

Evaluation de l'efficacité énergétique fossile des systèmes d'élevage en Afrique de l'Ouest : adaptations et perspectives méthodologiques

M. VIGNE¹, I. BENAGABOU^{1,2}, P. FAVERDIN^{3,4}, D. COULIBALY⁵, A. BA⁵, E. VALL¹, A. KANWE⁵, M. BLANCHARD¹

¹ CIRAD, UMR Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux, Montpellier, France

² CIRDES, UR Productions Animales, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

³ INRA, UMRI1348 Pegase, F-35590 Saint-Gilles, France

⁴ Agrocampus Ouest, UMRI1348 Pegase, F-35000 Rennes, France

⁵ IER, Programme Bovins, Sikasso, Mali

Courriel : mathieu.vigne@cirad.fr

L'analyse énergétique fossile a couramment été utilisée comme méthode d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes d'élevage intensifs et mécanisés. Cet article présente et discute les adaptations de la méthode dans le cadre de son application à des systèmes d'élevage en Afrique de l'Ouest.

L'impact environnemental de l'activité d'élevage est devenu cette dernière décennie un sujet sociétal majeur. L'élevage est notamment accusé d'être un contributeur majeur au réchauffement climatique global à travers les émissions de gaz à effet de serre (Steinfeld *et al* 2006). Or, la croissance future de la population mondiale, qui devrait atteindre plus de 9,6 milliards d'individus d'ici 2050 (United Nations 2013), et le changement des modes de consommation vont exacerber les besoins futurs en protéines animales (Boland *et al* 2013). Le secteur de l'élevage se trouve donc aujourd'hui face à un double défi : réduire ses impacts environnementaux et augmenter sa production globale.

L'énergie fossile tient un rôle particulier dans ces dynamiques. Par le passé, l'accroissement de la demande alimentaire mondiale a été couvert en grande partie par l'augmentation de la productivité des systèmes agricoles, rendue possible par un recours illimité à l'énergie fossile bon marché (Pimentel *et al* 1973, Leach 1976, Fluck et Baird 1980). Mais l'application d'un tel modèle est aujourd'hui remise en question. Au-delà de la déplétion de cette ressource, l'impact environnemental de sa consommation est relié à l'émission de dioxyde de carbone (CO₂) et de dioxyde de soufre (SO₂) durant sa combustion. De plus, ces consommations ont lieu à toutes les étapes de la chaîne de production : en amont de l'exploitation pour la fabrication, la production et le transport des intrants, sur l'exploitation

pour faire fonctionner les tracteurs et les machines et, en aval pour transformer et transporter les produits. Ceci aboutit à une forte dépendance du secteur aux ressources énergétiques fossiles, ce qui n'est pas sans conséquences économiques. En effet, l'accroissement tendanciel et la variabilité du prix du pétrole brut participent à l'envolée des prix des intrants et par conséquent à celui des denrées alimentaires (Heinberg et Bomford 2009).

Le secteur de l'alimentation consomme près de 30% de l'énergie fossile produite dans le monde (FAO 2011). Un cinquième de ces consommations a lieu sur l'exploitation, principalement dans les systèmes mécanisés des pays de l'OCDE. Dans les systèmes extensifs et manuels des pays du Sud, le faible revenu de la plupart des producteurs limite l'usage d'intrants et par conséquent d'énergie fossile. Ceci explique en grande partie l'intérêt depuis plus de 30 ans pour l'analyse énergétique fossile des systèmes d'élevage des pays de l'OCDE alors que les systèmes d'élevage des pays du Sud ont été peu étudiés. Dans une large revue de 197 références sur des analyses énergétiques menées en agriculture, Vigne *et al* (2012a) ont ainsi relevé que moins de 15% des études sur les systèmes d'élevage concernaient les pays du Sud. Cependant, les performances des animaux dans les pays de l'OCDE sont déjà très élevées et les surfaces supplémentaires pour les nourrir peu disponibles. Les systèmes d'élevage des pays du Sud joueront ainsi un rôle essentiel dans la fourniture future des

protéines animales (Herrero *et al* 2010). On observe d'ailleurs, déjà dans ces contextes, une intensification notable de certains systèmes d'élevage. Il apparaît donc nécessaire dès à présent de pouvoir fournir des méthodes d'analyse environnementale pertinentes et adaptées à ces systèmes d'élevage afin d'obtenir des références actuelles et de les accompagner vers des voies d'intensification écologique.

C'est ainsi que sont apparues très récemment dans la littérature des analyses énergétiques fossiles de systèmes d'élevage en Afrique de l'Ouest. Au Burkina Faso (Benagabou 2011, Benagabou 2013, Benagabou *et al* 2013), 25 exploitations familiales en intégration agriculture-élevage du village de Koumbia (12°42' Nord, 4°24' Ouest) et 8 exploitations périurbaines en voie d'intensification de Bobo-Dioulasso (11°11' Nord, 4°17' Ouest) et Ouagadougou (12°21' Nord, 1°31' Ouest) ont été étudiées. L'objectif initial était de comparer les modes de consommation de l'énergie fossile et son efficacité d'utilisation liés à la diversité des systèmes extensifs, mais également entre les systèmes extensifs et ceux en voie d'intensification. Au sud du Mali (Vigne 2012), ce sont 13 exploitations familiales en intégration agriculture-élevage et 1 exploitation en cours d'intensification de l'activité laitière de la zone de Sikasso (11°19' Nord, 5°40' Ouest) présentant toutes une activité laitière qui ont été étudiées. L'objectif de l'étude était de comparer les efficacités

énergétiques fossiles des différents systèmes ainsi que leur consommation d'énergie fossile par litre de lait produit.

Ces deux études originales présentent des méthodologies d'analyse énergétique adaptées à ces systèmes, afin notamment de produire des premières références. En effet, Vigne *et al* (2012a) semblent démontrer que l'analyse énergétique est une méthode reconnue et validée sur les systèmes agricoles (76% des cas d'application) et les systèmes d'élevage mécanisés des pays de l'OCDE (plus de 85% des systèmes d'élevage étudiés). Or, sa faible application dans les systèmes d'élevage des pays du Sud démontre qu'elle doit tenir compte de leurs spécificités. Cet article a pour objectif de présenter les avancées conceptuelles et méthodologiques réalisées dans ces études. Il expose également les pistes d'amélioration à envisager afin de fournir des évaluations plus pertinentes et réalistes sur l'ensemble des systèmes d'élevage présents dans la zone mais également sur d'autres territoires.

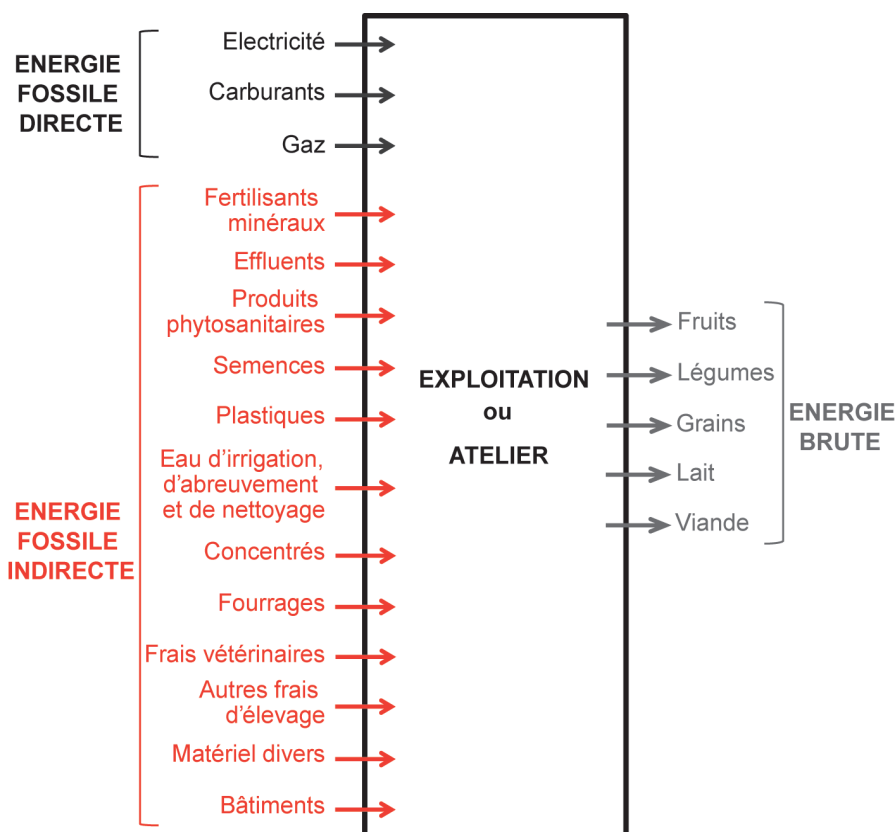
1 / Méthode d'analyse énergétique initiale

L'analyse énergétique appliquée aux systèmes agricoles mesure l'énergie fossile directement consommée pour faire fonctionner les tracteurs et les machines et indirectement pour extraire les matières premières, produire les intrants et les transporter sur l'exploitation (IFIAS 1974). Les énergies directes considérées sont l'électricité, les carburants et le gaz alors que les entrées d'énergie indirectes sont représentées par les intrants des cultures (engrais, phytosanitaires, eau d'irrigation, semences...) et du troupeau (concentrés, fourrages, frais vétérinaires, sels et minéraux, eau d'abreuvement...) ainsi que le matériel et les bâtiments de l'exploitation ou de l'atelier étudié (figure 1).

Cette méthode est souvent catégorisée comme une méthode « entrée-sortie » car elle considère le système étudié comme une boîte noire, et mesure les entrées et les sorties d'énergie du système. Elle peut également être considérée comme une analyse de cycle de vie partielle, car elle considère les consommations du berceau à la porte de la ferme (« *cradle-to-gate* »), et monocritère, bien qu'elle puisse être associée à d'autres indicateurs environnementaux et/ou sociaux.

Sa méthodologie originale consiste dans un premier temps à lister et quantifier l'ensemble des énergies directes, des intrants des cultures, des intrants du troupeau consommés sur le système, ainsi que le matériel et les bâtiments présents.

Figure 1. Représentation schématique des entrées et des sorties d'énergie initialement prises en compte dans l'analyse énergétique fossile.



Est ensuite affecté à chacun des intrants un coefficient énergétique fossile représentant le plus précisément possible l'énergie fossile par unité d'intrant nécessaire à l'extraction des matières premières, sa fabrication et son transport. Les différents produits du système sont également listés et leur énergie brute, correspondant à l'énergie calorifique intrinsèque, est quantifiée par unité de produit. Les produits considérés sont traditionnellement les produits à destination de l'alimentation humaine (lait, viande, céréales).

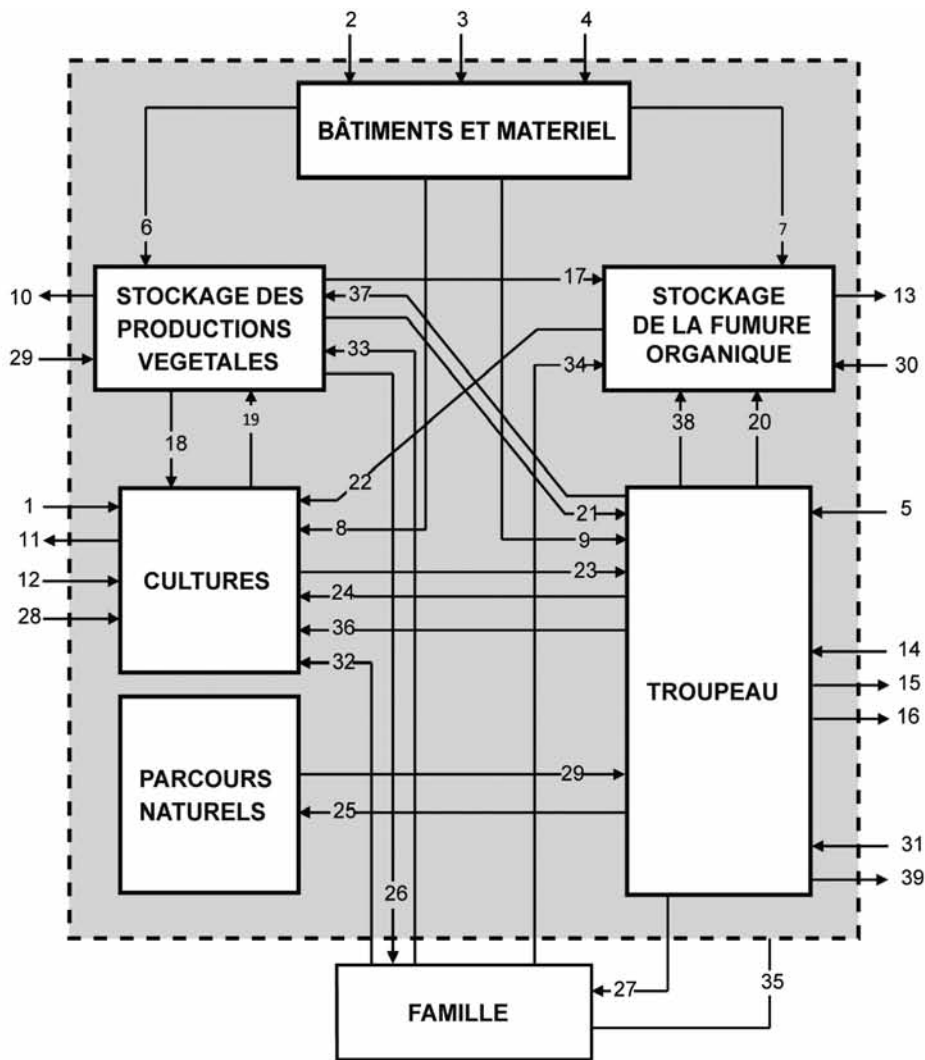
Son application conduit principalement à deux types d'indicateurs : des indicateurs de consommation d'énergie fossile et des indicateurs d'efficacité d'utilisation de l'énergie fossile appelée également efficacité énergétique fossile (Vigne *et al* 2013). La consommation d'énergie fossile représente la consommation d'énergie fossile totale calculée grâce au produit des quantités consommées de chacun des intrants par son coefficient énergétique spécifique. Cette consommation est alors exprimée soit par unité de structure (hectare ou nombre d'animaux présents), soit par unité de produit (kg, L, MJ, unité monétaire) ([1]).

Consommation d'énergie fossile =
$$\left[\sum (\text{Quantité d'intrants (en kg, L, ...)}) \times \text{Coefficients énergétiques spécifiques (en MJ.kg}^{-1}, \text{MJ.L}^{-1}, \text{...}) \right] / \text{Unité fonctionnelle (en kg, L, ha, UBT, ...) [1]$$

L'efficacité énergétique fossile correspond au ratio de l'énergie brute totale produite par le système et de ses consommations d'énergie fossile [2]. Elle est habituellement exprimée sans unité, mais peut également être exprimée en MJ d'énergie brute par MJ d'énergie fossile.

Efficiéce énergétique fossile =
$$\frac{\text{Energie brute produite (en MJ)}}{\text{Consommation d'énergie fossile totale (en MJ)}} [2]$$

En France, l'outil Dia'terre® (ADEME 2013), issu principalement de l'outil PLANETE (Risoud et Théobald 2002), est actuellement reconnu pour l'évaluation énergétique des systèmes agricoles. Il permet d'évaluer le système soit à l'échelle de l'exploitation soit des différents ateliers. La répartition des énergies par atelier se fait pour les postes fioul et électricité à partir de ratios de consommations d'énergie déjà disponibles dans l'outil qui permettent d'estimer une consommation théorique de chaque atelier. Pour les autres postes d'énergie, cette répartition s'effectue à partir de la répartition en pourcentage fournie par l'utilisateur. Les indicateurs proposés sont exprimés en consommations d'énergie par unité fonctionnelle (ha, kg, L...). Cette unité fonctionnelle est préalablement indiquée par l'utilisateur pour chacun des ateliers. L'outil ne permet donc pas d'allouer les consommations d'énergie

Figure 2. Schéma de flux générique des systèmes d'élevage en Afrique de l'Ouest.


1. Intrants des cultures (engrais, herbicides, fumure organique extérieure...)
2. Bâtiments
3. Matériel
4. Energies directes (Electricité, Carburants, Gaz)
5. Intrants du troupeau (concentrés, fourrages, coûts vétérinaires...)
6. Matériel, bâtiments et énergies directes utilisés pour le stockage des productions végétales
7. Matériel, bâtiments et énergies directes utilisés pour le stockage de la fumure organique
8. Matériel, bâtiments et énergies directes utilisés pour les cultures
9. Matériel, bâtiments et énergies directes utilisés pour le troupeau
10. Productions végétales stockées et vendues ou cédées
11. Biomasse issue des cultures pâturées par des troupeaux extérieurs ou récoltées par d'autres exploitations
12. Fumure organique épandue ou déposée durant le pâturage de troupeaux extérieurs
13. Fumure organique stockée et vendue ou cédée
14. Alimentation des animaux (concentrés et fourrages)
15. Produits animaux vendus ou cédés (lait, viande, effluents)
16. Effluents directement déposés durant le pâturage du troupeau sur des cultures extérieures
17. Production végétale utilisée directement pour la production de fumure organique
18. Productions végétales stockées et utilisées comme graines
19. Productions végétales produites par les cultures et stockées
20. Effluents produits par le troupeau et stockés
21. Productions végétales stockées et distribuées au troupeau
22. Fumure organique stockée et épandue sur les cultures
23. Productions végétales pâturées par le troupeau ou récoltées et distribuées directement au troupeau
24. Effluents directement déposés par le troupeau durant le pâturage sur les cultures
25. Effluents directement déposés par le troupeau durant le pâturage sur les parcours naturels
26. Productions végétales stockées et consommées par la famille
27. Produits animaux consommés par la famille
28. Travail humain et animal extérieur réalisé sur les cultures
29. Travail humain et animal extérieur réalisé pour le stockage des productions végétales
30. Travail humain et animal extérieur réalisé pour le stockage de la fumure organique
31. Travail humain et animal extérieur réalisé sur le troupeau
32. Travail humain familial réalisé sur les cultures
33. Travail humain familial réalisé pour le stockage des productions végétales
34. Travail humain familial réalisé pour le stockage de la fumure organique
35. Travail humain familial réalisé sur le troupeau
36. Travail animal issu du troupeau réalisé sur les cultures
37. Travail animal issu du troupeau réalisé pour le stockage des productions végétales
38. Travail issu du troupeau réalisé pour le stockage de la fumure organique
39. Travail issu du troupeau réalisé à l'extérieur

entre différents coproduits d'un même atelier. À l'échelle internationale, dans une revue de l'application de trois méthodes (Analyse énergétique fossile, Empreinte écologique et méthode « *Emergy* »), Vigne *et al* (2012a) ont mis en lumière 244 cas d'application de l'analyse énergétique fossile. La plupart de ces études ont été réalisées grâce à des méthodes originales adaptées à la production et au système étudié. Ces méthodes suivent la même logique que la méthode Dia'terre® à l'exception des indicateurs. En effet, les consommations d'énergie par unité fonctionnelle sont complétées pour certaines études par un indicateur d'efficacité énergétique. De plus, si la plupart des études s'intéressent à des systèmes spécialisés, certaines études proposent d'allouer les consommations d'énergie entre les différents coproduits de l'exploitation ou de l'atelier selon différentes bases : économique, massique, énergétique, protéique, biologique ou par expansion de système. Or, ce choix d'allocation n'est pas sans conséquence sur le résultat obtenu (Cederberg et Stadig 2003, Dollé *et al* 2011).

2 / Adaptations méthodologiques aux systèmes d'élevage d'Afrique de l'Ouest

Afin de mener les analyses énergétiques fossiles tout en répondant à la spécificité et à la complexité des systèmes d'élevage de l'Afrique de l'Ouest, l'application de la méthode initiale a nécessité la mise en place des adaptations méthodologiques communes ou spécifiques. Les deux premières adaptations, plus conceptuelles, concernent la délimitation du système étudié avec le questionnement de l'échelle d'analyse et des composantes à inclure dans le système. Les suivantes, plus techniques et applicables quelle que soit l'échelle d'analyse, sont liées à la construction de coefficients énergétiques fossiles pour le travail humain et animal ainsi qu'à la prise en compte des produits animaux. L'ensemble de ces adaptations méthodologiques a notamment abouti à la construction d'un schéma de flux générique original permettant les analyses énergétiques fossiles à l'échelle de l'exploitation et des différentes composantes du système (figure 2).

2.1 / Prise en compte de la mobilité des troupeaux hors exploitation

L'étude de systèmes agropastoraux de l'Afrique de l'Ouest pose la question de la définition des limites spatiales du système qui est primordiale dans les méthodologies de type « entrée/sortie ». En effet, ces choix peuvent influencer grandement la prise en compte des entrées et des sorties d'énergie fossile du système

et donc les résultats obtenus. Si la définition de ces limites semble évidente concernant les systèmes en pâturage et/ou en stabulation, cela l'est beaucoup moins lorsqu'apparaît la mobilité journalière ou saisonnière des animaux hors exploitation. Dans les systèmes d'Afrique de l'Ouest, cette mobilité s'illustre par la vaine pâture des parcours post-cultureux, l'utilisation de parcours naturels communs sur le territoire voire la possibilité de transhumance sur d'autres territoires aux saisons défavorables.

Se basant sur les interactions directes entre les parcours naturels et le troupeau durant leur pâture ainsi que leur gestion collective par les éleveurs, Vigne *et al* (2012a) proposent d'inclure ces surfaces dans le système. De plus, si la fumure organique déposée sur les parcours naturels ne permet pas de fertiliser les champs et de favoriser la production agricole, celle-ci améliore la productivité des parcours naturels et par conséquent l'efficacité énergétique fossile globale du système. Ces surfaces étant partagées le plus souvent entre différents troupeaux, la surface en parcours utilisée par chacun des troupeaux peut être estimée à partir de la productivité annuelle des parcours et d'un prélèvement moyen calculé selon le nombre d'animaux présents et leur temps de présence respectif [3].

Surface de parcours utilisé (*en ha*) = $[\text{Prélèvement (en kgMS.UBT.j}^{-1}) \times \text{Animaux présents (en UBT)} \times \text{Temps de présence (en j)}] / \text{Productivité annuelle des parcours (en kgMS.ha}^{-1})$ [3].

Contrairement aux parcours naturels, les surfaces utilisées pour la vaine pâture sont exclues du système dans les deux études. En effet, bien que les biomasses soient prélevées directement par le troupeau, l'éleveur n'a aucun moyen d'intervenir sur les modes de production de cette ressource et donc sur son coût en énergie fossile. Les surfaces de culture comptabilisées sont donc les surfaces propres à l'exploitation et les résidus de culture consommés sont donc considérés comme des fourrages importés.

2.2 / Analyse de flux multiéchelle

Comme effectué par la méthode Dia'terre®, il apparaît pertinent de mener des analyses différenciées aux différentes échelles de l'exploitation, depuis l'échelle globale jusqu'à l'échelle des ateliers ou composantes productives (surfaces et troupeau). L'analyse à l'échelle du troupeau par exemple semble pertinente pour produire des résultats précis de la valeur en énergie fossile de chacun des produits du troupeau, qu'ils soient auto-consommés ou exportés de l'exploitation,

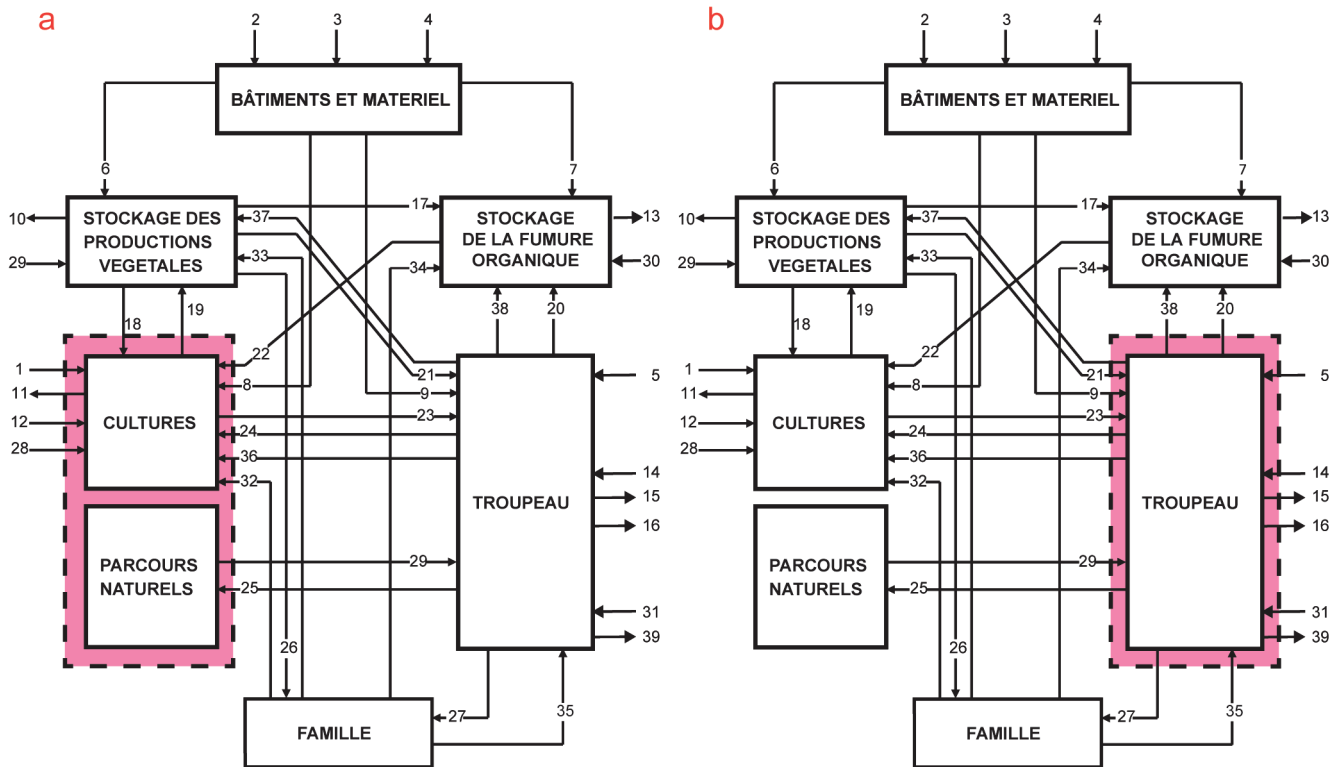
et ceci par le biais d'une allocation énergétique. Ceci permet des comparaisons orientées « produit » plus justes, notamment dans le cas de systèmes contrastés. Le niveau des indicateurs est effectivement fortement dépendant non seulement de l'importance des différents produits du troupeau, mais également des autres activités de l'exploitation. L'analyse à l'échelle de l'exploitation n'offre qu'une photographie globale du système. De plus, l'analyse à l'échelle du troupeau permet de se soustraire de la question de la définition des limites du système et des différents choix proposés. Enfin, l'analyse à l'échelle des différents types de surface de l'exploitation est également intéressante car elle permet d'offrir une évaluation des modes de production des ressources autoproduites sur l'exploitation et consommées par le troupeau, et de leur coût en énergie fossile. Elle offre en cela des pistes de réduction des entrées d'énergie fossile à l'échelle du troupeau et par conséquent d'amélioration de l'efficacité énergétique fossile des productions animales.

Cependant, plutôt que de diviser les consommations globales entre les ateliers *via* des ratios de consommations d'énergie préétablis ou des pourcentages fournis par l'utilisateur, nous proposons d'établir les répartitions selon les flux d'énergie interne. Les flux d'énergie fossile entrant dans l'exploitation *via* une composante sont ainsi répartis selon une allocation énergétique entre les différents produits de cette même composante. Par conséquent, un flux d'énergie peut être, selon l'échelle d'étude choisie, une entrée d'énergie fossile, une sortie d'énergie, ou bien ne pas être comptabilisé. Par exemple, le travail animal réalisé par les animaux de l'exploitation sur les cultures (flux n° 36, figure 2) est une entrée d'énergie fossile lorsque l'analyse se situe à l'échelle des surfaces (figure 3a) ou à l'inverse une sortie d'énergie lorsque l'échelle d'analyse est le troupeau (figure 3b).

2.3 / Comptabilisation de l'énergie humaine et animale comme entrée d'énergie fossile

Plusieurs études avaient précédemment inclus l'énergie du travail humain et animal comme intrants dans l'analyse énergétique de systèmes agricoles manuels (Gajaseni 1995, Mrini *et al* 2001, Kaltsas *et al* 2007). Cependant, l'énergie humaine et animale était alors quantifiée selon la dépense calorifique mesurée lors des travaux réalisés. Or, additionnée aux entrées d'énergie fossile, cette méthode s'éloigne de l'objectif initial de l'analyse énergétique fossile. En effet, suivant cet objectif, ces dépenses d'énergie calorifique doivent être transformées

Figure 3. Prise en compte des flux d'énergie entrants et sortants selon le système étudié : les surfaces (a) ou le troupeau (b). Les flux entrants (n° 1, 8, 12, 18, 24, 25, 28, 32) et sortants (n° 11, 19, 23, 29) comptabilisés pour les surfaces sont différents des flux entrants (n° 5, 9, 14, 21, 23, 29, 31, 35) et sortants (n° 15, 16, 20, 24, 25, 27, 36, 37, 38, 39) comptabilisés pour le troupeau.



en énergie fossile nécessaire pour leur production à partir de coefficients énergétiques fossiles spécifiques. La prise en compte de l'énergie fossile nécessaire au travail humain et animal est d'autant plus pertinente que l'on s'intéresse à des exploitations familiales ayant pour une large part recours à ces deux sources d'énergie en l'absence de mécanisation. Dans les systèmes étudiés et exposés précédemment, le travail représenterait ainsi de 5 à 9% des entrées d'énergie fossile dans les systèmes d'élevage de Sikasso (Vigne, 2012).

a) Travail humain

Le calcul des consommations d'énergie fossile liées au travail humain s'effectue en trois étapes.

La première étape consiste dans la quantification des dépenses d'énergie calorifique lors des travaux réalisés. Face à la diversité des valeurs trouvées dans la littérature pour ces dépenses, celles-ci se basent dans un premier temps sur des degrés de pénibilité propres à chaque territoire. Ces degrés de pénibilité, compris entre 1 (facile) et 5 (difficile), sont établis pour chacune des activités à dire d'experts. Au Mali par exemple, ces degrés de pénibilité ont été établis directement par enquête auprès d'un panel d'agro-éleveurs alors qu'ils sont issus de la représentation des chercheurs au Burkina Faso.

Ce degré de pénibilité permet dans une deuxième étape de calculer la dépense énergétique par heure de travail réalisée selon une pondération entre des valeurs minimales (0,703 MJ.h⁻¹ pour la conduite d'engins motorisés) et maximales (1,481 MJ.h⁻¹ pour le labour manuel) correspondant à des degrés de pénibilité respectifs de 1 et 5. Ces valeurs minimales et maximales sont issues de valeurs trouvées dans la littérature pour le travail d'un homme (Passmore et Durmin 1955). Le tableau 1 donne ainsi des exemples de valeurs de dépenses énergétiques calculées au Burkina Faso et au Mali. Se basant sur les besoins énergétiques journaliers moyens pour une femme et un enfant âgé de moins de 14 ans (FAO et OMS 1973), Vigne (2012) propose des valeurs de dépenses énergétiques liées au travail humain qui s'élèvent, pour une femme, à 80% de la valeur retenue pour un homme, et à 60% pour un enfant.

La troisième étape consiste à quantifier l'énergie fossile nécessaire à la production de l'alimentation permettant de réaliser les différents travaux. Idéalement, cette étape nécessite de décrire précisément la ration alimentaire des personnes fournissant les travaux et le coût énergétique des différents aliments constituant cette ration. Dans les contextes bien référencés tels que ceux des pays de l'OCDE où les modes de consommation sont bien connus et les analyses énergétiques fossiles des produits agri-

coles courantes, une telle approche semble envisageable. Toutefois, compte-tenu du manque de références dans certains contextes, Vigne (2012) propose de simplifier ce calcul en se basant sur l'énergie fossile nécessaire à la production d'1 MJ d'origine animale (E_{PA}) et végétale (E_{PV}) exprimée en MJ.MJ⁻¹, la part de productions animales (p_{PA}) et végétales (p_{PV}) dans 1 MJ alimentaire consommé et l'efficacité de conversion de l'énergie alimentaire en travail (Eff_{aliment/travail}) [4].

Coefficient énergétique fossile du travail humain (en MJ.MJ⁻¹) = (E_{PA} × p_{PA} + E_{PV} × p_{PV}) / Eff_{aliment/travail} [4]

Ainsi, en l'absence de références au Mali, des valeurs contextualisées pour l'E_{PA} et l'E_{PV} ont été calculées à partir des 14 exploitations étudiées. Elles sont issues des résultats d'une analyse énergétique fossile préliminaire appliquée à ces exploitations et sans prise en compte du travail humain comme entrée d'énergie fossile. Les résultats obtenus pour le coût en énergie fossile des productions animales à destination de l'alimentation humaine (E_{PA}) s'élevaient à 0,90 MJ.MJ⁻¹ d'énergie produite et, à 0,02 MJ.MJ⁻¹ d'énergie produite pour les productions végétales à destination de l'alimentation humaine (E_{PV}). Toujours en l'absence de références contextualisées, les valeurs de p_{PA} et p_{PV} sont issues de la perspective Agrimonde (Paillard *et al* 2010) qui

Tableau 1. Degrés de pénibilité retenus et dépenses énergétiques calculées en fonction du degré de pénibilité pour cinq travaux réalisés par des hommes dans les deux contextes d'étude.

Type de travaux	Burkina Faso (Benagabou <i>et al</i> 2013)		Mali (Vigne 2012)	
	Degré de pénibilité retenu	Dépense Énergétique (MJ.h ⁻¹)	Degré de pénibilité retenu	Dépense Énergétique (MJ.h ⁻¹)
Distribution des aliments	2	0,858	1,5	0,754
Apport d'engrais minéraux	2	0,858	2	0,858
Labour manuel	5	1,481	5	1,481
Récolte des grains	4	1,274	2,5	0,962
Traite	1	0,650	2,5	0,962

estimait une consommation quotidienne en Afrique de 2366 kcal.hab⁻¹.j⁻¹ dont 5% d'origine animale. Enfin, bien que celle-ci soit largement dépendante de nombreux facteurs, notamment le type d'activité et les conditions climatiques, une valeur de 20% correspondant au rendement du travail mécanique brut a été retenue pour l'Eff_{aliment/travail} (Lacour 2011).

b) Travail animal

Les coefficients énergétiques fossiles utilisés pour le travail animal obéissent dans un premier temps à un mode de calcul similaire à ceux du travail humain. Des valeurs de dépense énergétique issues de la littérature pour le transport (Lawrence et Stibbards 1990) et le labour (Fall *et al* 1997) sont considérées comme valeurs minimale et maximale puis des valeurs pour les autres travaux sont calculées selon le même ratio d'énergie dépensée que pour les valeurs humaines. Pour exemple, comme pour le travail humain, le coefficient énergétique animal pour le buttage s'élève à 83% de celui du labour.

Par la suite, le calcul du coût en énergie fossile du travail animal est différent selon l'origine du travail, qu'il soit interne ou extérieur à l'exploitation. Lorsque le travail est interne à l'exploitation, le coût en énergie fossile est calculé à partir d'un bilan énergétique à l'échelle de l'animal. Ce dernier prend alors en compte en entrée les différentes consommations énergétiques, principalement sous forme d'alimentation et de frais vétérinaires, et en sortie les différents produits de l'animal (travail, lait, viande, effluents) afin d'effectuer une allocation de l'énergie utilisée. Lorsque le travail est réalisé par des animaux issus d'autres exploitations, il apparaît difficile de connaître la gestion de l'animal et de calculer un bilan de façon similaire. Nous proposons ainsi d'affecter comme coût d'énergie fossile au travail animal extérieur une moyenne des coûts du travail interne calculés

dans l'ensemble des exploitations. Au Mali, le coefficient énergétique fossile pour le travail animal s'élevait par exemple en moyenne à 0,03 MJ d'énergie fossile par MJ de travail animal (Vigne 2012).

2.4 / Prendre en compte les différents produits de l'élevage

Les précédentes études sur l'efficacité énergétique fossile des systèmes d'élevage se sont contentées de quantifier en sortie du système étudié (exploitation ou atelier d'élevage) les produits du troupeau à finalité alimentaire : le lait et la viande. Compte tenu du rôle multiproductif des animaux dans les systèmes familiaux d'Afrique de l'Ouest, il apparaît nécessaire de considérer les effluents et le travail animal comme produits du troupeau ou de l'exploitation selon l'échelle d'étude choisie.

a) Effluents

La non-prise en compte des effluents dans les systèmes intensifs précédemment étudiés s'explique principalement par la part très faible que ces derniers représentent dans l'énergie exportée par ces exploitations. Dans une comparaison de systèmes laitiers issus de contextes très diversifiés, Vigne *et al* (2013) ont ainsi démontré que ceux-ci représentaient moins de 1% des sorties énergétiques à l'échelle de l'exploitation dans les systèmes laitiers de Bretagne, du Poitou-Charentes et de La Réunion. Or, ceux-ci représentaient en moyenne 27% de l'énergie exportée par les exploitations du Mali. Cette importance tendrait donc à valider leur prise en compte pour ce type de système. De plus, la non-prise en compte des effluents reviendrait à dénigrer le rôle de production de cette ressource par le troupeau qui est pourtant l'un des rôles primordiaux des animaux dans ces systèmes (Randolph *et al* 2007, Herrero *et al* 2010).

La prise en compte de la fraction des effluents exportés comme sortie d'éner-

gie du système devrait être basée sur leur contenu en énergie calorifique. Ce contenu en énergie calorifique peut être estimé soit à partir de mesures directes en laboratoire par calorimétrie, soit à partir de références bibliographiques (Richard *et al* 1990, Risoud et Théobald 2002). La fraction des effluents comptabilisée comme sortie d'énergie du système est différente selon l'échelle d'analyse. À l'échelle de l'exploitation, seuls les effluents exportés hors de l'exploitation seront comptabilisés comme sortie d'énergie (figure 2) alors qu'à l'échelle du troupeau, c'est la totalité des effluents qui sera considérée (figure 3b).

b) Traction animale

La comptabilisation de la traction animale comme sortie d'énergie du système avait été logiquement négligée dans les précédentes études concernant des systèmes d'élevage intensifs car aucun troupeau analysé ne comportait des animaux de traction. La part faible de la traction animale dans les sorties énergétiques totales des exploitations étudiées au Mali (moins de 1% de l'énergie produite) montrée par Vigne *et al* (2013) pourrait remettre en cause sa prise en compte dans ces systèmes. Cependant, cette valeur s'élève à 11% lorsque l'on s'intéresse seulement aux produits énergétiques du troupeau, quelle que soit leur destination. De plus, ces valeurs concernent des systèmes où le nombre d'animaux de trait représente une part faible du troupeau. Cette prise en compte pourrait se révéler d'autant plus intéressante dans des troupeaux spécialisés dans la traction animale. La prise en compte de l'énergie dépensée lors de la traction animale comme sortie d'énergie du système s'effectue alors par la quantification des dépenses énergétiques durant les travaux réalisés comme expliqué précédemment lors de la première étape du calcul du coût en énergie fossile de la traction animale. Comme pour les effluents, la fraction de la traction animale à prendre en compte comme sortie énergétique du

système est différente selon l'échelle d'analyse. À l'échelle de l'exploitation, seule la fraction correspondante à la traction animale réalisée à l'extérieur de l'exploitation sera comptabilisée comme sortie d'énergie (figure 2) alors qu'à l'échelle du troupeau, c'est la totalité de la traction animale qui devra être comptabilisée (figure 3b).

3 / Discussion

3.1 / Des premières références originales

L'application de la méthode d'analyse énergétique adaptée aux systèmes d'élevage de l'Afrique de l'Ouest dans les deux études précédemment citées montre des résultats communs concernant l'efficacité énergétique fossile supérieure des systèmes à dominante agricole par rapport aux autres systèmes plus orientés vers l'élevage. Au Burkina Faso (Benagabou 2011, Benagabou 2013, Benagabou *et al* 2013), les efficacités énergétiques fossiles des « Petits agriculteurs » et des « Agricultures moyens » étaient les plus élevées (respectivement 18,1 et 16,2) suivis des « Grands éleveurs » (14,5), des « Éleveurs moyens » (10,5) et des « Agro-éleveurs » (8,8). Au Mali, les exploitations du type « Agriculteurs » possédaient également l'efficacité énergétique fossile la plus élevée (14,1) suivi des « Éleveurs » (11,2). Les « Agro-éleveurs » affichaient quant à eux une valeur inférieure à ces exploitations (7,2). Ces résultats vont dans le sens des précédentes études réalisées de par le monde témoignant de l'efficacité énergétique fossile plus élevée des systèmes en productions végétales en comparaison des productions animales (Kuesters et Lammel 1999, Singh *et al* 2002, Canakci *et al* 2005).

Les deux études ont également montré une plus faible efficacité des systèmes périurbains (1,3 au Burkina Faso et 1,8 au Mali) face aux systèmes familiaux plus extensifs cités précédemment. Ces efficacités se rapprochent d'ailleurs de celles des systèmes d'élevage précédemment étudiés en France dont les valeurs se situaient généralement entre 0,5 et 1 (Benoit et Laignel 2010, Veyssset *et al* 2010). En effet, ces systèmes, basés sur l'intensification des productions animales, montrent des traits communs aux systèmes intensifs des pays de l'OCDE tels que la présence de bâtiments ou encore des apports de concentrés et de frais vétérinaires importants. Ces pratiques sont d'ailleurs caractérisées par une part de ces intrants dans les entrées énergétiques totales plus élevée et entraînent une augmentation importante des consommations d'énergie fossile. Au-delà

d'une faible présence de cultures de vente qui tend à améliorer l'efficacité énergétique fossile de l'exploitation, les valeurs supérieures des systèmes d'élevage extensifs sont principalement dues à la nature des ressources utilisées pour nourrir le troupeau et à leur coût inférieur en énergie fossile. En effet, la biomasse prélevée sur les parcours naturels par exemple, ne nécessite aucune énergie fossile. Son utilisation diminue d'autant les entrées d'énergie fossile qu'elle se substitue aux ressources alimentaires fortement consommatrices en énergie fossile principalement utilisées dans les systèmes intensifs tels que les fourrages et les concentrés importés ou autoproduits. De plus, dans les systèmes extensifs manuels, compte tenu de la difficulté d'accès aux intrants, en particulier à la mécanisation et aux fertilisants minéraux, les autres ressources alimentaires utilisées par le troupeau sont principalement produites à partir de la traction animale et du travail humain, eux aussi peu consommateurs d'énergie fossile. Cependant, leur meilleure efficacité énergétique fossile est à mettre en balance avec leurs besoins supérieurs en surface engendrés par un recours important à la mobilité. Ces systèmes entrent ainsi en compétition directe pour l'accès aux surfaces arables avec l'activité agricole nécessaire à l'accroissement de la population rurale dans ces régions et notamment dans les zones périurbaines (Dugué *et al* 2004).

Enfin, les résultats obtenus sur le coût en énergie fossile d'un litre de lait produit par l'étude de cas au Mali offrent également des premières références pour les systèmes laitiers en Afrique de l'Ouest. Les valeurs obtenues s'élevaient de 0,09 MJ.L⁻¹ pour les systèmes extensifs à 0,18 MJ.L⁻¹ pour les périurbains en voie d'intensification. Ces valeurs sont largement inférieures à l'efficacité énergétique fossile des différents systèmes laitiers précédemment étudiés en Europe, depuis des systèmes extensifs jusqu'à des systèmes hors sol, dont les valeurs s'étendent de 1,3 à 6,6 MJ.L⁻¹ (Vigne *et al* 2013). Ceci tend à confirmer la capacité de ces systèmes d'élevage à participer à la fourniture de produits animaux à un moindre coût en énergie fossile.

3.2 / Une nécessité de mobiliser de grandes bases de données

La multiplication des flux à quantifier, consécutive à la décomposition du système pour l'analyse à l'échelle des composantes, et l'ouverture à l'énergie humaine et animale tendent à complexifier l'application de l'analyse énergétique fossile en augmentant la quantité de données nécessaires.

Toutefois, les analyses énergétiques fossiles courantes s'appuient sur les postes de charges communément quantifiés et les différents produits de l'exploitation couramment évalués dans les études économiques. En cela, elles permettent de s'appuyer sur des bases de données déjà existantes. Dans les pays de l'OCDE, des systèmes d'information basés sur le suivi d'un réseau d'exploitations considérées comme représentatives sont souvent disponibles. On peut citer par exemple en France la base DIAPASON détenue par l'Institut de l'Élevage (Charroin *et al* 2005). À l'inverse, les références sur le secteur de l'élevage dans les pays du Sud sont faibles. Des initiatives telles que le « *World Watch Agriculture Initiative* » existent (CIRAD 2011), mais sont encore peu développées. En effet, la constitution de connaissances sur les systèmes d'élevage représente un défi méthodologique en raison tout d'abord de la prédominance de l'élevage paysan, difficile à renseigner. Par ailleurs, le déficit de connaissances est fortement lié à des situations locales politiques et économiques difficiles (Duteurtre *et al* 2011). Dans ces contextes, un suivi d'exploitation sur la période étudiée, bien que consommateur en temps et pouvant mener à un dispositif coûteux, constitue probablement l'option idéale afin d'améliorer la qualité et la précision des données.

Enfin, le recours à la modélisation ne peut être également négligé quel que soit le contexte. En effet, l'utilisation de modèles d'exploitation, à condition que ceux-ci soient adaptés au contexte étudié, pourrait permettre de générer de vastes ensembles de données.

3.3 / Une méthodologie à améliorer

a) Faciliter l'adaptation des coefficients énergétiques fossiles à de nouveaux territoires

L'adaptation de coefficients énergétiques fossiles des différents intrants au contexte étudié est une étape clé pour produire des résultats représentatifs des territoires. Vigne *et al* (2012b) ont montré que le choix de coefficients issus de la littérature mais non adaptés au territoire, pouvait donner une incertitude de $\pm 17\%$ autour de la moyenne, biaisant les comparaisons entre territoires. Cependant, l'analyse du cycle de vie d'un intrant pour évaluer la consommation d'énergie fossile nécessaire à sa production peut s'avérer fastidieuse. En effet, elle demande une connaissance importante de leurs modes et lieux de production et implique donc une grande collaboration entre les chercheurs et les industriels. Or, les données industrielles sont souvent peu disponibles. La mise

en place de bases de données détaillées concernant les consommations d'énergie fossile nécessaires à la production d'intrants agricoles sur d'autres territoires que les territoires européens et nord-américains, couramment étudiés et bien référencés, pourrait ainsi constituer une aide supplémentaire pour mener ce genre d'analyse.

b) Mettre en place un référentiel des dépenses énergétiques liées au travail humain et animal

La littérature offre de nombreuses références de dépenses énergétiques pour des activités et des contextes diversifiés. Concernant le travail humain, Vaz *et al* (2005) offrent par exemple une synthèse importante de valeurs concernant différents travaux dont des travaux agricoles. Cependant, les valeurs observées pour des mêmes travaux sont souvent variables. Face à cette variabilité et afin de produire des références de dépenses énergétiques liées au travail au plus juste, la solution idéale serait de produire des valeurs propres à chaque étude basées sur des mesures directes. Ces mesures directes peuvent être effectuées selon plusieurs méthodes (Acheson *et al* 1980), mais elles nécessitent toutes des équipements coûteux financièrement et du temps. En ce sens, une étude globale représentant les différentes situations et prenant en compte les différents facteurs sociologiques, techniques et pédo-climatiques pourrait être menée. Elle pourrait s'appuyer soit sur une méta-analyse des différentes études ayant déjà mesuré ces travaux, soit sur un réseau global d'études concernant les différentes conditions le plus exhaustivement possible et réalisant des mesures directes.

Dans l'attente de tels dispositifs, la méthodologie proposée ici, basée sur des degrés de pénibilité adaptés au contexte, apparaît pertinente. Cependant, nous avons remarqué que la différence d'approche pour l'établissement de ces degrés de pénibilité n'est pas sans impact sur les valeurs obtenues (tableau 1). Pour la récolte des grains par exemple, le degré de pénibilité établi par les scientifiques s'élevait à 4 alors que celui issu des enquêtes auprès des agriculteurs maliens était de 2,5 en moyenne. Il apparaît difficile de conclure sur les facteurs responsables d'une telle différence. Celle-ci peut être la conséquence des spécificités de chaque territoire (*e.g.* technique utilisée, type de matériel, structure du sol, classe d'âge effectuant les travaux) qui sont à l'origine de ces différences ou de la représentation biaisée qu'ont les chercheurs de la pénibilité des travaux par rapport à celle des agriculteurs. Il apparaît donc plus pertinent de faire établir ces degrés de pénibilité par les agri-

culteurs eux-mêmes en essayant de cerner l'ensemble des types de producteurs. Il pourrait d'ailleurs être intéressant d'approfondir cette approche autour de la définition de la pénibilité par les sciences humaines.

c) Améliorer la prise en compte de la multifonctionnalité de l'élevage

En comptabilisant la production d'effluents et la traction animale sous forme d'énergie, nous considérons que l'analyse énergétique telle qu'appliquée dans les deux territoires représente un progrès dans la prise en compte de la multifonctionnalité de l'élevage par des méthodes d'évaluation environnementale.

Il peut paraître étonnant de considérer sur le même plan qualitatif l'énergie des produits alimentaires et l'énergie de produits non alimentaires tels que les effluents. Ceci d'autant plus que la lutte contre l'insécurité alimentaire constitue toujours un des enjeux majeurs auxquels doivent faire face les pays du Sud. Selon la FAO (2013), ce serait plus de 800 millions de personnes qui ont souffert de sous-nutrition et de malnutrition entre 2011 et 2013 dans le monde. L'Afrique sub-saharienne est notamment pointée comme la région dans le monde la plus touchée. L'amélioration des productivités des systèmes dans cette zone devrait être ainsi prioritaire afin de rendre accessible à un plus grand nombre l'alimentation produite. La comptabilisation des effluents et de la traction animale en addition des produits alimentaires n'est toutefois pas un non-sens considérant l'objectif de sécurité alimentaire dans ces zones. En effet, compte tenu de l'accessibilité difficile aux fertilisants minéraux et à la mécanisation, ces deux éléments sont des composantes essentielles de la durabilité de ces systèmes, notamment en améliorant significativement la productivité des cultures (Williams 1997, Savadogo *et al* 1998, Guthiga *et al* 2007, Rufino *et al* 2007) et, par conséquent, en améliorant la fourniture alimentaire pour la famille ou les produits de rente.

Cependant, au-delà du rôle de producteur d'aliments, d'effluents pour la fumure organique et de force de traction, les autres fonctions de l'élevage dans ces zones sont multiples. En l'absence d'assurance et de services institutionnels adaptés, il détient un rôle de capital mobilisable qui est essentiel pour faire face aux risques divers et fréquents auxquels sont soumises ces familles (Dedieu *et al* 2011). L'élevage offre également un ensemble de services environnementaux (Millennium Ecosystem Assessment 2005). La gestion raisonnée des parcours par exemple permet une régulation des écosystèmes en évitant la fermeture des

milieux ou la restauration de zones dégradées (Blanfort *et al* 2011). Même lorsqu'il est peu productif, l'élevage joue également un rôle social important à travers la structuration des réseaux, les dons, les héritages ou le « confiage » (Alary *et al* 2011). Or, ces autres rôles ne sont pas encore comptabilisés sous forme d'énergie. Afin de ne pas pénaliser ces systèmes, il apparaît nécessaire de mener des recherches sur ce point-là.

4 / Perspectives

4.1 / Comprendre la diversité des systèmes d'élevage en Afrique de l'Ouest pour des références globales

Les deux études de cas précédemment exposées (Burkina Faso et Mali) répondent à l'objectif de recherche de voies d'intensification écologique des systèmes locaux en mettant en lumière des efficiences énergétiques fossiles différenciées et des voies d'amélioration des systèmes. Cependant, la diversité étudiée dans ces études ne semble pas totalement représentative de la diversité des systèmes d'élevage en Afrique de l'Ouest. Selon Dixon *et al* (2001), un système d'élevage est défini comme un ensemble d'exploitations caractérisées globalement par une dotation similaire en ressources naturelles, avec les mêmes types de productions animales et de moyens d'existence des ménages, et faisant face aux mêmes contraintes, de telle sorte que des stratégies de développement et d'interventions similaires leur sont applicables. Suivant cette définition, Fernandez-Rivera *et al* (2004) propose une typologie des systèmes d'élevage en Afrique de l'Ouest (tableau 2).

Dans les deux études mentionnées précédemment, les systèmes d'élevage étudiés appartiennent principalement au type « Agropastoral en cultures annuelles ». Il serait cependant intéressant de reclasser plus finement les systèmes étudiés selon cette même typologie et d'étudier les systèmes d'élevage manquants afin de fournir une évaluation complète du territoire.

De plus, ces études pourraient servir de base pour la production d'un référentiel exhaustif des consommations d'énergie fossile des systèmes d'élevage en Afrique de l'Ouest. Il serait ainsi intéressant de compléter les deux études précédemment exposées par des études portant sur d'autres territoires en tenant compte de cette diversité, mais également sur des systèmes d'élevage en plein essor dans la zone et plus particulièrement les systèmes aquacoles, avicoles et porcins (Gerber *et al* 2011).

Tableau 2. Typologie des systèmes d'élevage en Afrique de l'Ouest proposée par Fernandez-Rivera et al (2004).

Place de l'élevage	Sous-type	Caractéristiques et/ou particularités
Systèmes d'élevage pur	Pastoral	Valorisation de ressources naturelles ; systèmes traditionnels en vaine pâture ; transhumance ; savoir-faire ethnique
	Hors-sol	Embouche bovine, ovine, caprine ; systèmes intensifs urbains et périurbains ; aviculture ; porciculture ; production laitière
Systèmes d'agriculture-élevage	Agropastoral en cultures annuelles	Ruminants domestiques et cultures céréalières, vivrières et/ou de rente (coton) sans/avec traction animale ; Systèmes semi-intensifs et/ou à visée commerciale
	Agropastoral en cultures pérennes et arbres fruitiers	Élevage à faibles intrants (ruminants domestiques) et cultures pérennes de zones forestières (cacao, palmiers)
	Agropastoral en cultures de bas-fond, vallées et bourgoutières	Élevage associé aux cultures de bas-fonds et des systèmes irrigués ; productions des légumes commercialisables

4.2 / Evaluer les systèmes à l'échelle du territoire pour une gestion globale de la ressource fossile

Au-delà de l'analyse de la diversité intra-territoire, le changement d'échelle vers une analyse globale des consommations à l'échelle du territoire pourrait être intéressant. Tout d'abord, l'échelle territoriale permet de prendre en compte des facteurs sociaux et économiques qui permettent de repenser les conclusions obtenues à l'échelle des exploitations. Par exemple, en dépit de consommations énergétiques fossiles faibles, Vigne (2012) a démontré que les systèmes traditionnels de la périphérie de Sikasso sont encore loin de pouvoir répondre à la demande urbaine en produits laitiers compte tenu de leur faible production. Les systèmes périurbains, bien que plus consommateurs d'énergie fossile, ont donc ici un rôle à jouer. Dans ce cas précis, il serait donc intéressant d'appréhender les consommations d'énergie fossile globales dans le bassin laitier de Sikasso, notamment face aux coûts énergétiques du lait importé.

De plus, les consommations d'intrants et par conséquent d'énergie fossile à l'échelle des exploitations sont fortement reliées à l'organisation structurelle des filières d'approvisionnement de ces derniers. Une réorganisation optimisée de ces filières pourrait faire diminuer les distances de transport et par conséquent les consommations d'énergie fossile à l'échelle du territoire.

Enfin, l'étude des flux à l'échelle territoriale permettrait de répondre définitivement à la délimitation du système, notamment face aux questionnements concernant le partage des parcours naturels ou des résidus de culture issus des

champs d'autres exploitations. L'analyse des flux énergétiques à l'échelle territoriale, telle qu'effectuée par exemple *via* la notion de métabolisme territorial aussi appelé écologie territoriale (Duret *et al* 2007), pourrait permettre une optimisation des flux de biomasse à l'échelle du territoire. Ceci permettrait notamment d'élaborer un modèle d'intégration agriculture-élevage globale qui permettrait de diminuer la part d'intrants consommés sur le territoire et donc le coût global en énergie fossile du secteur agricole local.

Conclusion

L'application originale de l'analyse énergétique fossile sur des contextes jusqu'à aujourd'hui peu étudiés nécessite des adaptations méthodologiques. L'exemple de ses applications sur des systèmes d'élevage bovin en Afrique de l'Ouest en est illustratif. Les auteurs de ces études ont ainsi :

- redéfini les limites du système afin de prendre en compte la mobilité du troupeau ;
- rediscuté l'échelle d'analyse militant pour une analyse à l'échelle du troupeau afin de produire des comparaisons pertinentes entre systèmes ;
- affecté un coût en énergie fossile au travail humain et animal ;
- et ouvert le panel des productions aux effluents et à la traction animale produite.

D'autres perspectives d'évolution de la méthodologie sont proposées. Elles concernent notamment la construction de référentiels de coefficients énergétiques fossiles et de dépenses énergétiques liées au travail.

Cependant, bien que centrées sur les systèmes d'Afrique de l'Ouest, les conclusions issues de cette synthèse ne concernent pas uniquement les systèmes de ce territoire. Les dynamiques globales du secteur de l'élevage touchent l'ensemble des pays du Sud de par le monde, dans les autres régions de l'Afrique, mais également en Asie ou en Amérique du Sud. De plus, les études exposées ici concernent exclusivement des systèmes bovins, les petits ruminants étant peu présents sur ces exploitations. Parmi les autres systèmes d'élevage, l'élevage aquacole et les systèmes hors-sol (avicoles et porcins) notamment, qui connaissent un accroissement important de leur production depuis plusieurs dizaines d'années, ne sont pas sans intérêt. Il apparaît donc pertinent de mener le même genre de réflexion méthodologique dans d'autres territoires, mais également sur d'autres systèmes d'élevage.

Il convient également de garder à l'esprit que la mesure des consommations énergétiques fossiles ne doit pas rester une finalité. Bien qu'à l'origine de multiples dégradations environnementales, mais également d'impacts économiques et sociaux importants, l'approche environnementale par l'énergie fossile consommée reste monocritère. Elle doit s'inscrire dans une démarche plus globale d'analyse environnementale prenant en compte d'autres critères. Elle pourrait être ainsi complétée par l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre – beaucoup d'éléments nécessaires à leur calcul étant déjà mobilisés pour l'analyse énergétique –, de l'utilisation des surfaces ou de l'eau, critères particulièrement pertinents dans ces contextes faiblement dotés dans ces ressources.

Références

- Acheson K.J., Campbell I.T., Edholm O.G., Miller D.S., Stock M.J., 1980. The measurement of daily energy expenditure - an evaluation of some techniques. *Am. J. Clin. Nutr.*, 33, 1155-1164.
- ADEME, 2013. Dia'terre. Synthèse du guide de la méthode - version 3.0. <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=24540>
- Alary V., Duteurtre G., Faye B., 2011. Élevages et sociétés : les rôles multiples de l'élevage dans les pays tropicaux. In : Numéro spécial, Elevage en régions chaudes. Coulon J.B., Lecomte P., Boval M., Perez J.M. (Eds). INRA Prod. Anim., 24, 145-156.
- Benagabou I.O., 2011. Contribution de l'association agriculture-élevage dans l'amélioration du bilan de flux énergétique dans les systèmes agropastoraux : cas de Koumbia. Mémoire d'ingénieur du Développement Rural, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 59p.
- Benagabou I.O., 2013. Effet de la pratique de l'intégration agriculture-élevage sur l'efficacité des exploitations agricoles dans les systèmes agro-pastoraux du Burkina Faso. Mémoire de DEA, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 71p.
- Benagabou I.O., Kanwe B.A., Vall E., Vigne M., Blanchard M., 2013. Intégration agriculture-élevage et efficacité énergétique des exploitations mixtes d'agriculture-élevage du Burkina Faso. *Renc. Rech. Rum.* 20, 298.
- Benoit M., Laignel G., 2010. Energy consumption in mixed crop-sheep farming systems: what factors of variation and how to decrease? *Animal*, 4, 1597-1605.
- Blanfort V., Doreau M., Huguénin J., Lazard J., Porphyre V., Soussana J.F., Toutain B., 2011. Impacts et services environnementaux de l'élevage en régions chaudes. In : Numéro spécial, Elevage en régions chaudes. Coulon J.B., Lecomte P., Boval M., Perez J.M. (Eds). INRA Prod. Anim., 24, 89-112.
- Boland M.J., Rae A.N., Vereijken J.M., Meuwissen M.P.M., Fischer A.R.H., Van Boekel M.A.J.S., Rutherford S.M., Gruppen H., Moughan P.J., Hendriks W.H., 2013. The future supply of animal-derived protein for human consumption. *Trends Food Sci. Technol.*, 29, 62-73.
- Canakci M., Topakci M., Akinci I., Ozmerzi A., 2005. Energy use pattern of some field crops and vegetable production: case study for Antalya Region, Turkey. *Energy Convers. Manage.*, 46, 655-666.
- Cederberg C., Stadig M., 2003. System expansion and allocation in life cycle assessment of milk and beef production. *Int. J. LCA*, 8, 350-356.
- Charroin T., Palazon R., Madeline Y., Guillaumin A., Tchakerian E., 2005. Le système d'information des réseaux d'élevage français sur l'approche globale de l'exploitation. Intérêt et enjeux dans une perspective de prise en compte de la durabilité. *Renc. Rech. Rum.*, 4p.
- CIRAD, 2011. The World Agriculture Watch initiative is up and running. <http://www.cirad.fr/en/news/all-news-items/articles/2011/science/waw-up-and-running>
- Dedieu B., Aubin J., Duteurtre G., Alexandre G., Vayssières J., Bommel P., Faye B., 2011. Conception et évaluation de systèmes durables en régions chaudes. In : Numéro spécial, Elevage en régions chaudes. Coulon J.B., Lecomte P., Boval M., Perez J.M. (Eds). INRA Prod. Anim., 24, 113-128.
- Dixon J., Gulliver A., Gibbon D., 2001. Global Farming Systems Study: Challenges and Priorities to 2030 - Synthesis and Global Overview. World Bank/FAO, Rome, Italy, 90p.
- Dollé J.B., Agabriel J., Peyraud J.L., Faverdin P., Manneville V., Raison C., Gac A., Le Gall A., 2011. Les gaz à effet de serre en élevage bovin : évaluation et leviers d'action. In : Gaz à effet de serre en élevage bovin : le méthane. Doreau M., Baumont R., Perez J.M. (Eds). INRA Prod. Anim., 24, 415-432.
- Dugué P., Vall E., Klein H.D., Rollin D., Lecomte P., 2004. Évolution des relations entre l'agriculture et l'élevage dans les savanes d'Afrique de l'Ouest et du Centre. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 11, 268-276.
- Duret B., Mat N., Bonard A., Dastrevigne E., Lafrayette A., 2007. Écologie territoriale : une aide à la définition d'une politique énergétique. *Ann. Rech. Urbaine*, 103, 73-78.
- Duteurtre G., Bonnet P., Dutilly C., Napoleone M., Peyre M., Toure I., 2011. L'élevage tropical : Terrae Incognitae ? Panorama général des systèmes d'informations sur le secteur élevage dans les pays du Sud. In : Actes de l'atelier de formation collective « Systèmes d'information et outils de pilotage du secteur élevage dans les pays du Sud - Postures et méthodes ». Montpellier, France.
- Fall A., Pearson R. A., Lawrence P.R., 1997. Nutrition of draught oxen in semi-arid West Africa. 1. Energy expenditure by oxen working on soils of different consistencies. *Anim. Sci.*, 64, 209-215.
- FAO, 2011. "Energy-smart" food for people and climate. Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO), Rome, Italy, 78p.
- FAO, 2013. The State of Food Insecurity in the World - The multiple dimensions of food security. Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO), Rome, Italy, 56p.
- FAO, OMS, 1973. Besoins énergétiques et besoins en protéines. Rapport d'un comité spécial mixte FAO/OMS d'experts. Réunion sur la nutrition n° 52, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome. Série de rapports techniques n° 552, Organisation Mondiale de la Santé, Genève, Suisse, 114p.
- Fernandez-Rivera S., Okike I., Manyong V., Williams T.O., Kruska R.L., Tarawali S., 2004. Classification and description of the major farming systems incorporating ruminant livestock in West Africa. In: Sustainable crop-livestock production for improved livelihoods and natural resource management in West Africa. Williams T.O., Tarawali S.A. Hiernaux P., Fernandez-Rivera S. (Eds). Wageningen, The Netherlands, 89-122.
- Fluck R.C., Baird C.D., 1980. Agricultural Energetics. Florida University, Gainesville, United States, 192p.
- Gajaseeni J., 1995. Energy analysis of wetland rice systems in Thailand. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 52, 173-178.
- Gerber P., Bruguère C., Ankers P., 2011. Évolution des productions animales terrestres et aquacoles dans le monde : tendances globales et implications économiques, sociales et environnementales. In : Numéro spécial, Elevage en régions chaudes. Coulon J.B., Lecomte P., Boval M., Perez J.M. (Eds). INRA Prod. Anim., 24, 9-22.
- Guthiga P.M., Karugia J.T., Nyikal R.A., 2007. Does use of draft animal power increase economic efficiency of smallholder farms in Kenya? *Renew. Agric. Food Syst.*, 22, 290-296.
- Heinberg R., Bomford M., 2009. The food and farming transition - towards a post-carbon food system, Post Carbon Institute, Sebastopol, California, 39p.
- Herrero M., Thornton P.K., Notenbaert A.M., Wood S., Msangi S., Freeman H.A., Bossio D., Dixon J., Peters M., van de Steeg J., Lynam J., Parthasarathy Rao P., Macmillan S., Gerard B., McDermott J., Seré C., Rosegrant M., 2010. Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems. *Science*, 327, 822-825.
- IFIAS, 1974. Workshop on methodology and conventions. Workshop report, N° 6, International Federation of Institutes for Advanced Study (IFIAS), Stockholm, Sweden, 88p.
- Kaltsas A.M., Mamolos A.P., Tsatsarelis C.A., Nanos G.D., Kalburtji K.L., 2007. Energy budget in organic and conventional olive groves. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 122, 243-251.
- Kuesters J., Lammel J., 1999. Investigations of the energy efficiency of the production of winter wheat and sugar beet in Europe. *Eur. J. Agron.*, 11, 35-43.
- Lacour J.R., 2011. Activité musculaire et dépense d'énergie. *Revue des Maladies Respiratoires* 28, 1278-1292.
- Lawrence P.R., Stibbards R.J., 1990. The energy costs of walking, carrying and pulling loads on flat surfaces by Brahman cattle and swamp buffalo. *Anim. Prod.*, 50, 29-39.
- Leach G., 1976. Energy and Food Production. IPC Science and Technology Press, Guildford, United Kingdom, 137p.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Current state and trends assessment, Washington D.C., Island Press, 815p.
- Mrimi M., Senhaji F., Pimentel D., 2001. Energy analysis of sugarcane production in Morocco. *Environ. Dev. Sustain.*, 3, 109-126.
- Paillard S., Treyer S., Dorin B., 2010. Agrimonde. Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050. Quae, Versailles, France, 295p.
- Passmore R., Durnin J.V.G.A., 1955. Human energy expenditure. *Physiol. Rev.*, 35, 801-840.
- Pimentel D., Hurd L.E., Bellotti A.C., Forster M.J., Oka I.N., Sholes O.D., Whitman R.J., 1973. Food production and the energy crisis. *Science*, 182, 443-449.
- Randolph T.F., Schelling E., Grace D., Nicholson C.F., Leroy J.L., Cole D.C., Demment M.W., Omere A., Zinsstag J., Ruel M., 2007. Role of livestock in human nutrition and health for poverty reduction in developing countries. *J. Anim. Sci.*, 85, 2788-2800.

- Richard D., Guerin H., Friot D., Mbaye N., 1990. Teneurs en énergies brute et digestible de fourrages disponibles en zone tropicale. *Revue Elev. Méd. Vét. Pays Trop.*, 43, 225-231.
- Risoud B., Theobald O., 2002. Référentiel pour l'analyse énergétique de l'exploitation agricole et son pouvoir de réchauffement global. Enesad, Ademe, 43p.
- Rufino M.C., Tittonell P., van Wijk M.T., Castellanos-Navarrete A., Dolve R.J., de Ridder N., Giller K.E., 2007. Manure as a key resource within smallholder farming systems: analysing farm-scale nutrient cycling efficiencies with the NUANCES framework. *Livest. Sci.*, 112, 273-287.
- Savadoogo K., Reardon T., Pietola K., 1998. Adoption of improved land use technologies to increase food security in Burkina Faso: relating animal traction, productivity, and non-farm income. *Agricult. Sys.*, 58, 441-464.
- Singh H., Mishra D., Nahar N.M., 2002. Energy use pattern in production agriculture of a typical village in arid zone, India - part I. *Energy Convers. Manage.*, 43, 2275-2286.
- Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., de Haan C., 2006. *Livestock's Long Shadow. Environmental Issues and Options.* FAO, LEAD initiative, Rome, Italy, 389p.
- United Nations, 2013. *World Population Prospects: the 2012 revision. Key Findings and Advance Tables.* Department of Economic and Social Affairs, United Nations, New York, United States, 54p.
- Vaz M., Karaolis N., Draper A., Shetty P., 2005. A compilation of energy costs of physical activities. *Public Health Nutr.*, 8, 1153-1183.
- Veysset P., Lherm M., Bébin D., 2010. Energy consumption, greenhouse gas emissions and economic performance assessments in French Charolais suckler cattle farms: model-based analysis and forecasts. *Agricult. Sys.*, 103, 41-50.
- Vigne M., 2012. Flux d'énergie dans des systèmes d'élevage laitier contrastés – Elaboration d'indicateurs et analyse de la diversité inter et intra-territoire. Thèse de Doctorat, Agrocampus Ouest, Rennes, France, 269p.
- Vigne M., Vayssières J., Lecomte P., Peyraud J.L., 2012a. Evaluating the ability of current energy use assessment methods to study contrasting livestock production systems. *J. Environ. Manage.*, 112, 199-212.
- Vigne M., Martin O., Faverdin P., Peyraud J.L., 2012b. Comparative uncertainty analysis of energy coefficients in energy analysis of dairy farms from two French territories. *J. Clean. Prod.*, 37, 185-191.
- Vigne M., Vayssières J., Lecomte P., Peyraud J.L., 2013. Pluri-energy analysis of livestock systems - a comparison of dairy systems in different territories. *J. Environ. Manage.*, 126, 44-54.
- Williams T.O., 1997. Problems and prospects in the utilization of animal traction in semi-arid West Africa: evidence from Niger. *Soil Tillage Res.*, 42, 295-311.

Résumé

Face au double défi du secteur de l'élevage qui devra répondre à l'augmentation future de la demande en protéines animales tout en réduisant ses impacts environnementaux, l'analyse énergétique fossile apparaît comme une méthode d'évaluation pertinente. Elle permet de fournir à la fois des références sur les consommations et l'efficacité d'utilisation de l'énergie fossile, mais également sur les voies d'intensification écologique de ces systèmes. Son application dans le cadre de deux précédentes études à des systèmes d'élevage en Afrique de l'Ouest a nécessité des améliorations méthodologiques. Celles-ci ont concerné la prise en compte de la mobilité des troupeaux, l'analyse à l'échelle du troupeau afin de produire des comparaisons pertinentes entre systèmes, l'affectation d'un coût en énergie fossile au travail humain et animal et l'ouverture du panel des productions aux effluents et à la traction animale produite. D'autres perspectives d'amélioration, liées notamment à l'étude d'autres systèmes d'élevage et de nouveaux territoires, sont également proposées.

Abstract

Fossil energy efficiency assessment of livestock systems in West Africa: Methodological adaptations and perspectives

Fossil energy analysis appears as a relevant assessment method considering the joint challenges of livestock that will meet future growth in demand for animal protein while reducing its environmental impact. This method enables to provide references about both fossil energy use and efficiency use by livestock systems and to design ecological intensification ways. Two previous studies dealing with its application on livestock systems from West Africa required methodological improvements. They concerned the inclusion of herd mobility, the assessment at herd level to provide a relevant comparison between different systems, the quantification of fossil energy cost of human and animal labor and accounting of manure and animal traction as herd products. Other prospects for methodological improvement, especially concerning investigations of other livestock systems and territories, are also suggested.

VIGNE M., BENAGABOU I., FAVERDIN P., COULIBALY D., BA A., VALL E., KANWE A., BLANCHARD M., 2014. Evaluation de l'efficacité énergétique fossile des systèmes d'élevage en Afrique de l'Ouest : adaptations et perspectives méthodologiques. *INRA Prod. Anim.*, 27, 369-380.