

Les graines protéagineuses comme alternatives au tourteau de soja pour les vaches laitières : évaluation comparative par méta-analyses *in situ* et *in vivo* des paramètres digestifs et des performances laitières

MENDOWSKI S. (1,2), NOZIÈRE P. (1), FERLAY A. (1), DENIS P. (1), CHESNEAU G. (2), CHAPOUTOT P. (3)
(1) Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgroSup, UMR Herbivores, 63122 Saint-Genès-Champanelle
(2) Valorex, La Messayais, 35210 Combourtille
(3) Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR MOdélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 75005 Paris

RESUME

Pour inventorier à la fois les données *in situ* et *in vivo* publiées sur l'utilisation des graines protéagineuses (GP) crues ou traitées, en remplacement du tourteau de soja (TS) dans l'alimentation des vaches laitières, et quantifier les effets de la substitution du TS par des GP crues ou traitées, ou des GP crues par des GP traitées, deux bases de données ont été construites. Ces bases rassemblent les données concernant les graines de féverole, lupin et pois, et les traitements technologiques appliqués sont de natures thermique, thermomécanique ou chimique (tannage). Les effets des substitutions ont été déterminés grâce à des tests de Student comparant les lots expérimental vs témoin (GP vs TS ou GP traitées vs GP crues). Malgré la quantité limitée de données disponibles et la diversité des pratiques alimentaires ainsi que des traitements technologiques appliqués, des tendances générales se dégagent, en particulier pour les variables mesurées *in situ*. Les protéines des GP crues sont systématiquement plus dégradables dans le rumen et moins digestibles dans l'intestin que celles du TS. Le remplacement du TS par une GP crue entraîne également une diminution du rapport N lait/N ingéré et une diminution du taux protéique du lait. Lorsque les GP sont traitées technologiquement, les protéines sont moins dégradables dans le rumen et leur digestibilité intestinale est améliorée. Certaines combinaisons « traitement x graine » entraînent une plus forte sécrétion d'azote dans le lait (par exemple le lupin extrudé) tandis que d'autres conduisent à diminuer le taux butyreux du lait (par exemple la féverole toastée/torréfiée). Enfin, les quelques données disponibles pour la comparaison entre TS et GP traitées montrent que certaines combinaisons permettent d'atteindre un niveau de protection des protéines des GP similaire à celui du TS (par exemple le pois autoclavé) et que très peu de différences sont observées sur les paramètres mesurés *in vivo*. Cette synthèse montre qu'il est possible de remplacer le TS par des GP traitées dans les rations pour vaches laitières sans altérer significativement leurs performances zootechniques, à condition de choisir les paramètres de traitements adaptés.

Proteaginous seeds as alternatives to soybean meal for dairy cows: comparative evaluation by meta-analysis of *in situ* and *in vivo* digestive parameters and dairy performance

MENDOWSKI S. (1,2), NOZIÈRE P. (1), FERLAY A. (1), DENIS P. (1), CHESNEAU G. (2), CHAPOUTOT P. (3)
(1) Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgroSup, UMR Herbivores, 63122 Saint-Genès-Champanelle
(2) Valorex, La Messayais, 35210 Combourtille

SUMMARY

In order to both inventory the published *in situ* and *in vivo* data on the use of raw or treated proteaginous seeds (PS), replacing soybean meal (SBM) in the dairy cow diet, and quantify the effects of the substitution of either SBM by raw or treated PS, or raw PS by treated PS, two databases were designed. These databases compile data on faba bean, lupin and pea seeds, and the technological treatments studied are either thermal, thermomechanical or chemical (tanning). The effects of the substitutions were determined using Student tests comparing the experimental vs control groups (GP vs TS or treated vs raw GP). Despite the limited amount of available data and the diversity of feeding practices as well as technological treatments applied, general trends emerge, in particular for the variables measured *in situ*. Proteins of raw PS are systematically more degradable in the rumen and less digestible in the intestine than SBM ones. Replacing SBM with raw PS also leads to a reduction in the N milk/N intake ratio and a decrease in the milk protein content. When technologically treated PS are compared to raw ones, proteins are more protected in the rumen and their digestibility in the intestine is improved. Some "treatment x seed" combinations lead to a higher N secretion in milk (for example extruded lupin) while others lead to a decrease in the milk fat content (for example toasted/roasted faba bean). Finally, the few data available on comparisons between SBM and treated PS show that some combinations allow to reach a level of proteins protection from PS similar to that of SBM (for example autoclaved pea) and very few differences are observed on the parameters measured *in vivo*. This work shows that it is possible to replace SBM with treated PS in dairy cow diets without significantly altering their zootechnical performance, provided that the appropriate treatment parameters are applied.

INTRODUCTION

Le remplacement du tourteau de soja (TS) par des graines protéagineuses (GP) dans les rations des vaches laitières est étudié depuis de nombreuses années, notamment en France en lien avec la recherche d'une plus grande autonomie

protéique, puisque la majeure partie du TS utilisé en élevage est importé (Terres Univia, 2018). Par rapport au TS, les GP contiennent moins de protéines brutes (MAT) (entre 213 et 380 g MAT/kg de matière sèche (MS) pour les GP contre 526 g MAT/kg de MS pour le TS, INRA, 2018). De plus, l'azote (N) des GP crues est plus dégradable dans le rumen

(dégradabilité ruminale de l'azote calculée avec un taux de sortie des particules du rumen de $0,06 \text{ h}^{-1}$ (DT_{6_N} , en %) entre 70 et 81 % contre 63 % pour le TS, INRA 2018), diminuant leur valeur nutritive pour les ruminants. Pour mieux valoriser ces graines, le traitement technologique est une solution connue pour réduire la dégradabilité ruminale des protéines des GP (Cros *et al.*, 1991 ; Benchaar *et al.*, 1992). Bien qu'il existe un potentiel à utiliser les GP dans l'alimentation des ruminants, c'est le TS importé qui reste majoritairement utilisé en élevage par rapport aux GP produites en France.

Dans le but de quantifier les effets de différents traitements technologiques appliqués à des graines de féverole, lupin et pois, sur des variables d'utilisation digestive des protéines et de performance laitière, un travail de méta-analyse a été réalisé pour mettre en évidence d'éventuelles tendances et quantifier les effets de la substitution du TS par ces graines (cruées ou traitées) sur des paramètres mesurés *in situ* et *in vivo*. Pour ce faire, une recherche de données publiées dans la littérature a été effectuée sur différentes variables, comme la DT_{6_N} , la digestibilité réelle intestinale de l'N (dr_N , %), les paramètres fermentaires ruminants, la partition de l'azote entre le lait, les urines et les fèces, et la production et composition du lait. Ces données ont ensuite été intégrées dans l'une des deux bases de données (BDD) construites, selon que les variables étaient mesurées *in situ* ou *in vivo*. Le travail de méta-analyse a été construit selon trois grands axes de comparaisons : le premier axe comprenait les comparaisons « TS vs GP crues », le deuxième axe celles de type « GP crues vs GP traitées », et enfin le troisième axe consistait à comparer « TS vs GP traitées ».

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. CHOIX DES ARTICLES ET CREATION DES BASES DE DONNEES

La recherche des publications a été faite sur différentes plateformes éditoriales (Google Scholar, Science Direct, Web of Science, etc.). Pour que leurs données soient incluses dans les BDD, les publications devaient soit comparer l'utilisation du TS aux graines de féverole, lupin ou pois (cruées ou traitées), soit comparer ces graines crues à ces mêmes graines traitées. Le traitement pouvait être soit thermique (cuisson, cuisson vapeur, toastage et torréfaction – ces deux derniers traitements, du fait de leurs similitudes, sont analysés ensemble), thermomécanique (floconnage, expansion, extrusion et autoclavage) ou chimique (tannage). Pour être incluse dans la BDD *in situ* ou bien *in vivo*, la publication devait comporter, respectivement, des données sur la dégradation ruminale et/ou la digestibilité intestinale de l'azote, ou bien sur la digestion de l'azote et/ou sur la partition de l'azote et/ou sur les performances laitières mesurées sur vaches laitières. Les BDD *in situ* et *in vivo* contenaient respectivement 36 publications (36 essais) et 31 publications (37 essais).

1.2. ANALYSES DES BASES DE DONNEES

Dans la base de données *in situ*, la DT_{6_N} a été recalculée quand nécessaire en utilisant un taux de sortie de particules du rumen fixé à $0,06 \text{ h}^{-1}$, pour rendre toutes les valeurs des différentes publications comparables. La DT_{6_N} a été calculée en fonction des données disponibles dans chaque publication, soit par le modèle d'Ørskov et McDonald (1979) : $DT_{6_N} = a + (b \times c) / (c + 0,06)$, avec a la fraction soluble (%), b la fraction dégradabile (%) et c le taux de dégradation de b (h^{-1}) ; soit par la « méthode pas à pas » à partir des différents points de la cinétique de dégradation de l'azote (Kristensen *et al.*, 1982). Les teneurs (g/kg MS) en protéines intestinales alimentaires (PIA_6) et en protéines digestibles dans l'intestin d'origine alimentaire ($PDIA_6$) ont été calculées respectivement comme suit : $PIA_6 = \text{teneur en MAT de la graine} \times (1 - DT_{6_N}/100)$ et $PDIA_6 = PIA_6 \times dr_N / 100$. Dans la base de données *in vivo*, la méthodologie du calcul de

l'azote sécrété dans le lait pouvait différer d'une publication à l'autre, aussi cette variable a été systématiquement recalculée à partir de la quantité de matières protéiques (MP) du lait, (en supposant un ratio MP / N total du lait de 6,38 et 95 g d'N protéique dans 100 g d'N total du lait ; DePeters et Cant, 1992 ; Spanghero et Kowalski, 1997). Ainsi calculées ($N = (MP / 6,38) / 0,95$), les variations d'N du lait correspondent donc à des variations observées de MP du lait. Le bilan d'azote a été systématiquement recalculé comme étant N ingéré - (N dans le lait + N dans les fèces + N dans l'urine). Pour chaque variable, la différence entre les lots expérimental vs témoin (GP vs TS ou GP traitées vs GP crues) a été calculée. Les effets du remplacement du TS par des GP, ou du traitement des GP, ont été déterminés grâce à des tests de Student comparant les moyennes des deux lots. Les analyses ont été réalisées avec le logiciel Minitab 17 (Minitab Inc., USA, 2017). Les comparaisons *in vivo* ont été effectuées à teneur similaire en MAT des rations.

2. RESULTATS

Malgré la quantité limitée de données disponibles et la diversité des pratiques alimentaires ainsi que des traitements technologiques appliqués entre les différentes études, des tendances générales se sont dégagées, en particulier pour les variables mesurées *in situ*.

2.1. TOURTEAU DE SOJA VERSUS GRAINES PROTEAGINEUSES CRUES

2.1.1. In situ

Comme attendu, les GP crues contiennent en moyenne 199 g/kg MS de MAT de moins que le TS ($n = 26$, $P < 0,001$ pour les 3 graines). De même, la DT_{6_N} des GP crues est systématiquement supérieure à celle du TS (Figure 1) : +15,8 points pour la féverole ($n = 10$, $P < 0,001$), +18,1 points pour le lupin ($n = 9$, $P = 0,003$) et +15,1 points pour le pois ($n = 5$, $P = 0,002$). Enfin, la dr_N est plus faible avec les GP crues qu'avec le TS, cependant du fait du faible nombre de données trouvées, ces variations ne sont pas systématiquement significatives : -27,3 points pour la féverole ($n = 2$, $P = 0,096$), -21,3 points pour le lupin ($n = 2$, $P = 0,201$) et -10,2 points pour le pois ($n = 1$). En conséquence des différences de DT_{6_N} et dr_N , mais aussi de teneurs en MAT, les PIA_6 et $PDIA_6$ des GP crues sont inférieures à celles du TS : -124 g PIA_6 /kg MS ($n = 24$, $P < 0,001$) en moyenne pour les 3 graines et -134 g $PDIA_6$ /kg MS en moyenne pour la féverole et le lupin ($n = 3$, $P = 0,023$ pour la féverole ; pas de données pour le pois).

2.1.2. In vivo

La proportion des protéines de la ration concernée par les substitutions du TS par des GP crues est de 39 % en moyenne. Les modalités de substitution sont variables d'une publication à l'autre, mais globalement l'ingestion des animaux ne varie pas entre les traitements. La plus forte dégradation des protéines des GP crues dans le rumen par rapport à celles du TS est confirmée par une plus forte teneur en NH_3 dans le jus de rumen avec les GP crues : +16,7 mg/L avec la féverole ($n = 8$, $P = 0,039$), +21,1 mg/L avec le lupin ($n = 2$, $P = 0,032$) et +28,1 mg/L avec le pois ($n = 4$, $P = 0,020$), ainsi que par une quantité d'acides gras volatils (AGV) ramifiés plus importante dans le jus de rumen avec la féverole crue (+0,2 mol/mol d'AGV totaux, $n = 5$, $P = 0,079$). Selon la graine utilisée, le remplacement du TS par une graine crue peut également entraîner une variation de la composition du lait. Ainsi, une diminution de la production laitière (-0,5 kg/j, $n = 10$, $P = 0,079$), de l'azote sécrété dans le lait (-4,8 g/jour, $n = 10$, $P = 0,001$) et du rapport N lait/N ingéré (-0,7 point, $n = 9$, $P = 0,026$) est observée pour la féverole (Figure 2). De plus, une diminution du taux protéique de 0,7 et 1,2 g/kg, respectivement, avec la féverole ($n = 10$, $P = 0,018$) et le lupin ($n = 13$, $P < 0,001$) a également été constatée. La teneur en urée du lait est diminuée avec les 3

graines (-21 mg/L en moyenne, n = 9) mais cette diminution ne tend à être significative qu'avec la féverole (P = 0,084). En revanche, quelle que soit la graine, aucune différence n'a été observée sur la partition d'azote par rapport au TS.

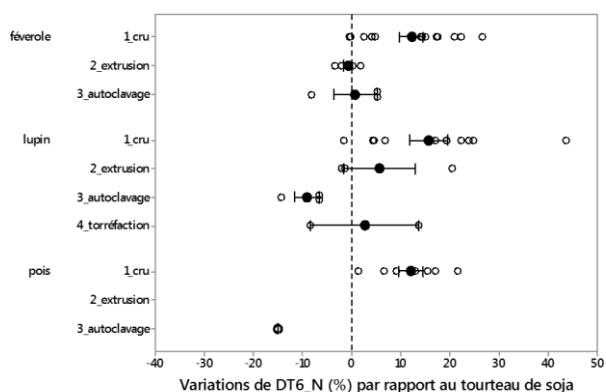


Figure 1 : écarts de DT₆_N entre les graines protéagineuses crues ou traitées et le tourteau de soja. Les symboles pleins représentent la moyenne et les symboles vides représentent les données individuelles. Les barres horizontales représentent l'erreur standard de la moyenne.

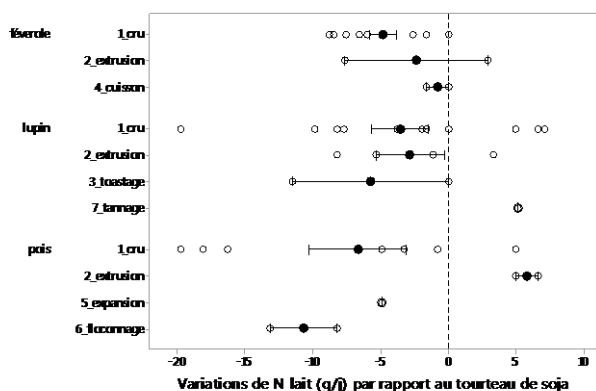


Figure 2 : écarts de sécrétion d'azote dans le lait (calculée à partir des matières protéiques) entre les graines protéagineuses crues ou traitées et le tourteau de soja. Les symboles pleins représentent la moyenne et les symboles vides représentent les données individuelles. Les barres horizontales représentent l'erreur standard de la moyenne.

2.2. GRAINES PROTEAGINEUSES CRUES VERSUS GRAINES PROTEAGINEUSES TRAITEES

2.2.1. In situ

Lorsque les GP sont traitées, une protection des protéines dans le rumen est observée (-13,8 points de DT₆_N en moyenne pour toutes les combinaisons « traitement x graine », n = 140, variations significatives ou non selon la combinaison « traitement x graine », Figure 3). Parmi les 3 graines étudiées, le lupin semble être le plus réactif aux traitements (-15,8 points de DT₆_N en moyenne pour tous les traitements, n = 69, P < 0,001 pour les traitements d'extrusion et de toastage/torréfaction). Parmi l'ensemble des traitements, le plus efficace semble être l'autoclavage (-28,7 points de DT₆_N en moyenne pour les 3 graines, n = 3). Le traitement des GP permet également d'améliorer la dr_N (+9,2 points en moyenne pour toutes les combinaisons « traitement x graine », n = 49, P ≤ 0,002), et là encore le lupin semble être le plus réactif (+32,4 points lorsqu'il est extrudé, n = 6, P = 0,001) par rapport à la féverole et au pois. De ce fait, les PIA₆ et PDIA₆ augmentent avec les traitements des GP. Les PIA₆ augmentent en moyenne pour tous les traitements, respectivement, de 18 g/kg MS (n = 25, P = 0,002 pour l'extrusion et non significatif pour les autres traitements), 53 g/kg MS (n = 56, P < 0,001) et 58 g/kg MS (n = 6, P ≤ 0,017) avec les graines de féverole, lupin et pois. Les données concernant les PDIA₆ sont plus rares, mais

permettent d'observer que ces dernières augmentent, respectivement, de 71 g/kg MS (n = 8, P ≤ 0,083) et 93 g/kg MS (n = 4, P ≤ 0,040) lorsque les graines de féverole et de lupin sont traitées (en moyenne pour tous les traitements) ; en revanche aucune donnée de PDIA₆ n'était disponible pour le pois.

2.2.2. In vivo

La proportion des protéines de la ration concernée par les substitutions des GP crues par des GP traitées est de 29 % en moyenne. La plus forte protection des protéines dans le rumen observée *in situ* lorsque les GP sont traitées est confirmée *in vivo* par une diminution de 12 mg/L de la teneur en NH₃ dans le jus de rumen (en moyenne pour toutes les combinaisons « traitement x graine », n = 16, non significatif sauf pour le lupin extrudé : P = 0,040), de même que par une diminution des AGV ramifiés dans le jus de rumen avec la féverole et le lupin extrudés (respectivement -0,5 mol/mol d'AGV totaux, n = 6, P = 0,001 et -0,5 mol/mol d'AGV totaux, n = 3, P = 0,022). Concernant la composition du lait, l'utilisation de la féverole et du lupin extrudés entraîne une plus forte sécrétion d'azote dans le lait qu'avec les graines crues (+4,1 g/j en moyenne, n = 9, P ≤ 0,085 ; Figure 4), en revanche l'utilisation de la féverole extrudée ou toastée/torréfiée et du lupin extrudé conduit à diminuer significativement le taux butyreux du lait par rapport aux mêmes graines crues : -2,2 g/kg en moyenne pour la féverole (n = 9, P ≤ 0,023) et -4,7 g/kg pour le lupin (n = 4, P = 0,006).

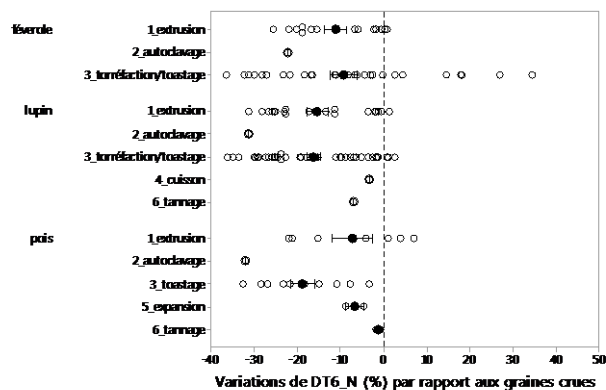


Figure 3 : écarts de DT₆_N entre les graines protéagineuses traitées et les graines protéagineuses crues. Les symboles pleins représentent la moyenne et les symboles vides représentent les données individuelles. Les barres horizontales représentent l'erreur standard de la moyenne.

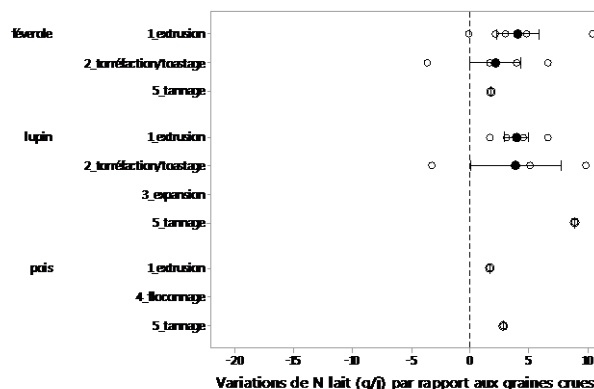


Figure 4 : écarts de sécrétion d'azote dans le lait (calculée à partir des matières protéiques) entre les graines protéagineuses traitées et les graines protéagineuses crues. Les symboles pleins représentent la moyenne et les symboles vides représentent les données individuelles. Les barres horizontales représentent l'erreur standard de la moyenne.

2.3. TOURTEAU DE SOJA VERSUS GRAINES PROTEAGINEUSES TRAITEES

2.3.1. In situ

Peu de comparaisons directes entre le TS et les GP traitées ont été trouvées dans la littérature. Les quelques données disponibles montrent que certains traitements permettent d'atteindre une DT_{6_N} inférieure avec les GP traitées par rapport au TS, et donc une meilleure protection des protéines dans le rumen, comme l'extrusion de la féverole (-0,9 point, $n = 5$, $P < 0,001$) et l'autoclavage du lupin (-9,3 points, $n = 3$, $P = 0,066$) ou du pois (-15,3 points, $n = 1$; Figure 1). D'autres traitements ont permis d'atteindre une DT_{6_N} similaire entre les GP traitées et le TS, comme l'autoclavage de la féverole et l'extrusion ou la torréfaction du lupin. Concernant la dr_N , les seules données trouvées concernaient l'extrusion. Les résultats diffèrent selon les graines : la dr_N de la féverole extrudée est inférieure de 4,1 points par rapport à celle du TS ($n = 5$, $P = 0,038$) et la dr_N du lupin et du pois extrudés n'est pas différente de celle du TS ($n = 4$). En revanche, les PIA_6 et $PDIA_6$ des GP traitées restent systématiquement inférieures à celles du TS, du fait des teneurs en MAT des GP inférieures à celle du TS : -60 g PIA_6 /kg MS en moyenne pour toutes les combinaisons « traitement x graine » ($n = 13$, variations significatives ou non selon la combinaison « traitement x graine ») et -62 g $PDIA_6$ /kg MS en moyenne pour la féverole et le lupin extrudés ($n = 7$, $P \leq 0,039$; seules données de $PDIA_6$ disponibles).

2.3.2. In vivo

La proportion des protéines de la ration concernée par les substitutions du TS par des GP traitées est de 43 % en moyenne. Là encore, les modalités de substitution sont variables d'une publication à l'autre, mais l'ingestion des animaux n'est pas modifiée entre les traitements. Les rares données trouvées dans la littérature n'indiquent aucune différence significative entre les GP traitées et le TS sur les paramètres digestifs mesurés *in vivo*, excepté une diminution de la part des AGV ramifiés dans les AGV totaux dans le jus de rumen avec le lupin extrudé (-0,2 mol/mol AGV totaux, $n = 2$, $P = 0,051$). Quelques différences (significatives ou tendances) sur les résultats de performance laitière ont en revanche été observées : l'extrusion de la féverole entraîne une diminution du rapport N lait/N ingéré (-0,9 point, $n = 2$, $P = 0,047$), la cuisson à la vapeur de la féverole et l'extrusion du lupin diminuent respectivement le taux protéique de 0,7 g/kg ($n = 2$, $P = 0,090$) et 2,2 g/kg ($n = 4$, $P < 0,001$), l'extrusion du lupin conduit à une diminution de la concentration en urée dans le lait (-67 mg/L, $n = 2$, $P = 0,085$) tandis que le floconnage du pois l'augmente (+22 mg/L, $n = 2$, $P = 0,016$), et enfin l'extrusion du pois tend à diminuer le taux butyreux (-1,4 g/kg, $n = 2$, $P = 0,070$) ainsi qu'à augmenter la sécrétion d'azote dans le lait (+5,8 g/jour, $n = 2$, $P = 0,090$).

3. DISCUSSION

Concernant les substitutions du TS par des GP crues ou des GP crues par des GP traitées, pour les résultats observés *in situ*, il est à retenir que les GP crues contiennent moins de MAT, sont plus dégradables et moins digestibles que le TS, mais que l'application d'un traitement technologique aux GP permet de diminuer leur DT_{6_N} et d'augmenter leur dr_N pour atteindre des valeurs proches de celles du TS. Certains résultats obtenus dans ce travail de méta-analyse sont toutefois un peu surprenants à première vue. Par exemple, les écarts de DT_{6_N} et de dr_N entre le TS et les GP crues sont, respectivement, plus faibles et plus importants que dans les Tables INRA (2018). Cela peut être dû aux différentes méthodes d'obtention de ces valeurs : dans ce travail, seules les données brutes issues de comparaison strictes ont été utilisées (ce qui limite le nombre de données disponibles), tandis que pour les Tables INRA de très nombreuses données disponibles ont été utilisées et

traitées pour une mise en cohérence globale de la matrice de l'aliment en fonction de sa composition chimique. De plus, les rares données de dr_N des GP crues rapportées dans les publications utilisées dans ce travail étaient particulièrement faibles (de l'ordre de 50 à 70 % !), ce qui entraîne une augmentation très importante avec le traitement technologique des GP.

En revanche, les résultats observés *in situ* pour la substitution du TS par des GP traitées, ainsi que ceux observés *in vivo* quelle que soit la substitution étudiée, sont beaucoup moins marqués que les résultats *in situ* pour les substitutions du TS par des GP crues ou des GP crues par des GP traitées, et ne reflètent pas toujours les observations *in situ*. Cela pourrait s'expliquer en partie par la valorisation marginale faible des protéines. Une autre piste pour expliquer cette différence de réponses est le risque de surestimation de la DT_{6_N} des GP en raison de possibles pertes particulières pendant l'incubation des sachets de nylon utilisés pour les mesures de dégradabilité et de digestibilité. Ces pertes ont en effet été signalées comme étant élevées avec les GP (Michalet-Doreau et Cerneau, 1992). Par conséquent, les valeurs PDI des GP peuvent avoir été sous-estimées, de ce fait un écart plus important dans les performances laitières entre le TS et les GP est attendu. De plus, ces résultats dépendent fortement de la combinaison « traitement x graine ». Ainsi, une autre explication pourrait être la grande diversité de traitements utilisés : outre leurs différentes natures, les traitements appliqués n'ont pas tous la même durée, la même température appliquée, la même pression pour les traitements thermomécaniques, etc. Ces traitements technologiques appliqués sont généralement peu décrits dans la littérature (voire parfois même pas du tout), rendant difficile l'interprétation de leurs effets sur l'utilisation par les vaches laitières des protéines issues des GP traitées. De plus, du fait de leurs différentes compositions chimiques, les GP ne réagissent pas de la même façon à un traitement défini. De surcroît, pour les essais *in vivo*, la diversité des pratiques alimentaires entre les différentes études (fourrages utilisés, taux d'incorporation des protéagineux dans la ration, etc.) contribue également à diluer les effets des substitutions entre le TS et les GP, qu'elles soient crues ou traitées. Enfin, une dernière hypothèse pour expliquer que les effets *in vivo* soient moins marqués que les effets *in situ* pourrait provenir d'une possible limitation en acides aminés, notamment en méthionine, puisque les graines protéagineuses (en particulier la féverole et le lupin) en contiennent peu. Ce déficit en méthionine pourrait « masquer » les réponses attendues du fait de l'augmentation des PDI causée par les traitements technologiques.

Un autre résultat surprenant est la baisse de la teneur en urée du lait lorsque le TS est remplacé par des GP crues dans les rations. En effet, ce résultat ne semble pas cohérent avec l'augmentation de NH_3 ruminal et de la DT_{6_N} , et avec la moindre excrétion d'N dans le lait, observées avec les GP crues. Ce résultat est toutefois à nuancer car chacun des critères étudiés, bien que faisant l'objet de comparaisons intra-essai, ne sont pas obtenus à partir des mêmes essais. Cette variabilité inter-essais est une limite du dispositif qui rend certains résultats difficiles à interpréter.

Les réponses des vaches laitières à l'utilisation des GP en remplacement du TS peuvent également être en partie liées à une différence d'apport énergétique entre les deux types de rations. En effet, si dans certaines publications, les rations ont été formulées pour être iso-énergétiques, dans d'autres, les GP apportent plus d'énergie, puisque le rapport UFL / MAT des GP est plus élevé que pour le TS. Du fait de données disponibles en faibles effectifs et de manque d'information dans les publications, il n'a pas été possible de séparer les deux cas de figures lors des analyses.

CONCLUSION

Malgré les quantités limitées de données disponibles et les pratiques d'alimentation très variées entre les études intégrées dans ce travail, certaines tendances générales ressortent de cette revue quantitative. Les résultats sur la digestion des protéines, mesurés à la fois *in situ* et *in vivo*, montrent que les protéines des GP crues sont plus dégradables dans le rumen que les protéines du TS, et que l'application de traitements technologiques à ces GP entraîne une protection des protéines dans le rumen ; protection qui est réversible dans la caillette. En revanche, les effets des substitutions du TS par des GP, ou des GP crues par des GP traitées sur les performances laitières mesurées *in vivo* sont moins clairs. La variabilité observée de ces réponses de production et de composition du lait pourrait s'expliquer en partie par des variations spécifiques à chaque étude, et en particulier les pratiques d'alimentation. De plus, lorsque les GP sont traitées, les procédés technologiques ne sont le plus souvent pas entièrement décrits, ce qui entraîne une incertitude quant à l'intensité du procédé subi par les graines. Une meilleure description de ces traitements technologiques permettrait de mieux comprendre leurs effets sur les GP, et par conséquent leurs effets sur les performances laitières lorsque ces GP traitées sont distribuées aux vaches laitières. Malgré la variabilité des résultats *in vivo*, les traitements

technologues ont amélioré la valeur nutritionnelle des GP : très peu de différences zootechniques ont été observées lorsque le TS est substitué par des GP traitées technologiquement, et certaines combinaisons « traitement x graine » ont même permis d'obtenir des DT₆_N similaires, voire plus faibles qu'avec le TS. Cette synthèse montre qu'il est donc possible de remplacer le TS par des GP traitées dans les rations des vaches laitières sans altérer significativement leurs performances zootechniques, à condition de choisir la nature du traitement technologique et ses conditions d'application adaptées à la graine utilisée.

Benchaar, C., Vernay, M., Bayourthe, C., Moncoulon, R. 1992. *Reprod. Nutr. Dev.*, 32:265-275.

Cros, P., Benchaar, C., Bayourthe, C., Vernay, M., Moncoulon, R. 1991. *Reprod. Nutr. Dev.*, 31:575-583.

DePeters, E.J., Cant, J.P. 1992. *J. Dairy Sci.*, 75:2043-2070.

INRA. 2018. Quae, Paris, France. 521-616.

Kristensen, E.S., Møller, P.D., Hvelplund, T. 1982. *Acta Agr. Scand.*, 32:123-127.

Michalet-Doreau, B., Cerneau, P. 1992. *Ann. Zoot.*, 41:13-14.

Ørskov, E.R., McDonald, I. 1979. *J. Agric. Sci.*, 92:499-503.

Spanghero, M., Kowalski, Z.M. 1997. *Livest. Prod. Sci.*, 52:113-122.

Terres Univia. 2018. Terres Univia, Paris, France. 20