

## Valoriser une diversité de biomasses pour répondre aux enjeux techniques, environnementaux et sociétaux des élevages de ruminants

BAUMONT R. (1), DECRUYENAERE V. (2), MAXIN G. (1), ROUILLE B. (3), HEUZE V. (4), TRAN G. (4)

(1) INRAE, UMR Herbivores, 63122 Saint-Genès-Champanelle, France

(2) CRA-W, B-5030 Gembloux, Belgique

(3) Institut de l'Élevage, 35652 Le Rheu, France

(4) Association Française de Zootechnie, AgroParisTech, CS 20040, 91123 Palaiseau Cedex, France

**RESUME** - À travers l'importance des surfaces valorisées (plus de la moitié de la surface agricole française) et l'importation d'une partie des matières premières riches en protéines, l'alimentation des ruminants est au cœur des enjeux techniques, économiques, environnementaux et sociétaux des élevages. Le changement climatique affecte déjà les calendriers fourragers et les ressources alimentaires disponibles. Face à ces enjeux, de nombreux leviers existent soit pour adapter les ressources existantes soit pour développer de nouvelles ressources. Ils reposent notamment sur l'adaptation des prairies (introduction d'espèces résilientes au changement climatique) et de leur gestion, l'utilisation des mélanges céréales-protéagineux, des dérobées estivales, des plantes à photosynthèse en C4 et le développement de l'agroforesterie. La diversification des systèmes de cultures rendue nécessaire par la réduction des engrais et pesticides de synthèse devrait fournir de nouvelles ressources à l'élevage (légumineuses fourragères et à graines, intercultures). De nouveaux procédés technologiques, comme le bio-raffinage offrent des perspectives comme une meilleure valorisation des coproduits des industries agroalimentaires. L'utilisation des insectes comme source protéique n'est pas encore autorisée en élevage de ruminants dans l'UE. Celle des algues pose la question des volumes nécessaires pour alimenter des ruminants, mais elles offrent des perspectives en tant qu'additifs alimentaires pour réduire les émissions de méthane entérique. Caractériser ces nouvelles ressources alimentaires pose de nombreuses questions de recherche et de développement. Cela nécessite de collecter un nombre suffisant de nouvelles données par les méthodes de référence d'évaluation des aliments *in vivo* pour conforter les bases de données, construire les tables de valeur alimentaire et développer les outils de prévision.

## Valorising a diversity of biomasses to meet the technical, environmental and societal challenges of ruminant farming

BAUMONT R. (1), DECRUYENAERE V. (2), MAXIN G. (1), ROUILLE B. (3), HEUZE V. (4), TRAN G. (4)

(1) INRAE, UMR Herbivores, 63122 Saint-Genès-Champanelle, France

**SUMMARY** - Through the importance of the surface area used (more than half of the French agricultural area) and the import of part of the protein-rich feedstuffs, ruminant feed is at the heart of the technical, economic, environmental and societal challenges facing livestock farming. Climate change is already affecting forage calendars and available feed resources. Faced with these challenges, many levers exist either to adapt existing resources or to develop new ones. They are based on the adaptation of grasslands (introduction of species resilient to climate change) and their management, the use of cereal-legume intercroppings, summer catch crops, C4 photosynthetic plants and the development of agroforestry. The diversification of cropping systems made necessary by the reduction of synthetic fertilisers and pesticides should provide new resources for livestock farming (forage and seed legumes, intercropping). New technological processes, such as the bio-refining of fodder, offer prospects, as does better use of the co-products of the agri-food industry. The use of insects as a source of protein is not yet authorized for ruminant farming in the EU. The use of algae raises the question of the volumes needed to feed ruminants, but they offer prospects as feed additives to reduce enteric methane emissions. Characterising these new feed resources raises many research and development questions. This requires a sufficient amount of new data obtained from *in vivo* reference feed evaluation methods to be able to strengthen the databases used for feed value tables and prediction tools.

## INTRODUCTION

En France, les ruminants valorisent la moitié de la SAU via les cultures fourragères et les prairies (Agreste 2020) qui fournissent environ 70 Mt de Matière Sèche (MS) et 9 Mt de protéines (Dronne, 2018 ; Saille et al., 2021). Ils consomment plus de 13 Mt d'aliments concentrés sous forme de graines ou de coproduits, dont 1,7 Mt de soja essentiellement importé (Tableau 1). Ces aliments fournissent 4,4 Mt de protéines (Saille et al., 2021). Hors soja, les aliments concentrés utilisés par les ruminants représentent environ 15% des céréales et oléoprotéagineux produits en France et 6% de la SAU. Le choix et l'utilisation des ressources alimentaires sont fortement questionnés par les multiples enjeux auxquels les élevages de ruminants font face : adaptation au changement climatique, recherche d'autonomie alimentaire et protéique, réduction de l'empreinte environnementale et de la compétition entre l'alimentation animale, l'alimentation humaine et les biocarburants dite « feed/food/fuel », maintien de la compétitivité face au renchérissement de coûts de l'énergie et des matières premières, impact de l'alimentation sur la qualité des produits, la santé et le bien-être des animaux, etc. Cette

synthèse se propose 1) d'analyser les questions posées par ces différents enjeux à l'alimentation des ruminants, 2) de faire le point sur les biomasses alternatives et nouvelles valorisables par les ruminants et 3) de faire le point sur les besoins de R&D et de transfert en matière de caractérisation et d'évaluation des aliments jusqu'ici peu utilisés. Le texte s'appuie principalement sur des études réalisées en France métropolitaine et en Europe.

## 1. LES QUESTIONS POSEES A L'ALIMENTATION DES RUMINANTS

La fonction première de l'alimentation des ruminants est de satisfaire les besoins nutritionnels des animaux selon les objectifs de production tout en minimisant son coût qui demeure le principal coût de production. Mais elle doit aujourd'hui satisfaire dans un contexte de changement climatique un jeu de contraintes multiples combinant à l'échelle de l'animal la valeur nutritive et les effets sur la santé, le bien-être animal et la qualité des produits, et à l'échelle du système d'élevage la performance économique et les effets sur l'environnement.

|                                       | Tous animaux d'élevage | Tous ruminants | Bovins laitiers et mixtes | Bovins viande | Caprins    | Ovins laitiers | Ovins viande |
|---------------------------------------|------------------------|----------------|---------------------------|---------------|------------|----------------|--------------|
| <b>Total Fourrages</b>                | <b>71 785</b>          | <b>68 169</b>  | <b>33 275</b>             | <b>30 411</b> | <b>695</b> | <b>997</b>     | <b>2 791</b> |
| Ensilage de maïs                      | 14 901                 | 14 684         | 11 963                    | 2 643         | 28         | 23             | 27           |
| Herbe conservée                       | 23 388                 | 21 185         | 9 068                     | 10 518        | 537        | 412            | 650          |
| Herbe pâturée                         | 31 726                 | 30 545         | 11 389                    | 16 468        | 116        | 533            | 2 039        |
| Autres fourrages                      | 1 845                  | 1 729          | 847                       | 777           | 9          | 25             | 71           |
| <b>Total concentrés</b>               | <b>34 037</b>          | <b>13 672</b>  | <b>8 446</b>              | <b>4 019</b>  | <b>404</b> | <b>282</b>     | <b>521</b>   |
| <b>Grains</b>                         | <b>19 637</b>          | <b>6 062</b>   | <b>3 067</b>              | <b>2 213</b>  | <b>251</b> | <b>178</b>     | <b>353</b>   |
| Céréales                              | 18 903                 | 5 742          | 2 845                     | 2 115         | 251        | 178            | 353          |
| <i>Dont blé tendre</i>                | 7 780                  | 2 190          | 1 176                     | 897           | 30         | 31             | 56           |
| <i>Dont maïs grain</i>                | 6 786                  | 1 582          | 704                       | 675           | 57         | 53             | 93           |
| <i>Dont orge</i>                      | 1 917                  | 842            | 289                       | 245           | 102        | 58             | 148          |
| Oléoprotéagineux                      | 735                    | 325            | 224                       | 99            | 0          | 1              | 1            |
| <b>Coproduits</b>                     | <b>13 693</b>          | <b>7 283</b>   | <b>5 142</b>              | <b>1 724</b>  | <b>156</b> | <b>103</b>     | <b>158</b>   |
| Céréaliers                            | 3 000                  | 1 999          | 1 470                     | 440           | 44         | 11             | 34           |
| Tourteaux                             | 7 823                  | 3 480          | 2 603                     | 773           | 15         | 33             | 56           |
| <i>Dont tourteau de soja</i>          | 3 824                  | 1 686          | 1 367                     | 290           | 1          | 20             | 8            |
| Huiles végétales                      | 112                    | 0              | 0                         | 0             | 0          | 0              | 0            |
| Luzerne déshydratée                   | 576                    | 440            | 219                       | 125           | 44         | 41             | 11           |
| Pulpes de betteraves                  | 900                    | 791            | 488                       | 233           | 27         | 5              | 38           |
| Autres coproduits                     | 1 286                  | 582            | 365                       | 153           | 26         | 16             | 22           |
| <b>Aliments minéraux et vitaminés</b> | <b>708</b>             | <b>328</b>     | <b>236</b>                | <b>81</b>     | <b>0</b>   | <b>1</b>       | <b>10</b>    |

**Tableau 1.** Estimations des consommations de fourrages (en 1 000 t MS) et de matières premières concentrées (en 1 000 t MS85) par l'ensemble des animaux d'élevage et les différentes filières de ruminants en France en 2015 (Sailley et al. 2021).

### 1.1. CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AUTONOMIE ALIMENTAIRE

L'autonomie alimentaire des ateliers de ruminants est élevée, supérieure à 85% pour les bovins et ovins viande, de l'ordre de 80% pour les bovins et ovins lait, mais seulement de 54% pour les caprins (Seegers et al., 2020). Ces chiffres sont à rapprocher de la part des fourrages dans l'alimentation des ruminants (plus de 80% d'après les chiffres cités plus haut) et du fait que la grande majorité des exploitations d'élevage sont autonomes en fourrage, l'élevage français étant dans son ensemble autonome à 100% en fourrage.

Le changement climatique se traduit par des épisodes de sécheresse plus sévères et plus fréquents qui remettent en cause l'autonomie alimentaire des élevages. Certaines cultures fourragères (maïs en particulier) nécessitent plus fréquemment l'irrigation ce qui ne sera pas forcément possible. Les modifications de la pousse de l'herbe (maturation plus précoce des plantes, déficits de croissance lors de périodes de sécheresse) complexifient la gestion des compromis entre qualité et quantité des fourrages exploités tant par les récoltes que par le pâturage. Ainsi par exemple, une étude sur 30 ans montre une dégradation significative de la valeur alimentaire des foin de prairie permanente récoltés au domaine INRAE de Marcenat, l'avancée des dates de récolte (1 semaine en 30 ans) ne compensant pas l'avancée du cumul des températures et du stade de maturité de la prairie (3 semaines en 30 ans) en raison de la nécessité de récolter des stocks suffisants et de disposer de fenêtres climatiques pour récolter le foin (Deroche et al., 2020).

### 1.2. EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE ET CIRCULARITE

L'alimentation constitue un levier important pour réduire l'empreinte environnementale des élevages. L'analyse de cycle de vie permet d'évaluer l'empreinte environnementale globale d'un aliment et la méthode ECOALIM (Wilfart et al., 2018) permet de formuler des aliments concentrés minimisant leur empreinte environnementale. Toutefois cette méthode n'intègre pas la compétition « feed-food » et ne prend pas en compte des aspects spécifiques des prairies comme leur contribution au stockage du C et à la biodiversité. Une meilleure intégration de l'élevage avec les productions

végétales constitue une partie de la solution grâce à un meilleur bouclage des cycles du carbone et de l'azote et la relocalisation des aliments utilisés en élevage (Peyraud et al., 2019).

#### a. Utilisation des surfaces, compétition « feed-food-fuel »

Les ruminants utilisent de larges surfaces agricoles, mais une grande partie de celles-ci (prairies permanentes, parcours, zones humides et pentues) ne sont pas ou difficilement exploitables pour la production végétale ou d'énergie. Selon les rations, seulement 5 à 25% des aliments et des protéines consommés par les ruminants (les céréales sous forme de grains principalement) pourraient être directement utilisés en alimentation humaine (Laisse et al., 2018). Plusieurs études ont montré que les ruminants peuvent être producteurs nets de protéines pour l'alimentation humaine. Ils produisent plus de protéines consommables par l'être humain qu'ils n'en ont consommées. Les systèmes les plus efficaces sont les systèmes laitiers herbagers et les ovins sur parcours (Wilkinson, 2011 ; Ertl et al., 2015 ; Laisse et al., 2018 ; Hennessy et al., 2021). La compétition « feed-food » peut être fortement réduite par la maximisation de l'utilisation des herbages et de coproduits. Dans un contexte de renchérissement du prix de l'énergie et des céréales, la réduction de la compétition « feed-food » devient aussi un enjeu économique.

#### b. Autonomie protéique et surfaces « importées »

L'élevage de ruminants mobilise des surfaces en dehors du territoire national pour assurer l'approvisionnement en protéines. En tenant compte des fourrages, l'autonomie protéique de l'élevage français atteint 84%, mais elle n'est que de 59% pour l'ensemble des aliments concentrés et de 43% pour les aliments riches en matières protéiques (MAT > 150 g/kg) (Sailley et al., 2021). A l'échelle des ateliers de ruminants et pour l'ensemble de l'alimentation, l'autonomie protéique est supérieure à 80% pour les bovins et les ovins viande, comprise entre 65 et 70% pour les bovins et ovins lait et inférieure à 50% pour les caprins (Seegers et al., 2020).

Réduire la dépendance des élevages aux importations de soja est une priorité. La crise ukrainienne de 2022 a également mis

en évidence notre dépendance à l'importation de tourteau de tournesol HiPro qui est riche en matières azotées (MAT = 350 g/kg). Pour cela l'utilisation de légumineuses fourragères (dans les prairies, sous forme de méteils...) et à graines doit être développée (cf. CAP Protéines et autres programmes, Pavie et al., 2022). L'utilisation de sources alternatives de protéines (algues, microalgues, insectes) doit être considérée même si les volumes nécessaires pour alimenter des ruminants en limitent aujourd'hui le potentiel.

### **c. Gaz à effet de serre, stockage de C et énergie**

Le système d'alimentation des ruminants joue un rôle important sur les émissions de gaz à effet de serre (GES), et de méthane en particulier, ainsi que sur le bilan C des élevages. Les ruminants sont au cœur d'un paradoxe qui fait que l'utilisation des prairies, avec des conduites plutôt « extensives », est souhaitable vis-à-vis des nombreux services qu'elles rendent (Stockage de C, biodiversité, paysage...), mais qu'une alimentation basée sur l'herbe est en défaveur de la réduction des émissions de méthane par les ruminants (Poux et Aubert, 2022).

L'utilisation des légumineuses en réduisant les besoins en fertilisation azotée, permet de réduire les consommations d'énergie et les GES (Lüscher et al., 2014 ; Baumont et al., 2016). Les leviers alimentaires pour réduire les émissions de méthane entérique peuvent aussi reposer sur l'utilisation des légumineuses, en particulier celles qui contiennent des tanins condensés (sainfoin, lotier). Enfin l'utilisation de ressources fourragères « pérennes » (prairies permanentes, arbres fourragers), contribuera positivement au stockage de C (Klumpp et Fornara, 2018). En complément de ces leviers, l'utilisation d'additifs alimentaires permettant de réduire les émissions de méthane est à considérer (inhibiteur d'enzymes impliquées dans la méthanogénèse comme le 3NOP maintenant autorisé en Europe et présentant un potentiel de réduction des émissions de méthane de 20%, algues rouges, huiles essentielles) (Hegarty et al., 2021).

### **d. Biodiversité et paysage**

Les systèmes de ruminants herbagers, en particulier lorsqu'ils utilisent des prairies diversifiées comme des prairies permanentes peu productives (parcours, estives, ...) peuvent contribuer positivement à la biodiversité et à l'entretien de des paysages. Dans des zones agricoles exploitées de façon plus intensive, utiliser une diversité de biomasses pour alimenter les ruminants contribuera aussi à améliorer l'impact des élevages sur la biodiversité à travers l'introduction de prairies (en particulier si elles sont diversifiées) et de légumineuses (plantes à fleurs) dans les rotations culturales.

## **1.3. SANTE ET BIEN-ETRE DES ANIMAUX**

L'alimentation peut contribuer positivement ou négativement à la santé et au bien-être des animaux. Il est bien établi que la fibrosité de la ration (appréciée par la teneur en parois végétales et liée à une part suffisante de fourrages dans la ration) est nécessaire à la santé digestive (réduit le risque d'acidose) et à l'expression d'un comportement alimentaire « normal » (ruminat) (Sauvant et al., 2018). L'accès au pâturage permet aux animaux de mieux exprimer leur comportement « naturel » et son rôle dans leur bien-être est un sujet actuellement à l'étude (Pietikäinen et al., 2022). Cela répond également à une demande sociétale.

## **1.4. QUALITE INTRINSEQUE ET EXTRINSEQUE DES PRODUITS**

Les liens entre l'alimentation et les qualités « intrinsèques » des produits (lait, viande) sont bien établis, en particulier en ce qui concerne la composition en acides gras des produits et certaines qualités sensorielles (couleur, flaveur, goût) (Martin et al., 2009 ; Lebret et al., 2015 ; Prache et al., 2022).

Le système d'alimentation contribue aussi aux qualités « extrinsèques » des produits à travers l'image que s'en fait le consommateur, notamment à travers les demandes d'alimentation utilisant des ressources locales et des possibilités de tracer l'alimentation et d'authentifier le mode de production des animaux (Prache et al., 2022).

## **2. MIEUX UTILISER LES RESSOURCES EXISTANTES ET RECHERCHER DES BIOMASSES ALTERNATIVES ET NOUVELLES VALORISABLES PAR LES RUMINANTS**

### **2.1. LES RESSOURCES FOURRAGERES**

Différents leviers sont à mobiliser pour concevoir des systèmes fourrager plus résilients au réchauffement climatique et aux aléas qui en découlent : la diversité intra et interspécifique dans les écosystèmes prairiaux, les espèces végétales et les variétés mieux adaptées (sorgho, légumineuses des régions méditerranéennes), les cultures dérobées, et les intercultures, les mélanges fourragers, l'agroforesterie, le pâturage d'automne et d'hiver, etc.

En grandes cultures, la réduction des engrais de synthèse et de l'usage des produits phytosanitaires passe par une diversification des rotations rendue nécessaire pour valoriser l'N fixé par les légumineuses, pour perturber les cycles biologiques des espèces invasives et des pathogènes, et aussi rendre plus efficace les approches de biocontrôle. Nombre des cultures de diversification ne sont pas utilisables en alimentation humaine. C'est notamment le cas des légumineuses fourragères (luzerne ou trèfle violet), de la prairie, des intercultures et des cultures dérobées qui en outre offrent l'avantage d'assurer une couverture du sol permanente et de piéger les nitrates.

Un certain nombre de leviers sont donc communs aux objectifs de sécurisation des systèmes fourragers et de réduction de l'impact environnemental des systèmes de cultures. Ils ouvrent des perspectives de nouvelles biomasses valorisables par les ruminants. Cela pose des questions d'organisation des filières (coopération entre cultivateurs et éleveurs, stockage et transport des ressources...) et de nombreuses questions techniques sur le potentiel quantitatif et qualitatif de ces biomasses.

### **a. Adapter les prairies et leur gestion au changement climatique**

Un des premiers leviers pour sécuriser les systèmes fourragers face au réchauffement climatique est le recours à des espèces et des variétés plus adaptées dans les prairies. Il s'agit par exemple d'intégrer dans les prairies temporaires des espèces plus résistantes à la sécheresse comme la fétuque élevée, le dactyle, la luzerne ou des légumineuses annuelles méditerranéennes. Il est également possible de jouer sur la complémentarité des espèces afin d'assurer une production plus continue sur la saison. Dans une revue récente, Lüscher et al. (2022) montrent qu'il existe une variabilité intraspécifique des plantes fourragères à la sécheresse encore peu exploitée et que la variabilité interspécifique permet de stabiliser la production face aux stress climatiques de deux façons : 1) des communautés de plantes diverses ont plus de chance de contenir des plantes résistantes à la sécheresse, et 2) les interactions positives entre plantes permettent à des communautés diverses de compenser les réductions de production dues à une sécheresse modérée. Toutefois il existe un compromis entre adaptation à la sécheresse et qualité du fourrage, les individus ou espèces les plus adaptées aux conditions difficiles étant généralement de rendement et de valeur alimentaire plus faible, du fait d'une stratégie de conservation des ressources, en particulier de l'eau.

La gestion des prairies doit s'adapter aux effets du changement climatique, en exploitant l'herbe plus tôt en fin

d'hiver et plus tard à l'automne, sous réserve que la portance des sols le permette. Les principes d'alignement des besoins des animaux avec la pousse de l'herbe (Baumont et al., 2014 ; Delaby et Horan, 2021) restent valables, mais s'en trouvent compliqués par la variabilité accrue de la pousse de l'herbe et par les périodes estivales de manque d'herbe. Dans la synthèse des projets CLIMALAIT et CLIMAVIANDE, Moreau et al., (2020) montrent les possibilités de mobiliser différents leviers dans les stratégies d'adaptation : date de mise à l'herbe, répartition entre fauches précoces et tardives, pâturage tôt en saison (déprimage) pour décaler le pic de production sur une partie des surfaces, etc.

#### **b. Produire du fourrage d'appoint : intercultures, dérobées et méteils**

Les cultures dérobées fourragères cultivées seules ou en mélange (trèfle incarnat, vesce, phacélie, sarrasin, colza fourrager...) sont une solution pour produire du fourrage supplémentaire en intersaison qui peut être récolté et conservé ou pâturé. Leur exploitation peut avoir lieu à la fin de l'été ou à l'automne mais également au printemps, ou bien à la fois en été-automne et au printemps et la valeur nutritive en vert de ces espèces est généralement intéressante (Maxin et al., 2020).

Les méteils ou mélanges de céréales à paille et de légumineuses sont également une solution pour constituer des stocks car les périodes d'implantation, de récolte et les modes de valorisation (pâturage, ensilage ou enrubbage) sont multiples (Legendre et al., 2019). Il existe ainsi une grande diversité de méteils, liée aux caractéristiques et aux proportions des espèces du mélange, à la densité de semis, au mode et stade de récolte. La valeur alimentaire des méteils varie principalement avec la proportion de légumineuses et le stade de récolte : plus un méteil est récolté précocement ou contient de légumineuses, meilleure sera sa valeur nutritive (Maxin et al., 2016 et 2017). Legendre et al. (2019) reportent des valeurs énergétiques comprises entre 0,73 et 0,89 UFL et des valeurs teneurs en MAT entre 93 et 211 g/kg MS pour 406 échantillons d'ensilage de méteils analysés. La valeur protéique des ensilages de méteils est souvent diminuée due à des valeurs élevées d'azote soluble et ammoniac (Maxin et al., 2017), suggérant un intérêt à utiliser des conservateurs d'ensilage (bactéries lactiques ou acides organiques) pour limiter la dégradation des protéines.

Comme pour les méteils, la conservation par voie humide des fourrages d'intercultures est parfois difficile à cause de leur faible teneur en matière sèche (généralement fourrages d'arrière-saison) et en sucres et de leur pouvoir tampon élevé lié à la forte teneur en protéines des légumineuses et/ou protéagineux souvent présents dans ces mélanges. Selon les essais réalisés à INRAE et chez ARVALIS en France (Herremans et al., 2018), et chez PROTECTEAU en Wallonie<sup>1</sup>, les quantités de biomasses récoltées en vert, peuvent atteindre 2,5 t MS/ha après plus de 70 jours d'implantation pour des valeurs nutritives intéressantes en vert. Selon une étude menée en Suisse (Wyss et Mosimann, 2016), les teneurs en matière sèche à la récolte étaient basses (< 25 %) quels que soient les mélanges considérés. Les teneurs en MAT des mélanges en vert dépendaient de la présence de légumineuses et étaient comprises entre 110 g/kg MS et 220 g/kg MS pour une valeur énergétique moyenne de 0,79 UFL/kg MS. Dans de bonnes conditions de récolte et de conservation, la valeur nutritive, et surtout protéique, reste en moyenne correcte après ensilage, l'emploi d'un conservateur d'ensilage à base de nitrite de sodium et d'hexamine s'avérant bénéfique (sans conservateur, perte moyenne de 11% d'UFL,

et de 30% de PDI ; avec conservateur, perte de 3% pour les UFL et de 26% pour les PDI). L'étude de Herremans et al. (2018) menée dans 52 fermes wallonnes montre que la diversité des mélanges rencontrés en ferme est grande (plus de 40 associations différentes d'espèces observées), les associations les plus représentées étant le ray-grass - trèfle (11% des fourrages) et l'avoine-pois (8%). L'analyse de 91 ensilages montre que les teneurs en matières sèches étaient assez élevées (38,2 +/- 15,4 %) et les valeurs nutritives comparables à celles décrites par Wyss et Mosimann (2016). En ce qui concerne la conservation des protéines, la proportion moyenne d'ammoniac de ces ensilages était toutefois élevée (> 10% de l'azote total).

Le pâturage des intercultures, notamment via des partenariats agriculteurs-éleveurs (projet H2020 DIVERIMPACT) est une autre façon de valoriser ce type de fourrage. Le partenariat est gagnant-gagnant, les intercultures fournissent des fourrages de bonne qualité aux animaux, les animaux désherbent et fertilisent les sols par leurs déjections. Ce pâturage d'intercultures est surtout réalisé en automne et en hiver, par des ovins. En raison de sa taille et de son poids, le mouton ne risque pas dégrader la structure du sol malgré des conditions peu portantes des sols à cette période (Régibeau, 2019). Les intercultures pâturables par des ovins sont diverses : repousses de colza en fin d'été, couverts gélifs (tournesol, nyger, trèfle, féverole, phacélie) jusqu'en novembre, couverts d'automne implantés après céréales gélifs ou non d'octobre à janvier, couverts non gélifs avant semis de printemps (RWDR 2020<sup>2</sup>). Pour ce qui est des rendements disponibles, plusieurs suivis réalisés en Wallonie ont permis d'observer des rendements généralement compris entre 2 et 3 t MS/ha. Ces rendements sont cependant largement dépendants des conditions climatiques estivales (implantation et croissance des mélanges), des mélanges et du précédent cultural. Par exemple, en 2020, des couverts semés en Wallonie après du blé ont produit à peine 1 t MS/ha en raison de la sécheresse au moment du semis (Herremans et al., 2021). Ce sont généralement des brebis en lutte ou des brebis gestantes qui pâturent ce type de fourrages. En France, des essais menés au Centre Interrégional d'Information et de Recherche en Production Ovine (87) ont montré qu'il était possible d'engraisser des agneaux en pâturant des intercultures. Selon Sagot (2017), de l'ordre de 20 agneaux peuvent être engraisés par ha d'intercultures si la biomasse disponible atteint 2 t MS/ha. Pour pâturer des intercultures, le pâturage doit être tournant dynamique ou cellulaire. Il nécessite la pose de clôtures mobiles électrifiées placées pour une durée déterminée. La vitesse de rotation dépend non seulement de la biomasse disponible mais aussi du nombre d'animaux présents. Bien choisir le chargement instantané est primordial. Si la charge instantanée est trop élevée, le travail de changement des animaux de parcelles à pâturer devient très contraignant.

Un autre levier est l'utilisation en dérobées estivales de graminées à photosynthèse en C4 (moha, millet perlé, teff grass, sorgho multicoupe) associées ou non avec une ou des légumineuses (par exemple, le trèfle d'Alexandrie). Les plantes en C4 sont originaires des zones intertropicales et caractérisées par un type de photosynthèse où les premières molécules synthétisées comportent 4 atomes de carbone, contrairement aux plantes tempérées qui synthétisent des molécules à 3 atomes de carbone. Les graminées en C4 sont plus résistantes aux conditions de chaleur et d'aridité. Ces espèces sont généralement semées après des céréales à paille ou un méteil et sont pâturées par les animaux pendant la période estivale. La qualité nutritionnelle de ces espèces

<sup>1</sup><https://protecteau.be/resources/shared/publications/articles/CIPAN%20fourrager.pdf>

<sup>2</sup> [https://www.reseau-pwdr.be/sites/default/files/ovin\\_web.pdf](https://www.reseau-pwdr.be/sites/default/files/ovin_web.pdf)

cultivées sous nos conditions est encore peu connue (Heuzé et al., 2015a et b, 2020). Cependant, des essais en cours à la ferme expérimentale des Bordes et à INRAE Val de Loire de Nouzilly sur les dérobées estivales observent que le sorgho multicoque et le teff grass seraient les espèces les plus intéressantes en termes de potentiel de production et de valeur alimentaire (Hernandez et al., 2021). Les teneurs en MAT des deux espèces étaient comprises entre 115 et 180 g/kg MS et les UFL entre 0,74 et 0,90. Ces deux espèces ont été bien consommées au pâturage par des génisses et des ovins.

### c. Intégrer l'agroforesterie dans les systèmes d'élevage

Pour améliorer le niveau d'autonomie alimentaire, l'utilisation des ressources ligneuses peut apporter une contribution intéressante. Selon Emile et al., (2017), la fonction fourragère des ligneux est très marginale dans les exploitations d'élevage. Pourtant, les espèces ligneuses (arbres, arbustes et lianes) valorisables par le bétail sont nombreuses et leur valeur nutritive intéressante malgré une variabilité importante au sein de ces ressources. Ainsi Vandermeulen et al. (2016) situent la teneur moyenne en protéines des fourrages ligneux à 178 g/kg MS au printemps et 133 g/kg MS en fin d'été, pour des valeurs de digestibilité supérieure à 85 % au printemps, cette digestibilité diminuant tout au long de la saison de pâturage. Les mêmes résultats ont été observés dans des projets ARBELE (Moreau et al. 2020) et PARASOL (Novak et al. 2020) qui ont montré que des espèces comme le mûrier blanc, le sureau ou le prunelier présentent de très bonnes valeurs nutritives pour les ruminants. Les fourrages ligneux sont également intéressants de par leur teneur en macro et micro nutriments qui peuvent bien compléter les rations des vaches laitières. Le projet AGFORWARD ([www.agforward.eu](http://www.agforward.eu)) a ainsi montré que les saules et les aulnes sont plus riches que l'herbe de ce point de vue (teneur en sélénium particulièrement). Les espèces comme la vigne, le chêne vert, le robinier sont également riches en tanins condensés, ce qui rend les protéines de ces végétaux moins dégradables dans le rumen (Vandermeulen et al., 2016 Emile et al., 2017 ; Novak et al., 2020 ;). Les fourrages ligneux, de par leur composition chimique particulière doivent donc être considérés comme des compléments à part entière des rations des ruminants. Selon Liagre et al. (2020), il existe une diversité d'aménagements ligneux à vocation fourragère : arbres hautes tiges dont la taille (émondage) est distribuée aux animaux, tables fourragères ponctuellement exploitées soit par pâturage, soit par coupe mise à disposition des animaux, arbres têtards (trognons) pâturables, haies fourragères diverses, pouvant dans le cas du plessage (haies composées d'un entrelacement de rejets des souches, de branches arbustes) qui, une fois développé, peuvent constituer de véritable clôture vivante, infranchissable par le bétail. Les ligneux permettent de suppléer au manque de fourrage en cas de sécheresse tout en préservant les stocks constitués pour la période hivernale. Des études menées en Nouvelle Zélande, ont montré le potentiel fourrager de taillis à très courte rotation de saule. Selon cette expérimentation, le taillis de saule réparti sur une surface de 4 ha permettait un pâturage complémentaire de 70 à 110 jours par an pour un troupeau de 100 brebis, avec 5 périodes de pâturage contrôlé entre le printemps et l'été (The New Zealand Poplar & Willow Research Trust, 2013). Des questions de recherches restent cependant ouvertes sur la gestion de ces ligneux et leur résilience à un pâturage soutenu, sur les densités à planter pour un bon équilibre des ligneux et de la prairie, et sur la protection des ligneux contre les ruminants lors de l'implantation.

**Pour résumer cette partie sur les ressources fourragères,** la figure 1 positionne par rapport à la valeur alimentaire des fourrages « classiques » bien renseignée dans les tables INRA2018, celle de certaines ressources fourragères nouvelles ou alternatives. Les dérobées estivales en vert présentent une valeur alimentaire dans la gamme des meilleures ressources pâturées. Les méteils ensilés riches en

légumineuses et les ensilages de sorgho grain présentent une densité énergétique intéressante.

## 2.2. LES MATIERES PREMIERES CONCENTREES

### a. Aliments issus de nouveaux procédés technologiques

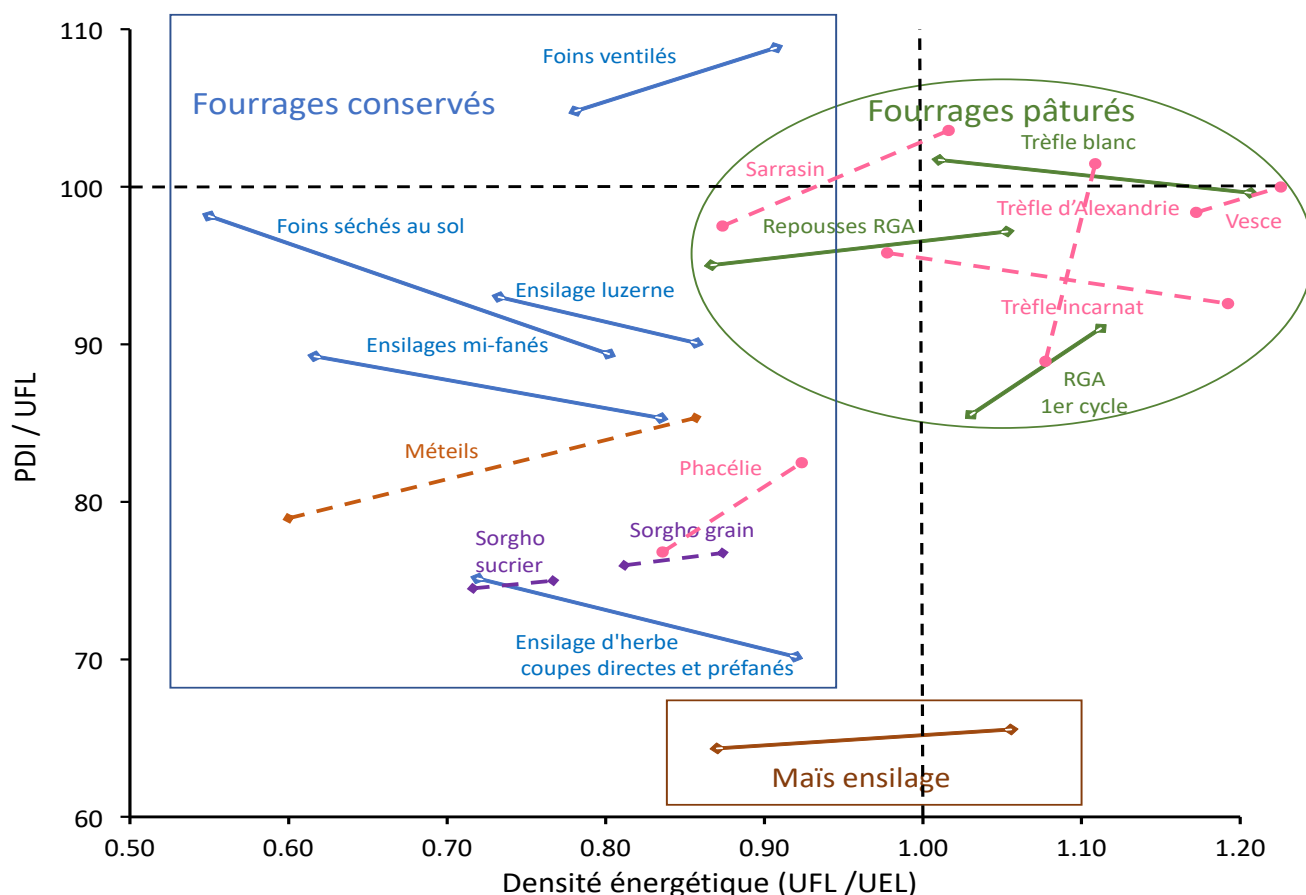
La recherche d'autonomie protéique des filières animales conduit aussi à développer de nouveaux procédés technologiques qui vont améliorer la valorisation des ressources végétales existantes et créer de nouvelles biomasses : par exemple, la valorisation des graines comme la féverole et le pois peut être améliorée par de nouvelles méthodes d'extrusion, de toastage qui est maintenant envisageable à la ferme (cf. par exemple le projet PROTECOW) et de décorticage (Nozière et al., 2022). La concentration et la biodisponibilité des protéines des tourteaux de colza et tournesol pourraient être accrues par de nouveaux procédés comme le blutage. Le « bioraffinage » des fourrages est une technique qui se développe, en particulier dans les pays du nord de l'Europe (Jorgensen et al., 2022). Le fractionnement des légumineuses fourragères ou de prairies permet d'extraire environ 40% des protéines du fourrage dans un concentré contenant environ 50% de protéines pouvant être utilisé en substitution du soja pour alimenter des porcs ou des volailles (Jorgensen et al. 2022). Le résidu fibreux contenant 150-180 g/kg de protéines peut être valorisé par des ruminants, ou pour la production d'énergie ou encore pour l'extraction d'autres molécules d'intérêts.

Dans un contexte d'élevage tropical, citons les travaux conduits sur les ressources duales, dont la valorisation intégrale concilie les besoins de l'Homme et de l'animal (graines et fanes de légumineuses, tubercules et feuilles de manioc ou de patate douce...) et sur l'enrichissement protéique par culture de microorganismes sur des substrats riches en glucides (tubercules de manioc, canne à sucre...) (Archimède et al., 2018). Le développement de ces nouvelles technologies pose de nombreuses questions, en premier lieu celles de l'organisation des filières et de l'efficacité énergétique des procédés.

### b. Les coproduits issus des industries agro-alimentaires

Des gisements de coproduits sont aujourd'hui bien connus et valorisés en élevage. En France, une enquête nationale réalisée en 2017 a permis d'identifier un gisement actuellement valorisé de 12,1 millions de tonnes de matière sèche (MS) de coproduits générés par les industries agroalimentaires. Ceux-ci sont valorisés à 76% en alimentation animale (animaux de rente et de compagnie) (RESEDA, 2017). Les autres usages sont, par ordre d'importance, l'industrie alimentaire de seconde transformation, l'agronomie et l'énergie. D'autres études ont été menées pour apporter des chiffres plus précis à pour différentes régions et ainsi mieux cerner les enjeux à l'échelle des territoires. Ainsi, 125 000 tonnes MS de coproduits ont été répertoriées en Normandie (RESEDA, 2019) et 1,9 millions de tonnes MS en région Grand-Est dans le projet COPRAME (Idele, 2021a). Ces gisements sont déjà bien valorisés notamment en alimentation animale et représentent 61% des utilisations en Normandie et 98% en Grand-Est respectivement. Mais de nouveaux gisements et de nouveaux usages pour les gisements déjà valorisés peuvent être identifiés. En particulier, en Europe, environ 50% des fruits et légumes sont perdus au cours de la chaîne de production et de consommation (Halmemies-Beauchet-Filleau et al., 2018). La valorisation de biomasses pour la production de biomatériaux pourrait aussi conduire à de nouveaux coproduits valorisables en élevage. Outre la question de l'organisation des filières, les questions concernent donc la connaissance fine, la conservation et l'utilisation dans la ration des animaux de ces coproduits.





**Figure 1.** Relations entre la densité énergétique des fourrages et leur concentration en protéines digestibles par unité fourragère. Les traits pleins correspondent aux fourrages des tables INRA (INRA, 2018) et représentent la plage de variation renseignée selon le stade d'exploitation du fourrage. Les traits pointillés représentent des catégories de fourrages non renseignées dans les tables INRA : en rose, des espèces fourragères utilisées en dérobées estivales (Maxin et al., 2020) ; en violet des valeurs pour les ensilages de sorgho estimées à partir des données de Brunschwig et al., (2008) et de Chauveau et Uijtewaal (2020) ; en marron les données sur les méteils estimées à partir de Legendre et al., (2019).

Pour un même coproduit, des variations saisonnières peuvent être constatées en fonction des conditions de culture, de récolte et de stockage et/ou du process industriel. Afin de garantir la qualité de ces coproduits, des techniques de conservation appropriées doivent être mises en œuvre en élevage et des précautions d'emploi dans les rations. Ainsi, un stockage en cuve peut être proposé pour des coproduits liquides comme des lactosérums. Pour des pulpes de betteraves surpressées, la réalisation d'un ensilage permet de garantir une bonne conservation en vue d'une utilisation dans la ration de bovins. Dans le but de valoriser ces coproduits, il est possible d'aller encore plus loin dans le niveau de connaissance des coproduits en analysant la teneur en composés secondaires (phénols, tannins, etc.) ainsi que de la digestibilité de différentes fractions d'intérêt. La question de la connaissance de la digestibilité et de la valeur protéique des biomasses lignocellulosiques reste posée notamment pour une valorisation par les ruminants (fourrages pauvres, paille). Certains coproduits, tout comme les fourrages tropicaux (Archimède et al., 2018), pourraient bénéficier des innovations et des traitements enzymatiques développés dans le cadre de la chimie verte pour améliorer leur valeur nutritionnelle pour une valorisation en alimentation animale. Au-delà de ces opportunités techniques, il convient donc de rappeler que la valorisation des coproduits par les animaux d'élevage doit être sans risque sanitaire pour ceux-ci, notamment vis-à-vis des bactéries, des mycotoxines et des contaminants physiques et chimiques (Chapoutot et al., 2018). Ces risques peuvent être gérés du champ à l'élevage en passant par l'usine, à travers des démarches d'analyse de risque des bonnes pratiques et des contrôles qualité. Enfin, un critère primordial reste l'intérêt économique des filières pour valoriser des coproduits en

alimentation animale. La formulation multicritère des aliments pour animaux (nutrition, environnement, etc.), couplée à une optimisation économique, doit permettre d'assurer un choix pertinent pour valoriser au mieux les coproduits en alimentation animale en fonction du type d'animal, de la ration proposée et des objectifs de performances (Chapoutot et al., 2018).

### 2.3. LES INVERTEBRES ET LES ALGUES : DE NOUVELLES SOURCES DE PROTEINES ?

#### a. Les insectes

Au cours des cinq dernières années, les insectes ont été identifiés comme des aliments alternatifs pour les animaux d'élevage (van Huis, 2020). La teneur en protéines des insectes est généralement supérieure ou égale à celle du tourteau de soja et ils sont riches en acides aminés essentiels comparés aux protéines végétales (Hawkey et al., 2021). Ils sont également riches en lipides et leur composition en acides gras dépend des classes d'insectes (Hawkey et al., 2021). Ils peuvent donc être utilisés comme source de protéines ou d'énergie dans les rations. Par ailleurs, la production d'insectes à partir de déchets alimentaires, de coproduits et de résidus issus de l'industrie agro-alimentaires se développe (Spranghers et al., 2017 ; Meneguz et al., 2018). Ce nouveau système de production constitue un modèle circulaire et durable pour produire des aliments pour l'alimentation animale et participe à réduire la compétition avec l'alimentation humaine. L'utilisation des insectes dans l'alimentation avicole et porcine est autorisée dans l'UE depuis 2021. Même si leur utilisation chez les ruminants reste interdite, l'intérêt nutritionnel de leur utilisation chez les ruminants s'accroît.

Comparé au tourteau de soja, plusieurs auteurs ont observé une diminution de la digestibilité *in vitro* de la matière organique et de la production de méthane avec les tourteaux d'insectes (Jayanegara et al., 2017a,b ; Renna et al., 2022). Ces réductions s'expliqueraient par la composition des insectes. Ils sont riches protéines et en lipides, pauvres en glucides ce qui limite les fermentations ruminales. Ils contiennent également de la chitine, composé partiellement indigestible. La dégradation ruminale des protéines serait également plus faible que celle du tourteau de soja (Toral et al., 2022 ; Renna et al., 2022), ce qui est intéressant pour augmenter la quantité de PDIA, d'autant que des digestibilités intestinales *in vitro* élevées ont été mesurées (Toral et al., 2022). Deux études ont validé *in vivo* l'intérêt de remplacer le tourteau de soja par des tourteaux d'insectes (Astuti et al., 2019 ; Fukuda et al., 2022).

## b. Les algues et microalgues

Le potentiel d'utilisation des algues et microalgues en tant que matière première pour l'alimentation animale paraît modeste du fait de leur faible teneur en matière sèche qui nécessiterait de l'énergie pour concentrer les nutriments. En revanche, les algues peuvent fournir des composés d'intérêt utilisables comme additifs pour l'alimentation animale. Les algues présentent un potentiel en tant que supplément lipidique pour accroître la teneur en lipides d'intérêt nutritionnel (AG poly-insaturés à chaîne longue type EPA/DHA) dans les produits animaux. Certaines algues marines peuvent présenter un intérêt pour réduire les émissions de méthane entérique grâce à une forte teneur en bromoforme qui agit sur la méthanogénèse. C'est notamment le cas pour les algues rouges comme *Asparagopsis armata* et *Asparagopsis taxiformis* (Vijn, et al., 2020). Les réductions pourraient être très importantes et atteindre -80% chez les bovins sans modifier les performances zootechniques (Honan et al., 2020). En France, le projet METH'ALGUES visant à évaluer des ressources algales locales sur cette question a débuté en 2021 (Idele, 2021b). Des tests *in vitro* puis *in vivo* permettront de conclure sur l'intérêt d'algues disponibles sur les côtes françaises autres que des algues rouges. De nouvelles technologies pourraient rendre les microalgues compétitives en tant que ressources alimentaires à l'avenir. Des systèmes de production de microalgues couplés à l'alimentation en eau des animaux sont à l'étude. La production de biocarburants dérivés de microalgues pourrait générer des résidus délipidés d'intérêt pour l'alimentation animale (Halmenies-Beauchet-Filleau et al., 2018).

**Pour résumer cette partie sur les matières premières concentrées, les insectes et les algues**, la figure 2 illustre la diversité des matières premières et coproduits végétaux pouvant être utilisée en alimentation des ruminants et de leurs teneurs en protéines et en parois végétales. Quelques données concernant les algues, les microalgues et les farines d'insectes sont positionnées sur ce graphique.

## 3. EVALUER LES NOUVELLES RESSOURCES, AGREGER ET TRANSFERER LES CONNAISSANCES

L'utilisation de nouvelles biomasses dans l'alimentation des ruminants suppose d'en connaître les caractéristiques nutritionnelles afin de bien les valoriser dans les rations.

### 3.1. EVALUER LES ALIMENTS

#### a. Nouveaux besoins de caractérisation fine des aliments

Les multiples finalités (productivité, efficacité, résilience, santé des animaux et des consommateurs de produits animaux, environnement) auxquelles l'alimentation des ruminants doit répondre rend nécessaire de caractériser plus finement les

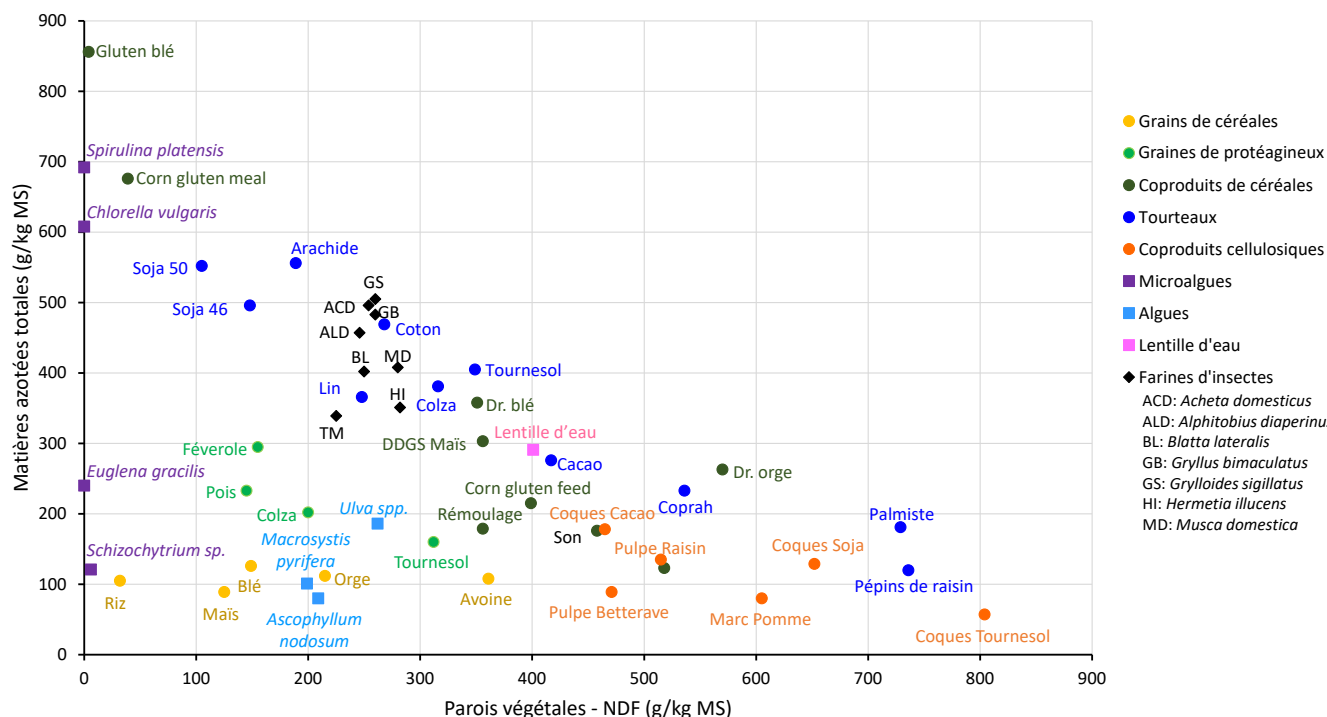
aliments. Cela recouvre notamment la caractérisation des polysaccharides complexes des parois végétales et leurs rôles nutritionnels et fonctionnels (santé du tube digestif), les acides aminés indispensables pour la nutrition des animaux à fort potentiel, les acides gras (Glasser et al., 2013) les micronutriments (oligoéléments, vitamines – Graulet, 2022), les composés secondaires dont certains peuvent avoir des effets alicaments comme par exemple les tanins condensés de certaines légumineuses (Aufrère et al., 2012), mais aussi des composés antinutritionnels pouvant affecter les performances des animaux, leur santé, les rejets ou la qualité des produits.

#### b. Evaluation de la valeur alimentaire par les méthodes de référence

Les méthodes de référence pour évaluer les aliments des ruminants reposent sur la mesure *in vivo* de leur digestibilité dans l'ensemble du tube digestif (Demarquilly et al., 1995), de leur dégradation *in situ* dans le rumen (principalement pour les fractions azotées et amylacées) et de leur ingestibilité pour les fourrages (Baumont et al., 2018a). Même si le nombre de données de référence accumulées au cours du temps et disponibles dans la littérature est conséquent, l'utilisation de nouvelles ressources dans les rations nécessite l'acquisition d'un nombre suffisant de nouvelles données de référence pour les caractériser. Ces dernières permettront de vérifier la validité des modèles de prévision de la valeur alimentaire pour ces nouvelles ressources. On pourra alors soit étendre leur domaine de validité, soit créer des modèles de prévision spécifiques. C'est en particulier le cas pour les coproduits dont la composition peut varier fortement (cf. 2.2.b). Il est donc important de maintenir des dispositifs de référence pour l'évaluation *in vivo* de nouvelles ressources alimentaires utilisées pour l'alimentation des ruminants. L'évolution des thématiques scientifiques, la rationalisation des outils expérimentaux et la prise en compte en expérimentation animale du principe des 3R (Remplacer, Réduire, Raffiner) ont conduit à réduire fortement en France comme à l'étranger le nombre de sites permettant de réaliser ces méthodes de références. Ainsi, à INRAE, le nombre d'ateliers permettant la mesure de la digestibilité et de l'ingestibilité des fourrages par la méthode de référence est passé de 7 dans les années 1990 à 3 dans les années 2020. En complément, pour certains critères de caractérisation des aliments, le développement des techniques de précision en élevage expérimental voire commercial, par exemple les mesures automatisées des quantités ingérées, ouvrent des perspectives pour le « phénotypage à haut débit » des ressources alimentaires conjointement à celui des animaux.

#### c. Méthodes alternatives et de prévision

Pour prévoir la valeur des aliments sur le terrain, pour faire du criblage d'un grand nombre de matières premières ou pour réduire l'utilisation d'animaux expérimentaux, des méthodes basées sur des approches *in vitro* et/ou des relations statistiques entre la composition des aliments et leur utilisation par les animaux ont été développées (Givens et al., 2000). Certaines techniques existent depuis longtemps comme les méthodes *in vitro* (Tilley et Terry, 1963) et les méthodes enzymatiques (Aufrère et al., 2007), et font toujours l'objet de développements pour augmenter leur précision et leur domaine d'application (Le Morvan et al., 2016). Pour répondre à la demande sociétale, l'arrêt programmé en France pour 2025 de l'utilisation des vaches munies d'une canule du rumen nécessite de mettre au point une méthode de référence alternative basée sur une approche *in vitro* pour la mesure de la dégradation des aliments dans le rumen. Dans ce but, INRAE conduit actuellement le programme ALTERFI avec le soutien des principales entreprises du secteur de l'alimentation des ruminants.



**Figure 2.** Teneurs moyennes en protéines (MAT) et en parois végétales (NDF) pour les principaux groupes de matières premières actuellement utilisées ou potentiellement utilisables en alimentation des ruminants.

Les aliments représentés par des ronds (grains de céréales, graines de protéagineux, coproduits de céréales, tourteaux, coproduits celluloseux) sont présents dans les tables INRA (INRA, 2018). Les données sur les algues, microalgues et la lentille d'eau sont issues de Halmemies-Beauchet-Filleau et al. (2018) et les données sur les farines d'insectes de Renna et al. (2022).

D'autres méthodes, plus récentes comme la spectrométrie dans le proche infra-rouge (SPIR), présentent un potentiel d'innovation fort (Andueza et al., 2011 ; Bastianelli et al., 2018). Basée sur l'absorption de la lumière infrarouge par la matière organique des échantillons, cette méthode non invasive et non destructive des échantillons peut être appliquée sur de nombreuses matrices alimentaires (fourrages, coproduits, ingrédients des rations) ou produites par les animaux (lait, fèces). Elle permet une estimation de la composition chimique des aliments en termes de teneurs en protéines, fibres, digestibilité enzymatique mais également, à titre expérimental, une estimation de l'utilisation digestive des rations. Ainsi, par exemple la mesure de la digestibilité d'une ration et des émissions de méthane à l'échelle d'un individu à partir du spectre infra-rouge d'un simple prélèvement de fèces constitue une perspective prometteuse tant pour l'évaluation des ressources que le phénotypage des animaux (Andueza et al., 2021).

La miniaturisation des spectromètres infrarouges permet aujourd'hui d'envisager une utilisation sur le terrain pour une analyse directe des échantillons de matières premières fraîches. Ces développements récents permettent de s'affranchir des étapes de séchage et de broyage préalables à toutes analyses. Cependant, analyser les échantillons sur les lieux de prélèvements n'a de sens que si les performances des spectromètres portables ne sont pas impactées par cette miniaturisation. Selon Bastianelli et al. (2018), les spectromètres infrarouges portables permettent de prédire avec une fiabilité raisonnable les principales caractéristiques nutritionnelles des aliments (humidité, protéines brutes, fibres, digestibilité de la matière sèche...). En raison de l'humidité, de l'hétérogénéité des échantillons et de la simplification des appareils de mesures, la précision des étalonnages est cependant significativement plus faible qu'avec des échantillons secs sur des appareils de laboratoire, et l'erreur de prédiction généralement multipliée par un facteur de 1,3 à 3,0.

Récemment, dans le cadre du projet régional wallon EFFORT ([www.cra.wallonie.be/fr/effort](http://www.cra.wallonie.be/fr/effort)), plusieurs types d'appareils

portables ont été comparés sur différents types de fourrages. Les performances varient entre appareils. Les paramètres comme l'humidité, les protéines et la cellulose semblent raisonnablement bien prédits. Des erreurs plus importantes ont été observées pour la composition en fibres (NDF – ADF) et la digestibilité enzymatique (Fernandez-Pierna et al., 2021). Le développement de base de données spectrales sur matériel frais, couvrant une large variété d'aliments (fourrages et matières premières) conditionnera l'utilisation en routine de ce type d'appareils.

### 3.2. AGREGER ET TRANSFERER LES CONNAISSANCES

La création et le transfert des connaissances sur les aliments ont longtemps été fondés sur la simple compilation de données expérimentales, diffusées sous forme de tables publiées sur papier de façon plus ou moins périodique. Dans les trois dernières décennies, la génération massive de données dans les laboratoires spécialisés ainsi que l'utilisation de l'informatique ont permis le développement de tables basées sur l'exploitation et la méta-analyse de larges bases de données intégrant les résultats de la littérature internationale. La diffusion des tables privilégie maintenant les supports numériques et en libre accès (Open Access).

#### a. Agréger les données de composition et les valeurs nutritionnelles : une étape indispensable pour intégrer de nouvelles ressources dans l'alimentation des ruminants

La collecte de données est la première étape pour la mise en place d'un système d'information cohérent sur la composition et la valeur nutritionnelle des matières premières destinées à l'alimentation animale.

Les travaux menés par l'Association française de zootechnie (AFZ) depuis 1989 dans le cadre de la Banque de données de l'alimentation animale française ont permis une collecte massive de données (3 millions de données dont 100 000 *in vivo*) pour 600 000 échantillons correspondants à près de 7 000 matières premières et fourrages différents. Les travaux conduits à INRAE sur les fourrages depuis les années 1950 ont permis de constituer une base de données de plus de 2000



mesures de digestibilité et d'ingestibilité sur les fourrages verts de graminées et de légumineuses et de 290 mesures sur le maïs. Cette base de données a été complétée par plus de 300 mesures permettant de prévoir la valeur des fourrages conservés à partir de celle du fourrage vert correspondant, et par plus de 450 mesures de dégradation de l'azote dans le rumen (Baumont et al., 2018a, b). Avoir de nombreuses données permet de couvrir les besoins en information de façon à la fois qualitative, quantitative (en termes de produits et de paramètres nutritionnels) et sécurisée (élimination des données anormales). L'exploitation statistique de ces bases de données donne lieu à l'établissement d'équations de prédiction liant des valeurs chimiques entre elles ou des valeurs chimiques et des valeurs nutritionnelles mesurées *in vivo*. Il devient alors possible de calculer des valeurs type de composition chimique et nutritionnelle qui ne sont pas de simples moyennes de valeurs brutes.

## b. Produire des tables de référence

Des premières tables de la valeur des fourrages ont été proposées par Demarquilly et Weiss (1970), INRA (1978) et Andrieu et al., (1989). Depuis 2002, les travaux conjoints d'INRAE et de l'AFZ ont abouti à la création de plusieurs tables de références : tables multi-espèces de matières premières (« Tables vertes », Sauvante et al., 2004), tables pour ruminants contenant à la fois des données de matières premières et de fourrages (INRA, 2007). La rénovation des systèmes d'alimentation des ruminants (INRA, 2018) a inclus celle des tables qui sont désormais consultables en ligne : [www.feedtables.com](http://www.feedtables.com) pour les tables matières premières multi espèces et [www.inration.fr](http://www.inration.fr) pour les tables des fourrages et des concentrés utilisés pour les ruminants (cf. données des tables présentées dans les figures 2 et 3).

## c. Etendre la portée des tables, améliorer la caractérisation des matières premières

Suite au succès des « Tables vertes » et des tables pour les ruminants à l'international (elles ont été traduites en Anglais, Espagnol et Chinois), l'AFZ a entrepris en 2006, en collaboration avec INRAE, le CIRAD et la FAO, la construction de tables destinées initialement aux régions chaudes. Ce travail est devenu par la suite Feedipedia ([www.feedipedia.org](http://www.feedipedia.org)), une encyclopédie des aliments pour animaux de ferme de portée mondiale et accessible gratuitement sur internet depuis 2012. Cette encyclopédie propose à la fois une caractérisation qualitative des aliments (description botanique et physique, conditions de culture et d'obtention, contraintes et modalités d'utilisation pour les différentes productions animales), et une caractérisation quantitative via des tables de composition et de valeurs nutritionnelles sur plus de 1500 matières premières et fourrages. Feedipedia est un outil de transfert de connaissances majeur, consulté dans le monde entier par plus d'un million de visiteurs par an. Dans le contexte du changement climatique, Feedipedia constitue une source d'information précieuse pour ceux qui envisagent de recourir à des aliments adaptés aux sécheresses ou capables de remplacer des cultures précédemment détruites (après une grêle ou un gel tardif). Avec 72% d'aliments alternatifs, Feedipedia offre une base de connaissances solide pour choisir ceux qui, dans les rations, remplaceront opportunément les matières premières et fourrages conventionnels et pourront ainsi contribuer à la résilience des élevages.

## d. Offrir des outils de calcul de valeurs alimentaires et de calcul des rations

Les données publiées dans les tables INRAE et INRAE-AFZ sont par construction des données correspondant à des aliments « moyens ». Pour une meilleure précision dans les calculs de ration, ces tables viennent nourrir différents outils, dont le module PrevAlim du logiciel de rationnement INRAE V5 et RUMIN'AL développé par INRAE avec France Conseil

Elevage ([www.inration-ruminal.fr](http://www.inration-ruminal.fr)) et le calculateur multi-espèces Feedinamics ([www.feedinamics.com](http://www.feedinamics.com)) développé par l'AFZ avec A-Systems. Grâce à ces outils, l'utilisateur peut calculer les valeurs alimentaires de ses propres aliments (matières premières seules pour toutes espèces animales pour Feedinamics ; toutes matières premières et fourrages pour les ruminants pour PrevAlim dans INRAE et RUMIN'AL) et, pour les deux outils INRAE, calculer les valeurs de rations complètes. INRAE V5 et RUMIN'AL intègrent des lois de réponses multicritères qui permettent d'évaluer les rations sur différents aspects, en particulier les rejets dans l'environnement (N, CH<sub>4</sub>), et le risque d'acidose.

## CONCLUSION

Cette synthèse met en lumière les nombreux enjeux climatiques, environnementaux, économiques et sociétaux qui questionnent les ressources alimentaires pour les ruminants. Face à ces enjeux, de nombreux leviers existent soit pour adapter les ressources existantes soit pour développer de nouvelles ressources. Ils mettent en évidence le rôle accru que devront jouer les légumineuses fourragères et à graines, les plantes adaptées à des climats plus chauds et secs, les ressources ligneuses et les coproduits végétaux dans l'alimentation des ruminants. Caractériser ces nouvelles ressources alimentaires nécessite d'obtenir de nouvelles données par les méthodes de référence d'évaluation des aliments pour pouvoir conforter les bases de données et les outils de prévision existants dans une démarche d'évaluation multicritère. Ces perspectives sur l'alimentation des ruminants questionnent aussi les caractéristiques des animaux, leur conduite, et plus largement l'organisation des filières de ruminants, autant de sujets que nous n'avons pas abordés ici. S'adapter au changement climatique, réduire les impacts sur l'environnement des élevages par plus d'autonomie alimentaire et de circularité nécessitera de rechercher des optimums de production permis par les ressources alimentaires disponibles en local plutôt que de maximiser le potentiel de production des animaux.

Agreste 2020. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/>

Andueza D., Picard F., Pradel P., Egal D., Hassoun P., Peccatte J.-R., Baumont R., 2011. Reproducibility and repeatability of forage *in vivo* digestibility and voluntary intake of permanent grassland forages in sheep. *Livestock Science*, 140, 42-48

Andueza D., Dehareng F., Rochette Y., Martin C., Vanlierde A., Picard F., Morgavi D., Pourrat J., 2021. Influence of measurement method of methane on the performances of faecal NIRS models in cattle. EAAP conference, Davos, Abstract.

Andrieu J., Demarquilly C., Sauvante D., 1989. Tables of feeds used in France. In: Jarrige, R. (Ed.), *Ruminant Nutrition: recommended allowances and feed tables*. INRA, John Libbey Eurotext, Paris, pp. 213-204.

Archimede H., Bastianelli D., Fanchone A., Gourdière J.-L., Fährmann L., 2018. Aliments protéiques dans les systèmes mixtes intégrés polycultures-élevage en régions tropicales. In : *Ressources alimentaires pour les animaux d'élevage*. Baumont R. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim., 31, 221-236.

Astuti DA, Anggraeny A, Khotijah L, Suharti S, Jayanegara A. 2019. Performance, physiological status, and rumen fermentation profiles of pre- and post-weaning goat kids fed cricket meal as a protein source. *Trop Anim Sci J*. 42:145–151. <https://doi.org/10.5398/tasj.2019.42.2.145>.

Aufrère J., Baumont R., Delaby L., Peccatte J.-R., Andrieu J., Andrieu J.-P., Dulphy J.-P. (2007). Prédiction de la digestibilité des fourrages par la méthode pepsine-cellulase. Le point sur les équations proposées. *INRA Prod. Anim.*, 20, 129-136.

Aufrère J., Theodoridou K., Baumont R., 2012. Valeur alimentaire pour les ruminants des légumineuses contenant des tannins condensés en milieu tempérés. *INRA Prod. Anim.*, 25, 29-44

Bastianelli D., Bonnal L., Barre P., Nabeneza S., Salgado P., Andueza D., 2018. La spectrométrie dans le proche infrarouge pour la caractérisation des ressources alimentaires. In : *Ressources alimentaires pour les animaux d'élevage*. Baumont R. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim., 31, 237-254.

Baumont, R., Lewis, E., Delaby, L., Prache, S., Horan, B. (2014). Sustainable intensification of grass-based ruminant production. *Grassland Science in Europe*, 19, 521-532.

- Baumont R., Bastien D., Férard A., Maxin G., Niderkorn V., 2016.** Les intérêts multiples des légumineuses fourragères pour l'alimentation des ruminants. *Fourrages*, 227, 171-180.
- Baumont, R., Sauvant, D., Maxin, G., Chapoutot, P., Nozière, P. (2018a).** Méthodes d'évaluation de la valeur des aliments et bases de données. In : Inra, 2018. Alimentation des ruminants. Apports nutritionnels - Besoins et réponses des animaux - Rationnement - Tables des valeurs des aliments. Versailles, FRA : Editions Quae. pp. 477-485.
- Baumont, R., Sauvant, D., Maxin, G., Chapoutot, P., Tran, G., Boudon, A., Lemosquet-Simon, S., Nozière, P. (2018b).** Calcul de la valeur des aliments pour ruminants : tables et équations de prévision. In : Inra, 2018. Alimentation des ruminants. Apports nutritionnels - Besoins et réponses des animaux - Rationnement - Tables des valeurs des aliments. Versailles, FRA : Editions Quae. pp. 487-520.
- Brunschwig P., Lamy J.M. (2008).** Mélanges céréales - légumineuses immatures et sorghos ensilés, des alternatives fourragères pour les vaches laitières en situation séchante. *Rencontres Recherches Ruminants*, 15, 205-208.
- Chapoutot P., Rouillé B., Sauvant D., Renaud B., 2018.** Les coproduits de l'industrie agro-alimentaire : des ressources alimentaires de qualité à ne pas négliger. In : Ressources alimentaires pour les animaux d'élevage, Baumont R. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim., 31, 201-220.
- Chauveau H., Uijtewaald A. (2020).** Sorghos fourragers monocuspides : différents types pour différentes valorisations. In : Actes des Journées AFPP, 2020, Produire des fourrages dans un contexte de changements climatiques (Poster). <https://afpp-asso.fr/actes/journees-de-printemps-2020?acte=677>
- Delaby L., Horan B., 2021.** Améliorer l'efficacité des systèmes laitiers herbagers en milieux tempérés. *INRAE Prod. Anim.*, 34, 161-172. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.3.487>
- Demarquilly C., Weiss P., 1970.** Tableaux de la valeur alimentaire des fourrages. *INRA-SEI Série Etudes (FRA)*, 42, 64p.
- Demarquilly C., Chenost M., Giger S., 1995** Pertes fécales et digestibilité des aliments et des rations. In *Nutrition des ruminants domestiques*, (R. Jarrige, Y. Ruckebusch, C. demarquilly, M.-H. Farce, M. Journet eds.), INRA Editions pp 501-648.
- Deroche B., Pradel P., Baumont R. (2020).** Long-term evolution and prediction of feed value for permanent mountain grassland hay: Analysis of a 32-year data set in relation to climate change. *Grass and Forage Science*, 75(1):18-27. DOI: <https://doi.org/10.1111/gfs.12465>
- Dronne Yves., 2018.** Les matières premières agricoles pour l'alimentation humaine et animale : l'UE et la France. In : Ressources alimentaires pour les animaux d'élevage. Baumont R. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim, 31, 181-200.
- Emile J.C., Barre Ph., Delagarde R., Niderkorn V., Novak S., 2017.** Les arbres, une ressource fourragère au pâturage pour des bovins laitiers ? *Fourrages* 230, 155-160.
- Ertl P., Klocker H., Hörtenhuber S., Knaus W., Zollitsch W., 2015.** The net contribution of dairy production to human food supply: The case of Austrian dairy farms. *Agric. Syst.*, 137, 199-125.
- Fernández Pierna, J., Chamberland, N., Vermeulen, P., Decruyenaere, V., Froidmont E., Minet, O., Leclerc, B. & Baeten, V. (2021).** Handheld NIR spectrometers to evaluate grass silage quality A study of calibration performance evaluation. Poster in: ICNIRS, Beijing China, 18-21 October 2021.
- Fukuda Ep, Cox Jr, Wickersham Ta, Drewery MI, 2022.** Evaluation of Black Soldier Fly larvae (*Hermetia illucens*) as a protein supplement for beef steers consuming low-quality forage. *Transl Anim Sci.*, 6(1):txac018. <https://doi.org/10.1093/tas/txac018>.
- Givens D.I., Axford R.F.E., Omed H.M., 2000.** Forage Evaluation in Ruminant Nutrition, Wallingford: CABI Publishing, 480 pp.
- Glasser F., Doreau M., Maxin G., Baumont R., 2013.** Fat and fatty acid content and composition of forages: A meta-analysis. *Animal Feed Science and Technology*, 185, 19-34.
- Graulet, B., 2022.** Récentes avancées sur les facteurs de variation des concentrations en vitamines du lait chez les ruminants. *INRAE Prod Anim*, 35, in press.
- Halmemies-Beauchet-Filleau A., Rinne M., Lamminen M., Mapato C., Ampapon T., Wanapat M. And Vanhatalo A., 2018.** Alternative and novel feeds for ruminants: nutritive value, product quality and environmental aspects. *Animal*, 12: S2, pp s295-s309.
- Hawkey KJ, Lopez-Viso C, Brameld JM, Parr T, Salter AM, 2021.** Insects: a potential source of protein and other nutrients for feed and food. *Annu Rev Anim Biosci.* 9: 333-354. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-021419-083930>.
- Hegarty RS, Cortez Passeti RA, Dittmer KM, Wang Y, Shelton S, Emmet-Booth J, Wollenberg E, McAllister T, Leahy S, Beauchemin K, Gurwick N. 2021.** An evaluation of emerging feed additives to reduce methane emissions from livestock. Edition 1. A report coordinated by Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS) and the New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre (NZAGRC) initiative of the Global Research Alliance (GRA).
- Hennessy DP, Shalloo L, van Zanten HHE, Schop M, De Boer IJM (2021).** The net contribution of livestock to the supply of human edible protein: the case of Ireland. *The Journal of Agricultural Science* 159, 463-471. <https://doi.org/10.1017/S0021859621000642>
- Hernandez P., 2021.** Fiche technique N°2 : les dérobées estivales, un levier face au déficit fourrager ? – Retour sur les essais 2019-2020. *Herbe et Fourrages*, Centre-Val de Loire.
- Herremans S., Ferard A., Wyss U., Maxin G., 2018.** Les cultures dérobées : des fourrages de qualité nutritive intéressante. *Fourrages*, 33, 39-46.
- Herremans S., Regibeau C., De Toffoli M., Jamar D., Daniaux C., Huyghebaert B., 2021.** Le pâturage des couverts d'interculture par les ovins et ses impacts : synthèse bibliographique. *Fourrages*, 248, 21-28.
- Heuzé V., Tran G., Sauvant D., 2020.** Foxtail millet (*Setaria italica*), forage. *Feedipedia*, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO. <https://www.feedipedia.org/node/382>
- Heuzé V., Tran G., Hassoun P., Sauvant D., 2015.** Pearl millet (*Pennisetum glaucum*), forage. *Feedipedia*, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO. <https://www.feedipedia.org/node/399>
- Heuzé V., Tran G., Giger-Reverdin S., Lebas F., 2015.** Sorghum forage. *Feedipedia*, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO. <https://www.feedipedia.org/node/379>
- Honan M., Feng X., Tricarico J.M., Kebreab E., 2021.** Feed additives as a strategic approach to reduce enteric methane production in cattle: modes of action, effectiveness and safety. *Animal Production Science*, Special issue, 15 pages.
- IDELE, 2021a.** Gisements et valorisations des coproduits des entreprises agroalimentaires du Grand Est. Rapport d'enquête, 90 pages.
- IDELE, 2021b.** METH'ALGUES, des algues pour réduire les émissions de méthane entérique chez la vache laitière. Plaquette institutionnelle, 2 pages.
- INRA, 1978.** Tables de l'alimentation des ruminants, INRA Editions.
- INRA, 2007.** Alimentation des bovins, ovins et caprins - Besoins des animaux - Valeurs des aliments - Tables INRA 2007. Editions Quae, Versailles, France, 307pp.
- INRA, 2018** Alimentation des ruminants. Apports nutritionnels - Besoins et réponses des animaux - Rationnement - Tables des valeurs des aliments (p. 487-520). Versailles, FRA : Editions Quae. 728 p.
- Jayanegara A, Novandri B, Yantina N, Ridla M. 2017a.** Use of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) to substitute soybean meal in ruminant diet: An in vitro rumen fermentation study. *Vet World*. 10(12):1439-1446. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2017.1439-1446>.
- Jayanegara A, Yantina N, Novandri B, Laconi EB, Ramli N, Ridla M. 2017b.** Evaluation of some insects as potential feed ingredients for ruminants: chemical composition, in vitro rumen fermentation and methane emissions. *J Indones Trop Anim Agric*. 42(4):247-254. <https://doi.org/10.14710/jitaa.42.4.247-254>.
- Jørgensen U., Jensen S.K. and Ambye-Jensen M. 2022.** Coupling the benefits of grassland crops and green biorefining to produce protein, products and services for the green transition. *Grassland Science in Europe*, 27, 83-94.
- Klumpp K., Fornara D.A., 2018.** The carbon sequestration of grassland soils – climate change and mitigation strategies. *Grassland Science in Europe*, 23, 509-519
- Laisse S., Baumont R., Dusart L., Gaudré D., Rouillé B., Benoit M., Veyssat P., Rémond D., Peyraud J.-L., 2018.** L'efficacité nette de conversion des aliments par les animaux d'élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine. In : Ressources alimentaires pour les animaux d'élevage. Baumont R. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim., 31, 269-288.
- Lebreton B., Prache S., Berri C., Lefèvre F., Bauchart D., Picard B., Corraze G., Médale F., Faure J., Alami-Durante H., 2015.** Qualités des viandes : influences des caractéristiques des animaux et de leurs conditions d'élevage. In : Numéro spécial, Le muscle et la viande. Picard B., Lebreton B. (Eds). INRA Prod. Anim., 28, 151-168.
- Legendre A. Bouffartigue J., Deleau D., Deraedt M., Desmoniere E., Emile J.C. Estrade O., Ferard A., Greffier J., Knoden D., Pierre P., Toussaint J. Uijtewaald A. 2019.** Guide technique des mélanges fourragers à base de céréales à paille et de légumineuses. Association Française pour la Production Fourragère.
- Le Morvan A., Quereuil A., Maxin G., 2016.** Vers une méthode enzymatique Haut Débit de prévision de la digestibilité des fourrages. *Renc. Rech. Ruminants*, 23, 31.
- Liagre F., Marin A., Ori D., 2020.** Exemples d'aménagements ligneux pour une production fourragère. *Fourrages* 242, 79-86.

- Luscher A., Mueller-Harvey I., Soussana J. F., Rees R.M., Peyraud J.-L., 2014.** Potential of legume-based grassland-livestock systems in Europe: a review. *Grass and forage science*, 69, 206–228.
- Lüscher A., Barkaoui K., Finn J.A., Suter D., Suter M. and Volaire F., 2022.** Using plant diversity to reduce vulnerability and increase drought resilience of permanent and sown productive grasslands. *Grassland Science in Europe*, 27, 309-322.
- Martin B., Hurtaud C., Graulet B., Ferlay A., Chilliard Y., Coulon J.-B., 2009.** Herbe et qualités nutritionnelles et organoleptiques des produits laitiers. *Fourrages*, 199, 291-310.
- Maxin G., Nozière P., Sauvant D., Baumont R., 2018.** Appliquer les méthodes d'évaluation multicritère aux rations des ruminants : identification des critères à évaluer et des indicateurs à mesurer sur les aliments. In : *Ressources alimentaires pour les animaux d'élevage*. Baumont R. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim., 31, 255-268.
- Maxin G., Andueza D., Le Morvan A., Baumont R. 2017.** Effect of intercropping vetch (*Vicia sativa* L.), field pea (*Pisum sativum* L.) and triticale (*X Triticosecale*) on dry-matter yield, nutritive and ensiling characteristics when harvested at two growth stages. *Grass and Forage Science*, 72, 777-784.
- Maxin, G. Graulet B., Le Morvan A., Picard F., Portelli J., Andueza D. 2020.** Cover crops as alternative forages for ruminants: nutritive characteristics, in vitro digestibility, methane and ammonia production. *Animal Production Science*, 60, 823-832.
- Maxin G, Arrigo Y, Dozias D, Andueza D, Le Morvan A., Baumont R., Delaby L. 2016.** Prediction of the in vivo organic matter digestibility of cereal-legume intercrops silages. 26th EGF general meeting, Trondheim, Norway
- Meneguz M, Schiavone A, Gai F, Dama A, Lussiana C, Renna M, Gasco L. 2018.** Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *J. Sci. Food Agric.* 98, 5776. doi: 10.1002/jsfa.9127
- Moreau J.-C., Madrid A., Brun T., Ruget F., 2020.** Dans les filières bovines, apprivoiser le changement climatique. La méthode déployée dans le cadre de Climail et Climaviande. *Fourrages* 244, 9-18.
- Moreau J.-C., Béral C., Hannachi Y., Lavoyer S., Monier S., Novak S., Van Lerberghe P., 2020.** ARBELE - L'arbre dans les exploitations d'élevage herbivore : des fonctions et usages multiples. *Innovations Agronomiques* 499-521.
- Novak S., Barre P., Delagarde R., Mahieu S., Niderkorn V., Emile J.-C., 2020.** Composition chimique et digestibilité in vitro des feuilles d'arbre, d'arbuste et de liane des milieux tempérés en été. *Fourrages*, 242, 35-47.
- Nozière 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 Prod Anim*, 35, in press.
- Pavie et al., 2022.** Autonomie protéique. *Journées 3R*.
- Peyraud J.-L., Aubin J., Barbier M., Baumont R., Berri C., Bidanel J. P., Citti C., Cotinot C., Ducrot C., Dupraz P., Faverdin P., Friggens N., Houot S., Nozrières-Petit M.-O., Rogel-Gaillard C., Sante-Lhoutellier V. (2019).** Quelle science pour les élevages de demain ? Une réflexion prospective conduite à l'INRA. *INRA Productions Animales*, 32(2):323-338. DOI: <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2591>.
- Pietikäinen A., Kokkonen T., Rissanen P., Vanhatalo A., Herzon I. and Krawczel P., 2022.** Effects of two approaches for outdoor access on the welfare of lactating Nordic red cows. *Grassland Science in Europe*, 27, 701-703.
- Poux X. and Aubert P.-M., 2022.** Permanent grassland and ruminants are a key component of the agroecological transition in Europe – findings from the 'Ten Years For Agroecology' scenario. *Grassland Science in Europe*, 27, 16-28.
- Prache S., Adamiec C., Astruc T., Baeza-Campone E., Bouillot P.E., Clinquart A., Feidt C., Fourat E., Gautron J., Girard A., Guillier L., Kesse-Guyot E., Lebret B., Lefevre F., Le Perchec S., Martin B., Mirade P.S., Pierre F., Raulet M., Remond D., Sans P., Souchon I., Donnars C., Sante-Lhoutellier V., 2022.** Review: Quality of animal-source foods. *Anim.* 16, 100376.
- Regibeau C., 2019.** Des couverts et des moutons. <https://filagri.be/actualites/des-couverts-et-des-moutons/>.
- Renna M, Coppa M, Lussiana C, Le Morvan A, Gasco L, Maxin G. 2022.** Full-fat insect meals in ruminant nutrition: in vitro rumen fermentation characteristics and lipid biohydrogenation. *Journal of Animal Science and Biotechnology* (in press).
- RESEDA, 2017.** Les coproduits de l'industrie agroalimentaire, un enjeu stratégique pour les filières. Rapport d'enquête, 121 pages.
- RESEDA, 2019.** Gisements et valorisations des coproduits des entreprises agroalimentaires en Normandie. Rapport d'enquête, 84 pages.
- Sagot L., 2017.** "Cet automne mes brebis pâturent les couverts végétaux". Brochure de l'Institut de l'Élevage / CIIRPO : <https://www.inn-ovin.fr/cet-automne-brebis-paturent-couverts-vegetaux/>.
- Sailley M., Cordier C., Courtonne J.-Y., Duflot B., Cadudal F., Perrot C., Brion A., Baumont R., 2021.** Quantifier et segmenter les flux de matières premières utilisées en France par l'alimentation animale. *INRAE Prod. Anim.*, 34, 273-292.
- Sauvant D., Perez J.M., Tran G., 2004.** Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. D INRA Editions, Paris, France, 301pp.
- Sauvant D., Giger-Reverdin S., Peyraud J.-L., 2018.** Bien-être digestif et acidose ruminale. In : *Inra, 2018. Alimentation des ruminants. Apports nutritionnels - Besoins et réponses des animaux - Rationnement - Tables des valeurs des aliments*. Versailles, FRA : Editions Quae. pp. 249-256.
- Seegers J., Kentzel M., Fagon J., Jousseins C., Morin E., Etienne L., Bossis N., 2020.** Etat des lieux de l'autonomie alimentaire et protéique dans les ateliers d'élevage herbivores, Institut de l'Elevage. <https://idele.fr/detail-article/etat-des-lieux-de-l'autonomie-alimentaire-et-protéique-dans-les-ateliers-delevage-herbivores>
- Sprangers, T.; Ottoboni, M.; Klootwijk, C.; Olyn, A.; Deboosere, S.; Meulenaer, B. de; Michiels, J.; Eeckhout, M.; Clercq, P. de; Smet, S. de, 2017.** Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates. *J. Sci. Food Agric.*, 97 (8): 2594-2600. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8081>
- The New Zealand Poplar & Willow Research Trust. 2013.** Setting up a willow coppice block for fodder. June 2013, Fact Sheet 03, 2p
- Tilley J. M. A., Terry R. A., 1963.** A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *Grass and Forage Science*, 18, 104-111. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1963.tb00335.x>
- Toral PG, Hervás G, González-Rosales MG, Mendoza AG, Robles-Jiménez LE, Frutos P. 2022.** Insects as alternative feed for ruminants: comparison of protein evaluation methods. *J Anim Sci Biotechnol.* 13:21. <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00671-2>.
- Vandermeulen S., Ramirez-Restrepo C.A., Marche Ch., Decruyenaere V., Beckers Y., Bindelle J., 2016.** Behaviour and browse species selectivity of heifers grazing in a temperate silvopastoral system. *Agroforest Syst*, published online, DOI 10.1007/s10457-016-0041-x.
- Vandermeulen S., Lebloy J., Ramirez-Restrepo C.A., Beckers Y., Logny G., Bindelle J., 2016.** In vitro evaluation of protein precipitation capacity of temperate browse species. In *The 21th National Symposium on Applied Biological Sciences*, February 5<sup>th</sup>, Antwerpen, Belgium.
- van Huis A. 2020.** Insects as food and feed, a new emerging agricultural sector: a 660 review. *J Insects Food Feed*, 6(1), 27–44.
- Vijn S., Compart D. P., Dutta N., Foukis A., Hess M., Hristov A. N., Kalscheur K. F., Kebreab E., Nuzhdin S. V., Price N. N., Sun Y., Tricarico J. M., Turzillo A., Weisbjerg M. R., Yarish C., Kurt T. D., 2020.** Key Considerations for the Use of Seaweed to Reduce Enteric Methane Emissions From Cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 2297-1769.
- Wilfart A., Dusart L., Meda B., Gac A., Espagnol S., Morin L., Dronne Y., Garcia-Launay F., 2018.** Réduire les impacts environnementaux des aliments pour les animaux d'élevage. In : *Ressources alimentaires pour les animaux d'élevage*. Baumont R. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim., 31, 289-306
- Wilkinson J.M., 2011.** Re-defining efficiency of feed use by livestock. *Animal*, 5, 1014-1022.
- Wyss U., Mosimann E., 2016.** Qualité des ensilages produits avec des cultures dérobées", *Recherche Agronomique Suisse*, 7, 436-441.