Matière
à débattre & décider

Élevages au pâturage et développement durable des territoires méditerranéens et tropicaux

Connaissances récentes sur leurs atouts et faiblesses

Alexandre Ickowicz et Charles-Henri Moulin, coord.

éditions Quæ

tous les niveaux, d'où l'intérêt de produire des outils d'évaluation ou de simulation multicritère, voire multiniveaux. Il est utile de constater que ces potentiels concernent tant les systèmes à l'herbe relativement extensifs comme en Guyane, où la gestion des prairies permet de constituer des puits de carbone jusqu'à un mètre de profondeur, que ceux plus intensifs comme à la Réunion, où les apports de matières organiques jouent un rôle non seulement de fertilisant pour les plantes fourragères, mais aussi de séquestration dans le sol.

La recherche d'efficience pour accompagner la transition agroécologique des systèmes d'élevage

Fabien Stark, Paulo Salgado, Stéphanie Alvarez, Claire Aubron, Ida Bénagabou, Mélanie Blanchard, Myriam Grillot, Sophie Plassin, René Poccard-Chapuis, Jonathan Vayssières, Mathieu Vigne

Comme nous avons pu le voir dans la section précédente, l'évaluation de la contribution des systèmes d'élevage aux enjeux de changement climatique, à travers le concept d'efficience et les différents indicateurs qui en découlent, a permis d'identifier des pratiques d'élevage à l'herbe prometteuses pour relever les défis conjugués du changement climatique et de la sécurité alimentaire. L'agroécologie est aussi une des voies évoquées dans la littérature scientifique et mobilisée par les politiques publiques nationales et internationales pour répondre aux objectifs assignés à l'agriculture, en matière de développement durable (ODD), de changement climatique, de sécurité alimentaire, de réduction des pollutions, voire de réduction de la pauvreté (FAO, 2018b). L'agroécologie peut en effet être définie comme un ensemble de pratiques agricoles qui visent à mobiliser les processus biologiques et écologiques pour la production de biens et de services.

Malgré le rôle central de l'élevage dans les processus de transferts et de bouclage des cycles de nutriments, les travaux scientifiques portant sur les principes de l'agroécologie appliquée à l'élevage sont relativement récents (Dumont *et al.*, 2013). Pour autant, les systèmes d'élevage à l'herbe et les systèmes mixtes agriculture-élevage, principalement présents en milieux méditerranéens et tropicaux, sont à même de mobiliser les principes de l'agroécologie pour répondre aux enjeux de l'agriculture. Ces systèmes exploitent et gèrent en effet une diversité des ressources naturelles n'entrant pas en compétition avec l'alimentation humaine (ressources pastorales) et mobilisent les complémentarités entre agriculture et élevage à travers le recyclage de la biomasse (coproduits, fumures organiques). Ces pratiques contribuent finalement au bouclage des cycles de nutriments et de biomasse pour réduire l'usage des intrants, recycler les sous-produits et réduire les pollutions, tant à l'échelle des exploitations que des territoires.

Pour accompagner la transition agroécologique des systèmes d'élevage, plusieurs pratiques d'élevage reposant sur ces principes peuvent ainsi être déployées. Qu'il s'agisse des pratiques d'alimentation animale, de gestion des déjections et de production de fumure organique, de gestion des ressources fourragères, tout un ensemble de leviers sont mobilisables par les éleveurs pour réussir cette transition agroécologique. À partir

du concept d'efficience, donc du ratio entre biens ou services générés et ressources mobilisées, plusieurs dimensions de la transition agroécologique peuvent être envisagées. Elles aident à concevoir et évaluer des pratiques et des systèmes d'élevage pour mieux utiliser les ressources mobilisées, et augmenter la production de biens et de services.

Nous proposons, dans ce chapitre, d'illustrer ce principe par des résultats de recherche récents, portant sur les systèmes d'élevage à l'herbe et sur les systèmes mixtes agriculture-élevage, et se focalisant notamment sur les flux de nutriments.

Bouclage des cycles pour améliorer l'efficience biochimique des systèmes d'élevage

Les travaux présentés ici sont relatifs à des pratiques d'élevage de type intégration agriculture-élevage (IAE) à l'échelle de l'exploitation, à travers l'analyse des flux d'énergie et de nutriments, dans une perspective de bouclage des cycles biogéochimiques. Pour s'adapter à la rareté croissante des ressources et réduire les externalités négatives liées à des modèles de production intensifs, tout en répondant aux demandes d'une population mondiale en expansion, les agriculteurs doivent produire plus et mieux. Sur la base des principes de l'agroécologie déclinés aux systèmes mixtes agriculture-élevage, l'efficience est en effet l'une des propriétés principales attendues de ces systèmes diversifiés (Bonaudo *et al.*, 2014).

Un système de production durable devra donc valoriser les ressources locales et mobiliser de façon efficiente les intrants afin de réduire les externalités négatives. Les quantités de nutriments (notamment l'azote) – dont les intrants auxquels de nombreux agriculteurs des pays en développement n'ont guère accès – doivent être judicieusement utilisées de manière à améliorer l'efficience de leur exploitation. Cela implique d'améliorer le recyclage et donc de conserver les nutriments dans le système.

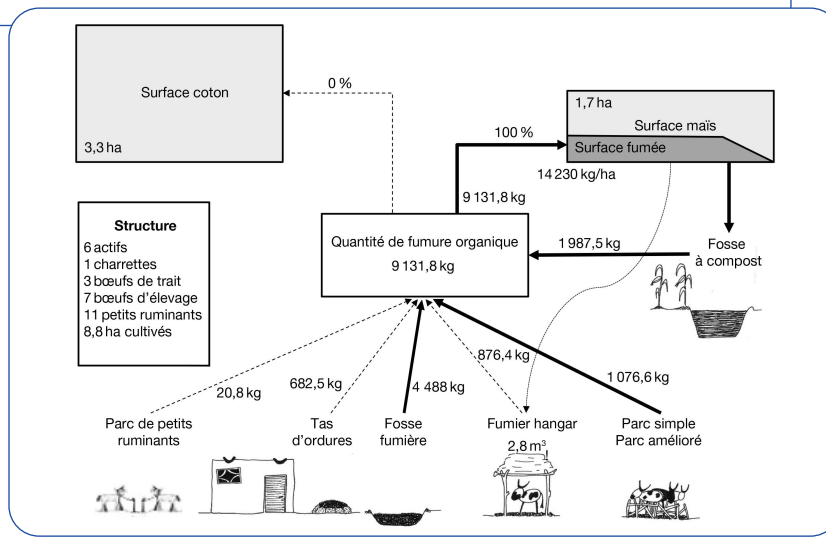
Gestion des biomasses et production de fumure organique dans les exploitations agropastorales des savanes d'Afrique de l'Ouest

Des travaux menés dans les savanes d'Afrique de l'Ouest (Mali et Burkina Faso) se sont attachés à caractériser les pratiques de production et gestion des fumures organiques, ces pratiques de recyclage de biomasses servant à fertiliser les sols, problématique récurrente dans toutes les zones dites cotonnières (subhumides) de la région (Blanchard *et al.*, 2013).

L'analyse du recyclage des biomasses pour produire des fumures s'est faite en caractérisant les pratiques à chaque étape du cycle, en en mesurant l'efficience (carbone et azote) et en analysant la relation recyclage/pertes depuis le ramassage des résidus de culture et des déjections animales jusqu'à l'épandage du fumier et du compost au champ (figure 3.8).

Ces travaux ont permis de repérer les pratiques à même d'améliorer la proportion de résidus de cultures et de déjections animales convertie en fumure organique. Elles permettent d'améliorer l'efficience de recyclage de l'azote, indépendamment de la taille et de la structure de l'exploitation. Pour favoriser ce type de pratiques, des structures classiques de production de fumure organique sont construites, telles que les fosses à la ferme et les parcs améliorés. D'autres structures dites innovantes permettent de produire

Figure 3.8. Recyclage des biomasses et production de fumure organique chez les producteurs (Blanchard, 2010). Représentation schématique du recyclage des nutriments à travers la production et l'utilisation de fumure organique dans une exploitation type d'Afrique de l'Ouest, suivant les modes de gestion de cette fumure organique.



de la fumure organique du champ à la ferme (fosse dans le champ, parcs améliorés avec tiges de coton en litière, enclos sans litière, abri pour animaux). Les éleveurs aux pratiques innovantes diversifient les modes de production de fumure organique et les répartissent entre les champs et la ferme, mobilisant les biomasses là où elles sont produites, sans investissement important en travail et en transport. Ils utilisent ainsi plus efficacement les résidus de cultures et les déchets animaux, favorisant l'efficience de recyclage de l'azote (23 et 31 % contre 16 % de la biomasse recyclée pour les moins innovants).

Pour autant, le taux de recyclage des biomasses dans les exploitations reste limité et présente donc des marges d'amélioration. L'estimation de la valorisation des déjections animales en fumure organique est comprise entre 38 et 50 % et entre 8 et 16 % des biomasses végétales actuellement valorisées sous forme de fumure organique. L'efficience de recyclage du carbone et de l'azote reste aussi limitée avec des pertes de nutriments par lessivage et émissions gazeuses qui restent conséquentes et qui conduisent à des taux d'efficience de recyclage compris entre 8 et 11 % pour le carbone, et 16 et 37 % pour l'azote.

Ainsi, même si la production de fumure organique permet d'améliorer le recyclage de la biomasse dans ces exploitations, le recyclage des biomasses reste bien en deçà de celui requis pour le maintien de la fertilité des sols cultivés, dont la fertilisation est aujourd'hui soutenue par l'utilisation d'engrais. Compte tenu de la disponibilité limitée

de ces nutriments, l'amélioration de l'efficience de recyclage de ces nutriments devra se raisonner au-delà de l'échelle de la ferme pour soutenir le niveau de fertilité des sols.

Impact des pratiques d'intégration agriculture-élevage sur les performances agroécologiques : étude comparative d'exploitations latino-caribéennes

De manière à pouvoir évaluer la contribution du recyclage des nutriments aux performances dites agroécologiques de systèmes mixtes agriculture-élevage, une analyse comparative des pratiques d'intégration agriculture-élevage entre des exploitations de trois territoires latino-caribéens (Guadeloupe, Amazonie brésilienne et Cuba) a été menée dans le cadre d'une thèse de doctorat (Stark *et al.,* 2018). L'hypothèse sous-jacente est que des systèmes agricoles diversifiés et intégrés mobilisent des processus biologiques et écologiques qui leur permettent d'être plus performants d'un point de vue agroécologique et notamment en matière d'efficience.

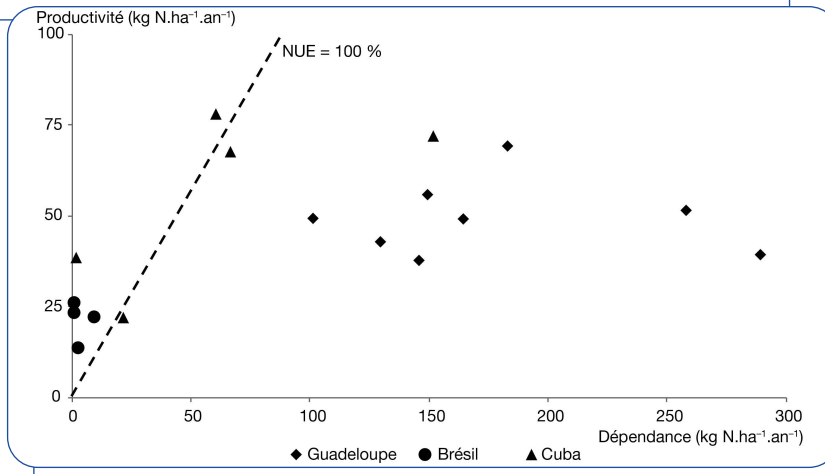
Pour ce faire, les pratiques d'intégration agriculture-élevage mises en œuvre dans une quinzaine d'exploitations de ces trois territoires ont été traduites en réseaux de flux d'azote. L'*ecological network analysis* (ENA), une méthode d'analyse des réseaux de flux utilisée en écologie, a été mobilisée dans le cadre de ces travaux pour avoir une vision systémique de la dynamique de l'azote, à l'échelle de l'exploitation (encadré 3.4). Chaque exploitation a ainsi été modélisée en une matrice de flux, et un ensemble d'indicateurs caractérisant ce réseau de flux (intensité et organisation) et ses propriétés (résilience, dépendance, productivité et efficience) ont ainsi pu être calculés. L'efficience correspond ici au ratio entre productivité et autonomie (*output*/*input*).

Lorsque l'on analyse la relation entre productivité et dépendance des exploitations, on peut identifier différents profils d'efficience, liés en partie aux pratiques d'intégration agriculture-élevage mises en œuvre et en partie à leur niveau d'intensification. En fonction des exploitations, et dans une moindre mesure des régions d'étude, les gammes de productivité sont très larges, variant de 13 à 72 kg $N \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ (produits animaux et végétaux confondus) et des niveaux de dépendance compris entre 1 et 289 kg $N \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ (ensemble des intrants). L'efficience qui en résulte présente de fait des profils contrastés (figure 3.9) :

- des systèmes extensifs peu consommateurs d'intrants (dépendance ≤ 22 kg $N \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) et peu productifs (≤ 39 kg $N \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$), mettant en œuvre toute une diversité de pratiques d'intégration mais de faible intensité. Il s'agit d'exploitations qui présentent des niveaux d'efficience supérieurs, voire très supérieurs à 100 % (compris entre 103 et 3 303 %), compte tenu finalement d'un faible recours à des intrants extérieurs à l'exploitation, et donc potentiellement surconsommateurs de ressources naturelles, ce qui questionne le renouvellement de la biomasse et de la fertilité des sols associés à ces systèmes.
- des systèmes intensifs, plus productifs (compris entre 38 et 72 kg $N \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) et très consommateurs d'intrants (dépendance ≥ 102 kg $N \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$), mettant en œuvre peu de pratiques d'intégration de faible intensité. Il s'agit des d'exploitations les moins efficientes (14 à 47 %).

• des systèmes ayant des niveaux de productivité plus élevés (≤ 68 kg N·ha^{-1}·an^{-1}) et présentant des niveaux de dépendance intermédiaires (compris entre 60 et 66 kg N·ha^{-1}·an^{-1}), mettant en œuvre une diversité de pratiques d'intégration d'intensité conséquente. Il s'agit d'exploitations présentant des niveaux d'efficience proches de 100 %, consommant autant d'intrants que de produits exportés.

Figure 3.9. Relation entre indicateurs de productivité et de dépendance, et profils d'efficience qui en découlent (Stark *et al.*, 2018).



Profils d'efficience des 17 exploitations de trois territoires (Guadeloupe, Brésil, Cuba) en fonction de leur niveau de dépendance (exprimé en kg N·ha^{-1}·an^{-1} provenant de l'extérieur de l'exploitation) et de leur niveau de productivité (exprimé en kg N·ha^{-1}·an^{-1} de produits vendus ou consommés à l'extérieur de l'exploitation). La ligne pointillée correspond au *nitrogen use efficiency* (NUE) de 100 % (une unité d'azote produite pour une unité d'azote consommée) avec pour les études de cas situés en deçà des niveaux d'efficience inférieurs à 100 % et au-delà des niveaux d'efficience supérieurs à 100 %.

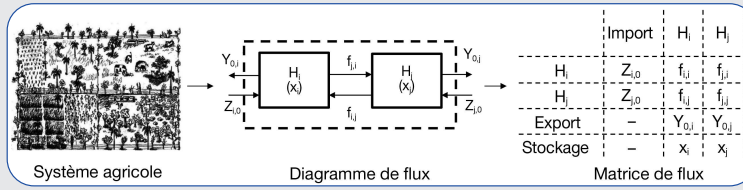
Encadré 3.4. Analyse des réseaux de flux de nutriments pour l'évaluation des performances des systèmes d'élevage : l'*ecological network analysis*.

Fabien Stark

L'analyse de réseaux écologiques est une méthode de type *input-output analysis* qui consiste en une représentation quantitative des interactions entre composantes d'un système et entre ces composantes et leur environnement. Pour mener à bien ce type d'analyse, deux étapes préliminaires à l'analyse sont nécessaires : la conceptualisation du système étudié en un diagramme de flux et la modélisation du réseau de flux en une matrice de flux pour pouvoir ensuite conduire l'analyse quantitative à proprement parler (figure 3.10).

Encadré 3.4. Suite

Figure 3.10. Schéma récapitulatif des étapes de modélisation matricielle de la structure et du fonctionnement des systèmes étudiés (Stark, 2018).



Dans le cadre des travaux menés, deux groupes d'indicateurs ont été développés pour l'analyse, l'un pour caractériser l'intégration agriculture-élevage, l'autre pour évaluer les performances agroécologiques des systèmes mixtes agriculture-élevage (tableau 3.3). Les indicateurs de caractérisation de l'intégration agriculture-élevage concernent l'organisation du réseau de flux et l'intensité du réseau de flux. Ils permettent ainsi de caractériser l'intégration agriculture-élevage, suivant la complexité et l'intensité des échanges de nutriments entre les compartiments. Les indicateurs de performances renvoient aux quatre principes de l'agroécologie tels que définis par Bonaudo *et al.* (2014) : l'efficience, la résilience, la productivité et la dépendance (corollaire de l'autosuffisance).

Tableau 3.3. Indicateurs d'intégration agriculture-élevage et indicateurs de performances.

Indicateurs d'intégration agriculture-élevage	Indicateurs de performances
Activité du système $TST = \sum_{i=1}^{n} T_i$	Productivité $\sum_{j=1}^{n} Y_{0,j}$
Flux circulant $T_i = \sum_{j=1}^{n} f_{i,j} + Z_{i,0} - (x_i)$	Dépendance $\sum_{i=1}^{n} Z_{i,0}$
Intensité de l'IAE $TT = \sum_{i=1}^{j=n} f_{i,j}$	Efficience $\sum_{j=1}^{n} Y_{0,j} \Big/ \sum_{i=1}^{n} Z_{I,0}$
Average mutual information $AMI = k \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=0}^{n} \frac{T_{ij}}{T_{..}} \log_2 \frac{T_{ij} T_{..}}{T_{i.} T_{.j}}$	*Overhead* $\Phi = -\sum_{i.j} T_{ij} \log \left(\frac{T_{ij}^2}{T_{i.} T_{.j}} \right)$
Statistical uncertainty $H_r = -\sum_{j=0}^{n} \frac{T_{.j}}{T_{..}} \log_2 \frac{T_{.j}}{T_{..}}$	*Development capacity* $C = -\sum_{i.j} T_{ij} \log \left(\frac{T_{ij}}{T_{..}} \right)$
Organisation du réseau de flux *AMI* / H_r	Résilience Φ / *C*

L'analyse multivariée des variables dont découlent ces résultats (Stark *et al.,* 2018) a aussi permis d'évaluer les corrélations entre pratiques d'intégration agriculture-élevage et efficience. La productivité et l'intensité de l'intégration sont partiellement corrélées, alors que, contrairement à nos hypothèses, l'intensité de l'intégration et la dépendance ne sont pas corrélées. Il semble donc que dans les situations caractérisées, les pratiques d'intégration n'apparaissent pas comme des pratiques de substitution à l'usage d'intrants (d'un point de vue quantitatif en ce qui concerne l'azote) mais qu'elles sont complémentaires et contribuent de fait à la productivité globale des systèmes étudiés. L'efficience, telle que mobilisée dans ces travaux, a ainsi permis d'identifier certains profils d'exploitations en fonction des pratiques mises en œuvre, et d'interroger les performances attendues de ces systèmes ainsi que leur durabilité.

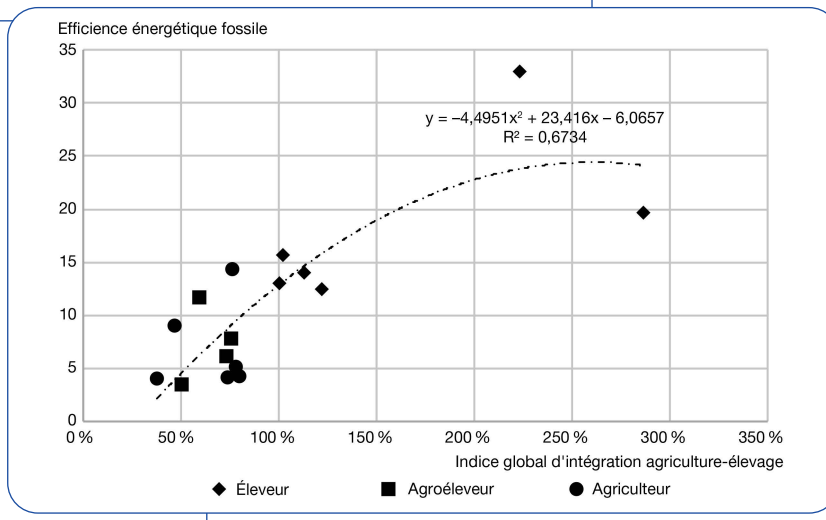
Impacts de l'intégration agriculture-élevage sur l'efficience énergétique des agroécosystèmes sahélo-soudaniens : cas de Koumbia au Burkina Faso

Par ailleurs, toujours dans les savanes d'Afrique de l'Ouest (Mali et Burkina Faso), les systèmes de polyculture-élevage ont tendance à intégrer activités d'élevage et activités agricoles. Si de nombreux travaux ont été menés sur la capacité de l'IAE à améliorer la résilience et la productivité de ces systèmes, peu ont analysé sa contribution à l'atténuation de leurs impacts environnementaux comme les consommations d'énergie fossile.

Une thèse de doctorat (Bénagabou *et al.,* 2017) visait à comparer différents niveaux d'IAE à l'échelle de 16 exploitations de la commune de Koumbia (ouest du Burkina Faso) et leur impact sur les consommations énergétiques fossiles de ces dernières. Pour y parvenir, des indicateurs décrivant les pratiques d'IAE ont été calculés : la couverture des besoins en traction animale (CBTA), la couverture des besoins en fumure organique (CBFO) et la couverture des besoins fourragers (CBF). Ces indicateurs ont ensuite été synthétisés en un indicateur global d'IAE puis ont été analysés au regard de l'efficience énergétique fossile des exploitations, considérée comme le rapport entre l'énergie brute produite sur l'énergie fossile consommée directement et indirectement.

Les résultats obtenus montrent que les trois piliers de l'IAE entraînent globalement une meilleure efficience dans l'utilisation de l'énergie fossile consommée (figure 3.11). Ce constat est particulièrement observable chez les éleveurs qui fournissent des efforts importants pour assurer une bonne couverture de leurs besoins en fumure organique, favorisés par un chargement animal élevé. D'une manière générale, l'amélioration conjointe de l'IAE et de l'efficience énergétique fossile s'explique principalement par une substitution des engrais minéraux par la fumure organique et une meilleure utilisation des résidus de culture pour l'alimentation du troupeau, entraînant ainsi une réduction des intrants de synthèse consommés sur l'exploitation et donc les consommations d'énergie fossile indirecte.

Figure 3.11. Intégration agriculture-élevage et efficience énergétique fossile (Bénagabou *et al.*, 2017).



Rapport entre l'indice global d'intégration agriculture-élevage et l'efficience énergétique fossile de 16 exploitations de l'ouest du Burkina Faso en fonction de leurs spéculations dominantes : éleveur, agroéleveur ou agriculteur.

Accroître le recyclage de la biomasse et de l'azote dans les fermes bovines laitières sur les Hautes Terres malgaches

Des travaux menés à Madagascar (Alvarez *et al.*, 2014) ont eu comme finalité de caractériser les flux de nutriments (notamment d'azote) à l'échelle des exploitations mixtes afin d'identifier les facteurs de variation à chacune des étapes du cycle de transfert. L'objectif était d'identifier si certaines pratiques d'IAE créent des systèmes plus productifs et plus durables. Ces travaux ont aussi mobilisé l'*Ecological Network Analysis* (ENA) avec cette fois-ci l'objectif d'explorer des scénarios alternatifs de gestion des nutriments.

Plusieurs exploitations représentatives de la diversité des systèmes d'agriculture-élevage des Hautes Terres à Madagascar selon une typologie basée sur les pratiques culturales et la gestion des ressources et des effluents ont servi de support d'étude. Quatre types d'exploitations mixtes culture-élevage ont ainsi été retenus :

- (T1) grandes exploitations d'élevage (> 8 animaux) avec des races bovines européennes et une diversification significative avec des activités avicoles et porcines,
- (T2) exploitations avec moins de vaches laitières (environ deux) et une diversification importante avec l'activité porcine,
- (T3) exploitations avec de petites surfaces (< 60 ares) sur collines et animaux laitiers nourris presque exclusivement de fourrages à volonté sans pâtures

• et (T4) exploitations avec 1 ou 2 zébus croisés, avec une faible production de lait avec très peu de cultures fourragères.

Quel que soit le type d'exploitation, on observe des pratiques d'intégration d'agriculture-élevage. Elles correspondent à des transferts de fourrages et de résidus de cultures du système de culture vers l'atelier élevage et à l'apport du fumier pour la fertilisation des cultures. Les exploitations étudiées ont ainsi été représentées comme des réseaux où les liens entre les compartiments représentent les flux de biomasse au sein de l'exploitation.

La plupart des flux de biomasses et de nutriments ont été quantifiés à partir des mesures au niveau de l'exploitation (production de biomasses, consommation d'aliments pour les animaux, etc.), en laboratoire pour les teneurs en nutriments, alors que certaines données ont été estimées (teneurs en nutriments et carbone des viandes, lait, œufs).

Quatre scénarios ont été conçus pour explorer les pratiques d'intensification des systèmes de production :
• (S1) l'apport d'azote pour les vaches laitières est augmenté en augmentant l'apport d'aliments concentrés,
• (S2) l'apport d'azote pour la production de riz est augmenté en augmentant l'apport d'engrais minéraux,
• (S3) l'amélioration de la conservation de l'azote lors du stockage du fumier (couverture du tas de fumier) et lors de l'utilisation / la fertilisation (rapide incorporation dans le sol)
• et (S4) la combinaison du premier et du troisième scénario.

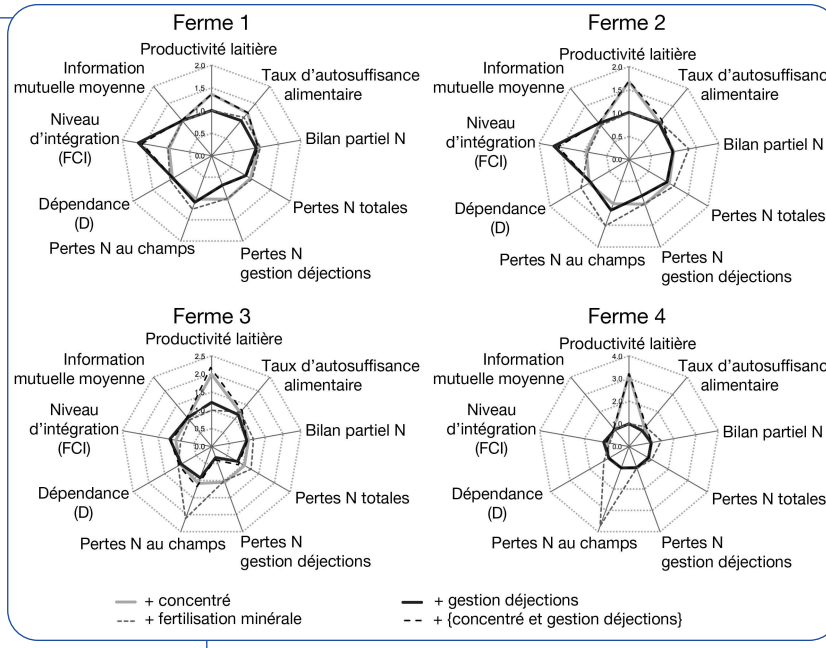
Les effets indirects et les rétroactions induites par les scénarios sur l'alimentation animale, l'azote excrété, l'azote appliqué dans le champ, le rendement laitier et des cultures ont été pris en compte.

Les résultats des scénarios (figure 3.12) ont montré que les pratiques de gestion du fumier telles que la couverture des tas de fumier et une rapide incorporation au sol pourraient avoir le meilleur impact sur le degré d'intégration agriculture-élevage et l'efficacité énergétique globale de l'exploitation (+ 50 % par rapport à ligne de base), diminuant les pertes totales azotées du système (- 20 % par rapport à ligne de base). Ces pratiques, associées à l'amélioration de la qualité des aliments pour les animaux, ont montré les meilleures performances économiques avec une augmentation notable de la marge brute pour les exploitations les plus petites, une augmentation de la production laitière (40 à 300 % par rapport à ligne de base), de l'autosuffisance des ménages (30 à 50 % par rapport à ligne de base) ainsi qu'une diminution des pertes d'azote et une augmentation de la capacité de stockage de l'azote dans le sol. Les grands éleveurs laitiers présentent globalement des excédents en biomasses et en nutriments par rapport aux petites exploitations. L'amélioration de la gestion interne des nutriments grâce à une meilleure intégration de l'élevage et de l'agriculture, et l'utilisation plus efficace des engrais disponibles sont des pistes d'intérêt pour les exploitations à faible capacité en ressources de production.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'une bonne gestion des ressources organiques, et en particulier du stockage et de l'utilisation du fumier, dans des systèmes

intégrant agriculture et élevage, afin de compenser les exportations de nutriments par les cultures. Un des points-clés de la conservation de la fertilité des systèmes agriculture-élevage dépend donc des pratiques visant à limiter les pertes de nutriments lors du stockage des ressources.

Figure 3.12. Changements relatifs par rapport à la ligne de base des scénarios sur la productivité, l'autosuffisance alimentaire, le bilan azoté et les pertes d'azote ainsi que les indicateurs d'analyse du *network analysis* pour les quatre exploitations des Hautes Terres malgaches (Alvarez *et al.*, 2014).



Les quatre scénarios étaient: [+ concentré] augmenter les entrées d'azote en tant qu'aliment supplémentaire ; [+ fertilisation minérale] augmenter les entrées d'azote en tant qu'engrais minéral ; [+ gestion déjections] améliorer la conservation de l'azote pendant le stockage et l'épandage du fumier et [+ (concentré et gestion déjections)] gérer le fumier et augmenter de la supplémentation alimentaire. La valeur de l'indicateur observée dans la ligne de base était la valeur de référence (c'est-à-dire que la ligne de base = 1) dans les quatre diagrammes radiaux.

Intégration territoriale et efficience des paysages

Les travaux abordés précédemment se sont appuyés sur des pratiques d'élevage (gestion des fumures, alimentation, intégration agriculture-élevage) de manière à améliorer l'efficience de l'exploitation. Les travaux de cette section s'intéressent toujours à la transition

agroécologique en élevage, mais dans une perspective territoriale, en tentant d'évaluer les contributions des élevages à l'efficience des territoires.

Efficience des paysages en Amazonie

Orienter le processus d'intensification des systèmes d'élevage vers l'efficience de paysages est devenu un enjeu majeur pour les territoires amazoniens. Il s'agit d'ajuster les pratiques d'élevage et leur localisation en fonction des aptitudes du milieu, de façon à favoriser l'utilisation efficiente des ressources naturelles. Les paysages ainsi remodelés permettent de mieux répondre aux défis agricoles et écologiques, tels que la préservation de la biodiversité, la protection des sols, l'atténuation du changement climatique et l'accroissement de la production agricole.

Pour favoriser la transition entre l'utilisation minière des ressources, héritée des dynamiques de fronts pionniers, et la construction de paysages efficients répondant aux défis de la durabilité, une analyse compréhensive des stratégies d'occupation des sols a d'abord été mise en œuvre, puis une modélisation de l'évolution des paysages, chez les éleveurs des communes de Paragominas et de Redenção, dans l'état du Pará, dans le cadre d'une thèse de doctorat (Plassin *et al.*, 2017).

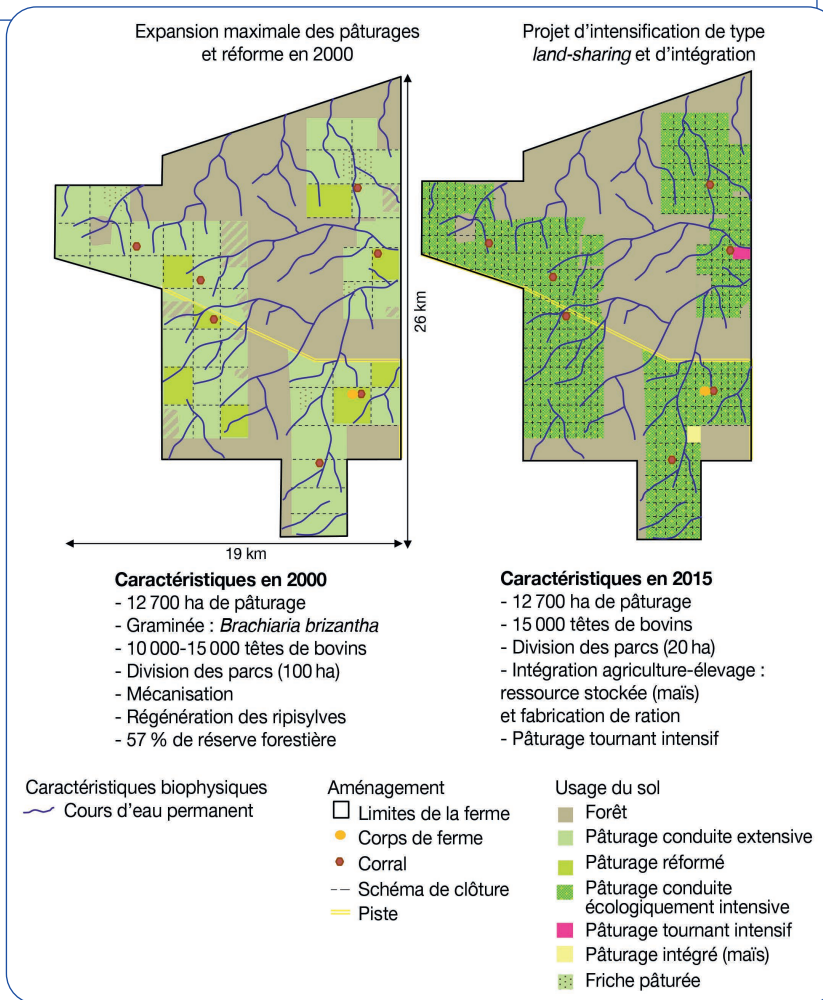
Les résultats montrent que dès lors qu'ils améliorent leurs pratiques au pâturage, les éleveurs changent également leurs perceptions des propriétés du sol, lesquelles deviennent prépondérantes dans les projets d'exploitation. Cette reformulation des potentiels conduit à modifier en profondeur le paysage. Le poids des aptitudes du sol s'observe quelle que soit la stratégie d'amélioration des pratiques, toutes étant sensibles à la fertilité, la texture et la portance des sols, à la topographie, à l'accès aux ressources hydriques, voire à la distance euclidienne depuis les bâtiments ou le corral. L'intensification fourragère sur les meilleurs sols provoque une déprise ailleurs, et la mosaïque forestière évolue également : une nouvelle trame peut se mettre en place, couvrant les zones de moindres aptitudes fourragères mais de grande importance pour les sols ou le cycle de l'eau, formant des couloirs écologiques entre les massifs protégés par le code forestier brésilien.

C'est donc cet agencement plus ou moins optimisé de pâturages améliorés et de trame forestière recomposée qui caractérise l'efficience du paysage (figure 3.13). En fonction des localisations et des aptitudes, les services écosystémiques augmentent, tant dans la sphère économique (production fourragère plus abondante et de meilleure qualité, sols sous pâturages plus fertiles…) qu'environnementale (habitats recomposés pour la biodiversité, carbone séquestré et émissions réduites, humidité relative augmentée en saison sèche…).

Les indices d'efficience du paysage peuvent donc se calculer grâce à des systèmes d'information géographique, qui vont:

- mesurer les correspondances spatiales entre les aptitudes des sols et les usages qu'en font les éleveurs,
- estimer les services écosystémiques produits sur l'exploitation.

Figure 3.13. Exemple de trajectoire d'intensification de type *land-sharing* (Plassin *et al.*, 2017).



Les prairies sont intensifiées sur la base de pratiques agroécologiques (pâturage tournant et réduction de la taille des paddocks, faible apport d'intrants chimiques, régénération naturelle d'arbres). Les surfaces en forêt sont étendues aux zones de faible aptitude agronomique (versants accidentés et bas-fond par exemple).

Dans les deux cas, l'information initiale est tirée d'images satellites et modèles numériques de terrain qui, pour être correctement interprétés, font l'objet de protocoles de vérification sur le terrain, facilités par l'usage de drones et de spectrométrie infrarouge. Les indices calculés peuvent donc être agrégés par exploitation, mais aussi par commune, ce qui présente un double avantage :

- la cohérence des paysages est appréhendée à une échelle plus large, ce qui est fondamental par exemple pour la biodiversité ou la régulation du cycle de l'eau ;
- les institutions locales peuvent mesurer l'évolution des paysages dans leur juridiction, ce qui leur permet de concevoir et accompagner des réglementations spécifiques, plus adaptées que les directives nationales, et souvent mieux appropriées par les éleveurs (des plans municipaux d'usage des sols, notamment).

La thèse de Daniel Pinillos a produit un premier jeu de données permettant de quantifier des services écosystémiques sur la commune de Paragominas et de réaliser des simulations en fonction de réglementations locales (Pinillos, 2021a). Des mesures d'efficience complètes sont en cours, dans l'objectif de produire un label de certification territoriale qui garantisse transparence et attractivité du territoire, au regard d'investisseurs ou filières responsables. Ces principes d'efficience des paysages ont d'ores et déjà inspiré le nouveau « plan d'intelligence et développement territorial » de la commune, décrété en 2019.

Efficience et métabolisme territorial de terroirs villageois contrastés en Afrique de l'Ouest

En Afrique de l'Ouest, les systèmes agro-sylvo-pastoraux (SASP) sont traditionnellement organisés à l'échelle de terroirs villageois et autour de l'intégration élevage-cultures-arbres. Par des pratiques alternant le pâturage diurne et le parcage nocturne, le déplacement des troupeaux dans le terroir villageois orchestre des transferts horizontaux de matière organique et de nutriments depuis les parcours vers les champs cultivés. Ces transferts permettent le maintien sur un temps long de la fertilité des sols et des productions végétales. Cependant, depuis les années 1950, la croissance démographique et l'extension des terres cultivées se font au détriment des parcours, ce qui entraîne une diminution des transferts de nutriments et remet en question la durabilité des SASP traditionnels. En réponse, certaines communautés villageoises se réorganisent et mettent en place diverses stratégies à l'échelle des terroirs villageois pour garder des animaux malgré la régression des parcours.

Une méthodologie originale d'inventaire des flux de biomasse par enquêtes en ménages agricoles a été mise en œuvre dans le bassin arachidier du Sénégal pour comparer ces différentes stratégies et étudier le métabolisme territorial de terroirs villageois contrastés. Cette méthodologie permet notamment de calculer des indicateurs d'efficience technique (productivités animale et végétale) et environnementale, telle que l'efficience d'utilisation de l'azote. Ce dernier indicateur correspond au rapport entre les exportations d'azote (par exemple la vente d'animaux et des surplus de grains de mil) et les importations d'azote du village (par exemple les achats d'aliments pour les habitants et les

animaux). Ces indicateurs sont repris pour comparer deux terroirs villageois contrastés où les parcours ont quasiment disparu (tableau 3.4).

Tableau 3.4. Comparaison de deux terroirs villageois contrastés du bassin arachidier du Sénégal sur la base d'indicateurs calculés à l'échelle du territoire pour la campagne agricole 2012-2013 (Audouin *et al.*, 2015).

Village	Densité de la population humaine	Chargement animal	Productivité végétale (grains)	Productivité végétale (résidus de culture)	Productivité animale	Bilan azoté (village)	Efficience d'utilisation de l'azote
	(hab.km^{-2})	(UBT.ha^{-1})	(kg MS·ha^{-1})	(kg MS·ha^{-1})	(kg poids vif·ha^{-1})	(kg N·ha^{-1})	(SD)
Diohine	180	0,96	400	2070	25	8,5	0,15
Bary	320	2,31	510	3150	213	24,9	0,64

hab : habitants.
UBT: unité bovin tropical.
MS : matière sèche.
SD : sans dimension.
L'ensemble des indicateurs donnés dans ce tableau sont issus de travaux de cartographie de l'occupation du sol, d'observations de terrain et d'enquêtes en ménages agricoles. Ces enquêtes ont notamment permis de décrire la structure des terroirs villageois et de réaliser un inventaire des flux de biomasse entre chaque terroir et son environnement et au sein de chaque terroir villageois (entre ménages agricoles). Ces flux de biomasse ont dans un second temps été convertis en flux d'azote sur la base de la teneur azotée moyenne de l'ensemble des biomasses, afin de reconstituer le métabolisme azoté de chaque terroir.

Diohine correspond à un SASP extensif se rapprochant du système traditionnel où une jachère collective est pratiquée et où les élevages restent mobiles et largement alimentés avec les ressources locales (résidus de cultures, herbacées sur jachères, émondage des arbres fourragers). La jachère collective correspond à un ensemble de parcelles cultivées conjointement mises en jachère la même année pour accueillir l'ensemble des troupeaux pendant la saison des cultures. Bary correspond à un SASP plus intensif où il n'y a pas de jachère collective et où des bovins sont engraissés à l'étable en mobilisant largement des ressources alimentaires extérieures au terroir sous la forme de coproduits de l'agro-industrie sénégalaise (tourteaux d'arachide et de coton, son de mil et de riz).

L'activité d'embouche bovine à Bary permet d'accroître le chargement animal et la production de fumier à l'échelle du village. Les apports annuels moyens en fumier à Diohine sont de 0,34 t MS·ha^{-1} contre 0,49 t MS·ha^{-1} à Bary, ils couvrent respectivement 24 et 31 % de la surface cultivée à Diohine et Bary. Les coproduits de l'agro-industrie importés (3,14 kg N·ha^{-1} à Diohine, 17,6 kg N·ha^{-1} à Bary) représentent une entrée supplémentaire d'azote dans le territoire, qui est partiellement redistribuée dans l'agroécosystème par la fumure organique. Ces différences d'organisation des flux d'azote se traduisent par des efficiences et des bilans azotés différents entre terroirs villageois. Les bilans azotés davantage positifs à Bary soulignent un potentiel d'entretien de la fertilité des sols plus important dans ce village. L'efficience d'utilisation de l'azote plus élevée à Bary s'explique par les gains de productivités animale et végétale en réponse à une disponibilité en azote plus

importante pour les animaux et les plantes. Ces gains de productivité observés à Bary permettent également de nourrir une population humaine plus importante (tableau 3.4).

Ces résultats illustrent que l'azote est un facteur limitant majeur de la productivité des agroécosystèmes en Afrique de l'Ouest, et qu'accroître les entrées d'azote dans les villages sous forme d'aliments pour les animaux permet à la fois d'accroître la production de viande, la production de céréales et la fertilité des sols. En effet, ces ressources alimentaires extérieures au territoire permettent de maintenir des chargements animaux élevés, intensifier les processus écologiques (dont la concentration de la fertilité par l'intermédiaire des animaux) et accroître les efficiences techniques et environnementales des SASP (Grillot *et al.*, 2018a). La dépendance aux ressources extérieures pose question en ce qui concerne la durabilité ; elle reste acceptable tant qu'elle se limite à une valorisation des coproduits de l'agro-industrie nationale par les animaux, puisqu'elle n'entre pas en compétition avec l'alimentation humaine. Une autre source durable d'azote pourrait être le développement de cultures fourragères légumineuses fixatrices de l'azote atmosphérique.

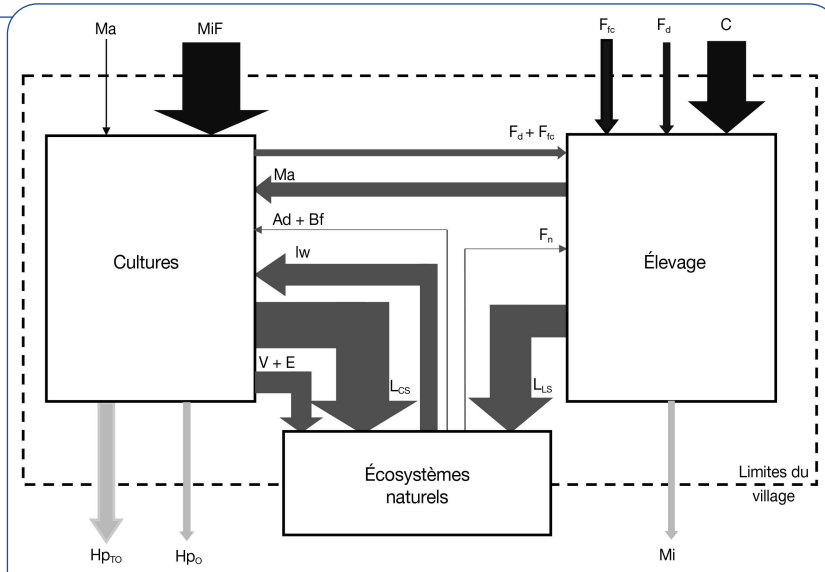
Contribution de l'élevage au métabolisme azoté d'un village indien

Le canton indien de Petlad, dans l'État du Gujarat, présente pour deux tiers des échantillons prélevés à l'échelle d'un village des taux de nitrates dans l'eau supérieurs à la limite de potabilité de 50 mg/l. Dans un contexte de forte densité animale, une analyse du métabolisme territorial du village par les flux d'azote a été conduite (Aubron *et al.*, 2021) afin d'évaluer la contribution de l'élevage, et de ses interactions avec les cultures, dans cette pollution.

Celle-ci a consisté à mener des bilans azotés et à évaluer l'efficience d'utilisation de l'azote (azote contenu dans les produits collectés / azote apporté) à l'échelle de la parcelle, du troupeau et de l'exploitation puis à extrapoler ces bilans à l'échelle du territoire pour mettre en lumière les flux d'azote entre les différentes activités agricoles et les composantes de l'écosystème (figure 3.14).

On observe ainsi qu'en dépit d'un potentiel élevé, l'intégration agriculture-élevage est limitée à Petlad, autant à l'échelle des exploitations que du territoire. En effet, les flux d'azote entre les activités d'élevage et de cultures sont faibles, en comparaison des entrées d'azote dans chaque activité, respectivement sous forme d'engrais de synthèse (65 % de l'azote entrant dans le village) et de concentrés alimentaires (25 % de l'azote entrant). Les flux d'azote en sortie, principalement représentés par le tabac (58 %), les autres produits des cultures (22 %) et le lait (20 %), sont mineurs et la plupart des entrées d'azote sont donc perdues, vers l'hydrosphère (plus de 600 kg d'excédent d'azote par hectare à l'échelle des cultures) et l'atmosphère. Bien que les subventions pour l'achat d'engrais azotés jouent un rôle majeur dans cette déconnexion entre agriculture et élevage, cette étude montre qu'elle s'explique aussi par la structure sociofoncière très inégalitaire qui prévaut à Petlad. En effet, la plupart des propriétaires possédant des surfaces suffisantes (> 1 ha) se tournent vers les cultures irriguées plus rémunératrices et tendent à abandonner l'élevage. À l'inverse, les ménages les plus pauvres avec un accès limité à la

Figure 3.14. Représentation des flux d'azote entre les activités agricoles et les écosystèmes dans un village du canton de Petlad (Aubron *et al.*, 2021).



Entrées de N dans le village (kg N/ha)
Ma : Effluents d'élevage (1)
MiF : Engrais minéraux (715)
F_{fc} : Fourrages verts cultivés (75)
F_d : Fourrages secs (36)
C : Concentrés (274)

Sorties de N du village (kg N/ha)
Hp_{To} : Tabac (101)
Hp_O : Autres produits des cultures* (38)
Mi : Lait* (36)

Flux de N internes (kg N/ha)
V + E : Volatilisation de NH_3 et émissions de N_2O (158)
L_{CS} : Autres pertes de N issues des cultures (626)
Iw : Irrigation (126)
Ad + Bf : Déposition atmosphérique et fixation biologique (9)
Ma : Effluents d'élevage (108)
L_{LS} : Pertes de N issues de l'élevage (284)
F_n : Fourrages spontanés (7)
$F_d + F_{fc}$: Fourrages secs et verts cultivés (36)

* : Les autoconsommations de lait et d'autres produits des cultures à l'intérieur du village ont été considérées comme négligeables et non comptabilisées.

terre élèvent des animaux laitiers pour compléter leurs revenus, mais peinent à alimenter leurs animaux, faute d'accès aux fourrages. Si le renforcement de l'intégration agriculture-élevage dans le territoire représente bien un levier de réduction des excédents d'azote, il n'apparaît donc pas évident à mobiliser dans un tel contexte de verrouillage social.

***

Les exemples développés dans cette section montrent comment l'IAE permet des progrès en matière de transition agroécologique, en fonction de l'efficience des processus biologiques associés : gestion des déjections animales pour la fertilisation organique, alimentation animale à partir de coproduits, complémentarités entre exploitations et

activités dans un territoire. L'analyse d'efficiences, et en particulier du recyclage de l'azote, permet d'évaluer les processus à l'œuvre pour tenter de les améliorer. Toutefois, dans des contextes de forte densité démographique, le recyclage n'est plus suffisant pour répondre aux besoins, et des entrées extérieures sont nécessaires (engrais, aliments concentrés) pour assurer l'équilibre de fonctionnement des systèmes : l'efficience des recyclages n'en est que plus cruciale car elle permet de valoriser au mieux dans le système ces intrants coûteux. Qui plus est, les politiques de subvention pour l'accès à ces intrants peuvent avoir l'effet pervers de rendre les recyclages moins nécessaires, et donc de freiner la transition agroécologique. L'ensemble de ces considérations ont été mises en lumière par l'analyse des efficiences, ce qui confirme l'intérêt de cette approche pour raisonner la durabilité de l'élevage et de ses contributions territoriales.

Ces travaux ont montré le rôle central que peuvent jouer les systèmes d'élevage dans la transition agroécologique. Ils sont en effet un maillon essentiel dans le recyclage des nutriments et le bouclage des cycles biogéochimiques, au-delà de la fourniture de biens alimentaires, à même d'envisager de nouvelles formes d'agriculture qui soient à la fois productives et respectueuses de leur environnement. Pour autant, les exemples montrent des marges de progrès pour réussir cette transition agroécologique : processus biologiques et écologiques à explorer pour améliorer l'utilisation de ressources naturelles, recyclage des nutriments pour accroître l'efficience des exploitations ou bien complémentarité entre espaces d'agriculture-élevage et espaces naturels pour la production d'un plus grand nombre de biens et de services au niveau des territoires.

Évaluation multicritère de l'efficience pour rendre compte de la multifonctionnalité des systèmes d'élevage au pâturage

Jonathan Vayssières, Véronique Alary, Claire Aubron, Christian Corniaux, Guillaume Duteurtre, Alexandre Ickowicz, Xavier Juanes, Samir Messad, Emmanuel Tillard, Abdrahmane Wane, Mathieu Vigne

Les deux sous-chapitres précédents, montrent que le calcul de l'efficience permet d'orienter la production vers une gestion sobre des ressources et une réduction des impacts environnementaux négatifs des systèmes d'élevage par le calcul d'indicateurs tels que la production de viande par quantité d'énergie non renouvelable (ENR) consommée et d'émissions de GES par litre de lait produit (sous-chapitre *Introduction : l'efficience, d'un simple ratio à un cadre d'analyse opérationnel pour appuyer le développement durable des systèmes d'élevage*, p. 82). Elle permet également de rendre compte des gains d'efficience d'utilisation des nutriments et de l'énergie dans les élevages au pâturage dans le cadre de la transition agroécologique (sous-chapitre *L'efficience pour rendre compte de la complexité des contributions des systèmes d'élevage au pâturage au changement climatique*, p. 86).