

Proposition d'un nouvel indicateur global de durabilité des exploitations d'élevage

L. Delaby¹, A. Pochon², M. Journet³

L'évaluation de la durabilité globale des exploitations agricoles doit pouvoir être réalisée quel que soit leur système. La complexité des exploitations d'élevage, qui comportent à la fois des animaux, des cultures et/ou des prairies, amène à concevoir un indicateur qui repose sur des concepts agronomiques et quantifie les flux d'éléments selon une méthode novatrice et transposable.

RÉSUMÉ

L'indicateur proposé ici (PAEP) est bâti autour de la notion de « ressources renouvelables et non renouvelables » en énergie et azote. Il repose sur 4 composantes : la production végétale, l'autonomie, l'efficacité et la pérennité, évaluée par les restitutions d'origine végétale et animale. Le calcul de ces composantes nécessite des informations simples et disponibles sur l'exploitation. Il est illustré par un exemple détaillé issu d'une exploitation laitière. Les atouts et limites de l'indicateur sont discutés. Des perspectives d'évolution sont proposées incluant le recours à d'autres ressources. Les concepts utilisés permettent d'envisager ultérieurement l'extrapolation à d'autres types d'exploitation.

SUMMARY

Proposal for a new indicator for assessing the global sustainability of livestock farms

One should be able to assess the global sustainability of farms regardless of their production system. The complex structure of livestock farms which depends on managing herds, crops and/or grassland, requires a benchmarking system that is based on agronomic concepts and quantifies input using a innovative and readily-transposable method. In this case, the proposed indicator is built on the notion 'of renewable and non-renewable sources' for energy and nitrogen, and rests on 4 elements: crop production, self-sufficiency, efficiency and persistence, evaluated on the basis of organic recycling (plant and animal waste). Calculating these elements requires accessible farm data. The example below illustrates the case of a dairy farm. Assets and shortcomings of this indicator are discussed.

L'avenir de l'agriculture semble devoir passer par des méthodes de production plus durables, à savoir à la fois productives et écologiques (GRIFFON, 2010). Néanmoins, le concept initial de durabilité qui repose sur le juste équilibre entre l'économie, le social et l'environnement au sein de l'exploitation agricole a bien évolué. De local, ce concept s'est mondialisé en intégrant les ressources essentielles que sont l'eau, le sol et l'atmosphère, et en s'intéressant à la satisfaction des besoins alimentaires (GUILLOU et MATHERON, 2011).

Depuis le sommet de Rio (1992) et les accords de Kyoto (1997), **de nombreux indicateurs de durabilité des exploitations agricoles ont été proposés** (VAN DER WERF et PETIT, 2002 ; THOMASSEN et DE BOER, 2005 ; BOCKSTALLER *et al.*, 2008 et 2010). Certains, telle la méthode IDEA (<http://www.idea.portea.fr/>, VILAIN *et al.*, 2008), procèdent à une analyse et une notation détaillée secteur par secteur. D'autres évaluent les impacts sur l'environnement, au travers de bilans partiels (carbone, azote, minéraux...) ou de bilans globaux (analyse du cycle de

AUTEURS

1 : INRA, AgroCampus Ouest, UMR 1348, Physiologie, Environnement et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Elevage, Domaine de la Prise, F-35590 Saint Gilles ; luc.delaby@rennes.inra.fr

2 : 52, rue d'Auvergne, F-22950 Trégueux

3 : 55, rue E. Vivier, F-28170 Chateaufort-en-Thymerais

MOTS CLÉS : Agriculture durable, analyse énergétique, autonomie, azote, diagnostic, environnement, exploitation agricole, fourrage, production laitière, système fourrager.

KEY-WORDS : Dairying, diagnosis, energy analysis, environment, farm, forage, forage system, nitrogen, self-sufficiency, sustainable agriculture.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Delaby L., Pochon A., Journet M. (2012) : "Proposition d'un nouvel indicateur global de durabilité des exploitations d'élevage", *Fourrages*, 213, 77-86.

vie : VAN DER WERF *et al.*, 2009), afin d'identifier les principaux risques d'atteinte à l'environnement. D'autres vont jusqu'à proposer une qualification « Haute Qualité Environnementale » sous l'impulsion du Grenelle de l'Environnement (2007 ; <http://www.legrenelle-environnement.fr/>). Cette qualification a permis à l'Institut de l'Élevage de proposer une grille d'analyse et de caractériser les exploitations herbivores françaises sur les aspects tels que la biodiversité, la stratégie phytosanitaire, la gestion de la fertilisation, la gestion de l'eau et la consommation d'énergie (LE GALL *et al.*, 2009).

La plupart de ces approches insistent sur les effets négatifs (dégradations, pollutions, effet de serre, perte de biodiversité...) de l'activité agricole et négligent, d'une part, le rôle vital de l'agriculture dans la production de biens alimentaires et, d'autre part, l'importance de la pérennité des ressources mobilisées pour les générations futures.

Ainsi, **l'objectif de l'indicateur PAEP est d'évaluer, à l'échelle globale de l'exploitation, les principales composantes jugées essentielles pour caractériser la durabilité du système de production** ; elles ont été identifiées comme étant : **1) la Production** (en quantité), **2) l'Autonomie**, **3) l'Efficacité** et **4) la Pérennité**. Cette approche repose sur la notion de ressources renouvelables et non renouvelables, utilisées pour produire mais également pour assurer la continuité des cycles de matières grâce aux restitutions (figure 1).

Dans une première partie, ce texte présentera la méthodologie utilisée pour définir et calculer les composantes de l'indicateur PAEP. Afin de concrétiser cette approche, la méthode sera illustrée à partir des données issues d'une exploitation laitière du Trégor. Puis les atouts et limites de l'indicateur proposé seront discutés. En conclusion, les perspectives d'évolution seront évoquées.

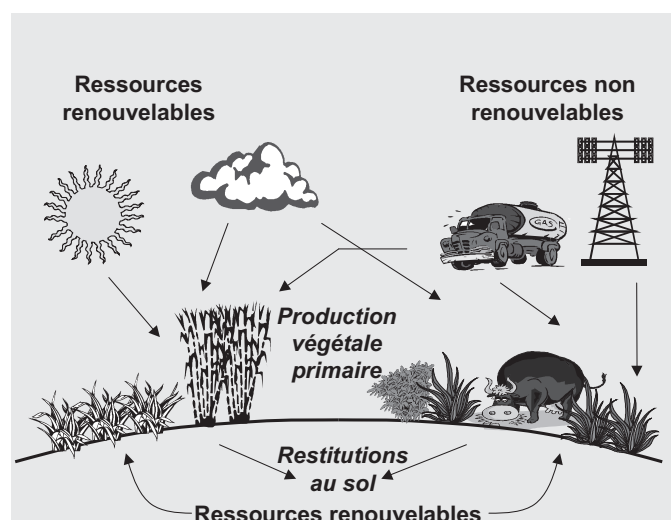


FIGURE 1 : Représentation schématique des différents flux à l'origine de l'indicateur PAEP.

FIGURE 1 : Diagram showing resources used to determine the PAEP indicator.

1. Présentation de la méthodologie utilisée

La construction de l'indicateur s'appuie sur 2 évaluations similaires mais distinctes relatives à l'énergie et à l'azote. Chaque évaluation est construite autour de 4 composantes : Production, Autonomie, Efficacité et Pérennité.

■ Composantes de l'indicateur et principaux paramètres utilisés

La construction de l'indicateur nécessite le **calcul préalable de 4 paramètres**, relatifs à l'énergie et à l'azote :

- la production végétale (Pv) ;
- les ressources non renouvelables (RnR), qui correspondent aux intrants tels que la fertilisation ;
- les ressources renouvelables (RR), calculées par la différence : $Pv - RnR$;
- les restitutions au sol (Rsol), correspondant aux résidus (azote et carbone) d'origine végétale et animale.

Les **4 composantes chiffrées de l'indicateur**, calculées à partir de ces 4 paramètres, correspondent aux ratios suivants :

- **Production végétale**, par hectare de surface agricole utile : cultures de vente+consommations de fourrages par les animaux, soit Pv (/ha SAU).
- **Autonomie**, caractérisée par la part des ressources renouvelables utilisées (exprimée en % des ressources totales), soit $RR / (RR + RnR)$.
- **Efficacité**, ou le ratio d'utilisation des ressources non renouvelables pour réaliser la production végétale, soit Pv / RnR .
- **Pérennité**, évaluée par les restitutions au sol qui contribuent au « capital Sol » (en % de la production végétale réalisée), soit $R\ sol / Pv$.

Les trois premières composantes évaluent la fonctionnalité du système de production. La quatrième composante participe à son futur au travers de l'évaluation des restitutions nécessaires pour conserver et enrichir le « capital Sol ».

■ Méthodes de calcul des paramètres

• Production végétale

La production végétale (Pv) issue des cultures de vente récoltées et des fourrages consommés par les animaux est exprimée en énergie brute et en azote. L'unité d'énergie des végétaux est la calorie dont les références figurent dans les tables d'alimentation (INRA, 2010). Elle a été transformée en équivalent fioul (EQF avec $1\ EQF = 35,8$ mégajoules ou 8 556 kilocalories), unité utilisée pour évaluer l'énergie sur une base plus pratique, tel que dans la méthode Planète proposée par Solagro (BOCHU,

	Production végétale utile (PvU)*			Restitutions au sol*			
	MS (t/ha)	Carbone (t/ha)	Azote (kg/ha)	Carbone (t/ha)	Carbone (% PvU)	Azote (kg/ha)	Azote (% PvU)
Blé	8,0	3,4	160	3,4	100	40	25
Maïs grain	7,5	3,2	120	3,0	94	60	50
Pomme de terre	11,5	4,9	195	2,55	52	85	44
Betteraves	15,0	6,4	250	1,7	27	105	42
Colza	2,7	1,15	95	2,30	200	40	42

* Synthèse réalisée à partir des teneurs en N des aliments et résidus (INRA, 2010), d'une teneur en carbone moyenne de 42,5 % pour la matière sèche récoltée ou la biomasse aérienne des résidus de récolte (LETERME, comm. pers.)

TABLEAU 1 : Restitutions d'azote et de carbone issues des résidus aériens de quelques grandes cultures.

TABLE 1 : Nitrogen and carbon recycling from the aerial residue of main crops.

2002), devenue aujourd'hui Dia'terre (<http://www.solagro.org>), utilisée et parfois réactualisée pour les comparaisons de systèmes laitiers et à viande (BOCHU, 2006 ; Institut de l'Élevage, 2010 ; BORDET *et al.*, 2010)

La **teneur en énergie brute varie assez peu** entre grands types de **fourrages, aliments complémentaires** et produits issus des grandes cultures (grains, tourteaux). De ce fait, une valeur unique de 0,526 EQF par kg de matière sèche (MS) a été adoptée, à l'exception des produits riches en lipides tels que les produits oléagineux qui nécessitent de se référer aux tables de la valeur des aliments (INRA, 2010).

Pour les **cultures de vente** (graines, racines, tubercules...), les rendements à l'hectare sont supposés connus et sont transformés en EQF et kg d'azote ($N = \text{MAT}/6,25$) exportés. Les quantités de fourrages consommés par les herbivores sont toujours difficiles à évaluer en élevage faute d'enregistrements précis des fourrages récoltés et encore moins de l'herbe pâturée. Afin de pallier cette question récurrente, **la production fourragère a été estimée à partir de l'efficacité de transformation des aliments consommés** en produit animal (coefficients kE pour l'énergie et kN pour l'azote). Ces deux coefficients ont été évalués pour les troupeaux laitiers (DELABY et JOURNET, 2009) et reposent sur la connaissance de variables simples et disponibles en élevage, à savoir le lait 4% produit, le taux d'élevage des génisses et l'âge moyen au 1^{er} vêlage.

• Ressources non renouvelables

L'énergie des intrants (ou ressources non renouvelables, RnR) est évaluée selon la méthode Planete dont le référentiel a été élaboré par RISOU et THEOBALD (2002) et qui inclut l'énergie directe issue des carburants, gaz, électricité, semences et aliments du bétail consommés, et aussi l'énergie indirecte dépensée en amont pour la synthèse et le transport des intrants. Ce référentiel a depuis nos travaux été actualisé et intégré à la méthode Dia'terre.

L'azote des intrants correspond à l'azote des fertilisants importés : engrais minéraux achetés et/ou effluents d'élevage. Il prend en compte également l'azote des aliments du bétail achetés qui restera sur l'exploitation sous forme de déjections animales et dont la proportion a été fixée à 80 % de l'azote des aliments consommés, ce qui correspond à un taux d'azote fixé dans les produits animaux (lait, croissance...) de 20 %.

• Ressources renouvelables

La ressource renouvelable (RR), correspondant à celle fournie par le sol et l'atmosphère, est estimée par différence entre la production végétale et les ressources non renouvelables consommées (RnR).

L'énergie fournie par l'atmosphère correspond de fait à l'énergie solaire captée et transformée par les végétaux et celle fournie par le sol provient de la chaleur dégagée par l'oxydation des résidus organiques sous l'action des organismes présents. L'azote fourni par l'atmosphère est issu de la fixation symbiotique par les légumineuses ; l'azote du sol est celui disponible après transformation et minéralisation des résidus végétaux et des déjections animales.

• Restitutions organiques

Les restitutions végétales de carbone et d'azote au sol (Rsol) correspondent aux pertes de fourrages à la récolte et en cours de conservation et stockage, et aussi à la fraction non consommée par les animaux (refus à l'auge ou au pâturage). Pour les **cultures de vente**, elles correspondent aux parties de la plante, produites mais non récoltées (pailles, chaumes, fanes, collets...), qui restent sur le champ. Il convient aussi d'y ajouter les restitutions provenant des cultures intermédiaires (CIPAN).

Pour les **fourrages**, la restitution a été évaluée en moyenne à 30 % de la production primaire, en énergie comme en azote, quel que soit le mode de conservation soit 43 % du récolté ou consommé. Pour les **cultures**, le pourcentage varie fortement selon qu'il s'agit du carbone ou de l'azote, et d'une culture à l'autre, ce qui nécessite d'utiliser des données spécifiques à chaque culture. Une estimation actualisée a été fournie pour les 5 cultures : blé, maïs grain, pomme de terre, betteraves et colza (tableau 1). Des données plus complètes sont disponibles dans la littérature spécifique, et pour partie intégrées au logiciel AzoFert® (<http://www.rmt-fertilisationenvironnement.org>) qui pourrait servir de référence.

Les restitutions animales proviennent des déjections fécales et urinaires émises directement au pâturage ou stockées durant la période hivernale et ensuite épanchées. Elles sont calculées en proportion des quantités de fourrages consommés par les animaux. Pour les déjections animales, le carbone fécal correspond en moyenne

Composantes	Energie		Azote	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
P Productivité (EQF ou kg N/ha SAU)	2 500	5 000	70	180
A Autonomie (%)	70	100	20	100
E Efficacité (%)	4	12	1	6
P Pérennité (%)	40	80	20	80

TABLEAU 2 : Grille d'évaluation de l'amplitude de variation de chacune des 4 composantes en énergie et en azote.

TABLE 2 : Evaluation grid measuring variation amplitude in energy and nitrogen for each one of the 4 elements.

à 34 % du carbone ingéré (FAVERDIN *et al.*, 2007). L'azote de la fraction organique insoluble, non ou très peu lessivable, est évalué à 70 % de l'azote fécal et à 30 % de l'azote urinaire (DECAU *et al.*, 1997).

■ Méthode globale d'évaluation

L'indicateur PAEP a été conçu pour évaluer l'exploitation dans sa globalité, en se référant dans l'immédiat aux valeurs des 4 composantes, en énergie et en azote. Cette évaluation ne pourra cependant se faire qu'après avoir acquis suffisamment de références sur un grand nombre d'exploitations afin de connaître l'amplitude exacte de variation des composantes.

Caractéristiques générales :

Département des Côtes d'Armor
77 ha de SAU - 4 Unités travailleurs
Fertilité moyenne
Pluviométrie annuelle : environ 900 mm

Surfaces :

Cultures : 20% (pommes de terre : 12 % ; blé : 8 %)
Fourrages : 80 % (herbe : 76 % soit 95 % de la SFP)

Végétaux :

Fertilisation :
2 t d'ammonitrate et 10 t de chlorure de potasse
37 t de chaux magnésienne et 10 t de scories
N - P₂O₅ - K₂O (kg/ha) : 8 - 0,3 - 85
310 t de lisier, soit 14 kg N/ha

Traitements :

240 kg matière active, soit 3,1 kg/ha SAU

Animaux :

Vaches laitières :
50,4 vaches présentes - 6 250 kg lait / vache
TB & TP : 40,7 et 31,8 g/kg lait
soit 5 200 kg de lait 4 %/ha de SFP

Troupeau :

80 UGB ; Taux d'élevage des génisses : 23 %
soit 1,30 UGB/ha SFP

ENCADRÉ 1 : Principales données techniques de l'exploitation du GAEC Le Fustec (année 2002).

FRAME 1 : Main technical data for the GAEC Le Fustec farm (year 2002).

Il est toutefois possible, à titre préliminaire et à des fins d'illustration, de proposer une **grille d'évaluation** élaborée sur la base d'estimations réalisées par les auteurs et qui borne l'amplitude de variation présumée de chaque composante en énergie et en azote (tableau 2). Chaque composante de l'exploitation étudiée est alors positionnée tel un curseur, ce qui permet d'abord de visualiser les cohérences entre les 4 composantes et ensuite d'évaluer les marges de progrès possibles. **L'exploitation sera d'autant mieux notée que les positions des 4 curseurs** pour un même élément, Energie ou Azote, **seront proches des maxima, et qu'elles seront « alignées »** (ou assez proches) ce qui traduit une homogénéité de classement des 4 composantes et garantit le bon équilibre de l'exploitation.

2. Exemple concret d'évaluation sur une exploitation laitière

■ Présentation de l'exploitation

L'exploitation se situe dans le Trégor à l'extrême nord-ouest du département des **Côtes d'Armor**. Elle est exploitée par le GAEC familial constitué des deux frères Patrick et Christian LE FUSTEC et de leurs épouses Martine et Martine. Cette exploitation a fait l'objet d'une expertise réalisée par l'INRA lors du programme « Système, Terre et Eau » de 1993 à 1998 (ALARD *et al.*, 2002). La dernière expertise (bilans énergétiques et azotés) dont les données ont servi à l'évaluation de l'indicateur a été réalisée par le bureau technique du CEDAPA entre août 2001 et août 2002 (THIEBOT *et al.*, 2003), lors d'une année climatique moyenne sans événements notables en termes de pluviométrie et température. Cette exploitation a été l'une des exploitations herbagères mise en valeur dans le film *Herbe* (<http://www.herbe-lefilm.com>). Selon l'expertise INRA (2002), l'exploitation se caractérisait par un bon niveau de durabilité. **Le système de production mixte associe** l'élevage laitier à la culture de blé et de plants de pommes de terre. Cette mixité entre **productions animales et végétales** a contribué au choix de cette exploitation pour illustrer la méthode de calcul.

	2001	2002	2003
Potentialité agronomique ⁽¹⁾	← 2,2 →		
Pluviométrie (mm/an)	922	930	770
Températures annuelles moyennes (minimale - maximale, °C)	7,4 - 15,3	7,9 - 15,6	7,4 - 16,3
Rendements			
Blé (q/ha)	54,5	70,9	54,5
Pommes de terre (t/ha)	19,0	16,5	18,4
Lait (kg/vache)	5 695	6 080	5 955

1 : notée de 1 (+) à 5 (-) sur la base de la profondeur de sol et de l'hydromorphie (RIVIERE, 1999)

TABLEAU 3 : Conditions climatiques et rendements moyens observés sur l'exploitation du GAEC Le Fustec de 2001 à 2003.

TABLE 3 : Climatic conditions and average yield for the GAEC Le Fustec farm from 2001 to 2003.

Depuis leur installation en 1979, les 4 exploitants ont fait évoluer le système fourrager vers un système herbager à base de prairies d'association ray-grass-trèfle blanc (POCHON, 2012) et la production animale vers un système laitier basé sur un chargement adapté au potentiel pédoclimatique local (1,30 UGB/ha SFP), avec un niveau d'apport de concentré faible. Ce système est cependant resté assez productif à l'hectare grâce à la production et à la qualité élevées des fourrages, et grâce à une alimentation des troupeaux qui s'appuie sur une saison de pâturage longue (de mars à novembre).

Lors du dernier bilan (encadré 1), **la prairie occupait 76 % de la surface, les pommes de terre 12 % et le blé 8 %**. Les 50 vaches produisaient 6 300 kg de lait standard en moyenne par an. Les intrants se limitaient à 22 kg N minéral et organique par hectare et par an, 85 kg K₂O et pratiquement pas de P₂O₅, et à 300 kg d'aliments complémentaires par vache et par an. Le coût alimentaire par 1 000 litres de lait produit n'était que de 34 € soit environ la moitié de celui des exploitations laitières du département suivies par le conseil de gestion CGER 22.

a) Evaluation de l'énergie et de l'azote des produits végétaux vendus					
Production végétale (et rendement)	Total sur l'exploitation			/ ha SAU	
	MS	EQF ⁽¹⁾	N (kg) ⁽²⁾	EQF ⁽¹⁾	N (kg) ⁽²⁾
Blé (6 t brutes /ha)	32,4	17 047	648	221	8,42
Pommes de terre (5 t MS/ha)	45,0	23 670	765	307	9,94
Foin (6,5 t brutes /ha)	26,3	13 840	526	180	6,83
Total				709	25,19

1 : 1 EQF = 35,8 MJoules soit 0,526 EQF/kg MS
2 : N (kg/t MS) : blé : 20,0 ; pommes de terre : 17,0 ; foin : 20,0

b) Evaluation de l'énergie et de l'azote du lait produit					
	Total sur l'exploitation			/ha SAU	
	Quantité	EQF ⁽³⁾	N (kg) ⁽⁴⁾	EQF ⁽³⁾	N (kg) ⁽⁴⁾
Lait brut livré (litres)	280 479				
Lait brut produit (kg) ⁽⁵⁾	314 929				
Lait 4% produit (kg) ⁽⁶⁾	318 236	27 814	1 649	361	21,4

3 : 0,0874 EQF/kg lait 4%
4 : (TP+1,6) / 6,38 soit 5,23 g N/kg de lait brut
5 : Lait brut livré x (1,033 / 0,92)
6 : 0,4 x Lait brut produit + 0,015 x Lait brut produit x TB (g/kg)

c) Evaluation de l'énergie et azote issus des fourrages consommés					
	Total sur l'exploitation			/ha SAU	
	Quantité (t MS)	EQF ⁽⁷⁾	N (kg) ⁽⁸⁾	EQF ⁽⁷⁾	N (kg) ⁽⁸⁾
Lait		27 814	1 649	361	21,4
Ration		233 142	10 084	3 028	131,0
Compléments ⁽⁹⁾		11 309	633	146	8,3
Conc. production	7,5	3 945	206		
Tourteau de soja	5,0	2 630	384		
Paille	9,0	4 734	43		
Fourrages ⁽¹⁰⁾		221 833	9 451	2 881	122,7

7 : EQF ration = EQF lait / kE avec kE = 0,1193
8 : N ration = N lait / kN avec kN = 0,1635
9 : % MAT : concentré de production : 17,2 ; tourteau de soja : 48,0 ; paille : 3,0
10 : Fourrages = Ration - Compléments

TABLEAU 4 : Données et calculs nécessaires à l'estimation des produits du GAEC Le Fustec.

TABLE 4 : Data and calculations required for measuring produced energy and nitrogen on the GAEC Le Fustec farm.

Les principaux résultats techniques, économiques et environnementaux se caractérisent par des rendements satisfaisants : 4 800 kg de lait sans compléments par hectare de surface fourragère et 5,5 t MS/ha de cultures (pommes de terre+blé). Les résultats économiques se caractérisent par de **faibles charges**, évaluées à 26 % du produit, et une marge brute de 1 250 €/ha de surface agricole. **L'impact environnemental associé à l'azote est faible** comme le montre le bilan apparent de seulement +30 kg N/ha SAU, en incluant les entrées d'azote atmosphérique fixé par les légumineuses.

Ces résultats doivent être appréciés en fonction des potentialités du milieu, celles liées au sol et au climat pour la période considérée. Les données présentées au tableau 3 caractérisent une situation climatique normale en termes de température et pluviométrie.

Depuis 2002, le GAEC (maintenant dénommé GAEC de Langren) a poursuivi son évolution et a consolidé sa pérennité en intégrant un jeune exploitant, le fils de Christian qui a remplacé ce dernier. L'exploitation est en **transition vers l'agriculture biologique**, évolution toute naturelle pour cet élevage laitier herbager qui fait un usage excessivement modéré de fertilisants azotés et de pesticides, véritable défi pour la culture de plants de pommes de terre.

Données à collecter et réalisation des calculs

Les principales données de l'exploitation utiles au calcul de l'indicateur sont récapitulées dans l'encadré 1.

• Produits

Les produits végétaux et donc l'énergie et l'azote exportés issus des cultures de vente sont constitués par les quantités récoltées de pommes de terre, de blé et de foin (tableau 4a). L'énergie et l'azote des aliments (fourrages et concentrés) consommés par le troupeau sont estimées à partir i) de l'énergie et de l'azote du lait 4 % issu des données de livraison annuelle et ii) des coefficients kE et kN dont les équations sont présentées au tableau 5. Comme ces coefficients s'appliquent sur la quantité de lait produit, il convient de corriger le lait livré d'un coefficient moyen de 0,92 afin de tenir compte du lait distribué aux veaux d'élevage et du lait non commercialisé (tableau 4b).

Puis l'énergie et l'azote issus des aliments produits sur l'exploitation sont évalués par déduction des aliments

$$kE = 0,118 + 0,127 \cdot 10^{-4} PL - 0,080 TE - 0,178 \cdot 10^{-2} AGvel1$$

$$kN = 0,170 + 0,137 \cdot 10^{-4} PL - 0,103 TE - 0,204 \cdot 10^{-2} AGvel1$$

Dans le GAEC le Fustec :

PL (Production laitière, kg lait 4%) = 6 314 kg	} kE = 0,1193 kN = 0,1635
TE (Taux d'Élevage) = 0,23	
AGvel1 (Age au 1 ^{er} vêlage) = 34 mois	

TABLEAU 5 : Application des équations de prédiction des coefficients kE et kN au GAEC Le Fustec.

TABLE 5 : Application of coefficient kE and kN prediction equations to the Le Fustec GAEC.

achetés et de leur composition en énergie et azote (tableau 4c).

a) Dépenses énergétiques			
Origine	Exploitation	(EQF/ha SAU)	
Consommation directe			
Carburant	8 426 litres	130	
Gaz	39 kg	1	
Electricité	27 933 kWh	98	
Consommation indirecte			
Engrais	884 kg N, 23 kg P ₂ O ₅ , 6 540 kg K ₂ O	62	
Insecticides	248 kg Matière active	28	
Semences		14	
Aliments	5 t tourteau.de soja 7,5 t concentré de production 9,0 t paille	24	
Autres		35	
Total		392	
b) Azote (des engrais, effluents et déjections) issu des aliments achetés			
	Exploitation	/ ha SAU	
		(t)	(kg N)
Engrais minéral	Ammonitrate	1,85	8,0
Effluents d'élevage	Lisier importé	310	13,0
Rejets N issus des concentrés ⁽¹⁾	Tourteau de soja	5,0	4,0
	Concentré de production	7,5	2,1
	Total		27,1

1 : soit 80 % N ingéré

TABLEAU 6 : Données et calculs nécessaires à l'estimation des ressources non renouvelables du GAEC Le Fustec.

TABLE 6 : Data and calculations required for estimating non-renewable resources on the Le Fustec GAEC.

• Ressources non renouvelables

L'évaluation des intrants énergétiques nécessite de connaître les consommations directes de carburant, de gaz, d'électricité, et les consommations indirectes utilisées au cours de l'extraction, la synthèse et les transports des produits achetés : engrais minéraux et organiques, produits phytosanitaires, aliments du bétail sans intégrer celles issues du matériel et des bâtiments. L'évaluation énergétique réalisée par le CEDAPA (THIÉBOT *et al.*, 2003) en utilisant la méthode PLANETE a été conservée et les résultats sont présentés au tableau 6a. Les intrants azotés sous forme de fertilisants minéraux et organiques, y compris les déjections issues des aliments achetés, sont rapportés au tableau 6b.

• Restitutions au sol

Les restitutions en provenance des cultures et des fourrages sont calculées en proportion de la partie productive récoltée des végétaux. Pour le GAEC de Langren, les valeurs en énergie (EQF), carbone et azote, sont décrites au tableau 7a. Les restitutions animales d'origine fécale et urinaire figurent au tableau 7b et le total des restitutions exprimées en pourcentage du produit végétal utile est détaillé au tableau 7c.

■ Valeurs des 4 composantes

Le calcul des composantes de l'indicateur PAEP aboutit aux valeurs suivantes présentées au tableau 8 :

1 - Production végétale d'environ 3 600 EQF et 148 kg N/ha SAU de l'exploitation soit environ 6 800 kg de matière sèche utile.

a) Energie, carbone et azote des produits végétaux consommés ou vendus, ou issus des résidus									
(/ha SAU)	Produits végétaux ⁽¹⁾			Résidus, pertes ⁽²⁾		Restitutions			
	EQF	kg C	kg N	EQF, C	N	EQF	kg C	kg N	
Blé	221	177	8,4	100	25	221	177	2,1	
Pommes de terre	307	246	9,9	52	44	160	128	4,4	
Foin vendu	180	144	6,8	43	43	77	62	2,9	
Fourrages consommés	2 881	2 305	122,7	43	43	1 239	991	52,7	
Total	3 589	2 872	147,7			1 697	1 357	62,1	

1 : Données issues du tableau 4a et c

2 : Résidus ou pertes au champ (EQF ou C, % du produit)

TABLEAU 7 : Données et calculs nécessaires à l'estimation des restitutions du GAEC Le Fustec.

TABLE 7 : Data and calculations required for estimating recycling on the Le Fustec GAEC.

b) Evaluation des restitutions fécales et urinaires				
(/ha SAU)	EQF ration ⁽³⁾	MS ⁽⁴⁾	Carbone ⁽⁵⁾	Azote
Ingéré (I)	3 028	5 757	2 422	131,0
N fécal (F) ⁽⁶⁾				41,5
N lait (L)				21,4
N urine (U) ⁽⁷⁾				68,1
N organique ⁽⁸⁾				49,5
C restitutions ⁽⁹⁾			824	

3 : Données issues du tableau 4c

4 : MS (Matière sèche) = EQF / 0,526

5 : Carbone : C = 0,8 EQF

6 : N fécal : F = 7,2 MS ingéré / 1 000

7 : N urine : U = I - F - L

8 : N organique = 0,7 N fécal + 0,3 N urine

9 : C restitutions = 0,34 C ingéré

c) Evaluation des restitutions totales, animales et végétales, en carbone et azote		
	Carbone (kg/ha SAU)	Azote (kg/ha SAU)
Produits végétaux récoltés	2 872	147,7
Résidus de récoltes	1 357	62,1
Restitutions animales	824	49,5
Restitutions totales	2 181	112
% produits végétaux	75,9	75,5

	Energie (EQF/ha SAU)	Azote (kg/ha SAU)
Paramètres		
Production (A)	3 589	147,7
Ressource non renouvelable (B)	392	27,1
Ressource renouvelable (C = A - B)	3 197	120,6
Composantes		
Production (/ha)	3 589	147,7
Autonomie (C) / (A)	89	82
Efficacité (A) / (B)	9,1	5,5
Pérennité	76	75

TABLEAU 8 : **Synthèse de l'indicateur PAEP** (paramètres et composantes) pour le GAEC Le Fustec.

TABLE 8 : **Synthesis of the PAEP indicator** (parameters and elements) on the Le Fustec GAEC.

2 - Autonomie de 89 % pour l'énergie et de 82 % pour l'azote. Dans cette exploitation, 89 % de l'énergie nécessaire pour la production proviennent donc de l'énergie solaire captée et du sol et 82 % de l'azote proviennent de l'azote atmosphérique fixé par les légumineuses et de l'azote du sol issu de la minéralisation de la matière organique.

3 - Efficacité de 9,1 pour l'énergie et 5,5 pour l'azote, ce qui signifie, pour l'énergie : 9 unités produites pour 1 dépensée, et pour l'azote : plus de 5 produites pour 1 dépensée.

4 - Pérennité caractérisée par des restitutions organiques équivalentes à environ 76 % du carbone et 75 % de l'azote (consommé + récolté), qui proviennent des végétaux non récoltés pour environ 60 % et le reste des déjections animales.

En l'absence d'un référentiel comparatif solide, qui reste à élaborer, cette évaluation apparaît néanmoins bonne à très bonne pour les 3 composantes de pérennité, autonomie et efficacité, et en phase avec le potentiel du milieu pour les productions végétales et animales.

3. Atouts et limites de l'indicateur

L'indicateur PAEP s'intéresse aux **cycles du carbone (ou énergie) et de l'azote**, à leurs flux entre végétaux et animaux en les élargissant au sol et à l'atmosphère. Ces cycles prendront en compte les entrées d'origine atmosphérique de N₂ et CO₂ utilisés pour la symbiose et la photosynthèse, la fixation de carbone et d'azote par les végétaux, le retour au sol des fractions végétales résiduelles et celles excrétées par les animaux, puis le recyclage ultérieur de ces restitutions par les plantes (figure 2).

■ Les atouts

• Concept et fonctionnalité

D'un point de vue conceptuel, l'indicateur mobilise 2 concepts pour juger du bon fonctionnement agronomique du système de production : un **concept de durabilité** basé sur la réalisation d'une production végétale à partir de

ressources renouvelables préférentiellement à des ressources non renouvelables, et un **concept « scientifique »** basé sur le cycle de 2 éléments, le carbone (ou l'énergie) et l'azote, essentiels et interdépendants en productions végétale et animale.

Le concept de durabilité évalue la stratégie mise en œuvre dans le système de production. Le concept scientifique s'intéresse au cycle de transformation des éléments C et N, en intégrant l'atmosphère comme lieu de captation par les végétaux et le sol comme lieu de recyclage et de re-captation, au lieu de se limiter au seul lien entre intrants et production.

D'un point de vue fonctionnel, **l'indicateur se base sur la production végétale uniquement**, en évaluant celle consommée par les animaux à partir de leurs performances. Ceci évite les calculs distincts par atelier (végétal et animal), dont les clefs de répartition font toujours l'objet de débats et de désaccords, et qui finalement désolidarisent les productions animales et végétales. Ce choix permet également de calculer l'indicateur sur tous les types d'exploitations, que ce soit d'élevage ou de grandes cultures, et quelle que soit leur spécialité ; il les compare sur la base de la production primaire végétale sans présager de l'utilisation future des végétaux, sur l'exploitation, ou en dehors après leur commercialisation.

Le mode d'expression de 3 des composantes, sous forme de ratio ou de pourcentage, permet une évaluation plus dépendante du mode de conduite et moins des conditions de milieu. Ce n'est cependant pas le cas pour la dernière composante, le volume de production, dont il faudra relativiser les valeurs en regard de la fertilité des sols et du climat.

L'indicateur doit aussi sa fonctionnalité au fait que les données nécessaires au calcul des composantes sont uniquement de nature physique et qu'elles sont facilement accessibles dans des registres tenus par les exploitants, sans nécessiter normalement de visite.

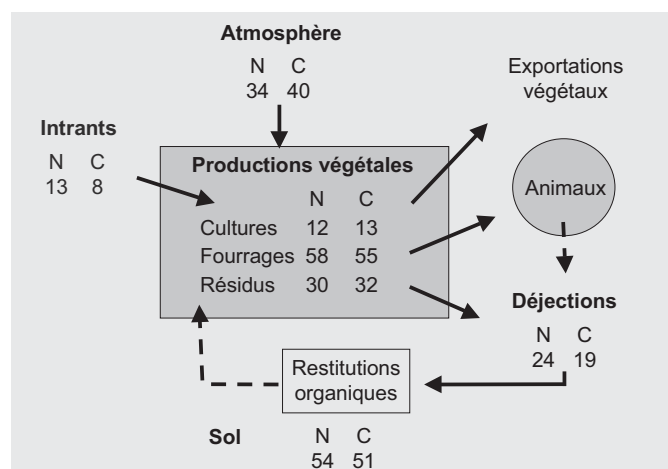


FIGURE 2 : **Illustration quantifiée des flux d'azote (N) et de carbone (C) (% du total des productions végétales primaires) du GAEC Le Fustec.**

FIGURE 2 : **Quantified diagram of nitrogen and carbon exchanges (% of total primary plant production) on the Le Fustec GAEC.**

• Regard sur la façon de produire

A partir de l'évaluation faite à travers l'utilisation des ressources énergétiques et azotées, **l'indicateur permet une expertise du système de production tel qu'il est conduit et permet d'envisager son évolution.**

Pour l'exploitation étudiée en exemple, l'indicateur PAEP indique que le système est performant sur 3 composantes : Autonomie, Efficacité et Pérennité, et moyennement performant sur la composante Production. L'indicateur confirme que la production végétale est en effet essentiellement réalisée à partir des ressources renouvelables, énergie et azote de l'atmosphère et du sol, grâce aux restitutions végétales et animales, réduisant à 10-15 % la contribution des intrants à la production végétale (figure 2). Ce bon résultat est à associer aux caractéristiques dominantes du système mis en œuvre par les éleveurs, dans les domaines de l'azote et de l'énergie, et plus globalement de la gestion des intrants.

Concernant la **gestion de l'azote**, le 1^{er} atout vient de l'importance de la place de l'herbe, riche en légumineuses, dans le système fourrager qui concourt à la fois à des prélèvements atmosphériques importants et des restitutions élevées d'azote par l'herbe et les bovins, permettant ainsi de faibles intrants azotés sous forme de fertilisants et compléments. A ce niveau, le rôle des légumineuses, bien connu (PEYRAUD *et al.*, 2009 ; LEDGARD *et al.*, 2009), est essentiel et constitue la clef de voûte de l'autonomie en azote.

Concernant la **gestion de l'énergie**, le résultat intéressant vient encore de la valeur de l'herbe, au travers cette fois de sa valorisation sous forme de pâturage (durée de vie des prairies et de la saison de pâturage), qui permet de réduire les intrants énergétiques associés au travail du sol, à la récolte et distribution des fourrages, aux engrais et compléments pour les animaux.

Pour la **gestion des intrants**, leur réduction extrême a été permise par le choix assumé d'une moindre performance par animal et d'un chargement également moindre adapté au potentiel du milieu (sol, climat).

Les **flux d'azote** (figure 2) ayant permis de calculer les composantes de l'indicateur éclairent aussi sur les risques de pertes. Le rejet d'azote « soluble » par les troupeaux, qui n'entre pas dans la composante restitution d'azote organique, peut être estimé. Ce rejet, potentiellement lessivable, est de l'ordre de 35 kg N/ha SAU et d'environ 40 kg en incluant les effluents importés. Il peut être considéré comme un risque faible compte tenu de la fraction qui sera utilisée pour la croissance des plantes.

Concernant l'avenir, le passage à l'agriculture biologique choisi par les éleveurs permettra-t-il d'aller plus loin dans l'autonomie sans pénaliser la production et la pérennité ?

■ Les limites

• Précision de l'évaluation

La recherche d'un indicateur facile d'utilisation a conduit à **des simplifications**. C'est le cas tout particuliè-

rement **pour l'évaluation de la ressource renouvelable**. Elle provient de l'équivalence : Production végétale = Ressource Renouvelable + Ressource non Renouvelable. La ressource non renouvelable est connue et correspond aux intrants ; la production végétale est mesurée ou estimée. Cette méthode a l'avantage d'être simple et semblable pour l'énergie et l'azote ; elle a pour inconvénient de ne pas identifier l'origine des 2 ressources renouvelables : atmosphère et sol. La ressource « Sol » correspond aux restitutions de nature organique, en carbone et azote ; il est alors possible d'obtenir la ressource atmosphère comme étant égale à : Production - Ressource Sol. A l'origine des réflexions lors de la conception de l'index, il avait été envisagé d'évaluer directement et séparément les 2 ressources renouvelables à la fois pour l'énergie et pour l'azote. Ce projet a été abandonné du fait de sa complexité, des hypothèses faites et des imprécisions, et surtout du manque d'homogénéité entre azote et énergie.

Le calcul de l'indicateur comporte d'autres imprécisions qui portent en particulier sur **les restitutions**. Celles-ci revêtent une grande importance dans la signification de l'indicateur, puisqu'elles représentent la composante pérennité et qu'elles constituent une part importante des ressources renouvelables. Il est impossible d'évaluer dans le détail les restitutions par manque d'informations précises sur les résidus animaux et sur les résidus végétaux en provenance des fourrages selon le mode de récolte : la valeur de 30 % de pertes correspond à une valeur moyenne pour la fenaison, l'ensilage, l'enrubannage, quelles que soient les conditions de récolte. Mais les erreurs commises restent réduites en regard des effets associés au système : système fourrager, type de production animale, méthodes de conduite et niveau des performances. Les restitutions végétales n'incluent pas la partie racinaire, ce qui nécessiterait des informations plus complètes et complexes que celles existantes.

• Sensibilité de l'indicateur aux conditions de milieu

Tout indicateur qui évalue les performances d'un système ou d'une exploitation agricole est confronté aux variations des potentialités du milieu et de climat selon les années. Les composantes de l'indicateur PAEP qui reposent sur des ratios seront assez peu sensibles aux conditions de milieu d'un point de vue agronomique ou climatique. A l'inverse, la composante « Production végétale » va varier et dépendre de la variabilité interannuelle du climat et de celle des potentialités agronomiques entre exploitations. Néanmoins cette sensibilité au climat sera un peu réduite puisque cette composante intègre l'ensemble des productions végétales de l'exploitation. Il faudra cependant rester prudent quant à la constitution des réseaux à des fins de comparaisons entre exploitations. En effet, les différences de conditions de milieux d'un territoire à l'autre sont importantes et influencent davantage les rendements des productions végétales que les autres composantes. Ces derniers pourraient être étalonnés chaque année au sein d'un référentiel à l'échelle de grandes régions comme ce fut le cas pour les rendements en céréales lors des calculs des droits à primes PAC.

• Les ressources et risques non pris en compte

Du fait de leur couplage et découplage dans les processus de production végétale (LEMAIRE, 2005) et animale (FAVERDIN et PEYRAUD, 2009), les deux ressources, énergie et azote, sont essentielles et affectent à la fois l'économie et l'environnement de l'exploitation agricole. Mais d'autres ressources essentielles sont indispensables et concernent aussi les productions végétales. Elles devront se présenter sous une forme, renouvelable ou non renouvelable, et être facilement intégrées comme telle.

Une des omissions concerne **les minéraux**, constituants essentiels du « capital Sol » comme le sont le carbone et l'azote qui composent la matière organique. Il en est de même pour **l'eau** dont on pressent les risques de pénurie créant ainsi une dépendance accrue des systèmes agricoles qui reposent sur l'irrigation (Rapport EsCo *Sécheresse et Agriculture* : AMIGUES *et al.*, 2006). L'eau et les minéraux majeurs, calcium, phosphore et potasse, se trouvent sous des formes qui peuvent être par extension considérées comme renouvelables et non renouvelables : l'eau de pluie et celle provenant de l'irrigation, les minéraux du sol et les minerais extraits du sous-sol. Ces répartitions sont cependant très simplificatrices. Dans le cas de l'eau, les compétitions entre les plantes, les animaux et les hommes sont complexes, ainsi que son cycle et recyclage. Pour les minéraux, leur réelle biodisponibilité pour les plantes est aussi importante que leur quantité. De plus, ces deux éléments influencent la production végétale autant par leur mode d'utilisation, que cherche à caractériser l'indicateur, que par les conditions de milieu : la géologie des sols et le climat, sec ou pluvieux. Ainsi, avant de décider de l'introduction de ces ressources à des fins d'évaluation globale du système, il faudra s'assurer du réel intérêt de leur prise en compte afin de ne pas accroître la complexité de l'indicateur et son interprétation.

L'indicateur fait également l'impasse sur certains risques, non liés aux ressources, énergie et azote. Il s'agit tout particulièrement des **risques majeurs** associés à l'utilisation importante de **pesticides et** de l'atteinte à la **biodiversité** (GARRIGUES *et al.*, 2012). Ces lacunes peuvent être comblées, sans déroger aux principes fondateurs de l'indicateur, en les faisant dépendre du « capital Sol », qui représente la composante « Pérennité » et qui se trouve altéré du fait de ces risques. La prise en compte des pesticides pourrait se faire par l'indicateur IFT, ou NODU du plan « surfaces équivalentes en biodiversité » incluant aussi les prairies (LE GALL *et al.*, 2009).

Conclusion

L'indicateur PAEP a été conçu pour avoir une portée générale et être compréhensible de tous : agriculteurs, conseillers, pouvoirs publics, citoyens et leurs associations, en jugeant le système de production agricole sur son aptitude à être, ou ne pas être : Autonome, Efficace, Pérenne et Productif.

D'un point de vue purement agronomique, l'indicateur a été construit pour être facilement généralisé à tous types de productions, végétale et animale, et en tous lieux, en se référant à deux concepts généraux : i) celui de durabilité, conçu comme une utilisation modérée des ressources extérieures au profit des ressources internes prélevées dans l'atmosphère et le sol, et ii) celui du cycle agro-chimique des éléments, énergie, carbone, azote, éléments essentiels pour produire, mais sources susceptibles d'agressions et altérations du milieu au travers de pollutions, locales (lessivage...) ou plus globales (émissions gazeuses).

Dans sa construction actuelle l'indicateur est utilisable mais n'est pas encore abouti. Il doit être testé par les utilisateurs qui pourront juger des améliorations à apporter et développer les réseaux nécessaires à l'élaboration du référentiel comme, en leur temps, pour le bilan des minéraux (SIMON et LE CORRE, 1992) ou l'ACV. Les auteurs auront à apporter des compléments pour l'extrapoler à tous les types de productions animales et notamment aux troupeaux à viande allaitants (travaux en cours).

L'indicateur pourra ultérieurement être plus complet, en l'étendant à d'autres ressources et en prévenant certains dérèglements non pris en compte dans sa construction actuelle, notamment ceux qui peuvent affecter le « capital Sol », à travers les pesticides et l'atteinte à la biodiversité. L'évolution de l'indicateur devra cependant veiller à maintenir la simplicité de l'outil pour qu'il reste facilement utilisable. L'approche proposée a choisi de ne pas inventorier les risques environnementaux comme l'ont fait d'autres auteurs (LE GALL *et al.*, 2007 ; CHAMBAUT *et al.*, 2007), estimant i) que ces risques sont trop divers et complexes à évaluer dans une exploitation agricole particulière et ii) que de nombreuses évaluations et outils existent déjà, telles l'ACV (VAN DER WERF *et al.*, 2009) ou la méthode Ges'tim (GAC, 2010). **L'objectif de l'indicateur PAEP est plutôt d'évaluer la capacité du système à limiter l'utilisation de ressources non renouvelables en profitant au mieux des potentialités du milieu.**

L'évaluation globale de l'exploitation constitue l'objectif principal de cet indicateur. Elle ne pourra cependant se faire que lorsque l'amplitude de variation des 4 composantes sera connue sur un nombre d'exploitations conséquent et qu'une valeur relative pourra être donnée à chacune d'elle. Le classement de l'exploitation, à des niveaux Haut ou Bas de durabilité, résultera des valeurs des 4 composantes, en adoptant normalement le principe que la composante la plus faible limite la note globale. Ce classement se fera sur chacune des ressources retenues. L'agrégation selon les ressources prises en compte sera à déterminer. Elle se posera rapidement pour les 2 ressources énergie et azote, notamment au sujet de l'intérêt de leur couplage.

L'évaluation globale fournie par l'indicateur PAEP sera avantageusement complétée par une analyse détaillée de l'exploitation et de son fonctionnement afin d'envisager les possibilités d'amélioration de l'efficacité, de l'autonomie et de la pérennité de l'exploitation. Soulignons enfin, pour conclure, que l'un des objectifs de cet indicateur est

d'insister sur le rôle essentiel de l'agriculture, trop souvent relégué au deuxième plan, qui est de produire efficacement, localement et durablement pour nourrir la population de la planète aujourd'hui et demain.

Accepté pour publication,
le 7 septembre 2012.

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier les familles LE FUSTEC pour la mise à disposition des données et leur contribution à la réflexion dans l'élaboration de l'indicateur PAEP ainsi que Gilbert LIÉNARD, ancien directeur du laboratoire Economie de l'Élevage des Herbivores, à l'INRA de Theix, pour la qualité de son analyse critique et ses remarques constructives proposées durant l'avancement du projet.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALARD V., BERANGER C., JOURNET M. (2002) : *A la recherche d'une agriculture durable*, éd. QUAE, Versailles, 346 p.
- AMIGUES J.P., DEBAECKE P., ITIER B., LEMAIRE G., SEGUIN B., TARDIEU F., THOMAS A. (2006) : *Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau, Expertise scientifique collective*, Rapport INRA, France, 380 p.
- BOCHU J.L. (2002) : "PLANETE : Méthode pour l'analyse énergétique de l'exploitation agricole et l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre", *Quels diagnostics pour quelles actions agroenvironnementales*, Colloque Solagro, Toulouse, 68-80.
- BOCHU J.L. (2006) : "Consommation et efficacité énergétique de différents systèmes de production agricole avec la méthodologie PLANETE", *Fourrages*, 186, 165-177.
- BOCKSTALLER C., GALAN M.B., CAPITAINE M., COLOMB B., MOUSSET J., VIAUX P. (2008) : "Comment évaluer la durabilité des systèmes en production végétale ?", *Systèmes de culture innovants et durables : Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?*, Coord : R. Reau et T. Doré, éd. Educagri, 29- 52.
- BOCKSTALLER C., ESPAGNOL S., GUICHARD L., PETIT J., RAISON C., VERTÈS F. (2010) : "Stratégies de choix des méthodes et outils d'évaluation environnementale en système d'élevage", *Elevages et Environnement*, coord S. Espagnol, P. Leterme, éd. Quae, 15-64.
- BORDET A.C., BOCHU J.L., TREVISIOL A. (2010) : *Références PLANETE 2010*, Fiche 2, Production Bovins Lait strict, Solagro, Toulouse, 25 p.
- CHAMBAUT H., RAISON C., LE GALL A., PFLIMLIN A. (2007) : "Flux d'azote dans les fermes laitières intensives de l'Espace atlantique ouest-européen diagnostic des niveaux de pertes d'azote vers l'eau et l'air (projet Green Dairy)", *Renc. Recherches Ruminants*, 14, 37-40.
- DECAU M.L., DELABY L., ROCHE B. (1997) : "AzoPât : Une description quantifiée des flux annuels d'azote en prairies pâturées par les vaches laitières. II les flux du système sol - plante", *Fourrages*, 151, 313-330.
- DELABY L., JOURNET M. (2009) : "Quantifier l'énergie et l'azote fixés par les fourrages à partir des productions animales en vue d'évaluer la durabilité des élevages laitiers", *Rencontres Recherches Ruminants*, 16, 123.
- FAVERDIN P., PEYRAUD J.L. (2009) : "Nouvelles conduites d'élevage et conséquences sur le territoire", *Elevage intensifs et environnement. Les effluents : menace ou richesse ?*, Colloque Acad. Agric. de France, 28 avril 2009.
- FAVERDIN P., MAXIN G., CHARDON X., BRUNSCHWIG P., VERMOREL M. (2007) : "Modèle de prévision du bilan carbone d'une vache laitière", *Rencontres Recherches Ruminants*, 14, 66.
- GAC A. (2010) : "Ges'tim : Un outil d'évaluation des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de l'exploitation et du produit agricole", *Journée technique Gaz à effet de serre en élevage herbivores*, Institut de l'Élevage, 23 novembre, Paris. <http://www.idele.fr/spip.php?article19091>
- GARRIGUES E., CORSON M., ANGERS D., VAN DER WERF H., WALTER C. (2012) : "Soil quality in Life Cycle Assessment : Towards development of an indicator", *Ecological indicators*, 18, 434-442
- GRIFFON M. (2010) : *Pour une agriculture écologiquement intensive*, éd. de L'Aube, 112 p.
- GUILLOU M., MATHERON G. (2011) : *Neuf milliards d'hommes à nourrir - le défi de demain*, François Bourin éd., 432 p.
- INRA (2010) : *Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeurs des aliments*, éd. QUAE, Versailles, 312 p.
- Institut de l'Élevage (2010) : *Consommation d'énergie en élevage herbivores et leviers d'action*, Coll. Méthodes et Outils, Institut de l'Élevage, Paris, 93 p.
- LEDGARD S., SCHILS R., ERIKSEN J., LUO J. (2009) : "Environmental impacts of grazed clover/grass pastures", *Irish J. of Agricultural and Food Res.*, 48, 209-226.
- LE GALL A., VAN DER WERF H., RAISON C., BRAS A., ROGER F., FOUGERE M. (2007) : "Application de l'analyse du cycle de vie à deux systèmes laitiers", *Rencontres Recherches Ruminants*, 14, 64.
- LE GALL A., BEGUIN E., DOLLE J.B., MANNEVILLE V., PFLIMLIN A. (2009) : "Nouveaux compromis techniques pour concilier les impératifs d'efficacité technique et environnementale des systèmes d'élevage herbivores", *Fourrages*, 198, 131-150.
- LEMAIRE G. (2005) : "Challenges for grassland science : managing research priorities", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 108, 99-108.
- Ministère de l'Agriculture (2008) : *Plan ECOPHYTO 2018 de réduction des usages de pesticides*, Ministère de l'agriculture, 10 septembre 2008.
- PEYRAUD J.L., LE GALL A., LUSCHER A. (2009) : "Potential food production from forage legume-based-systems in Europe : an overview", *Irish J. of Agricultural and Food Res.*, 48, 115-135.
- POCHON A. (2012) : *La prairie temporaire à base de trèfle blanc*, éd. CEDAPA, Plérin, 222 p.
- RISOUD B., THEOBALD O. (2002) : *Référentiel pour l'analyse énergétique de l'exploitation agricole et son pouvoir de réchauffement global*, Enesad - Ademe, 43 p.
- RIVIERE J.M. (1999) : "Le milieu physique et ses potentialités : caractérisation des sols et du potentiel agronomique", *Systèmes d'élevage herbagers autonomes en Bretagne. Actes du colloque*, 29-30 avril 1999.
- SIMON J.C., LE CORRE L. (1992) : "Le bilan apparent de l'azote à l'échelle de l'exploitation agricole : méthodologie, exemple de résultats", *Fourrages*, 129, 79-94.
- THIEBOT J., LE CALVEZ D., GOUREC N., NICOLAS K., LE METAYER-MORICE L. (2003) : *Synthèse de l'analyse énergétique et de l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des exploitations en agriculture durable*, CEDAPA éd., Etude menée avec le soutien financier du Conseil général des Côtes d'Armor et de l'Union Européenne (programme Objectif 2), 18 p.
- THOMASSEN M., DE BOER I. (2005) : "Evaluation of indicators to assess the environmental impact of dairy production systems", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 111, 185-199.
- VAN DER WERF H., PETIT J. (2002) : "Évaluation de l'impact environnemental de l'agriculture au niveau de la ferme. Comparaison et analyse de 12 méthodes basées sur des indicateurs", *Courrier de l'environnement*, 46, 121-133.
- VAN DER WERF H., KANYARUSHOKI C., CORSON M. (2009) : "An operational method for the evaluation of resource and environmental impacts of dairy farms by life cycle assessment", *J. of Environmental Management*, 90, 3643-3652.
- VILAIN L. et al. (2008) : *La méthode IDEA. Indicateurs de durabilité des exploitations agricoles*, 3^e édition, éd. Educagri, Dijon, 184 p.