

Faculté des bioingénieurs

Etude de l'impact d'une modification de l'alimentation des chèvres laitières de la ferme de la Baillerie (Belgique) dans une optique d'autonomie alimentaire

Auteur : Leleux Patricia

Promoteurs : Y. Larondelle (UCLouvain / ELI)

M. Focant (UCLouvain / Professeur émérite)

Lecteurs : V. Decruyenaere (CRA-W)

E. Froidmont (CRA-W)

Année académique 2018-2019

Bioingénieur : sciences agronomiques : Sciences, technologie et qualité
des aliments

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier le Professeur émérite Michel Focant pour son encadrement et son suivi lors de mon travail. Merci d'avoir été aussi présent et aussi réactif tout au long de l'année et ce, malgré ma maladresse. Merci du fond du cœur pour vos conseils et pour vos nombreuses relectures de mon mémoire.

Merci au Professeur Yvan Larondelle d'avoir accepté d'être mon promoteur.

Merci à Eric Froidmont et Virginie Decruyenaere d'avoir accepté de faire partie de mon jury en tant que lecteurs.

Je tiens également à remercier Christophe Col, Johanne Dupuis, Thibaut Etienne et Antonin Soreil pour m'avoir accueilli sur l'exploitation, enseigné leurs savoirs et permis de réaliser mon expérience dans les meilleures conditions possibles dans leur chèvrerie. Merci profondément pour votre aide et votre gentillesse.

Merci également à Cécile Gardin pour m'avoir aidé à mettre en place l'expérience et avoir pris part à celle-ci sur le terrain. Merci également pour son aide dans les analyses de laboratoire.

Merci à Eric Mignolet, Louise Brison et Matthias Vancoppenolle pour leur aide précieuse dans l'analyse du profil en AG.

Merci à Virginie Decruyenaere pour les analyses des fourrages avant et après l'expérience.

Merci à Frédéric Dehareng pour les analyses de la composition du lait.

Merci aux 50 goûteurs innocents qui ont pris part à mon test de dégustation.

Merci à Benjamin Vast pour être venu quelques fois m'aider sur le terrain.

Enfin, un tout grand merci à mes parents, Cécile Kaisin et Serge Leleux, à mon grand frère, Pierre Leleux, et à Françoise Kort pour m'avoir aidé jusqu'au bout à traquer les fautes d'orthographe et à corriger la structure.

Table des matières

Liste des abréviations	1
Liste des équations	3
Liste des figures	4
Liste des tableaux.....	5
Introduction	6
I. Etat de l'art	8
1.1 Elevage caprin	8
1.1.1 Elevage caprin –présentation générale	8
1.1.2 Comportement alimentaire des chèvres	8
1.2 Principe de rationnement des chèvres laitières	10
1.2.1 Ingestion.....	10
1.2.2 Besoins en énergie	12
1.2.3 Besoins en matières azotées	14
1.2.4 Besoins en vitamines, minéraux et eau	16
1.2.5 Bon fonctionnement du rumen	18
1.2.6 Périodes clés dans le cycle de production – rationnement adéquat	20
1.3 Production, composition du lait et fabrication fromagère	22
1.3.1 Caractéristiques du lait de chèvre	22
1.3.2 Production de lait : effet de la race, du stade de lactation et de la parité.....	25
1.3.3 Problèmes métaboliques	27
1.3.4 Effet de l'alimentation	28
1.3.5 Production de fromages	29
1.4 Autonomie alimentaire	31
1.4.1 Généralité	31
1.4.2 Leviers et pistes.....	33
2 Partie expérimentale	47
2.1 Objectifs	47
2.2 Pré-expérience	47
2.2.1 Matériel et méthodes	47

2.2.2	Résultats.....	47
2.2.3	Conclusion.....	49
2.3	Expérience finale.....	49
2.3.1	Matériel et méthodes.....	49
2.3.2	Résultats.....	55
2.3.3	Discussion.....	68
3	Conclusion.....	77
4	Références.....	80
5	Annexes.....	87
5.1	Annexe A : Composition et valeur nutritionnelle du concentré témoin à base de tourteau de lin expeller (SCAR).....	87
5.2	Annexe B : Composition de l'aliment minéral pour bovin (SCAR BLOC TOP).....	87
5.3	Annexe C : Mélange de semences pour prairie (Sencier 4).....	88
5.4	Annexe D : Exemple de formulaire pour un des fromages du test de dégustation.....	89
5.5	Annexe E : Exemple de plateau pour le test organoleptique des fromages.....	90

Liste des abréviations

		Unité usuelle
AA	Acide arachidonique	
AADI	Acides aminés digestibles dans l'intestin	
AG	Acide gras	
AGMI	Acide gras monoinsaturé	
AGPI	Acide gras polyinsaturé	
AGS	Acide gras saturé	
AGV	Acides gras volatils	
ALA	Acide α -linoléique	
ALC	Acide ruménique	
BEA	Bilan électrolytique alimentaire	mEq/kg MS
BesPDI	Besoin des chèvres en protéines digestibles dans l'intestin	g/j
BesUFL	Besoin des chèvres en énergie nette	UFL/j
BNTE	Laboratoire de l'UCLouvain : Biochimie de la Nutrition et Toxicologie Environnementale	
BPR	Balance protéique du rumen	
C	Concentré	
Ca _{abs}	Calcium absorbable	g/j
CB	Cellulose brute	g/kg MS
CI	Capacité d'ingestion	UEL/j
CRA-W	Centre wallon de recherche agronomique	
DCAD	Différence des cations et anions alimentaire	mEq/kg MS
DPA	Acide clupanodonique	
E	Coefficient de correction des apports énergétiques	UFL/j
EPA	Acide eicosapentaénoïque	
F	Fourrage	
F:C	Ratio Fourrage sur concentré	
GLA	Acide γ -linoléique	
HFD	Humidité du fromage dégraissé	%
IL	Index de lactation	
JEL	Jour en lactation	j
LA	Acide linoléique	

Lait STD	Lait Standard (2007 : TB = 35 g/kg, TP = 31 g/kg, lactose = 43 g/kg)	kg
LysDi	Lysine digestible dans l'intestin	% PDIE
MetDi	Méthionine digestible dans l'intestin	% PDIE
MAT	Matières azotées totales	g/kg MS
MFD	Milk Fat Depression	
MG	Matière grasse	
MS	Matière sèche	kg MS
MSI	Matière sèche totale ingérée = niveau d'ingestion	kg MSI
NDF	Teneur en paroi végétale totale	g/kg MS
P _{abs}	Phosphore absorbable	g/j
PDI	Protéines digestibles dans l'intestin	g/j
PDIE	Protéines digestibles dans l'intestin sur base de l'énergie fermentescible	g/j
PDIN	Protéines digestibles dans l'intestin sur base de l'azote fermentescible	g/j
PL	Production en lait brut	kg/j
PL _{pot}	Production laitière potentielle	kg/j
PL ₃₅	Production en lait STD (2007 : TB = 35 g/kg, TP = 31 g/kg, lactose = 43 g/kg)	kg
PV	Poids vif	kg
PV ^{0,75}	Poids métabolique	kg
PV _{ad}	Poids vif adulte attendu	kg
QI _c	Quantité de concentrés en MS ingérée	kg MSI
QI _f	Quantité de fourrage en MS ingérée	kg MSI
RDT	Rendement fromager	kg fromage/100 kg lait
Rmic	Rapport microbien	g PDI/UFL
SCC	Comptage des cellules somatiques dans le lait	1000/g lait
TB	Taux butyreux du lait	g/kg lait
TP	Taux protéique du lait	g/kg lait
UCL	Université catholique de Louvain	
UE	Unité d'encombrement	UE
UEL	Unité d'encombrement lait	UEL
UFL	Unité fourragère lait	UFL
VA	Acide <i>trans</i> -vaccénique	
VE	Valeur d'encombrement	UEL/ kg MSI

Liste des équations

Equation	Année
(1) $CI = (QI_F \times VE_F) + (QI_C \times VE_C)$	2007
(2) $QI_F = 0,31 + (0,015 \times PV) + (0,26 \times PL) - (0,65 \times QI_C)$	2007
(3) $CI = 1,17 + [0,016 \times (PV - 60)] + (0,24 \times PL_{35})$	2007
(4) $MSI = 0,23 + (0,014 \times PV) + (0,298 \times PL) + (0,26 \times MSI_{co})$	2018
(5) $BesUFL = 0,79 + [0,01 \times (PV - 60)] + (0,40 \times PL_{35})$	2007
(6) $UFL/kg \text{ lait} = 0,4 + [0,0055 \times (TB-35)] + [0,0033 \times (TP -31)]$	2007
(7) $E = 2,5 \times PL_{35} / PV$	2007
(8) $BesPDI = 50 + [0,62 \times (PV - 60)] + (45 \times PL_{35})$	2007
(9) $P_{abs} (g/j) = (0,905 \times MSI) + 0,30 + (0,002 \times PV) + (0,95 \times PL_{35})$	2007
(10) $Ca_{abs} (g/j) = (0,670 \times MSI) + (0,010 \times PV) + (1,25 \times PL_{35})$	2007
(11) $P_{abs} (g/kg \text{ de croît}) = 1,2 + (3,188 \times PV_{ad}^{0,28} \times PV^{-0,28})$	2007
(12) $Ca_{abs} (g/kg \text{ de croît}) = 6,75 \times PV_{ad}^{0,28} \times PV^{-0,28}$	2007
(13) $Rmic = (PDIN - PDIE)/UFL$	2007
(14) $RDT = (0,173 \times TB) + (0,454 \times TP) + (0,197 \times Cell) - (5,367 \times \text{urée}) + 3,23$	2017
(15) $\text{Autonomie alimentaire (\%)} = \frac{100 \times \text{aliments produits (kg)}}{\text{aliments achetés (kg)} + \text{aliments produits (kg)}}$	2016
(16) $\%MS = 100 \times \frac{(P_{sec}-T)}{P_{frais}}$	
(17) $\%MG = 100 \times \frac{MG}{P1 \times \frac{\%MS}{100}}$	
(18) $PL_{35} = (0,264 + 0,01375 \times TB + 0,00825 \times TP) \times PL$	2007

Liste des figures

Figure I.1 : Cinétique de lactation ajustée pour des chèvres primipares et multipares d'après Sauvart et Giger-Reverdin (2018)

Figure I.2 : Cinétique du TP et TB potentiels ajustés pour des chèvres primipares et multipares d'après Sauvart et Giger-Reverdin (2018)

Figure II.1 : Examen visuel des fèces récoltées entre le 18 et 20 janvier 2019 d'une des chèvres ayant consommé des graines de colza

Figure II.2 : Résultat des critères de l'analyse sensorielle des fromages issus du lait des 3 groupes

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Récapitulatif des facteurs de rationnement d'après l'Institut de l'élevage (2011)

Tableau I.2. Composition globale des laits de chèvre, vache et brebis d'après Frantz (2009), inspiré par Remeuf et al. (1989), Remeuf et al (1991), Jandal (1996) et Pellegrini (1995)

Tableau I.3 : Comparaison des niveaux d'autonomie et de la production de lait entre les différents systèmes caprins français de 2007 et 2013 d'après Bossis et al. (2016)

Tableau II.1 : Résultat de l'analyse des fèces (visuelle et MG) comparant les chèvres ayant consommé des graines de colza (Colza) aux témoins (moyenne \pm écart-type de l'échantillon)

Tableau II.2 : Composition théorique des quatre rations expérimentales (kg MS/chèvre.jour)

Tableau II.3 : Caractéristiques des chèvres (au 4 mars 2019) constituant les 3 lots finaux de l'expérience (moyenne \pm écart-type de l'échantillon) et p-valeur d'une Anova 1

Tableau II.4 : Ingestion individuelle des chèvres des 3 groupes en MS par jour (moyenne de 5 jours \pm écart-type de l'échantillon)

Tableau II.5 : Valeurs nutritionnelles des aliments composant les rations par kg MS. Les données en gras et en italique proviennent des analyses NIR réalisées au CRA-W ; les autres proviennent des tables alimentaires de l'INRA (2007) ou, pour l'OEB, du Tabellenboek Veevoeding (2016)

Tableau II.6 : Valeurs nutritionnelles des rations ingérées par kg MS et par jour par chèvre

Tableau II.7 : Production et composition journalières du lait produit (moyenne \pm écart-type de l'échantillon)

Tableau II.8 : Profil en AG du lait en % AG dosés

Tableau II.9 : Composition du lait récolté le mercredi matin destiné à la fabrication fromagère, MS des fromages et rendement fromager en kg et en kg MS/100 kg de lait

Tableau II.10 : Résultats du test sensoriel des fromages (moyenne \pm écart-type de l'échantillon, n=50)

Tableau II.11 : Evolution du poids en kg des chèvres entre le 4 mars et le 13 avril

Introduction

En Belgique, la production de lait de chèvre a augmenté ces dernières années, passant de 8,981 millions de litres collectés en 2013 à plus de 32,905 millions de litres en 2017. Cependant, que ce soit en Belgique ou ailleurs dans le monde, l'élevage caprin laitier reste un secteur beaucoup moins important que le secteur bovin laitier. Même si les quantités produites augmentent, les quantités de lait de chèvre collectées restent bien inférieures aux 3,9 milliards de litres de lait de vache collectés en Belgique en 2017 (STATBEL, 2018b, 2018a). Ce secteur est donc encore relativement anecdotique mais il est très intéressant car il n'est pas saturé et qu'il y a encore de la place pour y investir en Wallonie. Selon Filagri (2018), en 2015, la Belgique ne produisait que 58% du lait de chèvre qu'elle consommait. Or, cette consommation augmente tous les ans. La production wallonne de lait de chèvre est aussi moindre que dans les pays limitrophes : elle atteignait, en 2015, 2 L de lait/habitant contre 9,1 L lait/habitant en France et 15,9 L/an aux Pays-Bas.

Le Collège des Producteurs (Filagri, 2018) estime qu'il y avait environ 16 364 chèvres en Wallonie en 2015. Bon nombre de ces chèvres sont détenues à titre de hobby, dans des exploitations contenant moins de 10 chèvres. Un temps plein dans l'élevage caprin en Belgique équivaut à environ 400 chèvres dans les exploitations spécialisées dans la production et la commercialisation du lait brut ou à environ 50 chèvres dans des exploitations produisant et transformant le lait produit en fromage. En 2015, 108 producteurs de lait professionnels répartis dans 63 exploitations s'occupaient d'environ 8700 chèvres adultes destinées à la production de lait. Parmi ces exploitations, 9 élevages orientés vers la production laitière produisaient 80% du lait de chèvre total wallon. Les 20% restants étaient produits dans les 54 autres exploitations wallonnes dites « fromagères », transformant elles-mêmes leur production laitière et commercialisant leurs produits.

La ferme de la Baillerie est une exploitation caprine fromagère située à Genappe. Elle a été reprise en 2007 par Christophe Col et Johanne Dupuis, deux bio-ingénieurs néo-ruraux. A la tête d'un cheptel d'environ cent-vingt chèvres, ils prônent des valeurs d'agriculture durable et de production raisonnée. Par envie de respecter l'environnement, d'être rentable et de promouvoir des fromages de qualité au lait cru, ils aimeraient être le plus autonome possible au niveau de l'alimentation de leurs chèvres et de la distribution de leurs productions. La problématique de l'autonomie alimentaire est une préoccupation grandissante pour de nombreux éleveurs. Parmi les coûts de production, l'alimentation est un des postes que l'éleveur peut le plus influencer. Si l'autonomie alimentaire réduit le coût d'achat des aliments, elle peut augmenter les frais de travail et de mécanisation. En accord avec leurs principes, les objectifs de ce travail sont doubles : proposer une ration qui est en autonomie alimentaire complète et qui est équilibrée. Ce mémoire est basé principalement sur des fiches

pratiques et des éléments déjà testés dans la littérature. Les rations ont été développées grâce au logiciel INRAtion 4.07.

Le premier objectif de ce travail est de répondre au souhait des éleveurs de la ferme de la Baillerie de pouvoir produire toute l'alimentation de leurs chèvres sur leurs terres. Actuellement, ils produisent du foin de prairie et des grains de maïs, distribués toute l'année, et des betteraves fourragères, distribuées uniquement en hiver. En été, les chèvres sont affouragées en vert grâce à leurs prairies. En hiver, les rations reposent sur un ensilage d'herbe préfanée récoltée sur leurs terres pendant l'été et enrubannée pour la préserver au mieux. Le préfané, les betteraves, le maïs et le foin ne suffisent pas pour couvrir l'entièreté des besoins des chèvres en hiver. Ainsi, ils complètent cette ration avec un aliment concentré à base de tourteau de lin, de drêche et de luzerne qu'ils doivent acheter. Une partie importante de ce mémoire a concerné la recherche d'aliments, pouvant être produits sur l'exploitation, qui pourraient remplacer ces aliments composés du commerce qu'ils achètent afin d'atteindre l'autonomie alimentaire.

Le deuxième objectif est de proposer des rations optimisées afin de produire une quantité maximale de lait par chèvre. Les objectifs de production, par chèvre, à la ferme de la Baillerie sont de 3 L de lait/j en moyenne sur toute la lactation et de 3,5 L/j au début de la lactation. La version 4.07 du logiciel « INRAtion » a été utilisée pour constituer les rations de l'expérience pour équilibrer au mieux les apports en énergie et en protéines.

Si les tourteaux de soja restent un choix attrayant pour les éleveurs comme sources de protéines de haute qualité à bas prix, des alternatives plus locales d'aliments riches en énergie ou en protéines existent. Ce mémoire s'intéresse particulièrement à trois d'entre elles : les cultures de protéagineux, les méteils grain et les graines de colza.

L'expérience finale a été menée sur des chèvres à environ 50 jours de lactation. Les chèvres ont été séparées en quatre groupes homogènes afin de comparer la ration habituellement distribuée à la Baillerie, ration « Témoin » contenant comme concentrés du maïs et le concentré commercial à base de tourteau de lin, avec trois rations réalisables en autonomie alimentaire. Dans la première ration expérimentale, tous les concentrés ont été remplacés par un méteil grain, à base de froment et de pois. Dans les deux autres rations, seul le concentré commercial a été remplacé. La seconde ration contenait des graines de colza entières et la dernière des tourteaux de colza fermiers. L'expérience a duré cinq semaines. L'ingestion, la production laitière, la composition du lait, le rendement fromager et la qualité organoleptique des fromages ont été mesurés, analysés et comparés.

I. Etat de l'art

1.1 Elevage caprin

1.1.1 Elevage caprin –présentation générale

L'élevage caprin est en expansion partout dans le monde. Entre 1993 et 2013, le nombre mondial de chèvres a grimpé de 611 millions de têtes à 976 millions, soit une croissance de 59,7%, alors que la population mondiale n'a augmenté que de 28,4%. Cette augmentation a principalement eu lieu en Afrique et en Asie qui regroupaient respectivement 35,66% et 58,50% du cheptel mondial en 2013 alors que l'Europe n'en possédait que 1,64%. L'élevage caprin ne se limite pas à la production laitière. Dans de nombreux pays, les chèvres sont aussi élevées pour leurs poils, cuir ou viande. En 2013, l'Asie était le continent produisant les plus grandes quantités de lait avec 55,71% de la production totale, loin devant les 4,8% de l'Europe. Cependant, la productivité maximale se trouvait dans la région Méditerranée avec 15% de la production mondiale de lait de chèvre pour seulement 5% du cheptel caprin mondial (Marques de Almeida et Haenlein, 2017).

Les chèvres sont capables de s'adapter à des environnements très variés. Plus de 400 races de chèvres existent mais seulement une trentaine de races sont reconnues comme laitières primaires. Parmi celles-ci, quatre sont reconnues pour leur grand rendement laitier : l'Alpine, la Saanen, la Toggenburg et la Nubian (Marques de Almeida et Haenlein, 2017). En France, la Saanen, l'Alpine et leur croisement sont les chèvres les plus recensées au contrôle laitier de 2016 avec 99,65% des lactations brutes (Dougnet, 2017).

Les modes de production sont très diversifiés dans le monde, allant du plus extensif, comme l'élevage pastoral, au plus intensif avec l'utilisation d'aliments concentrés, d'ensilages et/ou d'objets automatisés. Les pays possédant de grands troupeaux commerciaux, tels que la France, ont souvent recours aux ensilages, dont ceux de maïs (Marques de Almeida et Haenlein, 2017). Même en France, la production laitière est très diversifiée. On y retrouve des élevages très industrialisés pouvant produire près de 900 kg de lait par lactation (Park et al., 2017) mais aussi des élevages pastoraux, répondant souvent à des labels de qualité.

1.1.2 Comportement alimentaire des chèvres

Tout comme les ovins et bovins, les caprins sont des ruminants herbivores. Ils sont donc bien adaptés à la valorisation des fourrages, contrairement aux volailles ou aux suidés. Cette valorisation est rendue possible grâce à leur système digestif particulier comprenant un rumen, pré-estomac où ont lieu des nombreuses fermentations, pouvant atteindre 8 à 20% du poids vif (PV) de la chèvre. Sa taille est un facteur limitant de la capacité d'ingestion (CI). Contrairement aux bovins, uniquement brouteurs, les caprins sont mi-brouteurs mi-

cueilleurs. Ainsi, les chèvres trient les aliments en fonction de leurs préférences alimentaires et ce, d'autant plus qu'une large gamme d'aliments est à leur disposition (Jacques, 2012).

La palatabilité des aliments dépend de plusieurs facteurs. Au niveau individuel, chaque chèvre a ses propres préférences en fonction de son histoire. Les chèvres ingèrent bien les fourrages qu'elles connaissent depuis qu'elles sont petites. En revanche, elles peuvent rechigner à manger certains aliments qui leur auraient causé une mauvaise expérience, comme une acidose sub-clinique. Au niveau des fourrages, les jeunes pousses, moins riches en parois cellulaires, sont préférées aux pousses plus âgées. Pour une légumineuse de même stade végétatif, le trèfle violet est préféré à la luzerne, elle-même préférée au trèfle blanc. Pour les graminées, le ray-grass est préféré au brome, lui-même préféré au dactyle-fétuque. Enfin, les betteraves sont plus appétentes que le colza, lui-même plus appétant que les choux. Le mode de conservation influence également la palatabilité : les fourrages verts sont préférés aux foin, eux-mêmes préférés aux ensilages sauf pour les préfanés enrubannés (Jacques, 2012).

Les chèvres reçoivent généralement 2 repas principaux par jour, distribués après les traites quand celles-ci ont lieu le matin et le soir. Le reste du temps est occupé par des repas secondaires et de la rumination. Animal curieux, la chèvre démarre généralement un nouveau repas lors de la distribution d'un nouvel aliment. Chaque repas commence par une phase d'exploration, courte lors de la distribution de la ration habituelle, pendant laquelle la chèvre analyse ce qui lui a été distribué. La chèvre entame ensuite son repas. La vitesse d'ingestion est très rapide au début, pouvant atteindre 400 g MS/h et se réduit au fil du temps jusqu'à ce que l'animal soit repu. La mastication lors d'un repas est maximale si celui-ci ne contient que des fourrages et diminue proportionnellement avec la part d'aliments concentrés dans la ration. Cette réduction de mastication est directement liée à une moindre salivation et augmente donc le risque d'acidose (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018). A la fin des repas, le tri augmente et la rumination démarre. Cette rumination est importante car elle permet de produire de la salive, de réduire la taille des particules et de les ramollir (Jacques, 2012).

La CI dépend de l'espèce, de l'âge, du poids, de la production laitière, du stade de lactation et de gestation (Jacques, 2012). Lors de maladie, d'excès de réserves corporelles, de déséquilibre nutritionnel ou d'excès de chaleur, la prise alimentaire volontaire peut être inférieure à la CI alors qu'elle augmente par de faibles températures (Sauvant et al., 2007). Les conditions d'élevage ont aussi une influence. La distribution de fourrages bien conservés, jeunes et ingestibles favorise l'ingestion. De même, une distribution modérée d'aliments concentrés, pour limiter la substitution, et un équilibre en azote fermentescible permettent aussi d'augmenter la CI. Il est également préférable d'avoir des animaux en bonne santé, de grand format, logés dans un bâtiment adapté et habitués depuis leur plus jeune âge aux fourrages grossiers. Augmenter le nombre de repas (maximum 5), retirer les refus et jouer sur la curiosité de l'animal permettent aussi de favoriser une bonne prise alimentaire (Legarto et al., 2011).

1.2 Principe de rationnement des chèvres laitières

Le calcul des rations a été réalisé à l'aide du logiciel INRAtion 4.07 (2007) pour des chèvres en début de lactation. La dernière mise à jour du système de rationnement de l'INRA est sortie en 2018 mais le logiciel associé n'était pas encore disponible lors des calculs, ne permettant pas son utilisation. Sauf contre-indication, toutes les équations proposées sont donc celles de 2007 car ce sont celles qui ont été utilisées. Les dernières modifications de l'INRA (2018) sont mentionnées mais elles n'ont pas pu être appliquées dans le calcul des rations.

Couvrir les besoins en énergie est important chez les chèvres en lactation : un défaut énergétique entraîne une mobilisation des réserves corporelles et réduit directement la production laitière, impactant négativement la persistance de lactation. Lorsque l'énergie n'est pas limitante, un manque de protéines digestibles réduit également le rendement laitier (Flamant et Morand-Fehr, 1982). Une ration trop riche en protéines par rapport à l'énergie entraîne un gaspillage de l'azote excédentaire, rejeté dans l'urine et dans le lait. L'équilibre entre protéines et énergie est ainsi intéressant économiquement pour limiter les coûts alimentaires et optimiser la production laitière mais il permet aussi de réduire l'impact sur l'environnement.

1.2.1 Ingestion

Les unités d'encombrement (UE) représentent l'aptitude d'un aliment à être ingéré grâce à ses caractéristiques propres de rassasiement métabolique et d'encombrement digestif. Ainsi, elles prennent en compte la CI, propre à l'animal, et la valeur d'encombrement (VE), spécifique à l'aliment ingéré (Delagarde et al., 2007). 1 UE équivaut à de l'herbe pâturée coupée au stade gazon lors de sa première pousse. Comme la prise volontaire d'un fourrage dépend du poids, du type d'animal et de la production, l'unité d'encombrement lait (UEL) est utilisée chez les vaches et les chèvres en lactation (Faverdin et al., 2018).

Les aliments concentrés n'ont pas de valeur d'UE fixée à priori car celle-ci résulte de la situation énergétique de la ration via la proportion d'aliments concentrés distribués et de l'UE du fourrage associé. De plus, les UEL ne sont applicables que si les fourrages sont distribués à volonté, que les refus se limitent à 15% des quantités distribuées et que la valeur énergétique de la ration est égale ou supérieure à 0,70 UFL/kg MS (Sauvant et al., 2007).

Prédire la quantité de matière sèche (MS) que l'animal va volontairement ingérer (MSI) est au cœur de la formulation d'une ration. Seulement, contrairement aux monogastriques, les fourrages sont souvent distribués à volonté chez les ruminants. Il est donc difficile de savoir précisément la quantité de fourrage réellement ingérée par l'animal et donc de déterminer la quantité des autres aliments à lui apporter pour répondre à ses besoins. On peut cependant l'estimer : lors de la distribution d'un aliment *ad libitum*, la CI en UEL/j équivaut à la somme des VE en UEL/kg MSI, multipliés par les quantités de MS ingérées (QI) en kg MSI des fourrages

(F) et des concentrés (C). La quantité de fourrages ingérée peut ainsi être déterminée (Delagarde et al., 2007). En pratique, la MSI du fourrage peut aussi s'estimer grâce au PV en kg, à la production laitière (PL) en kg de lait brut/j et à QI_c en kg MSI (Sauvant et al., 2007).

$$CI = (QI_F \times VE_F) + (QI_c + VE_c) \quad (1)$$

$$QI_F = 0,31 + (0,015 \times PV) + (0,26 \times PL) - (0,65 \times QI_c) \quad (2)$$

Tout comme la quantité de fourrage ingérée, la CI dans un bilan équilibré peut être estimée au moyen du PV en kg et de la production en lait standard (PL_{35}) en kg/j. L'état des réserves corporelles et la température extérieure influencent la prise alimentaire mais les relations précises n'ont pas encore été déterminées par l'INRA (2007). L'Institut de l'élevage (2011) estime qu'une chèvre trop grasse ou des températures ambiantes supérieures à 28°C diminuent la CI alors qu'une chèvre maigre ou des températures ambiantes froides, jusque -5°C, la favorisent.

$$CI = 1,17 + [0,016 \times (PV - 60)] + (0,24 \times PL_{35}) \quad (3)$$

La CI obtenue par l'équation (3) doit ensuite être modulée en fonction du stade physiologique de l'animal. Elle est réduite de 0,1 UEL/j au 5^e mois de gestation dû au développement du fœtus aux dépens du rumen. En début de lactation, le rumen n'a pas encore repris son volume maximal. Cet effet, combiné avec la mobilisation corporelle, la réduisent également. L'index de lactation (IL) est un correctif multiplicatif à appliquer à la CI qui prend en compte son augmentation progressive en début de lactation. La valeur de IL dépend de la semaine de lactation : il vaut respectivement 0,72, 0,85, 0,92, 0,95 et 0,98 de la 1^{re} à la 5^e semaine de lactation (Sauvant et al., 2007).

L'INRA (2018) a depuis proposé une nouvelle équation, plus précise, pour estimer la CI, tenant toujours compte des mêmes éléments. La réduction numérique de 0,1 UEL/j en fin la gestation est remplacée par un indice fonction de la prolificité et du jour de gestation. De plus, la teneur en protéines brutes de la ration l'influence désormais également car, sous une quantité seuil, un déficit en protéines dans le rumen pénalise l'ingestion.

L'ingestion de matière sèche (MSI), aussi appelée niveau d'ingestion, en kg MS, dépend des mêmes paramètres que la CI. Une chèvre de 60 kg produisant 3 kg de lait standard (lait STD) mange en moyenne 2,4 kg MS. Une augmentation de PV de 10 kg augmente la MSI d'environ 0,1 à 0,17 kg MS et une augmentation de production d'1 kg de lait brut l'augmente d'environ 0,30 à 0,40kg MS. L'ingestion de MS suit la même tendance que la CI pour la gestation et la lactation (Sauvant et al., 2007).

L'INRA (2018) a développé une nouvelle formule, pour calculer plus précisément la MSI en prenant en compte l'effet de substitution. La MSI en kg MS/j dépend du PV en kg, de PL en kg/j et de QI_c en kg MS/j lorsqu'au moins un des fourrages est distribué à volonté.

$$(2018) : MSI = 0,23 + (0,014 \times PV) + (0,298 \times PL) + (0,26 \times QI_c) \quad (4)$$

1.2.2 Besoins en énergie

Le système de l'INRA (2007) est basé sur l'apport en énergie nette. En pratique, l'unité fourragère lait (UFL) est utilisée pour calculer les besoins quotidiens en énergie d'une chèvre en lactation : 1 UFL équivaut à 1700 kcal d'énergie nette, apportée par 1 kg d'orge de référence à 87% de MS et 2700 kcal d'énergie métabolisable. Depuis 2018, l'INRA (2018) estime 1 UFL comme équivalente à 1760 kcal d'énergie nette pour le même orge de référence car les efficacités de conversion de l'énergie métabolique en énergie nette ont été revues.

Les besoins énergétiques totaux d'une chèvre (BesUFL) exprimés en UFL/j dépendent de 5 paramètres. L'équation 5 permet de les calculer en tenant compte du PV en kg et de PL₃₅ en kg/j. Cette équation doit être adaptée pour couvrir également des besoins en énergie supplémentaires pour la gestation, la croissance, la reconstitution des réserves corporelles ou l'activité physique. Le coût énergétique de la production laitière peut aussi être adapté en fonction du taux réel de matières utiles dans le lait produit. Ce taux équivaut à la somme du taux butyreux (TB) et du taux protéique (TP) du lait (Sauvant et al., 2007).

$$\text{BesUFL} = 0,79 + [0,01 \times (\text{PV} - 60)] + (0,40 \times \text{PL}_{35}) \quad (5)$$

La méthode de calcul des besoins énergétiques est similaire en 2018. Cependant, l'efficacité de conversion de l'énergie métabolique en énergie nette est désormais considérée comme différente entre la production de lait et la reconstitution des réserves corporelles, engendrant des modifications dans les différentes équations (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018).

L'équation 5 est à moduler en fonction des paramètres suivants :

1. **Les besoins d'entretien** dépendent du poids métabolique ($\text{PV}^{0,75}$). Ces besoins représentent la dépense énergétique quotidienne pour le métabolisme basal et pour le maintien des tissus cellulaires. Une chèvre de 60 kg de PV a besoin de 0,79 UFL/j. Un écart de 10 kg de PV entraîne un besoin supplémentaire de 0,1 UFL/j dans le même sens (Legarto et al., 2011). L'INRA (2018) a revu ses valeurs à la hausse : une même chèvre de 60 kg a désormais besoin de 0,88 UFL/j.

L'activité physique augmente les besoins d'entretien en fonction de son intensité. Des pâturages en zone de plaine les accroissent de 20 à 30% et des pâturages en terrain accidenté les haussent de 40 à 60%. Des méthodes plus précises pour estimer la dépense énergétique liée aux mouvements sont applicables quand on connaît précisément les déplacements (Sauvant et al., 2007). Depuis 2018, les besoins pour l'activité physique sont pris à part de ceux d'entretien. Ils fonctionnent toujours de la même façon et peuvent encore être calculés via les déplacements des animaux (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018).

2. **Les besoins de production** dépendent de la production et de la composition du lait produit. La production de 1 kg de lait STD à 43 g lactose/kg, 35 g de TB/kg et 31 g TP/kg nécessite 676,5 kcal soit environ 0,40 UFL (Legarto et al., 2011; Sauvant et al., 2007).

L'équation 6 permet de moduler le coût en énergie de la production de lait en fonction de son taux de matières utiles (Delagarde et al., 2007) :

$$\text{UFL/kg lait} = 0,4 + [0,0055 \times (\text{TB}-35)] + [0,0033 \times (\text{TP} -31)] \quad (6)$$

En 2018, la quantité de lactose du lait STD est passée à 45 g/kg. Le TP et le TB du lait STD sont les mêmes de sorte qu'1 kg de lait STD nécessite désormais 684,6 kcal ou 0,389 UFL. La valeur de 2007 était arrondie vers le haut, pouvant générer de faibles déviations dans les prévisions (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018).

3. **Les besoins de gestation** augmentent les besoins d'entretien et ne deviennent importants qu'en fin de gestation. Ils sont nuls en début de lactation. Ils sont plus importants chez les chèvres ayant une forte prolificité (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018).
4. **Les besoins pour reconstituer les réserves corporelles** : le stockage de 1 kg de PV nécessite environ 3,9 UFL alors que sa mobilisation en apporte 3,7 (Sauvant et al., 2007). L'apport d'énergie par la mobilisation corporelle a depuis été revu à la baisse par l'Institut de l'élevage (2011) à 2,6 UFL/kg. Depuis 2018, l'INRA a développé des équations pour modéliser la dynamique des réserves corporelles lors du cycle reproductif : les réserves sont mobilisées en fin de gestation et en début de lactation pour être reconstituées plus tard. Ce nouveau modèle permet de prendre directement en compte l'énergie amenée par la mobilisation des réserves énergétiques dans le calcul des rations afin de les optimiser (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018).
5. **Les besoins de croissance** sont toujours présents chez les chèvres primipares lors de leur première lactation. Pour une prise de 0,6 kg de PV/mois, un surplus énergétique de 0,08 UFL/jour est nécessaire (Legarto et al., 2011). Depuis 2018, l'INRA propose des valeurs de 0,12 et 0,06 UFL/j comme besoins supplémentaires chez les Saanen lors de la première et lors de la deuxième lactation (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018).

Les besoins calculés précédemment, en énergie nette, doivent être additionné à un coefficient de correction des apports énergétiques (E) pour calculer l'apport énergétique total que la ration doit apporter pour couvrir les besoins. E permet de prendre en compte que, chez des chèvres à haute valeur d'ingestion, des interactions digestives et métaboliques réduisent l'efficacité de conversion de l'énergie métabolisable en énergie nette. E peut être estimé au moyen de PL_{35} en kg/j et de PV en kg (Delagarde et al., 2007). Il a été supprimé avec la mise à jour de 2018.

$$E = 2,5 \times PL_{35} / PV \quad (7)$$

Finalement, les besoins énergétiques totaux semblent proches entre les deux versions de 2007 et de 2018. Les besoins énergétiques pour l'entretien ont été augmentés en 2018, grâce à une meilleure compréhension et considération de ces derniers, alors que ceux pour la production ont été légèrement revus à la baisse. Une grande nouveauté, non disponible en 2007, est la prise compte des mécanismes de mobilisation et de stockage d'énergie corporelle pour calibrer plus précisément les rations. Cependant, l'enjeu majeur de cette mise à jour réside surtout dans les valeurs des aliments. Le coefficient E de correction des apports

énergétiques lié aux interactions digestives est remplacé par un modèle dans lequel les fourrages ont des propriétés différentes en fonction de la composition de la ration dans laquelle ils sont incorporés et en fonction des niveaux d'alimentation et de production de l'animal en question (Cariou, 2018). Aussi, la valeur énergétique des aliments a été revue à la hausse avec une augmentation de 0,06 UFL, en moyenne, pour les fourrages et de 3,9% pour les aliments concentrés (Legarto, 2016).

1.2.3 Besoins en matières azotées

Les besoins en protéines pour l'entretien et la production sont exprimés sur base des protéines digestibles dans l'intestin (PDI) dans les systèmes de l'INRA. Les rations ont deux valeurs de PDI dans la version de 2007 : les protéines digestibles dans l'intestin sur base des protéines dégradables dans le rumen (PDIN) et les protéines digestibles dans l'intestin sur base de l'énergie fermentescible (PDIE). Une ration bien équilibrée amène des PDIE égales aux besoins en PDI et des PDIN égaux ou supérieurs. Un déficit en PDIN par rapport au PDIE signifie qu'il n'y a pas assez d'azote pour les dégradations ruminales (Delagarde et al., 2007).

L'INRA a supprimé la distinction entre PDIN et PDIE en 2018 et a proposé une nouvelle approche avec la balance protéique du rumen (BPR). La BPR compare la quantité d'azote alimentaire entrant dans le rumen avec celle qui en sort, sous forme microbienne ou alimentaire, permettant d'estimer la biodisponibilité de l'azote et son efficacité protéique. Elle remplace le rapport microbien (Rmic) qui estimait l'équilibre entre PDIN et PDIE dans le système de 2007. Idéalement, la BPR doit être nulle, ce qui équivaut à un Rmic de 4 à 8. Une BPR positive indique un gaspillage d'azote et une BPR négative une carence en azote dégradable dans le rumen. La carence peut être comblée, si elle est limitée, par le recyclage de l'azote salivaire (Bourgeois, 2018).

Les besoins en PDI (BesPDI) en g/j, dépendent du PV en kg et de PL₃₅ en kg/j. Ces besoins doivent être adaptés en cas de besoins supplémentaires pour la reconstitution des réserves corporelles et pendant la gestion (Sauvant et al., 2007). La grande nouveauté de la mise à jour de 2018 de l'INRA est la prise en compte du fait que l'efficacité de conversion protéique suit la loi des retours décroissants et peut donc varier. Alors que le système de 2007 fixait théoriquement cette efficacité à 0,64, le système de 2018 considère cette valeur variable mais a fixé 0,67 comme valeur pivot. Au plus l'alimentation est riche en protéines, au moins la conversion est efficace (Sauvant et al., 2018).

$$\text{BesPDI} = 50 + [0,62 \times (\text{PV} - 60)] + (45 \times \text{PL}_{35}) \quad (8)$$

Les besoins protéiques dépendent de quatre facteurs :

1. **Le poids vif** : une chèvre de 60 kg a besoin d'environ 50 g PDI/j pour son entretien. Un PV supérieur de 10 kg entraîne des besoins supplémentaires de 6,2 g de PDI/j (Legarto et al., 2011). Les besoins sont estimés précisément à 2,3 g PDI/ kg de PV^{0,75} (Sauvant et al., 2015). Depuis 2018, les PDI requises pour l'entretien, dépendant uniquement de PV, sont remplacées par les besoins protéiques pour des fonctions non productives. Des équations précises permettent de prendre en compte les pertes par l'azote urinaire et par le renouvellement cellulaire, dépendant principalement du PV, et les pertes d'azote dans les fèces, dépendant de l'excrétion d'enzymes endogènes. L'excrétion d'enzymes endogènes dépend du niveau et du contenu en matière organique non digestible de la ration. Au total, ces besoins ont été revus à la hausse car le système de 2007 surestime les PDI disponibles pour la production en négligeant l'accroissement des pertes non liées à la production (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018).
2. **La production laitière** : la production de 1 L de lait STD à 31 g de TP/kg nécessite 45 g PDI. En pratique, on considère que 45 g de PDI pour 1 kg de lait est utilisable peu importe le TP de celui-ci car les chèvres ayant un TP du lait élevé en raison de la caséine α_{s1} semblent plus efficaces pour convertir les protéines alimentaires en protéines laitières (Sauvant et al., 2007). Depuis 2018, les PDI requis pour 1 L de lait brut dépendent de l'efficacité de conversion protéique (Sauvant and Giger-Reverdin, 2018).
3. **La gestation** augmente les besoins d'entretien surtout lors des deux derniers mois. Ces derniers sont majorés de 60% lors du 4^e mois et de 120% lors du 5^e mois dû aux besoins utérins accrus pour une portée moyenne de 1,8 chevreaux (Legarto et al., 2011). Depuis 2018, la prolificité est aussi prise en compte car elle influence fortement l'ampleur de l'augmentation des besoins de gestation (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018).
4. **La reconstitution des réserves et la croissance** : des apports en PDI de 13 et 4 g de PDI/j en plus des autres besoins sont nécessaires respectivement chez les primipares et chez les multipares pour la croissance et pour reconstituer les réserves corporelles (Sauvant et al., 2007). Les besoins de croissance dépendent, depuis 2018, également de l'efficacité protéique. Elle est généralement moindre chez les ruminants en croissance. Les besoins sont estimés à 19,8 et à 8,6 g PDI/j chez les Saanen lors de la 1^{re} et de la 2^e lactation pour une efficacité de 0,5. L'INRA propose également un nouveau modèle simulant la mobilisation des réserves protéiques sur tout le cycle de lactation. L'ampleur cette mobilisation dépend de la quantité d'énergie amenée par la mobilisation des réserves corporelles (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018).

La lysine et la méthionine sont deux acides aminés généralement limitants dans la synthèse protéique dans le lait des ruminants. Cependant, les teneurs souhaitables en lysine digestible dans l'intestin (LysDi) et en méthionine digestible dans l'intestin (MetDi) n'ont pas été déterminées pour des chèvres en lactation. Dû aux similitudes entre l'alimentation protéique des chèvres et des vaches, le système alimentaire de l'INRA (2007) propose d'appliquer les

recommandations en acides aminés digestibles dans l'intestin (AADI) des bovins aux caprins. Ainsi, les recommandations sont de 7,3% de LysDi et 2,5% de MetDi dans PDIE.

Finalement, le gain de précision dans l'estimation des besoins protéiques par les nouveaux modèles mis au point par l'INRA en 2018 permet de réduire la marge de sécurité nécessaire lors du calcul de rations et réduit donc le gaspillage protéique. Les besoins de production sont passés d'une valeur fixe (45 g de PDI pour la production d'un L de lait) à une valeur comprise entre 38,7 et 77,5 g de PDI pour 1 L de lait avec un TB de 31 g/kg avec une efficacité de conversion de respectivement 0,80 ou 0,4 (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018). En analysant les nouveaux modèles proposés, on observe que les coûts protéiques non productifs et les besoins pour les réserves et la croissance augmentent, tout comme les coûts pour la production dans certains cas. Ainsi, les besoins en PDI peuvent être légèrement sous-estimés avec le programme de 2007 mais cet effet est contrecarré par la marge de sécurité généralement prise. Aussi, le modèle de 2007 sous-estimait la dégradabilité ruminale des matières azotées totales (MAT), surestimant les PDIA et les PDIE de certains aliments, principalement ceux de certains fourrages. Ainsi, les valeurs en PDI des aliments sont revues en 2018. Pour les fourrages, les modifications vont de -4 à +5 g de PDI/kg MS. Au niveau des aliments concentrés, les modifications sont faibles pour les aliments ayant une faible concentration en PDIE mais les aliments contenant plus de 200 g PDIE/kg MS perdent près de 10 à 15 g PDI/kg MS dans les tables (Legarto, 2016).

1.2.4 Besoins en vitamines, minéraux et eau

Les besoins en minéraux et vitamines sont tout aussi importants que ceux en énergie et protéines. Ils sont par contre plus insidieux car le stockage possible de certains d'entre eux fait que des carences ne sont pas immédiatement visibles (Legarto et al., 2011). L'INRA (2018) propose une équation pour calculer les besoins en eau des chèvres en thermoneutralité.

1.2.4.1 Vitamines

Pour les ruminants, les vitamines nécessaires à une bonne santé se retrouvent normalement dans leur alimentation, dans des proportions variables selon le type d'aliments. De plus, certaines vitamines peuvent être synthétisées par les micro-organismes du rumen. C'est le cas de la vitamine K et de celles du groupe B excepté la B₃. On considère donc que ces vitamines sont toujours en suffisance dans l'alimentation de l'animal. Les ruminants possèdent aussi une faible synthèse endogène de vitamine D et B₃ (Faverdin et al., 2018).

Les besoins vitaminiques n'ont pas été déterminés pour les chèvres. On leur applique donc les recommandations des bovins. Les besoins en vitamine A, D et E dépendent de la part d'aliments concentrés dans la ration et du stade physiologique (Legarto et al., 2011). Les

recommandations sont exprimées en équivalents ingérés par kg MS car leur digestibilité dépend des interactions digestives (Faverdin et al., 2018) :

- Vitamine A : lors de la lactation, les recommandations sont de 4200 UI/kg MS pour des rations contenant plus de 60% de fourrage ou de 6600 UI/kg si elle en contient moins de 60%. Le seuil de toxicité est fixé à 66 000 UI/kg MS
- Vitamine D : les recommandations sont de 1000 UI/kg MS avec un seuil de toxicité fixé à 10 000 UI/kg MS.
- Vitamine E : pendant la lactation 15 UI/kg MS sont requis pour des rations contenant plus de 60% de fourrage ou 40 UI/kg MS sinon. Le seuil de toxicité est fixé à 2000 UI/kg MS.

1.2.4.2 Minéraux

Comme pour les autres animaux, un apport suffisant en minéraux est essentiel pour le bon fonctionnement des voies métaboliques. Chez les ruminants, une attention particulière est accordée au calcium et au phosphore car ils sont particulièrement importants lors de la lactation. Ils sont exprimés en calcium (Ca_{abs}) et phosphore (P_{abs}) absorbable. Les équations pour les chèvres adultes en lactation et non gestantes ont été légèrement modifiées en 2018. Les besoins (2007) se calculent selon les équations 9 et 10 :

$$\text{Chèvre en lactation : } P_{abs} \text{ (g/j)} = (0,905 \times MSI) + 0,30 + (0,002 \times PV) + (0,95 \times PL_{35}) \quad (9)$$

$$Ca_{abs} \text{ (g/j)} = (0,670 \times MSI) + (0,010 \times PV) + (1,25 \times PL_{35}) \quad (10)$$

Les primipares ont des besoins en minéraux supérieurs dus à leur croissance et pour l'accrétion minérale optimale du squelette. Les besoins supplémentaires s'expriment en g du minéral par kg de croît et dépendent du poids vif adulte attendu (PV_{ad}) en kg (Delagarde et al., 2007). Les équations ont été revues avec la mise à jour de l'INRA de 2018 : Les besoins pour la croissance en Ca_{abs} et P_{abs} s'y expriment en g/j plutôt que par kg de croît (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018). Equations de 2007 :

$$\text{Chèvre en croissance : } P_{abs} \text{ (g/kg de croît)} = 1,2 + (3,188 \times PV_{ad}^{0,28} \times PV^{-0,28}) \quad (11)$$

$$Ca_{abs} \text{ (g/kg de croît)} = 6,75 \times PV_{ad}^{0,28} \times PV^{-0,28} \quad (12)$$

La minéralisation de l'utérus augmente également les besoins en fin de gestation, surtout chez les animaux les plus prolifiques. Les valeurs de ces augmentations ont été revues à la hausse en 2018 (Delagarde et al., 2007; Faverdin et al., 2018).

D'autres minéraux sont tout aussi importants pour la bonne santé des chèvres. Cependant, un apport excessif de ceux-ci peut être toxique : les seuils de toxicités, propres à chaque minéral, sont exprimés ci-après entre parenthèses. L'Institut de l'élevage (2011) recommande des apports en g/kg de MS de 2,5 pour le soufre (4), 15 pour le cuivre (30), 50 pour le zinc (250) et le manganèse (1000), 0,1 pour le sélénium (0,5), 0,3 pour le cobalt (10), 0,4 à 0,8 pour l'iode (8) et 0,1 pour le molybdène (3) afin d'être sûr que les apports soient supérieurs au seuil de carence.

La teneur en minéraux, leur capacité d'absorption et leur biodisponibilité varient fortement d'un aliment à l'autre. Idéalement, les besoins devraient donc être exprimés en quantité absorbable, comme c'est le cas pour le calcium et le phosphore. Certains minéraux ne peuvent malheureusement pas être pris indépendamment des autres. C'est le cas par exemple du magnésium dont l'absorption varie en fonction de la quantité de potassium de la ration. Ceci explique pourquoi certains éléments sont exprimés g/kg MS. L'INRA (2018) propose désormais des recommandations plus précises pour chaque minéral.

Le bilan électrolytique alimentaire (BEA) est l'équilibre entre les cations et les anions de la ration. Il équivaut à la somme des équivalents de sodium avec ceux de potassium moins ceux de chlore. Les équivalents des différents minéraux sont obtenus en divisant leur teneur en g/kg MS par leur masse moléculaire. La valeur du BPA joue sur l'équilibre acido-basique de l'organisme : un excès d'anions peut acidifier le sang et un excès de cations provoque l'effet inverse. Il est favorable d'avoir un BEA faible, voire négatif, en fin de gestation pour prévenir la fièvre de lait. Au contraire, un BEA d'environ + 250 à 300 mEq/kg MS permet d'optimiser la reprise d'ingestion après la mise bas, en début de lactation (Legarto et al., 2011). La différence des anions et cations alimentaires (DCAD) proposée par l'INRA (2018) équivaut au BEA auquel on ajoute le pouvoir acidifiant du soufre, bien inférieur à celui du chlore.

1.2.5 Bon fonctionnement du rumen

Le rumen est une particularité des ruminants qui nécessite une grande attention. En plus de répondre aux besoins des chèvres, il faut veiller à son bon fonctionnement. Il en va non seulement de la santé de la chèvre mais aussi de la production laitière. La digestion ruminale est réalisée par des micro-organismes et produit de nombreux nutriments essentiels à la bonne santé des ruminants dont des acides gras volatils (AGV) qui couvrent 60 à 80% des besoins en énergie des chèvres. Ces derniers ont également des besoins spécifiques en énergie, matières azotées, minéraux et eau (Jacques, 2012).

En pratique, l'Institut de l'élevage (2011) propose trois indicateurs permettant de s'assurer du bon fonctionnement du rumen. Premièrement, lors d'un repas, les chèvres doivent avoir une vitesse d'ingestion régulière, homogène dans le troupeau et pas trop rapide. Elle ne doit pas ingérer des quantités trop élevées dans un laps de temps trop court pour éviter les risques d'acidose latente. Ensuite, le TB du lait doit être stable et ne doit pas diminuer de 3 à 5 g/kg par rapport à un TB normal, signe du changement de profil fermentaire. Enfin, les chèvres doivent suffisamment ruminer : 2/3 des chèvres en état de ruminer doivent le faire 4 à 5h après le repas principal du soir.

1.2.5.1 *Digestion microbienne*

La digestion microbienne nécessite un équilibre entre les PDIE et les PDIN pour permettre une bonne synthèse de leurs protéines. On peut évaluer l'équilibre des PDIE et des PDIN grâce au

Rapport microbien (Rmic), équation 13. D'après l'Institut de l'élevage (2011), le taux d'urée du lait pourrait, dans certains cas, servir d'indicateur indirect pour l'équilibre du Rmic. Ce taux est cependant très variable d'une chèvre à l'autre et est souvent peu lié aux bilans alimentaires dans les élevages.

$$Rmic = (PDIN - PDIE)/UFL \quad (13)$$

Les valeurs attendues du Rmic dépendent de la production laitière souhaitée : en deçà de 1,5 kg lait STD/j, le Rmic doit être supérieur à -14. Entre 1,8 et 3 kg lait STD/j, il doit être supérieur à -7 et au-delà de 3 kg de lait STD/j, il doit être positif. Quand le Rmic est inférieur à 0, cela signifie que la ration n'apporte pas suffisamment d'azote alimentaire pour la synthèse des protéines microbiennes. Cependant, les micro-organismes peuvent, en partie, compter sur des apports d'azote, sous forme ammoniacale, recyclé et ramenés dans le rumen par la salive (Delagarde et al., 2007). Cela pénalise la production laitière mais c'est acceptable quand elle est modeste. Au contraire, un haut niveau de Rmic n'est pas non plus désirable car cela provoque une augmentation du taux d'urée dans le plasma et dans le lait. L'excédent est évacué par l'urine, constituant une perte économique et environnementale (Legarto et al., 2011; Delagarde et al., 2007). L'INRA (2018) a remplacé le Rmic par la BPR.

1.2.5.2 Environnement du rumen : fibres-pH

Le pH est un facteur très important pour les micro-organismes du rumen. Sa valeur idéale est comprise entre 6,2 et 6,8. La dégradation microbienne des glucides génère des AGV qui acidifient le rumen. Cette acidification est tamponnée principalement par des bicarbonates contenus dans la salive. L'ingestion et la rumination permettent la salivation. Cette dernière est favorisée par la fibrosité car elle augmente le temps de mastication. La fibrosité peut être vue de deux façons : d'un point de vue chimique, liée aux parois végétales, et d'un point de vue physique, corrélée positivement à la taille des fibres (Legarto et al., 2011).

Idéalement, le pH ne doit jamais descendre en dessous de 6,2 pendant plus de 4 heures par jour. Lors d'une acidification trop importante du rumen, la proportion des différents AGV qui y sont produits change : l'acide propionique augmente au détriment de l'acide acétique et de l'acide butyrique. Ces deux derniers AGV sont des précurseurs de la matière grasse du lait. Ce changement dans les proportions est délétère car il réduit le TB du lait, pouvant engendrer une « inversion de taux ». Maintenir un pH stable et compris entre 6,2 et 6,8 dans le rumen assure donc un meilleur TB du lait (Legarto et al., 2011).

La vitesse de variation du pH dans le rumen dépend de la vitesse de libération des AGV. Elle-même dépend des trois facteurs suivants liés à la fibrosité (Legarto et al., 2011) :

- Taille des particules : un hachage fin ou des concentrés broyés augmentent l'accessibilité des particules alimentaires aux micro-organismes, augmentant la vitesse de leur dégradation donc l'acidification du rumen. Une granulométrie grossière ou des brins de

grande taille nécessitent une mastication plus longue et favorisent dès lors une salivation supérieure, amenant des ions bicarbonate au rumen.

- Nature des aliments : les aliments sont plus ou moins fermentescibles en fonction de leur teneur en sucres solubles, amidon, pectines et parois végétales. La somme de l'amidon dégradable, des sucres totaux et des pectines ne doit pas dépasser 30% de la MS.
- Pouvoir tampon : chaque aliment a un pouvoir tampon propre en fonction de sa composition. Les ensilages ont un pouvoir tampon plus faible que les foin car ils sont plus acides. Les teneurs en MAT et en minéraux influencent également : la luzerne a un pouvoir tampon supérieur aux graminées car elle est riche en protéines et en bicarbonates.

Un indicateur fiable de la fibrosité d'une ration est la teneur en parois végétales totales (NDF) issues, principalement, des fourrages. Idéalement, la teneur en NDF doit être supérieure à 30% de la MSI pour garantir une sécurité dans des rations riches en énergie rapidement fermentescible. Les NDF comprennent la lignine, la cellulose (CB) et les hémicelluloses et excluent les pectines (Legarto et al., 2011). L'INRA (2018) préconise que la ration contienne entre 300 g NDF/kg MS, pour favoriser la mastication, et 500 g/kg MS, pour ne pas diminuer la digestibilité des matières organiques et augmenter l'effet d'encombrement.

1.2.6 Périodes clés dans le cycle de production – rationnement adéquat

1.2.6.1 Tableau récapitulatif

Tableau I.1 : Récapitulatif des facteurs de rationnement d'après l'Institut de l'élevage (2011)

		Fin gestation		Début lactation	Pleine lactation	Fin lactation
		4 ^e mois	5 ^e mois			
Rapport PDI/UFL	g PDI/kg	-		115 à 125	100 à 125	90 à 110
Fourrages grossiers	% MSI	> 70%	> 60%	> 50%	> 50%	> 50%
Concentrés	% MSI	< 20%	< 30%	< 40 %	< 40 %	< 40%
Cellulose brute (CB)	% MSI	> 20%		> 18%	> 18%	> 18%
NDF total	% MSI	> 40%		> 35%	> 35%	> 35%
NDF des fourrages	% MSI	> 35%		> 25%	> 25%	> 25%
Amidon	% MSI	< 18%		< 25%	<25%	15 à 20%
Lipides	% MSI	-		3 à 4 %	3 à 4 %	3 à 4 %

Le cycle annuel d'une chèvre laitière tarie annuellement est divisé en quatre grandes périodes clés : la fin de gestation, le début de lactation, la pleine lactation et la fin de lactation. Ces périodes sont associées à des stades physiologiques distincts où les besoins alimentaires sont différents, nécessitant d'adapter la ration. Le tableau I.1 récapitule les indicateurs de rationnement à respecter selon l'Institut de l'élevage (2011) aux 4 étapes clés.

1.2.6.2 *Rationnement début de lactation*

Seul le stade début de lactation est développé dans cette partie car il correspond à celui des chèvres de l'expérience. Les conseils ci-après sont majoritairement issus des recommandations de l'Institut de l'élevage (2011).

Le début de lactation équivaut aux 45 jours séparant la mise bas du pic de lactation. Durant cette période, les chèvres ont des besoins de maintenance et de production, ainsi que des besoins de croissance chez les primipares. Le premier lait, appelé colostrum, est produit en faible quantité mais a un coût énergétique élevé vu sa richesse en matières utiles. La panse a un volume réduit suite à la gestation, diminuant la CI. Ainsi, l'alimentation pendant des premières semaines de lactation ne sait pas couvrir entièrement les besoins. Elle doit être la plus optimale possible pour réduire la mobilisation des réserves corporelles. A cause du colostrum, les besoins de production sont maximaux dès le début de la lactation. Ils restent élevés par la suite car, même si le TP et le TB du lait chutent, la quantité de lait produite augmente fortement jusqu'au pic de lactation, 7 semaines plus tard.

En début de lactation, la CI est limitée à cause du développement de l'utérus aux dépens du rumen. Cet effet est d'autant plus marqué chez les chèvres les plus prolifiques, allant jusqu'à une perte de 20% du volume de la panse. La panse reprend progressivement du volume, augmentant la CI de 200 à 250 g MS/semaine, jusqu'à atteindre son volume maximal de la 6^e à la 8^e semaine de lactation. Les recommandations pour favoriser sa taille sont les mêmes qu'en fin de gestation : le fourrage distribué doit être de bonne qualité, disponible à volonté et être si possible le même qu'avant la mise bas. La part des aliments concentrés dans la ration doit être limitée et ils doivent être distribués après le fourrage à raison de maximum 400 g/distribution. Leur distribution peut augmenter, à raison de maximum 200 g/semaine, en conservant un ratio MS concentré/MS fourrage idéalement inférieur à 0,5 (maximum 0,6). L'apport total ne doit pas excéder 1,1 kg/j par chèvre pour les aliments concentrés et 2 kg/j par chèvre pour les aliments déshydratés afin d'éviter les accidents digestifs.

L'écart temporel entre le pic de lactation et le pic d'ingestion engendre un déficit énergétique. Un déficit de l'ordre de 0,50 UFL/j pour être comblé par les réserves corporelles pendant environ 50 jours et est tout à fait normal à ce stade de la lactation. L'état corporel des chèvres est un des points clés de cette période et il dépend directement de la période précédente. Durant les 6 à 8 premières semaines de la lactation, une chèvre de 70 kg de PV avec 5 kg de lait produit au pic de lactation peut mobiliser jusqu'à 7 à 8 kg de réserves corporelles, soit 10 à 12% de son PV. L'ampleur et la durée de la mobilisation dépendent directement de l'état à la mise bas. L'INRA (2007) considère que la mobilisation d'1 kg de PV génère en moyenne 3,7 UFL. La mobilisation de 7 kg de PV en 1 mois et demi, à raison de 1 kg mobilisé par semaine, équivaut donc à des apports énergétiques de 0,53 UFL/j. Les apports en énergie liés à la mobilisation corporelle ont été revus à la baisse depuis : 1 kg de PV mobilisé ne fournirait que

2,6 UFL. Cette même mobilisation (7 kg en 40 à 50 jours) ne générerait donc que 0,36 à 0,46 UFL/j, permettant de ne couvrir qu'un déficit de 0,4 UFL/j. L'INRA (2018) a retravaillé ses valeurs et estime désormais que la perte de poids habituelle après la mise bas est de 7,3 kg chez les multipares et de 4 kg chez les primipares. Cette perte de poids apporte donc de 18,6 UFL en 50 jours chez les multipares, soit 0,372 UFL/j, et 8,9 UFL chez les primipares, soit 0,178 UFL/j. Pour éviter une mobilisation trop importante, l'INRA (2018) recommande une densité énergétique de la ration de minimum 0,9 à 0,92 UFL/kg MS alors que leurs recommandations en 2007 étaient de 0,92 à 0,94 UFL/kg MS.

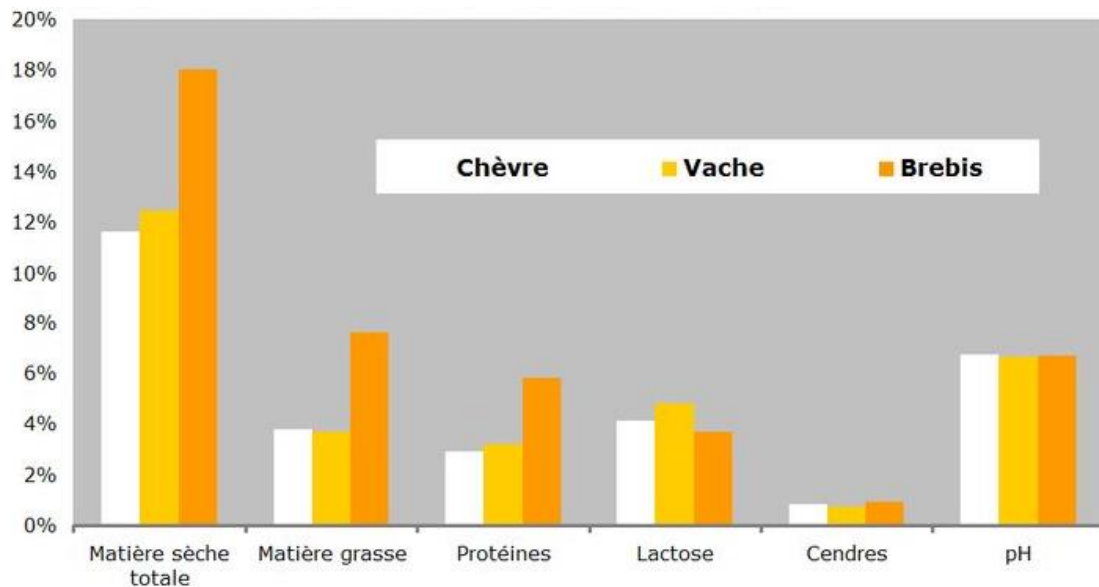
En cas de réserves lipidiques insuffisantes, la chèvre risque de mobiliser ses réserves protéiques, soit ses muscles, pour couvrir ses besoins. Or, les muscles se reconstituent plus difficilement que les réserves lipidiques. Il est donc important de veiller à de bons apports protéiques par l'alimentation pour limiter cette mobilisation. Un déficit en PDI peut être toléré en tout début de lactation. Il ne doit pas excéder 80 à 90 g lors de la 1^{re} semaine de lactation et 20 à 30 g lors de la 2^e semaine. Le bilan doit à nouveau être nul dès la 3^e semaine. Pour les animaux les plus productifs, un rapport PDI/UFL de 92 à 95 g permet de satisfaire les recommandations de l'INRA (2007). L'Institut de l'élevage (2011) préconise plutôt un rapport de 115 à 125 g de PDI/UFL car ils tiennent compte du fait que, tant que l'ingestion n'est pas optimale, il y a un défaut de matières énergétiques fermentescibles dans le rumen qui diminue la synthèse des protéines microbiennes.

1.3 Production, composition du lait et fabrication fromagère

1.3.1 Caractéristiques du lait de chèvre

La composition du lait varie d'une espèce à l'autre (Tableau I.2). Le lait de chèvre a une composition moyenne plus proche de celle du lait de vache que de celle du lait de brebis et contient moins de MS que ceux-ci. La valeur énergétique du lait de vache et celle du lait chèvre sont aux alentours de 72 kcal/L contre environ 120 kcal/l pour celui de brebis. Le lait de chèvre est constitué à près de 90% d'eau et ne contient pas de pigment caroténoïde, lui conférant une couleur blanc pâle. Il contient entre 28 et 42 g/L de MG, 44 à 47 g/L de lactose, 26 à 36 g/L de matière azotées dont 18 à 26 g/L de caséines et des constituants divers tels que des enzymes, vitamines et micro-organismes (Frantz, 2009).

Tableau I.2. Composition globale des laits de chèvre, vache et brebis d'après Frantz (2009), inspiré par Remeuf et al. (1989), Remeuf et al (1991), Jandal (1996) et Pellegrini (1995)



Les lipides du lait sont sous forme de globules gras. Leur diamètre moyen est inférieur et comparable dans le lait de chèvre (3,5 μm) et le lait de mouton (3,3 μm), facilitant leur digestion, par rapport à celui du lait de vache (4,55 μm). Comme chez la vache, 96,8% des lipides du lait de chèvre sont sous forme de triglycéride mais leur composition en AG diffère. Le lait de chèvre est plus riche en AG à chaînes courtes et moyennes (C4:0 à C14:0). Il contient notamment le double de C6:0, C8:0 et C10:0 du lait de vache, lui conférant son goût typique. Il est également riche en C16:0 et C18:1, mais légèrement moins que celui de la vache. Les concentrations en AG à longues chaînes (C16:0, C18:0, C18:2) et celles de cinq AG branchés peuvent varier significativement d'un troupeau caprin à l'autre (Park et al., 2017).

Les AG du lait proviennent de 2 origines. Les acides gras à longues chaînes (> C16) proviennent de triglycérides prélevés dans la circulation sanguine alors que ceux à chaînes courtes et moyennes (C4 à C14) sont synthétisés *de novo* dans l'épithélium mammaire. Les C16 proviennent des deux sources (Ollier et al., 2009). La teneur supérieure du lait de chèvre en AG à chaîne courtes et moyennes s'explique par une polymérisation différente dans les cellules mammaires de l'acétate issu des fermentations ruminales (Park et al., 2017).

Le sucre majoritaire du lait est le lactose. Ce disaccharide est fabriqué dans la glande mammaire à partir de glucose et de galactose (Park et al., 2017). Le glucose sanguin est bien souvent le facteur limitant de la production de lait car un kilo de lait requiert près de 70 g de glucose. Au total, près de 60 à 85% du glucose sanguin est utilisé par la glande mammaire (Marques de Almeida et Haenlein, 2017). Contrairement aux bovins, la teneur en lactose du lait peut légèrement augmenter chez les chèvres recevant une alimentation enrichie en amidon, sans doute grâce à une meilleure disponibilité digestive du glucose ou de ses précurseurs, tels que le propionate (Ollier et al., 2009)

Les protéines du lait sont présentes sous deux formes différentes : une part est sous forme micellaire et l'autre, appelée lactosérum, est sous forme sérique et est soluble dans l'eau. Les protéines du lait de chèvre ont été nommées d'après les protéines correspondantes en nature, composition et propriétés du lait de vache. Les caséines sont les protéines qui permettent la réalisation du fromage. Il en existe quatre types. Le lait de chèvre ne contient qu'environ 2,11 g/100 mL de caséines contre 2,7 g/100 mL pour le lait de vache, réduisant comparativement sa fromageabilité. Leur forme est aussi différente : le lait de chèvre contient moins de caséine α_{s1} et κ et plus de α_{s2} et β que le lait de vache (Park et al., 2017).

Une partie des matières azotées du lait n'est pas sous forme protéique mais est sous forme d'acides aminés, de peptides ou d'urée. Le taux d'urée est plus important dans le lait de chèvre (0,3 à 0,4 g/L) que de vache (0,2 g/L) et peut pénaliser la fabrication fromagère si sa concentration augmente (Frantz, 2009). Sa valeur présente de fortes variations individuelles et dépend fortement de la teneur en MAT, des PDIE et de l'excès de PDIN. Lefrileux et al. (2012) ont observé, par exemple, que le passage de 145 g/j de PDIA (RMIC = -4) à 265 g/j (RMIC = 25) a fait grimper le taux d'urée moyen du lait de 299 mg/L à 614 mg/L. Ce taux augmente également lorsque le pH ruminal diminue et il pourrait donc être un indicateur intéressant pour détecter les sub-acidoses, si les fluctuations liées au régime alimentaire arrivaient à être évaluées (Giger-Reverdin et Duvaux-Ponter, 2016).

Le lait de chèvre est globalement plus riche en minéraux que le lait de vache sauf au niveau du sodium. Il contient environ 1290 mg/L de Ca, 970 mg/L de P, 1900 mg/L de K, 380 mg/L de Na, 1600 mg/L de Cl et 130 mg/L de Mg. Le rapport calcium/caséine est plus important dans le lait de chèvre que dans le lait de vache, réduisant son temps de prise en fabrication fromagère. Sa plus haute teneur en calcium le rend aussi moins stable à haute température. Au niveau des vitamines, le lait de chèvre et celui de vache contiennent globalement des valeurs proches pour les vitamines A, B et C. Le lait de chèvre contient, par contre, près de trois fois moins de vitamine E, six fois moins de vit B12 et cinq fois moins de vit B9 que le lait de vache mais trois fois plus de vit B3 (Frantz, 2009).

Le lait contient aussi une quantité variable de cellules somatiques. Leur concentration dépend principalement de la traite, du type de lactation, de la morphologie des mamelles et de la prévention sanitaire mais elle ne semble pas liée au niveau azoté ou à la fibrosité de la ration. Le nombre de ces cellules doit rester le plus bas possible (Le Scouarnec et al., 2003). Au maximum, le lait de chèvre peut contenir jusqu'à 1.500.000 cellules/mL contre 400.000 cellules/mL dans le lait de vache car le comptage des cellules somatiques (SCC) n'est pas corrélé au niveau des leucocytes chez les chèvres. La synthèse apocrine du lait provoque une augmentation, particulièrement importante, de nombreuses particules circulaires cytoplasmiques chez les petits ruminants. Une augmentation du SCC peut induire une diminution de 15 à 20% de la production laitière par jour, une augmentation des IgG et une diminution du contenu en lactose du lait (Park et al., 2017).

1.3.2 Production de lait : effet de la race, du stade de lactation et de la parité

Au sein d'une même espèce, la race influence sur la production laitière. La Saanen et l'Alpine, races laitières majoritaires en France, ainsi que leur croisement sont les chèvres produisant de loin la plus grande quantité de lait sur une lactation de référence de 250 j. En termes de comparaison, si la Saanen produit jusque 780 kg de lait sur 250 j avec un TP moyen de 31,7 g/kg et un TB moyen de 35,5 g/kg, des races plus locales, comme la Poitevine, ne produisent que 473 kg de lait sur 230 j avec un TP de 30,7 g/kg lait et un TB de 33,4 g/kg de lait (Douguet, 2017). Cependant, en général, les chèvres qui produisent une quantité moindre de lait par lactation ont souvent un TP et un TB supérieurs (Marques de Almeida et Haenlein, 2017).

L'INRA (2018) propose désormais un modèle pour estimer la production laitière potentielle (PL_{pot}) en kg/j. Celle-ci augmente avec la production laitière attendue sur toute la lactation et diminue avec l'avancement dans la lactation. Des équations similaires sont aussi proposées pour déterminer le TP et le TB potentiels. De manière générale, pour des chèvres de parité équivalente, la quantité de lait produite et sa composition en MS sont intimement liées : plus la chèvre produit de lait, moins son lait est riche en matières utiles par effet de dilution. Le TB diminue généralement plus rapidement que le TP. La production de lait dépend de nombreux facteurs : le potentiel propre à l'animal, la parité, le stade de lactation et l'alimentation (Flamant et Morand-Fehr, 1982).

L'INRA (2018) a modélisé la courbe de production de lait (figure I.1) et les courbes du TB et TP (figure I.2) des chèvres primipares et multipares en fonction des jours en lactation (JEL) :

- La production de lait augmente de la mise-bas (JEL = 0 j) au pic de lactation (JEL = 40 j) avant de diminuer. Les chèvres multipares produisent davantage de lait que les primipares sur toute la lactation. Le colostrum est produit en quantité restreinte mais il est très riche en matières utiles.
- Le TP varie sur toute la lactation et ce, de façon plus marquée chez les primipares que chez les multipares. Le colostrum des chèvres multipares présente un TP d'environ 47 g/kg. Ce TP chute ensuite jusqu'à sa valeur minimum (TP \approx 32 g/kg lait à JEL \approx 40j) avant de se stabiliser aux alentours de 32 et 34 g/kg lait. Le colostrum des primipares a un TP de 40 g/kg. Leur TP diminue ensuite jusque 30 g/kg de lait (JEL \approx 100j) avant de remonter pour atteindre jusque 41 g/kg de lait à JEL \approx 300j.
- Le colostrum a un TB d'environ 55 g/kg lait tant pour les multipares que pour les primipares. Le TB diminue ensuite jusqu'à son minimum d'environ 34 g/kg lait (JEL \approx 100j). Les chèvres multipares présentent une meilleure persistance du TB. Ce dernier remonte jusque 46 g/kg lait contre 38 g/kg lait de chez les primipares à JEL \approx 300j.

Figure I.1 : Cinétique de lactation ajustée pour des chèvres primipares (pointillé) et multipares (trait continu) d'après Sauvart et Giger-Reverdin (2018)

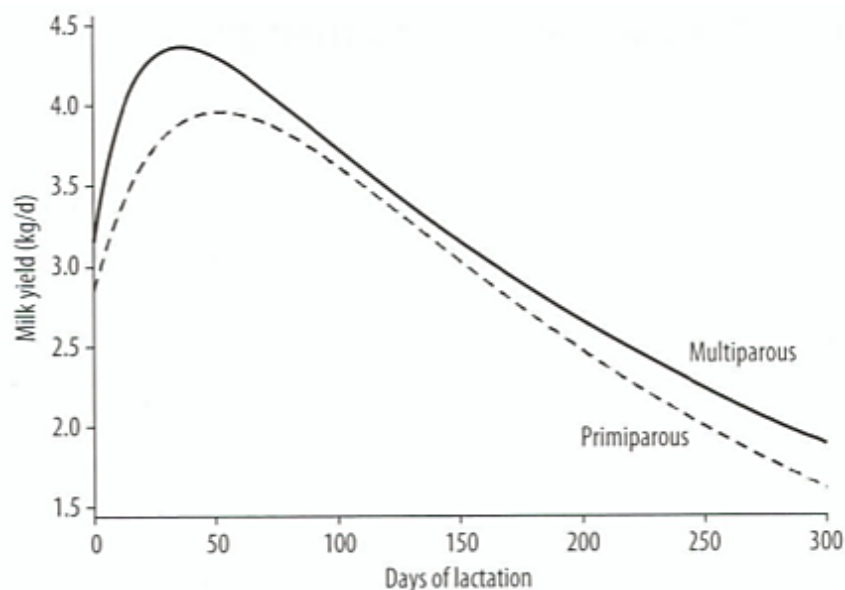
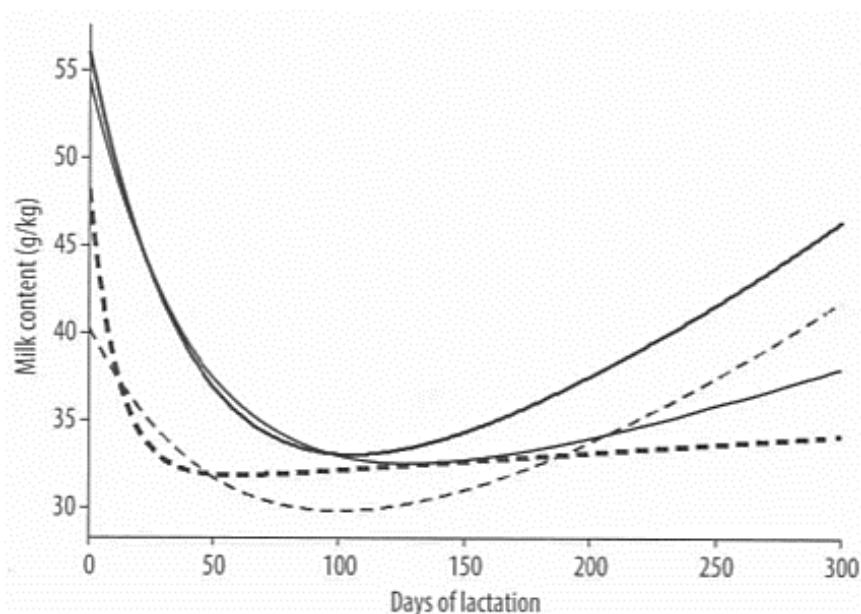


Figure I.2 : Cinétique du TP (pointillé) et TB (trait continu) potentiels ajustés pour des chèvres primipares (trait fin) et multipares (trait épais) d'après Sauvart et Giger-Reverdin (2018)



Le profil en AG du lait de chèvre varie aussi durant la lactation mais de façon moindre que chez les bovins et ovins. La teneur en AG monoinsaturé (AGMI) et celle en AG polyinsaturés (AGPI) semblent augmenter de respectivement 0,5% et 0,17% au détriment des acides gras saturés (AGS) qui diminuent de 0,6% durant la lactation. Cependant, d'après Esvan et al. (2010), cet effet observé dans les études pourrait n'être lié qu'à la saisonnalité. Le contenu minéral du lait diminue également avec l'avancement de la lactation sauf pour le potassium dont les valeurs sont stables (Park et al., 2017).

Au début de la lactation, une partie de l'énergie pour la production du lait provient des réserves corporelles qui doivent donc être suffisantes. Comme les AG constituant les réserves corporelles sont principalement des AG à chaînes longues (C16), leur quantité retrouvée dans le lait augmente en début de lactation au détriment des AG à chaînes courtes (C8 à C10) (Doyon, 2005). L'aspect du début de la courbe de lactation (figure I.1) dépend du contenu énergétique de la ration. Un apport réduit en énergie provoque une courbe de lactation relativement plate avec un pic de lactation réduit. Au contraire, des apports alimentaires très énergétiques provoquent un pic de lactation rapide et très élevé mais une moindre persistance laitière par la suite. Dans tous les cas, la persistance laitière dépend ensuite de l'alimentation. En pleine lactation, un déficit en énergie impacte directement négativement la production (Flamant et Morand-Fehr, 1982).

La parité influence également la production laitière. La deuxième lactation est celle avec le plus fort potentiel de production avec en moyenne 100 kg de lait produit en plus par rapport à la première lactation. La quantité de lait produite diminue ensuite avec les lactations suivantes à un rythme de 10 à 50 kg/an (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018). Le profil en AG du lait varie aussi significativement en fonction de la parité même si les différences sont faibles. Des chèvres multipares au-delà de leur quatrième lactation présentent 0,09% d'AGPI en plus et 0,10% d'AGS en moins que des primipares (Esvan et al., 2010). La parité n'influence globalement pas la composition minérale du lait sauf pour le sodium, dont la teneur est environ 15 à 20% plus faible lors de la première lactation (Park et al., 2017).

1.3.3 Problèmes métaboliques

Divers troubles métaboliques peuvent affecter la production laitière. « L'inversion de taux » se rencontre fréquemment dans les élevages à fort potentiel où les chèvres sont nourries avec un régime riche en aliments concentrés. Ce trouble apparaît lorsque le rapport TB/TP est inférieur à 1,15. Il est étroitement lié au bilan énergétique et survient généralement quand celui-ci est supérieur à 0,80 UFL/j car, lorsque la production de lait augmente, le TB du lait diminue plus que proportionnellement avec l'augmentation de la quantité produite alors que le TP du lait varie peu (Sauvant et al., 2007).

Le « milk fat depression » (MFD) est un problème métabolique observé chez les ruminants nourris avec des rations riches en huiles végétales ou très fermentescibles. Ce trouble est associé à la production d'AG intermédiaires, tels que le ALC C18:2 *trans*-10, *cis*-12, par la biohydrogénation ruminale d'AGPI alimentaires qui inhibent la synthèse lipidique mammaire. Ce trouble s'observe davantage avec des rations contenant des sources d'amidon rapidement digestibles et/ou des AGPI. Plus les AG alimentaires sont insaturés, comme l'huile de poisson, plus le MFD risque de survenir. De plus, la forme d'incorporation impacte également la disponibilité ruminale : les graines entières libèrent leurs AG moins rapidement que les drêches de céréales de distillerie ou les huiles et limitent donc le risque de MFD (Alatas et al.,

2015). Cependant, les gènes liés à la lipogenèse mammaire semblent moins impactés par la supplémentation alimentaire en MG chez la chèvre que chez la vache. Les chèvres expriment donc plus rarement le MFD (Ollier et al., 2009) même si la raison de cette différence n'est pas encore parfaitement élucidée (Toral et al., 2015).

1.3.4 Effet de l'alimentation

1.3.4.1 *Energie et protéines*

Le contenu énergétique de la ration est le facteur qui a l'impact le plus direct (corrélation 0,8 à 0,9) sur la production laitière en milieu de lactation (Flamant et Morand-Fehr, 1982). La production de lait brut croît avec l'augmentation de la teneur en énergie de la ration, donc principalement avec l'augmentation de la part d'aliments concentrés. Les rations contenant plus d'énergie, donc riches en concentrés (C), augmentent la quantité de lait produite, n'impactent pas le TP et réduisent le rapport acétate/propionate, le pH du rumen et le TB par effet de dilution, par rapport aux rations riches en fourrages (F) (Serment et al., 2010). Le ratio F:C a par contre un effet limité sur le profil en AG du lait. La teneur en AGS augmente, mais moins que proportionnellement, avec l'augmentation de la teneur en concentrés (Ollier et al., 2009).

Tout comme pour les bovins, dans des rations où l'énergie n'est pas limitante, la quantité de protéines brutes alimentaires peut également, si elle est inférieure à un certain seuil, réduire la production laitière. Ce seuil limite dépend des niveaux de production. Autrement, l'apport en protéines alimentaires n'influence ni le TB ni le TP mais influence le contenu azoté soluble du lait, tel que l'urée. La synthèse des protéines du lait est limitée principalement par la méthionine, suivie par la thréonine, la valine et l'isoleucine (Flamant et Morand-Fehr, 1982). Doyon (2005) a observé que des chèvres nourries avec une ration contenant surtout des légumineuses, par rapport à des chèvres alimentées principalement avec des graminées, produisent un lait contenant moins de caséines et de protéines sériques mais plus d'azote non protéique pour un même TP. Ces composés non protéiques ont une valeur nutritive moindre pour le consommateur et peuvent impacter négativement le rendement fromager.

1.3.4.2 *Supplémentation en lipides*

L'intérêt de la supplémentation en lipides dans la ration est multiple : l'apport de lipides augmente la valeur énergétique de la ration, permet de manipuler les digestions ruminales, pouvant potentiellement réduire les risques d'acidose, et permet de modifier le profil en AG du lait produit. Cependant, ces bénéfices sont contrebalancés par les risques liés à la réduction de la digestibilité ruminale (Adeyemi et al., 2016). Contrairement aux observations sur les bovins, un autre intérêt à l'apport alimentaire de MG chez la chèvre est sa capacité potentielle à augmenter le TB du lait et ce d'autant plus si la ration est riche en aliments

concentrés (Andrade et al., 2004). Cette augmentation semble atteindre un maximum lorsque l'apport de MG alimentaire approche les 190g/j (Chapoutot et Sauvant, 1997).

L'apport de lipides alimentaires modifie significativement la composition en AG du lait. Cette modification dépend de la forme d'incorporation et du profil en AG de l'aliment. Les graines entières libèrent progressivement leurs AG dans le rumen, laissant le temps aux microbes du rumen de les hydrogéner quasi entièrement. Ainsi, l'apport de graines entières réduit les AG courts et moyens saturés et monoinsaturés. Il augmente les teneurs en C18:0 et celles en *cis*-9 C18:1, issu principalement de la désaturation des AG C18:0 dans la glande mammaire. Les teneurs en ALC et *trans* C18:1 sont peu impactées. Les AG des graines laminées et, surtout, ceux des huiles sont davantage accessibles aux microbes du rumen et n'ont pas le temps d'être totalement hydrogénés, augmentant les ALC et *trans* C18:1, produits intermédiaires des réactions d'hydrogénation (Ollier et al., 2009). Cependant, les mélanges d'huiles ont un impact minimal sur les fermentations ruminales, malgré leur nature insaturée, surtout dans des rations avec un haut ratio F:C. Pour limiter les risques de perturbations dans le rumen, les MG alimentaires peuvent être protégées par différents traitements. Ces derniers ont un coût important mais permettent d'éviter l'hydrogénation des AGPI dans le rumen, leur permettant de se retrouver dans des quantités supérieures dans le lait produit (Adeyemi et al., 2016).

Le profil en AG de l'aliment incorporé dans la ration influence donc partiellement le profil en AG du lait. L'apport d'aliments riches en AGMI, comme le colza, augmente les teneurs en AGMI du lait. Les aliments riches en oméga-3, tels que les graines de lin, permettent d'augmenter les teneurs en AGPI, diminuant le rapport n-6/n-3 (Delmotte et al., 2006). En plus de l'apport par les concentrés, les fourrages amènent tout de même une quantité non négligeable d'AG lorsqu'ils représentent une part importante de la ration, pouvant influencer le profil en AG du lait. La conservation de l'herbe par ensilage semble mieux préserver le profil en AG de l'herbe fraîche (notamment les C16:0, C18:2 et C18:3) que les enrubannages, eux-mêmes meilleurs que les foin à cause des différences de pertes lors de fanage (Boufaïed et al., 2003).

1.3.5 Production de fromages

L'Institut de l'élevage (2017) a mis au point différentes équations pour déterminer le rendement fromager (RDT) en kg de fromage/100 kg de lait en fonction des composants du lait. La plus complète (équation 14, $r^2 = 0,72$) tient compte du TB en g/kg, du TP en g/kg, du SCC en million/mL lait et de l'urée en g/L. D'après celle-ci, 1 g/kg de TP en plus offre 0,4 kg de fromage supplémentaire et 1 g/kg de TB en plus offre 0,2 kg de fromage supplémentaire.

$$\text{RDT} = (0,173 \times \text{TB}) + (0,454 \times \text{TP}) + (0,197 \times \text{SCC}) - (5,367 \times \text{urée}) + 3,23 \quad (14)$$

Le contenu en caséines du lait influence la fabrication fromagère. Le gène α -s-1-CN, qui augmente le contenu en caséine total du lait, est deux fois moins observé chez les Saanen que

chez les Alpine, pouvant provoquer une différence dans le rendement, la fermeté du caillé et les arômes du fromage (Marques de Almeida et Haenlein, 2017). Ainsi, la teneur en caséine α_{s1} du lait de chèvre peut varier de 0,12 g/L à 2,7 g/L. Les laits de chèvre en contenant le moins présentent souvent un TB inférieur et des niveaux de lipolyse de la MG supérieurs qui rendent le goût de « chèvre » plus intense et moins apprécié dans les fromages (Park et al., 2017).

La qualité du lait utilisé pour la production de fromage doit répondre à certains standards. La composition brute et la valeur du lait cru doivent être déterminées. Pour cela, il existe différents indicateurs. Premièrement, le compte des bactéries indique les conditions d'hygiène. Ensuite, le SCC donne des informations sur les mammites et sur la qualité générale du lait. Des résidus, tels que des pesticides ou des médicaments, peuvent éventuellement se retrouver dans le lait mais ils doivent être évités à tout prix (Park et al., 2017).

Le goût du lait cru de chèvre et des produits qui en dérivent sont déterminés par de nombreux facteurs (Park et al., 2017) :

- Animal : la génétique, la santé et le stade physiologique
- Elevage : le système d'alimentation peut influencer la stabilité oxydative du lait, pouvant engendrer des défauts d'arômes. Les conditions environnementales peuvent également transférer des composants volatils dans le lait.
- Qualité du lait : la lipolyse induite ou spontanée de la MG peut induire une rancidité oxydative. La qualité microbiologique peut aussi avoir une influence : les psychrophiles dominant dans le lait cru maintenu à basse température pendant plus de 2 jours, pouvant engendrer des défauts de goût à cause de leurs activités protéolytiques et lipolytiques. De même, un SCC supérieur est souvent corrélé à une activité protéolytique supérieure.

Au niveau de la transformation du lait de chèvre, la qualité des fromages dépend directement de celle du lait. Le TB du lait influence le rendement fromager, la fermeté, la texture, la saveur et la couleur des produits caprins (Doyon, 2005). Le profil en AG retrouvé dans les fromages est stable et identique à celui du lait dont il est issu. La modification du profil en AG, lors de la supplémentation en AG alimentaire, se retrouve donc aussi dans le fromage, et ce, peu importe la nature du supplément lipidique (Delmotte et al., 2007).

La qualité gustative des fromages frais dépend directement de la qualité du lait utilisé. Des défauts de flaveur peuvent être observés lors de leur fabrication à partir d'un lait avec une faible teneur en TP et en TB, un ratio TB/TP inversé et/ou ayant une lipolyse de la MG supérieure à la moyenne. Pour les fromages affinés, leur qualité gustative dépend surtout de la transformation. Des défauts de flaveur peuvent se retrouver dans les fromages les plus âgés, dans ceux issus de lait cru et/ou dans ceux qui présentent une humidité du fromage dégraissé (HFD) supérieure aux autres au démoulage (Bellivier et Gaborit, 2000). La flaveur des fromages peut aussi être faiblement influencée par le profil en AG avec des interactions entre la nature du fourrage et la supplémentation lipidique. Des descriptions « amère » ou

« piquante » dans des fromages de chèvre semblent liées à un taux de lipolyse supérieur et à une accumulation d'AG libres. Des descriptions « métalliques » ou « oxydées » semblent être liées à des oxydations supérieures des AGPI du lait (Rouel et al., 2002). Des essais réalisés avec des fromages confectionnés à partir d'un lait plus riche en AG insaturés (tourteaux de colza, lin), donc plus oxydables, n'ont pas montré de défauts de goût (Delmotte et al., 2007). Cependant d'autres essais ont eu des résultats contradictoires avec l'apparition de défauts (« oxydé », « piquant », « amer », « poisson ») dans des fromages frais issus du lait de chèvres nourries avec des quantités importantes d'huile de ricin (5 à 6%). Ces fromages étaient aussi moins fermes à cause de la plus grande proportion d'AG insaturés (Berthelot, 2018).

1.4 Autonomie alimentaire

1.4.1 Généralité

L'augmentation durable du coût des matières premières, les aléas climatiques et la demande des consommateurs de produits locaux et respectueux de l'environnement ont fait resurgir la question de l'autonomie alimentaire dans les élevages, avec une attention particulière à l'autonomie protéique. Ce mode de production peut permettre aux éleveurs d'optimiser leur élevage, d'améliorer leurs revenus et de réduire leur impact environnemental (Bossis, 2016). D'un point de vue économique, ce mode de production permet de maîtriser et de limiter les coûts de production et réduit la dépendance des éleveurs face à la volatilité des prix des matières premières. Cependant, l'autonomie alimentaire n'est rentable que si l'économie sur l'achat des aliments est supérieure à l'augmentation des coûts de mécanisation et de travail. Au niveau social, cela accroît la traçabilité et la qualité des produits. Le bénéfice est également environnemental grâce à une limitation des importations et des rejets azotés. La transition vers davantage d'autonomie s'inscrit donc dans une démarche durable, permettant d'assurer la pérennité de son activité (Lefèvre, 2016). En Rhône-Alpes en 2012, les économies sur les coûts alimentaires (23% des coûts de production) ont été chiffrées : les élevages les moins autonomes (< 50% autonomie pour les fourrages et < 10% pour les concentrés) avaient des coûts alimentaires de 383 €/1 000L de lait. Les élevages davantage autonomes (>50% d'autonomie fourragère et/ou une autonomie en aliments concentrés >25%) avaient des coûts de production inférieurs, généralement situés entre 174 et 199 €/1000L lait (Réseaux d'élevage, 2013).

La notion d'autonomie diffère de celle d'autarcie et d'indépendance car elle s'insère dans un système où les échanges sont possibles. Dans le cas de l'autonomie alimentaire, elle implique de faire interagir des productions végétales et des productions animales. Les voies d'amélioration vers davantage d'autonomie sont multiples et dépendent du contexte externe, le territoire, mais aussi des conditions internes avec les choix propres aux éleveurs, les animaux élevés et les caractéristiques propres à chaque exploitation (Lefèvre, 2016). L'autonomie énergétique d'une ration est plus simple à atteindre que l'autonomie protéique

(Duhamel et al, 2015). C'est pourquoi les pistes proposées tendent davantage à la recherche de solutions pouvant accroître l'autonomie protéique que l'autonomie énergétique.

L'autonomie peut s'exprimer de différentes façons : en MS, en énergie, en protéines mais aussi en minéraux ou en vitamines. De manière générale, on peut calculer l'autonomie selon l'équation 15 (Lefèvre, 2016). Cette équation peut être modulée pour calculer l'autonomie massique en fourrages ou en aliments concentrés en remplaçant simplement les « aliments » par ceux-ci. De même, en remplaçant les valeurs, elle peut être utilisée pour calculer l'autonomie énergétique en UFL, ou protéique en MAT (Bossis et al., 2016).

$$\text{Autonomie alimentaire (\%)} = \frac{100 \times \text{aliments produits (kg)}}{\text{aliments achetés (kg)} + \text{aliments produits (kg)}} \quad (15)$$

Selon l'Institut de l'élevage (2016), les élevages caprins sont actuellement moins autonomes que les autres types d'élevages. L'autonomie alimentaire globale ne serait que de 56% pour les éleveurs caprins, en 2014, contre 85% pour les éleveurs de bovins laitiers en France, en 2012.

Les résultats obtenus par l'Institut de l'élevage (2016) entre 2007 et 2013 montre que l'autonomie massique des élevages caprins français, en excluant les élevages pastoraux misant sur le distribué (30 à 50% de la ration annuelle provient des parcours et pâturage et au moins 500 kg de foin acheté/an/chèvre), varie de 57 à 78%. L'autonomie en concentrés (Tableau I.3) est la plus problématique avec seulement 7 à 34% d'autoproductions consommées. L'autonomie énergétique et l'autonomie protéique sont plus faibles que l'autonomie massique. Elles se situent respectivement entre 48 à 71% et 20 à 69% en fonction des systèmes d'élevage. Les élevages caprins axés sur le pâturage consomment peu d'aliments concentrés et sont les plus autonomes d'un point de vue de l'énergie (67 ~ 71%) et des protéines (67 ~ 69%). Cependant, leur production annuelle est relativement faible (351 ~ 688 L lait/chèvre/an). Les élevages où l'enrubannage représente au moins 20% des fourrages font partie des plus autonomes en masse (70% au total), en énergie (60%) et en protéines (48%) et possèdent une des meilleures productions annuelles (806 L lait/chèvre/an). Ces résultats sont très variables d'une exploitation à l'autre (écart-type 26%) et il n'y a pas de relation entre autonomie protéique et fourragère sur une même exploitation (Bossis et al., 2015).

Tableau 1.3 : Comparaison des niveaux d'autonomie et de la production de lait entre les différents systèmes caprins français de 2007 et 2013 d'après Bossis et al. (2016)

Système caprin basé sur	Autonomie					Production de lait (L) annuelle par chèvre
	Masse			Energie	Protéine	
	totale	fourrage	concentré			
Ensilage maïs	62 %	89 %	20 %	53 %	34 %	846
Enrubannage	70 %	95 %	31 %	60 %	48 %	806
Foin (légumineuses)	64 %	83 %	32 %	59 %	48 %	787
Foin (graminées et légumineuses)	55 %	79 %	16 %	48 %	32 %	778
Concentrés ¹	60 %	84 %	34 %	53 %	20 %	860
Pâturage ²	76 %	91 %	30 %	71 %	67 %	688
Pastoral ² (pâturage)	69 %	78 %	7 %	67 %	69 %	351
Pastoral (distribué)	23 %	27 %	5 %	29 %	12 %	637

¹ : Les concentrés sont constitués à 46% d'aliments composés et à 49% de matières premières (céréales, coproduits, tourteaux et concentrés azotés). 10% des aliments achetés sont des coproduits de type luzerne déshydratée ou aliments fibreux.

² : les systèmes pâturant ont au moins 90 jours de pâturage/an alors que les systèmes pastoraux misant sur le pâturage ont au moins 75% de leur ration annuelle issue des pâturages et parcours et achètent moins de 300 kg de foin/chèvre/an.

1.4.2 Leviers et pistes

Il existe 4 leviers principaux à l'autonomie. Le premier est l'optimisation du pâturage pour les exploitations qui le pratiquent ou l'exploitation générale de l'herbe disponible. Le deuxième est la gestion générale du troupeau. Le troisième concerne la production et la conservation des fourrages. Le dernier consiste en la production d'aliments au contenu alimentaire proche des concentrés acheteables dans le commerce (Lefèvre, 2016). Ces leviers dépendent fortement de l'accès au foncier pour les exploitations. D'autres facteurs sont inhérents à ces terres disponibles comme le parcellaire, leur potentiel et les conditions pédoclimatiques en général (Bossis, 2016).

L'adaptation d'un système au contexte pédoclimatique est gage de sa résilience et de sa robustesse. Toutes les solutions proposées ci-après doivent être adaptées à la situation particulière de chaque exploitation. L'autonomie ne peut augmenter que si les besoins sont en phase avec les possibilités. Les systèmes d'élevage dépendent de leur sol, des risques climatiques, des ravageurs, des contraintes et de la valorisation voulue de leurs cultures. Un système bien adapté n'est pas forcément le plus productif mais c'est celui pour lequel la baisse des charges est supérieure à la baisse des produits et pour lequel l'autonomie limite

les transports, les intrants et les pertes minérales de la terre. Enfin les conditions de travail doivent y être harmonieuses et acceptables (Bossis et al., 2016).

1.4.2.1 *Optimisation du pâturage*

Dans les élevages pratiquant le pâturage, l'éleveur a intérêt à le maximiser pour limiter les besoins de stockage de fourrages, la part de concentrés dans la ration et pour produire du lait à moindre coût. Au niveau protéique, l'herbe pâturée est un aliment équilibré avec une forte valeur énergétique et une concentration en azote suffisante. En début de lactation, l'herbe pâturée peut couvrir les besoins de production de 3 à 4 kg lait/jour/chèvre. En pratique, il convient de sortir les animaux tôt à la sortie de l'hiver, d'ajuster la surface à disposition des animaux, de limiter le temps de pâturage sur une même parcelle à 3 ou 4 jours consécutifs et d'enchaîner par un temps non pâturé de repousse allant de 16 à 30 jours en fonction du moment de l'année. En Europe, l'accès au pâturage est bien souvent saisonnier. La gestion du parcellaire et la qualité des prairies sont importantes. Cette qualité dépend de la hauteur de l'herbe et du mélange semé. La hauteur idéale se situe entre 6 et 12 cm pour une bonne préhension et un stade végétatif optimal en termes de nutriments. L'intérêt nutritionnel peut être amélioré en semant des prairies multi-espèces riches en légumineuses ou des cultures associées (Bossis et al., 2016).

Si le pâturage n'est pas possible, les éleveurs peuvent envisager d'avoir recours à l'affouragement en vert. Cette technique a l'avantage de limiter les risques parasitaires souvent problématiques dans les élevages pâturant (Bossis, 2016). L'herbe est récoltée quotidiennement sur les terres puis distribuée à l'auge. Des investissements lourds sont nécessaires au départ, suivis d'une consommation d'énergie et d'un travail quotidien importants. Ces pratiques, tout comme le pâturage, ne sont pas possibles en hiver, les rations doivent alors se baser sur des fourrages conservés, souvent du foin (Bossis et al., 2016).

1.4.2.2 *Gestion du troupeau*

Le niveau de production voulu par l'éleveur est intéressant à analyser. Par la loi des rendements décroissants, les derniers litres de lait sont toujours les plus chers à produire. L'ajout d'aliments concentrés dans la ration augmente la production de lait, donc le revenu, mais parfois pas suffisamment par rapport à l'augmentation du coût alimentaire. Il peut, dès lors, être plus intéressant de produire moins de lait mais d'économiser sur les achats. Un autre moyen d'augmenter la rentabilité de son élevage est de jouer sur l'ajustement de la ration. Distribuer une ration de précision, en adéquation avec les besoins des animaux, permet de garantir une bonne santé des animaux, de limiter le gaspillage et d'ajuster la distribution des aliments concentrés. Enfin, la gestion du troupeau se fait aussi par la sélection des animaux : les animaux choisis doivent avoir des capacités de production adaptées à la production voulue et doivent être capables de valoriser les aliments disponibles (Bossis et al., 2016).

L'optimisation de la gestion du troupeau passe par la création d'un troupeau ou de lots d'animaux homogènes, une gestion rigoureuse des jours de lactation, de réforme et de tarissement ainsi qu'un élevage des chevrettes maîtrisé. Des lots homogènes permettent d'adapter la ration pour amener des apports en énergie et protéines ajustés au mieux aux besoins des animaux d'un même lot, évitant ainsi de gaspiller grâce à une meilleure valorisation des aliments, notamment des fourrages disponibles. Les lots homogènes peuvent se faire sur base des périodes de mises bas et de reproduction, de l'âge, de la production laitière, de l'état corporel, etc. (Bossis et al., 2016).

1.4.2.3 *Production et conservation des fourrages*

L'autonomie alimentaire par la production de fourrages est un objectif atteignable pour toutes les exploitations qui possèdent suffisamment de terres, étant donné que les plantes fourragères sont cultivables dans de nombreux contextes pédoclimatiques différents. Dans certains cas, il peut être intéressant d'augmenter les surfaces dédiées à la culture de fourrages. L'amélioration de la productivité de la terre, par épandage de fumiers, et l'amélioration des variétés végétales sont aussi une piste (Bossis, 2016). Enfin, les méthodes de conservation influencent la qualité des fourrages, donc l'ingestion de ces derniers.

L'herbe reste l'aliment le moins cher et le plus équilibré. La productivité des prairies peut être augmentée par la mise en place de prairies temporaires avec des cultures de légumineuses comme la luzerne ou le trèfle violet. A l'hectare, ces cultures devancent le soja en termes de production de protéines et sont donc des pistes incontournables pour augmenter l'autonomie protéique (Duhamel et al., 2015). Ces plantes permettent également de réduire les intrants azotés sur les terres, offrant un équilibre à la fois économique et agronomique. La productivité peut aussi être augmentée via des cultures associées de graminées et légumineuses, appelées méteil, récoltées immatures à des fins de fourrage. Enfin, la culture de prairies temporaires avec des mélanges multi espèces présente de nombreux avantages agronomiques et nutritionnels (Lefèvre, 2016; Bossis, 2016). Ces mélanges multi espèces renforcent l'adaptation à la parcelle et atténuent la variabilité interannuelle de production. Si le mélange contient suffisamment de légumineuses (>40% de la biomasse), le fourrage produit devrait être équilibré avec une valeur azotée élevée et un rapport PDIN/UFL > 90. La diversification des cultures est favorable également à la biodiversité. La composition du mélange semé dépend du type de distribution souhaité, du milieu, du climat, de son caractère appétant pour la chèvre et des performances zootechniques visées (Bossis et al., 2016).

Les cultures dérobées fourragères et les prairies sous couverts ont aussi leur intérêt. Les prairies sous couvert sont semées en même temps que des céréales ou des légumineuses qui les couvrent en un seul passage. Dès la récolte de la culture, la prairie reprend rapidement, la rendant exploitable de façon précoce. Cette technique peut, par contre, pénaliser le rendement de la culture lors d'une valorisation en grain. Les cultures dérobées, également

intéressantes, limitent le salissement de la parcelle et augmentent le potentiel productif de celle-ci (Bossis et al., 2016). Des exemples de cultures dérobées riches en protéines sont le trèfle incarnat ou le trèfle d'Alexandrie. Ces deux légumineuses ont leurs protéines protégées par des tannins et ne sont donc pas météorisantes (Duhamel et al., 2015).

Différentes méthodes de conservation pour les fourrages existent. Chacune a ses avantages et désavantages. L'ensilage enrubanné d'herbe est une technique courante. Moins fréquemment, les éleveurs ont recours au séchage artificiel du foin en grange. Ce dernier demande un fort investissement au départ et engendre des dépenses énergétiques mais offre des résultats intéressants au niveau de la qualité du fourrage généré. Même si l'enrubannage est une méthode de conservation efficace, permettant de faucher tôt et de gagner une coupe supplémentaire, cette technique n'est pas sans risque car elle peut entraîner des problèmes de listériose (Bossis, 2016). Cette méthode coûte aussi plus cher que le foin, fourrage le plus courant en élevage caprin. Le choix de la méthode de conservation reste dépendant des surfaces à collecter, de la météo et des capacités de stockage. L'itinéraire technique dépend du mode de conservation choisi mais un fourrage récolté tardivement sera toujours moins bien consommé par les animaux et aura toujours de moins bonnes valeurs nutritionnelles (Bossis et al., 2016).

Une dernière méthode servant à réduire la distribution de concentrés protéiques est la gestion de la distribution des fourrages pour augmenter leur ingestion. Pour faire progresser également l'autonomie fourragère, l'amélioration de la distribution doit aller de pair avec une ration totale efficace (~15% de MAT, PDIN > PDIE de 5 à 7 g/kg MS) et une valorisation des refus par d'autres animaux de l'élevage. Pour simuler l'ingestion des fourrages, l'éleveur doit distribuer davantage de fourrages afin d'augmenter leur tri, donc leur ingestibilité et diminuer les concentrés qui pourraient se substituer à ceux-ci. Le nombre de distributions par jour peut aussi être augmenté (max 4 à 5). Cependant, il faut tout de même veiller à ne pas trop diminuer la fibrosité de la ration à cause d'un tri accru. Ainsi, cette technique est plutôt adaptée en cas de fourrages de qualité médiocre qui ne présente pas trop de risques métaboliques lors d'une consommation et/ou d'un tri importants comme certains foins ou ensilages. Elle est moins adaptée pour les foins de luzerne et pour des ensilages enrubannés d'herbe. Cette technique permet de réduire les achats d'aliments, pouvant améliorer le bilan environnemental, et de mieux valoriser les productions fermières mais elle demande du temps de travail supplémentaire (Bossis et al., 2016).

1.4.2.4 *Production d'aliments concentrés*

L'autonomie en concentrés dépend principalement de l'accès à des terres labourables et est donc plus contraignante que celle en fourrage. Elle se base principalement sur la culture de céréales, de protéagineux et/ou d'oléagineux destinés à l'autoconsommation (Bossis, 2016).

1.4.2.4.1 Les protéagineux

Les graines protéagineuses cultivables en France et en Belgique sont les pois, la féverole et le lupin. Le lupin bleu est le lupin le plus cultivé au monde mais la culture du lupin blanc est privilégiée en Europe. La féverole peut être à fleurs colorées, la plus fréquente, ou blanches. Le pois et la féverole se cultivent couramment dans le nord de la France alors que la culture du soja n'y est possible. Le soja peut être cultivé dans le sud de la France mais il requiert des systèmes alimentés en eau. Il n'est donc pas intéressant en Belgique. Les rendements nationaux français selon Peyraud et al. (2015) varient en fonction de la région : ils sont globalement plus élevés pour le pois et la féverole (30 à 55 q/ha) que pour le lupin et le soja (25 à 30 q/ha). Ces graines ont toutes une valeur énergétique proche de celle des céréales, grâce à leur contenu en amidon ou en lipide. Leur teneur en protéines s'approche de celle de certains concentrés commerciaux mais reste en deçà de celle des principaux tourteaux. Lors d'une récolte sous forme de grain, les pailles de pois peuvent également servir de fourrage fibreux. Ces pailles ont une valeur énergétique supérieure à celle du blé, pouvant améliorer l'autonomie fourragère en plus de l'autonomie en concentrés. Les pailles de féverole et de lupin sont, par contre, difficiles à récolter, peu appétables et de faibles valeurs nutritionnelles. Les graines de protéagineux se récoltent, se conservent et peuvent être distribuées comme les céréales. Le grain doit être ventilé et séché si son taux d'humidité est supérieur à 15% (Guibert et al., 2017).

Le choix de l'espèce implantée dépend avant tout du rendement permis par le contexte pédoclimatique. L'accroissement des surfaces en protéagineux est agronomiquement solide mais en débat du point de vue économique. Dans certains cas, les faibles rendements des protéagineux en grain peuvent limiter leur intérêt économique. Ce dernier dépend aussi du coût de production des différentes cultures de la rotation, du rationnement et de la valorisation par l'animal (Bossis et al., 2016). Agronomiquement, même si les légumineuses ont un impact favorable sur l'écologie du sol, différents inconvénients sont inhérents à la monoculture de protéagineux. Lors d'essais menés au GAEC Ursule (France) depuis 1990 les rendements ont parfois été aléatoires : des problèmes de verse lors de la récolte des pois ont été observés ainsi qu'une forte sensibilité des plantes aux maladies et aux ravageurs tels que la bruche (Morineau, 2016).

1.4.2.4.1.1 Composition et digestibilité

L'intérêt principal des protéagineux réside dans leur niveau protéique. Le lupin blanc, la féverole à fleur colorée et les pois fourragers présentent de légères différences nutritionnelles. D'après les tables alimentaires de l'INRA (2007), le lupin est le plus riche en azote, en énergie et en fibres (385 g MAT, 1,33 UFL, 128 g CB et 240 g NDF/kg MS). La féverole est intermédiaire en MAT et en fibres (294 g MAT, 91 g CB et 160 g NDF/kg MS) et est légèrement moins riche en énergie que le pois (1,20 contre 1,21 UFL/kg MS). Le pois contient

le moins de MAT et de fibres (239 g MAT, 60 g CB et 139 g NDF/kg MS). Alors que les PDIA sont comparables entre la féverole et le lupin (52 ~ 53g/kg MS), le pois n'en contient que 34 g/kg MS. Le lupin contient le plus de PDIE (120 g/kg MS) et de PDIN (240 g/kg MS) suivi par la féverole (112 g PDIE et 188 g/kg MS). Le pois en contient le moins (97 g PDIE et 150 g PDIN/kg MS). Le lupin ne contient pas d'amidon, contrairement au pois et à la féverole (respectivement 516 g et 442 g amidon/kg MS), mais contient, en revanche, 95 g de MG/kg MS contre seulement 3 pour le pois et 15 pour la féverole. Ces trois protéagineuses sont assez bien pourvues en phosphore mais pauvres en calcium (Broqua, 2002).

Les MAT des graines protéagineuses (et oléagineuses) sont principalement des protéines de type albumines et globulines, très solubles. Ces protéines sont rapidement dégradées dans le rumen, engendrant de faibles valeurs de PDIA et des PDIN largement supérieurs aux PDIE. La dégradabilité théorique serait 85% avec la méthode *in sacco*. Cependant, cette méthode ne semble pas adaptée aux matières brutes distribuées généralement entières ou concassées contenant des protéines très solubles, comme ici. Les résultats en PDIE sont différents et semblent plus élevés lors de bilans digestifs duodénaux pour le pois et la féverole mais ils semblent plus faibles pour le lupin (Poncet et al., 2003). Des essais avec des graines de lupin non traitées chez des vaches laitières ont montré que cette forte dégradabilité peut entraîner une hausse de l'urée dans le lait et une réduction du TP à la suite d'une probable diminution de l'efficacité de l'utilisation des protéines alimentaires liée potentiellement à un manque d'utilisation de l'azote pour la synthèse des protéines bactériennes (Moss et al., 2000).

Différents traitements peuvent être appliqués aux graines pour accroître leur teneur en PDIE mais ces traitements ont un coût non négligeable et ne solutionnent pas tout. Moss et al. (2000) ont observé un maintien de la production, du TP et du TB en comparant des vaches nourries avec des graines de lupin traitées à la chaleur à des vaches témoins consommant des farines de poisson et des tourteaux de soja mais ils ont constaté une diminution significative des MAT et du contenu en caséine du lait. Ils ont émis 3 hypothèses : le MFD, un manque d'acides aminés soufrés limitant la synthèse protéique et une diminution de l'ingestion, réduisant les apports alimentaires.

Des traitements mécaniques comme le broyage, l'écrasement, l'éclatement, etc. diminuent la taille des particules alimentaires, augmentant leur accès aux micro-organismes et leur solubilité. Ainsi, ils augmentent la dégradabilité ruminale mais cet effet peut être compensé par un temps de séjour dans le rumen réduit. La méthode *in sacco* ne permet pas d'évaluer la réponse *in vivo* mais il semblerait qu'il existe une granulométrie idéale pour chaque graine. Peu de comparaisons directes entre les graines entières, broyées ou concassées des protéagineux existent actuellement (Poncet et al., 2003).

Lors de traitements thermiques, comme la torréfaction, l'infratisation, la chaleur sèche, la chaleur humide ou l'extrusion, la dégradabilité ruminale des protéines des graines est réduite

par la formation d'une liaison entre la protéine et un sucre réducteur (réaction de Maillard). L'humidification au préalable de l'aliment rend le traitement d'autant plus efficace. Cependant, ces traitements thermiques augmentent également la dégradabilité ruminale de l'amidon, à cause de sa gélatinisation, mais ils pourraient protéger partiellement les lipides de l'hydrogénation. De plus, lors d'un chauffage trop long ou à température trop élevée, la polymérisation des protéines réduit leur biodisponibilité dans l'intestin et, au-delà de 130°C, les lipides risquent de s'oxyder. Les conditions de traitement et températures optimales dépendent de l'aliment. En particulier, l'extrusion est un procédé techniquement complexe, pouvant avoir des résultats aléatoires. Elle semble réduire fortement la solubilité et la dégradabilité des protéines dans le rumen et ce d'autant plus que la température du traitement augmente. L'augmentation des PDIE par extrusion des graines de protéagineux peut atteindre les 70% (Bossis et al., 2016). Ce traitement, comme les autres, accroît la disponibilité intestinale des protéines alimentaires jusqu'à une certaine température mais, contrairement aux autres traitements thermiques, la destruction partielle de la structure cellulaire réduit la protection des lipides par rapport aux graines entières. La vitesse d'hydrogénation des MG alimentaires dans le rumen reste tout de même moindre qu'avec des huiles (Poncet et al., 2003). Des essais chez la vache ont montré que l'extrusion du pois, tout comme celle de graines de soja et de coton, augmente le flux non ammoniacal d'azote au niveau du duodénum, donc les acides aminés entrant dans l'intestin grêle, permettant une meilleure efficacité des synthèses protéiques microbiennes (Focant et al., 1990).

Les protéines des protéagineux sont riches en acides aminés intéressants, dont la lysine, mais pauvres en acides aminés soufrés et en tryptophane. Cette richesse en lysine les rend complémentaires avec les céréales au niveau des acides aminés limitants (Peyraud et al., 2015). Moss et al. (2000) estiment que les faibles teneurs en acides aminés soufrés du lupin ont pu réduire les MAT du lait des vaches qui en ont mangé alors qu'ils n'ont pas observé d'impact négatif sur la production des vaches ayant consommé des fèves, alors que celles-ci contiennent également peu d'acides aminés soufrés.

Les graines protéagineuses sont connues pour leur teneur en facteurs antinutritionnels. Les variétés de pois ont été sélectionnées à fleur blanche, sans tannins et possèdent une faible activité antitrypsique. La féverole peut contenir des tannins si sa fleur est colorée et elle contient également de la vicine et de la convicine. Les graines de lupin ont des teneurs variables en alcaloïdes. Si tous ces facteurs ont un impact néfaste sur la digestion des monogastriques et/ des volailles, toutes ces variétés peuvent être employées sans problème chez les ruminants. Par ailleurs, les tannins pourraient même protéger partiellement les protéines alimentaires d'une dégradation ruminale chez les ruminants. La sélection de variétés sans tanins, désirée pour les monogastriques, peut ainsi être préjudiciable pour les ruminants (Terres Univia, s. d.; Verhaeghe-Cartrysse, 2014; Poncet et al., 2003).

1.4.2.4.1.2 Introduction dans la ration

L'incorporation de graines protéagineuses dans la ration permet de les substituer à des concentrés protéiques mais elles pourraient aussi possiblement se substituer à des concentrés de production et énergétiques comme les céréales. Des essais rapportés par Poncet et al (2003) ont montré des performances identiques chez les vaches laitières lors du remplacement total ou partiel de tourteaux de soja par du pois ou du lupin.

L'Institut de l'élevage (2016) recommande d'introduire progressivement ces graines dans la ration pour laisser le temps à la flore ruminale de s'adapter : 1 semaine par tranche de 250 g de protéagineuses. Les limitations d'incorporation sont principalement liées à leur teneur en amidon (pois et féverole) ou en MG (lupin). Il recommande de broyer les graines de féverole si elles sont distribuées au-delà de 600 g/j et de limiter la distribution à 1 kg/j pour le lupin entier et le pois et à 1,2 kg/j pour la féverole. Il considère que :

- 100 g de graines de pois ou de féverole \approx 25 g de tourteaux de soja + 75 g de céréales
- 100 g de graines de lupin blanc \approx 35 g de tourteaux de soja + 65 g de céréales

Contrairement aux bovins, les graines de féverole, de pois et de lupin sont souvent distribuées entières aux chèvres. Broqua (2002, Institut de l'élevage) conseille de fractionner leurs apports quotidiens (maximum 300 g/repas) et signale que des refus et/ou des troubles digestifs peuvent apparaître lorsque les quantités distribuées quotidiennement dépassent 1,2 kg brut pour la féverole, 1,5 kg pour le pois et 1 kg pour le lupin entier (maximum 0,5 kg/j pour le lupin broyé ou extrudé chez les caprins).

Des essais en élevage caprin n'ont montré aucune incidence du remplacement d'un mélange d'orge et de tourteaux de soja par des graines de féverole ou de pois. Cependant, le remplacement de pulpes de betterave sèche et de tourteaux de soja par des graines de lupin broyées ou entières a montré une réduction de la production du lait avec les graines broyées alors que les quantités de lait produites par les chèvres nourries aux graines entières étaient comparables à celles nourries avec les tourteaux. L'ajout du lupin dans cet essai a, par ailleurs, augmenté significativement le TB sans impacter le TP, contrairement à ce qui est souvent observé chez les bovins. Dans un autre essai, le remplacement de tourteaux de soja par des graines de lupin crues ou extrudées n'a pas influencé la quantité de lait produite mais les graines extrudées ont réduit le TB alors que les graines entières l'ont augmenté. Cependant, dans ce cas-ci, le TP a été diminué avec les graines entières. Ainsi, les résultats lors de l'incorporation de protéagineux dans les rations sont parfois contradictoires d'un essai à l'autre (Broqua, 2002).

1.4.2.4.2 Les méteils

Les méteils sont des associations entre des protéagineux et des céréales. Ces associations, en comparaison avec des monocultures de protéagineux, réduisent le salissement de la parcelle,

les maladies et le risque de verses pour les espèces volubiles tel que le pois fourrager. Les rendements sont aussi accrus et le taux de protéines de la céréale associée augmente (Duhamel et al., 2015). Lors de la culture de protéagineux avec un peu de céréales, des essais au GAEC Ursule (France, 2016) ont en effet montré un gain de rendement de 120% par rapport à la monoculture. Ils ont également eu moins de maladies et de ravageurs, des céréales plus riches en protéines de 2%, un sol mieux couvert, pas de verse et ont pu cultiver des pois en terrain caillouteux. Ces cultures associées répondent aux principes de l'agroécologie : les plantes protéagineuses sont capables de fixer l'azote atmosphérique qui est ensuite assimilé par les céréales, limitant le recours aux engrais azotés (Guibert et al., 2017). Les méteils peuvent être récoltés et distribués immatures, comme fourrage, ou matures, sous forme de grain. Lors de la récolte sous forme de grain, la conservation est semblable aux céréales ou protéagineux seuls.

Le choix des variétés semées se fait en fonction du stade auquel le méteil sera récolté, de la compatibilité des stades de maturité pour les grains, de la rusticité et de la tolérance aux maladies. Un mélange habituel est le pois fourrager avec le triticale. Cependant, cette association présente un risque de verse élevé qui peut être réduit par l'ajout de féverole au mélange. Un autre mélange compatible et qui présente un faible taux de verse est le pois protéagineux avec le blé et/ou l'orge (Lochon, 2016). Idéalement, la hauteur des pailles des espèces doit être sensiblement la même mais la difficulté principale réside dans la concordance de la maturité des grains car les graines ne doivent pas être récoltées immatures. Le pois fourrager mûrit généralement avant le blé, devenant cassant à la récolte, et c'est l'inverse pour la féverole. Les pois protéagineux d'hiver, plus précoces, peuvent attendre 1 à 2 semaines sans perdre de grains grâce au port dressé de la céréale (Biarnès et al., 2011).

REDCap, projet expérimental de l'INRA pour le développement de la production caprine en France, a analysé et suivi des méteils utilisés en élevage caprin français et a observé que les associations peuvent être plus au moins complexes : 98% des mélanges contiennent 2 à 6 espèces végétales différentes. Les mélanges à 2 espèces sont les plus fréquents (30% des cas), devant ceux à 4 espèces (25%) et ceux à 3 espèces (22%). Parmi les espèces cultivées, on retrouve comme céréale le triticale dans près de 85% des mélanges puis l'avoine (57% des mélanges), l'orge (25%) et l'épeautre (20%). Le blé et le seigle sont plus rares (respectivement 8% et 5% des mélanges). Au niveau des protéagineux, le pois fourrager est le plus cultivé et est retrouvé dans 68% des mélanges, suivi par la féverole (45%), la vesce (25%), le pois protéagineux (17%) et le lupin (7%) (Guibert et al., 2017). Le mélange binaire triticale/pois est particulièrement fréquent. Pour accroître le contenu en protéines de l'association, de la féverole peut être ajoutée pour une récolte en grain ou de la vesce, pour une récolte en fourrage (Duhamel et al., 2015).

Les rendements sont fort variables d'un mélange à l'autre et d'une année à l'autre. En 2016, les rendements moyens recensés par REDCap en Nouvelle-Aquitaine et Pays de la Loire étaient de 30 qx/ha pour un méteil à 1 UFL et 17% de MAT. En 2017, les rendements ont grimpé à 42 qx/ha mais l'aliment obtenu n'était plus qu'à 14% de MAT et 1 UFL. Les mélanges peuvent être séparés en quatre catégories en fonction du rendement et du % de MAT. Les moins intéressants sont ceux qui contiennent moins de 3% de graines protéagineuses au semis. Les plus intéressants au niveau du rendement et des MAT sont de 2 types : les mélanges de 2017 contenant 10% de graines de protéagineux semés (féverole et pois) avec une récolte de 45 qx/ha pour 16,8% MAT et les mélanges de 2016 avec 10% de graines protéagineuses semées (féverole) avec 39 qx/ha pour 18,7% MAT (Guibert et al., 2017). La difficulté de ces mélanges réside dans la maîtrise de la proportion finale de chaque espèce dans le produit récolté. Si on sait généralement ce qu'on sème, on ne sait pas toujours ce qu'on va récolter (Biarnès et al., 2011).

Dans un objectif de la maximisation la récolte d'un blé de qualité riche en protéines, on peut l'associer à une culture de protéagineux en le semant à hauteur de 60 ~ 70% de la densité en culture pure avec 30% de la densité en culture pure de la protéagineuse. Des exemples binaires de ces mélanges sont l'association blé tendre d'hiver/pois protéagineux d'hiver et blé tendre d'hiver/féverole d'hiver (Biarnès et al., 2011). Un exemple de mélange semé avec 4% massique d'avoine, 52% triticales, 32% féverole, 12% pois fourrager a donné respectivement 30% récolté d'avoine, 33% triticales, 27% féverole et 10% de pois pour 0,92 UFL/kg MS et 16,5% MAT (Lochon, 2016).

Dans un objectif de la maximisation des protéagineux, le GAEC Ursule (France, 2016) conseille de semer 80 à 100% de la dose normale du protéagineux d'hiver et 20 à 30% de la dose pure de la céréale. Pour le lupin, ils préconisent plutôt 50 à 60% de céréales en fonction de sa capacité de concurrence. L'ITAB (2011) considère que des doses de semis de 60 ~ 70% de la dose normale du protéagineux et 40% de sa densité en culture pure de la céréale suffisent. Les céréales ne servent alors principalement que de tuteurs, de concurrents aux adventices et de protection pour limiter certaines maladies. Comme cultures, des mélanges triticales/féverole d'hiver, blé/pois protéagineux d'hiver ou orge de printemps/pois protéagineux de printemps peuvent être réalisés. L'apport d'une fertilisation azotée extérieure à la culture augmente le rendement total et la proportion de céréales récoltées. Lors d'essais en Vendée-CA en 2010, un rendement de 60 qx/ha en fertilisation azotée minérale avec 27% de protéagineuses récoltés, soit 16,2 qx, a été obtenu. Sans fertilisation azotée minérale, les rendements n'étaient plus que de 50 qx/ha mais la part de protéagineux a grimpé à 40%, soit 20qx (Guibert et al., 2017). Lors de reliquats azotés dans le sol, le développement des céréales sera aussi favorisé par rapport à celui du protéagineux. Il faut alors réduire la proportion de la céréale dans le mélange à semer (Lochon, 2016).

Les plantes protéagineuses sont riches en protéines et en énergie alors que les céréales ne sont riches qu'en énergie. La combinaison des deux offre un aliment plus équilibré en protéines, en acides aminés essentiels et en énergie. Ainsi, 85% des éleveurs interrogés par l'Institut de l'élevage (2017) produisant un méteil le distribuent « tel quel », sans transformation ni tri, à hauteur de 100 kg/chèvre. Les 90 méteils qui ont été suivis en 2016 et 2017 en élevage caprin par REDcap, en Nouvelle-Aquitaine, ont été distribués à hauteur de 10 et 200 kg/chèvre/an, soit en moyenne 300 g par jour productif/an. Ceux-ci ont permis de couvrir 10% des besoins annuels en MS (Jost et al., 2018).

1.4.2.4.3 Les oléagineux

1.4.2.4.3.1 Généralités

Les graines oléagineuses sont particulièrement riches en matière grasse (MG), limitant leur incorporation dans la ration. Cependant, en quantité limitée, les MG alimentaire peuvent avoir un effet bénéfique sur le TB du lait. Contrairement aux bovins, les caprins sont moins enclins au MFD causé par l'apport de MG alimentaires (Doyon, 2005). Ces graines sont d'autant plus intéressantes qu'elles sont également riches en énergie. Différentes graines existent : colza, tournesol, lin, ... Le lupin et le soja, intermédiaires entre les protéagineux et les oléagineux, ont déjà été abordés précédemment. Les oléagineux se distinguent des protéagineux par leur teneur élevée en MG et leur absence d'amidon. Comme similitudes, la teneur en MAT des graines oléagineuses est proche de celles du pois, leurs protéines présentent une forte dégradabilité ruminale et la digestibilité intestinale de l'azote *by-pass* est élevée (Poncet et al., 2003).

Sous certaines conditions, les MG alimentaires peuvent tout de même perturber les digestions ruminales chez les caprins. Particulièrement, certains types d'AG et certains traitements des graines peuvent influencer cette tendance. De manière générale, des teneurs maximales de 5% MG dans la ration sont recommandées. Au niveau des AG, plus le degré d'insaturation augmente, plus les problèmes métaboliques sont à craindre. Les graines oléagineuses constituées principalement d'AGPI peuvent donc poser des problèmes. Au niveau des traitements, l'extrusion des graines augmente la vitesse de libération de ses lipides, les rendant plus à risque de poser des problèmes qu'avec des graines crues. La vitesse de libération reste tout de même inférieure qu'avec les huiles. Les traitements thermiques peuvent oxyder les lipides, à trop haute température, mais ils peuvent aussi permettre de protéger partiellement de l'hydrogénation grâce à une résistance acquise par les protéines qui l'entourent (Poncet et al., 2003).

La graine de tournesol, à hauteur de 80 à 120 g/j par chèvre, est fréquemment utilisée pour accroître les teneurs en MG des rations pauvres (herbe). A ce niveau d'incorporation, le TP du lait augmente (de 1 à 3 g/kg lait) sans qu'il n'y ait de répercussions sur les PDIE (Sagot, 2013). Comme cette graine est riche en parois (31% NDF/MS), son dépelliculage est nécessaire mais

pas évident à réaliser en ferme. La graine de lin est riche en acide linoléique (54%), AG recherché pour ces effets bénéfiques pour la santé humaine mais qui est aussi connu pour perturber fortement les digestions ruminales. Cette graine est intéressante mais elle est peu disponible et très chère car sa culture n'est pas encore répandue et ni évidente (Poncet et al., 2003).

1.4.2.4.3.2 Les graines de colza

La graine de colza est particulièrement riche en MG (45,5%/MS), dont 58% d'acide oléique, et contient 207 g MAT/kg MS (Baumont et al., 2007). Elle a l'avantage d'avoir une vitesse de dégradation de ses protéines dans le rumen plus faible que celle des autres graines, favorisant ainsi la synthèse de protéines microbiennes (Poncet et al., 2003). Ses teneurs en lysine et méthionine sont proches des seuils recommandés pour les vaches laitières. Elle est également bien pourvue en P et Ca, réduisant les besoins en compléments minéraux (Institut de l'élevage et Prolea, 2007).

Les graines et les tourteaux de colza contiennent deux facteurs antinutritionnels : l'acide érucique et les glucosinolates. La teneur du premier dépend de l'origine de la graine. Des variétés 0 ont été sélectionnées pour leur faible teneur en cet acide alors que certaines variétés industrielles, destinées à la production de détergent, sont sélectionnées pour leur richesse en celui-ci. L'hydrolyse des glucosinolates résulte en la formation de divers facteurs antinutritionnels, pouvant réduire le rendement laitier sans impacter l'ingestion. Cet effet n'est pas clairement identifié : certaines études le reportent, suggérant une possible réduction de la digestibilité causée par certaines variétés de graines, alors que d'autres n'observent aucune diminution (Ollier et al., 2009). Dans les années 1980, la sélection a permis de diminuer leurs teneurs : les variétés 00 contiennent maximum 35 $\mu\text{mol/g}$ MS de glucosinolates, les variétés 0 en ont plus de 40 $\mu\text{mol/g}$ MS. L'incorporation à hauteur de 30% de la ration reste possible sans affecter la croissance des animaux (Bendailh, 2010).

Au niveau de l'incorporation dans la ration, la distribution des graines de colza entières est déconseillée chez les bovins car elle réduit fortement la digestibilité. Il est conseillé de les endommager, par exemple par aplatissage, pour faciliter l'attaque microbienne. En revanche, pour les ovins, la mastication est suffisante que pour permettre la distribution des graines de colza entières. Rien n'est précisé pour les caprins. Pour les graines de petite taille, comme le colza ou le lin, l'humidification au préalable fragilise la paroi et améliore l'accessibilité aux micro-organismes et pourrait donc être intéressante au cas où les graines échappent à la mastication mais cela requiert du travail supplémentaire (Poncet et al., 2003).

Chez les chèvres, l'incorporation de graines de colza laminées à hauteur de 20% de la MS des concentrés a provoqué une augmentation du TB du lait et ce, parallèlement à l'augmentation de la part de concentré dans la ration, sans impacter le taux d'ingestion ou le TP du lait. Cet

apport de colza a modifié les AG du lait, réduisant les AG moyens saturés (C10-C14), les AG C16 et augmentant les AG longs insaturés (Andrade et al., 2004). Une autre expérience avec un mélange de pois et de graines de colza entières a montré que l'extrusion permet d'augmenter les valeurs de PDIA et PDIE par rapport au mélange cru. Si l'effet sur le TB du lait n'a pas été significatif dans cet essai, le changement du profil en AG a été sensiblement le même. Au final, l'inclusion de graines de colza entières dans la ration n'a eu aucun effet négatif et cet ajout a même augmenté l'ingestion (Chapoutot et Sauvart, 1997).

1.4.2.4.3.3 Les tourteaux de colza

Le pressage des graines oléagineuses permet de les distribuer dans des quantités plus élevées, la teneur en MG résiduelle restant le facteur limitant d'incorporation. Parmi les différents tourteaux existants, les plus communs dans le monde sont les tourteaux de soja puis ceux de colza, ceux de coton et enfin ceux de tournesol. Les tourteaux produits en ferme sont des tourteaux dits « gras », car ils contiennent, par définition, plus de 5% de MG (Bendailh, 2010). Le tourteau fermier le plus usuel est celui de colza. Les tourteaux de lin sont peu fréquents et leur production en ferme est peu documentée. Le soja et le coton ne sont pas cultivables en Belgique. Le tourteau de tournesol est envisageable mais il nécessite le dépelliculage des graines qui est difficile à mettre en place en ferme (Heuzé et al., 2016; Briand et al., 2006).

La teneur en MG résiduelle du tourteau de colza dépend du système de pressage. Deux types de presses existent, laissant le tourteau plus ou moins gras en fonction du modèle : les presses à vis et les presses à barreaux (Bossis et al., 2016). Ce sont des presses de faible capacité travaillant par pressage à froid (< 80°C). Les tourteaux fermiers contiennent entre 11 et 35% de MG résiduelle/MS contre 2 à 5% pour les industriels déshuilés et 9 à 13% pour les expellers. En plus de son intérêt potentiel dans l'autonomie alimentaire des animaux, une motivation pour le pressage des graines sur l'exploitation est l'utilisation de l'huile à des fins énergétiques. Celle-ci peut être incorporée jusque 30% dans le carburant des tracteurs et le surplus peut être vendu comme combustible pour le chauffage domestique ou utilisé pour sécher le foin (Bendailh, 2010).

A cause de la variabilité des teneurs résiduelles en MG, la valeur alimentaire des tourteaux de colza fermiers ne sont pas simples à déterminer. La MG résiduelle dans le tourteau présente le même profil en AG que celle extraite et que celle de la graine entière. L'extrusion des lipides détruit partiellement la structure cellulaire de sorte que la libération des lipides résiduels du tourteau dans le rumen se fait plus rapidement qu'avec la graine initiale mais moins rapidement qu'avec de l'huile pure. Les teneurs en protéines, en minéraux et en CB du tourteau augmentent par effet de concentration quand la teneur en MG diminue. La CB est comprise entre 8,2 et 18,1% avec une moyenne de 11,8%. Pour les protéines, les MAT sont comprises entre 18 à 35% avec une valeur moyenne de 29,9% (Bendailh, 2010). Même si les protéines du colza sont moins rapidement dégradées dans le rumen que celles des

protéagineux, elles restent très dégradables, d'autant plus que leur digestibilité augmente à cause du traitement. Si les tourteaux industriels peuvent subir une injection de vapeur à 100-110°C qui réduit la dégradabilité des protéines dans le rumen, augmentant les PDIE, le chauffage n'est pas suffisant pour obtenir ce phénomène dans les tourteaux fermiers ou pressés à froid (Poncet et al., 2003).

Le tourteau de colza fermier (14,5% MG) est particulièrement intéressant dans des rations non déficitaires en PDIN, comme celles à base de légumineuses, où il peut remplacer intégralement le tourteau de soja. Par contre, dans des rations contenant un déficit en PDIN, comme celles à base de foin de graminées, sa teneur en protéines est trop faible par rapport à celle en MG et il ne pourra dès lors pas couvrir le déficit. Dans ce cas, le seul intérêt de son incorporation réside dans sa teneur en MG (Bossis et al., 2016). Avec des PDIN d'environ 171 g/kg MS en moyenne dans les tourteaux de colza fermiers, 2,2 kg de ces derniers sont nécessaires pour substituer 1 kg de tourteaux de soja 48 (Bendailh, 2010). En comparaison, 1,5 kg de tourteaux industriels de colza à 2% de MG suffisent substituer 1 kg de tourteaux de soja (Institut de l'élevage et Prolea, 2007).

L'incorporation de tourteaux de colza fermiers dans l'alimentation des caprins a déjà été testée. Leur ajout (tourteau à 11,7% MG/MS) à des niveaux importants (600 g/j/chèvre) sans dépasser les 5% de MG dans la ration n'a pas entraîné de refus, ni provoqué de différence de goût sur les fromages et a permis une augmentation de la production laitière de 10%. Cependant, l'accroissement de l'écart entre PDIN et PDIE a provoqué une augmentation sensible du taux d'urée du lait (Lefrileux et Pommaret, 2008). Dans une autre expérience menée par Delmotte et al. (2009), leur incorporation (200 g/j/chèvre) a permis d'augmenter le rendement en lait mais a aussi augmenté le taux d'urée du lait. Cependant, les auteurs soulignent que ces changements ont peut-être été causé uniquement par le fait que cette ration était plus protéinée que les autres rations de l'expérience. Aucune différence sur les fromages n'a été relevée et aucune amélioration du TB n'a été observée, sans doute à cause du fait que les animaux étaient à des stades physiologiques différents. Cependant, les tourteaux ont eu un impact positif sur la composition en AG du lait : les AGS ont diminué au profit des AGMI.

Une attention particulière doit être accordée au stockage des graines et des tourteaux d'oléagineux. Les graines entières se stockent au-delà de 6 mois si la graine contient < 10% d'humidité et que le stockage se fait sans impuretés à des températures < 15°C (Heuzé et al., 2017). Les tourteaux de colza sont plus à risque de s'oxyder ou de rancir que les graines entières. Dans de bonnes conditions, leur stockage va de 3 à 6 mois, nécessitant d'en presser régulièrement. Ce pressage doit idéalement se faire par temps sec pour viser un taux de MS élevé. Après pressage, les tourteaux doivent être refroidis pour éviter la condensation et les moisissures puis leur stockage doit se faire dans un endroit propre, sec, à l'abri de la lumière, des intempéries et de l'humidité (Bossis et al., 2016).

2 Partie expérimentale

2.1 Objectifs

Pour rappel, ce travail a pour objectif de proposer des rations équilibrées et en autonomie alimentaire aux éleveurs de la Baillerie. Ces rations doivent permettre de maintenir une production de 3 L de lait par jour par chèvre, en moyenne, sur toute la lactation. Comme les chèvres étaient en début de lactation pendant l'expérience, les rations ont été conçues pour couvrir une production de 3,5 L/j. Si l'autonomie alimentaire des éleveurs de la Baillerie est totale en été, grâce à l'affouragement en vert, ils doivent encore acheter un concentré en hiver pour compléter la ration en protéines. Les rations proposées lors de cette expérience ont été conçues sur base des fourrages qu'ils distribuent habituellement. Les aliments concentrés ont été remplacés, en partie ou intégralement, par d'autres qu'ils pourraient autoproduire. Trois pistes ont été envisagées : un méteil, des tourteaux de colza fermiers et des graines de colza. Etant donné que ces dernières sont de petite taille, un pré-test a été réalisé au début du mois de janvier 2019 pour se faire une idée de la valorisation digestive de celles-ci.

2.2 Pré-expérience

2.2.1 Matériel et méthodes

Afin d'estimer la valorisation digestive des graines de colza distribuées entières, six chèvres furent utilisées lors de cette pré-expérience. Trois d'entre elles (« Témoin ») reçurent en salle de traite leur ration quotidienne habituelle contenant 200 g de l'aliment concentré commercial (composition à l'Annexe A). Les 3 autres chèvres (« Colza ») ont consommé presque la même ration : l'aliment concentré commercial a été remplacé par 100 g de graines de colza entières, par jour, pendant 12 jours. La méthodologie d'analyse a reposé un examen visuel des matières fécales et sur l'analyse de leur teneur en MG (méthode Soxhlet) afin de comparer les résultats entre les chèvres « Témoin » et les chèvres « Colza ». Les fèces ont été récoltées individuellement dans des sacs zip, au sol, le matin pendant la traite alors que les chèvres étaient isolées sur du béton dans l'étable pour éviter tout mélange et tout risque de contamination des échantillons. Pour les 3 chèvres « Témoin », les fèces ont été récupérées les 28, 29 et 30 décembre 2018. Les fèces des 3 chèvres « Colza » ont été récoltées les 18, 19 et 20 janvier 2019. Les échantillons ont été rassemblés pour faire un échantillon moyen par chèvre des fèces des 3 jours. L'examen visuel a été réalisé sur 30 crottes, prises aléatoirement, dans chaque échantillon moyen des fèces.

2.2.2 Résultats

L'examen visuel a permis de déceler la présence de graines entières de maïs et de colza dans les fèces des chèvres de l'expérience. Comme attendu, aucune graine de colza n'a été

retrouvée dans les fèces des chèvres « Témoin » mais elles ont parfois été décelées dans celles des chèvres « Colza » (pointe du couteau, figure II.1) à hauteur de 0,48 graine/crotte (tableau II.1). En revanche, des grains de maïs ont été retrouvés de façon sporadique tant chez les chèvres « Témoins » que chez les chèvres « Colza ».

Figure II.1 : Examen visuel des fèces récoltées entre le 18 et 20 janvier 2019 d'une des chèvres « Colza » ayant consommé des graines de colza



La quantification de la matière grasse (tableau II.1) montre une tendance (p-valeur = 0,085) à l'augmentation de la teneur en MG dans les fèces des chèvres « Colza » par rapport à celles des chèvres « Témoin » (respectivement 7,9% et 6,6% de la MS). L'analyse du préfané, fourrage principal des rations, avant l'expérience a montré une digestibilité de la MS (méthode cellulase Aufrère) comprise entre 62,24% et 78,16%. Selon le logiciel INRAtion 4.07, une chèvre multipare de 70 kg au 50^e jour de lactation produisant 3,5 L de lait par jour et 800 L de lait sur toute sa lactation mange environ 2,53 kg MS/j. En approximant la digestibilité de la MS à 70% pour la ration, les chèvres produiraient environ 0,759 kg MS/j de fèces. La quantité de MG perdue par jour serait donc d'environ 60,19 g/j pour les chèvres « Colza » contre 50,40 g/j chez les chèvres « Témoin ». Les chèvres « Colza » auraient donc perdu 9,79 g MG/j en plus par rapport aux « Témoin ».

Les chèvres « Témoin » ont ingéré 200 g d'un concentré qui contiendrait, selon le fabricant, 7,8 g MG/100g (Annexe A). Les chèvres « Témoin » auraient donc eu un apport d'environ 15,6 g de MG par cet aliment. Les chèvres « Colza » ont consommé, à la place, 100 g/j de graines de colza à 42% de MG sur frais, d'après les tables alimentaires de l'INRA (2007). Ces chèvres auraient donc consommé 42 g de MG/j soit 26,4 g de MG/j en plus des « Témoin ».

Les chèvres « Colza » auraient donc consommé 26,4 g MG/j en plus que les « Témoin » mais elles auraient aussi perdu dans leurs déjections 9,79 g MG/j en plus. Même si la valorisation digestive des graines de colza ne semble donc pas être totale, on peut conclure sur base de cette pré-expérience, que les chèvres en valoriseraient plus de 50%.

Tableau II.1 : Résultat de l'analyse des fèces (visuelle et MG) comparant les chèvres ayant consommé des graines de colza (Colza) aux témoins (moyenne \pm écart-type de l'échantillon)

	Témoin	Colza	t-test Moyennes égales
Nombre de chèvres	3	3	-
% MG par MS fèces	6,64 \pm 0,24	7,93 \pm 0,73	0,085
Visuel (nombre de graines entières observées par crotte) :			
- Maïs	0,249 \pm 0,257	0,120 \pm 0,096	0,479
- Graines de colza	0 \pm 0	0,480 \pm 0,395	0,031

2.2.3 Conclusion

Malgré la présence de graines de colza entières lors de l'examen visuel, l'analyse de la teneur en MG des fèces montre que, même si toute la MG des graines de colza n'est pas entièrement valorisée, une partie non négligeable l'est. Ainsi, la décision de tester une ration contenant des graines entières de colza a été maintenue vu l'intérêt potentiel d'incorporer celles-ci dans l'alimentation des chèvres. Ces graines peuvent être facilement cultivées sur les terres de la ferme de la Baillerie, sont faciles à conserver telles quelles et ne nécessitent pas de traitement. En comparaison, un groupe testant une ration contenant des tourteaux gras de colza sera également inclus dans l'expérience finale. Suite à la découverte de grains de maïs entiers dans les fèces des chèvres, la décision de distribuer des grains de maïs aplatis plutôt que des grains entiers pendant l'expérience finale a été prise pour augmenter leur valorisation digestive. Faute d'aplatisseur à la ferme de Baillerie, des grains de maïs aplatis ont été achetés expressément pour l'expérience.

2.3 Expérience finale

2.3.1 Matériel et méthodes

2.3.1.1 Choix des animaux

Quatre-vingt-sept chèvres de race Saanen, dont environ un quart de primipares, ont mis bas entre le 26 janvier et le 4 mars 2019, à la ferme de la Baillerie. Parmi toutes ces chèvres, 60 ont été sélectionnées pour former quatre lots expérimentaux de 15 chèvres les plus homogènes possible, afin de tester et comparer 4 mélanges de concentrés : l'aliment composé commercial témoin, les graines de colza, les tourteaux gras de colza et un méteil. Ces 4 groupes ont été retirés du troupeau, différenciés par des colliers de couleur et séparés dans 4 enclos différents d'environ 22 m² dans l'étable, sans accès à l'extérieur. Les animaux constituant chaque lot ont été choisis sur base de leur âge, de leur poids vif, de leur production laitière mesurée le 4 mars 2019 et de leur nombre de jours en lactation (JEL) à cette date-là. Le poids vif a été obtenu grâce à une balance à curseur précise au kilo près. La

quantité de lait produite a été déterminée grâce à un « tru-test » qui prélève, par chèvre, un échantillon de lait proportionnel à la quantité produite lors de la traite.

2.3.1.2 Rations expérimentales

La ration « Témoin » fut celle habituellement distribuée en hiver à la ferme de la Baillerie (tableau II.2). Elle est constituée d'un ensilage enrubanné d'herbe préfanée distribué à volonté. Ce fourrage principal est complété par la distribution quotidienne de 2,5 kg de betteraves et 0,150 kg de foin fibreux. Tous ces fourrages sont produits et conservés sur l'exploitation et toutes les rations expérimentales se basent sur ce fourrage. Seul le mélange de concentrés changeait : par jour, le groupe « Témoin » a reçu 400 g de grains de maïs aplati et 200 g de leur concentré habituel à base de tourteau de pression de lin (44,4%), de luzerne (26,1%) et de drêche de froment (25%) (SCAR, Visé, Annexe A), le groupe « T. colza » a reçu 400 g de grains de maïs aplati et 200 g de tourteaux gras de colza, le groupe « G. colza » a reçu 450 g de grains de maïs aplati et 150 g de graines de colza et le groupe « Méteil » a reçu 600 g d'un mélange homogène composé de 1/3 de pois fourrager et de 2/3 de froment en poids frais. En plus de ces aliments, les chèvres avaient accès à un aliment minéral pour bovins « SCAR BLOC TOP » (Annexe B).

Tableau II.2 : Composition théorique des quatre rations expérimentales (kg MS/chèvre.jour)

kg MS/chèvre.jour	Groupe ¹			
	Témoin	T. colza	G. colza	Méteil
Ensilage enrubanné d'herbe préfanée	À volonté	À volonté	À volonté	À volonté
Foin de prairie	0,12	0,12	0,12	0,12
Betterave fourragère	0,30	0,30	0,30	0,30
Grain de maïs aplati	0,35	0,35	0,39	-
Aliment concentré SCAR	0,18	-	-	-
Tourteau de colza fermier	-	0,18	-	-
Graine de colza	-	-	0,14	-
Méteil	-	-	-	0,53

¹ : Les rations ont été mises au point à l'aide du logiciel INRAtion 4.07 pour des chèvres multipares de 70 kg en stabulation au 50^e jour de leur lactation produisant 3,5 L de lait/j et 800 L de lait/lactation.

Les rations ont été distribuées en deux repas par jour. Les fourrages étaient distribués collectivement à l'auge alors que les concentrés étaient distribués individuellement à la traite. Le matin, les chèvres étaient traitées avant de recevoir leurs fourrages. L'après-midi, les chèvres recevaient leurs fourrages avant la traite. A l'étable, de l'ensilage enrubanné d'herbe préfanée était disponible à volonté. Lors des repas, les aliments étaient distribués de façon séquentielle et les refus étaient enlevés avant la distribution de l'aliment suivant. Les repas

débutaient par la distribution du foin, suivis par la distribution des betteraves et se terminaient par la distribution du préfané, qui restait à disposition et qui était redistribué si nécessaire. L'ensilage enrubanné d'herbe préfanée et le foin ont été récoltés sur des prairies temporaires,ensemencées par un mélange de semences pour prairies composé de 48% de graminées et de 52% de légumineuses (Sencier 4 ; Annexe C).

2.3.1.3 Schéma expérimental

Le schéma expérimental prévoyait 3 semaines d'adaptation aux différents régimes et au nouvel environnement des chèvres. Cependant, après deux semaines d'adaptation, il fut constaté que, parmi les 15 chèvres du groupe « G. Colza », 4 chèvres ne mangeaient systématiquement pas tous leurs concentrés et 4 autres en laissaient de temps en temps. De même, 2 chèvres du groupe « Témoin » ne mangeaient pas toujours tous les concentrés de leur ration. Dans le groupe « Méteil », la majorité des chèvres ne le mangeait pas entièrement (30 à 60% de refus/traite pour les concentrés pour le groupe). Dans le groupe « T. Colza », 11 chèvres sur 15 triaient et laissaient les tourteaux gras de colza. Au vu de la situation, il a été décidé de 1°) retirer le groupe « T. Colza » car, après broyage des tourteaux et leur homogénéisation avec le maïs, les refus avaient encore augmentés ; 2°) mouliner le méteil pour faciliter son ingestion ; 3°) limiter à 11 le nombre de chèvres par groupe. Les 4 chèvres qui consommaient le moins de concentrés ont été écartées du groupe « G. Colza ». Un nouveau groupe « Méteil » a été formé avec des chèvres le consommant : 9 chèvres composant le nouveau groupe « Méteil » étaient issues de l'ancien groupe « T. Colza » et 2 chèvres de l'ancien groupe « Méteil ». Enfin 4 chèvres ont été écartées du groupe « Témoin » dont les deux qui laissaient le plus souvent des concentrés. Les groupes ont été reformés à la fois sur l'ingestion, pour s'assurer d'avoir le moins de refus de concentrés possible, mais aussi sur le poids vif, l'âge, la production laitière et le nombre de jours en lactation des chèvres afin de garder 3 groupes de 11 chèvres les plus homogènes possible (Tableau II.3).

Tableau II.3 : Caractéristiques des chèvres (au 4 mars 2019) constituant les 3 lots finaux de l'expérience (moyenne \pm écart-type de l'échantillon) et p-valeur d'une Anova 1

	Groupe			Pr (>F) Moyennes égales
	Témoin	G. colza	Méteil	
Nombre de chèvres	11	11	11	-
- Dont primipares	3	3	2	-
Âge (ans)	3,14 \pm 1,00	3,27 \pm 1,35	3,14 \pm 0,92	0,946
Poids vif (kg)	71 \pm 8	70 \pm 9	71 \pm 7	0,955
Production (kg/j)	3,48 \pm 0,39	3,48 \pm 0,43	3,48 \pm 0,77	1
JEL jours	26,73 \pm 10,88	26,91 \pm 8,68	28,18 \pm 9,96	0,932

Après la reformation des groupes, il a été décidé de prolonger la période d'adaptation et de transition d'une semaine. Les quatre premières semaines de l'expérience ont donc servi de semaines de transition et d'adaptation à leur nouvelle alimentation. Aucun prélèvement n'y a été effectué mais les quantités des différents aliments distribués et les refus des aliments concentrés ont tout de même été pesés sur toute la période de l'expérience. Les prélèvements ont été effectués lors de la cinquième semaine. Toutes les chèvres ayant pris part à l'expérience étaient en début de lactation (JEL = 14 à 45 jours) au début de celle-ci. Lors de la période pré expérimentale, s'étendant de la mise bas au début de l'expérience, les 60 chèvres de l'expérience ont consommé la ration habituelle de la ferme de la Baillierie contenant comme concentrés des graines de maïs et le concentré témoin commercial de la SCAR (ration « Témoin » du Tableau II.2).

2.3.1.4 *Mesures et prélèvements*

Poids des chèvres. Les chèvres ont été pesées à l'aide d'une balance à curseur précise au kg près : une première fois avant l'expérience, le 4 mars 2019 de 14h à 16h, pour former les lots et une seconde fois après l'expérience, le 13 avril 2019 de 10h à midi. A noter que les chèvres bougeaient pendant les mesures, les rendant imprécises. Les résultats ont été gardés malgré tout, à titre indicatif.

Aliments distribués. Les fourrages, distribués par lot, ont été pesés avant chaque distribution à l'aide d'une balance précise à 0,02 kg près. Les concentrés étaient distribués individuellement grâce à des pots spécifiques, fabriqués sur place, pour distribuer la quantité exacte de chaque aliment. La préparation des fourrages avait lieu le matin pour une distribution de ceux-ci le matin et le soir du même jour. Lors de chaque préparation quotidienne, en semaine de prélèvement, un échantillon de préfané, un échantillon de foin et un échantillon de betterave ont été prélevés. Pour les autres aliments, de composition moins variable, un échantillon sur la semaine a été collecté pour chacun en prélevant quotidiennement une petite quantité de ceux-ci. Les mesures sur les aliments ont été faites du lundi au vendredi de la semaine expérimentale.

Lors du prélèvement quotidien des fourrages, les échantillons de foin et de préfané ont, à chaque fois, été séparés en deux. La première moitié de chacun de ces échantillons et les échantillons quotidiens de betterave ont servi à la réalisation d'une analyse de MS à 105°C au laboratoire BNTE de l'UCL, réalisée quotidiennement. L'autre moitié des échantillons a été directement comprimée et stockée au congélateur. Ces échantillons congelés ont été rassemblés en fin de semaine pour confectionner un échantillon moyen de la semaine de préfané et un de foin. Ces deux échantillons moyens ont ensuite été séchés à 60°C et moulus au laboratoire BNTE de l'UCL avant d'être envoyés pour analyse de leur valeur alimentaire par spectroscopie proche infrarouge au laboratoire de l'unité « mode d'élevage, bien-être et qualité » du département « productions et filières » du CRA-W (Gembloux). Seule la matière

sèche à 105°C a été réalisée sur l'échantillon moyen de la semaine des autres aliments distribués (maïs aplati, concentré commercial, graines de colza, méteil moulu).

Refus. Les refus ont été collectés par lot du lundi au vendredi de la semaine de prélèvement. Ainsi, les différents échantillons des refus ont été collectés du lundi matin, avec le premier échantillon de foin, au samedi matin pour le dernier échantillon de préfané. Les refus de chaque aliment ont été collectés avant la distribution de l'aliment suivant et pesés à l'aide d'une balance précise à 0.02 kg près. Tout comme pour les aliments distribués, les échantillons quotidiens de foin et ceux de préfané non ingérés ont été séparés en deux pour subir les mêmes opérations et analyses que les échantillons de fourrages distribués. Les autres aliments refusés (betterave, maïs aplati, graines de colza, concentré commercial, méteil moulu) ont juste été pesés.

Production laitière. La production laitière a été mesurée avant l'expérience, le 4 mars 2019, pour former les groupes puis lors de chaque traite du lundi matin au vendredi soir de la semaine de prélèvement, à l'aide de « tru-tests ». Les quantités mesurées le matin et le soir ont été réunies pour représenter la production quotidienne de chaque chèvre. Le « tru-test » est un dispositif qui prélève un échantillon individuel de lait proportionnel au volume de lait produit par chèvre par traite. Dans certains cas, une mauvaise connexion du tube rendait la mesure erronée et elle n'a, dès lors, pas pu être prise en compte.

Composition laitière. La composition du lait produit par chaque lot a été déterminée sur six prélèvements représentatifs de trois productions journalières. Les 66 premiers échantillons individuels ont été prélevés le mardi soir et le mercredi matin grâce au lait dévié par le « tru-test ». Les 66 échantillons suivants ont été prélevés le jeudi soir et le vendredi matin et les 66 derniers ont été collectés le vendredi soir et le samedi matin. En plus de ces 198 échantillons, un échantillon moyen de lait de chaque groupe a été prélevé dans la cuve, vidée et rincée entre la traite de chaque groupe, le mercredi matin. Les échantillons ont été envoyés au laboratoire de l'unité « technologies de la transformation des produits » du département « valorisation des productions » du CRA-W (Gembloux) pour y déterminer leur TB, leur TP et leur teneur en urée par spectroscopie infrarouge. En plus de la composition individuelle du lait, le profil en AG a été déterminé sur les 3 échantillons de lait des groupes prélevés le mercredi matin. Cette analyse a été réalisée au laboratoire BNTE de l'UCL après congélation du lait. Deux pastilles d'azide de sodium par 50 ml de lait avaient été ajoutées avant congélation pour éviter le caillage à la décongélation.

Production fromagère. Les laits de groupe de la traite du mercredi matin ont été transformés en fromages frais par Johanne, fromagère attitrée de la ferme de la Baillerie. Pour chaque lot, 10 kg de lait ont été pesés sur une balance à 0,02 kg près puis transformés en fromages. Le lait a caillé pendant 24h, après ajout de présure, à basse température (20°C). Les crottins frais ont ensuite été réalisés après 48h d'égouttage. Les fromages obtenus ont été pesés sur une

balance à 0,02 g près. Leur MS à 105°C a été déterminée et ils ont été soumis à un test organoleptique organisé la semaine suivante, le mardi 16 avril, dans les bâtiments de l'UCL à Louvain-la-Neuve.

2.3.1.5 Analyses

Teneur en matière sèche (MS). La teneur en MS des aliments distribués, des refus et des fromages a été déterminée au laboratoire BNTE de l'UCL sur base de la variation du poids de l'échantillon avec l'eau perdue (équation 16). Les échantillons ont été placés dans des sacs microperforés conçus pour résister à 105 °C dont le poids a été déterminé au préalable (T). Les échantillons ont été pesés sur une balance (AE160 à 0,1 mg près) au préalablement tarée (P_{frais}) avant d'être placés dans une étuve. A leur sortie de l'étuve, les échantillons ont été placés au dessiccateur le temps de revenir à la température ambiante (~ 30 minutes) puis repesés ($P_{\text{sec}} + T$). Les échantillons sont restés soit pendant 48h dans l'étuve ventilée à 60°C, soit 24h quand l'étuve était à 105°C. Le calcul est le même dans les deux cas. Seules les betteraves sont restées 48h à 105°C plutôt que 24h car ce temps n'était pas suffisant pour entièrement les déshydrater.

$$\%MS = 100 \times \frac{(P_{\text{sec}} - T)}{P_{\text{frais}}} \quad (16)$$

Mouture. Les échantillons de fourrage destinés à la spectroscopie infrarouge ont été moulus après dessiccation à 60°C au moyen d'un broyeur ultra-centrifuge ZM 200 – RETSCH. Les moutures ont été réalisées au laboratoire BNTE de l'UCL avec une grille dont le diamètre des pores était de 1 cm et avec une vitesse de rotation de 6000 tours/min.

Teneur en matière grasse (MG) ou extrait éthéré (EE). La teneur en MG des fèces a été déterminée au laboratoire BNTE de l'UCL par la méthode de Soxhlet. La manipulation a été réalisée en trois étapes. Premièrement, environ 2 g (P_1) de chaque échantillon a été hydrolysé à l'HCL à chaud. Ensuite, la MG a été extraite à l'éther dans un ballon au préalablement taré (T). Enfin, les ballons ont été séchés puis pesés ($T + MG$). Le % de MG/MS se détermine par l'équation 17.

$$\%MG = 100 \times \frac{MG}{P_1 \times \frac{\%MS}{100}} \quad (17)$$

Profil en acide gras du lait. Le profil en acide gras du lait de chaque groupe a été déterminé au laboratoire BNTE de l'UCL par une chromatographie en phase gazeuse (Dans Van et al., 2011). La MG a été, au préalable, extraite par la méthode de Folch sur 1 g de lait lyophilisé avant d'être méthylée.

Analyse organoleptique des fromages. Un test de dégustation des fromages issus des laits séparés des trois groupes expérimentaux a eu lieu le mardi de la semaine suivant l'expérience dans la salle Pierre Bouillon (UCL) aménagée pour le test de dégustation en 6 cabines isolées.

Cinquante dégustateurs non expérimentés, dont 26 femmes, ont pris part bénévolement à ce test. Les goûteurs étaient tous adultes et issus principalement du monde universitaire avec une majorité d'étudiants et de chercheurs. La dégustation des trois fromages devait se faire dans un ordre précis, aléatoire entre les dégustateurs, tout en remplissant un questionnaire (Annexe D) identique par fromage. Les trois fromages ont été différenciés par un code à 3 chiffres choisis également aléatoirement. Les goûteurs avaient également à disposition de l'eau et du pain pour se rincer la bouche entre les différents échantillons. A leur arrivée dans la salle, ils ont reçu des explications sur la façon de procéder puis ils ont été placés dans un des six isoloirs. Un exemple de plateau se trouve à l'annexe E.

Analyses statistiques. Le schéma expérimental ne permettait pas de répétition de l'expérience. Les mesures d'ingestion, de productions et de la composition du lait ont été ramenées à une valeur moyenne pour la semaine expérimentale. L'ensemble des données collectées a été analysé par des tests statistiques. Ces analyses ont été réalisées sur le logiciel libre Rstudio version 3.5.3. :

- Des ANOVA 1 ont permis de tester si les moyennes étaient significativement différentes entre les groupes.
- Lors de moyennes significativement différentes, des tests de student ont été réalisés pour comparer les groupes deux à deux.

2.3.2 Résultats

2.3.2.1 Ingestion

Le tableau II.4 présente l'ingestion moyenne quotidienne en MS des chèvres de chaque groupe. Le groupe « Témoin » a une ingestion de préfané légèrement supérieure (1,43 kg MS) à celle des deux rations testées (1,25 kg MS pour le groupe « G. colza » et 1,20 kg MS pour le groupe « Méteil ») et donc une part de concentrés sur la MS totale de la ration moindre (20,31% contre 21,55% pour « G. colza » et 22,36% pour « Méteil »). Le groupe « G. colza » présente une ingestion en MS des concentrés inférieure (0,51 kg MS vs 0,52 kg MS) à cause de quelques refus.

Les quantités de préfané distribuées à l'étable étaient, au départ, déterminées grâce aux estimations et aux observations des semaines précédentes. Elles ont été adaptées à chaque distribution en fonction des observations (trop = >35% refus ou pas assez = <15% refus). La quantité distribuée variait donc d'un repas à l'autre mais chaque groupe a, à chaque fois, reçu la même quantité de préfané lors d'un même repas. Les refus de préfanés se sont élevés en moyenne à 32,22% en MS sur la semaine pour les trois groupes. Ils semblaient plus élevés dans le groupe « Méteil » (36,97%) par rapport au groupe « G. colza » (34,39%) et au groupe « Témoin » (25,30%).

Tableau II.4 : Ingestion individuelle des chèvres des 3 groupes en MS par jour (moyenne de 5 jours \pm écart-type de l'échantillon)

kg MS/chèvre.jour	Groupe		
	Témoin	G. colza	Méteil
Ensilage enrubanné d'herbe préfanée	1,43 \pm 0,19	1,25 \pm 0,21	1,20 \pm 0,20
Foin de prairie	0,09 \pm 0,01	0,10 \pm 0,01	0,09 \pm 0,01
Betterave fourragère	0,51 \pm 0,01	0,51 \pm 0,01	0,51 \pm 0,01
Total fourrages	2,03 \pm 0,21	1,86 \pm 0,23	1,80 \pm 0,22
Maïs aplati	0,34 \pm 0	0,38 \pm 0	-
Concentré SCAR	0,18 \pm 0	-	-
Graine de colza	-	0,13 \pm 0	-
Méteil moulu	-	-	0,52 \pm 0
Total concentrés	0,52 \pm 0,01	0,51 \pm 0	0,52 \pm 0
Total	2,55 \pm 0,22	2,37 \pm 0,23	2,32 \pm 0,22
Dont concentrés (% MS)	20,31%	21,55%	22,36%

Les valeurs nutritionnelles de l'ensilage d'herbe préfanée ingéré sont comparables entre les groupes (Tableau II.5). Il contient environ 0,92 UFL/kg MS, des MAT aux alentours de 175 g/kg MS, des PDIE de 85 g/kg MS et des PDIN de 110 g/kg MS. Au niveau des fibres, il contient environ 237 g CB/ kg MS et 427 g de NDF/kg MS. Il contient aussi près de 146 g de sucre/kg MS, pas d'amidon et 17 g MG/kg MS. L'OEB est positif avec une valeur d'environ 38 g/kg MS.

Le foin ingéré a des valeurs nutritionnelles différentes d'un groupe à l'autre :

- Celui du groupe « Témoin » est plus énergétique (0,84 UFL/kg MS contre 0,82 kg/kg MS)
- Le foin « Témoin » est plus riche en azote avec 110 g MAT/kg de MS (contre ~ 103 g MAT/kg MS dans les deux autres groupes). Il contient 91 g PDIE/kg MS et 73 g PDIN/kg MS alors que celui ingéré par les chèvres des deux autres groupes ne contient que ~ 88 g PDIE et 68 g PDIN/kg MS.
- Le foin « Témoin » est le moins riche en fibres avec 254 g CB/kg MS et 498 g NDF/kg MS alors que celui des deux autres groupes contient ~ 266 g CB/kg MS et ~ 512 g NDF/kg MS.
- Le foin « Témoin » est moins riche en sucres solubles avec 145 g/kg MS (contre 152 g/kg MS dans celui des 2 autres groupes).
- Tous les foins ne contiennent pas d'amidon et ont un OEB négatif d'environ -44 g/kg MS.

Sur base des tables alimentaires de l'INRA (2007), et du Tabellenboek Veevoeding (2016) pour l'OEB, les mélanges de concentrés de l'expérience avaient des valeurs nutritionnelles différentes :

- Le concentré le plus énergétique est celui du groupe « G. colza » (1,37 UFL/kg MS) suivi par celui du groupe « Méteil » (1,19 UFL/kg MS) puis par celui du groupe « Témoin » (1,13 UFL/kg MS).
- Les concentrés « Témoin » et « Méteil » sont les plus riches en MAT avec respectivement 162 g/kg MS et 160 g/kg MS (contre 122 g/kg MS pour le concentré « G. colza »). Le concentré « Témoin » contient le plus de PDIA (73g/kg MS), de PDIE (116 g/kg MS) et de PDIN (118 g/kg MS). Celui du groupe « Méteil » contient un peu moins de PDIE (101 g/kg MS) et de PDIN (104 g/kg MS) et beaucoup moins de PDIA (31 g/kg MS). Enfin, celui du groupe « G. colza » contient une teneur intermédiaire en PDIA (50 g/kg MS) et est le moins riche des trois en PDIE (89 g/kg MS) et en PDIN (88 g/kg MS).
- Le concentré le plus riche en fibre est le « Témoin » avec 70 g de CB et 200 g de NDF/kg MS. Le concentré « Méteil » contient plus de NDF (142 g/kg MS) mais moins de CB (37 g/kg MS) que le concentré « G. colza » (138 g NDF/kg MS et 41 g CB/kg MS).
- Le concentré « Méteil » est le plus riche en sucres solubles (32 g/kg MS) et en amidon (637 g/kg MS) suivis par le concentré « G. colza » (28 g sucre/kg MS et 557 g amidon/kg MS) puis par le concentré « Témoin » (24 g sucre/kg MS et 500 g amidon/kg MS).
- Le concentré « G. colza » est le plus riche en MG (146 g/kg MS) suivi par le « Témoin » (51 g/kg MS). Le concentré « Méteil » ne contient que 15 g MG/kg MS.
- Les OEB des concentrés sont négatifs dans les trois cas : L'OEB le plus proche de zéro est celui du concentré « Méteil » (-13 g/kg MS) suivi par celui de la ration « Témoin » (-19 g/kg MS) et par celui « G. Colza » (-23 g/kg MS).

Tableau II.5 : Valeurs nutritionnelles des aliments composant les rations par kg MS. Les données en gras et en italique proviennent des analyses NIR réalisées au CRA-W ; les autres proviennent des tables alimentaires de l'INRA (2007) ou, pour l'OEB, du Tabellenboek Veevoeding (2016)

Aliment	Groupe	UFL	MAT	PDIA	PDIE	PDIN	CB	Amidon	Sucre	NDF	MG	OEB
		(UFL/kg MS)	(g/kg MS)									
Foin de prairie												
- Distribué ¹		0,82	106	32	89	70	263	0	150	509	17	-43
	- Témoin	0,84	110	33	91	73	254	0	145	498	18	-42
- Consommé	- Méteil	0,82	102	32	88	67	269	0	153	515	17	-46
	- G. colza	0,82	104	32	89	69	263	0	151	509	17	-44
Ensilage d'herbe préfanée ²												
- Distribué		0,89	178	40	85	111	236	0	136	427	17	41
	- Témoin	0,91	176	40	85	110	236	0	143	428	17	39
- Consommé	- Méteil	0,93	173	40	85	108	240	0	145	429	17	36
	- G. colza	0,92	177	40	86	111	234	0	150	423	17	40
Betteraves		1,15	104	11	86	62	70	0	620	0	6	-99
Maïs aplati		1,22	94	54	97	74	25	742	19	120	43	-67
Concentré SCAR ³		0,96	299	110	155	206	160	15	35	360	67	78
Graines de colza		1,82	207	39	66	130	89	0	55	190	455	108
Méteil		1,19	160	31	101	104	37	637	32	142	15	-13
	- Témoin	1,13	162	73	116	118	70	500	24	200	51	-19
Concentré total	- Méteil	1,19	160	31	101	104	37	637	32	142	15	-13
	- G. colza	1,37	122	50	89	88	41	557	28	138	146	-23

¹. Analyse complétée par FE0580 (FV0030), ². Analyse complétée par FE2800 (FV0810) avec une UEL modifiée de 1,07 ; ³ Résultats issus d'un aliment mélange contenant 47 % de tourteau de lin expeller, 26 % de drêche distillerie <7% amidon, 25% de luzerne à MAT<16% sur sec, 1% de mélasse de betterave et 1% de remoulage blanc de blé tendre sur le logiciel INRAtion 4.07.

Les rations totales ingérées ont des valeurs nutritionnelles différentes entre les groupes (tableau II.6) :

- La ration ingérée par le groupe « G. colza » est la plus dense en énergie avec 1,07 UFL/kg MS, suivi par la ration « Méteil » (1,03 UFL/kg MS) et par la « Témoin » (1 UFL/kg MS). Cependant, par jour, les chèvres du groupe « Témoin » ont ingérés un peu plus d'énergie (2,55 UFL) que celles du groupe « G. colza » (2,52 UFL) grâce à leur ingestion plus élevée de préfané. Les chèvres du groupe « Méteil » ont ingéré 2,39 UFL/j.
- Au niveau des protéines, les 3 rations expérimentales contiennent une teneur par MS comparable de PDIE (86 à 89 g/kg MS) et de PDIN (94 à 97 g/kg MS). La ration « Témoin » semble plus riche en PDIA (41 g/kg MS) et en MAT (157 g /kg MS) que la ration « G. colza » (36 g PDIA/kg MS et 147 g MAT/kg MS) et que la ration « Méteil » (31 g/kg MS et 152 g MAT/kg MS). Par jour, la ration « Témoin » contient le plus de MAT (399 g), de PDIA (104 g), de PDIN (247 g) et de PDIE (226 g) des trois rations. La ration « G. colza » contient légèrement plus de PDIA (84 g) que la ration « Méteil » (73 g). Ces deux rations sont comparables en MAT (348 g et 352 g), PDIE (205 g et 206 g) et PDIN (222 g et 221 g).
- La ration « Témoin » est, de loin, la plus riche en fibres avec 170 g CB et 299 g NDF par kg MS. Les deux autres rations sont comparables avec ~158 g CB et ~273 g NDF/kg MS. Par jour, les chèvres du groupe « Témoin » ont ingéré le plus de fibres avec 433 g CB et 762 g NDF suivis par la ration « G. colza » (376 g CB et 649 g NDF) et la ration « Méteil » (367 g CB et 633 g NDF).
- La ration « Méteil » est la plus riche en amidon (142 g/kg MS) suivi par la ration « G. colza » (118 g/kg MS) et par la ration « Témoin (100 g/kg MS). L'ingestion quotidienne en amidon suit la même tendance avec 330 g/j pour le groupe « Méteil », 278 g/j pour « G. colza » et 253 g/j pour « Témoin ».
- Les rations « G. colza » et « Méteil » ont une teneur en sucres solubles comparable (225 g/kg MS) et supérieure à celle de la ration « Témoin » (215 g/kg MS). Cependant, au total, la ration « Témoin » est la plus sucrée (546 g/j) suivie par la ration « G. colza » (532 g) et par la ration « Méteil » (520 g/j).
- La ration la plus riche en MG est la ration « G. colza » (46 g/kg MS) suivi par la ration « Témoin » (24 g/ kg MS) puis par la « Méteil » (17 g/kg MS). L'ingestion quotidienne en MG suit la même tendance avec 109 g/j dans le groupe « G. colza », 61 g/j pour « Témoin » et 38 g/j pour « Méteil ».
- Tous les Rmic sont positifs. Le Rmic le plus bas (6,18 g PDI/UFL) est celui de la ration des « Méteil ». Celui de la ration « G. colza » est intermédiaire (7,07 g PDI/UFL) et celui de la ration « témoin » est le plus élevé (8,43 g PDI/UFL).
- Inversement, tous les OEB sont légèrement négatifs. La valeur la plus faible est dans le groupe « Méteil » (-18 g/j et -8 g/kg MS) suivi par le groupe « G. colza » (-14 g/j et -6 g/kg MS) et par le groupe « Témoin » (-8 g/j et -3 g/kg MS).

- Le rapport PDIE/UFL est légèrement plus élevé dans le groupe « Témoin » (88,59 g PDI/UFL) suivi par le groupe « Méteil » (86,07 g PDI/UFL) et enfin par le groupe « G. colza » (81,17 g PDI/UFL).

Globalement, au niveau de la production théorique permise, les PDIE sont le facteur limitant pour les trois rations. Le groupe « Témoin » est limité à une production de 3,93 kg de lait STD, le groupe des « G. colza » à 3,43 kg et le groupe « Méteil » à 3,46 kg. Le lait STD est la production standardisée pour des chèvres laitières à un TB de 35 g/kg, un TP de 31 g/kg et 43 g/kg de lait de lactose.

Tableau II.6 : Valeurs nutritionnelles des rations ingérées par kg MS et par jour par chèvre

		Ration			Ration		
		Témoin	G. colza	Méteil	Témoin	G. colza	Méteil
MSI	(kg MS)	2,55	2,37	2,32	2,55	2,37	2,52
		UFL/j ou g/j			UFL/kg MS ou g/kg MS		
UFL		2,55	2,52	2,39	1	1,07	1,03
MAT		399	348	352	157	147	152
PDIA		104	84	73	41	36	31
PDIE		226	205	206	89	86	89
PDIN		247	222	221	97	94	95
CB		433	376	367	170	159	158
Amidon		253	278	330	100	118	142
Sucre		546	532	520	215	225	225
NDF		762	649	633	299	274	273
MG		61	109	38	24	46	17
OEB		-8	-14	-18	-3	-6	-8
		g PDI/UFL					
PDIE/UFL		88,59	81,17	86,07			
Rmic		8,43	7,07	6,18			
Production permise ¹ par :		kg lait STD					
- UFL		4,05	3,97	3,67			
- PDIE		3,93	3,43	3,46			
- PDIN		4,43	3,83	3,80			

¹ En fonction des besoins en UFL et PDI du logiciel INRation 4.07 pour des Saanen multipares en stabulation de 70 kg de PV au 50^{ème} jour de lactation produisant en moyenne 800 L de lait/lactation

2.3.2.2 Production et composition du lait individuel

Tableau II.7 : Production et composition journalières du lait produit (moyenne \pm écart-type de l'échantillon)

		Groupe			Pr (>F) Moyennes égales
		Témoin	G. colza	Méteil	
Production					
Lait	(kg/j)	3,19 ^a \pm 0,19	2,81 ^b \pm 0,21	2,86 ^b \pm 0,20	<0,001
MG	(g/j)	126,29 ^a \pm 15,76	122,22 ^{ab} \pm 22,08	111,34 ^b \pm 22,29	0,016
Protéines	(g/j)	91,12 ^a \pm 10,21	86,96 ^a \pm 11,09	80,72 ^b \pm 13,03	0,003
Lait STD ¹	(kg/j)	3,31 ^a \pm 0,34	3,14 ^{ab} \pm 0,45	2,95 ^b \pm 0,50	0,007
Composition					
TB	(g/100g lait)	4,05 ^a \pm 0,40	4,31 ^b \pm 0,58	3,97 ^a \pm 0,51	0,302
TP	(g/100g lait)	2,91 ^a \pm 0,17	3,08 ^b \pm 0,22	2,84 ^a \pm 0,25	<0,001
TB/TP		1,39 \pm 0,15	1,40 \pm 0,15	1,41 \pm 0,23	0,937
Urée	(mg/L lait)	248,60 ^a \pm 62,60	129,72 ^b \pm 50,30	194,72 ^c \pm 64,92	<0,001

^{a b c} : Pour une ligne, des exposants différents signalent des données significativement différentes à $p \leq 0,05$;

$$^1 : PL_{35} = (0,264 + 0,01375 \times \text{g TB/kg} + 0,00825 \times \text{g TP/kg}) \times PL \quad (18)$$

La production et la composition du lait produit diffèrent entre les groupes (tableau II.7) :

- Le groupe « Témoin » est celui qui produit la plus grande quantité de lait brut (3,19 kg/j) contre 2,91 kg/j pour le groupe « G. colza » et 2,86 kg/j pour le groupe « Méteil ».
- Le lait du groupe « G. colza » a un TB et un TP significativement supérieurs (TB = 43,1 g/kg lait et TP = 30,8 g/kg lait) à ceux des autres groupes (TB = 40,5 g/kg de lait et TP = 29,1 g/kg lait « Témoin » ; TB = 39,7 g/kg lait et TP = 28,4 g/kg lait « Méteil »).
- La quantité de MG sécrétée quotidiennement dans le lait du groupe « Témoin » (126,29 g/j) est significativement supérieure à celle du groupe « Méteil » (111,34 g/j) et est comparable à celle du groupe « G. colza ». (122,22 g/j). Celle du groupe « G. colza » semble également supérieure (p -valeur = 0,065) à celle du groupe « Méteil ».
- La sécrétion quotidienne de protéines est significativement moindre dans le groupe « Méteil » (80,72 g/j) par rapport à celle des deux autres groupes (91,12 g/j pour « Témoin » et 86,96 g/j pour « G. colza »).
- La production en lait STD est significativement inférieure dans le groupe « Méteil » (2,95 kg lait STD/j) par rapport au groupe « Témoin » (3,31 kg lait STD/j). Le groupe « G. colza » a une production en lait STD qui semble intermédiaire (3,14 kg lait STD/j), non significativement différente de celle des deux autres groupes.

- Le rapport TB/TP n'est pas significativement différent entre les groupes et tourne autour de 1,40, bien au-delà du seuil de risque d'inversion de taux de 1,15 (Sauvant et al., 2007).
- La teneur en urée du lait est significativement supérieure dans le groupe « Témoin » (248,6 mg/L lait), intermédiaire dans le groupe « Méteil » (194,72 mg/L lait) et significativement inférieure dans le groupe « G. colza » (129,72 mg/L lait).

2.3.2.3 Profil en AG du lait mélangé

Tableau II.8 : Profil en AG du lait en % AG dosés

	Nom	Groupe		
		Témoin	G. colza	Méteil
C6:0	Caproïque	2,83	2,76	2,90
C8:0	Caprylique	3,56	3,26	3,58
C10:0	Caprique	12,16	9,97	11,30
C12:0	Laurique	5,28	3,90	4,63
C13:0	Tridécyclique	0,17	0,14	0,16
C14:0	Myristique	13,21	10,52	11,25
C14:1 <i>cis</i> 9	Myristoléique	0,13	0,09	0,08
C15:0	Pentadécyclique	0,91	0,87	0,91
C16:0	Palmitique	29,69	23,68	23,40
C16:1 <i>trans</i> 9		0,13	0,13	0,13
C16:1 <i>cis</i> 9	Palmitoléique	0,68	1,58	0,48
C17:0	Margarique	0,95	0,84	0,88
C18:0	Stéarique	7,82	14,39	14,62
C18:1 <i>trans</i> 9	Élaïdique	0,12	0,21	0,18
C18:1 <i>trans</i> 11	<i>Trans</i> -vaccénique (VA)	0,55	0,65	0,76
C18:1 <i>cis</i> 9	Oléique	16,53	22,39	18,91
C18:1 <i>cis</i> 11		0,43	0,49	0,40
C18:2 <i>c9 c12</i>	Linoléique (LA)	2,11	2,35	2,14
C18:3 <i>c6 c9 c12</i>	γ -linoléique (GLA)	0,01	0,01	0,01
C18:3 <i>c9,c12 c15</i>	α -linoléique (ALA)	1,61	1,52	2,05
C18:2 conj <i>c9 t11</i>	Ruménique (ALC)	0,24	0,22	0,25
C18:4 <i>c6 c9 c12 c15</i>	Stéaridonique	0,02	0,02	0,03
C19:0	Nonadécyclique	0,14	0,15	0,18
C20:0	Arachidique	0,10	0,23	0,17
C20:1c11	11-eicosénoïque	0,02	0,04	0,02
C20:3 <i>c11 c14 c17</i>		0,02	0,02	0,02
C20:4 <i>c5 c8 c11 c14</i>	Arachidonique (AA)	0,08	0,08	0,07

C20:5 <i>c5 c8 c11 c14 c17</i>	Eicosapentaénoïque (EPA)	0,10	0,10	0,11
C22:0	Béhénique	0,05	0,07	0,06
C22:5 <i>c7 c10 c13 c16 c19</i>	Clupanodonique (DPA)	0,21	0,19	0,19
C22:6 <i>c4 c7 c10 c13 c16 c19</i>	Docosahexaénoïque	0,07	0,06	0,06
C24:0	Lignocérique	0,02	0,02	0,02
(C6:0 ; C8:0, C10:0)		18,55	15,99	17,79
(C12:0 ; C14:0, C16:0)		48,18	38,10	39,29
(C13:0 ; C15:0, C17:0)		2,04	1,85	1,94
C6 – C14		37,36	30,64	33,92
C18 - C24		30,23	43,20	40,24
Total AGS		76,91	70,81	74,10
Total AGMI		18,60	24,59	20,96
<i>Trans</i> -AGMI		1,05	1,22	1,32
Total AGPI		4,46	4,57	4,92
Total C18		29,45	42,27	39,35
▪ C18:0 (% Total C18)		26,56	34,05	37,16
▪ C18:1 <i>t11</i> (% Total C18)		1,88	1,55	1,93
▪ C18:2 conj <i>c9t11</i> (% Total C18)		0,82	0,53	0,63
▪ <i>Trans</i> C18 (% Total C18)		3,12	2,58	3,03
Oméga-9		16,67	22,64	19,12
Oméga-6		2,20	2,44	2,22
Oméga-3		1,73	1,64	2,18
LA/ALA		1,31	1,54	1,04
n-6/n-3		1,27	1,48	1,02
ALC/VA		0,43	0,34	0,33

Le profil en AG du lait, en % sur les AG totaux dosés, diffère entre les groupes (Tableau II.8). En comparant la longueur des AG, il ressort que :

- Le lait du groupe « Témoin » contient la plus haute teneur en AG courts et moyens (C6-C14) avec 37,36% contre seulement 33,92% dans le lait du groupe « Méteil » et 30,64% dans celui du groupe « G. colza ». Il contient aussi la plus haute teneur en C16:0 (29,69%) alors que les laits des deux autres groupes n'en contiennent qu'environ 23,5%.
- Le lait du groupe « Témoin » a la plus haute teneur en AG typiques du lait de chèvre (C6:0, C8:0 et C10:0) avec 18,55% suivi, de peu, par celui du groupe « Méteil » (17,79%). Le lait du groupe « G. Colza » semble en contenir le moins (15,99%).
- Le lait du groupe « Témoin » contient, de loin, le plus d'AG C12:0, C14:0 et C16:0 (48,18%) alors que les laits du groupe « G. colza » et « Méteil » n'en contiennent respectivement que 38,1% et 39,29%.

- Le lait du groupe « Témoin » semble contenir plus d'AG d'origine microbienne (C13:0, C15:0 et C17:0) avec 2,04% contre 1,94% dans celui de « Méteil » et 1,85% dans celui de « G. colza ».
- Le lait du groupe « Témoin » contient le moins d'AG longs (C18 à C24) avec seulement 30,23%. Le lait le plus riche en AG longs est celui du groupe « G. Colza » (43,2%) suivi par le lait du groupe « Méteil » (40,24%).

Au niveau du degré d'insaturation :

- Le lait du groupe « Témoin » contient, au total, le plus haut pourcentage d'AGS (76,91%) alors que le lait du groupe « G. colza » n'en contient que 70,81% et celui du groupe « Méteil » 74,1%.
- Le lait du groupe « G. colza » est le plus riche en AGMI (24,59%) suivi par celui du groupe « Méteil » (20,96%) et par celui du groupe « Témoin » (18,6%).
- Le lait du groupe « Méteil » semble légèrement plus riche en AGPI (4,92%) que le celui des deux autres groupes (4,57% pour « G. colza » et 4,46% pour « Témoin »).

Pour les AG insaturés :

- Le lait du groupe « G. colza » présente la plus forte teneur en oméga-9 (22,64%) et en oméga-6 (2,44%) mais la plus faible teneur en oméga-3 (1,64%). Ce lait a donc le plus haut ratio n-6/n-3 avec 1,48.
- Le lait du groupe « Méteil » présente le plus faible ratio n-6/n-3 (1,02) car il contient la plus forte teneur en oméga-3 (2,18%). Sa teneur en oméga-6 (2,22%) est comparable à celle du groupe du groupe « Témoin » (2,20%) et sa teneur en oméga-9 est intermédiaire (19,12%).
- Le lait du groupe « Témoin » contient une teneur intermédiaire en oméga-3 (1,73%) et présente donc un ratio n-6/n-3 intermédiaire (1,27). Ce lait contient la plus faible part d'oméga-9 (16,67%).

Au niveau des C18 :

- Le lait du groupe « G. colza » contient la plus haute teneur en C18 totaux avec 42,27%, suivi par celle du lait du groupe « Méteil » (39,35%), loin devant celle du lait du groupe « Témoin » (29,45%).
- Parmi ces C18, le lait du groupe « Témoin » semble contenir une plus faible part de C18:0 (26,56% sur les C18 totaux) contre 34,05% pour le lait du groupe « G. colza » et 37,16% pour celui du groupe « Méteil ». En comparant avec les AG totaux dosés, le lait du groupe « Témoin » ne contient que 7,82% de C18:0 alors que les laits des groupes « G. colza » et « Méteil » en contiennent respectivement 14,39% et 14,62%.

Concernant les AG *trans* :

- Le lait du groupe « Méteil » semble contenir le plus de *trans*-AGMI avec 1,32% contre 1,22% pour le lait du groupe « G. Colza » et 1,05% pour le lait du groupe « Témoin ».

- Sur les AG totaux dosés, la différence se fait principalement au niveau de l'AG *trans*-vaccénique (VA). Le lait du groupe « Méteil » en contient 0,76% contre 0,65% dans celui du groupe « G. colza » et 0,55% dans celui du groupe « Témoin ». La différence est moins marquée pour l'acide ruménique (ALC) : le lait du groupe « G. colza » semble en contenir moins (0,22%) que le lait des deux autres groupes (0,24% pour « Témoin » et 0,25% pour « Méteil »).
- En comparant uniquement sur les C18 dosés, le lait du groupe « Témoin » présente le plus de *trans* C18 (3,12% dont 1,88% de VA et 0,82% d'ALC), suivi par celui du groupe « Méteil » (3,03% dont 1,93% de VA et 0,63% d'ALC), puis par celui du groupe « G. colza » (2,58% dont 1,55% de VA et 0,53% d'ALC).
- Le groupe « Témoin » présente le plus haut ratio de désaturation avec un rapport ALC/VA de 0,43 contre 0,34 dans le groupe « G. colza » et 0,33 dans le groupe « Méteil ».

2.3.2.4 Production fromagère et composition des mélanges de lait

Le lait de la traite du mercredi matin a été destiné à la fabrication des fromages. Le lait du groupe « G. colza » avait le TB et le TP les plus élevés avec respectivement 33,9 g/kg lait et 29,8 g/kg lait (Tableau II.9) et possédait ainsi le taux de matières utiles (TB + TP) le plus élevé (63,7 g/kg lait contre 60,2 g/kg lait pour le groupe « Témoin » et 59,3 g/kg lait pour le groupe « Méteil »). Les 10 kg du lait mis en production fromagère ont permis de produire 1,863 kg de fromage dans le groupe « Témoin », 1,954 kg dans le groupe « G. colza » et 1,867 kg dans le groupe « Méteil ». Tous ces fromages avaient environ 30 % de MS. Le rendement en sec est le plus élevé dans le groupe « G. colza » (5,98 kg MS/100 kg lait) suivi par le groupe « Témoin » (5,83 kg MS/100 kg lait) et par le groupe « Méteil » (5,56 kg MS/100 kg lait).

Tableau II.9 : Composition du lait récolté le mercredi matin destiné à la fabrication fromagère, MS des fromages et rendement fromager en kg et en kg MS/100 kg lait

		Groupe		
		Témoin	G. Colza	Méteil
Composition				
TB	g/100 g lait	3,21	3,39	3,08
TP	g/100 g lait	2,81	2,98	2,85
Taux de matières utiles	g/100 g lait	6,02	6,37	5,93
TB/TP		1,14	1,14	1,08
Urée	mg/L lait	198	104,1	159,3
Rendement fromager				
MS fromage	(%)	30,73	30,62	29,80
Rendement en frais	(kg/100 kg lait)	18,63	19,54	18,67
Rendement en sec	(kg MS/100 kg lait)	5,73	5,98	5,56

Une partie des fromages produits a servi au test organoleptique. Parmi tous les critères composant ce test sensoriel (Annexe D), seule la friabilité d'un point de vue visuel s'est révélée significativement différente entre les groupes (tableau II.10). Les goûteurs ont trouvé que les fromages issus du lait du groupe « Témoin » étaient légèrement plus friables (note de 2,86 sur une échelle de 1 à 5 : 1 = cohérent, 5 = friable) alors qu'ils ont jugé les fromages issus du lait du groupe « Méteil » légèrement plus cohérents (2,11) et ceux issus du lait du groupe « G. colza » intermédiaires (2,45).

De manière générale, les 50 goûteurs ont trouvé que les fromages avaient une couleur légèrement blanche à crème et qu'ils n'étaient ni secs ni humides. Au niveau de la texture visuelle, ils ont trouvé qu'ils étaient à moitié collants et que leur granulométrie était légèrement fine. Leur odeur a été jugée légère et assez agréable. En bouche, les fromages ont été trouvés onctueux et assez mous. Leur texture a été jugée relativement cohérente, à moitié collante et d'une granulométrie assez fine. Au goût, ils ont été jugés faiblement à modérément acides et salés, faiblement sucrés et amers et modérément typiques pour des fromages de chèvre. L'arrière-goût était faible et moyennement agréable. De manière générale les fromages ont été jugés assez agréables. La différence organoleptique entre les fromages est très faible (figure II.2).

Figure II.2 : Résultat des critères de l'analyse sensorielle des fromages issus du lait des 3 groupes

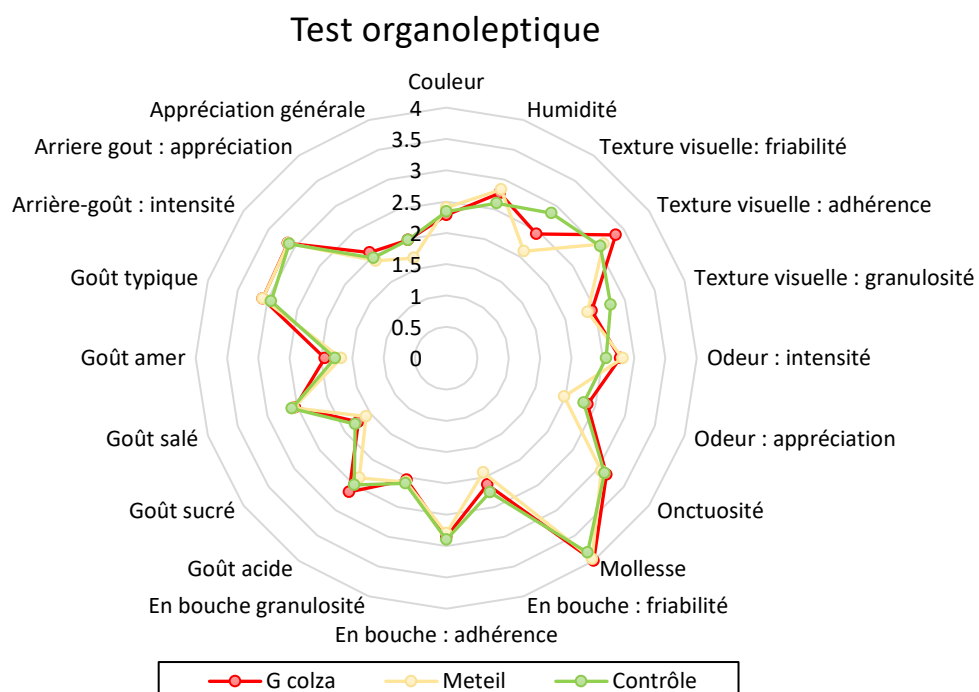


Tableau II.10 : Résultats du test sensoriel des fromages (moyenne \pm écart-type de l'échantillon, n=50).

Critère (Voir Annexe D)		Groupe			Pr (>F) Moyennes égales
		Témoin	G. colza	Méteil	
Visuel	Couleur	2,34 \pm 0,82	2,29 \pm 0,82	2,40 \pm 0,86	0,792
	Humidité	2,60 \pm 0,83	2,77 \pm 0,93	2,83 \pm 0,94	0,426
	Friabilité	2,86 ^b \pm 1,12	2,45 ^{ab} \pm 1,04	2,11 ^a \pm 0,85	0,002
	Adhérence	3,04 \pm 1,03	3,35 \pm 1,03	3,10 \pm 1,15	0,328
	Granulosité	2,76 \pm 1,04	2,44 \pm 1,07	2,37 \pm 0,98	0,143
Odeur	Intensité	2,55 \pm 0,87	2,78 \pm 1,00	2,82 \pm 0,86	0,304
	Appréciation	2,31 \pm 0,98	2,38 \pm 1,02	1,98 \pm 1,01	0,126
En bouche	Onctuosité	3,12 \pm 0,90	3,16 \pm 0,72	3,06 \pm 0,68	0,800
	Mollesse	3,84 \pm 1,09	4,00 \pm 0,87	3,96 \pm 0,98	0,693
	Friabilité	2,25 \pm 1,10	2,12 \pm 1,11	1,92 \pm 0,85	0,279
	Adhérence	2,90 \pm 1,21	2,85 \pm 1,25	2,80 \pm 1,31	0,922
	Granulosité	2,10 \pm 1,02	2,04 \pm 1,01	2,08 \pm 1,31	0,955
Goût	Acidité	2,50 \pm 1,09	2,64 \pm 0,92	2,36 \pm 0,87	0,353
	Sucré	1,80 \pm 0,84	1,73 \pm 0,81	1,58 \pm 0,61	0,348
	Salé	2,59 \pm 0,67	2,54 \pm 0,71	2,56 \pm 0,70	0,933
	Amer	1,78 \pm 0,87	1,94 \pm 1,02	1,68 \pm 0,89	0,370
	Typicité	2,94 \pm 0,82	3,08 \pm 0,86	3,08 \pm 0,83	0,626
Arrière-goût	Intensité	3,10 \pm 1,07	3,12 \pm 1,03	3,12 \pm 1,00	0,993
	Appréciation	1,98 \pm 1,00	2,08 \pm 1,00	1,92 \pm 0,91	0,702
Appréciation générale		1,98 \pm 1,08	1,98 \pm 0,96	1,68 \pm 0,77	0,189

^{a b} : Pour une ligne, des exposants différents signalent des données significativement différentes à $p \leq 0,05$

2.3.2.5 Variation du poids des chèvres

Rappelons que les pesées ne furent pas aussi précises que nous l'aurions souhaité. En moyenne, en 6 semaines, les chèvres de l'expérience, en début de lactation, ont perdu de l'ordre de 4 kg peu importe le groupe (Tableau II.12).

Tableau II.11 : Evolution du poids en kg des chèvres entre le 4 mars et le 13 avril

		Groupe			Pr (>F) Moyennes égales
		Témoin	G. colza	Méteil	
Poids 04/03/2019	kg	71 \pm 8	70 \pm 9	71 \pm 7	0,955
Poids 13/04/2019	kg	67 \pm 7	66 \pm 9	66 \pm 7	0,966
Variation	kg	- 4 \pm 7	- 4 \pm 3	- 4 \pm 4	0,984

2.3.3 Discussion

2.3.3.1 *Ingestion et production en lait standard*

L'objectif principal de ce travail était de proposer des rations équilibrées permettant aux éleveurs de la chèvrerie de la Baillerie d'être en autonomie alimentaire toute l'année tout en atteignant leurs objectifs de production (3L/j en moyenne sur la lactation ; 3,5L/j en début de lactation). Toutes les rations testées étaient suffisamment équilibrées pour couvrir les besoins en protéines et en énergie d'une production de 3L de lait/j mais seule la ration « Témoin » permettait de couvrir la production visée à ce stade de la lactation de 3,5 L/j.

Toutes les productions permises en lait STD par les rations ingérées étaient limitées par les PDIE. Les teneurs en PDIE et en PDIN par kg de MS étaient, au départ, comparables dans les trois groupes (86 à 89 g PDIE et 94 à 97 g PDIN/kg MS) mais les quantités de PDIE et de PDIN ingérées par jour se sont révélées différentes à cause de la variation dans les ingestions quotidiennes du préfané. Les chèvres du groupe « Témoin » ont eu la production permise la plus élevée (3,93 L de lait/j) car ce sont celles qui ont ingéré le plus de préfané, donc le plus de MS par jour, donc le plus PDIE par jour. Les fourrages, en particulier le préfané car il était à volonté, ont fortement influencés la valeur nutritionnelle des différentes rations ingérées car, au départ, les teneurs en PDIE et PDIN des concentrés variaient d'un groupe à l'autre.

Théoriquement, avec les protéines et l'énergie amenées par l'ingestion de leur ration, les chèvres du groupe « Témoin » auraient pu produire 3,93 kg de lait STD/j, celles du groupe « G. colza » 3,43 kg lait STD/j et celles du groupe « Méteil » 3,46 kg lait STD/j. Toutes les productions brutes mesurées, ramenées en lait STD, ont été inférieures à ces valeurs. La différence entre la production théoriquement permise et la production brute en lait STD était plus élevée dans les groupes « Témoin » (0,62 kg lait STD) et « Méteil » (0,51 kg lait STD) mais moindre dans le groupe « G. colza » (0,29 kg lait STD). Les productions laitières étaient limitées par l'apport en PDIE qui dépendait principalement de la quantité de fourrages ingérés. Cependant, comme ils étaient distribués collectivement à l'auge, il n'est pas possible de connaître l'ingestion individuelle des chèvres des différents fourrages. Les 11 chèvres de chaque groupe n'ont donc peut-être pas eu une ingestion équivalente.

Comme l'avait montré la pré-expérience, la valorisation des graines de colza n'est pas totale. Il se pourrait donc que la production permise par la ration du groupe « G. colza » soit plus faible, en réalité, que celle obtenue par calcul. Cette moindre valorisation pourrait avoir limité d'autant plus la production de lait par l'apport alimentaire en PDIE. En recalculant les valeurs nutritionnelles de cette ration en considérant une valorisation des graines de 50 %, la production permise est réduite à 3,70 kg lait STD/j par les UFL, 3,30 kg de lait STD/j par les PDIE et à 3,60 kg lait STD/j par les PDIN. La production effective serait alors très proche de celle théoriquement permise par les PDIE (différence de 0,16 kg lait STD), dans la mesure où la valorisation digestive des graines de colza a pu être surévaluée. Le pressage des graines de

colza en tourteaux gras aurait dû permettre d'améliorer cette valorisation digestive mais ceux-ci ont présenté de forts soucis d'ingestion lors de l'expérience, forçant le retrait de ce groupe.

Pour les groupes « Témoin » et « Méteil », la production effective ne coïncide pas avec la production permise par leur ration. Outre la possibilité d'une valorisation digestive moindre qu'attendue, d'autres explications peuvent expliquer cet écart. Celui-ci est d'autant plus interpellant car les chèvres ne semblent pas avoir spécialement pris du poids, même le contraire, alors que leurs apports alimentaires semblaient être bien supérieurs à leurs besoins. Le système UFL/PDI de 2007 de l'INRA pourrait sous-estimer les besoins des chèvres et/ou surestimer la valeur alimentaire de certains aliments. De même, les analyses IR des fourrages peuvent avoir surévalué les valeurs alimentaires de ceux-ci. Enfin, les refus n'ont peut-être pas été intégralement ramassés, surévaluant la quantité réellement ingérée par les chèvres.

D'après les analyses IR, l'ensilage enrubanné d'herbe préfanée produit à la Baillerie et servant de fourrage principal a une bonne composition nutritionnelle. Ce préfané est particulièrement riche en énergie (0,89 UFL/kg MS), en MAT (178 g/kg MS), en PDIN (111 g/kg MS) et en PDIE (85 g/kg MS). Ainsi, peu de fourrages alternatifs pourraient améliorer significativement ces valeurs d'après les caractéristiques de ceux retrouvés des tables alimentaires de l'INRA (2007). Cependant, le préfané de la Baillerie semble pauvre en fibres avec seulement 236 g CB et 427 g NDF par kg MS alors que ceux des tables ont des valeurs variables mais généralement plus proches des ~ 300 g CB et ~ 500 g NDF par kg MS.

Le foin de l'expérience, distribué en quantité restreinte aux chèvres, est, en comparaison avec ceux des tables alimentaires de l'INRA (2007), riche en énergie (0,82 UFL/kg MS) et en PDIE (89 g/kg MS). Il présente, par contre, des teneurs ordinaires en MAT (106 g/kg MS) en PDIN (70 g/kg MS) et en fibres (263 g CB et 509 g NDF/kg MS). Les PDIN, les MAT et les fibres pourraient être améliorées, sans impacter les PDIE, en passant à un foin de luzerne mais celui-ci aurait réduit sa densité énergétique.

La valeur nutritionnelle des rations ingérées quotidiennement a été moins bonne lors de l'expérience que les estimations faites par le logiciel INRA 4.07 pour des Saanen multipares de 70 kg en stabulation au 50^e jour de leur lactation produisant 3,5 L de lait/j et 800 L de lait/lactation car la quantité de préfané ingérée a été moindre que dans les estimations. Les chèvres auraient dû, selon le logiciel, ingérer près 2,56 kg MS alors qu'elles n'ont ingéré que 2,32 kg MSI/j et 2,37 kg MSI/j dans les groupes « Méteil » et « G. colza ». Seul le groupe « Témoin » s'en rapproche avec 2,55 kg MSI/j. Si l'ingestion réelle avait été la même celle du logiciel, les productions permises par les PDIE, facteur limitant, auraient été de 3,95 kg lait STD/j dans le groupe « Témoin », 3,80 kg dans le groupe « G. colza » et de 3,95 kg dans le groupe « Méteil ». Les ingestions constatées du groupe « Méteil » et « G. colza » se rapprochent davantage de la valeur obtenue avec l'équation (4), disponible depuis la mise

à jour du système de rationnement de l'INRA (2018), de 2,39 kg MSI/j pour des chèvres produisant 3,5 L de lait STD/j, de 70 kg de PV et ingérant 0,51 kg MS de concentré/j.

La fibrosité des rations expérimentales était inférieure aux seuils recommandés par l'Institut de l'élevage (2011) pour des chèvres en début de lactation. La part de cellulose brute dans la MS était comprise entre 15,8% (« Méteil ») et 17,0% (« Témoin ») alors qu'ils recommandent au minimum 18% de CB sur la ration totale. De même, la part de NDF totale était comprise entre 27,3% (« Méteil ») et 29,9% (« Témoin ») alors que les seuils recommandés sont de minimum 35%. La part de NDF amenée par les fourrages sur la MSI totale n'atteignait le seuil de minimum 25% que dans le groupe « Témoin » alors qu'elle était de 24,4% dans le groupe « G. colza » et de 24,2% dans le groupe « Méteil ». Sauf pour la part de NDF totale, les valeurs restent tout de même assez proches des seuils recommandés. L'INRA (2018), suggère que les rations contiennent entre 300 et 500 g de NDF/kg MSI pour une bonne mastication. La ration « Témoin » était la plus proche de ce seuil avec 299 g NDF/kg MSI. Les autres rations ne comprenaient que 273 à 274 g de NDF/kg MSI. Un manque de fibres alimentaires peut diminuer le pH du rumen suite à un manque de mastication. La mastication permet aux chèvres d'avaler de la salive contenant des ions bicarbonate pour tamponner le rumen, permettant de maintenir son pH compris entre 6,2 à 6,8. Lors de l'expérience, aucun souci digestif n'a été observé, sans doute grâce au fait que ces seuils ont été calculés avec une marge de sécurité, mais aussi grâce au fait que les rations proposées étaient riches en fourrages grossiers, augmentant la fibrosité physique de la ration.

La part de sucre et d'amidon était au-deçà des seuils recommandés par l'Institut de l'élevage (2011) de maximum 30% de la ration en MS. La ration la plus riche en sucre et amidon (36,7%) était la ration « Méteil » car elle était la moins riche en fourrages, suivie par la ration « G. colza » (34,2%) et par la ration « Témoin » (31,4%). Toutes les rations expérimentales étaient donc à risque d'engendrer une acidose sub-clinique. Aucune n'a été observée pendant l'expérience ni aucune chute anormale du TB. Cependant, aucune mesure ne permet d'attester que des chutes du pH ruminal ne sont pas survenues, limitant l'ingestion. Les teneurs estimées par l'analyse IR des sucres solubles dans les fourrages semblent élevées dans les fourrages analysés par rapport aux tables. Une partie des « sucres » dosés pourraient ne pas en être.

Le rapport PDIE/UFL était inférieur à celui recommandé par l'INRA (2007) de 92 à 95 g de PDI/UFL en début de lactation pour tous les groupes. Les chèvres qui avaient des réserves lipidiques insuffisantes étaient donc à risque de mobiliser leurs réserves protéiques. Les pesées laissent penser que les chèvres ont perdu environ 4 kg lors du début de lactation, perte normale à ce stade, sauf en cas d'apports alimentaires supérieurs aux besoins comme ici. Certaines chèvres ont donc peut-être perdu de la masse protéique qui sera plus difficile à récupérer que de la masse lipidique plus tard dans la lactation.

La comparaison du système français (PDI) avec le système néerlandais montre des incohérences. D'après le système français, les rations contenaient près de 10 g de PDIN de plus que de PDIE sur la MS. Ainsi, l'énergie fermentescible, et non l'azote, aurait été le facteur limitant de la synthèse de protéines microbiennes. D'après le système néerlandais, l'OEB des trois rations testées était légèrement négatif, signifiant que la synthèse microbienne serait davantage limitée par l'azote que par l'énergie fermentescible. D'après Dulphy et al. (1995), les chèvres produisent davantage de salive que les bovins et ovins et leur population microbienne ruminale semble avoir une meilleure capacité à utiliser des concentrations faibles d'ammoniac. Ainsi, elles auraient, sans doute, un meilleur recyclage ruminal de l'azote. Les chèvres pourraient donc mieux s'en sortir avec cet OEB négatif que d'autres espèces, même si les teneurs en urée mesurées dans le lait semblent indiquer le contraire.

Si toutes les rations étaient calculées pour être correctement équilibrées avant l'expérience, la transition du concentré habituel vers un autre n'a pas été une tâche facile. Les aliments testés n'avaient jamais été goûtés par les chèvres de la Baillerie avant l'expérience. Celles-ci ne connaissaient que leurs concentrés et fourrages habituels. Les chèvres les plus gourmandes ou curieuses ont goûté les nouveaux aliments mais certaines ont rechigné à mettre le nez dedans. Comme déjà mis en évidence par l'Institut de l'élevage (2012), il semble difficile d'introduire de nouveaux aliments chez des chèvres adultes qui ne les ont jamais goûtés auparavant. L'ajout de mélasse, pour améliorer l'appétence des nouveaux concentrés, n'a pas été testé car des essais préalables avec de la mélasse s'étaient révélés infructueux à la ferme de la Baillerie.

2.3.3.2 *Production et composition du lait*

D'après Serment et al. (2010), la production de lait brut devrait croître avec l'augmentation du contenu énergétique de la ration, quand l'énergie est limitante, sans impacter le TP, car la sécrétion de protéines augmente, mais diluant le TB car la sécrétion de MG reste stable. Dans les rations expérimentales, l'énergie n'était pas le facteur limitant. Dans ce cas-ci, où les protéines sont le facteur limitant, la quantité de protéines brutes peut, sous un certain seuil, réduire la quantité de lait produite (Flamant et Morand-Fehr, 1982). La ration « Méteil » a amené le moins d'énergie par jour, expliquant une moindre production en lait brute par rapport au groupe « Témoin ». Les apports en UFL/j étaient plus élevés et comparables dans les rations « Témoin » et « G. colza ». Cependant, la production en lait brut du groupe « Témoin » était aussi significativement plus élevée que celle du groupe « G. colza ». Deux raisons peuvent expliquer ces observations :

- Comme l'a montré la pré-expérience, la valorisation digestive des graines de colza n'est pas totale ; l'apport énergétique de la ration « G. colza » a donc pu être surestimé.

- La ration « G. colza » était davantage limitée par les PDIE que la ration « Témoin ». La production de lait brut a pu être pénalisée par le manque de protéines alimentaires. En effet, cette ration apportait moins de MAT, de PDIE et de PDIN par jour que la « Témoin ».

La sécrétion quotidienne de protéines dans le lait était comparable entre les groupes « Témoin » et « G. colza » et significativement inférieure dans le groupe « Méteil ». Ces mesures concordent avec les observations de Serment et al. (2010) : même si les UFL ne sont pas le facteur limitant, l'augmentation des apports en énergie semblent avoir augmenté la sécrétion de protéines dans le lait.

La sécrétion quotidienne de MG dans le lait était différente entre les groupes. D'après Serment et al. (2010), elle aurait dû rester stable lors de l'augmentation du contenu énergétique. Dans cette expérience, la sécrétion de MG a été plus élevée dans le groupe « Témoin » que dans le groupe « Méteil ». Celle du groupe « G. colza » n'était pas significativement différente de celle des deux autres groupes. L'augmentation de la sécrétion lipidique peut être reliée à la teneur en MG alimentaire. D'après Chapoutot et Sauvant (1997), le TB du lait semble atteindre un maximum lorsque l'on atteint les 190 g de MG alimentaire par jour. Aucune des rations testées ne contenait autant de MG alimentaires. Ainsi, le TB aurait donc dû augmenter en fonction du contenu en MG alimentaires. La ration « Méteil » était moins riche en MG (38 g/j) que la ration « Témoin » (61 g/j), pouvant expliquer la différence de sécrétion des MG dans le lait de ces deux groupes. La ration « G. colza » était la plus riche en MG (109 g/j), en théorie, mais cette MG n'a peut-être pas été entièrement valorisée (cfr. Pré-expérience), expliquant la différence non significative la MG sécrétée dans le lait. Globalement, les rations « Contrôle » et « Méteil » avaient un TP et un TB comparables car les chèvres « Témoin » ont produit plus de lait brut mais elles ont aussi sécrété plus de MG et de protéines que celles du groupe « Méteil ».

Les chèvres de l'expérience avaient toutes des niveaux d'urée dans le lait inférieurs aux valeurs moyennes de 300 à 400 mg/L pour le lait de chèvre (Frantz, 2009). Ces teneurs sont très difficiles à interpréter à cause de la grande variabilité entre individus. Les chèvres du groupe « Témoin » semblaient, cependant, avoir une teneur significativement supérieure (248,6 mg/L de lait) à celles des deux autres rations, sans doute à cause d'une plus grande ingestion d'azote. Le Rmic de la ration contrôle était effectivement légèrement supérieur (8,43 g PDI/UFL) à celui des deux autres rations (7,07 g PDI/UFL pour « G. colza » et 6,18 g PDI/UFL pour « Méteil »). Bien que le groupe « Méteil » présente le plus faible Rmic, les teneurs mesurées en urée dans le lait de ce groupe sont intermédiaires. Ces teneurs peuvent être causées par des variations entre les individus, les mesures n'ayant été faites que sur 11 chèvres.

D'après le Rmic, la synthèse de protéines microbiennes dans le rumen est limitée par l'énergie fermentescible alors que le système hollandais montre plutôt une limitation de la synthèse

microbienne par l'azote avec l'OEB négatif. Les faibles teneurs d'urée dans le lait des chèvres mesurées dans cette expérience, par rapport aux valeurs moyennes, montrent effectivement un déséquilibre dans le rumen et va plutôt dans le sens d'un manque d'azote pour les micro-organismes du rumen. Des valeurs d'OEB négatives, comme observées dans toutes les rations de l'expérience, devraient être évitées à court et long terme car elles empêchent d'atteindre la production maximale de protéines microbiennes (Hoekstra, 2016).

2.3.3.3 Profil en acides gras du lait

Le lait du groupe « Témoin » contient la proportion la plus élevée d'acides gras courts et moyens et la moins élevée d'AG longs, suggérant une synthèse lipidique *de novo* plus intense. Ainsi, ce lait contient plus d'AGS que les deux autres. Il contient également légèrement plus d'AG d'origine microbienne, peut-être grâce à l'ingestion plus élevée de préfané des chèvres de ce groupe.

Le profil en AG du groupe « G. colza » concorde avec les observations d'Ollier et al. (2009) et de Delmotte et al. (2006), l'apport de graines entières de colza a réduit les teneurs en AG courts et moyens saturés et monoinsaturés, a augmenté les C18:0 et les *cis*-9 C18 sans impacter les ALC et *trans* C18:1. Ce lait est le plus riche des trois en oméga-9, mais aussi en oméga-6. Ainsi, il contient davantage d'AGMI et moins d'AGS que le lait des chèvres ayant consommé les deux autres rations. Comme ce lait contient une teneur comparable AG *trans* C18:1 et en ALC, AG intermédiaires de la biohydrogénation, et davantage de C18:0 et C 18:1 que les autres rations, la biohydrogénation des graines de colza semble avoir été complète. L'apport de graines entières a permis une libération progressive des MG alimentaires, laissant suffisamment de temps aux micro-organismes pour les hydrogéner. Aussi, comme le laissent passer les teneurs en AG microbiens, les micro-organismes ne semblent pas avoir été affectés négativement par les MG alimentaires. Même si les graines de colza n'ont pas été entièrement valorisées (cfr. Pré-expérience), elles ont tout de même influencé le profil en AG.

La ration du groupe « Méteil » apportait le moins de MG alimentaires. Le lait produit par les chèvres de ce groupe contenait légèrement plus d'AGPI, lui octroyant le plus faible ratio n-6/n-3. La synthèse lipidique *de novo* ne semble pas être aussi importante que dans le groupe « Témoin » mais légèrement supérieure à celle du groupe « G. colza ». Les teneurs en AG courts, moyens et longs étaient intermédiaires dans le lait de ce groupe par rapport à celles du lait des deux autres groupes mais elles étaient plus proches de celles du lait des chèvres du groupe « G. Colza ». Ainsi, ce lait contient une teneur intermédiaire d'AGS et d'AGMI. Ce lait contient presque autant de C18 que le lait du groupe « G. colza » alors que les chèvres ont ingéré une ration pauvre en MG. Une partie de ces AG provient sans doute des fourrages mais d'autres pourraient provenir d'une mobilisation corporelle, peut-être plus intense. Cependant, ces chèvres ne semblent pas avoir maigri davantage.

La biohydrogénation ruminale peut-être évaluée en comparant les teneurs en C18:0, C18:1, C18:1 *t11* et ALC par rapport au total des C18. Le lait du groupe « Témoin » présentait la plus faible part de C18:0 et la plus grande part d'AG *trans* C18 parmi le total C18. Ces valeurs semblent indiquer que la bio-hydrogénation n'était pas complète car ce lait contiendrait le moins de produits finaux et le plus de produits intermédiaires de la biohydrogénation. A l'inverse, le lait du groupe « G. colza » contenait plus d'un tiers de C18:0 parmi les C18 et le moins d'AG *trans* 18, indiquant une bio-hydrogénation plus complète. Le lait du groupe « Méteil » contenait le plus de C18:0 et une valeur intermédiaire, mais plus proche de celle du groupe « Témoin », pour les AG *trans* C18. Ainsi, les chèvres de ce groupe semblent avoir eu une forte bio-hydrogénation ruminale des MG mais pas toujours complète.

Le lait du groupe « Témoin » contient le plus grand ratio de désaturation (ALC/VA) avec 0,43 contre 0,34 pour le groupe « G. colza » et 0,33 dans le groupe « Méteil ». Les ALC, composés intermédiaires de la bio-hydrogénation ruminale, retrouvés dans le lait peuvent provenir d'un flux digestif direct depuis le rumen ou d'un flux digestif de VA, désaturé partiellement dans les glandes mammaires. En considérant une désaturation des C18:1 *t11* en ALC identique dans les glandes mammaires des chèvres de chaque groupe, l'augmentation de ce ratio suggère un flux d'ALC depuis le rumen supérieur dans le groupe « Témoin » par rapport à celui des autres groupes.

La différence du profil en AG des laits entraîne un impact différent de ceux-ci sur la santé des consommateurs. Le lait du groupe « Témoin » est le plus riche en AG C12:0, C14:0 et C16:0, AG connus pour augmenter les risques cardio-vasculaires lorsqu'ils sont consommés à l'excès (Conseil Supérieur de la Santé, 2016). L'AG C16:0 est le plus délétère des trois, or, le lait du groupe « Témoin » en contient près de 6% de plus sur les AG totaux dosés par rapport aux deux autres laits. Au niveau des oméga, le lait issu du groupe « Méteil » serait le plus adapté pour des populations occidentales car il contient davantage d'oméga-3 par rapport aux oméga-6. Au contraire, le lait du groupé « G. colza » présente le ratio n-6/n-3 le moins favorable pour une population occidentale consommant généralement trop peu d'oméga-3. Cependant, les différences sont relativement faibles et tous les laits de l'expérience ont un ratio n-6/n-3 bien inférieur (1,02 à 1,48) à la valeur limite recommandée de 5 (Legrand, 2013). En outre, ces laits contiennent tous entre 0,22 à 0,25 % d'ALC, AG conjugué ayant potentiellement des effets bénéfiques pour la santé du consommateur.

2.3.3.4 Production fromagère

D'après Lefrileux et al. (2017), le rendement théorique en fromage (équation 14) du lait issu de la cuve du mercredi matin devrait être de 20,61 kg fromage/100 kg lait pour le groupe « Témoin », 22,28 kg fromage/100 kg lait pour le groupe « G. colza » et 20,75 kg fromage/100

kg lait dans le groupe « Méteil ». Le nombre de cellules utilisé¹ pour le calcul théorique est de 0,657 million/ml pour le groupe « Témoin », 1,115 million/ml pour le groupe « G. colza » et 0,565 million/ml pour le groupe « Méteil ». Ces rendements théoriques sont supérieurs aux rendements obtenus en réalité. Premièrement, il se peut que les fromages aient perdu du poids par déshydratation ; les pesées lors de l'expérience ayant eu lieu 3 jours après le début de la fabrication fromagère. Ensuite, cette équation théorique possède un r^2 de 0,72 : il reste donc 28% de variabilité non expliquée par cette dernière.

Selon le rendement théorique, le groupe « G. colza » devrait avoir le meilleur rendement en fromage frais. C'est effectivement ce qui a été mesuré dans cette expérience avec 19,54 kg de fromage frais/100 kg lait. Les rendements en fromage frais présentaient de faibles différences, dans le même sens que la formule théorique, pour les groupes « Témoin » (18,63 kg fromage frais/100 kg lait) et « Méteil » (18,67 kg fromage frais/100 kg lait). En sec, ces rendements suivaient la même tendance que le taux de matière utile mesuré dans les laits dont ils sont issus. Le lait du groupe « G. colza » contenait le plus de matières utiles avec 6,37 kg/100 kg lait pour un rendement en fromage sec de 5,98 kg/100 kg de lait. Il est suivi par le groupe « Témoin » avec 6,02 kg de matières utiles/100 kg lait pour 5,73 kg de fromage sec/100 kg de lait. Enfin, le lait du groupe « Méteil » contenait 5,93 kg de matières utiles/100 kg lait et a obtenu un rendement fromager en sec de 5,56 kg MS/100 kg lait. Toute la matière utile ne se retrouve pas dans la MS des fromages car une partie de celle-ci est perdue lors de leur égouttage.

Selon Bellivier et Gaborit (2000), des défauts de flaveur peuvent survenir lors de la fabrication de fromages à partir d'un lait caractérisé par un TB et un TP faibles et inversés. Les laits qui ont servi à la fabrication fromagère possédaient un TB et un TP correct mais ils étaient à la limite de l'inversion de taux (seuil = 1,15). Cependant, aucun défaut de flaveur n'a été mis en évidence lors des tests sensoriels. Globalement, les fromages sont sensiblement les mêmes : aucune différence significative n'a été mise en avant par les goûteurs, à l'exception de la friabilité d'un point de vue visuel.

Des défauts de goûts liés à un risque supérieur d'oxydation et de textures moins fermes ont été rapportés par Berthelot (2018) avec des fromages issus de laits riches en AG insaturés. Le lait destiné à la fabrication fromagère du groupe « G. colza » contenait près de 4 à 5% d'AGMI de plus sur le total des AG dosés que celui des deux autres rations expérimentales mais il n'a pas montré de défaut de goût ou de texture. D'ailleurs, si la friabilité d'un point de vue visuel s'était révélée différente entre les fromages, le fromage qui a été jugé le plus friable, donc le moins cohérent, a été celui issu du lait du groupe « Témoin », le lait le plus pauvre en AGMI.

¹ Ces nombres de cellules sont les moyennes, par groupe, des mesures individuelles qui ont eu lieu lors du contrôle laitier du lundi 8 avril, pendant la semaine de prélèvement, à la traite du matin.

Enfin, le lait du groupe « Témoin » et le lait du groupe « Méteil » sont les plus riches en AG typiques du lait de chèvre (C6:0, C8:0 et C10:0) avec près de 2% de plus que dans le lait du groupe « G. colza ». Cependant, aucune différence n'a été observée au niveau du critère « goût typique de fromages de chèvre » lors du test organoleptique. Une teneur en ces AG de 16 à 18,5%, sur les AG totaux dosés, semble donc acceptable pour la production de fromages caprins avec un goût typique suffisamment prononcé mais pas excessif.

3 Conclusion

Cette expérience a été réalisée pour répondre au souhait des éleveurs de la Baillerie de distribuer des rations en autonomie alimentaire à leurs chèvres toute l'année. Les rations devaient être suffisamment équilibrées pour répondre à leurs objectifs de production (3,5L de lait/j par chèvre en début de lactation). En hiver, la ration de la Baillerie repose sur un ensilage enrubanné d'herbe préfanée distribué à volonté, complété par des betteraves fourragères et du foin de prairie distribués en quantités limitées. Ces fourrages sont distribués collectivement à l'auge. Comme concentrés, distribués individuellement à la traite, les chèvres reçoivent des grains de maïs et un concentré commercial (seul aliment acheté, à base de tourteau de pression de lin (44,4%), de luzerne (26,1%) et de drêche de froment (25%)).

Trois concentrés alternatifs, réalisables en autonomie alimentaire, ont été testés et comparés entre eux lors de l'expérience. Ainsi, les chèvres ont été séparées en 4 groupes : le 1^{er} groupe (« Témoin ») comprenait les concentrés habituels composés de 400 g de graines de maïs aplaties et 200 g du concentré commercial, le 2^{ème} groupe (« T. colza ») avait comme concentrés 400 g de maïs aplati et 200 g de tourteaux gras de colza, le 3^{ème} groupe (« G. colza ») comprenait 450 g de maïs aplati et 150 g de graines de colza entières et le 4^{ème} (« Méteil ») comprenait 600 g de méteil moulu (2/3 de froment et de 1/3 de pois).

Lors de l'expérience, des soucis d'ingestion des nouveaux concentrés expérimentaux ont engendré des modifications dans les groupes. En particulier, le taux de refus important des tourteaux de colza gras a forcé le retrait de ce groupe de l'expérience.

En théorie, d'après les estimations du logiciel « INRAtion 4.07 », toutes les rations expérimentales étaient suffisamment équilibrées en protéines et en énergie pour couvrir les objectifs de production visés à la ferme de Baillerie. Cependant, les ingestions de préfané ont été inférieures à celles estimées pour les groupes « Méteil » et « G. colza ». Ainsi, seules les valeurs nutritionnelles de la ration « Témoin » présentaient une production permise par les UFL, PDIE et PDIN supérieure à 3,5 L lait/j car l'ingestion de préfané des chèvres de ce groupe a été plus élevée malgré une distribution de préfané équivalente entre les groupes.

La production et la composition du lait ont différencié entre les groupes. Alors que la production en lait brut était significativement supérieure dans le groupe « Témoin », le lait du groupe « G. colza » présentait un TP et un TB significativement supérieurs à ceux des autres groupes. La production, ramenée en lait standard, était significativement supérieure dans le groupe « Témoin » par rapport à celle du groupe « Méteil » alors que celle du groupe « G. colza » était intermédiaire, non significativement différente des deux autres.

Les rations expérimentales semblaient toutes déficientes en PDIE ($R_{mic} > 0$) mais présentaient toutes un OEB légèrement négatif. Les teneurs en urée du lait des chèvres de l'expérience étaient inférieures aux moyennes générales et tendaient donc davantage vers le

système hollandais. Cependant ce taux est fort variable entre individus et les mesures n'ont été réalisées que sur 11 chèvres par groupe.

Les profils en AG des laits variaient. La supplémentation en MG dans la ration du groupe « G. colza » a permis une diminution de la teneur en AGS dans le lait et une augmentation de celle en AGMI sans impacter celle des AG *trans* C18 grâce à une libération progressive des AG dans le rumen qui laissait le temps aux bactéries d'hydrogéner les MG alimentaires. A l'opposé, le lait « Témoin » contenait le plus d'AGS, d'AG courts et moyens et a donc eu une synthèse lipidique *de novo* supérieure. Le lait du groupe « Méteil » avait un profil intermédiaire.

Les fromages des différents groupes n'ont pas montré de différences significatives entre eux lors du test organoleptique, organisé avec 50 goûteurs lambdas, malgré des différences dans la composition et le profil en AG des laits dont ils sont issus. Le rendement fromager a été le meilleur dans le groupe « G. colza », probablement grâce à son taux de matières utiles supérieur.

Parmi les rations expérimentales, le remplacement du concentré habituel par le méteil a donné les moins bons résultats. Ainsi, la ration « G. colza » semble l'alternative la plus prometteuse des trois pour remplacer le concentré commercial acheté. Cependant, la pré-expérience a montré que la valorisation digestive des graines de colza entières n'est pas totale. La distribution du colza sous forme de tourteaux fermiers aurait pu permettre d'améliorer cette valorisation, mais ces derniers ont été triés et refusés par les chèvres lors de l'expérience. D'autres traitements, tels que l'aplatissement des graines, pourraient aussi l'augmenter. Un aplatisseur pourrait être un investissement intéressant à la ferme de la Baillerie, d'autant plus qu'il pourrait également servir pour les grains de maïs. Sans traitement des graines, une autre alternative pourrait être d'augmenter la quantité de graines de colza distribuée pour tenir compte de leur valorisation partielle.

D'autres perspectives d'amélioration des rations pourraient être :

- Le préfané, fourrage principal, était de bonne qualité. Il pourrait-être intéressant de stimuler les chèvres pour essayer d'augmenter son ingestion car elle était inférieure, en pratique, aux simulations dans les deux rations testées (« Méteil », « G. colza »).
- Le foin de prairie pourrait être remplacé par du foin de luzerne. Cela augmenterait ses teneurs en MAT, PDIN et en fibres, sans impacter celles en PDIE, mais cela réduirait sa densité énergétique
- Les betteraves fourragères sont un aliment intéressant car elles contiennent un ratio PDIN:PDIE de 11:8. Cependant, à cause de leur richesse en sucres solubles, augmenter les quantités distribuées risque d'accroître les risques d'acidose, d'autant plus que les chèvres en mangent déjà 2,5 kg brut/j et qu'elles sont déjà proches du seuil maximal recommandé par l'Institut de l'élevage (2011) en sucres solubles et amidon de la ration.

- Au niveau des concentrés, les deux rations expérimentales contenaient des graines oléagineuses (colza) ou protéagineuses (pois). Les protéines de ces types de graines sont rapidement dégradées dans le rumen. Des traitements mécaniques ou thermiques pourraient permettre d'augmenter leurs valeurs en PDIE par rapport aux PDIN (Poncet et al., 2003) mais ceux-ci ont un coût non négligeable.
- Dans le méteil, remplacer les pois par de la féverole ou du lupin permettrait d'augmenter les PDIE/kg MS. Le lupin blanc semble une alternative intéressante, bien que sa culture soit moins habituelle, car il est riche en énergie, contient un peu de MG et pas d'amidon.

L'autonomie alimentaire semble être atteignable dans le cas de la ferme de la Baillerie ; cependant, les pistes présentées ci-dessus devraient encore faire l'objet d'études complémentaires.

4 Références

- Adeyemi, K. D., A. Q. Sazili, M. Ebrahimi, A. A. Samsudin, A. R. Alimon, R. Karim, S. A. Karsani, et A. B. Sabow. 2016. « Effects of Blend of Canola Oil and Palm Oil on Nutrient Intake and Digestibility, Growth Performance, Rumen Fermentation and Fatty Acids in Goats ». *Animal Science Journal* 87 (9): 1137-47. <https://doi.org/10.1111/asj.12549>.
- Alatas, M. S., O B. Cital, O. Kahraman, et A. Ozbilgin. 2015. « Causes of Milk Fat Depression in Dairy Cows ». *Animal Science*, D., LVIII: 6.
- Andrade, P V.D., J. Tessier, et P. Schmidely. 2004. « Composition en acides gras du lait de chèvre : influence du pourcentage de concentré combinée à la supplémentation en graines de colza ». *Rencontres Recherches Ruminants* 11: 78.
- Baumont, R., J.-P. Dulphy, D. Sauvant, G. Tran, F. Meschy, J. Aufrère, J-L. Peyraud, et P. Champciaux. 2007. « Les tables de la valeur des aliments ». Dans *Alimentation des bovins, ovins et caprins : Besoins des animaux - Valeurs des aliments (Tables Inra 2007)*, Quae, 181 à 275. Versailles: Quae.
- Bellivier, A.C., et P. Gaborit. 2000. « Influence de la lipolyse naturelle du lait de chèvre sur qualité organoleptique des fromages ». *Rencontres Recherches Ruminants* 7: 315.
- Bendailh, F. 2010. « Dégradabilité de l'azote de tourteaux gras de colza obtenus par pressage à chaud ou à froid : études in sacco et in vitro ». Médecine vétérinaire, Toulouse: Paul-Sabatier de Toulouse.
- Berthelot, V. 2018. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Lavoisier. Paris: Brigitte Peyrot.
- Biarnès, V., B. Carrouée, D. Bouttet, I. Chaillet, G. Hellou, et L. Fontaine. 2011. « FICHE TECHNIQUE - Cultiver les associations céréales/protéagineuses en AB ». *ITAB, Arvalis-Institut de l'élevage et l'UNIP*, juillet, 8.
- Bossis, N. 2016. « Le réseau thématique « autonomie » en élevage caprin : un réseau de fermes qui innove pour l'autonomie alimentaire et protéique : Trajectoires, techniques mises en oeuvre et premiers résultats ». *Institut de l'élevage*, juin, 32.
- Bossis, N., J. Jost, C. De Boissieu, M. Boutin, et C. Guinamard. 2015. « Accompagner le développement de l'autonomie alimentaire en élevage caprin laitier ». *Institut de l'élevage*, Résultats, septembre, 38.
- Bossis, N., J. Jost, M. Peglion, C. Guinamard, et C. De Boissieu. 2016. « Accompagner le développement de l'autonomie alimentaire en élevage caprin laitier - 2ème année ». *Institut de l'élevage*, Résultats, septembre, 68.

- Boufaïed, H., P. Chouinard, G. F. Tremblay, H. V. Petit, R. Michaud, et G. Bélanger. 2003. « Fatty acids in forages. I. Factors affecting concentrations ». *Animal Science* 83 (501): 12. <https://doi.org/10.4141/A02-098>.
- Bourgeois, S. 2018. « Le système Inra de rationnement est rénové ». Réussir Bovins Viande. 25 juillet 2018. <https://www.reussir.fr/bovins-viande/actualites/le-systeme-inra-de-rationnement-est-renove:ZN07UIF6.html>.
- Briand, L., S. Friboulet, J. Nassibou, et M. Truntzler. 2006. « Valorisation des huiles alimentaires en première pression à froid en pays d'Aunis ». Paris: Institut national agronomique Paris-Grignon. <https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/INIP/document/INIP/inipespv06/projets/Huiles.pdf>.
- Broqua, C. 2002. « Utilisation des protéagineux dans l'alimentation des caprins ». *Institut de l'élevage*, Utilisation des protéagineux en élevage, décembre, 8.
- Cariou, J. 2018. « L'INRA rénove son système d'alimentation pour les ruminants ». Traduit par G. Trou. *Terra, herbivores*, septembre, 32 à 33.
- Chapoutot, P., et D. Sauvant. 1997. « Nutritive Value of Raw and Extruded Pea-Rapeseed Blends for Ruminants ». *Animal Feed Science and Technology* 65 (1-4): 59-77. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(96\)01080-2](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(96)01080-2).
- Conseil Supérieur de la Santé. 2016. « Recommandations nutritionnelles pour la Belgique 2016 », n° 9285 (septembre): 202.
- Dang Van Q C, Focant M, Mignolet E, Turu C, Froidmont E, Larondelle Y (2011a) : « influence of the diet structure on ruminal biohydrogenation and milk fatty acid composition of cows fed extruded linseed », *Animal feed Science and Technology*, 1691-10.
- Delagarde, R., L. Delaby, F. Meschy, et P. Faverdin. 2007. « Alimentation des vaches laitières ». Dans *Alimentation des bovins, ovins et caprins : Besoins des animaux - Valeurs des aliments (Tables Inra 2007)*, Quae, 23 à 55. Versailles: Quae.
- Delmotte, C, P Rondia, F Dehareng, J Laloux, et J Famerée. 2009. « An Oleaginous Supplement to Improve the Nutritional Quality of Goat's Milk and Cheese (Whole or Extruded Linseed, Rapeseed Cake) ». *CIHEAM, Nutritional and foraging ecology of sheep and goats, Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens* (85): 445-51.
- Delmotte, C., P. Rondia, F. Dehareng, J. Laloux, J. Fameree, V. Decruyenaere, et N. Bartiaux-Thill. 2006. « Influence de la nature et de la forme du complément oléagineux (graine de lin entière ou extrudée et tourteau colza) sur le profil en acides gras du lait de chèvre ». *Rencontres Recherches Ruminants* 13: 329.

- Delmotte, C., P. Rondia, F. Dehareng, J. Laloux, J. Fameree, V. Decruyenaere, Christine Marechal, et Philippe Marechal. 2007. « Un essai en ferme : de la graine de lin ou du tourteau de colza fermier pour améliorer la qualité diététique du lait et des fromages de chèvre ». *Filière Ovine et Caprine* 20: 6 à 9.
- Douguet, M., éd. 2017. « Résultats contrôle laitier caprin - France 2016 ». Institut de l'élevage. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oid=workspace://SpacesStore/1ff124d7-1876-4d13-817d-d748d87fbc4c.
- Doyon, A. 2005. « Influence de l'alimentation sur la composition du lait de chèvre : revue des travaux récents ». Dans *CRAAQ*, 24. Saint-Hyacinthe.
- Duhamel, J., M. Huguet, et G. Tierce. 2015. « Être autonome en protéines dans son élevage ». Édité par Annette Fichtl. *GRAB HN*, Les Cahiers techniques de Haute Normandie, Elevage Cahier (1): 12.
- Dulphy, J.P., W. Martin-Rosset, et J.P. Jouany. 1995. « Ingestion et digestion comparées des fourrages chez différentes espèces d'herbivores ». *INRA Productions animales* 8 (4): 293-307.
- Esvan, S., C. Dragan, A. Varenne, J-M. Astruc, F. Barillet, D. Boichard, P. Brunschwig, et al. 2010. « PhénoFinlait, 1ers résultats : influence de l'alimentation, de l'état physiologique et de la génétique sur la composition en acides gras des laits de lait vache, brebis et chèvre ». *Rencontres Recherches Ruminants* 17: 385-89.
- Faverdin, P., R. Baumont, M. Boval, J. Agabriel, et R. Delagarde. 2018. « Feed intake ». Dans *INRA Feeding System for Ruminants*, INRA, 33-42. Wageningen: Wageningen Academic Publishers.
- Filagri. 2018. « Le secteur ovins-caprins ». Filagri. 2018. <https://filagri.be/ovins-caprins/le-secteur-ovins-caprins/>.
- Flamant, J.C., et Pierre Morand-Fehr. 1982. « Chapter 15 : Milk production in sheep and goats ». Dans *Sheep and Goat production*, I.E. COOP, 1:285-95. World animal Science, C Production-system approach. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Compagny.
- Focant, M., A. Van Hoecke, et M. Vanbelle. 1990. « Effets de l'extrusion du pois (*Pisum sativum*) sur le flux intestinal d'azote chez la vache ». *Reproduction Nutrition Développement* 30 (Suppl. 2): 171s-72. <https://doi.org/10.1051/rnd:19900813>.
- Frantz, J. 2009. « Composition du lait de chèvre ». Fédération Régionale des Syndicats Caprins du Poitou-Charentes-Vendée. Terre des chèvres. 8 juillet 2009. http://public.terredeschèvres.fr/1_PRINCIPAL/1_3_1_lait/1_composition.html.

- Giger-Reverdin, S., et C. Duvaux-Ponter. 2016. « Le taux d'urée du lait : un indicateur non invasif du degré de sub-acidose ruminale chez la chèvre laitière ? » *Rencontres Recherches Ruminants* 23: 57.
- Guibert, E., J. Jost, T. Soulard, et V. Tardif. 2017. « Atelier F : " Le méteil grain : un savant mélange qui dévoile ses atouts " ». Dans *Institut de l'élevage*, 3. Lusignan.
http://idele.fr/fileadmin/medias/Documents/Presentations/PANNEAU_ATELIER_F_-_Meteils_standard.pdf.
- Heuzé, V., G. Tran, et B. Rouillé. 2016. « Tourteau de tournesol ». *Comité National Des Coproduits*, mai, 11.
- Heuzé, V., G. Tran, D. Sauvart, M. Lessire, et F. Lebas. 2017. « Rapeseeds ». A programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. Feedpedia. 2017. <https://www.feedipedia.org/node/15617>.
- Hoekstra, Tjipke. 2016. « Tabellenboek Veevoeding 2016 ». *Federatie Nederlandse Diervoederketen*, n° 52: 49.
- Institut de l'élevage, et Prolea, éd. 2007. « Le tourteau de colza, source de protéines de qualité pour vos bovins ». Institut de l'élevage.
http://www.terresinovia.fr/uploads/tx_cetiomlists/tourteaux_colza_bovins_2007.pdf.
- Jacques, L. 2012. *L'élevage des chèvres*. Édité par A-M. Paulais. France Agricole. Agriproduction. Institut de l'élevage.
- Jost, J., D. Honorine, et G. Auber. 2018. « Prairies multi-espèces et méteils : de savants mélanges qui dévoilent leurs atouts pour les chèvres ». Dans *SPACE*, 58. Rennes: RedCAP.
- Le Scouarnec, J., V. Guez, et P. Bourreau. 2003. « Facteurs de variation des concentrations cellulaires dans le lait de chèvre ». *Rencontres Recherches Ruminants* 10: 303.
- Lefèvre, A. 2016. « Intérêts technico-économiques et leviers de l'autonomie protéique ». CRA-W présenté à Légumineuses : Quelle place dans les systèmes agricoles ?, octobre 25.
http://www.csa-be.org/IMG/pdf/presentation_soiree_autonomie_lefevre.pdf.
- Lefrileux, Y., M. N. Fouilloux, et J. Birckner. 2017. « Rendement fromager technologie lactique en production fromagère ». Formation PLF présenté à stage de perfectionnement technique annuel du réseau « Produits Laitiers Fermiers », Rhône, octobre.
<http://idele.fr/filieres/caprin/publication/idelesolr/recommends/rendement-fromager-en-technologie-lactique-en-production-fermiere.html>.
- Lefrileux, Y., J. Legarto, et A. Pommaret. 2012. « Effet de la complémentation en concentré sur le taux d'urée du lait de chèvre ». *Rencontres Recherches Ruminants* 19: 1.
- Lefrileux, Y., et A. Pommaret. 2008. « Utilisation du tourteau gras de colza chez la chèvre laitière : incidences zootechniques et impacts sur la transformation fromagère ». *Rencontres Recherches Ruminants* 15: 296.

- Legarto, J. 2016. « La rénovation 2016 du système d'alimentation des ruminants ». Dans *Journée bovine laitière OPTILAIT*. Bernussou: idele.
http://idele.fr/fileadmin/medias/Documents/SYSTALI_Bernussou_publi.pdf.
- Legarto, J., M-C. Leclerc, F. Blanchard, B. Bluet, N. Bossis, P. Gauthier, K. Lazard, et al. 2011. *L'alimentation pratique des chèvres laitières*. Institut de l'Élevage. Les incontournables. Institut de l'élevage.
- Legrand, Philippe. 2013. « Nouvelle approche pour les recommandations nutritionnelles en lipides ». *Oléagineux, Corps gras, Lipides* 20 (2): 75-78.
<https://doi.org/10.1051/ocl.2013.0502>.
- Lochon, V. 2016. « Fiche technique : Le méteil grain en élevage caprin ». REDCap. 2016.
http://redcap.terredeschèvres.fr/IMG/pdf/fiche_meteil.pdf.
- Marques de Almeida, M., et G.F.W. Haenlein. 2017. « Production of Goat Milk ». Dans *Handbook of Milk of Non-Bovine Mammals*, John Wiley & Sons Ltd, 11 à 41. John Wiley & Sons.
- Morineau, J. 2016. « L'autonomie sur tous les fronts, GAEC URSULE : résultat des travaux ». Dans *Légumineuses : Quelle place dans les systèmes agricoles ?*
<https://en.calameo.com/read/004917840638e622eb4a7>.
- Moss, A., R. Allison, A. Stroud, et C. Collins. 2000. « Evaluation of Heat-Treated Lupins, Beans and Rapeseed Meal as Protein Sources for Dairy Cows ». *HGCA-Project*, n° OS45 (août): 49.
- Ollier, S., C. Leroux, A. de la Foye, L. Bernard, J. Rouel, et Y. Chilliard. 2009. « Whole Intact Rapeseeds or Sunflower Oil in High-Forage or High-Concentrate Diets Affects Milk Yield, Milk Composition, and Mammary Gene Expression Profile in Goats ». *American Dairy Science Association* 92. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2022>.
- Park, Young W., G. F.W. Haenlein, et W. L. Wendorff. 2017. « Goat Milk - Chemistry and Nutrition ». Dans *Handbook of Milk of Non-Bovine Mammals*, John Wiley & Sons Ltd, 42 à 83. John Wiley & Sons.
- Peyraud, J-L., J-Y. Dourmad, M. Lessire, F. Médale, et C. Peyronnet. 2015. « Conséquences zootechniques de l'introduction des légumineuses françaises dans les systèmes de productions animales ». Dans *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*, Quae, 225 à 262. Versailles Cedex.
- Poncet, C, D Rémond, E Lepage, et M Doreau. 2003. « Comment mieux valoriser les protéagineux et oléagineux en alimentation des ruminants », 18.
- Réseaux d'élevage. 2013. « Evolution sur 4 campagnes des couts de production en filière caprine en Rhone-Alpes ». *Institut de l'élevage*, Résultats annuels, n° 2012 (juin): 6.

- Rouel, J., P. Gaborit, J.M. Chabosseau, K. Raynal, A. Ferlay, A. Lauret, et Y. Chilliard. 2002. « Effets de la nature du fourrage et de la supplémentation lipidique sur la composition en acides gras du lait et sur la qualité sensorielle des produits laitiers caprins ». *Rencontres Recherches Ruminants* 9: 359-62.
- Sagot, L. 2013. « Des Graines d'oléagineux Pour Remplacer Une Partie Des Céréales ». Idele.Fr. 18 novembre 2013. <http://idele.fr/presse/publication/idelesolr/recommends/des-graines-doleagineux-pour-remplacer-une-partie-des-cereales.html>.
- Sauvant, D, G Cantalapiedra-Hijar, L Delaby, J-B Daniel, P Faverdin, et P Nozière. 2015. « Actualisation des besoins protéiques des ruminants et détermination des réponses des femelles laitières aux apports de protéines digestibles dans l'intestin ». *INRA*, 22.
- Sauvant, D., G. Cantalapiedra-Hijar, S. Lemosquet, P. Nozière, V. Berthelot, et P. Faverdin. 2018. « Protein and amino acid expenditure, efficiency and requirements ». Dans *INRA Feeding System for Ruminants*, INRA, 119 à 137. Wageningen: Wageningen Academic Publishers.
- Sauvant, D., et S. Giger-Reverdin. 2018. « Dairy and growing goats ». In *INRA Feeding System for Ruminants*, INRA, 339 à 374. Wageningen: Wageningen Academic Publishers.
- Sauvant, D., S. Giger-Reverdin, et F. Meschy. 2007. « Alimentation des caprins ». Dans *Alimentation des bovins, ovins et caprins : Besoins des animaux - Valeurs des aliments (Tables Inra 2007)*, Quae, 137 à 148. Versailles: Quae.
- Sauvant, D., P. Nozière, et I. Ortigues-Marty. 2018. « Energy expenditures, efficiencies and requirements ». Dans *INRA Feeding System for Ruminants*, INRA, 91 à 118. Wageningen: Wageningen Academic Publishers.
- Serment, A., P. Schmidely, S. Giger-Reverdin, et D. Sauvant. 2010. « Effet du pourcentage de concentrés sur les paramètres ruminiaux et sanguins, la production et la qualité du lait chez la chèvre en milieu de lactation ». *Rencontres Recherches Ruminants*, n° 17: 305.
- STATBEL. 2018a. « Statistique sur la collecte et la production laitière : Résultats annuels 2017 ». STATBEL.
- STATBEL. 2018b. « Statistiques laitières annuelles : produits à base de lait autre que le lait de vache ». 10 octobre 2018. <https://bestat.statbel.fgov.be/bestat/crosstable.xhtml?view=c3139de2-acfe-4e14-b2fa-ae42a4fcf034>.
- Terres Univia. s. d. « Protéagineux - Alimentation animale - Produits/Débouchés ». Consulté le 11 décembre 2018. <http://www.terresunivia.fr/produitsdebouches/alimentation-animale/proteagineux>.
- Toral, P.G., Y. Chilliard, J. Rouel, H. Leskinen, K.J. Shingfield, et L. Bernard. 2015. « Comparison of the Nutritional Regulation of Milk Fat Secretion and Composition in

Cows and Goats ». *Journal of Dairy Science* 98 (10). <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9649>.

Verhaeghe-Cartryse, Christine. 2014. « Phytotechnie des protéagineux ». Dans *Vers une plus grande autonomie alimentaire dans nos élevages*, 42. Gesves: APPO.

5 Annexes

5.1 Annexe A : Composition et valeur nutritionnelle du concentré témoin à base de tourteau de lin expeller (SCAR)

Composition : Tourteau de pression de lin (44,4 %), luzerne (26,1 %), drêche de froment (25 %), carbonate de calcium (1,1 %), mélasse de betteraves (1 %), rebulet (0,7 %), phosphate bicalcique (0,7 %), sel (0,3 %), phosphate monocalcique (0,3 %), oxyde de magnésium (0,2 %), huile de soya (0,0 %)

Constituants analytiques : Protéine brute (26,1 %), Matière grasse brute (7,8 %), Cendres brute (6,8 %), Cellulose brute (4,3 %), Calcium (1,4 %), Phosphore (0,8 %), Sodium (0,3%)

Additifs nutritionnels (par kg) :

3a672a	Vitamine A	12 488 UI
3a671	Vitamine D3	2 498 UI
3a700	Vitamine E	19 mg
E4	Sulfate de cuivre (II) pentahydraté	18 mg
3b605	Sulfate de zinc monohydraté	87 mg
3b503	Sulfate de magnésium	62 mg
3b304	Carbonate de cobalt (II) monohydraté	0,6 mg
3b203	Iodate de calcium anhydre	1 mg
E8	Sélénite de sodium	0,6 mg
E8	Sélénite de sodium by-pass	0,6 mg

5.2 Annexe B : Composition de l'aliment minéral pour bovin (SCAR BLOC TOP)

Composition : Carbonate de calcium, phosphate monocalcique, Mélasse de canne à sucre, Chlorure de sodium, Oxyde de magnésium, Drêches de distilleries séchées, Remoulage de blé, Lactosérum en poudre

Constituants analytiques : Calcium (12,79 %), Phosphore (4%), Magnésium (8%), Sodium (6%)

Additifs nutritionnels (par kg) :

3a672a	Vitamine A	500 000 UI
E671	Vitamine D3	100 000 UI

3a700	Vitamine E (acétate d'alpha-tocophéryle totalement racémique)	1 000 UI
E4	Cuivre (sulfate cuivrique, pentahydraté)	1300 mg
E4	Cuivre (chélate cuivreux d'acides aminés, hydraté)	500 mg
3b605	Zinc (sulfate de zinc monohydraté)	4 600 mg
3b606	Zinc (chélate de zinc d'acides aminés, hydraté)	2 000 mg
E5	Manganèse (oxyde manganoux)	3 000 mg
3b202	Iode (iodate de calcium, anhydre)	350 mg
3b304	Cobalt (Granulés enrobés de carbonate de cobalt (II))	40 mg
E8	Sélénium (sélénite de sodium)	34 mg
E8	Sélénium (sélénite de sodium rumino-protégé)	17 mg

5.3 Annexe C : Mélange de semences pour prairie (Sencier 4)

Graminées (48%)			Légumineuses (52%)		
RGA	Aberavon	8%	Trèfle violet	Lestris	20%
RGA	Sucral	8%	Trèfle hybride	Lomiaï	10%
Dactyle	Tardi	8%	Trèfle blanc	Giga	6%
Fléole des prés	Aurora	8%	Trèfle blanc	Aberdai	6%
RGI	Jericho Bio	5%	Lotier coriculé	Gran San Gabriele	5%
RGH	Tonuss	5%	Minette	Ekola	5%
Fétuque élevée	Iliade	6%			

5.4 Annexe D : Exemple de formulaire pour un des fromages du test de dégustation

Echantillon :

Aspect visuel

- | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| • Couleur : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Blanc | | Crème | | Jaune |
| • Humidité : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Sec/Mate | | Brillant | | Humide/Imbibé |
| • Texture : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Cohérente | | | | Friable |
| | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Non-collante | | | | Collante |
| | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Fine | | | | Granuleuse |

Odeur

- | | | | | | |
|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| • Intensité : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Absente | | Faible | | Forte |
| • Appréciation : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Agréable | | Neutre | | Désagréable |

Texture en bouche

- | | | | | | |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| • Onctuosité : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Sec | | Onctueux | | Gras |
| • Fermeté : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Dur | | | | Mou |
| • Texture : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Cohérente | | | | Friable |
| | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Non-collante | | | | Collante |
| | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Fine | | | | Granuleuse |

Goût

- | | | | | | |
|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| • Acide : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Absent | Faible | Modéré | Fort | Excessif |
| • Sucré : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Absent | Faible | Modéré | Fort | Excessif |
| • Salé : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Faible | Faible | Modéré | Fort | Excessif |
| • Amer : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Absent | Faible | Modéré | Fort | Excessif |
| • Typique : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| (Fromage chèvre) | Absent | Faible | Modéré | Fort | Excessif |

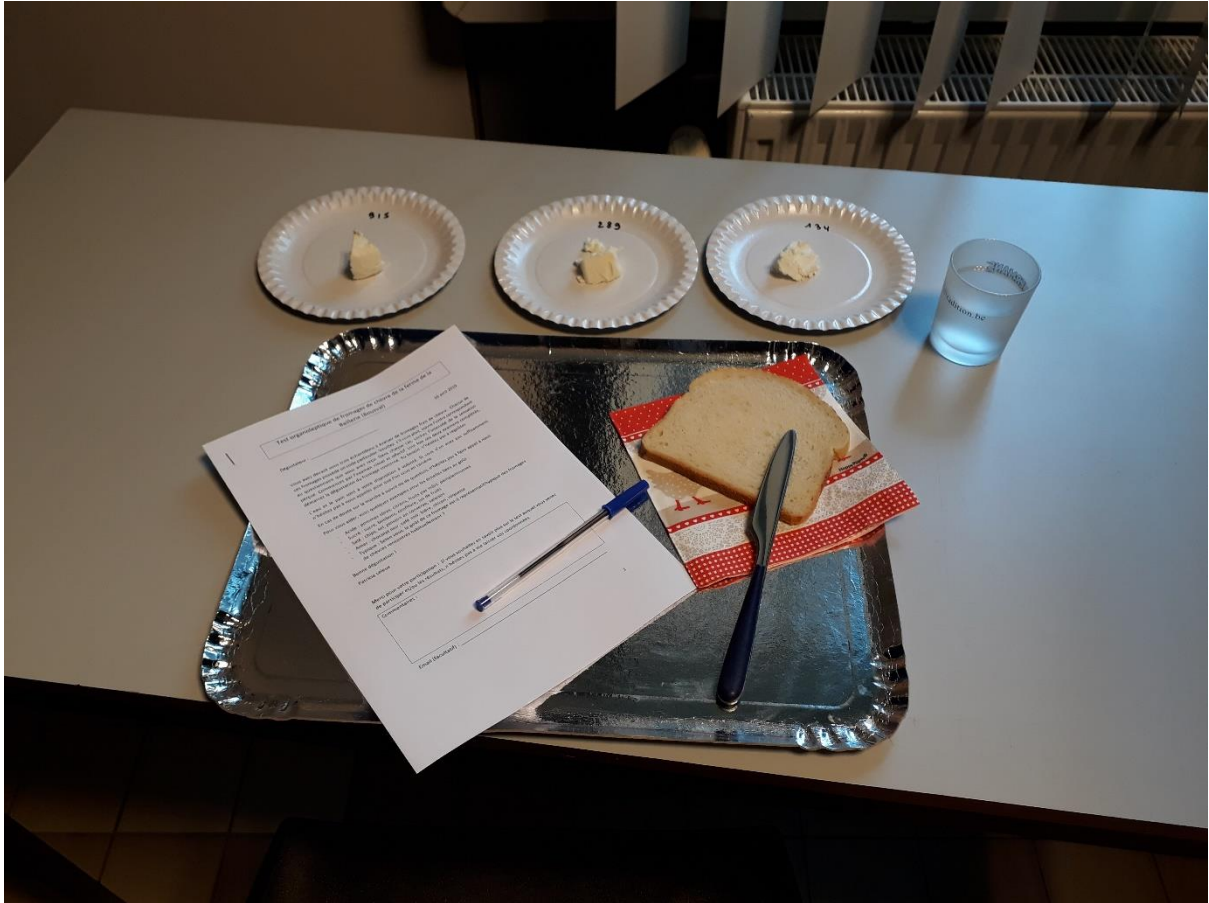
Arrière-goût

- | | | | | | |
|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| • Intensité : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Absent | | Faible | | Fort |
| • Appréciation : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Agréable | | Neutre | | Désagréable |

Appréciation générale

- | | | | | | |
|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| • Appréciation : | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Agréable | | Neutre | | Désagréable |

5.5 Annexe E : Exemple de plateau pour le test organoleptique des fromages



Résumé

La ferme de la Baillerie (Genappe, Belgique) est une exploitation caprine fromagère d'environ 120 Saanen appartenant à Christophe Col et Johanne Dupuis, deux défenseurs d'une agriculture durable. Autonomes dans l'alimentation de leurs chèvres en été, ils achètent un concentré commercial en hiver pour compléter leur ration basée sur un ensilage enrubanné d'herbe préfanée. L'objectif du présent mémoire est de proposer des alternatives à ce concentré commercial afin d'atteindre l'autonomie alimentaire.

Quatre combinaisons de concentrés, dont une témoin composée de la ration habituellement distribuée à la Baillerie, ont été testées et comparées entre elles. Ces concentrés s'ajoutaient tous à un même fourrage : du préfané distribué à volonté, des betteraves fourragères et un foin de prairie. Les différents concentrés sont constitués d'un méteil ou d'un mélange de maïs aplati combiné à un concentré commercial, à des graines de colza ou à des tourteaux gras de colza.

Quatre groupes homogènes de 15 chèvres ont pris part à l'expérience au mois de mars 2019. Elles étaient toutes en début de lactation lors des 5 semaines d'expérience. La dernière semaine de l'expérience, la production, la composition et le profil en AG du lait de même que l'ingestion, le rendement fromager et le goût des fromages ont été mesurés, analysés et comparés. Les quatre premières semaines expérimentales ont servi de semaines de transition et d'adaptation aux nouveaux régimes.

Le groupe consommant des tourteaux de colza a été retiré après 2 semaines d'expérience à cause de son taux de refus particulièrement élevé. Les 3 groupes restants ont été réduits 11 chèvres chacun. L'ingestion du préfané a été moindre dans les 2 groupes expérimentaux que dans le groupe témoin. Une pré-expérience a montré que la valorisation digestive des graines de colza n'était pas totale. Ces graines ont, cependant, eu un impact sur le lait produit par les chèvres qui les ont ingérées vu ses teneurs supérieures en AGMI et réduites en C4-C12 et en AGS. Ce lait contenait le TP et le TB les plus élevés et a eu le meilleur rendement fromager. Le groupe témoin est celui qui a produit la plus grande quantité de lait brut. Le groupe ayant consommé du méteil a eu la plus faible production en lait standard, significativement inférieure de celle du groupe témoin. Aucune différence n'a été mise en avant lors du test organoleptique comparant les fromages.