

Gestion des ressources fourragères : quels outils d'aide à la décision sont à disposition des éleveurs laitiers ?

C. Battheu-Noirfalise¹, A. Lefèvre², D. Stilmant¹, S. Hennart¹, V. Decruyenaere², E. Froidmont¹

Une valorisation optimale des fourrages permet de meilleures performances économiques et environnementales. Pour aiguiller les éleveurs dans cette tâche complexe, une diversité d'outils d'aide à la décision (OAD) ont été développés.

RESUME

L'objectif de cette synthèse est de proposer une méthode de catégorisation des outils d'aide à la décision (OAD) en lien avec la valorisation des fourrages en élevage laitier pour **guider les éleveurs et leurs conseillers vers le(s) type(s) d'OAD le(s) plus adapté(s) à chaque situation**. Le niveau d'action (pâturage, système fourrager, alimentation, troupeau, technico-économique et système d'élevage) aborde les différentes étapes influençant directement ou indirectement la valorisation des fourrages. L'horizon de gestion approche la temporalité de l'aide à la décision : gestion prévisionnelle (Prévoir), rétrospective (Contrôler) et, à plus long terme, stratégique (Repenser). Le niveau technique (indicateur, programme, outil automatisé) représente le degré d'élaboration du conseil par l'OAD.

SUMMARY

Forage resource management: what decision support tools are available to dairy farmers?

Forage management is complex. To tackle this issue many decision support tools (DSTs) have been developed. The objective of this synthesis is to propose a method of categorization of DSTs that address the use of forages in dairy farming in order to guide farmers and their advisors towards the type(s) of DSTs most adapted to each situation. The level of action (grazing, forage system, feed, herd, techno-economic and farming system) addresses the different stages that have a direct or indirect influence on the use of forages. The horizon of management approaches decision support in a predictive (Forecast), retrospective (Control) and, in the longer term, strategic (Rethink) manner. Finally, the level of technicity (indicator, programme, automated tool) describes different degrees in the development of an advice as well as the level of involvement of the farmer in the decision-making process.

Depuis les années 60, les performances des vaches laitières n'ont cessé d'augmenter. En parallèle, l'herbe a été complémentée et en partie remplacée par de l'ensilage de maïs, plus riche en énergie mais déficitaire en protéines, et par des aliments concentrés, notamment en protéines, pour rectifier le déséquilibre lié au maïs (Delaby et Peyraud, 2009). Cette consommation grandissante de concentrés est critiquée pour plusieurs raisons dont notamment la perte d'autonomie (Brunschwig *et al.*, 2012), les impacts sur l'environnement et la compétition avec l'alimentation humaine (Wilkinson, 2011). Pourtant, une ration à base de fourrages de qualité permet également d'atteindre de

bons niveaux de production laitière, et ce, avec une faible complémentation démontrant qu'une **marge d'amélioration significative existe au niveau de la valorisation des ressources fourragères** (Delaby et Peyraud, 2009).

Un frein majeur à la bonne valorisation de ces ressources est l'importante variabilité en qualité et quantité qui leur est associée. La gestion de cette variabilité est complexe de par la multitude de facteurs d'influence (essence fourragère, fertilisation, stade de récolte, conditions climatiques à la récolte, mode de conservation, complémentation apportée, modes de présentation et de distribution de la ration, *etc.*) dont

AUTEURS

1 : Centre wallon de Recherches agronomiques, Département durabilité, systèmes et prospectives. Bâtiment Haute Belgique, 100 Rue du Serpont, B-6800 Libramont. Belgique, c.battheu@cra.wallonie.be

2 : Centre wallon de Recherches agronomiques, Département productions agricoles. Bâtiment Bertrand Vissac, 8 Rue du Liroux, B-5030 Gembloux. Belgique

MOTS-CLES : Simulation, gestion des prairies, gestion du pâturage, herbomètre, ration alimentaire, santé, diagnostic, sélection génomique, jeux sérieux

KEY-WORDS : Simulation, grassland management, grazing management, herbometer, feed ration, health, diagnosis, genomic selection, serious games

REFERENCE DE L'ARTICLE : Battheu-Noirfalise C., Lefèvre A., Stilmant D., Hennart S., Decruyenaere V., Froidmont E., (2022). « Gestion des ressources fourragères : quels outils d'aide à la décision sont à disposition des éleveurs laitiers ? ». *Fourrages* 251, 39-50

certaines, notamment les conditions pédoclimatiques, sont hors du contrôle des éleveurs (Baumont *et al.*, 2009 ; Hanrahan *et al.*, 2017). Dans le cadre du pâturage, une difficulté supplémentaire est liée à la prévision de la pousse de l'herbe qu'il faut réussir à faire correspondre au mieux aux besoins des animaux. Ceci induit une remise en question quasi quotidienne dans la prise de décision (Michaud *et al.*, 2008).

Une fois les fourrages produits, **la capacité à valoriser ces ressources en lait ou en viande dépend de l'entière du système de production**. En Irlande, par exemple, le système de production laitier est basé sur le groupement des vaches en fin d'hiver permettant d'alimenter les vaches au pic de lactation à partir d'herbe pâturée. Certaines caractéristiques animales sont nécessaires à ce système dont notamment une fertilité excellente, la résistance aux boiteries et au parasitisme et la plasticité suffisante pour moduler la production laitière en fonction de la disponibilité en herbe (Delaby *et al.*, 2020).

De nombreux Outils d'Aide à la Décision (OAD) ont été développés par les chercheurs et organismes de conseils pour aider les éleveurs dans leur gestion des fourrages. Aux Pays-Bas, 74 outils en lien « seulement » avec la production de fourrages ont été dénombrés, dont 40 programmes informatiques, 18 manuels en ligne et 16 outils de mesure (Bufe *et al.*, 2018). Les programmes informatiques étaient les premiers OAD développés. Ils datent de peu après la seconde guerre mondiale où la modélisation mathématique a été mise à profit de la prise de décisions, notamment en agriculture (Little, 1970). Suite à leur faible utilisation par les éleveurs, les OAD ont ensuite évolué vers tous types de support d'aide à la décision (support visuel, manuel, objet de mesure, arbre de décision, etc.) afin d'être plus en phase avec la gestion pratique des éleveurs (Meinke *et al.*, 2001 ; Plant et Stone, 1991). Par ailleurs, depuis une dizaine d'années, les objets connectés font leur apparition en élevage et une offre concernant la gestion des fourrages émerge (Allain *et al.*, 2021). Ceux-ci offrent de nouvelles opportunités en termes d'efficacité des programmes jusqu'à la création d'outils automatisés.

Face un tel foisonnement d'OAD, il devient fastidieux de trouver l'outil idéal. D'autant plus que les préférences varient en fonction des éleveurs et de leur système d'élevage (Battheu-Noirfalise *et al.*, 2022). **L'objectif de cette synthèse est de catégoriser et d'illustrer la diversité d'OAD pouvant être mobilisés dans le cadre de la valorisation des fourrages par les éleveurs laitiers dans le but de guider les éleveurs et leurs conseillers vers le(s) type(s) d'OAD le(s) plus adapté(s) à chaque situation.**

1. Catégorisation des outils

Nous proposons trois catégorisations des OAD : le niveau technique, le niveau d'action et l'horizon de gestion.

1.1. Le niveau technique

Pour comprendre le fonctionnement d'un OAD, Rutten *et al.* (2013) proposent un schéma en quatre étapes (Figure 1) à partir duquel **nous définissons trois niveaux techniques d'OAD : les indicateurs, les programmes et les outils automatisés**. Premièrement, l'étape technique (1) contient les capteurs. Ceux-ci mesurent un aspect de la condition de l'animal, de l'environnement ou des ressources (ex : hauteur d'herbe). À l'étape de l'interprétation des données (2), un modèle prédictif, basé sur des données expérimentales, permet d'interpréter l'information du premier niveau par rapport à la question d'intérêt (ex : lien entre hauteur d'herbe et biomasse disponible). Ces données informatives issues directement d'outils de mesure ou transformées vers d'autres indicateurs compréhensibles représentent le niveau des **indicateurs**. À la troisième étape, dite d'intégration (3), d'autres données sont potentiellement prises en compte dans un modèle d'aide à la décision. Il s'agit du niveau des **programmes**. Par exemple, un programme peut traiter les hauteurs d'herbe en établissant un profil de pâturage indiquant l'ordre de pâture des parcelles optimal et, à l'aide de données d'élevage, évaluer si les quantités d'herbe sur chaque parcelle correspondent aux objectifs de l'éleveur. Enfin, un conseil est rendu et la prise de décision (4) peut s'effectuer par l'éleveur ou de manière automatisée. En effet, les **outils automatisés**, représentant le troisième niveau, sont capables de réaliser toute la chaîne de décision, de la prise d'information, à l'élaboration d'un conseil jusqu'à la réalisation de celui-ci.

En fonction du niveau technique de l'OAD, l'éleveur prend une posture différente par rapport à la prise de décision (en pointillé sur la Figure 1). Il est en mesure d'interpréter le résultat d'un indicateur en fonction du contexte à l'aide d'un système de connaissance, personnel et/ou issu de ressources techniques, jusqu'à l'élaboration d'une décision. Lors de l'utilisation d'un programme, l'éleveur peut décider de réaliser tel quel ou de modifier, en réinterprétant en fonction du contexte, le conseil de l'OAD. Lors de l'utilisation d'outils automatisés, l'éleveur prend plutôt une posture de contrôle. En lien avec cette caractérisation, nous définissons le terme Outil d'Aide à la Décision de la manière suivante : « *Tout système peut être considéré comme outil d'aide à la décision (OAD) s'il permet de prévoir ou de contrôler la gestion à court terme (gestion opérationnelle et tactique) et/ou de repenser l'orientation de son système d'élevage (gestion stratégique) en procurant des indicateurs quantitatifs ou qualitatifs associés à un modèle d'interprétation, qu'il soit informatisé ou non.* ».

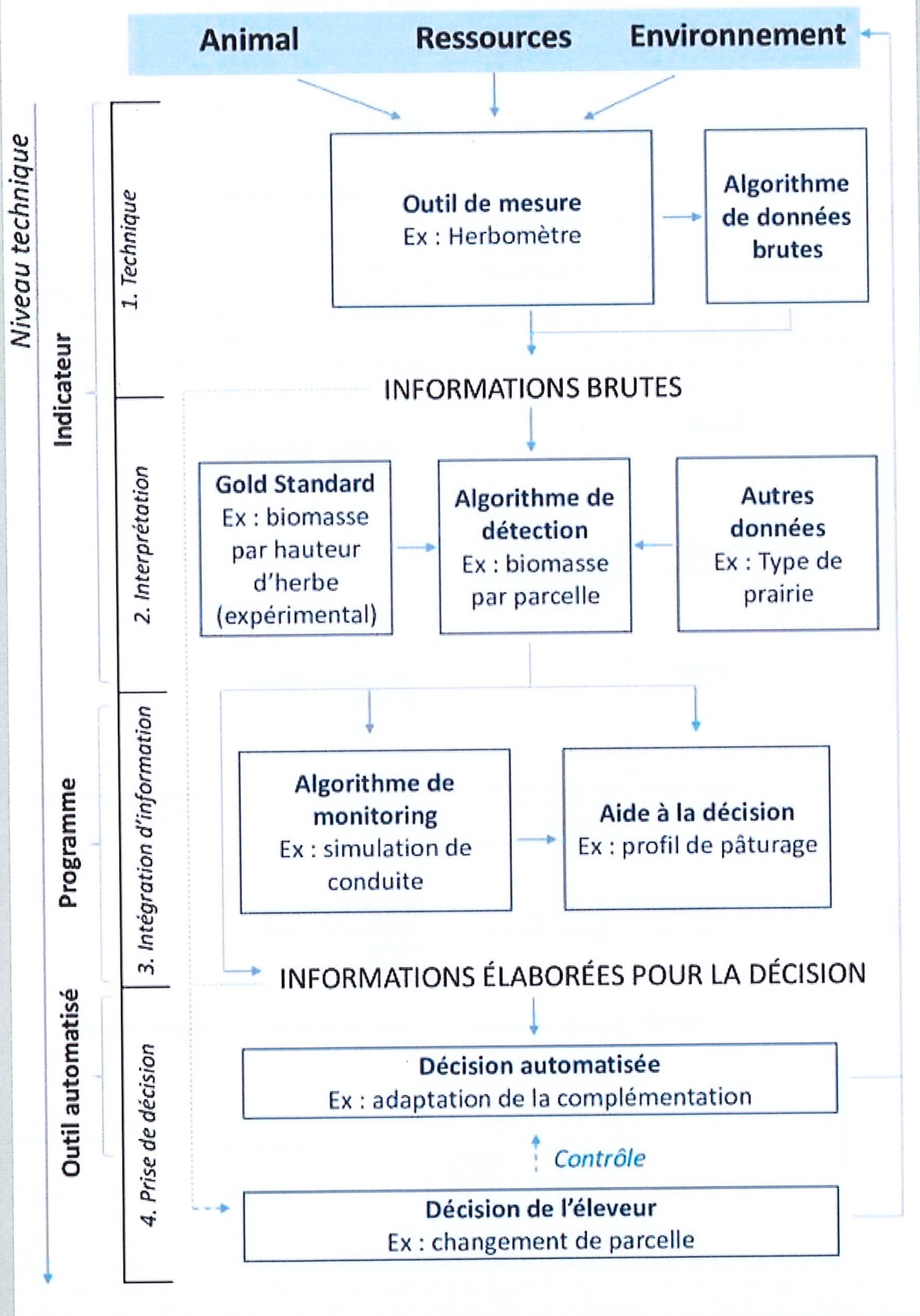


FIGURE 1 : Relations entre les sources d'informations et la prise de décision à l'aide d'un OAD (schéma réalisé sur base de Favardin et al., 2020 ; Rutten et al., 2013 ; Shalloo et al., 2018).
 Figure 1 : Relationships between information sources and decision making using an ADO (diagram based on Favardin et al., 2020; Rutten et al., 2013; Shalloo et al., 2018).

L'efficacité d'utilisation des fourrages peut être abordée à différents niveaux d'action (Figure 2). Les plus directs sont le **pâturage** et le **système fourrager** (fertilisation, choix des espèces fourragères, etc.) qui l'englobent. Cependant, la manière dont la ration fourragère est complétée influence également la valorisation des fourrages. **L'alimentation**, au niveau de la composition globale de la ration, est donc également d'intérêt. Au niveau supérieur encore, la **gestion de troupeau** peut être choisie pour être plus en phase avec le système fourrager souhaité. Ensuite, différents indicateurs **technico-économiques** (production laitière, bilans, etc.) représentent les performances effectives des décisions de l'éleveur, dont notamment celles en lien avec les niveaux d'action précédemment cités. Le niveau le plus global est le

système d'élevage, prenant en compte les nombreuses synergies entre les différentes composantes. Il est important de s'intéresser à la valorisation des fourrages à chacun de ces niveaux d'action car il serait dommage de perdre les gains d'efficacité obtenus par une pratique plus précise du pâturage, par exemple, par une complémentation inadéquate de la ration.

1.3. Horizon de Gestion

Les réflexions influençant la valorisation des fourrages peuvent être catégorisées à différents horizons de gestion (Figure 2). La **gestion prévisionnelle (Prévoir)** est en lien avec des réflexions préalables à l'utilisation des fourrages. Celle-ci concerne principalement les quatre premiers niveaux d'action.

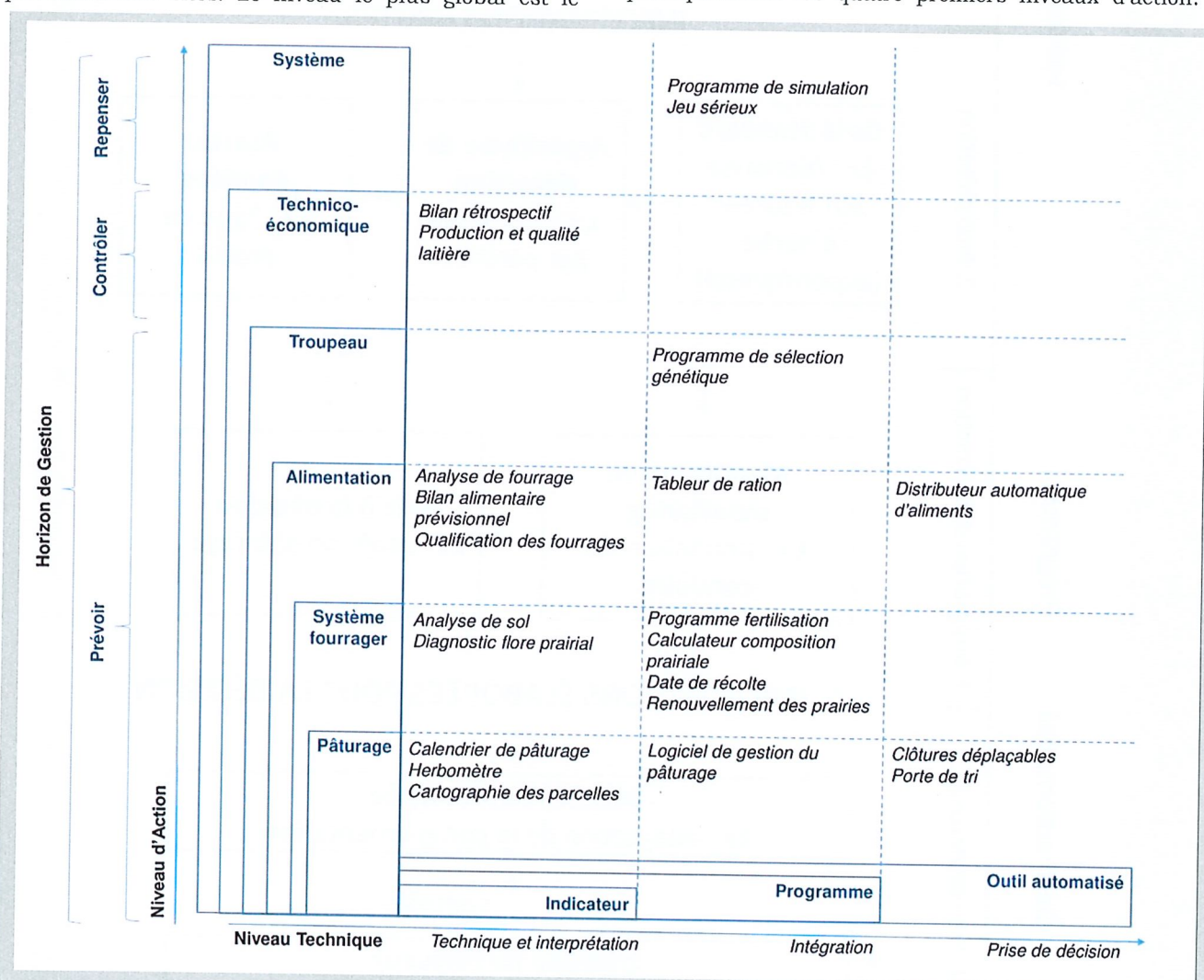


FIGURE 2 : Différents leviers d'actions ayant un impact sur l'efficacité d'utilisation des ressources fourragères et pouvant faire l'objet d'OAD en fonction du niveau d'action (pâturage, système fourrager, alimentation, troupeau, technico-économique et système d'élevage), du niveau technique (indicateur, programme, outil automatisé) et de l'horizon de gestion (prévoir, contrôler et repenser). Les OAD cités représentent une liste non-exhaustive à titre d'illustration de la catégorisation.

Figure 2: Different action levers that have an impact on the efficiency of forage resource use and that can be the subject of DMOs according to the level of action (grazing, forage system, feed, herd, technico-economic and breeding system), the technical level (indicator, program, automated tool) and the management horizon (forecasting, controlling and rethinking). The ADOs mentioned represent a non-exhaustive list to illustrate the categorization.

Une fois la décision prévisionnelle appliquée, l'éleveur peut également faire appel à certains indicateurs de contrôle des performances de cette action. Il s'agit alors d'une **gestion rétrospective (Contrôler)** permettant, le cas échéant, de se réajuster. Cet horizon concerne majoritairement les indicateurs technico-économiques précédemment cités. Ces deux horizons de gestion (prévisionnelle et rétrospective) sont en lien avec des décisions ayant un effet à court et moyen termes. Cependant, certaines décisions **plus stratégiques (Repenser)**, à un horizon plus lointain et en lien avec une modification du système d'élevage à part entière, peuvent également être envisagées par l'éleveur dans l'optique d'optimiser son utilisation des fourrages (Piquet *et al.*, 2013).

Cette méthode de catégorisation est illustrée par la suite à l'aide d'une liste non-exhaustive d'OAD existants.

2. Outils prévisionnels (Prévoir)

2.1. Gestion du système fourrager

♦ Les bilans prévisionnels et plannings d'alimentation

De nombreux outils permettent d'établir des **bilans prévisionnels** permettant d'évaluer l'adéquation entre charge animale, intensité de production souhaitée et productions fourragères à disposition. Par exemple, le **bilan fourrager** permet d'évaluer les stocks fourragers à intervalle régulier de façon à anticiper les situations de déficit (Palazon and Moreau, 2020). Après l'état des lieux des aliments disponibles, une allocation optimale aux différentes catégories animales ainsi qu'une prévision d'utilisation annuelle sont réalisées.

♦ Les outils de gestion technique de la prairie

Dans le but de maintenir une prairie productive en quantité et en qualité, l'éleveur doit être en mesure d'évaluer l'état de ses parcelles. Des **méthodes simplifiées du diagnostic de la flore prairiale** ont été élaborées et donnent un indicateur de l'état de la prairie. Par exemple, la méthode des poignées de De Vries et Boer permet de décrire la flore en appréhendant les variations d'abondance d'espèce (Theau *et al.*, 2010). Une fois un diagnostic de la parcelle réalisé, Semae (n.d.) a développé un arbre de décision intégrant également les objectifs de l'éleveur ainsi que l'historique et les caractéristiques de la parcelle. En intégrant ces différents paramètres, cet arbre de décision est un exemple de programme, comme défini dans la classification proposée, en format papier. L'outil Herb'type permet un diagnostic simplifié de la flore en lien avec sa valeur d'usage agricole (productivité, valeur nutritive, souplesse d'utilisation, temporalité) (Duru *et al.*, 2010).

Au niveau du **choix du couvert à (re-)implanter**, Semae (n.d.) propose également un programme en ligne ou sous format papier pour établir les proportions d'essences prairiales en fonction du contexte pédoclimatique et de l'utilisation de la prairie. Capflor est un outil d'aide à la définition des mélanges prairiaux conçu plus spécifiquement pour la mise en place de prairies à flore variée (Goutiers *et al.*, 2016). Par ailleurs, d'autres programmes existent pour le choix d'intercultures fourragères en fonction de la période de semis, du contexte pédoclimatique et des cultures présentes dans la rotation et ce en Wallonie (PROTECT'eau n.d.) et en France (Arvalis n.d.).

Une autre série d'outils vise à préciser les stratégies de fertilisation. Afin d'ajuster les apports d'azote, la plupart des OAD développés sont des **bilans prévisionnels**, comparant les besoins de la culture aux fournitures, comme notamment l'outil Ferti Prairie (PROTECT'eau n.d.). Les **analyses de sols** fournissent d'autres indicateurs permettant d'évaluer les besoins en apports d'autres nutriments ou de rectification du pH. Dans l'objectif de faire le lien entre les effluents d'élevage disponibles et les besoins en fertilisation des productions végétales, le programme VALOR a été développé pour fournir une estimation des quantités et qualités des différents **engrais de ferme** et de leur distribution optimale entre les différents couverts végétaux cultivés (CRA-W n.d.). L'outil Date N'Prairie est un indicateur de **la date optimale du premier apport d'azote** en fonction de la somme des températures depuis le premier janvier (Arvalis n.d.).

L'utilisation d'un grand nombre d'OAD très spécifiques peut s'avérer fastidieuse et chronophage pour l'utilisateur. En réponse à cela, les concepteurs tendent à regrouper plusieurs modules au sein de boîtes à outils. L'outil HappyGrass par exemple, reprend plusieurs outils précédemment cités dont notamment des bilans prévisionnels permettant d'estimer les surfaces nécessaires au troupeau et la fertilisation nécessaire, un **diagnostic prairial** suivi d'indications sur la **lutte chimique** ou **l'adaptation des pratiques** en fonction de ce diagnostic, mais également une aide à la **définition de la composition des prairies** et des **dates de fauche** ainsi qu'à la qualification des foin sur base de caractéristiques visuelles et olfactives (Leborgne *et al.*, 2022). Outre l'aspect « prairie », HappyGrass possède également un module pâturage et un module cartographie.

♦ Les outils de pâturage

La gestion du pâturage reste très technique de par l'incertitude liée à la croissance de l'herbe. Le **calendrier de pâturage** est l'un des outils les plus simples d'utilisation. Répertoire du déroulement du pâturage ainsi que les fauches et fertilisations, il permet de garder en mémoire les pratiques effectuées et sert ainsi d'indicateur pour les pratiques à venir. Le calendrier de pâturage peut également être utilisé sous format informatique, comme Herb'Evol, dont l'avantage est de

pouvoir réaliser un dépouillement automatique et d'éditer ainsi un bilan de la quantité d'herbe valorisée sur l'année au niveau de la parcelle (voir « bilans rétrospectifs » au point 3.) (Seuret et al., 2007). Le calendrier de pâturage représente donc un outil dont la gestion peut être à la fois prévisionnelle et rétrospective (si un dépouillement est effectué en fin de saison).

Des outils de pilotage plus dynamiques permettent un ajustement régulier en cours de saison. Par exemple, dans le cas du pâturage tournant, **les hauteurs d'herbe d'entrée et de sortie de parcelle** sont des indicateurs du stade optimal de début de pâturage pour la première et permettent d'éviter un potentiel gaspillage ou un surpâturage pour la deuxième. Ces hauteurs peuvent être mesurées à l'aide de différents outils : herbomètre à plateau, réglette, repères sur des bottes, mètre ruban, etc. La mesure des hauteurs d'herbe permet ensuite, combinée à une estimation de la densité du couvert végétal, d'évaluer un **stock d'herbe disponible** (SHD). Pour déterminer cette biomasse disponible, l'herbomètre à plateau est le plus précis car il permet de mesurer une hauteur d'herbe compressée (pression du plateau sur l'herbe). La valeur de densité moyenne de 250 kg MS/cm/ha est généralement utilisée. Cependant, les herbomètres gagneraient encore en précision à l'aide de calibrations spécifiques selon la région, le mois et les espèces prairiales (Defrance et al., 2004).

D'autres outils sont en voie de développement pour permettre une mesure plus précise et moins fastidieuse du SHD, comme des capteurs à ultrasons et des spectromètres portables attelables sur un véhicule tout terrain (Moeckel et al., 2017) ou encore l'utilisation d'images satellites (Nickmilder et al., 2021) ou de drones (Punalekar et al., 2018). Cependant, ces approches restent moins précises que l'herbomètre (Shalloo et al., 2018). Par ailleurs, **l'utilisation de**

l'herbomètre oblige l'éleveur à parcourir ses prairies lui permettant potentiellement de collecter, outre les relevés de pousse de l'herbe, d'autres observations en lien avec leur état. C'est sur ce principe qu'est basée la boîte à outils FarmWalk, développée en Nouvelle Zélande et adaptée aux Pays-Bas. Il s'agit d'un tour hebdomadaire des parcelles pâturées permettant de prendre note des hauteurs d'herbe mais également des spécificités de chaque parcelle (van den Pol-van Dasselaar et al., 2015).

Des informations supplémentaires peuvent être ajoutées à l'indicateur de hauteurs d'herbe créant ainsi des programmes permettant de préciser le conseil. Par exemple, **l'Abaque pâturage** permet de connaître la complémentation nécessaire en fonction de l'herbe disponible au pâturage (mesurée par herbomètre) et de la production laitière (Kohnen ; 2009). En retenant une hypothèse de consommation journalière, on peut calculer, sur base du SHD, le nombre de **jours d'avance** (JA) de pâture représentant un indicateur pour anticiper la stratégie de pâturage en ajustant les concentrés, les fourrages complémentaires ainsi que les parcelles à faucher. C'est notamment le principe de la méthode Herbo-LIS (Arvalis, 2011). Les JA sont repris dans certains programmes. Herb'Avenir utilise également les JA, mais permet de simuler différentes options de gestion de troupeau et de pousse de l'herbe (Defrance et al., 2005). L'outil Pâtur'IN permet, outre le calcul du SHD et des JA, d'évaluer l'impact de différents schémas de gestion du pâturage dans un mode « simulation ». L'outil possède également un mode « réalisé » qui permet d'élaborer le **planning de pâturage** et le **bilan de la saison** (Delaby et al., 2001).

Le **profil de pâturage** (PP), développé en Nouvelle-Zélande, offre une visualisation de l'herbe disponible par parcelle (Figure 3). Cette option est particulièrement

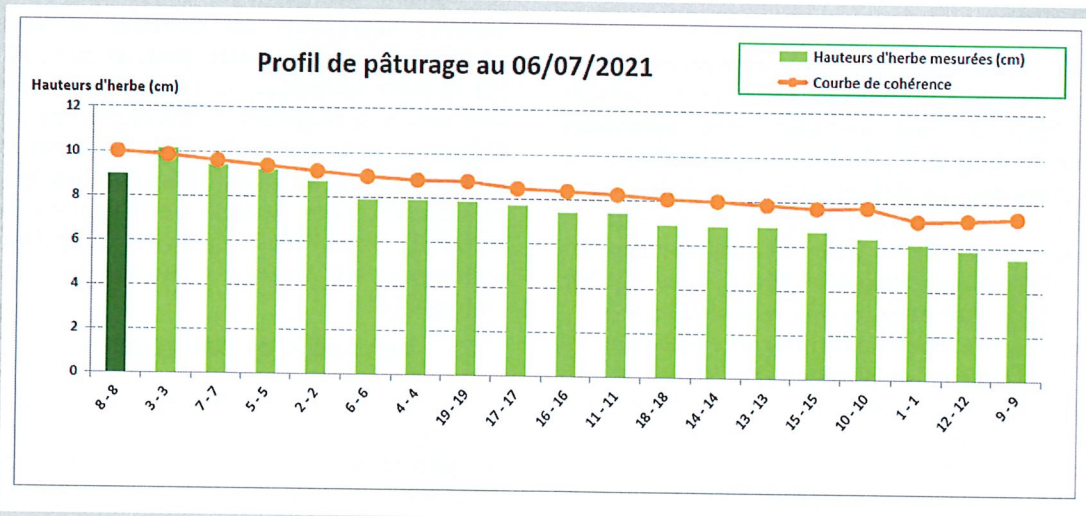


FIGURE 3 : Profil de pâturage établi à l'aide du logiciel Pâtur'Plan© avec, en abscisse, les différentes parcelles qui entrent dans le circuit de pâturage.

Figure 3 : Grazing profile established with the Pâtur'Plan© software (on the x-axis, the different parcels that enter the grazing circuit).

intéressante pour la gestion du pâturage tournant dynamique en représentant d'une part la mesure de hauteur d'herbe par parcelle, et d'autre part la courbe de cohérence qui indique les hauteurs d'herbe idéales à atteindre en entrée de parcelle nécessaires pour maintenir la conduite envisagée par l'éleveur (taille du troupeau, niveau de production, sévérité du pâturage et complémentation apportée). Une forte inadéquation entre ces deux valeurs invite l'éleveur à adapter sa conduite. À l'aide de l'outil Pâtur'Plan, par exemple, il peut simuler l'impact de décisions comme débrayer une parcelle pour la fauche ou ajuster la complémentation (Delaby et Bignon, 2015).

Lors de la mise en place d'un pâturage tournant, la définition du parcellaire et la planification de chemins d'accès peuvent s'avérer fastidieuses. Les outils de **cartographie** permettent d'avoir une vue claire de ses parcelles et d'en effectuer une découpe précise. Cela facilite le calcul des chargements à prévoir. Paturevision (n.d.) a développé un logiciel gratuit de cartographie. L'utilisateur peut y créer des paddocks géolocalisés, ajouter des points de repères et exporter les cartes créées.

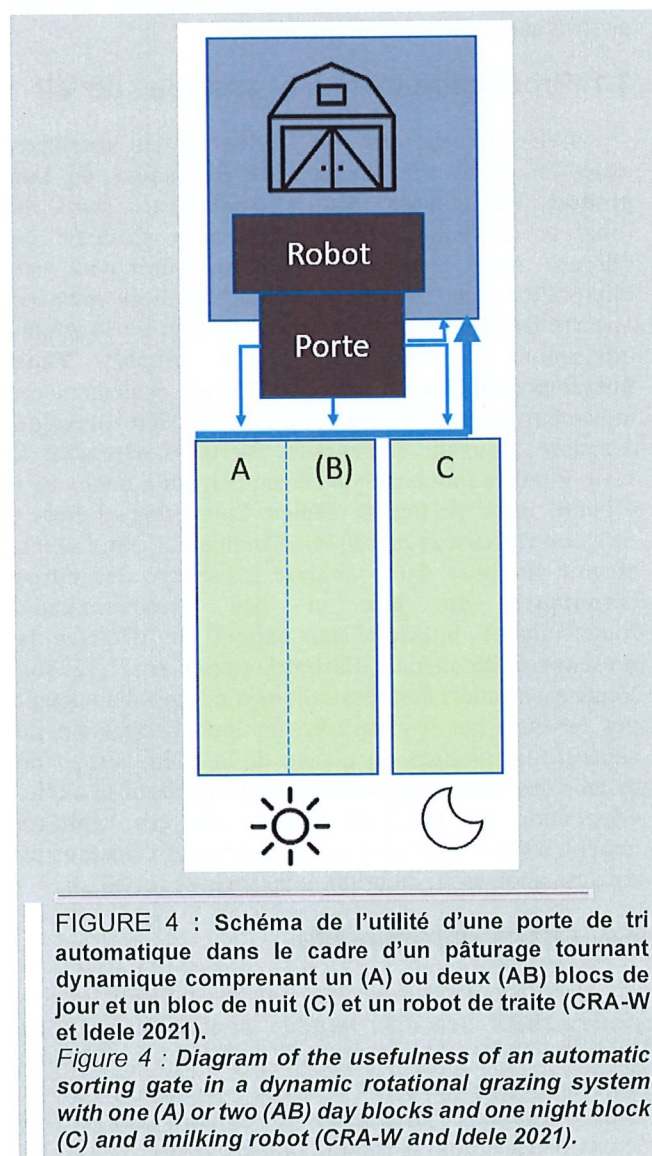
Les capteurs connectés peuvent faciliter l'utilisation des OAD du pâturage en automatisant l'encodage des données nécessaires. Les herbomètres connectés, notamment, permettent de faire un lien direct entre mesures de hauteur d'herbe et réalisation du PP (Shalloo *et al.*, 2018). D'autre part, l'intérêt des accéléromètres se confirme pour analyser le comportement du troupeau au pâturage dont notamment l'ingestion d'herbe. En lien avec la parcelle en cours de pâturage (géolocalisation), les données provenant d'accéléromètres pourront être intégrées au sein d'OAD et potentiellement permettre d'automatiser la gestion du pâturage (Riaboff *et al.*, 2020). Par exemple les clôtures virtuelles ou physiques, en voie de développement, sont déplaçables de manière automatisée en fonction de la disponibilité en herbe estimée par les accéléromètres (French *et al.*, 2015). Déjà effective à l'heure actuelle, les portes de tri permettent d'automatiser le changement de parcelle pour **optimiser la valorisation de l'herbe avec un robot de traite** (Figure 4).

2.2. Gestion de l'alimentation

Pour composer au mieux les rations, différents systèmes d'alimentation ont été développés (Schwab and Broderick, 2017). Ces informations sont reprises au sein de tableurs de rationnement permettant de composer une ration optimale pour chaque catégorie animale, voire pour chaque individu (Cuttulic *et al.*, 2013). On retrouve notamment l'application Systool sur base du système d'alimentation français Systali (INRAe n.d.). Les apports individuels peuvent être réalisés à l'aide d'un Distributeur Automatique de Concentrés (DAC) créant un outil automatisé où les vaches peuvent

prendre leur portion spécifique de concentrés en toute autonomie.

Outre les besoins zootechniques, il est également nécessaire d'avoir une bonne connaissance de la qualité nutritionnelle des ingrédients disponibles. A ce niveau, une nouvelle gamme d'analyseurs portables est en développement comme par exemple l'AgriNIR (Dinamica generale n.d.). Ces outils seront en mesure de procurer des indicateurs pertinents sur la qualité des aliments directement en ferme. Ces appareils peuvent également être embarqués sur les machines agricoles. Ainsi, le système HarvestLab 3000, embarqué sur ensileuse, permet d'analyser la qualité du fourrage pendant la récolte et d'adapter, en temps réel, la hauteur de coupe ou la quantité de conservateurs utilisée (John Deere n.d.). Dans l'optique de faciliter ces analyses, d'autres outils basés sur l'analyse multi-spectrale et la valorisation d'images satellitaires sont en voie de développement. Cependant, leur précision reste inférieure à l'analyse en laboratoire (Wachendorf *et al.*, 2018).



2.3. Adaptation du troupeau

Les caractéristiques adaptatives nécessaires à certains systèmes fourragers mènent les éleveurs à opter pour un changement de race (*via* achat extérieur ou croisements) ou une orientation génétique spécifique (Delaby et Peyraud, 2009). Certaines fonctionnalités de sélection génétique des Prim'Holstein sont notamment disponibles dans l'application Illicow (PHF 2020). A titre d'exemple, ils peuvent prêter attention à une bonne fertilité (en vue d'un éventuel vêlage groupé) ou à la qualité des aplombs de la descendance. Vu la complexité que ces adaptations de troupeau peuvent représenter, cela motive dans certains cas l'utilisation d'outils de simulation (voir 4. *Outils de simulation*).

3. Outils rétrospectifs (Contrôler)

Certains outils permettent de contrôler, rétrospectivement, l'effet des actions prises au niveau des différentes catégories précédemment citées et des critères tels que la production laitière et les performances technico-économiques.

3.1. Production laitière et analyses de lait

L'éleveur peut observer l'influence des stratégies mises en œuvre sur la **quantité et qualité du lait produit**. Par ailleurs, d'autres indicateurs issus de l'analyse du lait, peuvent orienter la stratégie de l'éleveur. Ainsi, le **taux d'urée dans le lait** peut être interprété comme indicateur d'un déséquilibre entre les apports de protéines et d'énergie au sein de la ration (Nousiainen et al., 2004). Le rapport **Taux Butyreux (TB)/Taux Protéique (TP)** est également un indicateur pertinent : inférieur à 1,20, il reflète un risque d'acidose (Sauvant et Peyraud, 2010) et supérieur à 1,40, il reflète un risque de cétose ; ce qui a donné lieu à l'outil IDEC (Indice de Déficit Energétique Cétose ; Alves de Oliveira et al., 2014). L'indicateur CétoDétect, obtenu sur base d'une analyse infrarouge des **corps cétoniques du lait** et des caractéristiques zootechniques individuelles, permet de détecter la présence d'acétonémie (Barbat-Letterier et al., 2016). Même si certaines données sont déjà mises à disposition des éleveurs par les contrôles laitiers, l'utilisation de capteurs infrarouges au niveau de la traite permet de fournir des informations directement pendant la traite. Cependant, les résultats fournis par ces capteurs restent, à l'heure actuelle, moins précis que ceux fournis par une analyse en laboratoire (French et al., 2015).

3.2. Bilans rétrospectifs

Les bilans rétrospectifs sont des indicateurs des performances sur une certaine période et ainsi de contrôler l'effet de décisions passées. Les **bilans d'autonomie** permettent d'estimer l'adéquation entre charge animale et productions fourragères comme c'est le cas de Devautop (Benadda and Sarzeaud, 2022). De

manière analogue, les **bilans de productivité à l'hectare**, au niveau de l'exploitation, ou même de la parcelle avec l'outil HerbValo notamment, permettent une réflexion sur l'optimisation des pratiques agricoles (Delagarde et al., 2017). L'outil en ligne CowNex permet une évaluation annuelle de l'autonomie et de **l'efficacité azotée** à l'échelle du troupeau laitier (Faverdin et al., 2013).

Pour calculer ces bilans et fournir les résultats aux éleveurs en routine, les **comptabilités agricoles** mises en place dans de nombreuses exploitations représentent un support clé (Argilés et Slof, 2001). En effet, les données relevées peuvent être mobilisées pour calculer de nombreux indicateurs pertinents, tant au niveau de la gestion d'élevage (production laitière, taux protéiques et butyreux du lait, etc.) que de la conduite des surfaces fourragères (coût des fourrages grossiers, etc.), ou encore de l'alimentation (kg de concentrés / kg de lait, etc.) (Hansen et al., 2005). Cependant, les comptabilités agricoles ne sont délivrées qu'à un pas de temps annuel, ce qui limite la fréquence à laquelle ces analyses rétrospectives peuvent être menées. De plus, elles sont représentatives de la moyenne du troupeau et ne permettent donc pas de cibler les individus plus problématiques.

Certaines solutions commerciales ont été développées et permettent l'intégration de données individuelles et connectées en temps réel. On retrouve les logiciels Herd Navigator™ (DeLaval) et Lely Horizon (Lely) en lien avec des capteurs au niveau d'un robot de traite, et Medria FarmLife en lien avec l'utilisation d'un accéléromètre localisé au niveau d'un collier. Ces logiciels permettent à l'éleveur de suivre en temps réel l'évolution de différents indicateurs de contrôle des performances sur un tableau de bord.

4. Outils de simulation (Repenser)

Les outils de simulation permettent de répondre aux questions de type « quoi si ? », en lien avec des changements potentiels de gestion ou l'implémentation d'innovations. Certains outils précédemment cités possèdent notamment un mode « simulation » permettant d'envisager l'impact de différents modes de conduite à court terme. Cependant, ceux-ci sont en lien avec des questions très spécifiques. Cette partie traite de simulations d'orientation stratégique plus larges, ayant un effet à plus long terme et impactant l'entière du système d'élevage. Celles-ci sont plus complexes de par l'incertitude sur certaines variables exogènes (fluctuation des prix) et de par les liens implicites entre de nombreux paramètres de l'exploitation (Le Gal et al., 2013). A titre d'exemple, Dynamilk est un modèle de simulation à l'échelle de l'exploitation, en montagne, permettant d'explorer des stratégies contrastées de conduite et ainsi, de comprendre les compromis entre niveaux de production, autonomie fourragère et utilisation durable des prairies (Jacquot, 2012).

Soulignons que les outils de modélisation deviennent de plus en plus précis grâce à la disponibilité grandissante de données (Cabrera, 2018). À ce niveau, les modèles développés à des fins scientifiques pourraient potentiellement être utilisés comme outils de réflexion stratégique pour les conseillers et les éleveurs, à l'aide d'un encadrement adéquat (Duru *et al.*, 2007 ; Le Gal *et al.*, 2013).

De plus en plus de « jeu sérieux » sont également développés sur des thématiques en lien avec l'agronomie (Lecomte *et al.*, 2021). En transformant le rôle de l'apprenant de passif à actif et en y ajoutant une notion d'amusement, ils représentent des OAD ludiques. De plus, l'utilisation d'un jeu sérieux de manière collective et animée par un conseiller permet d'articuler connaissances scientifiques (modélisation du jeu) et pratiques (discussions collectives sur les scénarios développés) tout en créant le débat entre les participants (Piquet *et al.*, 2013). Pour Berthet *et al.*, (2020), que ce soit en mettant l'accent sur la collaboration ou l'individu, les jeux de conception sont particulièrement intéressants pour repenser les systèmes agricoles en :

- Aidant à construire une représentation commune d'un besoin/problème,
- Facilitant le transfert de connaissances,
- Stimulant la créativité,
- Permettant des stratégies itératives,
- Permettant de tester des solutions.

Par exemple, le Rami Fourrager aborde l'adéquation du système fourrager par rapport aux besoins du troupeau en place, et ce, en particulier face aux changements climatiques. Ainsi, à partir du contexte choisi par les joueurs, l'assolement, le troupeau et l'alimentation sont discutés pour parvenir aux objectifs souhaités (Martin *et al.*, 2011).

5. Discussion

Les OAD permettent d'agir à différents horizons de gestion de manière complémentaire

Les OAD agissant à différents horizons de gestion sont intéressants à utiliser en consort. Les OAD de gestion rétrospective (Contrôler) permettent de valider les prises de décision préalables en lien avec l'utilisation d'OAD de gestion prévisionnelle (Prévoir). Certains OAD peuvent même être utilisés tant pour la gestion prévisionnelle que la gestion rétrospective (voir l'exemple du calendrier de pâturage). Étant donné que plusieurs paramètres peuvent avoir une influence sur les indicateurs de contrôle (le stade de lactation, une maladie, *etc.* peuvent également influencer la production laitière), il est intéressant de pouvoir mesurer l'effet des facteurs confondants. French *et al.*, (2015) expliquent qu'il serait possible de faire le lien entre les données collectées par les capteurs infrarouges

du lait, l'alimentation des vaches et les performances laitières en vue, par exemple, d'émettre un avis sur la quantité/qualité d'herbe disponible au pâturage. Pour ce faire, l'utilisation d'outils connectés peut fortement faciliter voire automatiser la prise de données.

Les outils connectés permettent le développement de programme et outils automatisés

Grâce aux capteurs connectés et au Big Data, de nombreuses solutions deviennent disponibles pour monitorer son troupeau ou automatiser certaines tâches en vue d'alléger le temps d'astreinte, notamment au niveau de la traite ou de l'alimentation voire de la gestion du pâturage (Allain *et al.*, 2015). De ce fait, les outils automatisés représentent un levier primordial à la valorisation d'OAD dont un des principaux freins est le besoin en temps (Rose *et al.*, 2016). Cependant, il est possible que ces outils, de plus en plus complexes, nécessitent des investissements tant financiers que temporels trop importants (Baldin *et al.*, 2021) alors même que les élevages basés sur la valorisation des herbages sont caractérisés par de plus faibles niveaux d'investissements (Shalloo *et al.*, 2018). Il est donc possible que ces solutions ne conviennent pas à tous les profils d'éleveur.

Les indicateurs représentent des OAD plus simples et actuellement plus utilisés

Les OAD du niveau technique des « indicateurs » sont généralement plus simples et plus régulièrement utilisés en exploitation que les OAD des catégories « programme » et « outil automatisé » (Battheu-Noirfalise *et al.*, 2022). Leur format souvent peu informatisé et la simplicité des indicateurs n'est pas leur seul avantage ; ils permettent également à l'éleveur de se sentir moins dépossédé de ses qualités de gérant et peut prendre en compte l'entièreté des paramètres de son exploitation, dont notamment des paramètres qualitatifs ou des nuances fines en lien avec son savoir-faire ou ses préférences personnelles (Eastwood and Kenny, 2009). En effet, il est impliqué plus en amont de processus décisionnel (voir Figure 1). Néanmoins, il est possible que l'éleveur n'interprète pas de manière optimale les indicateurs à sa disposition par manque de connaissances, parfois de manière inconsciente.

Diffusion, formation, conseil, encadrement : les outils sont difficilement utilisés seuls

Les OAD sont généralement développés avec l'intime conviction qu'ils transmettront par eux-mêmes le nouveau système de connaissance intégré aux utilisateurs. Par exemple, en créant un tableur de ration, les développeurs pensent que celui-ci permettra aux éleveurs de comprendre les enjeux d'une complémentation adaptée. Cependant, comme Turner *et al.*, (2020), nous pensons que dans le but de comprendre l'intérêt et le fonctionnement d'un OAD, les éleveurs ont besoin d'acquiescer le système de connaissance associé au

préalable. Par exemple, un éleveur pourrait ne pas comprendre l'intérêt d'utiliser le tableur d'alimentation s'il ne comprend pas le fonctionnement du système d'alimentation associé, et les gains que celui-ci peut apporter à ses pratiques d'alimentation. Dans le but d'augmenter davantage l'adoption des OAD mais également leur efficacité, notamment dans le cadre de l'interprétation des indicateurs précédemment cités, la formation au système de connaissance associé, à l'utilisation technique des OAD et à l'interprétation de leurs résultats est extrêmement précieuse (Turner *et al.*, 2020).

Valoriser les ressources existantes dans la création d'OAD

Certains indicateurs de suivi représentent une opportunité intéressante d'OAD car ils peuvent être dérivés de données déjà disponibles en exploitation. Ainsi, ils peuvent être à disposition de tous les éleveurs et ce à moindre coût. C'est notamment le cas des comptabilités agricoles mais également des analyses de lait. Une autre opportunité est l'utilisation de modèles de simulation développés dans un cadre de recherches scientifiques. Ce type de programme, associé à un encadrement adéquat, permet à l'éleveur de mieux aborder et explorer l'incertitude liée aux résultats ; incertitude qui est souvent mal prise en compte ou en tout cas mal transmise aux éleveurs dans l'utilisation individuelle de programmes (Piquet *et al.*, 2013).

6. Conclusion

Nous proposons une méthode de catégorisation pour une meilleure compréhension de la diversité d'OAD existants en lien avec la valorisation des fourrages. Le niveau d'action permet de veiller à prendre en compte les différentes étapes d'influence sur la valorisation des fourrages. L'horizon de gestion permet, à court terme, de lier une action prévisionnelle à un contrôle des performances attendues ainsi que de fixer une orientation de son système d'élevage à plus long terme. Le niveau technique, en lien avec l'intégration de différentes étapes d'élaboration d'un conseil induit également une implication différente de l'éleveur dans le processus décisionnel. Le développement de capteurs connectés entraîne la création de nouveaux programmes et outils automatisés plus efficaces. Cependant, il est possible que ces solutions ne conviennent pas à tous. Ainsi, notre définition d'OAD intègre également les indicateurs, laissant le soin aux éleveurs d'utiliser leur propre système de connaissance dans l'interprétation des résultats. Certains indicateurs sont déjà à disposition de nombreuses exploitations et pourraient être (mieux) valorisés en terme d'OAD, grâce à une communication renforcée quant à leur fonctionnement, utilité et interprétation.

Remerciements

Cette recherche a été réalisée dans le cadre du projet EFFORT, financé par le Centre wallon de recherche agronomique (CRA-W) dans le cadre de la loi de défiscalisation des institutions de recherche. Les auteurs remercient vivement Edouard Reding et Olivier Vanwarbeck (Élévéo - AWE groupe) pour leurs remarques avisées sur l'utilisation d'OAD par les éleveurs laitiers, ainsi que Romane Vanhakendover pour son apport enrichissant sur le thème des OAD.

Article accepté pour publication le 20 octobre 2022

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allain C., Pavie J., Gautier D., and Pierre P., (2021). "L'internet des objets appliqué aux fourrages, à la conduite." *Journées AEPF - Prairies et Fourrages 2.0*, 1–10.
- Allain C., Quinton P., Philibert A., Cros P., Herman M., Cimino M., Frappat B., Larsonneur S., and Lafont N., (2015). "La connectivité des élevages bovins laitiers." *Renc. Rech. Ruminants*, (22) : 403.
- Alves de Oliveira L., Bertrand E., and Commun L., (2014). "IDEC@: un indicateur de cétose chez la vache laitière." *Renc. Rech. Ruminants*, 21 : 321.
- Argilés J. M., and Slof E. J., (2001). "New opportunities for farm accounting." *European Accounting Review*, 10 (2) : 361–383. <https://doi.org/10.1080/09638180126640>.
- Arvalis, (2011). "Herbo-LIS®." ARVALIS. Consulté le 12 octobre, 2022. <https://www.arvalis.fr/outils-et-services/outils-et-fiches/herbo-lis>.
- Arvalis, (n.d). "Choix des couverts." Consulté le 12 octobre, 2022a. <http://www.choix-des-couverts.arvalis-infos.fr/>.
- Arvalis, (n.d). "Date N°Prairie - Calculer la date du 1er apport d'azote." Consulté le 1 avril, 2021b. <http://www.datenprairie.arvalis-infos.fr/>.
- Baldin M., Breunig T., Cue R., De Vries A., Doornink M., Drevenak J., Fourdraine R., George R., Goodling R., Greenfield R., Jorgensen M. W., Lenkaitis A., Reinemann D., Saha A., Sankarajah C., Shahinfar S., Siberski C., Wade K. M., Zhang F., Fadul-Pacheco L., Wangen S., da Silva T. E., and Cabrera V. E., (2021). "Integrated Decision Support Systems (IDSS) for Dairy Farming: A Discussion on How to Improve Their Sustained Adoption." *Animals*, 11 (7): 2025. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/ani11072025>.
- Barbat-Letterier A., Leclerc H., Philippe M., Fritz S., Daviere J.-B., Manciaux L., Guillaume F., De Bretagne T., and Boichard D., (2016). "GénoSanté: Améliorer la santé productive des vaches laitières par la sélection génomique et la conduite d'élevage: Une première étape avec l'acétonémie." *Renc. Rech. Ruminants*, 23 : 153–156.
- Battheu-Noirfalise C., Froidmont E., Mathot M., and Stilmant D., (2022). "Decision Support Tools for grass-based fodder management in Walloon dairy farms: current adoption and perspectives." *Base*.
- Baumont R., Aufrère J., and Meschy F., (2009). "La valeur alimentaire des fourrages: rôle des pratiques de culture, de récolte et de conservation." *Fourrages*, 198 : 153–173.
- Benadda L., and Sarzeaud P., (2022). "DEVAUTOP." Institut de l'Élevage. Consulté le 12 octobre, 2022. <https://idele.fr/detail-article/devautop>.
- Berthet I. E., Pénicaud C., and Prost L., (2020). "Séminaire IDEAS: « La contribution potentielle des jeux sérieux à la conception ». 8/10/2020.
- Brunschwig P., Devun J., Guinot C., Ballot N., Bèche J.-M., and Le Doaré C., (2012). "L'autonomie alimentaire des troupeaux bovins en France: état des lieux et perspectives". Institut de l'Élevage.
- Bufe C., Wesselink M., Verhoeven J., Stienezen M., Strijkveen E., Steinbusch M., Tjoonk L., and Verloop K., (2018). "Beslisondersteunende hulpmiddelen voor de ruwvoerproductie in Nederland: Inventarisatie van online beslisondersteunende hulpmiddelen en analyse van het gebruik in de praktijk". *Wageningen: Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research*.
- Cabrera V. E., (2018). "Invited review: Helping dairy farmers to improve economic performance utilizing data-driving decision support tools." *Animal*, 12 (1) : 134–144. <https://doi.org/10.1017/S1751731117001665>.

- CRA-W, n.d. "Valor." Valor. Accessed February 24, 2021. Un logiciel pour l'optimisation de l'utilisation des engrais de ferme à l'échelle de l'exploitation et de la parcelle.
- CRA-W, and Idele, (2021). Fiche F4 Pâturage et robot de traite. 2. Fiches techniques sur l'autonomie protéique. Projet AUTOPROT.
- Cutticelli E., Delaby L., Edouard N., and Faverdin P., (2013). "Rôle de l'équilibre en azote dégradable et de l'alimentation protéique individualisée sur l'efficacité d'utilisation de l'azote." *Renc. Rech. Ruminants*, 20 : 53–59.
- Defrance P., Delaby L., and Seuret J. M., (2004). "Mieux connaître la densité de l'herbe pour calculer la croissance, la biomasse d'une parcelle et le stock d'herbe disponible d'une exploitation." *Renc. Rech. Ruminants*, (11) : 291–294.
- Defrance P., Delaby L., and Seuret J. M., (2005). "Herb'Avenir : un outil simple d'aide à la décision pour la gestion du pâturage Herb'Avenir : a simple decision support tool for grazing management." *Renc. Rech. Ruminants*, 12 : 80.
- Delaby L., and Bignon E. (2015). "Pâtur'Plan, nouvel outil dynamique pour anticiper la gestion du pâturage." *Fourrages*, 223 : 249–252.
- Delaby L., Finn J. A., Grange G., and Horan B., (2020). "Pasture-Based Dairy Systems in Temperate Lowlands : Challenges and Opportunities for the Future." *Front. Sustain. Food Syst.*, 4 : 1–13. Frontiers. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.543587>.
- Delaby L., Peyraud J. L., and Faverdin P., (2001). "Pâtur'IN : le pâturage des vaches laitières assisté par ordinateur." *Fourrages*, 167 : 385–398.
- Delaby L., and Peyraud J.-L., (2009). "Valoriser les fourrages de l'exploitation pour produire du lait." *Fourrages*, 198 : 191–210.
- Delagarde R., Caillat H., and Fortin J., (2017). "Herb'Valo, une méthode pour estimer dans chaque parcelle la quantité d'herbe valorisée par les ruminants au pâturage." *Le pâturage au cœur des systèmes d'élevages de demain*, 117–124.
- Dinamica générale, (n.d.) "AgriNIRTM, Analyseurs NIR portables." Consulté le 14 mai, 2021. <https://www.dinamicagenerale.com/fr-www/agrinir.aspx>.
- Duru M., Berge J. E., Delaby L., Justes E., Theau J. P., and Viégas J., (2007). "A spreadsheet model for developing field indicators and grazing management tools to meet environmental and production targets for dairy farms." *Journal of Environmental Management*, 82 (2) : 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.12.014>.
- Duru M., Cruz P., Jouany C., and Theau J. P., (2010). "Herb'type@ : un nouvel outil pour évaluer les services de production fournis par les prairies permanentes." *INRA Prod. Anim.*, 23 (4) : 319–332. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2010.23.4.3311>.
- Eastwood C. R., and Kenny S., (2009). "Art or science ? Heuristic versus data driven grazing management on dairy farms." *Extension Farming Systems Journal*, 5 (1) : 95–102.
- Faverdin P., Allain C., Guatteo R., Hostiou N., and Veissier I., (2020). "Élevage de précision : De nouvelles informations utiles pour la décision ?" *INRA Prod. Anim.*, 33 (4) : 223–234. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.4.4585>.
- Faverdin P., Baratte C., Perbost R., Thomas S., Ramat E., and Peyraud J. L., (2013). *Application Web CowNex : Guide Utilisateur*. 24.
- French P., O'Brien B., and Shalloo L., (2015). "Development and adoption of new technologies to increase the efficiency and sustainability of pasture-based systems." *Anim. Prod. Sci.*, 55 (7) : 931. <https://doi.org/10.1071/AN14896>.
- Goutiers V., Charron M.-H., Deo M., and Hazard L., (2016). "Capflor@ : un outil pour concevoir des mélanges de prairies à flore variée." *Fourrages*, 228 : 243–252.
- Hanrahan L., Geoghegan A., O'Donovan M., Griffith V., Ruelle E., Wallace M., and Shalloo L., (2017). "PastureBase Ireland : A grassland decision support system and national database." *Computers and Electronics in Agriculture*, 136 : 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.029>.
- Hansen B. G., Stokstad G., Hegrenes A., and Sehested E. (2005). "Key Performance Indicators on Dairy Farms." *Journal of International Farm Management*, 3 (1) : 1–16.
- INRAe, (n.d.) "Systool Web 1.2." Consulté le 12 octobre, 2022. <http://www.systool.fr/login.php>.
- Jacquot A.-L. M., (2012). "Dynamilk : un simulateur pour étudier les compromis entre performances animales, utilisation des ressources herbagères et recherche d'autonomie alimentaire dans les systèmes bovins laitiers de montagne." Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- John Deere, (n.d.) "HarvestLab 3000 | Technologie agricole de précision | John Deere FR." Accessed May 14, 2021. <https://www.deere.fr/fr/solutions-de-gestion-agricole/solutions-d%E2%80%99agriculture-de-pr%C3%A9cision/harvestlab-3000/>.
- Kohnen H., (2009). "L'Abaque pâturage : un outil pour déterminer et optimiser la quantité d'herbe pâturée à partir de la production laitière et de la complémentation." *Fourrages*, 199 : 393–396.
- Le Gal P.-Y., Bernard J., and Moulin C.-H., (2013). "Supporting strategic thinking of smallholder dairy farmers using a whole farm simulation tool." *Trop Anim Health Prod*, 45 (5) : 1119–1129. <https://doi.org/10.1007/s11250-012-0335-6>.
- Leborgne A., Gaudillière N., Delaby L., Pavie J., and Pierre P., (2022). "HappyGrass, a unique set of applications to manage grazing and meadows from sowing to harvest." *Proceedings of the 29th General Meeting of the European Grassland Federation*, 820–822. Caen, France: Wageningen Academic Publishers.
- Lecomte S., Chouteau A., and Lescoat P., (2021). "Les jeux sérieux en élevage, un nouveau moyen de transfert de connaissances ?" *Journées AAFP - Prairies et Fourrages 2.0*, 83–87.
- Little J. D. C., (1970). "Models and Managers: The Concept of a Decision Calculus." *Management Science*, 16 (8): B-466. INFORMS. <https://doi.org/10.1287/mnsc.16.8.B466>.
- Martin G., Felten B., and Duru M., (2011). "Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems." *Environmental Modelling & Software*, 26 (12): 1442–1453. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.08.013>.
- Meinke H., Baethgen W. E., Carberry P. S., Donatelli M., Hammer G. L., Selvaraju R., and Stockle C. O., (2001). "Increasing profits and reducing risks in crop production using participatory systems simulation approaches." *Agricultural Systems*, 70 (2–3): 493–513.
- Michaud A., Havet A., and Mathieu A., (2008). "Reverting to grazing: farmers' conceptions." *Biodiversity and animal feed: future challenges for grassland production*, Grassland science in Europe, European Grassland Federation, A. Hopkins, European Grassland Federation, and Sveriges lantbruksuniversitet, eds., 828–830. Uppsala, Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences (SLU).
- Moeckel T., Safari H., Reddersen B., Fricke T., and Wachendorf M., (2017). "Fusion of Ultrasonic and Spectral Sensor Data for Improving the Estimation of Biomass in Grasslands with Heterogeneous Sward Structure." *Remote Sensing*, 9 (1): 98. <https://doi.org/10.3390/rs9010098>.
- Nickmilder C., Tedde A., Dufrasne I., Lessire F., Tychon B., Curnel Y., Bindelle J., and Soyeurt H., (2021). "Development of Machine Learning Models to Predict Compressed Sward Height in Walloon Pastures Based on Sentinel-1, Sentinel-2 and Meteorological Data Using Multiple Data Transformations." *Remote Sensing*, 13 (3): 408. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/rs13030408>.
- Nousiainen J., Shingfield K. J., and Huhtanen P., (2004). "Evaluation of Milk Urea Nitrogen as a Diagnostic of Protein Feeding." *Journal of Dairy Science*, 87 (2): 386–398. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73178-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73178-1).
- Palazon R., and Moreau J.-C., (2020). "Le bilan fourrager : un outil pour anticiper." *idele.fr*. Accessed June 17, 2020. http://idele.fr/no_cache/recherche/publication/idelesolr/recommends/e-bilan-fourrager-un-outil-pour-anticiper-1.html.
- Paturevision, (n.d.). "Logiciel de cartographie." Consulté le 1 avril, 2021. <https://paturevision.fr/content/6-logiciel-de-cartographie>.
- PHF, (2020). "Illicow ! | Prim'Holstein France." Consulté le 13 octobre, 2021. <https://primholstein.com/2020/illicow/>.
- Piquet M., Frappat B., Gin P., Morel K., Sautier M., Duru M., Moreau J.-C., and Martin G., (2013). "S'adapter ensemble (éleveurs, conseillers, chercheurs) au changement climatique : enjeux et exemple du Rami fourrager." *Fourrages*, 215 (247–256): 12.
- Plant R. E., and Stone N. D., (1991). "Knowledge-based systems in agriculture". New York : McGraw-Hill, Inc.

- Van den Pol-van Dasselaar A., Blokland P. W., Gies T. J. A., de Haan M. H. A., Holshof G., Naeff H.S. D., and Philippsen A. P., (2015). "Beweidbare oppervlakte en weidegang op melkveebedrijven in Nederland." *Livestock Research Report*, 57. Wageningen UR Livestock Research.
- PROTECT'eau, (n.d.). "Module cipan | PROTECT'eau." Consulté le 12 octobre, 2022a. <https://www.protecteau.be/fr/cipan>.
- PROTECT'eau, (n.d.). "Module ferti prairie | PROTECT'eau." Consulté le 12 octobre, 2022b. <https://www.protecteau.be/fr/ferti-prairie>.
- Punalekar S. M., Verhoef A., Quaife T. L., Humphries D., Bermingham L., and Reynolds C. K., (2018). "Application of Sentinel-2A data for pasture biomass monitoring using a physically based radiative transfer model." *Remote Sensing of Environment*, 218: 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.028>.
- Riaboff L., Couvreur S., Madouasse A., Roig-Pons M., Aubin S., Massabie P., Chauvin A., Bédère N., and Plantier G., (2020). "Use of Predicted Behavior from Accelerometer Data Combined with GPS Data to Explore the Relationship between Dairy Cow Behavior and Pasture Characteristics." *Sensors*, 20 (17): 4741. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/s20174741>.
- Rose D. C., Sutherland W. J., Parker C., Lobley M., Winter M., Morris C., Twining S., Ffoulkes C., Amano T., and Dicks L. V., (2016). "Decision support tools for agriculture : Towards effective design and delivery." *Agricultural Systems*, 149 : 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.009>.
- Rutten C. J., Velthuis A. G. J., Steeneveld W., and Hogeveen H., (2013). "Invited review: Sensors to support health management on dairy farms." *Journal of Dairy Science*, 96 (4) : 1928–1952. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6107>.
- Sauvant D., and Peyraud J. L., (2010). "Calculs de ration et évaluation du risque d'acidose." *INRAE Productions Animales*, 23 (4): 333–342. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2010.23.4.3312>.
- Semae, (n.d.). "Introduction au diagnostic de prairie." *GNIS Pédagogie*. Consulté le 1 avril, 2021a. <https://www.gnis-pedagogie.org/sujet/diagnostic-prairie-presentation/>.
- Semae, (n.d.). "Le calculateur pour mélanges prairiaux." Consulté le 12 octobre, 2022b. <https://le-calculateur.herbe-actifs.org>.
- Seuret J. M., Defrance P., and Delaby L., (2007). "Herb'Evol: un outil d'enregistrement et d'aide à la décision pour la gestion du pâturage." *Renc. Rech. Ruminants*, 14 : 431.
- Shalloo L., O' Donovan M., Leso L., Werner J., Ruelle E., Geoghegan A., Delaby L., and O'Leary N., (2018). "Review: Grass-based dairy systems, data and precision technologies." *Animal*, 12 (s2): s262–s271. <https://doi.org/10.1017/S175173111800246X>.
- Theau J. P., Cruz P., Fallour D., Jouany C., Lecloux E., and Duru M., (2010). "Une méthode simplifiée de relevé botanique pour une caractérisation agronomique des prairies permanentes." *Fourrages*, 201: 19–25.
- Turner L., Irvine L., and Kilpatrick S., (2020). "Incorporating data into grazing management decisions: supporting farmer learning." *Anim. Prod. Sci.*, 60 (1): 138–142. CSIRO PUBLISHING. <https://doi.org/10.1071/AN18533>.
- Wachendorf M., Fricke T., and Möckel T., (2018). "Remote sensing as a tool to assess botanical composition, structure, quantity and quality of temperate grasslands." *Grass and Forage Science*, 73 (1): 1–14. <https://doi.org/10.1111/gfs.12312>.
- Wilkinson J. M., (2011). "Re-defining efficiency of feed use by livestock." *Animal*, 5 (7): 1014–1022. <https://doi.org/10.1017/S175173111100005X>.