

Quels outils pour évaluer des systèmes fourragers adaptés au changement climatique ?

M. Carof^{1, 2, 3}, M. Marie^{4, 5}, J. Pavie⁶

1 : AGROCAMPUS OUEST, UMR1069, Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, F-35000 Rennes ;
matthieu.carof@agrocampus-ouest.fr

2 : INRA, UMR1069, Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, F-35000 Rennes

3 : Université Européenne de Bretagne

4 : Université de Lorraine, ENSAIA, F-54500 Vandœuvre-lès-Nancy

5 : INRA, UR55, Agrosystèmes Territoires Ressources, F-88500 Mirecourt

6 : Institut de l'Élevage, F-14053 Caen

Résumé

Les perturbations du climat, actuelles et futures, sont l'un des moteurs du changement des pratiques agricoles. En exploitation d'élevage, ces perturbations peuvent inviter les éleveurs, seuls ou accompagnés, à imaginer de nouveaux systèmes fourragers, localement adaptés à leurs besoins. La conception de nouveaux systèmes s'accompagne d'une phase d'évaluation pour juger de leur pertinence vis-à-vis de différents critères pouvant appartenir à une ou plusieurs dimensions de la durabilité. L'utilisation d'outils pour réaliser cette évaluation est courante pour les scientifiques et les conseillers ; la difficulté réside dans le choix de l'outil à mobiliser. Les auteurs de cet acte utilisent un guide récent (CAROF *et al.*, 2013) pour établir, sur la base de caractéristiques simples (type de système à évaluer, dimensions de la durabilité évaluées, utilisateurs-cibles de l'outil, *etc.*), les outils capables d'évaluer sur de nombreux critères les systèmes fourragers adaptés au changement climatique. Une liste d'outils est proposée et deux d'entre eux (EDEN, MCASTER) sont présentés à titre d'illustration.

Introduction : les systèmes fourragers et le changement climatique

Le système fourrager est le système de pilotage d'une exploitation d'élevage qui assure la correspondance entre les besoins des animaux (ces derniers étant constitutifs du système d'élevage) et l'offre en paille, fourrages, *etc.* (ces derniers étant constitutifs du système de culture) ; il met en relation le système d'élevage et le système de culture (VIGNAU-LOUSTAU et HUYGHE, 2008). Élément décisionnel du système de production, sa modification implique de modifier le(s) système(s) de culture de l'exploitation, le(s) système(s) d'élevage et les relations entre ces ensembles.

En accord avec la définition précédente, **la réussite d'un système fourrager résulte de l'atteinte et du maintien d'un équilibre subtil entre besoins des animaux et offre**. Si la finalité est facile à saisir – une allocation de ressources optimale avec les besoins des animaux –, la mise au point d'un système fourrager efficient reste un exercice délicat qui, au cours du temps, a eu tendance à se complexifier par addition de nouvelles contraintes. On peut évoquer ainsi certaines attentes sociétales nouvelles, la variabilité des conjonctures économiques et bien sûr les conséquences du changement climatique.

L'adaptation à cette dernière contrainte est l'un des enjeux majeurs de l'élevage de demain. Ainsi, l'augmentation de la fréquence et de l'ampleur des aléas climatiques impose dès maintenant une réflexion sur la sécurisation, la flexibilité et la résilience des systèmes fourragers. C'est avant tout un enjeu technique sur lequel repose la pérennité de nombreuses exploitations, déjà exposées aujourd'hui. À plus long terme, les modifications climatiques conduiront inévitablement à une adaptation (i) des pratiques agronomiques et zootechniques, (ii) des modes d'exploitation des prairies et (iii) des choix cultureux ; **ces modifications climatiques remettront profondément en cause les systèmes fourragers aujourd'hui connus**. Par exemple, l'avancement de la pousse de l'herbe en saison ou l'accentuation de sécheresses estivales auront des réponses diverses selon les éleveurs : renforcement du pâturage pour les uns, développement de la part du maïs pour les autres. Selon les cas, les impacts environnementaux sur la gestion de l'eau, le stockage du carbone, la consommation d'énergie, le cycle de l'azote, *etc.* seront très différents. Il en est de même pour les impacts économiques, peut-être également pour les impacts sociaux.

Les éleveurs seront les acteurs principaux de la construction de ces nouveaux systèmes fourragers adaptés au changement climatique. Tout en proposant des adaptations de leur système fourrager qui empêcheront le changement climatique de rompre l'équilibre entre besoins et offre, les éleveurs seront invités à réduire leur empreinte environnementale et à conserver des exploitations rentables, viables et vivables. Ces objectifs risquent parfois d'être difficiles à concilier ; il convient donc d'être en mesure de rechercher des solutions par une approche pluridisciplinaire (agronomie, zootechnie, *etc.*) et multicritère.

Les auteurs du présent acte souhaitent (i) présenter le cadre général qui conduit à la proposition de nouveaux systèmes fourragers, (ii) définir l'évaluation et signaler l'existence d'une grille d'analyse pour choisir un outil d'évaluation parmi d'autres, (iii) lister, sur la base de synthèses récentes, des outils permettant de mettre en œuvre une évaluation et (iv) présenter deux exemples d'outils d'évaluation. L'objectif est de **donner au lecteur une aide pour choisir des outils d'évaluation et un aperçu de ceux existants**.

1. La conception de nouveaux systèmes fourragers

– Les modifications à apporter aux systèmes fourragers

Comme indiqué précédemment, l'impact du changement climatique sur les systèmes fourragers invite les éleveurs à en imaginer de nouveaux qui soient à la fois **plus résilients** (c'est-à-dire capables de retrouver un fonctionnement « normal » après des fluctuations climatiques d'importance) et **plus robustes** (c'est-à-dire capables, d'année en année, de performances égales même dans un environnement climatique perturbé) (LOPEZ-RIDAURA *et al.*, 2005). En même temps, ces nouveaux systèmes devront **contribuer le moins possible au changement climatique et assurer la durabilité de l'exploitation**.

Les modifications du système fourrager pourront concerner plusieurs de ses caractéristiques. Par exemple, LEMAIRE *et al.* (2006) et MOREAU (2009) proposent des pistes potentiellement innovantes : la substitution du maïs par le sorgho grain ou des céréales immatures ensilées, l'extension de la période de pâturage, le choix de variétés adaptées au changement climatique ou bien encore l'introduction d'une plus grande diversité floristique dans les prairies. Bien évidemment, ces propositions de modification devront s'établir dans le respect de la cohérence globale des systèmes en évolution.

– La démarche de conception

Pour une exploitation donnée, ou un groupe d'exploitations similaires, la conception d'un nouveau système fourrager s'inscrit dans une démarche globale incluant quatre étapes (Figure 1), que l'on soit dans une démarche de recherche ou dans une démarche d'accompagnement au changement. MEYNARD (2008) précise que cette démarche générique comprend en fait deux familles : l'une qualifiée de « boucle de progrès », où l'on cherche à améliorer pas-à-pas les systèmes existants afin qu'ils s'adaptent à de nouveaux objectifs et l'autre dite de « conception *de novo* », où l'on s'affranchit de l'existant pour construire des systèmes en rupture.

1. Définition des objectifs assignés au SF
Définition des contraintes qui s'exerce(ro)nt sur le SF
↓ ↑
2. Conception de SF compatibles avec les contraintes
identifiées et capables d'atteindre les objectifs attendus
↓ ↑
3. Évaluation des nouveaux SF conçus
↓ ↑
4. Test et diffusion des SF les plus intéressants aux
acteurs concernés

FIGURE 1 – Le cadre théorique pour la conception de nouveaux systèmes fourragers (SF) comprend quatre étapes dépendantes les unes des autres (adapté de VEREIJKEN, 1997 ; LOYCE et WÉRY, 2006).

L'étape 1 implique souvent un diagnostic du système existant pour identifier les problèmes actuels et le cadre de contraintes dans lequel les alternatives au système en place seront conçues. Ces contraintes peuvent être, par exemple, la surface exploitable, l'accès aux crédits ou, en ce qui concerne le changement climatique, la répartition annuelle des précipitations.

La génération de systèmes fourragers alternatifs à l'existant (étape 2) peut se faire en utilisant différentes méthodes comme le prototypage ou la modélisation. Cette dernière méthode est particulièrement intéressante parce que les modèles permettent d'explorer des situations non permises par l'expérimentation et élargissent le « champ des possibles ». À titre d'exemple, COLENO et DURU (1999) proposent un modèle pour mettre au point et tester des règles de décision relatives au pâturage tournant. D'autres méthodes ont été présentées pendant ces Journées et les auteurs renvoient le lecteur aux articles correspondants.

Au cours de l'étape 3, les résultats de l'évaluation sont interprétés par les concepteurs afin que ces derniers sélectionnent le(s) système(s) fourrager(s) alternatif(s) le(s) plus prometteur(s). Les éléments constitutifs de ces nouveaux systèmes fourragers pourront ensuite être testés en station expérimentale et/ou chez des agriculteurs (étape 4). Cette étape d'évaluation fournit également des informations précieuses aux acteurs des filières agricoles – au premier rang desquelles, les agriculteurs – sur les avantages mais également les limites de ces nouveaux systèmes. À noter qu'une évaluation conduisant à « mal » noter les nouveaux systèmes proposés peut renvoyer à une nouvelle étape de conception, en se focalisant sur les composantes du système responsables de cette « mauvaise » évaluation.

La recherche participative facilite la réalisation des différentes étapes puisque les acteurs sont directement impliqués dans le processus global de conception (par ex. GOUTTENOIRE *et al.*, 2012). Le jeu du Rami fourrager, mis au point par MARTIN *et al.* (2011, 2012) est un exemple de démarche de conception associant l'expertise d'éleveurs et la modélisation.

2. Les caractéristiques générales des outils d'évaluation

– Une définition de l'évaluation et des termes s'y rapportant

Évaluer un système agricole consiste en fait à quantifier un (ou plusieurs) indicateur(s) afin de déterminer le degré de maîtrise d'un (ou plusieurs) critère(s). Un indicateur est une variable que l'on peut mesurer, simuler ou expertiser et qui renseigne sur l'état d'un critère ; ce dernier est un caractère, principe, élément auquel on se réfère pour juger le système évalué. Par exemple, la teneur en nitrate dans le sol pendant la période d'interculture peut être un indicateur d'un critère « impact du système sur la qualité de l'eau » ; la quantité de gaz à effet de serre émis par un système peut être un indicateur d'un critère « contribution du système au réchauffement climatique ».

– Six caractéristiques pour choisir un outil d'évaluation

Pour réaliser l'évaluation de nouveaux systèmes agricoles, plusieurs outils ont été développés ces dernières années et les synthèses sur le sujet sont nombreuses (par ex. HALBERG *et al.*, 2005 ; LE GAL *et al.*, 2011). En complément de celles-ci, CAROF *et al.* (2013) proposent un guide, simple, pour aider une personne impliquée dans une démarche de conception à distinguer puis choisir un outil d'évaluation sur la base de six caractéristiques, rappelées dans le Tableau 1. Sur le même thème, les travaux de LEBACQ *et al.* (2012) sont également à mentionner.

TABLEAU 1 – Les outils d'évaluation se distinguent, dans un premier temps, selon six caractéristiques facilement accessibles (d'après CAROF *et al.*, 2013).

Caractéristique de l'outil	Description
Type de système évalué	Un outil évalue un type de système, défini initialement par ses créateurs. Classiquement, il s'agit du système de culture, du système d'élevage ou du système de production.
Échelles spatio-temporelles de l'évaluation	Le type de système à évaluer et la nature des indicateurs utilisés pour l'évaluation déterminent les échelles auxquelles le système est évalué.
Dimensions évaluées de la durabilité et critères associés	Un outil privilégie une, deux ou trois dimensions de la durabilité pour évaluer un système : économique, environnementale, sociale. Chaque dimension peut être appréciée au travers d'un seul critère ou de plusieurs.
Utilisateurs pouvant utiliser l'outil	Pour un outil donné, la nature des critères et des indicateurs, la possibilité de définir des priorités entre les dimensions évaluées de la durabilité et le type d'informations en sortie de l'évaluation restreignent le panel d'utilisateurs pouvant utiliser l'outil (par ex. des scientifiques, des conseillers agricoles, des agriculteurs).
Type d'information en sortie de l'évaluation	La qualité des supports visuels en sortie de l'évaluation (par ex. des graphiques synthétiques en radar) facilite la comparaison des systèmes alternatifs, leur classement ou la sélection du meilleur.
Capacité à générer des systèmes alternatifs	L'outil est-il capable de générer des systèmes alternatifs à l'existant ou faut-il avoir recours à un autre outil pour l'étape de conception ?

Appliqué à l'évaluation de systèmes fourragers adaptés au changement climatique, le guide peut être pré-rempli de la manière suivante (Figure 2). Bien évidemment, un certain nombre de questions restent posées : seule la personne (ou le collectif de personnes) impliquée dans une réelle démarche de conception pourra y répondre.

Certains points du guide appliqué à la sélection d'un outil pour évaluer les systèmes fourragers adaptés au changement climatique méritent un commentaire :

- L'outil recherché doit évaluer le système fourrager, c'est-à-dire (i) les conséquences économiques et/ou environnementales et/ou sociales des actes techniques mis en œuvre au champ et sur les animaux et (ii) l'équilibre entre besoins des animaux et offre en paille, fourrages, *etc.* Cependant, comme le lecteur pourra s'en rendre compte au chapitre suivant, peu d'outils s'intéressent à ce type de

système. Beaucoup d'outils évaluent le système de production, qui certes inclut le système fourrager mais peut également inclure d'autres aspects d'une exploitation non liés au système fourrager ; dans ce cas, l'évaluation ne porterait pas que sur le système fourrager. D'autres outils évaluent soit le système de culture, soit le système d'élevage mais pas directement le lien entre ces deux ensembles.

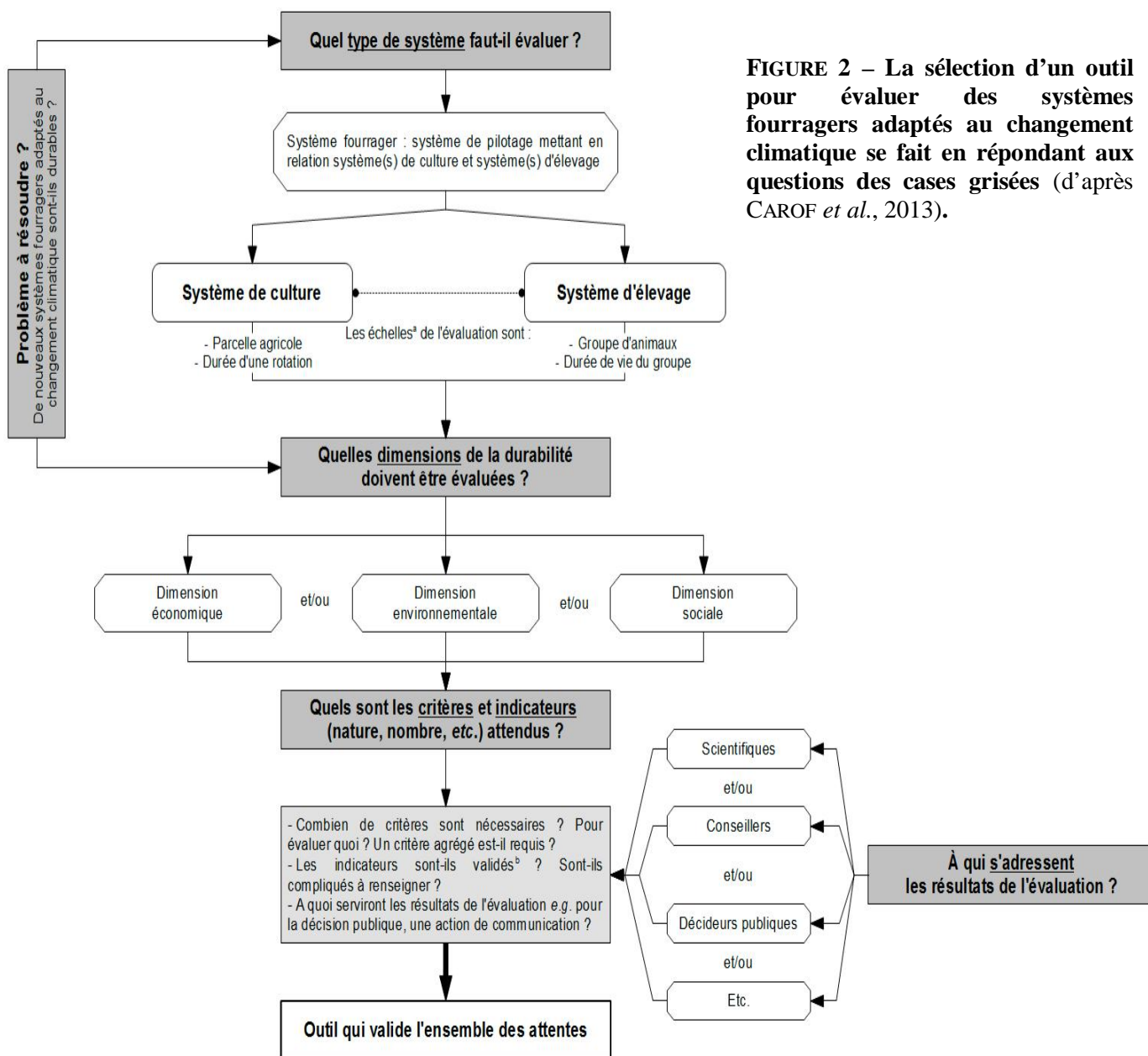


FIGURE 2 – La sélection d'un outil pour évaluer des systèmes fourragers adaptés au changement climatique se fait en répondant aux questions des cases grisées (d'après CAROF *et al.*, 2013).

^aLe type de système évalué détermine les échelles de l'évaluation mais cette limitation peut être dépassée en fonction des indicateurs utilisés dans l'outil

^bPour la définition du concept de "validation" des indicateurs, cf. Bockstaller et Girardin (2003)

- Le choix des critères et indicateurs retenus pour l'évaluation de nouveaux systèmes fourragers est à la discrétion des personnes impliquées dans la démarche de conception. Toutefois, il semble important que des critères concernant la contribution des systèmes fourragers au changement climatique soient présents afin d'éviter de concevoir de nouveaux systèmes fourragers adaptés à ce changement qui seraient eux-mêmes plus émetteurs de gaz à effet de serre que les systèmes actuels !

- Dans le guide, trois dimensions sont mises en avant, correspondant à une définition généralement admise de la durabilité (VON WIREN-LEHR, 2011). Certains auteurs considèrent également une dimension « technique » (par ex. COLOMB *et al.*, 2012) pour évaluer la productivité des systèmes ainsi que la pérennité de leur capacité de production.

3. Les outils d'évaluation

Les outils d'évaluation des systèmes agricoles sont régulièrement référencés par les scientifiques (par ex. VAN DER WERF et PETIT, 2002 ; HALBERG *et al.*, 2005 ; BOCKSTALLER *et al.*, 2009 ; LE GAL *et al.*, 2011 ; CAROF *et al.*, 2013). Le Tableau 2 ci-dessous ne se veut pas exhaustif mais est une information volontairement partielle des outils multicritères existants, présentés dans les différents articles cités précédemment. Pour ne pas alourdir le référencement bibliographique de cet acte, le lecteur consultera les synthèses mentionnées auparavant pour trouver – sauf exception précisée dans le tableau – l'article décrivant tel ou tel outil. Notez que certains de ces outils n'évaluent que très partiellement l'impact du système étudié sur le changement climatique (par ex. DIALECTE, IDEA).

TABLEAU 2 – Les trois caractéristiques – type de système évalué, utilisateurs-cibles et dimensions évaluées – permettent de faire un premier tri dans une liste non exhaustive des outils d'évaluation actuels.

Nom de l'outil	Type de système évalué	Utilisateur-cible ⁽¹⁾				Dimensions évaluées ⁽²⁾		
		A	C	S	Au.	Éco.	Env.	Soc.
DIALECTE	Système de production	(x)	x				x	
EDEN	Système de production		x	x		x	x	x
IDEA	Système de production	x	x		x	x	x	x
INDIGO	Système de culture	(x)	x	x			x	
MASC	Système de culture	(x)	x	x		x	x	x
MCASTER ⁽³⁾	Système de production			x		x	x	x
MEACROS	Système de culture	(x)	x	x	x	x	x	x
MODAM	Système de production	(x)		x	x	x	x	
MOTIFS ⁽⁴⁾	Système de production	x				x	x	x

1 : A : Agriculteur ; C : Conseiller ; S : Scientifique ; Au. : Autre (décideur public, étudiant, *etc.*)

Une croix entre parenthèses (x) signifie que les agriculteurs peuvent être l'une des cibles de l'outil mais que sa complexité d'utilisation peut nécessiter une tierce personne.

2 : Éco. : économique ; Env. : Environnementale ; Soc. : Sociale

3 : MARIE et BACCHIN (2011) ; MARIE et MERCHIER (2012)

4 : MEUL *et al.* (2008)

Cette liste ne contient pas des outils se limitant à une dimension et à un seul critère ; par exemple, l'outil Dia'terre (ex-PLANETE) n'est pas présent parce que l'évaluation est une analyse énergétique du système de production (consommations énergétiques, émissions de gaz à effet de serre). Il en est de même pour les outils s'appuyant sur le concept d'« émergie » (par ex. BASTIANONI *et al.*, 2001) ; l'émergie d'une ressource ou d'un produit est « définie en convertissant toutes les ressources (matières premières) et les entrées d'énergie sous la forme de leurs équivalents énergétiques solaires (solar energy unit, seJ) » (AMPONSAH, 2011).

4. Deux exemples d'outils d'évaluation

Pour concrétiser les outils d'évaluation, les auteurs du présent acte ont choisi d'en présenter deux exemples sur la base de travaux réalisés dans leur unité de recherche (UMR SAS, UR ASTER).

– L'outil EDEN : l'analyse de cycle de vie pour évaluer la durabilité d'exploitations agricoles

Développé par VAN DER WERF *et al.* (2009), EDEN est un outil basé sur le cadre conceptuel de l'analyse de cycle de vie (ACV) ; il sert à évaluer la durabilité d'exploitations d'élevage laitier, en associant les indicateurs d'impact environnemental de l'ACV à des indicateurs de performances économique et sociale. Dans cette analyse « du berceau à la sortie de la ferme », le système évalué est l'exploitation agricole et son amont (la production des intrants) ; les produits ne sont plus inclus dans le système dès lors qu'ils quittent l'exploitation (vente, transfert d'effluents, *etc.*).

Les indicateurs environnementaux qualifient les impacts « directs » (affectant le territoire de l'exploitation) et « indirects » (associés à la production, en amont, des intrants utilisés sur l'exploitation) du système évalué ; les résultats sont exprimés par 1 000 kg de lait corrigé en matière grasse et en protéines et par ha de surface utilisée. Les indicateurs renseignent sur l'eutrophisation (en kg équivalent PO₄), l'acidification (en kg équivalent SO₂), le changement climatique (en kg équivalent CO₂), la toxicité terrestre (en kg équivalent 1-4 DCB), l'utilisation d'énergie non renouvelable (en MJ) et l'occupation de terre (en ha/an). Les indicateurs économiques informent, par exemple, sur la viabilité économique, le taux de spécialisation ou la sensibilité aux aides ; les indicateurs sociaux relatent la qualité de vie, la contribution à l'emploi, l'implication sociale et l'intensité du travail.

Le Tableau 3 ci-dessous regroupe les indicateurs environnementaux d'EDEN appliqué à une exploitation laitière d'Ille-et-Vilaine dans laquelle le système fourrager a été modifié afin de s'adapter au changement climatique (allongement de la période de pâturage et réduction de la durée de pâturage en été). L'exemple a une portée pédagogique uniquement (un certain nombre de cohérences systémiques seraient à vérifier avant de faire l'analyse approfondie de cet exemple) et le lecteur notera que le système testé ici n'améliore pas les impacts environnementaux par rapport au système actuel.

TABLEAU 3 – EDEN permet de comparer les évolutions d'un système d'exploitation (système actuel vs. système prenant en compte les conséquences du changement climatique) **en évaluant leurs impacts potentiels totaux sur l'environnement, l'économie et le social** (VAN DER WERF *et al.*, 2009). Seuls certains indicateurs d'impact environnemental sont présentés ici. Les impacts potentiels sont exprimés pour 1 000 kg de lait corrigé en matière grasse et en protéines.

Impact potentiel ⁽¹⁾	Système actuel	Système testé
Eutrophisation	5,8	6,9
Acidification	10,1	10,3
Changement climatique	1 250	1 270
Utilisation d'énergie non renouvelable	4 248	4 284

1 : Eutrophisation (en kg équivalent PO₄) ; Acidification (en kg équivalent SO₂) ;
Changement climatique (en kg équivalent CO₂) ; Utilisation d'énergie non renouvelable (en MJ)

– L'outil MCASTER : l'agrégation multicritère pour évaluer la durabilité de systèmes de production

MCASTER (MARIE et BACCHIN, 2011 ; MARIE et MERCHIER, 2012) est un outil d'évaluation multicritère de systèmes de production avec élevage, implémenté dans le logiciel d'aide à la décision DEXi (BOHANEK, 2012). Trente-cinq critères basiques appartenant aux dimensions économique, environnementale et sociale de la durabilité sont décrits par une valeur quantitative, variant de 0 à 10, établie grâce à des indicateurs construits à partir (i) de pratiques¹, qui correspondent à des pressions exercées sur le système et (ii) de mesures directes, qui évaluent l'état actuel du système. Les critères sont organisés selon une arborescence hiérarchique, ce qui permet une association des critères basiques en critères agrégés jusqu'à un critère d'évaluation unique pour chacune des trois dimensions de la durabilité.

Cet outil explore l'impact sur les ressources abiotiques par douze indicateurs concernant :

- les risques de pollution de l'eau (émission de produits phytosanitaires dans les eaux profondes et de surface, pertes de nitrates et de phosphore) ;
- les risques de pollution de l'air (émission de produits phytosanitaires, NH₃, gaz à effet de serre : N₂O, CH₄, CO₂) ;
- la qualité du sol (teneur en matières organiques, disponibilité du phosphore) ;
- la consommation d'énergie.

¹ Certains indicateurs de pratiques dérivent de la méthode INDIGO (BOCKSTALLER *et al.*, 1997).

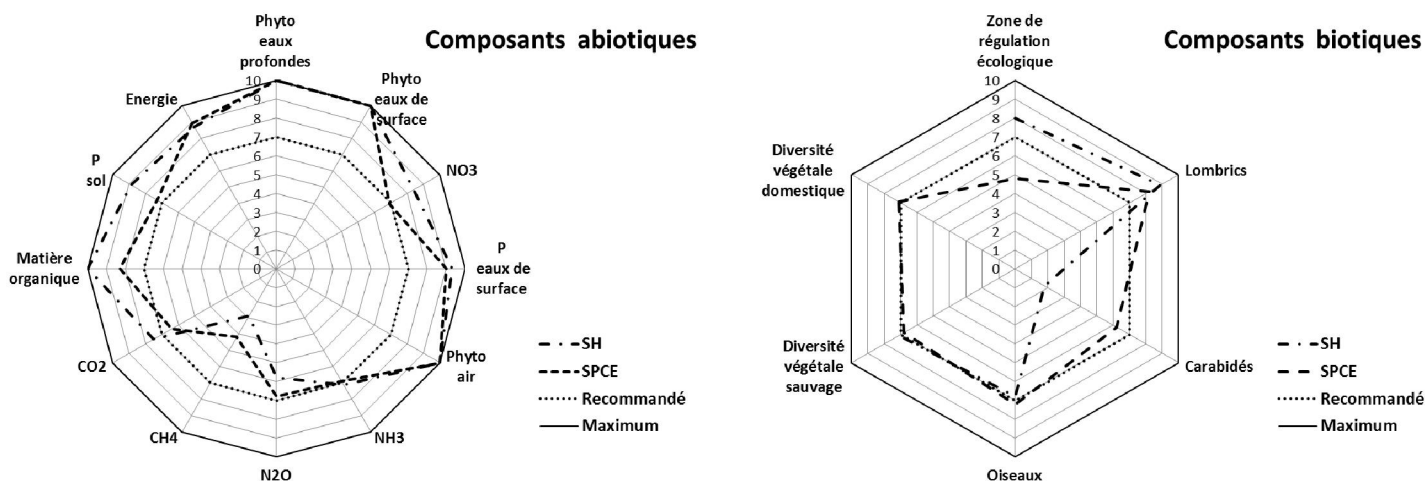
L'outil explore également l'impact sur les ressources biotiques par sept indicateurs concernant :

- les habitats (zones de régulation écologiques, diversité des cultures) ;
- la fertilité du sol (densité des lombrics) ;
- le contrôle biologique des ravageurs (carabidés, faune aviaire) ;
- la diversité végétale sauvage et domestique.

Les aspects sociétaux (six indicateurs : circuits courts, qualité des produits, gestion du paysage, gestion du bâti, services rendus, participation à l'emploi), sociaux (quatre indicateurs : pénibilité du travail, hygiène et sécurité au travail, implications sociales et autonomie décisionnelle) et économiques (six indicateurs empruntés à la méthode IDEA : viabilité économique, spécialisation économique, autonomie financière, sensibilité aux aides, transmissibilité économique, efficacité) sont aussi pris en compte.

Un exemple de sa mise en œuvre sur un système agricole bovin laitier herbager (SH : 37 vaches et 80 ha de prairies permanentes) et un système en polyculture - élevage bovin laitier (SPCE : 60 vaches, 105 ha de cultures de rente, fourragères et de prairies temporaires et 50 ha de prairies permanentes) est présenté sur la Figure 3 en ce qui concerne les aspects environnementaux.

FIGURE 3 – L'outil MCASTER permet, par exemple, de comparer sur différents critères environnementaux un système bovin laitier herbager (SH) et un système polyculture-élevage bovin laitier (SPCE) (MARIE et BACCHIN, 2011 ; MARIE et MERCHIER, 2012).



Ces résultats prennent en compte de manière globale le système de production mais il reste possible, à un niveau d'agrégation inférieur, d'identifier la part revenant au système d'élevage et au système de culture ou même aux seules cultures fourragères ; il est donc possible de se centrer plus particulièrement sur le système fourrager. L'outil permet de caractériser les liens entre changement climatique et performances du système en termes de durabilité.

Dans le cas présenté, l'influence des cultures et des modes cultureux sur la production de gaz à effet de serre peuvent être mis en évidence (ainsi, les émissions de protoxyde d'azote sont plus fortes dans les prairies – permanentes ou temporaires – de graminées que dans les prairies temporaires d'association luzerne - dactyle tandis que les cultures céréalières sont moins émettrices).

Conclusion

L'évaluation de systèmes fourragers adaptés au changement climatique doit permettre non seulement de s'assurer que l'équilibre entre les besoins des animaux et les ressources fournies par le(s) système(s) de culture perdure mais également d'apprécier les autres conséquences – économiques, environnementales et sociales – que des adaptations des systèmes fourragers engendreront. L'évaluation de nouveaux systèmes fourragers doit donc être multidimensionnelle et multicritère.

Pour faciliter cela, il existe de nombreux outils d'évaluation ; une liste, non exhaustive, a été présentée dans cet acte. L'utilisateur impliqué dans un processus de conception pourrait aussi s'affranchir de cette liste en faisant lui-même une sélection d'indicateurs individuels qu'il jugerait pertinents (cf. le guide de sélection proposé par LEBACQ *et al.*, 2012). En tous les cas, le choix d'un outil est une étape cruciale pour la réussite du processus de conception ; un guide récent permettant de clarifier ce choix a été signalé.

Le lecteur aura noté, enfin, que peu d'outils évaluent spécifiquement le système fourrager tel qu'il a été défini en introduction de cet acte. Les outils s'intéressent souvent au système de production qui englobe le système fourrager mais aussi des caractéristiques de l'exploitation qui en sont éloignées bien que souvent liées ou dépendantes.

Références bibliographiques

- AMPONSAH N. Y. (2011) : *Contribution à la théorie de l'éMergie: application au recyclage*, thèse de doctorat, École des Mines de Nantes, Université Nantes Angers Le Mans (France), 189 p. + annexes.
- BASTIANONI S., MARCHETTINI N., PANZIERI M., TIEZZI E. (2001) : « Sustainability assessment of a farm in the Chianti area (Italy) », *J. Clean. Prod.*, 9, 365–375.
- BOCKSTALLER C., GIRARDIN P. (2003) : « How to validate environmental indicators », *Agric. Syst.*, 76, 639–653.
- BOCKSTALLER C., GIRARDIN P. VAN DER WERF H. M. G. (1997) : « Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems », *Eur. J. Agron.*, 7, 261–270.
- BOCKSTALLER C., GUICHARD L., KEICLINGER O., GIRARDIN P., GALAN M.-B., GAILLARD G. (2009) : « Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review », *Agron. Sustain. Dev.*, 29, 223–235.
- BOHANEC M. (2012) : *DEXi: program for multi-attribute decision making, Version 3.04*, Jozef Stefan Institute, Ljubljana (Slovénie), disponible sur : <http://www-ai.ijs.si/MarkoBohanec/dexi.html>
- CAROF M., COLOMB B., AVELINE A. (2013) : « A guide for choosing the most appropriate method for multi-criteria assessment of agricultural systems according to decision-makers' expectations », *Agr. Syst.*, 115, 51–62.
- COLÉNO F. C., DURU M. (1999) : « A model to find and test decision rules for turnout date and grazing area allocation for a dairy cow system in spring », *Agr. Syst.*, 61, 151–164.
- COLOMB B., CAROF M., AVELINE A., BERGEZ J.-E. (2012) : « Stockless organic farming: strengths and weaknesses evidenced by a multicriteria sustainability assessment model », *Agron. Sustain. Dev.*, doi: 10.1007/s13593-012-0126-5

- GOUTTENOIRE L., COURNUOT S., INGRAND S. (2012) : « Participatory modelling with farmer groups to help them redesign their livestock farming systems », *Agron. Sustain. Dev.*, doi: 10.1007/s13593-012-0112-y
- HALBERG N., VAN DER WERF H. M. G., BASSET-MENS C., DALGAARD R., DE BOER I. J. M. (2005) : « Environmental assessment tools for the evaluation and improvement of European livestock production systems », *Livest. Prod. Sci.*, 96, 33–50.
- LEBACQ T., BARET P. V., STILMANT D. (2012) : « Sustainability indicators for livestock farming. A review », *Agron. Sustain. Dev.*, doi: 10.1007/s13593-012-0121-x
- LE GAL P.-Y., DUGUÉ P., FAURE G., NOVAK S. (2011) : « How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level? A review », *Agr. Syst.*, 104, 714-728.
- LEMAIRE G., DELABY L., FIORELLI J.-L., MICOL D. (2006) : « Systèmes fourragers et élevage » dans AMIGUES J.P., DEBAEKE P., ITIER B., LEMAITRE G., SEGUIN B., TARDIEU F., THOMAS A. (sous la direction de) *Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau*, Paris (France), Expertise scientifique collective INRA, pp. 312–322.
- LOPEZ-RIDAURA S., VAN KEULEN H., VAN ITTERSUM M. K., LEFFELAAR P. A. (2005) : « Multiscale methodological framework to derive criteria and indicators for sustainability evaluation of peasant natural resource management systems », *Environm. Sustain. Dev.*, 7, 51–69.
- LOYCE C., WERY J. (2006) : « Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture » dans DORÉ T., LE BAIL M., MARTIN P., NEY B., ROGER-ESTRADE J. (sous la direction de) *L'agronomie aujourd'hui*, Versailles (France), Synthèses, Éditions Quæ, pp. 77–95.
- MARIE M., BACCHIN M. (2011) : « Crops and fodder for sustainable organic low input dairy systems » dans *Book of the 62nd annual meeting of the European Federation of Animal Science*, Stavanger (Norvège), pp. 162, disponible sur : http://www.eaap.org/Previous_Annual_Meetings/2011Stavanger/Papers/Published/S25_Marie.pdf
- MARIE M., MERCHIER M. (2012) : « Biotic components of sustainability: assessing ecosystem services in livestock farming system » dans *Book of the 63rd annual meeting of the European Federation of Animal Science*, Bratislava (Slovaquie), pp. 280, disponible sur : http://www.eaap.org/Previous_Annual_Meetings/2012Bratislava/Papers/Published/37_Marie.pdf
- MARTIN G., FELTEN B., DURU M. (2011) : « Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems », *Environ. Modell. Softw.*, 26, 1442–1453.
- MARTIN G., DURU M., MAGNE M. A., THEAU J.-P., PIQUET M., FELTEN B., SAUTIER M., THENARD V. (2012) : « Le Rami fourrager : un support pour la conception de scénarios de systèmes fourragers avec des éleveurs et des conseillers », *Fourrages*, 210, 119–128.
- MEUL M., VAN PASSEL S., NEVENS F., DESSEIN J., ROGGE E., MULIER A., VAN HAUWERMEIREN A. (2008) : « MOTIFS: a monitoring tool for integrated farm sustainability », *Agron. Sustain. Dev.*, 28, 321–332.
- MEYNARD J.-M. (2008) : « Introduction générale – Produire autrement : réinventer les systèmes de culture » dans REAU R., DORÉ T. (sous la direction de) *Systèmes de culture innovants et durables. Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?*, Dijon (France), Educagri éditions, pp. 11–27.
- MOREAU J.C. (2009) : « Prospective à l'échelle des systèmes d'élevage herbivore, adaptations et pistes de réflexion » dans *Actes du colloque Changement climatique – Conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore*, Institut de l'élevage et Arvalis – Institut du végétal, pp. 113-122.
- VAN DER WERF H. M. G., PETIT J. (2002) : « Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods », *Agric. Ecosyst. Environ.*, 93, 131–145.
- VAN DER WERF H. M. G., KANYARUSHOKI C., CORSON M. S. (2009) : « An operational method for the evaluation of resource use and environmental impacts of dairy farms by life cycle assessment », *J. Environ. Manage.*, 90, 3643–3652.
- VEREIJKEN P. (1997) : « A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms », *Eur. J. Agron.*, 7, 235–250.
- VIGNAU-LOUSTAU L., HUYGHE C. (2008) : « Chapitre 1 : Le système fourrager », *Stratégies fourragères. Pâturage - Ensilage - Foin*, Paris (France), Éditions France Agricole, pp. 11–65.
- VON WIRÉN-LEHR S. (2001) : « Sustainability in agriculture – an evaluation of principal goal-oriented concepts to close the gap between theory and practice », *Agric. Ecosyst. Environ.*, 84, 115–129.