

Autonomie protéique des élevages bovins : quels aliments pour remplacer le tourteau de soja ?

J. Jurquet¹, B. Rouillé², R. Boré¹, B. Deroche¹

1 : Institut de l'Elevage, 42 rue Georges Morel – CS 60057 – 49071 BEAUCOUZÉ - julien.jurquet@idele.fr

2 : Institut de l'Elevage, 8 route de Monvoisin – 35650 LE RHEU

La recherche d'une bonne efficacité protéique des rations et le recours à des graines protéagineuses autoproduites sont des pistes intéressantes pour gagner en autonomie protéique. Mais dans quelles mesures peuvent-elles aider à se passer du tourteau de soja importé dans l'alimentation des vaches laitières et des jeunes bovins ?

Résumé

Chez les ruminants, les vaches laitières (VL) et jeunes bovins (JB) sont les principaux consommateurs de tourteau de soja, majoritairement importé. L'utilisation de tourteau de colza représente la première solution pour remplacer le tourteau de soja en élevage bovin et améliorer l'autonomie protéique nationale, mais elle n'améliore pas l'autonomie à l'échelle des élevages. Le maïs fourrage plante entière est largement utilisé pour nourrir les bovins à haut potentiel de production, mais il est pauvre en protéines. L'ajout d'un fourrage riche en protéines à la place d'une partie du maïs fourrage plante entière constitue une première piste pour gagner en autonomie protéique. Il est toutefois possible de concevoir des rations améliorant l'efficacité du concentré protéique apporté et d'introduire des protéagineux dans les rations des VL et des JB. Viser des rations apportant environ 90 g PDI/kg MS dans le système d'alimentation INRA 2018 semble un bon compromis pour bien valoriser les protéines apportées par la ration. Le remplacement du tourteau de soja par des graines crues de pois, féverole, lupin est possible. Avec des rations comportant une part importante de maïs ensilage (plus de 65 %) et des niveaux de production élevés, le tourteau ne pourra être remplacé que partiellement. Chez les VL et les JB, il faut compter de 1,5 à 2,6 kg de protéagineux pour remplacer 1 kg de tourteau de soja. Ces graines affichent toutefois des teneurs en matières azotées totales (MAT) nettement inférieures à celles du tourteau de soja et se caractérisent par une forte dégradabilité de l'azote, ce qui limite leur valeur PDI (protéines digestibles dans l'intestin). Le traitement des graines grâce aux procédés de toastage ou d'extrusion, est une alternative qui fait l'objet d'un regain d'intérêt pour remédier à cette forte dégradabilité de l'azote des protéagineux. Des essais récents ont mis en évidence une amélioration de la valeur PDI des graines grâce ces procédés. Cela n'a cependant pas amélioré les performances des animaux ce qui limite à ce jour leur intérêt pour gagner en autonomie protéique.

Introduction

Améliorer l'autonomie protéique des élevages bovins répond à plusieurs enjeux majeurs : gagner en efficacité technique et économique des systèmes, être moins dépendant des marchés mondiaux, répondre aux attentes des consommateurs et réduire son empreinte environnementale. En valorisant des fourrages majoritairement produits sur l'exploitation, les élevages bovins affichent des niveaux d'autonomie massive élevés (83% en bovins lait et 89% en bovins viande, Seegers et al., 2020). Néanmoins, leur autonomie protéique est nettement plus faible (70% en bovins lait et 86% en bovins viande, Seegers et al., 2020). Cette situation est d'autant plus marquée chez les bovins à haut niveau de production et besoins en protéines élevés, comme les vaches laitières en lactation et les jeunes bovins (JB). Le tourteau de soja, dont 93% est importé et produit dans des conditions peu durables (déforestation), occupe une place importante dans ces achats extérieurs. Il représente en moyenne 2,7 à 4,6 % de la matière sèche consommée par les vaches laitières (Rouillé et al., 2022) et 6% pour les JB (Douhay et Brouard, 2021). Le recours au tourteau de colza, dont la graine est davantage produite en France, en remplacement du tourteau de soja, s'est largement développé dans les élevages français depuis le début des années 2000 (Terres Univia, 2021). Ce remplacement est une première piste permettant d'améliorer l'autonomie protéique à l'échelle nationale. Une autre solution consiste à valoriser et/ou introduire des fourrages riches en matières azotées (Baumont et al. 2022). Les auteurs renvoient vers les revues de Pierre et al. (2023, à paraître) et Deroche et Chauveau (2023) pour l'herbe pâturée et conservée. Une autre piste consiste à remplacer le tourteau de soja par des concentrés protéiques autoproduits sur l'exploitation. Cette synthèse s'intéresse plus spécifiquement à ce levier. Elle aborde, dans un premier temps, les pistes d'optimisation des rations sur le plan des apports protéiques et de l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des protéines par les bovins. Elle s'intéresse ensuite aux propriétés des graines protéagineuses et à leur utilisation en remplacement du tourteau de soja. Enfin, elle fait le point sur les traitements technologiques destinés à augmenter les teneurs en protéines métabolisables de ces graines protéagineuses et améliorer leur valorisation.

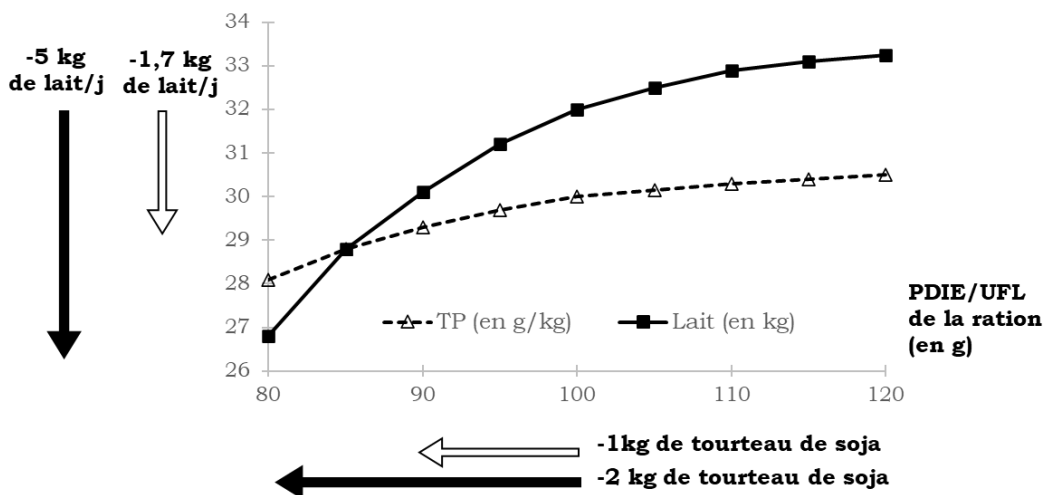
I. Réduire les apports de tourteau de soja et améliorer l'efficacité protéique

La première étape consiste à réduire les apports de concentrés protéiques achetés, notamment de tourteau de soja importé, avant de chercher à le remplacer. Le but est de limiter le gaspillage pour trouver un juste équilibre entre les apports et les besoins pour assurer des performances zootechniques conformes aux objectifs de l'éleveur.

I.1 Ajuster les quantités de concentré riche en protéines

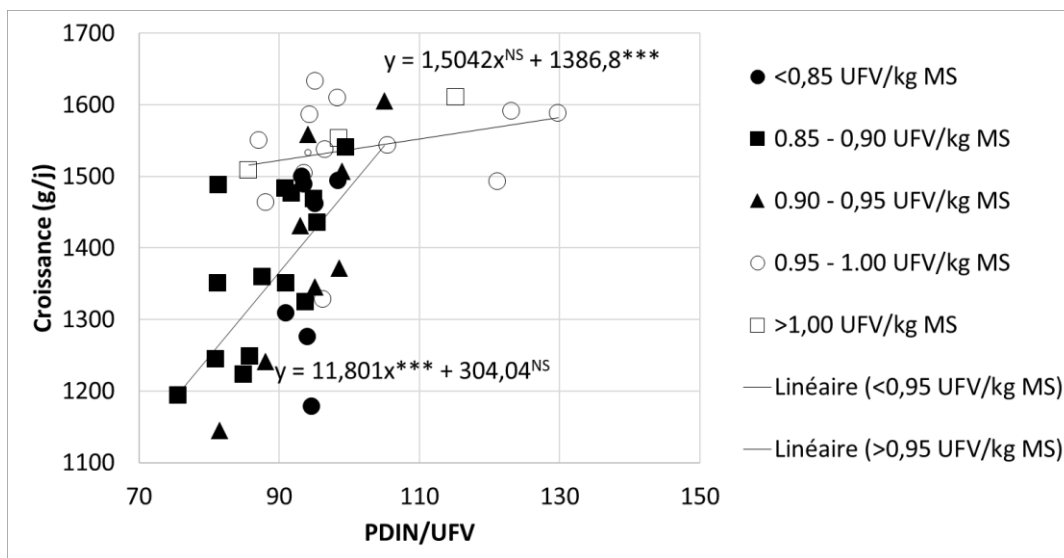
Chez les vaches laitières et les jeunes bovins, l'équilibre optimal de la ration se situe autour de 100 g de PDI/UF dans le système INRA 2007, soit environ 90 g de PDI/kg de matière sèche ingérée.

FIGURE 1 : Effet de l'équilibre azotée de la ration (exprimée par le rapport PDIE/UFL) sur la production laitière et le taux protéique de vaches laitières recevant une ration à base d'ensilage de maïs (Vérité et Delaby, 1998)



Chez les vaches laitières, au-dessus de 100 g PDI/UF, l'amélioration des performances est faible au regard des apports supplémentaires (Figure 1). Les protéines en plus sont moins bien utilisées et l'azote excrété (urée) dans le lait augmente fortement. Réduire le niveau protéique des rations permet d'économiser du concentré protéique, notamment acheté. Les performances zootechniques diminuent légèrement jusqu'à 90-95 g de PDI/UF. En deçà de 90g de PDI/UF, la baisse de performances est plus forte, surtout lorsqu'elle est associée à une baisse possible de la consommation : -1,7 kg de lait/vache/jour pour une réduction de l'apport de tourteau de soja de 1 kg/j/vache, jusqu'à 5 kg de lait pour une baisse de l'apport de tourteau de soja de 2 kg/j/vache (Figure 1).

FIGURE 2 : Effet de l'équilibre azotée de la ration (exprimée par le ratio PDIN/UFV) sur la croissance de jeunes bovins allaitants recevant une ration sèche (Haurez et al., 2003 ; Cabon et al., 2008) ou à base d'ensilage de maïs (Cadot et al., 1984 ; Hardy et Belouin, 2003 ; Haurez et al., 2003 ; Hardy et Belouin, 2005 ; Cabon et al., 2008 ; Bertron et al., 2021) ; NS : non significatif ; *** p-value <0,001



Chez les JB, la croissance (GMQ) est pilotée en priorité par les UF ingérées (Garcia et al., 2007 ; Agabriel et al., 2018). L'équilibre de 100 g de PDI/UFV dans le système INRA 2007 semble un point pivot pour atteindre de fortes croissances, quelles que soient la ration et sa densité énergétique. En effet, pour des JB laitiers (De Pous et Brandon, 1973) ou allaitants (Figure 2 ; données en JB Charolais), au-delà de 0,95 UFV/kg MS, l'augmentation de GMQ permise par un ratio PDI/UF croissant est marginale (+15 g/j pour 10 g de PDIN/UFV ; n=16 traitements ; n=4 articles). En revanche, en dessous de 0,95 UFV/kg MS, le GMQ est fortement affecté par ce ratio, car une baisse de 10 g de PDIN/UFV réduit le GMQ de 118 g/j en moyenne (n=29 traitements ; n=4 articles). La couverture des PDIN était inférieure à celle des PDIE dans la majorité des traitements de la Figure 2 (40 sur 45 traitements), impliquant une réponse zootechnique dépendante de ce critère en priorité. De ce fait, le lien entre la croissance et le ratio PDIE/UFV est moins marquée (37 traitements ; non présenté) et ne permet pas de mettre en avant l'effet pivot précédent sur le GMQ. A nouveau, la croissance des traitements au-delà de 0,95 UFV/kg MS sont faiblement affectés par ce ratio (pente non significative), tandis qu'en deçà de ce même seuil, une baisse de 10 g de PDIE/UFV réduit le GMQ de 67 g/j en moyenne (p=0,026).

La valeur pivot précédente est annoncée pour une ration identique sur l'ensemble de l'engraissement. Toutefois, les besoins en PDI rapportés aux UFV ingérées évoluent en cours d'engraissement (Garcia et al., 2007 ; Agabriel et al., 2018). Une économie de complément azoté est possible au sein de rations ajustées pendant l'engraissement (Garcia et al., 2007 ; exemple : JB Charolais avec un GMQ de 1400 g/j) en passant d'un apport de 103 g de PDI/UFV chez le jeune (350 kg) à 93 g de PDI/UFV en fin d'engraissement (700 kg).

1.2 Améliorer l'efficacité d'utilisation des protéines avec le système d'alimentation INRA 2018

L'efficacité des protéines métabolisables (effPDI) est le rapport entre les protéines utilisées pour les fonctions non productives (phanères, azote urinaire endogène, azote fécale endogène) et productives (lait et viande) d'une part, et les PDI disponibles (g/j) d'autre part. Cette efficacité est variable et dépend de plusieurs facteurs. En effet, contrairement à l'énergie, les femelles laitières en général, et les vaches en particulier, sont capables d'accroître l'efficacité d'utilisation des protéines lorsque les apports sont restreints. Par voie de conséquence, pour 100 g en plus ou en moins autour des besoins théoriques totaux, la sécrétion de protéines dans le lait ne va varier que de +/- 5 à 25 g maximum, ce qui correspond à une faible valorisation de ces protéines, plus faible que le rendement moyen des protéines produites dans le lait (Sauvant et al., 2018).

Le système d'alimentation INRA 2018 permet de prévoir l'effPDI lors du calcul de la ration. Dans les rations usuelles, l'effPDI varie entre 80 et 55 % chez les vaches laitières (en fonction du stade de lactation) ou entre 64 % et 30 % chez des JB (diminution avec la maturité), alors que celle-ci était considérée comme fixe (à 64 %) dans les précédents systèmes d'alimentation.

Lorsque la concentration de la ration en PDI/kg MS augmente, l'effPDI diminue. Ainsi, pour une vache laitière, il faut seulement 45 g de PDI pour produire 1 kg de lait à 32 g/kg de taux protéique avec une effPDI de 72 % (soit une ration à 90 g de PDI/kg MS) alors qu'il en faut 51 g avec une effPDI de 63 %. Cette relation n'est pas considérée comme une loi de réponse chez les bovins en croissance ou en finition, en raison de l'influence d'autres facteurs (Sauvant et al., 2018). Le logiciel de rationnement Rumin'al/INRA 2018, basé sur le système INRA 2018, permet de prévoir les effets d'une réduction des apports protéiques sur l'efficacité d'utilisation des protéines et la production (Tableau 1).

TABLEAU 1 : Exemple de l'effet de la réduction de la quantité de tourteau de soja dans des rations pour vaches laitières sur les caractéristiques de la ration et les valorisations animales attendues, Simulations calculées avec Rumin'al (avec PLpot= 10 300 kg, lait objectif =30 kg/j et stade de lactation = 5,5 mois), d'après INRA 2018.

Aliments distribués (en kg MS)	Ration 1	Ration 2	Ration 3
Ensilage de maïs	12,6	12,1	11,8
Ensilage d'herbe préfané	5,0	5,0	5,0
Tourteau de soja	3,5	2,6	2,2
Maïs grain	0,9	1,8	2,2
Minéraux	0,3	0,3	0,3
Matières azotées Totales de la ration (%)	17,0	15,4	14,6
PDI/kg MS	97	91	87
Production laitière attendue (kg/jour/vache)	30,9	29,6	28,9
Taux Protéique attendu (g/kg)	33,3	33,5	33,6
Efficacité des PDI (%)	70	74	76

2. Remplacer le tourteau de soja importé par des graines protéagineuses autoproduites

Pour réduire la quantité de tourteau de soja importé, l'utilisation de graines de soja françaises transformées peut s'avérer être une première solution. En effet, la France est le deuxième pays de l'Union Européenne en production de soja (Terres Univia, 2021). Néanmoins, leur disponibilité reste très limitée et ne couvre pas l'ensemble des besoins actuels des élevages bovins, en particulier dans les filières tracées « non OGM ». Il ne semble donc pas possible de remplacer tout le tourteau de soja importé par du tourteau de soja métropolitain dans les mêmes conditions d'utilisation. Des coproduits permettant de densifier la ration en protéines (> 15% MAT), comme le tourteau de colza ou la luzerne déshydratée, ont montré un intérêt zootechnique pour remplacer le tourteau de soja (Fekete, 1974 ; Brunschwig et al., 1996 ; Chaigneau et al., 2012), et permettent d'améliorer l'autonomie protéiques à l'échelle nationale. Cependant, à l'échelle de l'exploitation ces coproduits sont achetés à l'extérieur. La production de graines de protéagineux sur l'exploitation utilisatrice (autoproduction et autoconsommation) constitue une solution pour les élevages souhaitant améliorer leur autonomie protéique. Le pois, la féverole et le lupin sont les trois principales graines qui peuvent remplacer le tourteau de soja dans l'alimentation des vaches laitières et des jeunes bovins.

2.1 Caractéristiques des graines protéagineuses dans l'alimentation des bovins

Le pois, la féverole et le lupin présentent une valeur énergétique équivalente aux céréales, mais des teneurs en MAT intermédiaires, entre les céréales et le tourteau de soja (tableau 2). La teneur en MAT du pois (233 g/kg MS) est inférieure à celle de la féverole (311 g/kg MS), alors que celle du lupin est la plus élevée des trois graines (380 g/kg MS). Ces teneurs restent toutefois inférieures de 25 à 50 % à celles du tourteau de soja. Par ailleurs, les protéines de ces graines sont rapidement dégradées dans le rumen ce qui explique leurs faibles teneurs en PDI. Notons également que le lupin se différencie du pois et de la féverole par une teneur en matière grasse près de 5 fois plus élevée et une absence d'amidon (pois : 513 g d'amidon/kg MS ; féverole : 431 g d'amidon/kg MS).

Bien que moins concentrée que le tourteau, la graine de soja est également particulièrement riche en protéines. Cependant, elle présente une teneur élevée en matières grasses (23,5 % de la MS) ce qui limite son usage dans l'alimentation des bovins. Il est en effet recommandé de ne pas excéder 5 % de matières grasses dans la ration des vaches laitières et 6 % pour les JB.

TABLEAU 2 : Comparaison de la composition et des valeurs alimentaires des graines protéagineuses au tourteau de soja et au blé tendre (d'après AFZ - INRA 2002 ; INRA-CIRAD-AFZ et Legarto et Beaumont, 2006)

Composition ou valeur/kg MS	Tourteau de soja 48	Blé tendre	Pois	Féverole	Lupin	Graine de soja
Matière sèche (%)	87,7	86,9	87,2	86,0	88,1	89,0
Matières Azotées Totales (%)	49,5	12,6	23,3	31,1	38,0	38,5
Dégradabilité théorique de l'azote (%)	63	76	86	83	86	80-85
Matières grasses (%)	1,7	1,6	1,4	1,2	9,6	23,5
Amidon (g/kg)	6,8	69,1	51,3	43,1	1,0	4,8
UFL/UFV	1,25/1,27	1,20/1,22	1,21/1,23	1,20/1,22	1,43/1,47	1,43*/-
PDI	217	89	98	111	127	80*

* exprimé dans les unités des systèmes d'alimentation INRA 2007

2.2 Effets de l'introduction de graines protéagineuses crues dans l'alimentation des bovins

2.2.1 Pois, féverole et lupin crus en remplacement du tourteau dans la ration des vaches laitières

La revue d'Halmemies-Beauchet-Filleau (2018) dresse un état des lieux international d'essais où le tourteau de soja a été remplacé partiellement ou totalement dans l'alimentation des vaches laitières par des graines de pois, féverole et lupin (broyées ou aplaties ; Tableau 3).

TABEAU 3 : Effet du remplacement partiel ou total du tourteau de soja par des graines protéagineuses sur l'ingestion et la production des vaches laitières, (Halmemies-Beauchet-Filleau, 2018)

	Féverole	Féverole	Lupin	Pois	Pois
Taux de remplacement du tourteau de soja sur la base des MAT (%)	40	100	100	33 à 80	100
Nombre de références	1	1	3	3	4
Production laitière des lots témoins (kg/jour)	20 à 22	27	26 à 38	21 à 35	21 à 27
Matière sèche ingérée*	-1	-1	-1	4	2
Production laitière*	0	0	0	2	2
Taux butyreux*	-3	-3	-1	3	1
Taux protéique*	-1	-1	-3	4	3

*variation en % par rapport aux lots témoins

Dans les différents essais pris en compte, les protéagineux remplacent 33 à 100 % de la MAT apportée par le tourteau de soja des rations témoins. La production laitière moyenne des vaches des lots témoins est comprise entre 20 et 38 kg/jour. Le remplacement partiel ou total du tourteau de soja par du pois, de la féverole ou du lupin affecte peu les performances laitières. En effet, quel que soit le critère de production considéré (ingestion, production laitière, taux protéique ou taux butyreux), l'écart de performance avec celle du lot témoin est compris entre -3 et +4 %.

Ces travaux montrent qu'il est possible de remplacer le tourteau de soja par du pois, de la féverole ou du lupin crus broyés ou aplatis. Cependant, les contextes des essais référencés sont parfois éloignés des pratiques d'alimentation des éleveurs français. Ces matières premières entraînent aussi à accroissement de la compétition avec l'alimentation humaine (Rouillé et al, 2023).

Les travaux de Froidmont et al. (2004) et de Mendowski et al. (2019) se rapprochent davantage des rations rencontrées en France, en particulier du point de vue des fourrages utilisés et de la place du tourteau de soja dans ces dernières. Dans des rations maïs-herbe avec moins de 50 % de maïs ensilage, ces auteurs ont remplacé l'intégralité du tourteau de soja de la ration par des graines de lupin et/ou de féverole crues. Les rations testées par Mendowski et al. présentaient les mêmes concentrations en énergie et en matières protéiques totales. Celles proposées par Froidmont et al. avaient pour objectif d'apporter la même quantité de matières azotées totales (tableau 4).

TABEAU 4 : Composition moyenne des rations expérimentales en fonction du traitement testé

	Froidmont et al., 2004		Mendowski et al., 2019		
Composition des rations	Témoin	Lupin	Témoin	Féverole	Lupin
Ensilage de maïs / Ensilage d'herbe (% MS)	47,3/7,0	43,9/6,4	33/17	33/17	33/17
Foin (% MS)			10,0	10,0	10,0
Tourteau de soja (% MS)	18,4		11,3		
Autres concentrés protéiques (%MS)	12,0	11,0			
Protéagineux (% MS)		26,0		25,0*	18,5*
Céréales et/ou P. de betteraves déshy. (% MS)	11,8	10,6	28,4	14,7	21,2
AMV, urée et autres compléments (% MS)	3,5	3,2	0,3	0,3	0,3
Concentrations					
Matières azotées totales (g/kg MS)	203	184	146	146	146
UFL (/kg MS) / PDI (g/kg MS)	-	-	0,98/92	0,97/80	0,96/80

* Mélange composé de 90 % de protéagineux et de 10 % de graine de lin

Dans ces rations, le remplacement de la totalité du tourteau de soja par du lupin ou de la féverole crus a augmenté l'ingestion dans l'essai de Froidmont et al., contrairement aux essais de Mendowski et al. La production laitière s'est améliorée dans l'essai conduit par Froidmont et al. (2004) et s'est maintenue dans les essais conduits par Mendowski et al. (2019). Les performances des lots « protéagineux » de ces trois essais sont globalement du même ordre que ceux des lots témoins. Notons toutefois que dans l'essai de Froidmont et al., les concentrations en MAT des rations étaient relativement élevées et supérieures à ce qu'on observe dans les rations françaises. En ce qui concerne les rations utilisées par Mendowski et al., la teneur en MAT était relativement modérée et identique entre les lots. Compte tenu de la dégradabilité de l'azote plus élevée de la

féverole et du lupin, ceci a eu pour conséquence et réduction de la concentration PDI des rations « protéagineux » sans que cela n'est d'effet sur la synthèse de matières protéiques dans le lait, mettant ainsi en évidence une amélioration de l'efficacité d'utilisation des PDI (tableau 5).

TABEAU 5 : Consommations d'aliments et performance zootechniques des rations testées

	Froidmont et al., 2004		Mendowski et al., 2019		Mendowski et al., 2019	
	Témoin	Lupin	Témoin	Féverole	Témoin	Lupin
Ingestion totale (kg MS)	21,5 ^a	23,7 ^b	21,6	21,1	21,3	19,6
Dont Protéagineux (kg MS)	-	6,2	-	5,3	-	3,6
Production laitière (kg/jour)	34,2 ^a	35,7 ^b	29,7	28,7	29,4	29,4
Taux butyreux (g/kg)	35,2 ^a	32,1 ^b	31,6	33,9	32,6	32,4
Taux protéique (g/kg)	31,8	31,6	30,6 ^a	29,1 ^b	31,5 ^a	29,2 ^b
Matières grasses (g/jour)	1186	1121	925	986	958	947
Matières protéiques (g/jour)	1081 ^a	1124 ^b	888	842	917	857
Urée (mg/litre)	403	416	177	143	178 ^a	140 ^b
Efficacité d'utilisation des PDI (%)	-	-	73	82	73	88

Les graines de pois, de lupin et de féverole ont également été utilisées dans un contexte de rations contenant une forte proportion d'ensilage de maïs (plus de 65 %) en remplacement de tourteau de colza dont une partie était tannée (Brunschwig et al., 2001 ; Brunschwig et al., 2002 ; Brunschwig et al., 2003 et Brunschwig et al., 2004). Si ces essais ne s'intéressaient pas au remplacement du tourteau de soja proprement dit, ils présentent l'intérêt d'étudier des situations nécessitant un recours important aux concentrés protéiques comme c'est le cas dans certains élevages de l'ouest de la France. Dans ces essais, le pois, la féverole et le lupin ont permis de remplacer respectivement 45 %, 58 % et 75 % du tourteau de colza de la ration sans modification majeure des performances de production. Le tourteau de colza tanné n'a cependant été réduit qu'avec le lupin ; le pois et la féverole ne possédant pas une teneur en PDI suffisamment élevée pour y parvenir.

L'introduction de graines protéagineuses dans la ration des vaches laitières est donc un moyen pour réduire voire supprimer le tourteau de soja. **En brut, pour remplacer 1 kg de tourteau de soja il faut compter 2,6 kg de pois, 2,5 kg de féverole ou 1,6 kg de lupin.** Dans ces conditions, le pois et la féverole peuvent être utilisés comme seuls concentrés protéiques pour des niveaux de production ne dépassant pas 25 à 28 kg de lait/jour alors que le seuil est porté à environ 30 kg de lait/jour avec du lupin. Cela suppose d'accepter un excès d'azote soluble (se traduisant par une balance protéique du rumen élevée). Au-delà de ces niveaux de production, il faudra associer les protéagineux à des aliments plus concentrés en PDI.

2.2.2 Introduction de graines crues de soja dans la ration des vaches laitières

Deux essais chez des vaches laitières alimentées avec des rations contenant plus de 65 % de maïs ensilage ont été conduits par Legarto et Beaumont (2006). L'objectif était de comparer trois niveaux d'incorporation de graines crues de soja dans les rations : 2, 4 ou 6 kg brut/vache/jour. Les graines crues ont remplacé du tourteau de soja ou un correcteur protéique du commerce. Compte tenu de la faible valeur PDIE 2007 de la graine crue comparativement au tourteau, les rations « graines crues » étaient complétées par du tourteau de soja tanné afin de composer des rations iso-PDIE.

La production laitière a été améliorée avec 2 kg de graines de soja crues/vache/jour (+2,2 kg/vache/jour), maintenue avec 4 kg de graines de soja, mais réduite avec 6 kg de graines de soja, sans modification du taux protéique. L'introduction de graines crues de soja, riches en matières grasses (tableau 2), a eu un effet dépressif sur le taux butyreux des lots « graines crues ». La diminution est perceptible dès l'introduction de 2 kg de graines (-0,5 à -1,2 g/kg) et s'accroît avec les apports plus élevés pour atteindre -3,3 g/kg. Selon les auteurs, la dose de **2 kg de graines crues de soja par vache et par jour serait un bon compromis** d'un point de vue zootechnique. Dans ces conditions, l'économie de tourteau de soja est modérée (30%). Exprimée en économie de PDI issues du tourteau de soja, elle n'est plus que de 23%. Ceci démontre par ailleurs que dans une démarche de remplacement du tourteau de soja par une graine protéagineuse, le rationnement protéique doit impérativement se raisonner sur la base des PDI.

2.2.3 Pois, féverole et lupin crus en remplacement du tourteau de soja dans la ration des jeunes bovins

Selon la revue de Halmemies-Beauchet-Filleau et al. (2018), **le remplacement partiel ou total du tourteau de soja par une graine de protéagineux n'affecte pas en général la croissance** ou l'ingestion.

En ration sèche, le lupin ou le pois aplati parviennent à remplacer tout ou partie du tourteau de soja (Murphy et McNiven, 1994 ; Haurez et al., 2003). Les croissances sont maintenues avec le lupin (Murphy et McNiven, 1994), voire supérieures dans les rations où le tourteau de soja est partiellement ou totalement remplacé, grâce à une ingestion supérieure (-0,8 UFV ; Haurez et al., 2003). Pour maintenir une teneur en PDI proche dans une ration avec 0,7 kg MS de tourteau de soja, le remplacement total du tourteau nécessite 2 kg de pois, tandis qu'un remplacement partiel (-0,3 kg MS de tourteau) nécessite 1,5 kg MS de pois. La part de blé est également réduite dans le même temps (-0,6 et -0,4 kg MS). La ration est maintenue à 1 UFV/kg MS, grâce à la forte valeur UFV du pois (1,12). Quel que soit le régime, les résultats de carcasse sont identiques. L'économie de tourteau de soja est de 83 kg pour un remplacement partiel et 163 kg pour un remplacement total sur toute la durée d'engraissement (213 j en moyenne).

Dans une ration à base d'ensilage, lorsque la quantité de correcteur azoté est identique, les jeunes bovins recevant du lupin croissent moins que ceux alimentés avec du tourteau de soja (Murphy et McNiven, 1994), à cause du déficit protéique du lupin. Pour une ratio iso-protéique, le remplacement du tourteau de soja par du lupin (Moss et al., 1997) ou de la féverole (Keller et al., 2021) n'affecte pas les performances de jeunes bovins. Quelle que soit la part de maïs fourrage dans la ration (50% : tableau 7 ; 60 – 70% : tableau 8 ; 80% : Cadot et al., 1984), la suppression totale ou partielle de tourteau de soja est possible aussi bien avec des graines aplaties (Haurez et al., 2003 ; Hardy et Belouin 2003 et 2005 ; Bertron et al., 2021) ou broyées (Cadot et al., 1984) de féverole, pois ou lupin. Dans la majorité des essais, les croissances ou les caractéristiques des carcasses (poids, rendement, conformation) ne diffèrent pas significativement entre traitements étudiés (Cadot et al., 1984 ; Haurez et al., 2003 ; Hardy et Belouin, 2003 et 2005 ; Bertron et al., 2021). Seuls Haurez et al. (2003) observent une baisse significative du GMQ sur l'un de leur traitement (féverole) sans explication apparente. L'ingestion des JB est supérieure avec la féverole dans des rations incluant 50% d'ensilage de maïs (tableau 6), mais pas 60-70% (tableau 7), ce qui ne permet pas de généraliser sur l'effet de cette graine. Sur l'ensemble des articles, l'écart de croissance au traitement avec tourteau de soja est compris entre +3,5 et -9,5% pour toutes les graines avec remplacement partiel ou total.

Pour remplacer totalement le tourteau de soja, il a été nécessaire d'apporter **1,5 à 2 kg brut de lupin ou 2,1 à 2,6 kg brut féverole par kg brut de tourteau de soja**. Comme vu précédemment, la plus forte densité protéique du lupin explique cette moindre incorporation. Selon les études et taux d'incorporation d'ensilage de maïs, l'économie de tourteau de soja réalisée est de 250 kg MS/JB (260 j d'engraissement ; tableau 6), 250 kg MS/JB (260 j d'engraissement ; tableau 7) ou 269 kg MS/JB (225 j d'engraissement ; Cadot et al., 1984).

Dans le cas où l'ensilage de maïs récolté est de faible valeur alimentaire (encombrant et/ou pauvre en énergie), le remplacement total de tourteau de soja devient compliqué si l'on souhaite maintenir un haut niveau de croissance, nécessitant des densités UFV et PDI élevées. En effet, la densité protéique de ces trois graines de protéagineux est plus faible que celle du tourteau de soja. Un remplacement partiel peut être envisagé. Dans le tableau 8, 0,5 kg MS de tourteau de soja a été remplacé en moyenne par 1,6 kg MS de pois et 1,9 kg MS de féverole. L'économie de tourteau de soja est limitée à 90 kg MS/JB avec le pois et 139 kg MS/JB avec la féverole (267 j d'engraissement).

TABLEAU 6 : **Effet du remplacement total du tourteau de soja par la féverole ou le lupin en ration avec 50% d'ensilage de maïs** (Cadot et al., 1984 ; Hardy et Belouin, 2005) ; * données PDIE absentes du compte rendu

	Tourteau de soja	Féverole	Lupin
Nombre de traitements	2	2	2
Ensilage maïs (% MS)	49%	52%	49%
Paille (% MS)	2%		2%
Blé (% MS)	37%	18%	24%
Tourteau de soja (% MS)	11%		
Graine de protéagineux (% MS)		27%	22%
UFV (/kg MS)	0,96	0,96	0,97
PDIN / PDIE (g/kg MS)	92 / 100	87 / 87	91 / *
Ingestion (kg MS)	8,85	9,62	8,54
Croissance (g/j)	1561	1592	1531

TABEAU 7 : Effet du remplacement partiel ou total du tourteau de soja par la féverole ou le pois en ration avec 60-70% d'ensilage de maïs (Haurez et al., 2003 ; Bertron et al., 2021)

	T. soja	T. soja + féverole	Féverole	T. soja + pois	Pois
Nombre de traitements	6	4	2	2	2
Ensilage maïs (% MS)	66%	65%	65%	69%	65%
Paille (% MS)	2%	2%	3%	1%	3%
Blé (% MS)	20%	9%	4%	2%	4%
Tourteau de soja (% MS)	10%	5%		7%	
Graine de protéagineux (% MS)		18%	25%	21%	24%
UFV/kg MS	0,89	0,91	0,90	0,89	0,90
PDIN / PDIE (g/kg MS)	86 / 99	88 / 94	85 / 94	84 / 89	73 / 89
Ingestion (kg MS)	10,42	10,39	9,97	11,04	9,99
Croissance (g/j)	1499	1442	1334	1467	1419

2.3 Traitement technologique des graines protéagineuses pour gagner en protéines métabolisables

Protéger les protéines des graines de protéagineux en limitant leur dégradation ruminale constitue une piste pour remédier à leur dégradabilité élevée, afin d'augmenter leur teneur en protéines métabolisables. Plusieurs procédés alternatifs au traitement avec le formol existent : thermique, physique ou chimique. En France, le toastage et l'extrusion sont les deux principaux qui ont fait l'objet d'études récentes appliquées aux graines protéagineuses, développées ci-après.

2.3.1 Le toastage

Le toastage est un procédé thermique qui consiste à cuire la graine à cœur (120 °C) avec un air chauffé à 280°C (Chambre d'Agriculture de Normandie, 2017).

Trois essais récents ont **évalué l'effet du toastage de graines de féverole et de soja sur les performances des vaches laitières** (Jurquet et al., 2020 ; Berchoux et al., 2022) dans des rations contenant 45 % à 60 % d'ensilage de maïs et dosant 92 à 95 g de PDIE/UFL. Dans chacun des essais, les rations « graines crues » et « graines toastées » présentaient la même composition. Seule la forme des graines différait. Les proportions de féverole et de graine de soja dans les rations (crues ou toastées) étaient respectivement de 17,8 % et 8,0 %.

La digestibilité enzymatique à une heure (DE1) (Aufrère et al., 1989) de l'azote dans le rumen des graines toastées utilisées dans les essais 1, 2 et 3 a été diminuée respectivement de 32, 43 et 51 points par rapport aux mêmes graines crues. Ceci s'est traduit par une hausse des PDIE ingérées par les animaux de respectivement +114, +254 et +109 g/j pour les lots « graines toastées » des essais 1, 2 et 3.

Malgré cette hausse des apports en protéines métabolisables, le toastage n'a pas eu d'effet sur la production laitière. Le taux protéique a été significativement réduit sous l'effet du toastage dans les essais 1 et 2, mais la quantité de matières protéiques dans le lait est restée inchangée (Tableau 8). Dans l'essai 3, le taux protéique n'est pas affecté par le toastage, en revanche la quantité de matière protéique est significativement améliorée. Dans ces essais, la hausse attendue de matière protéique sous l'effet du toastage était comprise entre +20 et +50 g/j. Dans les essais 1 et 2, l'absence de différence de matières protéiques semble liée à la baisse du TP, celle-ci faisant probablement suite à une baisse de la teneur en méthionine digestible (MetDi) des rations féveroles toastées. En effet, les graines protéagineuses crues ont un taux de MetDi similaire au tourteau de soja, mais le toastage le réduit (Baumont et al., 2007, 2018). Le supplément de PDIA apporté grâce au toastage accroît ce déséquilibre en MetDi pour des rations déjà légèrement déficitaires. Ceci n'est toutefois pas le cas dans l'essai 3 probablement en raison des besoins plus faibles des animaux et de la présence d'ensilage d'herbe dans la ration, moins déficitaire en MetDi.

TABLEAU 8 : Effet du toastage de graines de féveroles et de graines de soja

	Jurquet et al., 2020 Essai 1		Jurquet et al., 2020 Essai 2		Berchoux et al., 2022 Essai 3	
	Crue	Toastée	Crue	Toastée	Crue	Toastée
Ingestion totale (kg MS)	26,9	26,8	23,7	24,1	18,3	18,4
Dont féverole (kg MS)	4,8	4,8	4,2	4,3	-	-
Dont graine de soja (kg MS)	-	-	-	-	1,5	1,5
Production laitière (kg/jour)	37,8	38,2	26,5	27,0	20,6	21,2
Taux butyreux (g/kg)	39,6	39,3	45,3	45,6*	45,4	46,1
Taux protéique (g/kg)	29,5	28,9**	34,1	33,2***	35,0	35,4
Matières grasses (g/jour)	1496	1497	1170	1215	935	977
Matières protéiques (g/jour)	1115	1104	895	883	709	730*

*/**/** : non significatif ; $p < 0,05$; $p < 0,01$; $p < 0,001$ intra essai

Les procédés de toastage testés améliorent faiblement la valeur nutritive des graines de féverole ou de soja en réduisant la DT de l'azote. Cependant, ceci s'est traduit au mieux par une légère amélioration des matières protéiques synthétisées dans le lait dans des rations où la quantité de protéagineux était relativement élevée.

Une absence de différence significative a également été observée sur la croissance de jeunes bovins recevant une ration sèche ou à base d'ensilage d'herbe, complémentée avec une même quantité de lupin cru ou toasté (Murphy et McNiven, 1994).

Chez les JB, deux essais avec pois ou féverole aplaties dans la ration ont visé le **maintien de l'objectif de croissance** entre traitements. Le taux de concentré total était identique, mais la part de céréale et correcteur azoté, ainsi que le type de graine de protéagineux pouvait être modulé. Ce schéma expérimental a permis **d'évaluer l'autonomie protéique de rations à base d'ensilage de maïs et complémentées avec une graine de protéagineux crue ou toastée** (Bertron et al., 2021). La ration témoin (graine crue aplatie) des essais « féverole » et « pois » comportait respectivement 5 et 7 % de tourteau de soja, 9 et 2% de blé, ainsi que 19 % de féverole ou 21 % de pois. Dans les deux essais, le remplacement total de la graine crue par la graine aplatie toastée a permis de réduire le tourteau de soja (-5 et -3 points), mais en maintenant la part de blé (essai «féverole») ou l'augmentant (+2 points ; essai pois), tandis que la part de graine de protéagineux toastée a atteint 23 % de féverole et 22 % de pois. Sur la base des valeurs tables INRA 2007 pour les graines toastées, les rations étaient iso-PDIE/UFV, mais un déficit de 5 points de PDIN/UF était relevé pour les rations avec la graine toastée dans chaque essai.

Dans ces deux essais, les ingestions étaient identiques (entre 10,8 et 11,0 kg MS) et aucune différence significative n'a été relevée sur la croissance et les résultats de carcasse entre lots (poids, rendement, conformation). En valeur, le GMQ de la ration avec graine toastée a été réduit de -113 g/j et -43 g/j dans l'essai «féverole» et «pois», à cause du déficit en PDIN annoncé précédemment. Celui-ci provient d'une moindre amélioration de la teneur en PDIN des graines toastées (respectivement pois et féverole : +12 et 21 g PDIN/kg MS ; + 24 et 36 g PDIE/kg MS) par rapport aux valeurs annoncées dans les tables INRA 2007 (respectivement pois et féverole : +35 et 43 g PDIN/kg MS ; + 72 et 96 g PDIE/kg MS). Il en résulte toutefois une réduction de l'ordre de 126 à 143 kg MS et 55 à 76 kg MS de tourteau de soja avec la graine toastée, respectivement dans l'essai «féverole» et «pois».

2.3.2 L'extrusion

L'extrusion correspond à un traitement thermomécanique des graines durant un temps très bref (moins d'une minute). Les graines subissent en général un pré-traitement thermique de température variable (60 à 90°C) et de durée souvent courte (2 à 3 minutes) (Nozière et al., 2022).

Mendowski et al. (2019) ont comparé les performances de vaches laitières recevant une graine crue broyée ou une graine extrudée à 140 ou 160 °C. Les rations expérimentales étaient iso MAT et présentaient la même composition (composition des rations « féverole » et « lupin » identiques à celles présentées dans le tableau 4).

TABEAU 9 : Effet de l'extrusion de graines de féveroles et de lupin sur les performances des vaches laitières
(Mendowski et al., 2019)

	Féverole Cru	Féverole extrudée à 140°C	Féverole extrudée à 160°C	Lupin Cru	Lupin extrudé à 140°C	Lupin extrudé à 160°C
Ingestion totale (kg MS)	21,1	21,9	21,7	19,6	19,9	19,1
Production laitière (kg/jour)	28,7	31,5	28,9	25,9	24,5	24,4
Taux butyreux (g/kg)	33,9	28,5	30,9	32,4 ^a	27,0 ^b	29,2 ^b
Taux protéique (g/kg)	29,1	28,8	29,3	29,2	29,2	29,2
Matières grasses (g/jour)	986	898	893	947	811	855
Matières protéiques (g/jour)	842	906	842	857	885	867
Urée (mg/litre)	143	135	123	140	120	102
PDI ingérées (g/jour)	1697 ^a	2003 ^b	2155 ^b	1558 ^a	1818 ^b	1902 ^b
Efficience d'utilisation des PDI (%)	82 ^a	73 ^b	64 ^c	88 ^a	78 ^b	69 ^c

L'ingestion des vaches laitières ne diffère pas entre les lots, quelle que soit la graine considérée et sa forme d'apport. L'extrusion des graines de féverole et de lupin se traduit par une hausse des PDI ingérées sans différence significative entre les deux modalités de températures d'extrusion. Celle-ci s'explique par la diminution de la dégradabilité de l'azote dans le rumen sans que le procédé d'extrusion ne pénalise la digestibilité réelle de l'azote dans l'intestin. Finalement, la dégradabilité de l'azote dans le rumen des graines extrudées est nettement plus faible que celle des graines crues et équivalente à celle du tourteau de soja. La teneur en PDIA des graines extrudées est multipliée par trois par rapport aux graines crues (Nozière et al., 2022).

Malgré cette hausse significative des PDI ingérées, les matières protéiques synthétisées dans le lait ne diffèrent pas entre les lots consommant des graines crues et ceux consommant des graines extrudées. Ces résultats s'expliquent par la baisse d'efficience d'utilisation des PDI associée à la hausse des PDI ingérées.

Conclusion

Plusieurs voies d'amélioration de l'autonomie protéique des rations existent, mais il convient de les utiliser de manière cohérente. Avant de chercher un remplaçant au tourteau de soja dans l'alimentation des vaches laitières et des jeunes bovins, **la première étape consiste à viser une certaine sobriété protéique**. La connaissance des valeurs nutritives des aliments et la connaissance des animaux à alimenter doivent permettre d'ajuster au mieux les quantités de concentré protéique de la ration. Viser une densité de l'ordre de **95 à 100 g PDI/UF ou 90 g PDI/kg MS semble un bon compromis** pour les vaches laitières comme pour les jeunes bovins. Le rationnement des bovins avec le nouveau système de rationnement INRA 2018 offre par ailleurs la possibilité de prévoir les effets d'une modulation des apports de concentré protéique et de trouver ainsi le meilleur équilibre entre les apports et les produits (lait et croissance).

L'introduction de graines de protéagineux autoproduites dans la ration fait également partie des leviers à disposition des éleveurs. Ces graines présentent des teneurs en protéines nettement inférieures à celle du tourteau de soja, c'est pourquoi il faut compter selon la graine utilisée entre 1,5 et 2,6 kg de protéagineux pour remplacer un kg de tourteau de soja. D'un point de vue zootechnique, le pois, la féverole, le lupin, et dans une moindre mesure la graine de soja, peuvent remplacer tout ou une partie du tourteau de soja de la ration. Il semble néanmoins difficile, avec des animaux à forts besoins et dans des régimes comportant plus de 65 % de maïs ensilage pour les vaches laitières, de remplacer en totalité le tourteau utilisé par des graines crues de protéagineux pour corriger le fort déficit protéique de la ration, sans pénaliser les performances.

Le toastage et l'extrusion sont des pistes séduisantes pour améliorer la teneur en protéines métabolisables des protéagineux. Malgré une amélioration de la valeur PDI des graines permise par ces process, aucune amélioration significative des performances zootechniques n'est observée dans les essais *in vivo* récents. De plus, il semble que l'amélioration des valeurs PDI permise par ces techniques soit contrebalancée par un déficit accru en acides aminés limitants (méthionine).

Les graines protéagineuses ne constituent donc pas une solution unique pour remplacer le tourteau de soja. Leur culture et leur introduction dans la ration des bovins doivent s'intégrer dans l'équilibre global de l'exploitation, en particulier l'assolement et les coûts associés. L'intérêt économique pour l'éleveur de remplacer le tourteau de soja par un protéagineux reste à préciser dans le contexte actuel. En outre, les travaux sur les traitements technologiques doivent être poursuivis pour réussir à transformer les gains de dégradabilité de

l'azote en économie de concentrés protéiques réelles sur les animaux, et pour préciser les coûts énergétiques associés.

Enfin, si la réduction des niveaux protéiques et le recours à des protéagineux sont des leviers intéressants, n'oublions pas que pour réussir à se passer totalement de concentré protéique, il faut inévitablement travailler en parallèle sur la voie des fourrages en réduisant la part de maïs ensilage plante entière de la ration au profit de fourrages plus riches en protéines comme l'herbe.

Références Bibliographiques

- AUFRERE J., GRAVIOU D., DEMARQUILLY C., VERITE R., MICHALET-DOREAU B., CHAPOUTOT P. (1989). "Aliments concentrés pour ruminants : prévision de la valeur azotée PDI à partir d'une méthode enzymatique standardisée". *INRA Productions Animales*, 2, 249-254.
- AGABRIEL J., SEPCHAT B., CANTALAPIEDRA-HIJAR G., ORTIGUES-MARTY I. (2018). "Bovins en croissance et à l'engrais", In: *Alimentation Des Ruminants. Nozière, P., Sauvant, D. et Delaby L., Versailles*, 341-376.
- BAUMONT R., DULPHY J.-P., SAUVANT D., TRAN G., MESCHY F., AUFRERE J., PEYRAUD J.-L., CHAMPCIAUX P. (2007). "CHAPITRE 9. Les tables de la valeur des aliments". In : *Alimentation des bovins, ovins et caprins : besoins des animaux, valeurs des aliments : tables Inra 2007. Quae, Versailles*, pp. 181-275.
- BAUMONT R., DECRUYENAERE V., MAXIN G., RIUILLE B., HEUZE V., TRAN G. . (2022). "Valoriser une diversité de biomasses pour répondre aux enjeux techniques, environnementaux et sociétaux des élevages de ruminants". *Rencontres Recherches Ruminants, Paris*, 26.
- BAUMONT R., TRAN G., CHAPOUTOT P., MAXIN G., SAUVANT D., HEUZE V., LEMOSQUET S., LAMADON A. (2018). "Tables INRA de la valeur des aliments utilisés en France et dans les régions tempérées". In : *Alimentation Des Ruminants. Nozière, P., Sauvant D. et Delaby L., Quae, Versailles*, pp. 521-618.
- BERCHOUX A., DUVAL M., GUILLIER M., HERMANT E., LEGRIS M., JOUFFROY M. (2022). "Effet du toastage de graines de soja sur les performances laitières de vaches laitières". *Rencontres Recherches Ruminants, Paris*, 26.
- BERTRON J.J., DEROCHE B., VALANCE S., MERLE L.A. (2021). "JB Toast - Toastage de protéagineux pour des jeunes bovins à l'engraissement". N° 0021301058, *Résultats. Institut de l'Elevage*. 48.
- BRUNSWIG P., LAMY J.-M. (2001). "Source protéiques végétales alternatives au tourteau de soja pour l'alimentation des vaches laitières". *Rencontres Recherches Ruminants, Paris*, 8, 292.
- BRUNSWIG P., LAMY J.-M. (2002). "Utilisation de féverole ou de tourteau de tournesol comme sources protéiques dans l'alimentation des vaches laitières". *Rencontres Recherches Ruminants, Paris*, 9, 316.
- BRUNSWIG P., LAMY J.-M., WEILL P., LEPAGE E., NERRIERE P. (2003). "Lupin broyé ou extrudé comme correcteur unique pour vaches laitières". *Rencontres Recherches Ruminants, Paris*, 10, 383.
- BRUNSWIG P., LAMY J.-M., PEYRONNET C., CREPON K. (2004). "Valorisation de la féverole dans des rations pour vaches laitières". *Rencontres Recherches Ruminants, Paris*, 10, 275.
- CABON G., GARREAU R., MESLIER E. (2008). "Base de données sur la dégradation in situ de la matière sèche du maïs fourrage : aspects méthodologiques et description du contenu". *Rencontres Recherches Ruminants, Paris*, 15, 309.
- CADOT, MERIEAU, RIVOISY (1984). "Tourteau de soja, tourteau de colza, pois, lupin en complément d'ensilage de maïs pour la production de taurillons Charolais". N° 84053. *ITEB et EDE Vendée, Etablères*, 23.
- CHAIGNEAU F., BASTIEN D., BENOIT M. (2012). "Valorisation des tourteaux fermiers de colza en production viande bovine". Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire et Institut de l'Elevage, 4. Disponible via https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Pays_de_la_Loire/2012/2012_tourteaux_colza_en_prod_V_B.pdf
- DEROCHE B., CHAUVEAU H. (2023). "Les fourrages conservés riches en protéines : une ressource d'intérêt pour améliorer l'autonomie des élevages de bovins lait et viande", *Fourrages*.
- DE POUS M., BRANDON G. (1973). "Utilisation du maïs grain pour la production de jeunes bovins - niveau de complémentation azotée". N°31. *ITCF, Boigneville*. 13.
- DOUHAY J., BROUARD S. (2021). "Les conduites alimentaires en finition de l'offre française de viandes de gros bovins", *Interbev et Idele*, 99.
- FEKETE J. (1974). "Utilisation de maïs fourrage pour la production de jeunes bovins - complémentation azotée : substitution de luzerne déshydratée au tourteau de soja". N°4-8-03-61. *ITCF, Quimper*, 17.
- FROIDMONT E., BARTIAUX-THILL N. (2004). "Suitability of lupin and pea seeds as a substitute for soybean meal in high-producing dairy cow feed". *Animal Research*, 53, 475-487.
- GARCIA F., AGABRIEL J., MICOL D. (2007). "Alimentation des bovins en croissance et à l'engrais", In : *Alimentation des bovins, ovins et caprins : besoins des animaux, valeurs des aliments : tables Inra 2007. Quae, Versailles*, pp. 89-120.
- HALMEMIES-BEAUCHET-FILLEAU A., RINNE M., LAMMINEN M., MAPATO C., AMPAPON T., WANAPAT M., VANHATALO A. (2018). "Review: Alternative and novel feeds for ruminants: nutritive value, product quality and environmental aspects". *Animal*, 12, s295-s309.
- HARDY A., BELOUIN M. (2003). "Production de jeunes bovins Charolais - utilisation du lupin en complément de l'ensilage de maïs". *Arvalis Institut du Végétal, La Jaillière*, 30.
- HARDY A., BELOUIN M. (2005). "Production de jeunes bovins Charolais - utilisation de la féverole en complément de l'ensilage de maïs". *ARVALIS Institut du Végétal, La Jaillière*, 30.

- HAUREZ P., FARRIE J.-P., JOULIE A., POISEAU O., RENON J. (2003). "Utilisation des fèves et du pois pour l'engraissement des jeunes BOVINS Charolais". N° 3164 et 3187. *Institut de l'élevage, Chambre d'Agriculture de la Vendée et de Saône et Loire, Chambres régionales d'agriculture des Pays de la Loire et de Bourgogne, Stations expérimentales des Etablissements et de Jalogny*. 30.
- INRAE, CIRAD, AFZ. "Table INRAE-CIRAD-AFZ Composition et valeurs nutritionnelles des matières premières pour bovins, ovins, caprins, porcs, volailles, chevaux, lapins et salmonidés". <https://feedtables.com/fr> consulté le 3/01/2023.
- JURQUET J., BROCARD V., BORE R., GILLIER M., TRANVOIZ E., GERADR C. (2020). "Effet du toastage de graines de fève sur les performances des vaches laitières". *Rencontres Recherches Ruminants, Paris*, 25, 218.
- KELLER, M., REIDY, B., SCHEURER, A., EGGERSCHWILER, L., MOREL, I., GILLER, K., 2021. "Soybean meal can be replaced by faba beans, pumpkin seed cake, spirulina or be completely omitted in a forage-based diet for fattening bulls to achieve comparable performance, carcass and meat quality". *Animals*, 11, 1588.
- LEGARTO J., BEAUMONT B. (2006). "Détermination de seuils d'incorporation de la graine de soja crue dans l'alimentation des vaches laitières". N° 030631013 *Collection Résultats, Institut de l'Élevage*, https://idele.fr/fileadmin/medias/3418-Determ_seuils_incorpor_graine_soja_1_.pdf (consulté le 08/02/2023, (38p).
- MENDOWSKI S., CHAPOUTOT P., CHESNEAU G., FERLAY A., ENJALBERT F., CANTALAPIEDRA-HIJAR G., GERMAIN A., NOZIERE P. (2019). "Effects of replacing soybean meal with raw or extruded blends containing faba bean or lupin seeds on nitrogen metabolism and performance of dairy cows". *Journal of dairy science*, 102, 5130-5147.
- MOSS A.R., GIVENS D.I., GRUNDY H.F., WHEELER K.P.A. (1997). "The nutritive value for ruminants of lupin seeds from determinate plants and their replacement of soya bean meal in diets for young growing cattle". *Animal Feed Science and Technology*, 68, 11-23.
- MURPHY S.R., MCNIVEN M.A. (1994). "Raw or roasted lupin supplementation of grass silage diets for beef steers". *Animal Feed Science and Technology*, 46, 23-35.
- NOZIERE P., MENDOWSKI S., FERLAY A., PEYRONNET C., ENJALBERT F., CHESNEAU G., GERMAIN A., CHAPOUTOT P. (2022). "Améliorer l'utilisation des graines oléo-protéagineuses par l'extrusion : un enjeu technologique pour contribuer à l'autonomie protéique des élevages bovins laitiers". *INRAE Productions Animales*, 35, 2, 121-138.
- PAVIE J., LE GALL A. (2022). "L'autonomie protéique des élevages de ruminants en France : un objectif réalisable ?". *Rencontres Recherches Ruminants, Paris*, 26.
- PEYRAUD J.-L., APPER-BOSSARD E. (2006). "L'acidose latente chez la vache laitière". *INRA Productions Animales*. 19, 2, 79-92.
- ROUILLE B., JOST J., FANÇA B., BLUET B., JACQUEROUD M.P., SEEGER J., CHARROIN T., LE COZLER Y., (2023). "Evaluating net energy and protein feed conversion efficiency for dairy ruminant systems in France". *Livestock Science*, 105170.
- ROUILLE B., JURQUET J., BROCARD V., BORE R., HARDY D. (2022). "Quelle part de tourteau le soja importé représente-t-il dans la ration des vaches laitières en moyenne en France ?". *Rencontres Recherches Ruminants, Paris*, 26.
- SAUVANT D., CANTALAPIEDRA-HIJAR G., LEMOSQUET S., NOZIERE P., BERTHELOT V., FAVERDIN P. (2018). "Dépenses, efficacité métabolique et besoins en protéines et en acides aminés". In: *Alimentation Des Ruminants*. Nozière, P., Sauvant, D. et Delaby L. Versailles, pp. 133-156.
- SAUVANT D., PEREZ J.M., TRAN G. (2002). "Tables de composition et de valeurs nutritives des matières premières destinées aux animaux d'élevage". *Association Française de Zootechnie et INRA éditions*, 301.
- SEEGER J., KENTZEL M., FAGON J., JOUSSEINS C., MORIN E., ETIENNE E., BOSSIS N. (2020). "Etat des lieux de l'autonomie alimentaire et protéique dans les ateliers d'élevage herbivores". <https://agri82.chambre-agriculture.fr/> consulté le 03/01/2023 (fichier pdf, 36p).
- VERITE R., DELABY L. (1998). "Conduite alimentaire et rejets azotés chez la vache laitière. Interrelations avec les performances". *Rencontres Recherches Ruminants, Paris*, 5, 185-191.
- CHAMBRES D'AGRICULTURE DE NORMANDIE (2017). "Le toastage des protéagineux - Expérience d'un groupe d'éleveurs laitiers en Normandie". 8. Disponible via https://normandie.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Normandie/b1-toastage-Proteine-normandie.pdf
- TERRES UNIVIA (2021). "Chiffres clés oléagineux 2020 - édition 2021". *Terres Univia*, 24. Disponible via <https://www.terresunivia.fr/sites/default/files/chiffres%20cl%C3%A9s/TU-CC20-oleagineux.pdf>
- TERRES UNIVIA (2021). "Le marché du soja dans l'Union Européenne". *Terres Univia*, 2. Disponible via <https://www.terresunivia.fr/sites/default/files/LegValue/LegValue-fiche-soja-juillet-2021-FR.pdf>