitamine A		320 000 UI/kg	258 500 UI/kg
Vitamine D		120 000 UI/kg	31 350 UI/kg
Vitamine E	Pâturage	1 040 UI/kg	1 705 UI/kg
	Stabulation	3 200 UI/kg	6 875 UI/kg

CONCLUSION

La puberté est définie comme le premier œstrus ovulatoire suivi d'une phase lutéale de durée normale. Elle correspond à la maturation de l'axe hypothalamo-pituitaire-gonadique permise par une inversion de la réponse de l'hypothalamus à l'œstradiol : le rétrocontrôle négatif exercé par l'œstradiol devient positif. L'âge de la puberté dépend de différents facteurs dont le plus important est la vitesse de croissance. En effet, les génisses sont pubères lorsqu'un poids cible est atteint (40-50% et 55-60% du poids vif adulte pour les génisses laitières et allaitantes respectivement).

La mise à la reproduction dépend des objectifs de l'élevage et plus particulièrement de l'âge souhaité au premier vêlage (classiquement deux ou trois ans) et des caractéristiques de la génisse (race, précocité). Des objectifs de croissance sont définis selon l'âge au premier vêlage.

La maîtrise de l'alimentation joue un rôle essentiel dans les performances de reproduction d'un élevage. Les besoins alimentaires en énergie, protéines, minéraux et vitamines lors de la mise à la reproduction des génisses dépendent de la vitesse de croissance souhaitée.

Des recommandations d'apports sont établies pour l'ensemble des nutriments selon le poids et le croît des animaux. Afin d'optimiser les performances de reproduction des génisses, il est essentiel de respecter les apports recommandés. Toutefois, il est possible de moduler ces apports lors de situations particulières comme en cas de carence ou de maigreur.

Concernant les apports énergétiques, toute restriction d'apport est à proscrire lors de la mise à la reproduction au risque d'engendrer une diminution des performances de reproduction. Dans le cas d'animaux maigres ou de déficit énergétique avéré, un flushing peut être intéressant afin de favoriser la fonction de reproduction. Un excès des apports énergétiques est sans effet sur la reproduction voire néfaste lorsqu'il aboutit à un engraissement excessif des génisses.

Pour les protéines, un déficit d'apport est également à éviter pour ne pas réduire la réussite de la reproduction. Les effets d'un excès de protéines ne font pas consensus mais il semblerait que plus que la quantité, ce soit la nature des protéines apportées qui soit déterminante.

Dans le cas des minéraux (macro-minéraux et oligoéléments), si certains sont plus importants que d'autres pour la reproduction, de manière générale, toute carence perturbe la fonction de reproduction. Ainsi, il est important de vérifier le statut en minéraux et d'apporter au besoin des minéraux dans la ration afin d'éviter toute situation carencielle.

Enfin, des recommandations d'apport sont établies pour les vitamines A, D et E seulement, les bovins étant théoriquement capables de produire eux-mêmes les autres vitamines en quantité suffisante. De la même manière que pour les minéraux, la connaissance du statut vitaminique des bovins est essentielle pour ajuster au mieux les apports en vitamines de la ration et ainsi éviter les carences qui sont délétères pour la reproduction.

Bibliographie

ABOELENAIN M., BALBOULA A. Z., KAWAHARA M., MONTASER A.B., ZAABEL S.M., KIM S.W., NAGANO M., TAKAHASHI M. (2017). Pyridoxine supplementation during oocyte maturation improves the development and quality of bovine preimplantation embryos. *Theriogenology*, 91, pp. 127-133. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.12.022>

AGABRIEL J., BROUARD S., DEVUN J. (2014). *Guide de l'alimentation du troupeau bovin allaitant : vaches, veaux et génisses de renouvellement*. Institut de l'élevage : Paris, 340 p.

AMUNDSON O.L., LARIMORE E.L., McNEEL A.K., CHASE C.C., CUSHMAN R.A., FREELY H.C., PERRY G.A. (2016). Uterine environment and pregnancy rate of heifers with elevated plasma urea nitrogen. *Animal Reproduction Science*, 173, pp. 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2016.08.011>

ARIKAN S., RODWAY R.G. (2000). Effects of high density lipoprotein containing high or low β -carotene concentrations on progesterone production and β -carotene uptake and depletion by bovine luteal cells. *Animal Reproduction Science*, 62, pp. 253-263.

ARTINGTON J.D., CORAH L.R. (1993). Effect of molybdenum/sulfur-induced copper deficiency upon enzyme levels and reproduction in heifers. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*, 0(1), pp. 97-98. <https://doi.org/10.4148/2378-5977.2117>

ATKINS J.A., POHLER K.G., SMITH M.F. (2013). Physiology and Endocrinology of Puberty in Heifers. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 29(3), pp. 479-492. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2013.07.008>

BAISHYA N., MORANT S.V., POPE G.S., LEAVER J.D. (1982). Rearing of dairy cattle 8. Relationships of dietary energy intake, changes in live weight, body condition and fertility. *Animal Science*, 34(1), pp. 63-70. <https://doi.org/10.1017/S0003356100000489>

BALDOCEDA-BALDEON L.M., GAGNE D., VIGNEAULT C., BLONDIN P., ROBERT C. (2014). Improvement of bovine in vitro embryo production by vitamin K2 supplementation. *Reproduction*, 148(5), pp. 489-497. <https://doi.org/10.1530/REP-14-0324>

BALL P.J.H., PETERS A.R. (2004). *Reproduction in cattle*. Third edition. Blackwell Publishing : Oxford, 242 p.

BEKEOVA E., ELECKO J., ROSIVAL I., HAJURKA J., KRAJNICKAKOVA M. (1985). Concentrations of thyroxine, beta carotene, vitamin A and pregnancy in heifers after administration of beta carotene. *Veterinarni Medicina*, 30(12), pp. 715-724.

BELLO-FARIA J.L., MORA-LUNA R.E., HERRERA-ANGULO A.M., ACOSTA-RIVAS B. (2021). Productive and reproductive performance and blood chemistry on grazing Brahman replacement heifers supplemented with fatty acids and protein. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 22(3), pp. e2051. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num3_art:2051

BJELLAND D.W., WEIGEL K.A., HOFFMAN P.C., ESSER N.M., COBLENTZ W.K. (2011). The effect of feeding dairy heifers diets with and without supplemental phosphorus on growth, reproductive efficiency, health, and lactation performance. *Journal of Dairy Science*, 94(12), pp. 6233-6242. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4596>

BONSEMBIANTE M., ANDRIGHETTO I., BITTANTE G. (1983). Effect of β -carotene on pregnancy and parturition of beef heifers and on the rearing in confinement of their calves. *Zootecnica e Nutrizione Animale*, 9, pp. 401-417.

BONSEMBIANTE M., BITTANTE G., ANDRIGHETTO I. (1980). Effect of beta-carotene on the fertility of cows fed diets supplemented with vitamin A. *Zootecnica e Nutrizione Animale*, 6(1), pp. 47-58.

BOSSIS I., WETTEMANN R.P., WELTY S.D., VIZCARRA J.A., SPICER L.J., DISKIN M.G. (1999). Nutritionally induced anovulation in beef heifers : Ovarian and endocrine function preceding cessation of ovulation. *Journal of Animal Science*, 77(6), pp. 1536-1546. <https://doi.org/10.2527/1999.7761536x>

BOSSIS I., WETTEMANN R.P., WELTY S.D., VIZCARRA J., SPICER L.J. (2000). Nutritionally Induced Anovulation in Beef Heifers : Ovarian and Endocrine Function During Realimentation and Resumption of Ovulation. *Biology of Reproduction*, 62(5), pp. 1436-1444. <https://doi.org/10.1095/biolreprod62.5.1436>

BRASCHE C.J. (2015). *Effect of a Trace Mineral Injection on trace mineral liver concentrations, AI conception and pregnancy rate of virgin beef heifers*. Master of Science in Animal Science. Lincoln : University of Nebraska, 137 p.

BRIDGES G.A., KRUSE S.G., FUNNEL B., PERRY G.A., GUNN P.J., ARIAS R.P., LAKE S.L. Changes in body condition on oocyte quality and embryo survival. In : BEEF REPRODUCTION TASK FORCE (2012). *Applied Reproductive Strategies in Beef Cattle, December 3-4, 2012, Sioux Falls, SD*. 376 p.

BRISSON J. Nutrition, alimentation et reproduction. In : CENTRE DE REFERENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUEBEC (2003). *Symposium sur les bovins laitiers, 30 octobre 2003, Saint-Hyacinthe*. 66 p.

BROCARD V., LECLERC M.-C. (2010). *Guide pratique de l'alimentation du troupeau bovin laitier*. Institut de l'élevage : Paris, 262 p.

BURNETT R.H. (2017). *Supplemental Trace Minerals (Zn, Cu, and Mn) as Sulfates or Hydroxy Trace Mineral Sources for Beef Heifers*. Master of Science in Animal Science. Fayetteville : University of Arkansas, 58 p.

BUTLER W.R. (1998). Review : Effect of Protein Nutrition on Ovarian and Uterine Physiology in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*, 81(9), pp. 2533-2539. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)70146-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)70146-8)

BUTLER W.R. (2003). Energy balance relationships with follicular development, ovulation and fertility in postpartum dairy cows. *Livestock Production Science*, 83(2), pp. 221-218. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(03\)00112-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(03)00112-X)

BUTLER W.R. (2005). Nutrition, negative energy balance and fertility in the postpartum dairy cow. *Cattle Practice*, 13(1), pp. 13-18.

CASSADY J.M., MADDOCK T.D., DICOSTANZO A., LAMB G.C. (2009). Body composition and estrous cyclicity responses of heifers of distinct body conditions to energy restriction and repletion. *Journal of Animal Science*, 87(7), pp. 2255-2261. <https://doi.org/10.2527/jas.2008-1715>

CHAMBRE D'AGRICULTURE DES PAYS DE LA LOIRE (2010). *Guide de recommandations pour l'élevage des génisses de renouvellement*. Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire : Angers, 35 p.

CHASTANT-MAILLARD S. Nutrition : Les grandes pannes de la reproduction. In : SOCIETE NATIONALE DES GROUPEMENTS TECHNIQUES VETERINAIRES (2016). *Journées Nationales des GTV, 18-20 mai 2016, Nantes*. 984 p.

CLIFF LAMB G., BROWN D.R., LARSON J.L., DAHLEN C.R., DILORENZO N., ARTHINGTON J.D., DICOSTANZO A. (2008). Effect of organic or inorganic trace mineral supplementation on follicular response, ovulation, and embryo production in superovulated Angus heifers. *Animal Reproduction Science*, 106(3-4), pp. 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2007.04.007>

CORDEIRO M.B., PERES M.S., DE SOUZA J.M., GASPAS P., BARBIERE F., SA FILHO M.F., MATURANA FILHO M., DINARDI R.N., NOGUEIRA G.P., MESQUITA F.S., PUGLIESI G., MARTINS T., BINELLI M., MEMBRIVE C.M.B. (2015). Supplementation with sunflower seed increases circulating cholesterol concentrations and potentially impacts on the pregnancy rates in *Bos indicus* beef cattle. *Theriogenology*, 83(9), pp. 1461-1468. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2015.01.022>

CORLAY, B. (1998). *Influence de l'alimentation énergétique et azotée sur la qualité des génisses receveuses d'embryons*. Thèse de doctorat vétérinaire. Nantes : Faculté de médecine, 107 p.

DAY M.L., ANDERSON L.H. (1998). Current Concepts on the Control of Puberty in Cattle. *Journal of Animal Science*, 76(suppl_3), pp. 1-15. https://doi.org/10.2527/1998.76suppl_31x

DISKIN M.G., MACKAY D.R., ROCHE J.F., SREENAN J.M. (2003). Effects of nutrition and metabolic status on circulating hormones and ovarian follicle development in cattle. *Animal Reproduction Science*, 78(3-4), pp. 345-370. [https://doi.org/10.1016/S0378-4320\(03\)00099-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4320(03)00099-X)

D'OCCHIO M.J., BARUSELLI P.S., CAMPANILE G. (2019). Influence of nutrition, body condition, and metabolic status on reproduction in female beef cattle : A review. *Theriogenology*, 125, pp. 277-284. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.11.010>

DOYLE D.N., LONERGAN P., DISKIN M.G., PIERCE K.M., KELLY A.K., STANTON C., WATERS S.M., PARR M.H., KENNY D.A. (2019). Effect of dietary n-3 polyunsaturated fatty acid supplementation and post-insemination plane of nutrition on systemic concentrations of metabolic analytes, progesterone, hepatic gene expression and embryo development and survival in beef heifers. *Theriogenology*, 127, pp. 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.12.037>

DOYLE J.C., HUSTON J.E., THOMPSON P.V. (1990). Influence of mineral supplementation on bovine serum, liver and endometrium at day 1 and day 12 of the estrous cycle. *Theriogenology*, 34(1), pp. 21-31.

DOZIAS D., PECCATTE J.R., MICHEL G. Influence du profil de croissance sur les performances de reproduction de génisses charolaises de 2 ans d'âge. In : INSTITUT DE L'ELEVAGE et INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (2006). *13eme Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, 6-7 décembre 2006, Paris*. 476 p.

DUCKER M.J., YARROW N.H., BLOOMFIELD G.A., EDWARDS-WEBB J.D. (1984). The effect of β -carotene on the fertility of dairy heifers receiving maize silage. *Animal Science*, 39(1), pp. 9-16. <https://doi.org/10.1017/S0003356100027550>

DUDOUE C. (2021). *La production des bovins allaitants*. 5e édition. Éditions France agricole : Paris. 499 p.

- DUNNE L.D., DISKIN M.G., BOLAND M.P., O'FARRELL K.J., SREENAN J.M. (1999). The effect of pre- and post-insemination plane of nutrition on embryo survival in beef heifers. *Animal Science*, 69(2), pp. 411-417. <https://doi.org/10.1017/S1357729800050980>
- DUPLESSI M., GIRARD C.L., SANTSCI D.E., LAFOREST J.-P., DUROCHER J., PELLERIN D. (2014). Effects of folic acid and vitamin B12 supplementation on culling rate, diseases, and reproduction in commercial dairy herds. *Journal of Dairy Science*, 97(4), pp. 2346-2354. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7369>
- DUPONT J., SCARAMUZZI R.J., REVERCHON M. (2014). The effect of nutrition and metabolic status on the development of follicles, oocytes and embryos in ruminants. *Animal*, 8(7), pp. 1031-1044. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000937>
- EDMONSON A.J., LEAN I.J., WEAVER L.D., FARVER T., WEBSTER G. (1989). A Body Condition Scoring Chart for Holstein Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 72(1), pp. 68-78. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(89\)79081-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(89)79081-0)
- ELECKO J., MARACEK I., CHOMA J., HAJURKA J., HENDRICHOVSKY V., LAZAR L., KRAJNICKAKOVA M. (1984). Cervical mucus in the heifer uterus during heat and insemination after feeding with synthetic beta-carotene. *Veterinarni Medicina*, 29(11), pp. 669-678.
- ELROD C.C., BUTLER W.R. (1993). Reduction of fertility and alteration of uterine pH in heifers fed excess ruminally degradable protein. *Journal of Animal Science*, 71(3), pp. 694-701. <https://doi.org/10.2527/1993.713694x>
- ENJALBERT F. (2006). Les bases de l'alimentation de la génisse future laitière. *Le point vétérinaire*, 37(264), pp. 50-53.
- ENJALBERT F., ALVES DE OLIVEIRA L., BRODEUR M., DUBUC J. Alimentation en période de transition et effets sur la reproduction. In : DESCOTEAUX L., VAILLANCOURT D. (2012). *Vade-mecum de gestion de la reproduction des bovins laitiers*. Med'com : Paris, pp. 154-161.
- ENNUYER, M., LAUMONNIER, G. (2013). *Vade-mecum de gestion de l'élevage bovin laitier*. Med'com : Paris, 478 p.
- FOLMA Y., ASCARELL I., HERZ Z., ROSENBERG M., DAVIDSON M., HALEVI A. (1979). Fertility of dairy heifers given a commercial diet free of β -carotene. *British Journal of Nutrition*, 41(2), pp. 353-359. <https://doi.org/10.1079/BJN19790044>
- FORDE N., BELTMAN M.E., LONERGAN P., DISKIN M., ROCHE J. F., CROWE M.A. (2011). Oestrous cycles in Bos taurus cattle. *Animal Reproduction Science*, 124(3-4), pp. 163-169. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2010.08.025>
- FRYE T.M., WILLIAMS S.N., GRAHAM T.W. (1991). Vitamin Deficiencies in Cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 7(1), pp. 217-275. [https://doi.org/10.1016/S0749-0720\(15\)30817-3](https://doi.org/10.1016/S0749-0720(15)30817-3)
- FUNSTON R.N. (2004). Fat supplementation and reproduction in beef females. *Journal of Animal Science*, Supplément(82), pp. 154-161. https://doi.org/10.2527/2004.8213_supplE154x

GAGNON A., KHAN D.R., SIRARD M.-A., GIRARD C.L., LAFOREST J.-P., RICHARD F.J. (2015). Effects of intramuscular administration of folic acid and vitamin B12 on granulosa cells gene expression in postpartum dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 98(11), pp. 7797-7809. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9623>

GAMARRA G., PONSART C., LACAZE S., LE GUIENNE B., DELOCHE M.-C., MONNIAUX D., PONTER A.A. (2014). Short term dietary propylene glycol supplementation affects circulating metabolic hormones, progesterone concentrations and follicular growth in dairy heifers. *Livestock Science*, 162, pp. 240-251. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.01.015>

GANIE A.A., BAGHEL R.P.S., MUGDAL V., AARIF O., SHEIKH G.G. (2014). Effect of selenium supplementation on reproductive performance and hormonal profile in buffalo heifers. *Indian Journal of Animal Research*, 48(1), pp. 27-30. <https://doi.org/10.5958/j.0976-0555.48.1.006>

GARCIA-DIAZ J.R., JOSEPH-AJAKAIYE J., CUESTA-MAZORRA M., QUINONES-RAMOS R., MUNYORINDERITU H., FIGUEREDO-ROSS J.M., MOLLINEDA-TRUJILLO Á. (2012). Effects of parenteral supplementation of Cu in female cattle with different levels of cupremia. *Archives Animal Breeding*, 55(2), pp. 113-122. <https://doi.org/10.5194/aab-55-113-2012>

GATH V.P., CROWE M.A., O'CALLAGHAN D., BOLAND M.P., DUFFY P., LONERGAN P., MULLIGAN F.J. (2012). Effects of diet type on establishment of pregnancy and embryo development in beef heifers. *Animal Reproduction Science*, 133(3-4), pp. 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2012.06.019>

GRANT J.K., STEICHEN P.L., WRIGHT C.L., VONNAHME K.A., BAUER M.L., JENNINGS J.S., PERRY G.A. (2013). Influence of nitrogen and sulfur intake on bovine uterine pH throughout the luteal phase1. *Journal of Animal Science*, 91(3), pp. 1186-1192. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5518>

GRIMARD B., AGABRIEL J., CHAMBON G., CHANVALLON A., CONSTANT F., CHASTANT-MAILLARD S. (2017). Particularités de la reproduction des vaches allaitantes de races françaises. *INRA Productions Animales*, 30(2), pp. 125-138. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2017.30.2.2239>

GUTIERREZ C.G., OLDHAM J., BRAMLEY T.A., GONG J.G., CAMPBELL B.K., WEBB R. (1997). The recruitment of ovarian follicles is enhanced by increased dietary intake in heifers. *Journal of Animal Science*, 75(7), pp. 1876-1884. <https://doi.org/10.2527/1997.7571876x>

HAVLIN J.M., ROBINSON P.H., GARRETT J.E. (2018). Effects on post-fresh period milk production and fertility as a result of prior niacin supplementation of dairy cows during their fresh period. *Livestock Science*, 214, 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.05.010>

HEMKEN R.W., BREMEL D.H. (1982). Possible Role of Beta-Carotene in Improving Fertility in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*, 65(7), pp. 1069-1073. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(82\)82314-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(82)82314-X)

HESS B.W., MOSS G.E., RULE D.C. (2008). A decade of developments in the area of fat supplementation research with beef cattle and sheep. *Journal of Animal Science*, 86(suppl_14), pp. E188-E204. <https://doi.org/10.2527/jas.2007-0546>

HIDIROGLOU M. (1979). Trace Element Deficiencies and Fertility in Ruminants : A Review. *Journal of Dairy Science*, 62(8), pp. 1195-1206. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(79\)83400-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(79)83400-1)

HOPPER R.M. (2021). *Bovine Reproduction*. 2^e édition. Wiley : Ames, 1206 p.

HURLEY W.L., DOANE R.M. (1989). Recent Developments in the Roles of Vitamins and Minerals in Reproduction. *Journal of Dairy Science*, 72(3), pp. 784-804. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(89\)79170-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(89)79170-0)

HURLEY W.L., EDGERTON L.A., OLDS D., HEMKEN R.W. (1982). Estrous Behavior and Endocrine Status of Dairy Heifers with Varied Intakes of Phosphorus. *Journal of Dairy Science*, 65(10), pp. 1979-1986. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(82\)82447-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(82)82447-8)

INSTITUT DE L'ELEVAGE. (2020). *Reproscope* [en ligne] <http://www.reproscope.fr> [consulté le 10/05/2022]

INSTITUT DE L'ELEVAGE. (2021). *Résultats du contrôle de performance bovins allaitants, France—Campagne 2020*. Edition 2021. Institut de l'élevage : Paris, 126 p.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (2010). *Alimentation des bovins, ovins et caprins : Besoins des animaux, valeurs des aliments tables Inra 2007*. Mise à jour 2010. Quae : Versailles, 311 p.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE. (2018). *Alimentation des ruminants*. Quae : Versailles, 728 p.

KANE K.K., HAWKINS D.E., PULSIPHER G.D., DENNISTON D.J., KREHBIEL C.R., THOMAS M.G., PETERSON M.K., HALLFORD D.M., REMMENG M.D., ROBERTS A.J., KEISLER D.H. (2004). Effect of increasing levels of undegradable intake protein on metabolic and endocrine factors in estrous cycling beef heifers. *Journal of Animal Science*, 82(1), pp. 283-291. <https://doi.org/10.2527/2004.821283x>

KENNY D.A., BOLAND M.P., DISKIN M.G., SREENAN J.M. (2002). Effect of rumen degradable protein with or without fermentable carbohydrate supplementation on blood metabolites and embryo survival in cattle. *Animal Science*, 74(3), pp. 529-537. <https://doi.org/10.1017/S1357729800052681>

KINDER J.E., BERGFELD E.G.M., WEHRMAN M.E., PETERS K.E., KOJIMA F.N. (1995). Endocrine basis for puberty in heifers and ewes. *Journal of Reproduction and Fertility. Supplement*, 49, pp. 393-407.

KRUSE S.G., BRIDGES G.A., FUNNEL B.J., BIRD S.L., LAKE S.L., ARIAS R.P., AMUNDSON O.L., LARIMORE E.L., KEISLER D.H., PERRY G.A. (2017). Influence of post-insemination nutrition on embryonic development in beef heifers. *Theriogenology*, 90(1), pp. 185-190. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.11.021>

LAFLAMME L., HIDIROGLOU M. (1991). Effects of selenium and vitamin E administration on breeding of replacement beef heifers. *Annales de Recherches Vétérinaires*, 22(1), pp. 65-69.

LANSFORD A.C., MUSGRAVE J.A., FUNSTON R.N. (2018). Effect of supplementation during the breeding season on a May-calving beef herd in the Nebraska Sandhills. *The Professional Animal Scientist*, 34(3), pp. 269-274. <https://doi.org/10.15232/pas.2017-01693>

LARSON R.L. (2007). Heifer Development : Reproduction and Nutrition. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 23(1), pp. 53-68. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2006.11.003>

LAUMONNIER G. (2013). Optimiser une ration pour obtenir un vêlage à deux ans. *Le Point Vétérinaire Expert Rural*, 44(n° spécial 2013), pp. 48-54

LE COZLER Y. (2015). Reproduction chez la génisse laitière. *Repromag*, 2015, pp. 12-23

LE COZLER Y., LOLLIVIER V., LACASSE P., DISENHAUS C. (2008). Rearing strategy and optimizing first-calving targets in dairy heifers: A review. *Animal*, 2(9), pp. 1393-1404. <https://doi.org/10.1017/S1751731108002498>

LE COZLER Y., PECCATTE J.R., PORHIEL J.Y., BRUNSCHWIG P., DISENHAUS C. (2009). Pratiques d'élevages et performances des génisses laitières: État des connaissances et perspectives. *INRA Productions Animales*, 22(4), pp. 303-316. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2009.22.4.3356>

LENTS C.A., WHITE F.J., CICCIOLO N.H., FLOYD-WHITE L.N., RUBIO I., KEISLER D.H., SPICER L.J., WETTEMANN R.P. (2013). Metabolic status, gonadotropin secretion, and ovarian function during acute nutrient restriction of beef heifers. *Journal of Animal Science*, 91(9), pp. 4146-4157. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6342>

LEQUEUX G. Santé et performances chez les bovins : Rôles des oligoéléments. In : SOCIETE NATIONALE DES GROUPEMENTS TECHNIQUES VETERINAIRES (2016). *Journées Nationales des GTV, 18-20 mai 2016, Nantes*, 984 p.

LI H.Q., LIU Q., WANG C., YANG Z.M., GUO G., HUO W.J., PEI C.X., ZHANG Y.L., ZHANG S.L., WANG H., LIU J.X., HUANG Y.X. (2016). Effects of dietary supplements of rumen-protected folic acid on lactation performance, energy balance, blood parameters and reproductive performance in dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 213, pp. 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.01.005>

LONG N.M., BURNS T.A., DUCKETT S.K., SCHAFER D.W. (2014). Reproductive performance and serum fatty acid profiles of underdeveloped beef heifers supplemented with saturated or unsaturated rumen bypass fat compared to an isocaloric control. *The Professional Animal Scientist*, 30(5), pp. 502-509. <https://doi.org/10.15232/pas.2014-01311>

LONG N.M., HILL G.M., BAKER J.F., GRAVES W.M., FROETSCHER M.A., KEISLER D.H., MULLINIX B.G. (2007). Reproductive Performance of Beef Heifers Supplemented with Corn Gluten Feed and Rumen-Protected Fat before Breeding. *The Professional Animal Scientist*, 23(4), pp. 316-324. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)30984-0](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)30984-0)

LOTTHAMMER K.H., AHLWEDE H.L. (s. d.). Untersuchungen über eine spezifische Vitamin A-unabhängige Wirkung des β -Carotins auf die Fertilität des Rindes 5. Mitt. : Organuntersuchungen—Gewichts- und Gehaltsbestimmungen. *Dtsch Tierärztl Wochenschr*, 85(7). Cité par HEMKEN R.W., BREMEL D.H. (1982). Possible Role of Beta-Carotene in Improving Fertility in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*, 65(7), pp. 1069-1073. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(82\)82314-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(82)82314-X)

LOTTHAMMER K.H., AHLWEDE H.L. (1977). Untersuchungen über eine spezifische Vitamin A-unabhängige Wirkung des β -Carotins auf die Fertilität des Rindes 3. Mitt. : Blutserumuntersuchungen. *Dtsch. Tierärztl. Wochenschr*, 84(220). Cité par HEMKEN R.W., BREMEL D.H. (1982). Possible Role of Beta-Carotene in Improving Fertility in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*, 65(7), pp. 1069-1073. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(82\)82314-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(82)82314-X)

LOTTHAMMER K.H., AHLWEDE H.L., MEYER H. (1976). Untersuchungen über eine spezifische Vitamin A-unabhängige Wirkung des β -Carotenes auf die Fertilität des Rindes 2. Mitt. Weitere klinische Befunde und Besamungsergebnisse. *Dtsch Tierärztl Wochenschr*, 83(353). Cité par FRYE T.M., WILLIAMS S.N., GRAHAM T.W. (1991). Vitamin Deficiencies in Cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 7(1), pp. 217-275. [https://doi.org/10.1016/S0749-0720\(15\)30817-3](https://doi.org/10.1016/S0749-0720(15)30817-3)

LOTTHAMMER K.H., MEYER H., AHLWEDE H.L. (1975). Untersuchungen über eine spezifische Vitamin A-unabhängige Wirkung des β -Carotins auf die Fertilität des Rindes. 1. Mitt. : Versuchsanstellung, Körperentwicklung und Eierstocksfunktion. *Dtsch. Tierärztl. Wochenschr*, 82(444). Cité par HEMKEN R.W., BREMEL D.H. (1982). Possible Role of Beta-Carotene in Improving Fertility in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*, 65(7), pp. 1069-1073. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(82\)82314-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(82)82314-X)

LOTTHAMMER K.H., SCHAMS D., HORMANN B., AHLWEDE H.L. (1977). Untersuchungen über eine spezifische Vitamin A-unabhängige Wirkung des β -Carotins auf die Fertilität des Rindes 4. Mitt. : Auswirkung auf hormonale Parameter. *Dtsch. Tierärztl. Wochenschr*, 84(307). Cité par HEMKEN R.W., BREMEL D.H. (1982). Possible Role of Beta-Carotene in Improving Fertility in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*, 65(7), pp. 1069-1073. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(82\)82314-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(82)82314-X)

LOTTHAMMER K.H., SCHAMS D., SCHOLZ H. (1978). Untersuchungen über eine spezifische Vitamin A-unabhängige Wirkung des β -Carotins auf die Fruchtbarkeit von laktierenden Kühen. *Zuchthygiene*, 13(76). Cité par HEMKEN R.W., BREMEL D.H. (1982). Possible Role of Beta-Carotene in Improving Fertility in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*, 65(7), pp. 1069-1073. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(82\)82314-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(82)82314-X)

LYONS S.E., SHAEFFER A.D., DREWOSKI M.E., POORE M.H., POOLE D.H. (2016). Effect of protein supplementation and forage allowance on the growth and reproduction of beef heifers grazing stockpiled tall fescue1. *Journal of Animal Science*, 94(4), pp. 1677-1688. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9969>

MACKEY D.R., SREENAN J.M., ROCHE J.F., DISKIN M.G. (1999). Effect of Acute Nutritional Restriction on Incidence of Anovulation and Periovarian Estradiol and Gonadotropin Concentrations in Beef Heifers. *Biology of Reproduction*, 61(6), pp. 1601-1607. <https://doi.org/10.1095/biolreprod61.6.1601>

MACKEY D.R., WYLIE A.R., SREENAN J.M., ROCHE J.F., DISKIN M.G. (2000). The effect of acute nutritional change on follicle wave turnover, gonadotropin, and steroid concentration in beef heifers. *Journal of Animal Science*, 78(2), pp. 429-442. <https://doi.org/10.2527/2000.782429x>

MAQUIVAR M.G., GALINA C.S., GALINDO J.R., ESTRADA S., MOLINA R., MENDOZA M.G. (2010). Effect of protein supplementation on reproductive and productive performance in *Bos indicus* \times *Bos taurus* heifers raised in the humid tropics of Costa Rica. *Tropical Animal Health and Production*, 42(4), pp. 555-560. <https://doi.org/10.1007/s11250-009-9470-0>

MAQUIVAR M., GALINA C.S., VERDUZCO A., GALINDO J., MOLINA R., ESTRADA S., MENDOZA M.G. (2006). Reproductive response in supplemented heifers in the humid tropics of Costa Rica. *Animal Reproduction Science*, 93(1-2), pp. 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2005.05.033>

MAYA-SORIANO M.J., TABERNER E., LOPEZ-BEJAR M. (2013). Retinol improves in vitro oocyte nuclear maturation under heat stress in heifers. *Zygote*, 21(4), pp. 377-384. <https://doi.org/10.1017/S0967199412000135>

McDONALD P., EDWARDS R.A., GREENHALGH J.F.D., MORGAN C.A., SINCLAIR L.A., WILKINSON R.G. (2022). *Animal nutrition*. Eighth edition. Pearson : Harlow, 736 p.

McDOWELL L.R. (2000). *Vitamins in animal and human nutrition*. Second edition. Iowa State University Press : Ames, 793 p.

MESCHY F. (2007). Alimentation minérale et vitaminique des ruminants : Actualisation des connaissances. *INRA Productions Animales*, 20(2), pp. 119-128.

- MESCHY F. (2017). *Nutrition minérale des ruminants : Nouvelle édition*. Quae : Versailles, 208 p.
- MESCHY F., RAMIREZ-PEREZ A.H. (2005). Evolutions récentes des recommandations d'apports en phosphore pour les ruminants. *INRA Productions Animales*, 18(3), pp. 175-182.
- MORAN C., QUIRKE J.F., ROCHE J.F. (1989). Puberty in heifers : A Review. *Animal Reproduction Science*, 18(1-3), pp. 167-182. [https://doi.org/10.1016/0378-4320\(89\)90019-5](https://doi.org/10.1016/0378-4320(89)90019-5)
- MORIEL P., PALMER E., VEDOVATTO M., PICCOLO M.B., RANCHES J., MARCELO SILVA H., MERCADANTE V.R.G., LAMB G.C., VENDRAMINI J.M.B. (2020). Supplementation frequency and amount modulate postweaning growth and reproductive performance of Bos indicus-influenced beef heifers. *Journal of Animal Science*, 98(8), pp. 1-11. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa236>
- MURPHY M.G., ENRIGHT W.J., CROWE M.A., McCONNELL K., SPICER L.J., BOLAND M.P., ROCHE J.F. (1991). Effect of dietary intake on pattern of growth of dominant follicles during the oestrous cycle in beef heifers. *Reproduction*, 92(2), pp. 333-338. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.0920333>
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. (2000). *Nutrient Requirements of Beef Cattle : Seventh Revised Edition: Update 2000*. National Academies Press : Washington, 248 p.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. (2001). *Nutrient Requirements of Dairy Cattle : Seventh Revised Edition, 2001*. National Academies Press : Washington, 405 p.
- NOAKES D.E., PARKINSON T.J., ENGLAND G.C.W. (2019). *Veterinary reproduction and obstetrics*. Tenth edition. Saunders Elsevier : Edinburgh, 950 p.
- NOLAN R., O'CALLAGHAN D., DUBY R.T., LONERGAN P., BOLAND M.P. (1998). The influence of short-term nutrient changes on follicle growth and embryo production following superovulation in beef heifers. *Theriogenology*, 50(8), pp. 1263-1274. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(98\)00225-8](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(98)00225-8)
- PATTERSON D.J., PERRY R.C., KIRACOFÉ G.H., BELLOWS R.A., STAIGMILLER R.B., CORAH L.R. (1992). Management considerations in heifer development and puberty. *Journal of Animal Science*, 70(12), pp. 4018-4035. <https://doi.org/10.2527/1992.70124018x>
- PECCATTE J.R., MICHEL G., DELABY L., TROCÇON J.L. Influence du profil de croissance autour de la période d'insémination sur la fertilité des génisses laitières de race Holstein et Normande conduites en vêlage 3 ans. In : INSTITUT DE L'ELEVAGE et INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (2006). *13eme Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, 6-7 décembre 2006, Paris*. 476 p.
- PERREAU J.-M. (2021) *Conduire son troupeau de vaches laitières*. 2e édition. Éditions France agricole : Paris, 592 p.
- PERRY G.A., LARIMORE E.L., PERRY B.L., WALKER J.A. (2015). Grazing behavior of drylot-developed beef heifers and the influence of postinsemination supplementation on artificial-insemination pregnancy success. *The Professional Animal Scientist*, 31(3), pp. 264-269. <https://doi.org/10.15232/pas.2014-01374>
- PERRY G.A., PERKINS S.D., NORTHROP E.J., RICH J.J.J., EPPERSON K.M., ANDREWS T.N., KLINE A.C., QUAIL L.K., WALKER J.A., WRIGHT C.L., RUSSELL J.R. (2021). Impact of trace mineral source on beef replacement heifer growth, reproductive development, and biomarkers of maternal recognition of pregnancy and embryo survival. *Journal of Animal Science*, 99(7), pp. 1-8. <https://doi.org/10.1093/jas/skab160>

- PERRY G.A., PERKINS S., NORTHROP E., RICH J., EPPERSON K., MAYES S., WRIGHT C., RUSSELL J. (2019). Effect of trace mineral source on heifer reproductive performance. *Journal of Animal Science*, 97(Supplement_3), pp. 145. <https://doi.org/10.1093/jas/skz258.297>
- PERRY G.A., PERRY B.L., WALKER J.A. (2016). Postinsemination diet change on reproductive performance in beef heifers. *The Professional Animal Scientist*, 32(3), pp. 316-321. <https://doi.org/10.15232/pas.2015-01474>
- PERRY G.A., PERRY B.L., WALKER J.A., WRIGHT C.L., SALVERSON R.R., PATTERSON H.H. (2013). Evaluation of prior grazing experience on reproductive performance in beef heifers. *The Professional Animal Scientist*, 29(6), pp. 595-600. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)30290-4](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)30290-4)
- PONTER A.A., ARNAULT J., GUELOU K., PONCHON S., GONZALES C., GRIMARD B., HUMBLLOT P. Effet de la nature des acides gras alimentaires (acide α -linoléique ou acide linoléique) sur le nombre et la qualité des ovocytes collectés par Ovum Pick-Up et sur la production d'embryons chez la génisse laitière. In : INSTITUT DE L'ELEVAGE et INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (2006). *13eme Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, 6-7 décembre 2006, Paris*. 476 p.
- PONTER A.A., GUYADER-JOLY C., NUTTINCK F., GRIMARD B., HUMBLLOT P. (2012). Oocyte and embryo production and quality after OPU-IVF in dairy heifers given diets varying in their n-6/n-3 fatty acid ratio. *Theriogenology*, 78(3), pp. 632-645. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2012.03.009>
- RHODES F.M., ENTWISTLE K.W., KINDER J.E. (1996). Changes in Ovarian Function and Gonadotropin Secretion Preceding the Onset of Nutritionally Induced Anestrus in *Bos indicus* Heifers. *Biology of Reproduction*, 55(6), pp. 1437-1443. <https://doi.org/10.1095/biolreprod55.6.1437>
- RHODES F.M., FITZPATRICK L.A., ENTWISTLE K.W., DE'ATH G. (1995). Sequential changes in ovarian follicular dynamics in *Bos indicus* heifers before and after nutritional anoestrus. *Reproduction*, 104(1), pp. 41-49. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.1040041>
- RISCO C.A., MELENDEZ P. (2011). *Dairy production medicine*. Wiley-Blackwell : Ames, 363 p.
- ROOKE J.A., AINSLIE A., WATT R.G., ALINK F.M., McEVOY T.G., SINCLAIR K.D., GARNSWORTHY P.C., WEBB R. (2009). Dietary carbohydrates and amino acids influence oocyte quality in dairy heifers. *Reproduction, Fertility and Development*, 21(3), pp. 419-427. <https://doi.org/10.1071/RD08193>
- SALES J.N.S., DIAS L.M.K., VIVEIROS A.T.M., PEREIRA M.N., SOUZA J.C. (2008). Embryo production and quality of Holstein heifers and cows supplemented with β -carotene and tocopherol. *Animal Reproduction Science*, 106(1-2), pp. 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2007.04.001>
- SALES J.N.S., PEREIRA R.V.V., BICALHO R.C., BARUSELLI P.S. (2011). Effect of injectable copper, selenium, zinc and manganese on the pregnancy rate of crossbred heifers (*Bos indicus* × *Bos taurus*) synchronized for timed embryo transfer. *Livestock Science*, 142(1-3), pp. 59-62. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.06.014>
- SCHILLO K.K., HALL J.B., HILEMAN S.M. (1992). Effects of nutrition and season on the onset of puberty in the beef heifer. *Journal of Animal Science*, 70(12), pp. 3994-4005. <https://doi.org/10.2527/1992.70123994x>
- SCHOLLJEGERDES E.J., LEKATZ L.A., VONNAHME K.A. (2011). Effects of short-term oilseed supplementation on reproductive performance in beef heifers. *Canadian Journal of Animal Science*, 91(2), pp. 221-229. <https://doi.org/10.4141/cjas2010-045>

- SHARMA M.C., JOSHI C., DAS G., HUSSAIN K. (2007). Mineral nutrition and reproductive performance of the dairy animals : A review. *Indian Journal of Animal Sciences*, 77(7), pp. 599-608.
- SINCLAIR K.D., KURAN M., GEBBIE F.E., WEBB R., McEVOY T.G. (2000). Nitrogen metabolism and fertility in cattle : II. Development of oocytes recovered from heifers offered diets differing in their rate of nitrogen release in the rumen. *Journal of Animal Science*, 78(10), pp. 2670-2680. <https://doi.org/10.2527/2000.78102670x>
- SMITH O.B., AKINBAMIJO O.O. (2000). Micronutrients and reproduction in farm animals. *Animal Reproduction Science*, 60-61, 549-560. [https://doi.org/10.1016/S0378-4320\(00\)00114-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4320(00)00114-7)
- SPICER L.J., ENRIGHT W.J., MURPHY M.G., ROCHE J.F. (1991). Effect of dietary intake on concentration of insulin-like growth factor-I in plasma and follicular fluid, and ovarian function in heifers. *Domestic Animal Endocrinology*, 8(3), pp. 431-437.
- SPRINGMAN S. (2017). *Management Strategies for Beef Heifer Development*. Master of Animal Science. Lincoln : University of Nebraska, 155 p.
- SPRINGMAN S.A., DREWNOSKI M.E., FUNSTON R.N. (2021). Effects of hydroxy trace mineral supplementation on gain and reproductive performance in beef heifers. *Livestock Science*, 245, 104425. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104425>
- SPRINGMAN S.A., MADDUX J.G., DREWNOSKI M.E., FUNSTON R.N. (2018). Effects of injectable trace minerals on reproductive performance of beef heifers in adequate trace mineral status. *The Professional Animal Scientist*, 34(6), pp. 649-652. <https://doi.org/10.15232/pas.2018-01752>
- STOKES R.S., RALPH A.R., MICKNA A.J., CHAPPLE W.P., SCHROEDER A.R., IRELAND F.A., SHIKE D.W. (2017). Effect of an injectable trace mineral at the initiation of a 14 day CIDR protocol on heifer performance and reproduction1. *Translational Animal Science*, 1(4), pp. 458-466. <https://doi.org/10.2527/tas2017.0050>
- STORY C., RASBY R., BRINK D., KINDER J., MORAVEK T. (1999). Trace Mineral Supplementation and Ovarian and Luteal Function in Pubertal Heifers. *Nebraska Beef Cattle Reports*, 423, 10-11.
- SUTTLE N.F. (2010). *Mineral nutrition of livestock*. 4th edition. CABI : Cambridge, 587 p.
- THARNISH T.A., LARSON L.L. (1992). Vitamin A Supplementation of Holsteins at High Concentrations : Progesterone and Reproductive Responses. *Journal of Dairy Science*, 75(9), pp. 2375-2381. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(92\)77998-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(92)77998-3)
- TROCCON J.L. Elevage des génisses laitières et performances ultérieures. In : INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE INSTITUT DE L'ELEVAGE (1996). *3eme Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, 4-5 décembre 1996, Paris*. 330 p.
- TROCCON J.L., PETIT M. (1989). Croissance des génisses de renouvellement et performances ultérieures. *INRA Productions Animales*, 2(1), pp. 55-64. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.1989.2.1.4400>
- VANDEHAAR M.J. Alimentation, gestion et croissance des génisses laitières de remplacement. In : CENTRE DE REFERENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUEBEC (2006) *30eme Symposium sur les bovins laitiers, 7 décembre 2006, Drummondville*. 25 p.

VANDEHAAR M.J., SHARMA B.K., FOGWELL R.L. (1995). Effect of Dietary Energy Restriction on the Expression of Insulin-like Growth Factor-I in Liver and Corpus Luteum of Heifers. *Journal of Dairy Science*, 78(4), pp. 832-841. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(95\)76695-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(95)76695-4)

VAUGHAN L., POOLE D.B.R., SMITH F.H., BOLAND M.P., ROCHE J.F. (1994). Effect of Low Copper Status and Molybdenum Supplementation on Pregnancy in Beef Heifers. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 33(2), pp. 121-129. JSTOR.

VELASQUEZ-PEREIRA J., ARECHIGA C.F., McDOWELL L.R., HANSEN P.J., CHENOWETH P.J., CALHOUN M.C., RISCO C.A., BATRA T.R., WILLIAMS S.N., WILKINSON N.S. (2002). Effects of gossypol from cottonseed meal and dietary vitamin E on the reproductive characteristics of superovulated beef heifers. *Journal of Animal Science*, 80, pp. 2485-2492.

VELAZQUEZ M.A. (2011). The role of nutritional supplementation on the outcome of superovulation in cattle. *Animal Reproduction Science*, 126(1-2), pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2011.05.009>

VILLA-GODOY A., HUGHES T.L., EMERY R.S., STANISIEWSKI E.P., FOGWELL R.L. (1990). Influence of Energy Balance and Body Condition on Estrus and Estrous Cycles in Holstein Heifers. *Journal of Dairy Science*, 73(10), pp. 2759-2765. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(90\)78961-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(90)78961-8)

WANG J.Y., HAFI C.B., LARSON L.L. (1988). Endocrine responses and estrous activity in Holstein heifers fed supplemental beta-carotene. *Theriogenology*, 29(3), pp. 731-742. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(88\)80017-7](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(88)80017-7)

WANG J.Y., LARSON L.L., OWEN F.G. (1982). Effect of beta-carotene supplementation on reproductive performance of dairy heifers. *Theriogenology*, 18(4), pp. 461-473. [https://doi.org/10.1016/0093-691X\(82\)90168-6](https://doi.org/10.1016/0093-691X(82)90168-6)

WHITEHURST W.A., PATERSON J.A., HARBAC M.M., PETERSEN M.K., DUFF G.C., GEARY T.W., ZANTON G.I., WISTUBA T.J. (2014). Comparison of methionine hydroxy analogue chelated versus sulfate forms of copper, zinc, and manganese on growth performance and pregnancy rates in yearling beef replacement heifers. *The Professional Animal Scientist*, 30(1), pp. 62-67. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)30084-X](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)30084-X)

WILLMORE C.J., HALL J.B., HARRISON S., DREWNOSKI M.E. (2015). Effect of a trace mineral injection on pregnancy rate of Angus beef heifers when synchronized using the 14-day controlled internal drug-releasing insert–prostaglandin F₂ α protocol at a commercial feedlot. *The Professional Animal Scientist*, 31(6), pp. 588-592. <https://doi.org/10.15232/pas.2015-01412>

WOLTER R. (1988). Besoins vitaminiques des ruminants. *INRAE Productions Animales*, 1(5), pp. 311-318. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.1988.1.5.4466>

WU G. (2018). *Principles of animal nutrition*. CRC Press, Taylor & Francis Group : Boca Raton, 772 p.

YAAKUB H., O'CALLAGHAN D., BOLAND M.P. (1999). Effect of roughage type and concentrate supplementation on follicle numbers and in vitro fertilisation and development of oocytes recovered from beef heifers. *Animal Reproduction Science*, 55(1), pp. 1-12. [https://doi.org/10.1016/S0378-4320\(99\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S0378-4320(99)00002-0)

YOUNGQUIST R.S., THRELFALL W.R. (2007). *Current therapy in large animal theriogenology*. 2nd edition. Saunders Elsevier : Saint Louis, Mo, 1061 p.

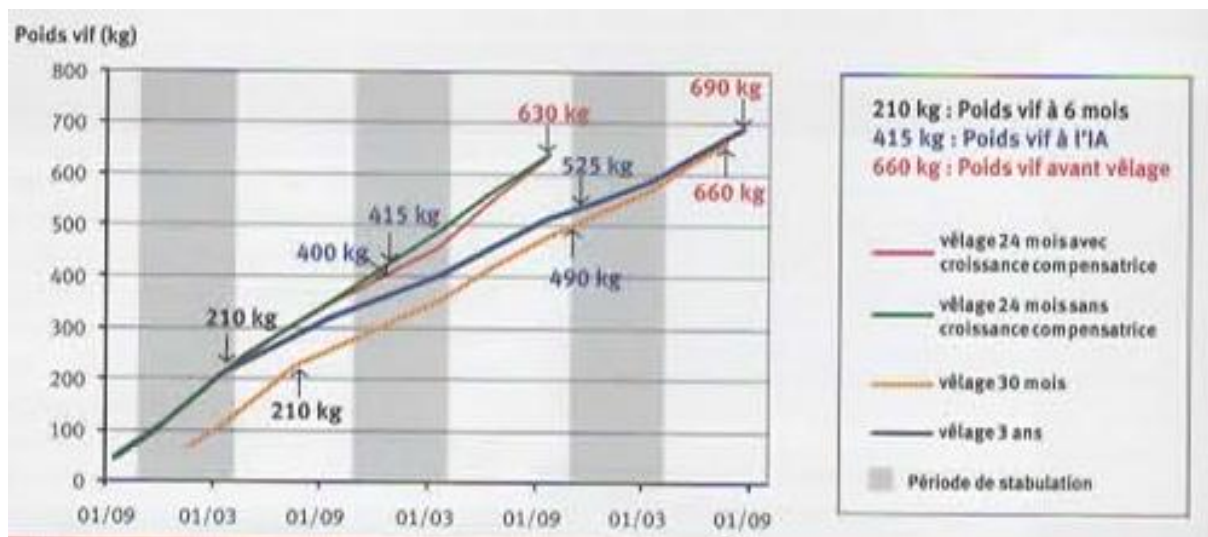
YUNG M.C., VANDEHAAR M.J., FOGWELL R.L., SHARMA B.K. (1996). Effect of energy balance and somatotropin on insulin-like growth factor I in serum and on weight and progesterone of corpus luteum in heifers. *Journal of Animal Science*, 74(9), pp. 2239-2244. <https://doi.org/10.2527/1996.7492239x>

ZANTON G.I., HEINRICHS A.J. (2005). Meta-Analysis to Assess Effect of Prepubertal Average Daily Gain of Holstein Heifers on First-Lactation Production. *Journal of Dairy Science*, 88(11), pp. 3860-3867. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)73071-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73071-X)

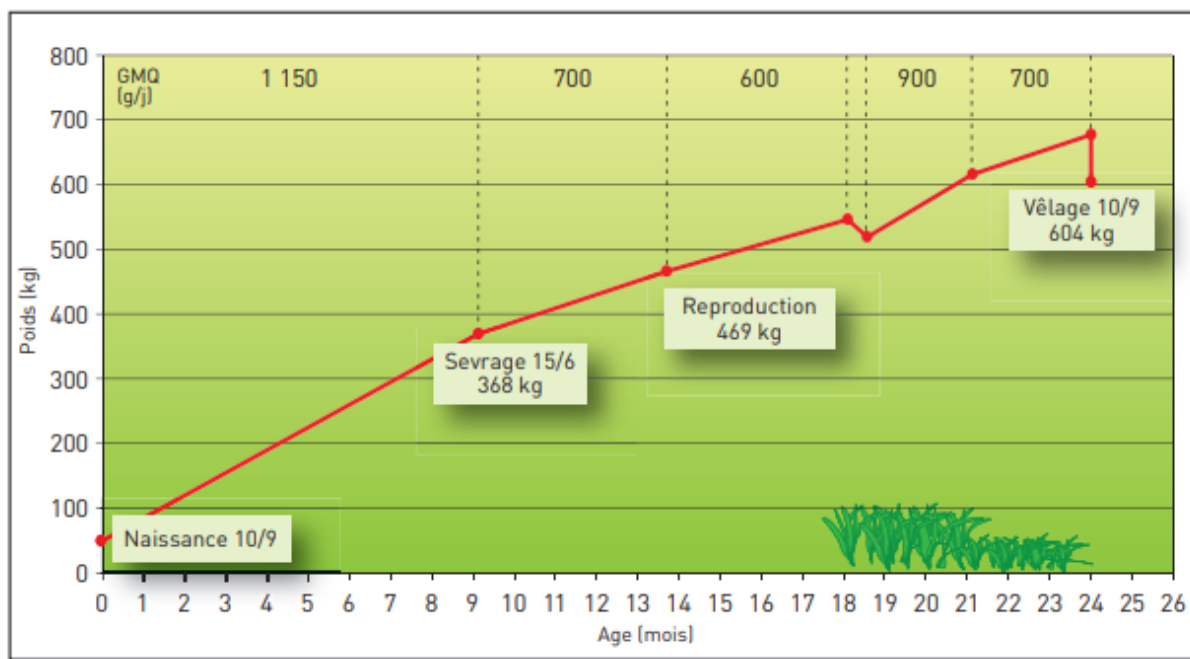
ZHOU J., ZHANG J., XUE B., YUE S., YANG C., XUE B. (2021). Effects of Premating Calcium and Phosphorus Supplementation on Reproduction Efficiency of Grazing Yak Heifers. *Animals*, 11(2), pp. 554-562. <https://doi.org/10.3390/ani11020554>

ANNEXES

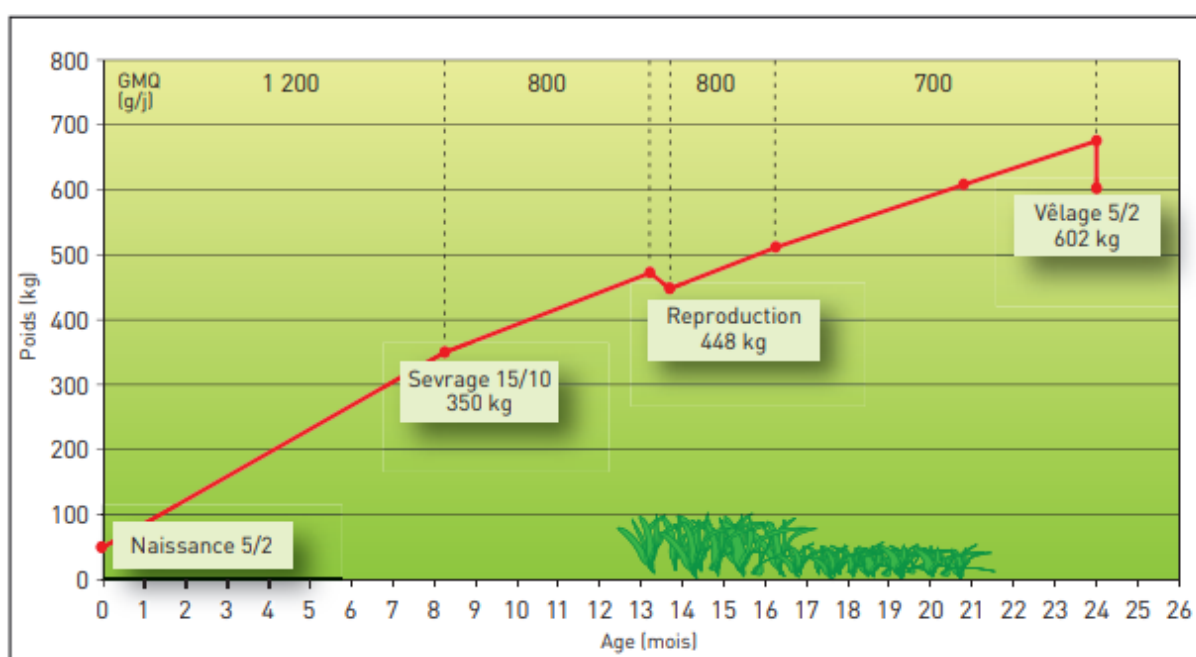
Annexe 1 : Exemple de courbes de croissance de génisses laitière (BROCARD et LECLERC, 2010)



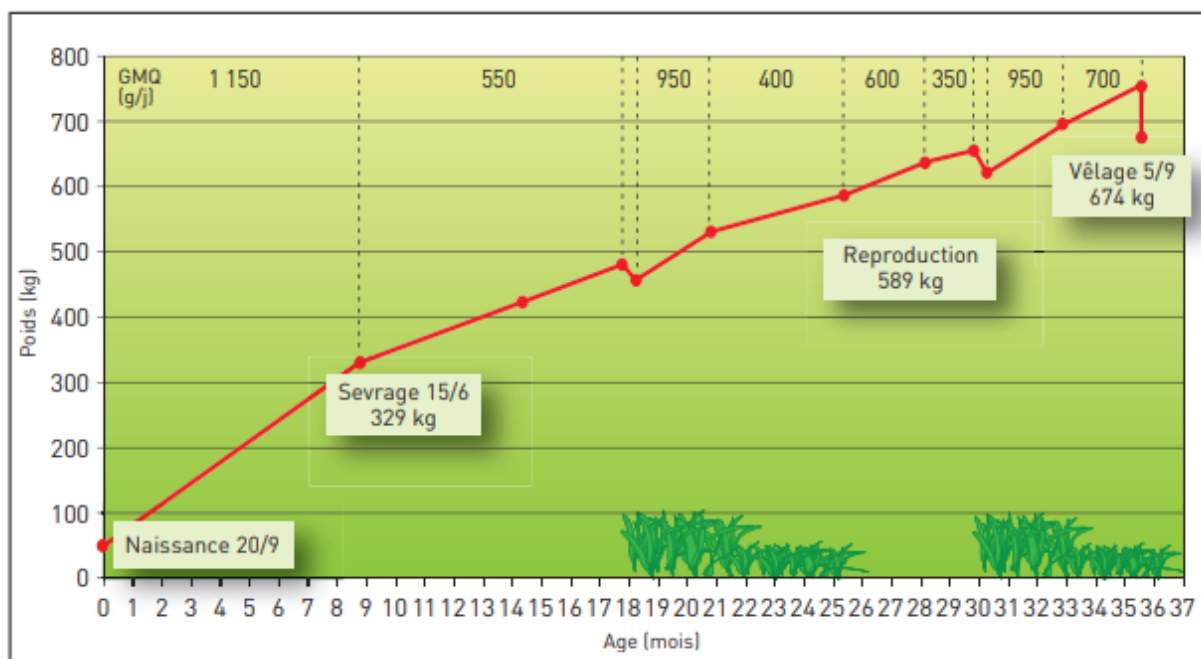
Génisse Charolaise, vêlage 24 mois à l'automne, 750 kg adulte



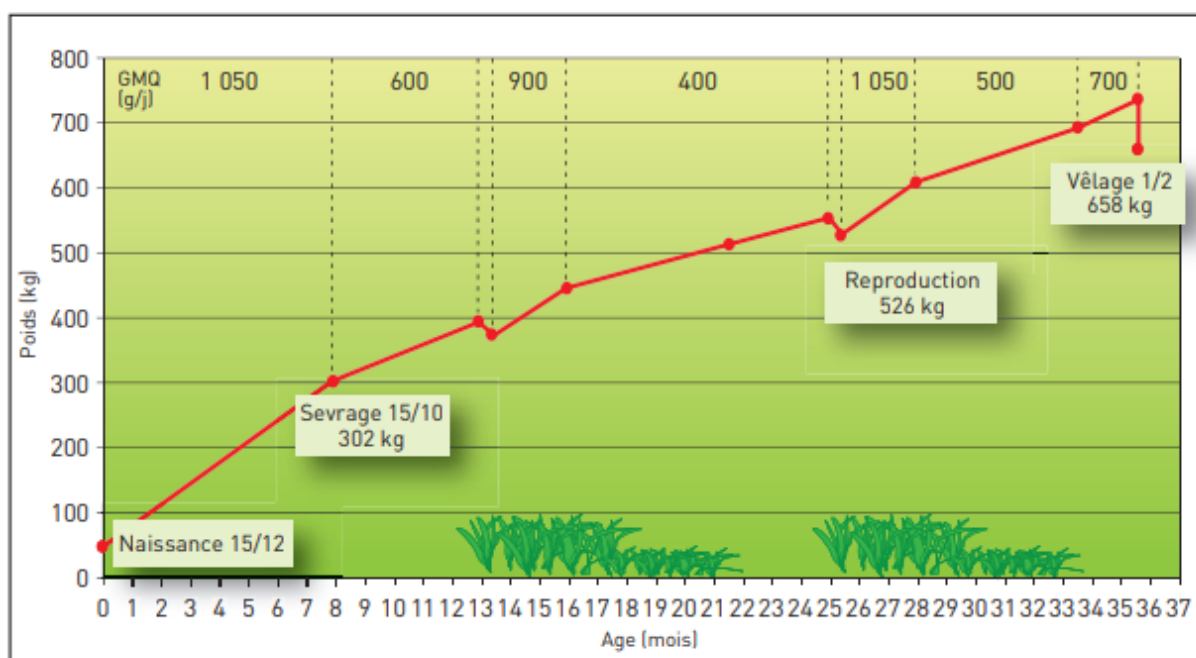
Génisse Charolaise, vêlage 24 mois en fin d'hiver, 750 kg adulte



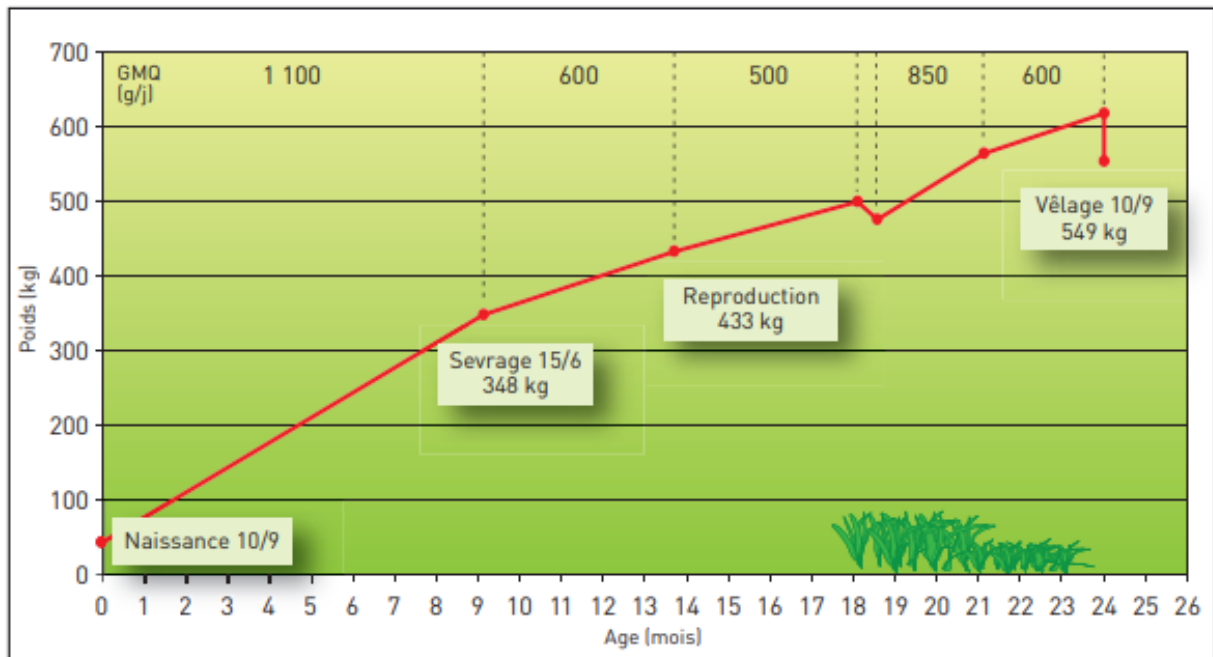
Génisse Charolaise, vêlage 36 mois à l'automne, 750 kg adulte



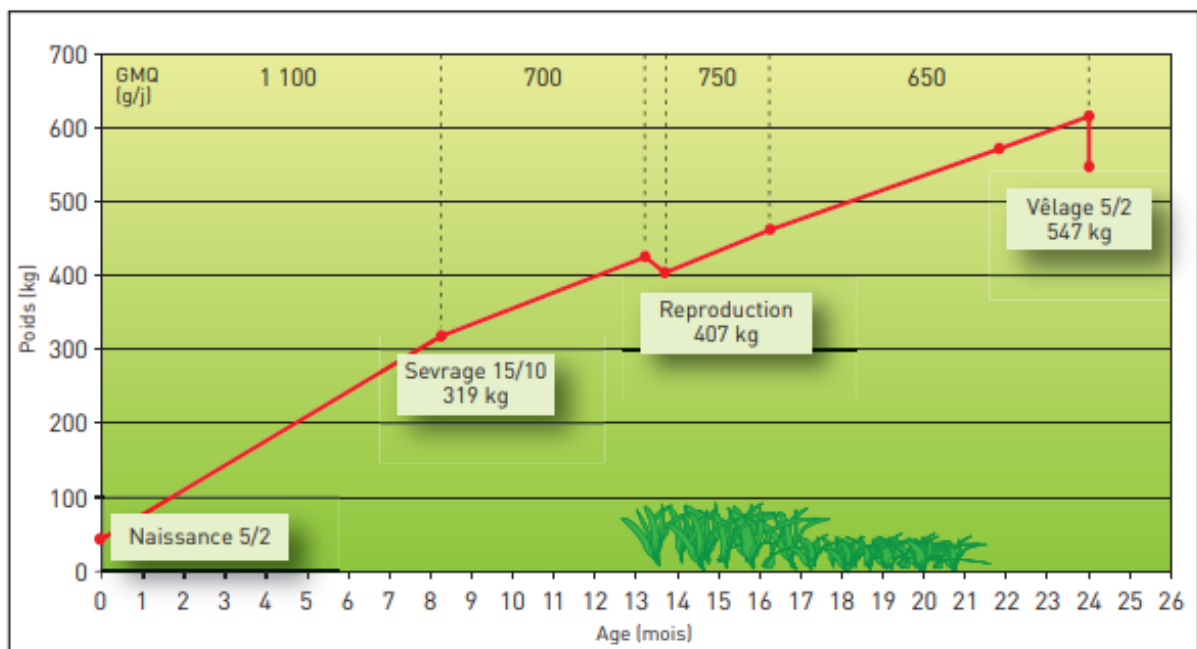
Génisse Charolaise, vêlage 36 mois en fin d'hiver, 750 kg adulte



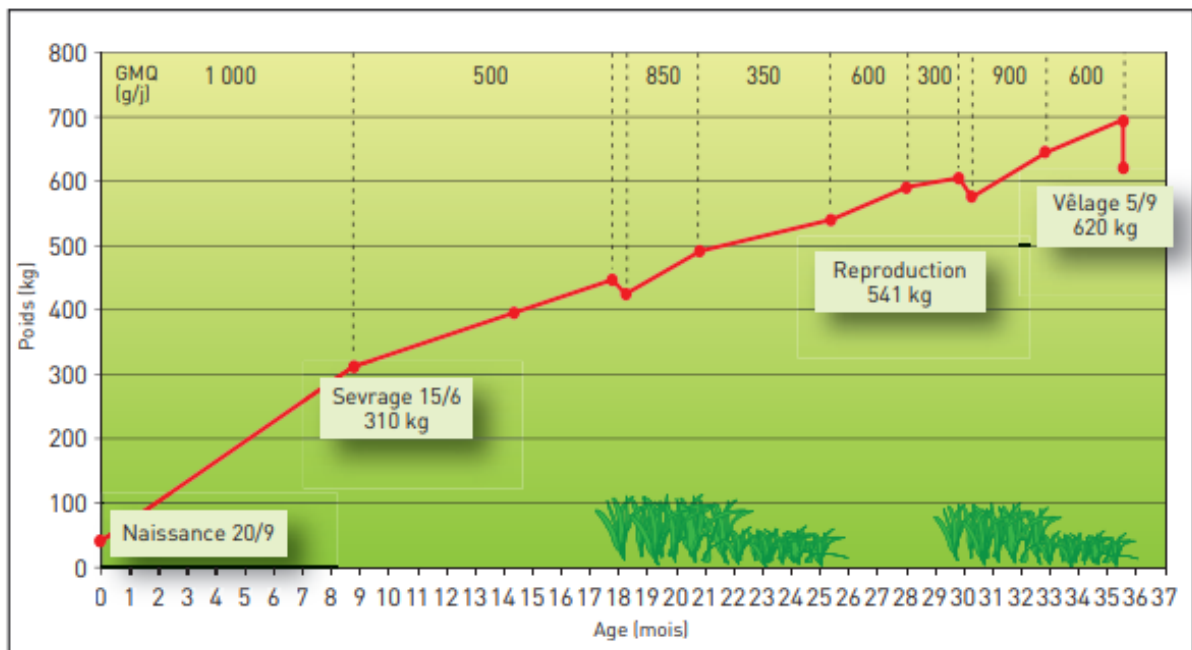
Génisse Limousine, vêlage 24 mois à l'automne, 675 kg adulte



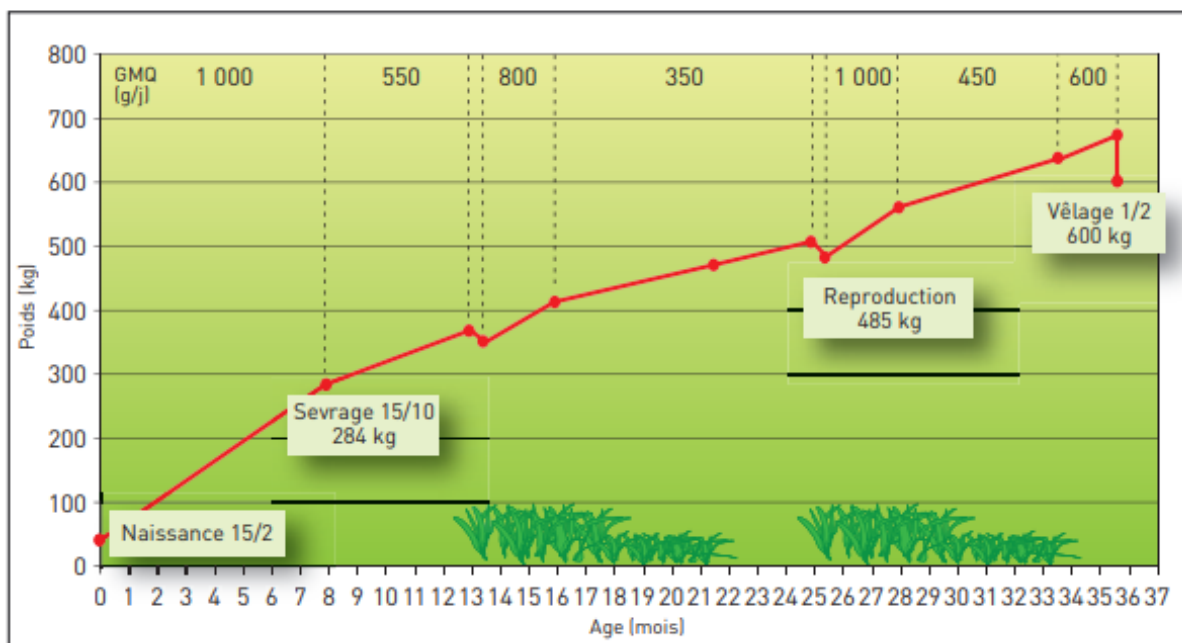
Génisse Limousine, vêlage 24 mois en fin d'hiver, 675 kg adulte



Génisse Limousine, vêlage 36 mois à l'automne, 675 kg adulte



Génisse Limousine, vêlage 36 mois en fin d'hiver, 675 kg adulte



Annexe 3 : Grille d'évaluation de la Note d'Etat Corporelle (NEC) (traduit de EDMONSON, 1989)

SCORE	Epines dorsales	Entre épines et apophyses	Apophyses transverses	Creux du flanc	hanche et ischions	Entre les hanches et PF	Entre les hanches	Pointes de la fesse (PF) et fausses caudales (FC)
1.00	En dent de scie	Creux profond	Très proéminentes, >1/2 visibles	Très marqué, émâcié	Très saillant	Creux sévère, sans graisse	Très creux	PF proéminente, FC profondes en forme de V
1.25								
1.50								
1.75	Individualisées	Creux marqué	1/2 visibles	important	Proéminent	Très creux		PF proéminente, FC en forme de U
2.00								
2.25								
2.50	En forme de crête pointue		1/2 à 1/3 visibles	modéré		thin flesh covering	Creux très visible	
2.75								
3.00		Creux légèrement marqué	1/4 visibles	léger	Lisse	creux	Creux modéré	PF arrondie, FC peu profondes
3.25								
3.50	Aplaties, non individualisées	Pente lisse	Bords distincts, apophyses non discernables	absent	Couvert	Léger creux	Creux léger	
3.75								
4.00		Presque plat	Bords lisses et arrondis		arrondie	plat	plat	PF couverte de graisse, FC en partie remplies de graisse
4.25	Couvertes de graisses, non discernables				Couvert de graisse			
4.50			Bords à peine discernables					PF couverte de graisse, FC remplies de graisse avec des plis
4.75			Couvertes de graisses	renflé		arrondie	arrondie	
5.00		Arrondi (convexe)						
	Très mauvais état (émâcié)							
	Squelette bien visible							
	Squelette et couverture équilibrés							
	Couverture dominante							
	Trop grasse							

Annexe 4 : Apports énergétiques recommandés, besoins PDI, capacité d'ingestion et DERm en fonction du poids et du GMQ pour des génisses allaitantes (INRA, 2018)

PV (kg)	GMQ (kg/j)	UFL	CI (UEB)	DER _m	EffPDI	PDI/UFL	BPR ² (g/kg MS)	MOND (g/kg MS)
300	0,4	4,04	5,9	0,68				
	0,6	4,44	5,9	0,76	0,57	88	-8 à -12	355
	0,8	4,89	5,9	0,83	0,52 à 0,60	85 à 90		330 à 370
	1,0	5,37	5,9	0,92				
350	0,2	4,12	6,7	0,61				
	0,4	4,49	6,7	0,67				
	0,6	4,92	6,7	0,73				
	0,8	5,39	6,7	0,80				
	1,0	5,91	6,7	0,88				
400	0,2	4,53	7,6	0,60				
	0,4	4,92	7,6	0,65				
	0,6	5,38	7,6	0,71	0,54	86	-11 à -17	360
	0,8	5,88	7,6	0,77	0,50 à 0,58	82 à 88		340 à 380
	1,0	6,44	7,6	0,85				
450	0,2	4,94	8,4	0,58				
	0,4	5,35	8,4	0,63				
	0,6	5,83	8,4	0,69				
	0,8	6,37	8,4	0,75				
	1,0	6,97	8,4	0,83				
500	0,2	5,33	9,3	0,57				
	0,4	5,76	9,3	0,62				
	0,6	6,28	9,3	0,68	0,49	83	-13 à -18	370
	0,8	6,86	9,3	0,74	0,44 à 0,53	77 à 85		345 à 390
	1,0	7,52	9,3	0,81				
550	0,2	5,72	10,1	0,56				
	0,4	6,18	10,1	0,61				
	0,6	6,73	10,1	0,66				
	0,8	7,36	10,1	0,73				
	1,0	8,08	10,1	0,80				
600	0,2	6,09	10,9	0,56				
	0,4	6,59	10,9	0,60				
	0,6	7,19	10,9	0,66	0,47	84	-12 à -20	376
	0,8	7,89	10,9	0,72	0,42 à 0,50	77 à 85		350 à 400
	1,0	8,67	10,9	0,79				

¹ Les besoins PDI sont exprimés en fonction des apports énergétiques recommandés (PDI/UFL). Pour chaque poids référencé, sont indiqués dans le tableau les valeurs moyennes, les minima et les maxima des besoins PDI, de l'efficacité des PDI (EffPDI), de l'objectif moyen de la balance protéique du rumen (BPR) et de la matière organique non digestible (MOND), des rations associées permettant un bilan énergétique nul. Les plages de valeurs acceptables sont ainsi indiquées en italique sous les valeurs moyennes proposées. Pour les poids intermédiaires, on réalisera une interpolation linéaire entre les valeurs affichées.

² Plage acceptable des valeurs inférieures de BPR.

Annexe 5 : Apports énergétiques recommandés, besoins PDI, capacité d'ingestion et DERm en fonction du poids et du GMQ pour des génisses laitières (INRA, 2018)

PV (kg)	GMQ (kg/j)	UFL	CI (UEB)	DERm	EFFPDI	PDI/UFL	BPR ² (g/kg MS)	MOND (g/kg MS)
150	0,6	3,0	3,6	0,83				
	0,8	3,4	3,6	0,95				
	1,0	3,8	3,6	1,08				
200	0,4	3,1	4,6	0,68				
	0,6	3,5	4,6	0,77	0,59	110	- 8 à - 12	345
	0,8	4,0	4,6	0,87	0,57 à 0,61	108 à 112		335 à 380
	1,0	4,5	4,6	0,98				
250	0,4	3,6	5,6	0,65				
	0,6	4,1	5,6	0,72				
	0,8	4,6	5,6	0,81				
	1,0	5,1	5,6	0,91				
300	0,2	3,7	6,6	0,56				
	0,4	4,1	6,6	0,62				
	0,6	4,6	6,6	0,69	0,55	105	- 10 à - 15	350
	0,8	5,2	6,6	0,78	0,53 à 0,57	100 à 110		335 à 380
	1,0	5,8	6,6	0,87				
350	0,2	4,1	7,6	0,54				
	0,4	4,6	7,6	0,60				
	0,6	5,1	7,6	0,67				
	0,8	5,7	7,6	0,75				
	1,0	6,4	7,6	0,84				
400	0,2	4,6	8,6	0,53				
	0,4	5,0	8,6	0,59				
	0,6	5,6	8,6	0,65	0,51	99	- 11 à - 17	365
	0,8	6,3	8,6	0,73	0,49 à 0,53	96 à 106		345 à 385
	1,0	7,0	8,6	0,82				
450	0,2	5,0	9,6	0,52				
	0,4	5,5	9,6	0,57				
	0,6	6,1	9,6	0,64				
	0,8	6,9	9,6	0,72				
	1,0	7,7	9,6	0,81				
500	0,2	5,4	10,5	0,51				
	0,4	5,9	10,5	0,56				
	0,6	6,6	10,5	0,63	0,45	97	- 13 à - 18	365
	0,8	7,4	10,5	0,71	0,43 à 0,47	94 à 105		345 à 390
	1,0	8,4	10,5	0,80				
550	0,2	5,8	11,5	0,50				
	0,4	6,4	11,5	0,56				
	0,6	7,1	11,5	0,62				
	0,8	8,1	11,5	0,71				
	1,0	9,2	11,5	0,80				
600	0,2	6,2	12,4	0,50				
	0,4	6,8	12,4	0,55	0,43	104	- 16 à - 22	380
	0,6	7,7	12,4	0,62	0,41 à 0,43	102 à 106		375 à 395
	0,8	8,8	12,4	0,71	0,40	85	- 10 à - 15	355
	1,0	10,0	12,4	0,81	0,38 à 0,42	85 à 90		345 à 365

¹ Les besoins PDI sont exprimés en fonction des apports énergétiques recommandés (PDI/UFL). Pour chaque poids référencé, sont indiqués dans le tableau les valeurs moyennes, les minima et les maxima des besoins PDI, de l'efficacité des PDI (EFFPDI), de l'objectif moyen de la balance protéique du rumen (BPR) et de la matière organique non digestible (MOND), des rations associées permettant un bilan énergétique nul. Les plages de valeurs acceptables sont ainsi indiquées en italique sous les valeurs moyennes proposées. Pour les poids intermédiaires, on réalisera une interpolation linéaire entre les valeurs affichées.

² Plage acceptable des valeurs inférieures de BPR

Annexe 6 : Besoins alimentaires des génisses allaitantes (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2000)

Wt @ Small marbling		533 kg					
Weight range		200-450 kg					
ADG range		0.50-2.50 kg					
Breed Code		1 Angus					
Body Weight, kg		200	250	300	350	400	450
Maintenance Requirements							
NE _m	Mcal/d	4.1	4.84	5.55	6.23	6.89	7.52
MP	g/d	202	239	274	307	340	371
Ca	g/d	6	8	9	11	12	14
P	g/d	5	6	7	8	10	11
Growth Requirements (ADG)							
		<i>NE_g required for gain, Mcal/d</i>					
0.5	kg/d	1.27	1.50	1.72	1.93	2.14	2.33
1.0	kg/d	2.72	3.21	3.68	4.13	4.57	4.99
1.5	kg/d	4.24	5.01	5.74	6.45	7.13	7.79
2.0	kg/d	5.81	6.87	7.88	8.84	9.77	10.68
2.5	kg/d	7.42	8.78	10.06	11.29	12.48	13.64
		<i>MP required for gain, g/d</i>					
0.5	kg/d	154	155	158	157	145	133
1.0	kg/d	299	300	303	298	272	246
1.5	kg/d	441	440	442	432	391	352
2.0	kg/d	580	577	577	561	505	451
2.5	kg/d	718	712	710	687	616	547
		<i>Calcium required for gain, g/d</i>					
0.5	kg/d	14	13	12	11	10	9
1.0	kg/d	27	25	23	21	19	17
1.5	kg/d	39	36	33	30	27	25
2.0	kg/d	52	47	43	39	35	32
2.5	kg/d	64	59	53	48	43	38
		<i>Phosphorus required for gain, g/d</i>					
0.5	kg/d	6	5	5	4	4	4
1.0	kg/d	11	10	9	8	8	7
1.5	kg/d	16	15	13	12	11	10
2.0	kg/d	21	19	18	16	14	13
2.5	kg/d	26	24	22	19	17	15

Annexe 7 : Besoins alimentaires des génisses laitières (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2001)

BW kg	ADG kg/d	DMI kg/d	TDN %	NE _m Mcal/d	NE _c Mcal/d	ME Mcal/d	RDP g/d	RUP g/d	RDP %	RUP %	CP ^a %	Ca g/d	P g/d
100	0.3	3.0	56.5	2.64	0.47	6.0	255	110	8.6	3.7	12.4	14	7
	0.4	3.0	58.6	2.64	0.64	6.4	270	143	9.0	4.7	13.7	18	8
	0.5	3.1	60.7	2.64	0.82	6.7	284	175	9.3	5.7	15.0	21	10
	0.6	3.1	62.9	2.64	1.00	7.0	298	207	9.6	6.7	16.3	25	11
	0.7	3.1	65.2	2.64	1.19	7.3	310	239	10.0	7.7	17.7	28	12
	0.8	3.1	67.7	2.64	1.37	7.6	323	270	10.4	8.7	19.0	31	13
150	0.3	4.0	56.5	3.57	0.63	8.2	346	95	8.6	2.4	11.0	15	8
	0.4	4.1	58.6	3.57	0.87	8.7	366	124	9.0	3.0	12.0	19	10
	0.5	4.1	60.7	3.57	1.11	9.1	385	152	9.3	3.7	12.9	22	11
	0.6	4.2	62.9	3.57	1.36	9.5	403	180	9.6	4.3	13.9	25	12
	0.7	4.2	65.3	3.57	1.61	9.9	421	207	10.0	4.9	14.9	28	13
	0.8	4.2	67.7	3.57	1.86	10.3	437	234	10.4	5.5	15.9	31	14
200	0.3	5.0	56.5	4.44	0.79	10.2	429	81	8.6	1.6	10.3	17	10
	0.4	5.1	58.6	4.44	1.08	10.7	454	106	9.0	2.1	11.1	20	11
	0.5	5.1	60.7	4.44	1.38	11.3	478	131	9.3	2.6	11.8	23	12
	0.6	5.2	62.9	4.44	1.68	11.8	500	156	9.6	3.0	12.6	26	13
	0.7	5.2	65.3	4.44	1.99	12.3	522	179	10.0	3.4	13.4	29	14
	0.8	5.2	67.7	4.44	2.31	12.8	543	202	10.4	3.9	14.2	32	15
250	0.3	5.9	56.5	5.24	0.93	12.0	508	69	8.6	1.2	9.8	19	11
	0.4	6.0	58.6	5.24	1.28	12.7	537	91	9.0	1.5	10.5	21	12
	0.5	6.1	60.7	5.24	1.63	13.4	565	113	9.3	1.9	11.1	24	13
	0.6	6.1	62.9	5.24	1.99	14.0	592	135	9.6	2.2	11.8	27	14
	0.7	6.2	65.3	5.24	2.36	14.6	617	155	10.0	2.5	12.5	30	15
	0.8	6.2	67.7	5.24	2.73	15.2	642	175	10.4	2.8	13.2	32	16
300	0.3	6.7	56.5	6.01	1.07	13.8	582	58	8.6	0.9	9.5	20	12
	0.4	6.9	58.6	6.01	1.46	14.6	616	79	9.0	1.1	10.1	23	13
	0.5	7.0	60.7	6.01	1.87	15.3	648	98	9.3	1.4	10.7	26	14
	0.6	7.0	62.9	6.01	2.28	16.0	678	117	9.6	1.7	11.3	28	15
	0.7	7.1	65.3	6.01	2.70	16.7	707	135	10.0	1.9	11.9	31	16
	0.8	7.1	67.7	6.01	3.13	17.4	736	151	10.4	2.1	12.5	34	17

^aCrude protein required only if ration is perfectly balanced for RDP and RUP.

BW kg	ADG kg/d	DMI kg/d	TDN %	NE _m Mcal/d	NE _c Mcal/d	ME Mcal/d	RDP g/d	RUP g/d	RDP %	RUP %	CP ^a %	Ca g/d	P g/d
150	0.5	4.1	58.4	3.57	0.84	8.6	364	167	8.9	4.1	13.0	23	11
	0.6	4.1	60.0	3.57	1.03	9.0	379	199	9.2	4.8	14.0	26	12
	0.7	4.2	61.7	3.57	1.22	9.3	393	230	9.4	5.5	14.9	30	13
	0.8	4.2	63.4	3.57	1.41	9.6	407	261	9.7	6.2	15.9	33	15
	0.9	4.2	65.3	3.57	1.61	9.9	421	292	10.0	6.9	16.9	37	16
	1.0	4.2	67.2	3.57	1.80	10.3	434	322	10.3	7.6	17.9	40	17
	1.1	4.2	69.2	3.57	2.00	10.6	446	352	10.6	8.3	18.9	43	18
200	0.5	5.1	58.4	4.44	1.05	10.7	452	148	8.9	2.9	11.9	24	12
	0.6	5.1	60.0	4.44	1.28	11.1	470	177	9.2	3.4	12.6	27	13
	0.7	5.2	61.7	4.44	1.51	11.5	488	205	9.4	4.0	13.4	30	14
	0.8	5.2	63.4	4.44	1.75	11.9	505	233	9.7	4.5	14.2	34	15
	0.9	5.2	65.3	4.44	1.99	12.3	522	260	10.0	5.0	15.0	37	17
	1.0	5.2	67.2	4.44	2.24	12.7	538	287	10.3	5.5	15.8	40	18
	1.1	5.2	69.2	4.44	2.49	13.1	554	314	10.6	6.0	16.6	43	19
250	0.5	6.0	58.4	5.24	1.24	12.6	534	131	8.9	2.2	11.1	25	13
	0.6	6.1	60.0	5.24	1.51	13.1	556	156	9.2	2.6	11.8	28	14
	0.7	6.1	61.7	5.24	1.79	13.6	577	182	9.4	3.0	12.4	31	15
	0.8	6.2	63.4	5.24	2.07	14.1	597	207	9.7	3.4	13.1	34	16
	0.9	6.2	65.3	5.24	2.36	14.6	617	232	10.0	3.7	13.7	37	17
	1.0	6.2	67.2	5.24	2.65	15.0	636	256	10.3	4.1	14.4	40	18
	1.1	6.2	69.2	5.24	2.94	15.5	655	280	10.6	4.5	15.1	43	19
300	0.5	6.9	58.4	6.01	1.42	14.5	612	114	8.9	1.7	10.6	27	14
	0.6	6.9	60.0	6.01	1.73	15.1	637	138	9.2	2.0	11.2	30	15
	0.7	7.0	61.7	6.01	2.05	15.6	661	161	9.4	2.3	11.7	33	16
	0.8	7.1	63.4	6.01	2.38	16.2	685	183	9.7	2.6	12.3	35	17
	0.9	7.1	65.3	6.01	2.70	16.7	707	205	10.0	2.9	12.9	38	18
	1.0	7.1	67.2	6.01	3.03	17.2	729	227	10.3	3.2	13.5	41	19
	1.1	7.1	69.2	6.01	3.37	17.7	751	248	10.6	3.5	14.1	44	20
350	0.5	7.7	58.4	6.75	1.59	16.2	687	99	8.9	1.3	10.2	28	15
	0.6	7.8	60.0	6.75	1.94	16.9	715	121	9.2	1.5	10.7	31	16
	0.7	7.9	61.7	6.75	2.30	17.6	742	141	9.4	1.8	11.2	34	17
	0.8	7.9	63.4	6.75	2.67	18.2	769	162	9.7	2.0	11.7	37	18
	0.9	8.0	65.3	6.75	3.03	18.8	794	181	10.0	2.3	12.3	40	19
	1.0	8.0	67.2	6.75	3.41	19.4	819	200	10.3	2.5	12.8	42	20
	1.1	8.0	69.2	6.75	3.78	19.9	843	218	10.6	2.7	13.3	45	21
400	0.5	8.5	58.4	7.46	1.76	18.0	760	86	8.9	1.0	9.9	30	16
	0.6	8.6	60.0	7.46	2.15	18.7	791	105	9.2	1.2	10.4	33	17
	0.7	8.7	61.7	7.46	2.55	19.4	821	124	9.4	1.4	10.9	35	18
	0.8	8.8	63.4	7.46	2.95	20.1	850	142	9.7	1.6	11.3	38	19
	0.9	8.8	65.3	7.46	3.35	20.7	878	159	10.0	1.8	11.8	41	20
	1.0	8.8	67.2	7.46	3.76	21.4	905	176	10.3	2.0	12.3	44	21
	1.1	8.8	69.2	7.46	4.18	22.0	931	192	10.6	2.2	12.8	46	22

^aCrude protein required only if ration is perfectly balanced for RDP and RUP.

Annexe 8 : Principales fonctions physiologiques des minéraux essentiels (INRA, 2018)

Élément	Fonctions principales
Phosphore	<ul style="list-style-type: none"> - Métabolisme osseux, fonction structurelle et métabolique - Composant du système tampon du sang, des parois cellulaires et des contenus cellulaires (phospholipides, acides nucléiques) - Impliqué dans presque toutes les transactions énergétiques basées sur la rupture ou la formation d'ATP - Requis dans le rumen pour la digestion de la cellulose (recyclage de la salive)
Calcium	<ul style="list-style-type: none"> - Métabolisme osseux, fonction structurelle et métabolique - Déclenche la contraction et la relaxation musculaire - Coagulation sanguine - Impliqué dans l'activité de nombreuses enzymes - Messenger secondaire important pour la signalisation cellulaire
Magnésium	<ul style="list-style-type: none"> - Cofacteur de nombreuses réactions enzymatiques impliquées dans toutes les voies métaboliques majeures - Mg extracellulaire vital pour la conduction nerveuse, la fonction musculaire - Composant des os et nécessaire pour la minéralisation osseuse
Potassium	<ul style="list-style-type: none"> - Impliqué dans le contrôle de la pression osmotique et la régulation acido-basique (cation intracellulaire principalement) - Activateur ou cofacteur de nombreuses réactions enzymatiques régulant le métabolisme énergétique, l'absorption cellulaire des acides aminés et la synthèse des protéines
Sodium	<ul style="list-style-type: none"> - Impliqué dans la régulation du volume de liquide extracellulaire et l'équilibre acido-basique (cation extracellulaire primaire) - Rôle indispensable dans les pompes Na-K ATPase impliquées dans la régulation de l'absorption cellulaire du glucose, des acides aminés et des phosphates et dans la sécrétion cellulaire des protons, Ca, bicarbonates, K et Cl
Chlore	<ul style="list-style-type: none"> - Impliqué avec le Na dans la régulation du volume de liquide extracellulaire et l'équilibre acido-basique (anion extracellulaire) - Principal anion des sécrétions gastriques permettant la digestion des protéines et la solubilisation des phosphates
Soufre	<ul style="list-style-type: none"> - Composant de plusieurs acides aminés (méthionine, cystéine, cystine, taurine), vitamines (thiamine et biotine) et hormones (insuline, ocytocine) - Essentiel pour assurer une synthèse protéique maximale dans le rumen - Impliqué dans tous les principaux métabolismes - Rôle particulier dans la synthèse du cartilage et des phanères

Annexe 9 : Principales fonctions physiologiques des oligoéléments (INRA, 2018)

Elément	Fonctions principales
Cobalt	Composant de la vitamine B12, impliqué dans l'activité cellulolytique ruminale
Cuivre	Composant, cofacteur ou activateur de nombreuses enzymes impliquées dans le métabolisme et le transport du fer, la synthèse de myéline, du collagène et de l'élastine (os et cartilage), le système antioxydant et l'implantation embryonnaire
Iode	Composant de l'hormone thyroïdienne (régulation de l'oxydation cellulaire, de la synthèse des protéines, métabolisme basal, du système immunitaire, thermorégulation, reproduction, développement fœtal)
Manganèse	Composant ou activateur des enzymes impliquées dans la synthèse du cartilage et de la substance fondamentale de l'os (protéine impliquée dans la structure osseuse), métabolisme glucidique et lipidique, système antioxydant, métabolisme des gonades
Sélénium	Composant de plusieurs enzymes (sélénoprotéines), comme la glutathion peroxydase (protection cellulaire contre l'accumulation de peroxyde d'hydrogène) et la désiodase (convertit T4 et T3). Autres sélénoprotéines impliquées dans les métabolismes liés au développement fœtal, à la reproduction et au système immunitaire
Zinc	Composant de nombreuses métalloenzymes qui affectent les métabolismes glucidiques, lipidiques, protéiques et celui des acides nucléiques

Annexe 10 : Principales fonctions physiologiques des vitamines (INRA, 2018)

Vitamine	Fonctions biologiques
A (rétinol)	<ul style="list-style-type: none"> - Vision - Immunité - Organogenèse et différenciation tissulaire - Intégrité cellulaire des épithélia - Reproduction
Carotènes	<ul style="list-style-type: none"> - Vision - Reproduction - Pro-vitamine A
B1 (thiamine)	<ul style="list-style-type: none"> - Métabolisme des sucres et des acides gras ramifiés
B2 (Riboflavine)	<ul style="list-style-type: none"> - Métabolisme des sucres et des acides gras - Production d'énergie
B3 (PP, Niacine)	<ul style="list-style-type: none"> - Métabolisme des sucres et des acides gras
B5 (acide pantothénique)	<ul style="list-style-type: none"> - Métabolisme des acides gras et de l'énergie
B6 (pyridoxal / pyridoxine / pyridoxamine)	<ul style="list-style-type: none"> - Métabolisme des acides aminés - Synthèse de l'hème
B8 (biotine)	<ul style="list-style-type: none"> - Transporteur de bicarbonate actif pour la carboxylation de substrats - Synthèse de glycogène et d'acides aminés
B9 (acide folique)	<ul style="list-style-type: none"> - Transporteur d'unités fonctionnelles monocarbonées pour le cycle des groupements méthyls impliqué dans la synthèse des acides nucléiques, des lipides, d'hormones, de protéines, de myéline
B12 (cobalamine)	<ul style="list-style-type: none"> - Activation des folates - Oxydation des acides aminés ramifiés, des acides gras à chaîne impaire, du propionate
C (acide ascorbique)	<ul style="list-style-type: none"> - Antioxydant hydrophile majeur - Agent réducteur participant comme cofacteur enzymatique dans l'hydroxylation du collagène, la synthèse de norépinéphrine, l'amidation d'hormones peptidiques, le métabolisme de la tyrosine
D2 et D3 (ergocalciférol et cholécalférol)	<ul style="list-style-type: none"> - Homéostasie phosphocalcique - Minéralisation osseuse - Contraction musculaire - Conduction nerveuse
E (tocophérols)	<ul style="list-style-type: none"> - Antioxydants liposolubles majeurs dont le rôle est de protéger les composants de la membrane cellulaire (AG polyinsaturés)
K1 et K2 (phylloquinone et ménaquinone)	<ul style="list-style-type: none"> - Coagulation sanguine - Régulation du cycle cellulaire

SPECIFICITES DE L'ALIMENTATION LORS DE LA MISE A LA REPRODUCTION DES GENISSES

Auteur

ROBERT Céline

Résumé

La maîtrise de la reproduction des génisses est un paramètre essentiel à la pérennité des élevages bovins. Celles-ci peuvent être mises à la reproduction une fois leur système reproducteur mature, c'est-à-dire lorsqu'elles sont pubères. Le moment de la mise à la reproduction des génisses dépend de l'âge au premier vêlage fixé par l'éleveur et des caractéristiques de la génisse (race, précocité).

L'alimentation joue un rôle déterminant dans les performances de reproduction, il est donc primordial de respecter les recommandations d'apports en énergie, protéines, minéraux et vitamines. Il est cependant possible de faire varier ces apports dans certains cas, l'essentiel étant de ne jamais induire de déficit car tout apport en deçà des recommandations entraîne des conséquences délétères sur les performances de reproduction. Dans le cas de génisses maigres, un flushing énergétique permet une amélioration des performances de reproduction. Pour les minéraux et les vitamines, il est intéressant de connaître le statut des animaux pour ces éléments afin d'ajuster au mieux les apports dans la ration. Toutefois, les travaux portant sur les génisses sont parfois limités, il n'est donc pas toujours possible de conclure quant à l'effet des variations d'apports en nutriment lors de la mise à la reproduction sur les performances des génisses.

Ce travail propose également des rations types pour les génisses laitières et allaitantes en période de reproduction selon l'âge au premier vêlage.

Mots-clés

Alimentation, Reproduction, Bovin

Jury

Président du jury : Pr **MONNEUSE Olivier**

Directeur de thèse : Dr **ALVES DE OLIVEIRA Laurent**

1er assesseur : Dr **ALVES DE OLIVEIRA Laurent**

2ème assesseur : Pr **ARCANGIOLI Marie-Anne**