



HAL
open science

Évaluation des performances agroécologiques des systèmes de polyculture-élevage en milieu tropical humide: application de l'analyse de réseaux écologiques

Fabien Stark, Harry Archimède, Eliel González García, René Pocard-Chapuis, Audrey Fanchone, Charles-Henri Moulin

► To cite this version:

Fabien Stark, Harry Archimède, Eliel González García, René Pocard-Chapuis, Audrey Fanchone, et al.. Évaluation des performances agroécologiques des systèmes de polyculture-élevage en milieu tropical humide: application de l'analyse de réseaux écologiques. Innovations Agronomiques, 2019, 72, pp.1-14. 10.15454/11w6us . hal-02105006

HAL Id: hal-02105006

<https://hal.science/hal-02105006>

Submitted on 19 Apr 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Evaluation des performances agroécologiques des systèmes de polyculture-élevage en milieu tropical humide : application de l'analyse de réseaux écologiques

Stark F.^{1,2}, Archimède H.³, González-García E.⁴, Pocard–Chapuis R.^{4,5}, Fanchone A.³,
Moulin C.H.⁴

¹Innovation, Univ Montpellier, INRA, CIRAD, Montpellier SupAgro, Montpellier, France

²DRAAF Occitanie, Sriset, Montpellier, France

³URZ, INRA, Centre Antilles Guyane, Guadeloupe, France

⁴SELMET, Univ Montpellier, INRA, CIRAD, Montpellier SupAgro

⁵CIRAD, UMR SELMET, Bélem, PA, Brasil

Correspondance : fabien.stark@agriculture.gouv.fr

Résumé

L'agroécologie propose un cadre théorique pertinent pour concevoir des systèmes agricoles à la fois productifs, autosuffisants, efficaces et résilients. Dans ce travail, nous questionnons dans quelle mesure, les systèmes mixtes agriculture-élevage (SMAE) les plus intégrés sont-ils aussi plus performants. Par l'analyse comparative de dix-sept études de cas issues de trois territoires tropicaux contrastés (Guadeloupe, Amazonie brésilienne, Cuba), nous appliquons l'analyse de réseaux écologiques (cf. *Ecological Network Analysis*, ENA) pour en caractériser l'intégration agriculture-élevage (IAE) et en évaluer les performances agroécologiques à partir d'indicateurs comme l'efficacité, la productivité, le recyclage des nutriments (azote), la dépendance et la résilience. Nos résultats, issus de la reconstitution du fonctionnement des exploitations sur une année donnée, montrent que les exploitations peu intégrées sont soit peu efficaces et peu résilientes, soit peu productives et fortement résilientes. En revanche, des exploitations fortement intégrées combinent un niveau élevé de productivité, d'efficacité et un bon niveau de résilience.

Mots-clés : Agroécologie, Analyse des réseaux, Flux d'azote, Efficacité, Résilience, Autosuffisance, Dépendance, Intégration agriculture - élevage, Guadeloupe, Amazonie brésilienne, Cuba.

Abstract: Assessment of agroecological properties of mixed farms in the humid tropics : the application of ecological network analysis

This study presents an agroecological analysis of crop-livestock integration (CLI) in mixed farming systems (MFS). We question to what extent, at farming system level, CLI, as a set of agricultural practices mobilizing ecological processes, can contribute to the agroecological performance of MFS: efficiency, productivity, resilience and dependency. We first develop a methodological framework based on ecological network analysis (ENA) to assess the properties of agrosystems. We then apply this methodological framework to seventeen case studies in the humid tropics, from three territories: Guadeloupe, Brazilian Amazonia, and Cuba. The MFS studied were modelled into nitrogen flow networks. The results suggest that less integrated farms are inefficient and poorly resilient, or not very productive and resilient. However, highly integrated farms combine a high level of productivity and efficiency and an intermediate level of resilience. We demonstrate the benefits of ENA for the analysis of the functioning and agroecological performance of agricultural systems, even if such performance is not wholly dependent on CLI practices.

Keywords: Agroecology, Network analysis, Nitrogen flow, Efficiency, Resilience, Self-sufficiency, Dependency, Crop-livestock integration, Guadeloupe, Brazilian Amazonia, Cuba.

1. L'agroécologie comme cadre d'analyse pour des systèmes agricoles complexes

L'agriculture doit répondre à des enjeux de plus en plus complexes : produire plus (pour satisfaire à une demande alimentaire toujours croissante) avec moins (compte tenu de la raréfaction des ressources naturelles) et en s'adaptant à de nouvelles contraintes liées aux changements rapides et brutaux que subissent les socio-écosystèmes. Dans le champ des possibles, l'agroécologie s'avère être un cadre d'analyse pertinent pour conduire des agrosystèmes durables valorisant les processus écologiques et les interactions bénéfiques au sein des agrosystèmes (Gliessman, 2005 ; Wezel *et al.*, 2009). Deux éléments nous semblent essentiels dans l'application des principes de l'agroécologie à la conduite des systèmes agricoles : la diversité biologique (ou biodiversité) et les interactions biologiques (Malézieux, 2012). En écologie, les écosystèmes les plus « matures », *i.e.* les plus diversifiés en termes de structure, et les plus complexes en termes de fonctionnement, montrent en effet une plus grande productivité, une plus grande efficacité et une plus grande résilience (Gliessman, 2005 ; Tilman *et al.*, 2002; Ulanowicz *et al.*, 2009). Bonaudo *et al.* (2014) montrent plus spécifiquement que la productivité, l'autosuffisance, la résilience et l'efficacité sont les principes fondamentaux pour la reconception de systèmes agricoles agroécologiques.

A nos yeux, les systèmes mixtes agriculture-élevage (SMAE) représentent des systèmes de production adaptés à l'application de ces principes. En effet, les pratiques d'intégration agriculture-élevage (IAE) en sont le fondement, en tant que pratiques visant à exploiter les interactions et synergies au sein de la diversité d'activités et de composantes de ces systèmes. Cependant, à l'échelle du système de production, l'IAE, en tant que système de pratiques agricoles, n'a été que partiellement étudiée. L'IAE prend différentes formes en fonction de son environnement (Iiyama *et al.*, 2007). Elle est en effet fonction des pratiques agricoles mises en œuvre, qui dépendent de la nature des productions animales et végétales en interactions, du type de pratiques considérées (fertilisation, alimentation...), des dimensions spatio-temporelles de ces pratiques (rotation, association, transhumance...), de la nature même des flux générés par ces pratiques (biomasse, nutriments, énergie, travail, matériel...) et finalement de leurs finalités (protection sanitaire, fertilité des sols, alimentation, microclimat, bien être, etc.). Comprendre l'IAE non plus comme une pratique technique entre deux composantes en interaction, mais comme système de pratiques à l'échelle du système de production est donc primordiale (Rufino *et al.*, 2009).

En effet, dans une vision holistique et systémique, la résultante des pratiques d'IAE à l'échelle du système de production est plus que la somme des pratiques d'IAE prises individuellement. L'hypothèse qui est faite est que des propriétés émergentes en découleraient, en termes de recyclage global, d'efficacité et de résilience, à l'échelle du système étudié. L'analyse holistique et systémique de l'IAE, en termes de flux de nutriments, nous apparaît dès lors centrale pour en apprécier sa contribution à la conduite durable des systèmes agricoles (Bonaudo *et al.*, 2014 ; González-García *et al.*, 2012).

Notre objectif est ainsi de pouvoir évaluer les performances des SMAE en fonction de formes différentes d'IAE à partir de critères suffisamment génériques. Nous questionnons dans quelle mesure, à l'échelle des exploitations agricoles, les SMAE plus intégrés, *i.e.* avec des réseaux de flux de nutriments les plus diversifiés et les plus complexes, sont agroécologiquement plus performants, tout en étant à la fois productifs, efficaces, autosuffisants et résilients (Altieri *et al.*, 2012 ; Bonaudo *et al.*, 2014).

2. Analyse comparative d'études de cas contrastés en milieu tropical humide

En fonction de la gamme de ressources disponibles, des conditions pédoclimatiques, du contexte socioéconomique, de l'accès aux intrants et facteurs de production, les systèmes agricoles présentent des structures et des logiques de fonctionnement différentes (Zahm *et al.*, 2007). A la différence des systèmes spécialisés, fondés sur une artificialisation de leur milieu environnant pour s'affranchir de ses contraintes, les systèmes mixtes et intégrés ont plutôt tendance à mieux valoriser les processus naturels de l'écosystème ce qui les rend, en général, plus sensibles à leur environnement. Nous avons ainsi mené une analyse comparative de cas d'études dans des contextes socio-économiques très contrastés pour construire un gradient de pratiques d'IAE à étudier afin d'en évaluer les performances. En se basant sur des collaborations scientifiques existantes, trois terrains d'étude en milieu tropical humide ont été retenus, présentant des conditions pédoclimatiques similaires mais des situations socioéconomiques contrastées nous permettant l'étude d'une gamme de systèmes de pratiques d'IAE différents (Tableau 1).

Au total, 17 études de cas ont été retenues sur les 3 terrains pour couvrir une diversité de SMAE et un gradient d'IAE (tableau 2). Ces études de cas ont été sélectionnées sur la base de travaux exploratoires réalisés précédemment en Guadeloupe (n=8), au Brésil (n=4) et dans le cadre de projets de recherche-développement en cours à Cuba (n=5). Ces travaux ont permis d'identifier des exploitations présentant des pratiques d'IAE diversifiées et contrastées au sein de chaque territoire. Il ne s'agissait pas en effet d'être représentatif de la diversité locale des SMAE présents, mais de travailler sur des SMAE présentant une large gamme de pratiques d'IAE. La collecte des données a été organisée suivant le cadre compréhensif proposé par l'approche globale de l'exploitation agricole (Bonneviale *et al.*, 1989). A travers des entretiens itératifs et semi-directifs, les données qualitatives et quantitatives ont pu être renseignées pour chaque étude de cas : ressources disponibles, occupation et usage des sols, productions animales et végétales, pratiques culturales et pratiques d'élevage. Sur cette base, le fonctionnement moyen des exploitations étudiées sur une année donnée a ainsi pu être reconstitué. L'échantillon ainsi constitué présente des SMAE plus ou moins diversifiés (entre 2 et 8 productions), pour lesquels les productions animales principalement présentes sont les bovins (n=13) et les porcins (n=12). En Guadeloupe et au Brésil (exception faite d'une étude de cas), les ruminants sont élevés au pâturage sans production fourragère complémentaire. Les productions végétales principales sont les cultures fourragères à Cuba, les cultures d'exportation (canne à sucre et banane) en Guadeloupe, les cultures maraîchères en Guadeloupe et à Cuba, et les cultures vivrières et fruitières pour les 3 sites d'étude.

Tableau 1 : Caractéristiques générales (accès aux facteurs de productions et contexte socio-économique) des terrains d'études et hypothèses de développement de l'IAE («-» = faible «=» = moyen ; « + » = fort).

| | Guadeloupe | Amazonie brésilienne (Paragominas, Etat du Pará) | Cuba (Province de Matanzas) |
|---|------------------------------------|---|---------------------------------------|
| Accès aux facteurs de production | | | |
| Main d'œuvre | - | = | + |
| Terre | - | + | = |
| Capital | + | = | - |
| Contexte socioéconomique | Petite région insulaire développée | Région continentale en transition | Région insulaire « atypique » |
| Hypothèses sur IAE | Peu développée | Développée | Très développée |

Tableau 2: Caractéristiques générales des 17 études de cas, indicateurs d'IAE et performances agroécologiques

| | G1 | G2 | G3 | G4 | G5 | G6 | G7 | G8 | B1 | B2 | B3 | B4 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
|--|-------------|-------|------|-------|--------------|--------------|--------------|------|----------|----------|--------|------------|-------------|--------------|-----------|---------------|---------------|
| Caractéristiques générales | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cultures ¹ | Ft, Vi | Ft, M | E, M | E, Vi | E, Ft, M, Vi | E, Ft, M, Vi | E, Ft, M, Vi | E | Vi | Ft, Vi | Ft, Vi | Fg, Ft, Vi | Fg, Vi | Fg, F, M, Vi | Fg, M, Vi | Fg, Ft, M, Vi | Fg, Ft, M, Vi |
| Élevage ² | B, P, Vo, R | P, Vo | B, P | B | B | B, P | P, Vo | P | B, P, Vo | B, P, Vo | B, Vo | B | B, P, Vo, L | B, P, Vo | B, P | Vo, L | B, P, Vo, L |
| Stockage ³ | Sa | Sa | Sa | - | Sa | Sa | Sa | - | - | - | - | Sc | Sa | Sa, Sc | Sa, Sc | Sa | Sa |
| Surface totale (ha) | 2,5 | 2,7 | 10,0 | 12,9 | 14,6 | 16,6 | 13,0 | 13,0 | 20,5 | 50,5 | 22,0 | 100,0 | 43,1 | 33,3 | 28,9 | 64,0 | 13,8 |
| Pâturage (%) | 60 | 0 | 30 | 47 | 24 | 24 | 0 | 0 | 88 | 85 | 91 | 80 | 93 | 90 | 72 | 3 | 40 |
| Effectif animal ⁴ | 27,5 | 6,0 | 9,2 | 17,6 | 32,8 | 26,8 | 23,5 | 2,4 | 24 | 32,2 | 11,4 | 86,4 | 29,5 | 61,2 | 58,4 | 7,0 | 64,3 |
| Indicateurs d'intégration agriculture-élevage | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Activité totale ⁵ | 179 | 128 | 137 | 749 | 197 | 162 | 263 | 292 | 31 | 22 | 32 | 46 | 66 | 92 | 190 | 110 | 502 |
| Intensité de l'IAE ⁵ | 6,2 | 24,3 | 1,1 | 1,3 | 3,0 | 1,2 | 5,3 | 3,4 | 2,1 | 3,0 | 0,7 | 14,1 | 8,0 | 6,1 | 40,1 | 14,7 | 246,8 |
| Organisation du réseau de flux ⁶ | 0,55 | 0,65 | 0,7 | 0,85 | 0,78 | 0,70 | 0,65 | 0,91 | 0,39 | 0,40 | 0,39 | 0,82 | 0,54 | 0,49 | 0,53 | 0,52 | 0,61 |
| Indicateurs de performances agroécologiques | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Productivité ⁵ | 38 | 49 | 43 | 38 | 69 | 56 | 52 | 39 | 23 | 13 | 26 | 22 | 22 | 39 | 68 | 78 | 72 |
| Dépendance ⁵ | 165 | 102 | 129 | 146 | 183 | 149 | 258 | 289 | 1 | 3 | 1 | 10 | 22 | 2 | 66 | 60 | 152 |
| Efficience (%) | 23 | 48 | 33 | 26 | 38 | 38 | 20 | 14 | 1 | 3 | 3 | 231 | 103 | 2 066 | 102 | 128 | 47 |
| Résilience ⁶ | 0,66 | 0,58 | 0,48 | 0,31 | 0,54 | 0,61 | 0,70 | 0,32 | 0,78 | 0,73 | 0,82 | 0,37 | 0,65 | 0,79 | 0,68 | 0,62 | 0,58 |

G1 - G8: Guadeloupe ; B1 - B4: Brésil ; C1 - C5 : Cuba

¹ Culture: E: culture exportation, Ft: fruits, Fg: fourrage, M: maraîchage, Vi: culture vivrière

² Élevage: B bovin, P: porcine, Vo: volaille, L: lapin

³ Stockage: Sa: déjection animale, Sc: cultures et résidus de culture

⁴ TLU = Tropical Livestock Unit; 1 bovin = 0,8 TLU, 1 porcine = 0,2 TLU, 1 lapin = 1 volaille = 0,01 TLU

⁵ kg N.ha⁻¹.an⁻¹

⁶ sans dimension

3. L'analyse de réseaux écologiques pour l'étude des systèmes agricoles

3.1 Modélisation matricielle de la structure et du fonctionnement des systèmes agricoles

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 de réseau de flux en une matrice de flux pour pouvoir ensuite conduire l'analyse quantitative à proprement parler (Figure 1).

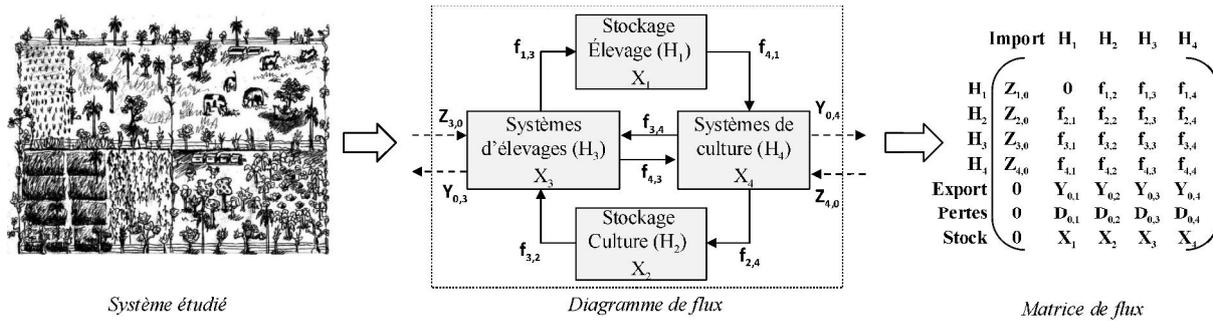


Figure 1 : Schéma récapitulatif des étapes de modélisation matricielle de la structure et du fonctionnement des systèmes étudiés.

La première étape consiste en la conceptualisation du système étudié, ici le système de production à l'échelle de l'exploitation, en un réseau de flux de matière. Cette étape nécessite de définir les frontières du système avec son environnement, les compartiments (systèmes d'élevages et de culture), d'identifier les flux entre ces compartiments (alimentation, fertilisation), puis entre ces compartiments et l'environnement du système (intrants, productions, pertes et émissions). Le résultat finalement obtenu est un diagramme de flux, véritable modèle conceptuel du système étudié pour son analyse. Pour conduire cette première étape, il est nécessaire de caractériser la structure et le fonctionnement global du système, afin de décrire en détails les productions présentes et leurs modes de conduite. Le choix des compartiments et du niveau d'agrégation des composantes du système en compartiments distincts dépend du niveau de détail retenu pour une analyse et une problématique donnée. Sur la base de l'échantillon de cette étude, le choix a été fait de regrouper les différentes productions en 5 compartiments végétaux (fourrage, maraîchage, culture vivrière, culture d'exportation, fruits) et 4 productions animales (bovin, porcin, volaille et lapin). Dans le cas des bovins, animaux et prairies permanentes ont été regroupées en un compartiment unique pour que les interactions entre ces deux systèmes n'aient pas trop de poids dans l'analyse. Deux compartiments de stockage complètent le modèle conceptuel proposé: stockage des déjections et stockage des végétaux (Figure 2).

La seconde étape de modélisation des interactions entre compartiments en une matrice de flux servira de base pour le calcul des indicateurs. Sur la base du diagramme de flux, il s'agit de quantifier chacun des flux en une unité commune. Pour cela il est nécessaire de détailler les itinéraires techniques et les modes de conduite de chacune des productions, en termes d'intrants utilisés, de valorisation de résidus de culture, de déjections animales, et de produits exportés. Les flux sont quantifiés de trois manières : observations directes, entretiens avec les exploitant(e)s, et estimations à partir de la littérature scientifique. Il est ensuite nécessaire de ramener ces flux à une échelle temporelle commune, l'année dans notre cas, correspondant à l'échelle usuelle d'analyse d'une exploitation agricole.

Après avoir quantifié chaque flux dans l'unité qui leur est propre (nombre d'animaux, litre de lait, poids carcasse, quantité de MS, ...), les flux sont ramenés à une unité commune au moyen de coefficients de conversion disponibles dans la littérature. Dans notre cas, nous avons fait le choix de raisonner nos modèles de flux en azote, l'azote étant un nutriment essentiel dans les transferts entre élevages et cultures.

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

3.2 Analyse de réseau écologique et calcul matriciel

La Figure 2a illustre un modèle théorique de réseau de flux à 2 compartiments et synthétise l'ensemble des informations nécessaires pour l'analyse de réseaux écologiques (adapté de Finn, 1980). La figure 2b illustre le modèle conceptuel commun aux 17 études de cas, permettant dès lors de comparer sur une base commune (même nombre de compartiments, mêmes frontières) l'ensemble des études de cas.

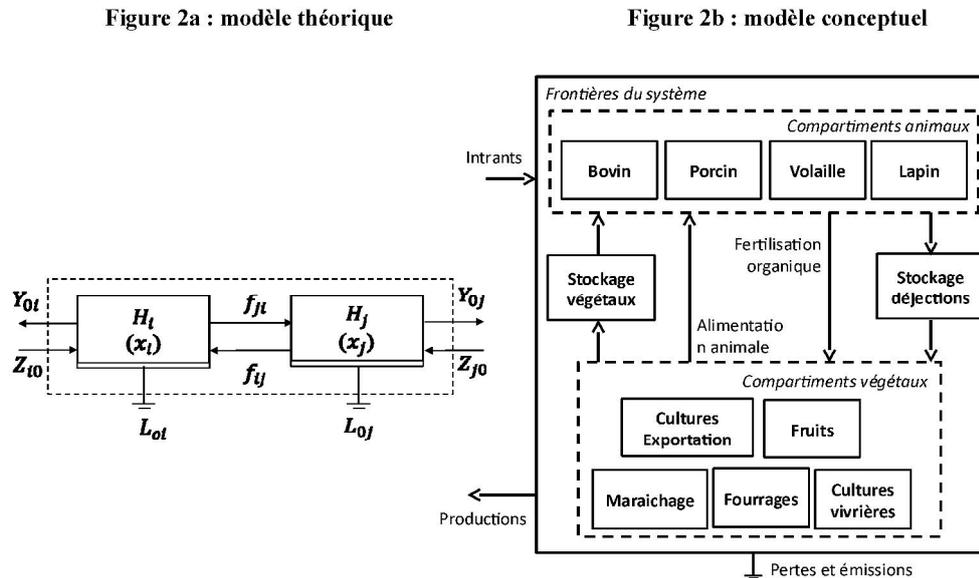


Figure 2 : Modèle théorique d'un réseau de flux à deux compartiments (adapté de Finn, 1980) et modèle conceptuel commun aux 17 études de cas.

Les flux de matière sont exprimés en $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ et circulent d'un compartiment ($j=0, \dots, n$; 0 correspondant aux intrants et n au nombre de compartiments) à un autre compartiment i ($i=1, \dots, n+1, n+2$), $n+1$ correspondant aux productions et $n+2$ aux pertes et aux émissions. Chaque système est caractérisé par les éléments suivants: n le nombre de compartiments; H_i et H_j , les compartiments i et j ; x_i et x_j le stockage des compartiments i et j ; f_{ij} les flux internes, entre le compartiment H_j et le compartiment H_i ; Y_{oi} et Y_{oj} les flux sortants; Z_{oi} et Z_{oj} les flux entrants; L_{oi} et L_{oj} les pertes et émissions.

Trois indicateurs permettent de caractériser l'IAE à l'échelle de l'exploitation :

- L'**activité totale du système** est mesurée par le « total system throughflows » (TST) qui comptabilise l'intensité de l'ensemble des flux circulants, entre les compartiments et avec l'extérieur.
- L'**intensité de l'IAE** est mesurée par le « total internal throughflows » (TT) qui comptabilise l'intensité des flux circulants uniquement entre les compartiments, et donc les flux internes au système de production correspondant aux flux d'IAE.
- L'**organisation du réseau de flux** est estimée par le ratio entre l'organisation actuelle du réseau de flux (intensité et distribution ; AMI) et son potentiel permis par la configuration du réseau de flux (incertitude statistique, Hr). Plus le ratio est proche de 0, plus le réseau de flux est réparti de manière homogène entre les compartiments. Le Tableau 3 synthétise les algorithmes de calcul de ces indicateurs (voir Stark *et al.*, 2018).

Quatre indicateurs (Tableau 3) permettent, quant à eux, d'évaluer les performances des systèmes étudiés :

- La **productivité** est mesurée par la somme des productions sortantes (hors pertes et émissions), ramenée ensuite à l'hectare pour la comparaison entre systèmes ;
- La **dépendance** (corollaire de l'autosuffisance) est mesurée par la somme des flux entrants dans le système, ramenée ensuite à l'hectare pour la comparaison entre systèmes ;
- L'**efficience** est mesurée par le ratio entre la productivité et la dépendance;
- Enfin, la **résilience** est mesurée par le ratio ϕ/C (overhead / development capacity) qui vient des sciences de l'information et est inspiré de « l'ascendency suite » développée par Ulanowicz (2004) en écologie. Cet indicateur correspond à la *capacité de réserve* du système, calculée en fonction de la configuration et de l'intensité du réseau de flux (flux directs entre deux compartiments et flux indirects qui impactent les flux rétroactivement) et qui confère au système sa propriété d'adaptation et d'évolution face à des perturbations. Plus le ratio est proche de 1, plus le système a une capacité de réserve conséquente, permise par un réseau de flux indirects dense.

Tableau 3 : Eléments de calcul des indicateurs d'IAE et de performances

| Indicateurs de caractérisation de l'IAE | | Indicateurs de performances | |
|---|--|-----------------------------|---|
| Activité totale du système | $TST = \sum_{i=1}^n T_i$ | Productivité | $\sum_{j=1}^n Y_{0j}$ |
| Flux circulant | $T_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} + Z_{i0} - (\dot{x}_i)$ | Dépendance | $\sum_{i=1}^n Z_{i0}$ |
| Intensité de l'IAE | $TT = \sum_{i=1}^{j=n} f_{ij}$ | Efficience | $\sum_{j=1}^n Y_{0j} / \sum_{i=1}^n Z_{i0}$ |
| 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 |

Sur la base d'une matrice de flux construite pour chaque étude de cas, certains indicateurs sont facilement calculables : intensité de l'IAE, productivité, dépendance et efficience. Les autres indicateurs correspondent à des algorithmes plus complexes et sont calculés en utilisant le logiciel R et la librairie enaR (Lau *et al.*, 2017). Après l'analyse descriptive de nos résultats, une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée sur six des indicateurs retenus (Lê *et al.*, 2008). L'indicateur d'efficience n'a pas été inclus dans l'ACP, du fait de sa corrélation directe aux indicateurs de productivité et de dépendance. Il en est de même de l'étude de cas C5, du fait de sa trop grande distance avec les valeurs des autres études de cas, ayant pour effet de réduire très fortement la contribution des autres individus et ainsi de réduire la portée de l'analyse.

4. Caractérisation des pratiques d'intégration agriculture-élevage et évaluation des performances agroécologiques

4.1 Intensité et organisation de l'IAE

L'analyse descriptive des résultats (Tableau 2) montre que les systèmes étudiés ont une activité totale (azote circulant) comprise entre 22 et 1 749 kg.N.ha⁻¹.an⁻¹ traduisant des niveaux « d'intensité » de la circulation de l'azote dans le système très hétérogènes, la valeur médiane étant de 137 et la moyenne de 274 kg.N.ha⁻¹.an⁻¹. Concernant l'IAE, la gamme de SMAE étudiés présente des niveaux d'intensité eux aussi variables : de 1 kg N.ha⁻¹.an⁻¹ à 247 kg.N.ha⁻¹.an⁻¹, avec une valeur médiane de 5, 3 et une moyenne de 22,4 kg.N.ha⁻¹.an⁻¹). Il en est de même pour l'organisation du réseau de flux, avec des exploitations présentant un réseau de flux très hétérogène ($AMI/H_r > 0,7$; *i.e.* flux concentrés sur un nombre restreint de compartiments) et des exploitations ayant au contraire un réseau de flux plus homogène ($AMI/H_r < 0,6$; *i.e.* flux dispersés entre un grand nombre de compartiments).

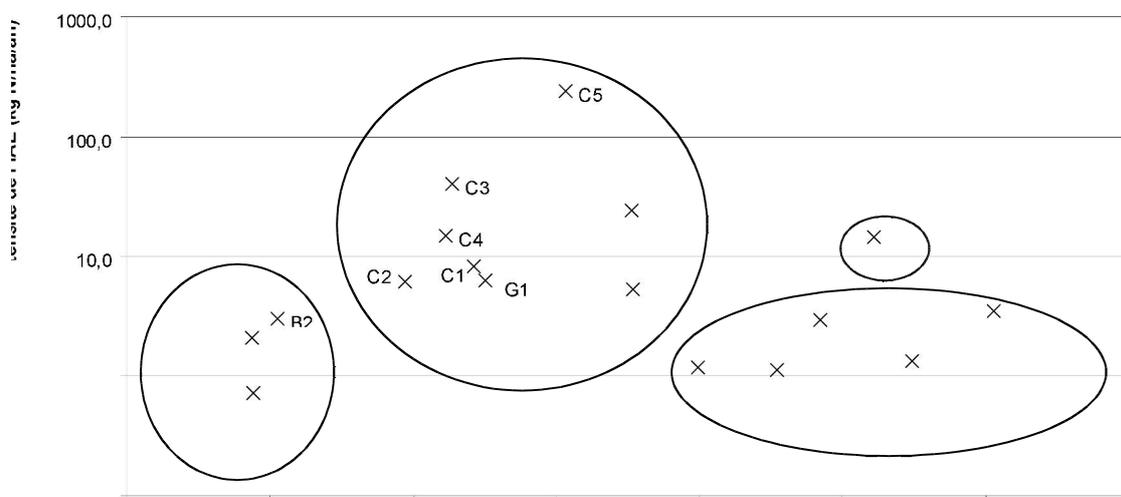


Figure 3: Intensité de l'intégration agriculture-élevage en fonction de l'organisation des flux des 17 études de cas.

Le croisement des 2 derniers indicateurs permet ainsi une caractérisation de l'IAE à l'échelle de l'exploitation, suivant l'intensité des flux internes et l'organisation du réseau de flux. 4 types d'IAE peuvent ainsi être décrits (Figure 3) :

- Des systèmes avec peu de flux d'IAE et de faible intensité ($TT \leq 3,4$ kg N.ha⁻¹.an⁻¹; $AMI/H_r \geq 0,7$; n=5) correspondant principalement aux exploitations Guadeloupéennes qui mettent en œuvre des pratiques d'IAE de façon marginale (valorisation de résidus de culture, valorisation d'une partie des déjections des bâtiments d'élevage) ;
- Des systèmes avec plusieurs flux d'IAE de faible intensité ($TT \leq 3$ kg N.ha⁻¹.an⁻¹; $AMI/H_r \leq 0,41$; n=3) ; correspondant principalement aux exploitations Brésiliennes qui mettent en œuvre de nombreuses pratiques d'IAE mais qui correspondent à de faibles flux de matière (production d'aliment pour les animaux, valorisation des déjections pour fumure organique, production de fourrage) ;
- Des systèmes présentant une intensité élevée d'IAE réparti sur un réseau de flux relativement homogène ($TT \geq 8$ kg N.ha⁻¹.an⁻¹; $0,49 \leq AMI/H_r \leq 0,65$; n=8) ; correspondant

principalement aux exploitations Cubaines, et à quelques exploitations Guadeloupéennes, qui mettent en œuvre de nombreuses pratiques d'IAE correspondantes à des flux de matière conséquent (production d'alimentation à la ferme, transformation et stockage des déjections et des végétaux,...) ;

- Un système présentant une intensité élevée d'IAE concentrée sur un nombre restreint de flux ($TT = 14,1 \text{ kg N.ha}^{-1}.an^{-1}$; $AMI/H_r = 0,82$) ; correspondant à une exploitation brésilienne produisant une quantité importante de maïs ensilage pour l'alimentation des bovins.

4.2 Evaluation des performances agroécologiques des SMAE

En fonction des exploitations, et dans une moindre mesure des régions (Tableau 2), les systèmes étudiés présentent des productivités variant de 13 à 72 $\text{kg N.ha}^{-1}.an^{-1}$ (valeur médiane de 39 et moyenne de 44 $\text{kg N.ha}^{-1}.an^{-1}$) et des niveaux de dépendance compris entre 1 et 289 $\text{kg N.ha}^{-1}.an^{-1}$ (valeur médiane et moyenne de 102 $\text{kg N.ha}^{-1}.an^{-1}$). L'efficacité qui en résulte présente des profils contrastés (Figure 4):

- En bas à gauche de la figure, des systèmes extensifs peu consommateurs d'intrants (dépendance $\leq 22 \text{ kg N.ha}^{-1}.an^{-1}$) et très peu productifs ($\leq 39 \text{ kg N.ha}^{-1}.an^{-1}$). Il s'agit des 4 exploitations brésiennes et de 2 exploitations cubaines ($n=6$) qui présentent des niveaux d'efficacité supérieurs, voire très supérieurs à 100 % (compris entre 103 et 3 303 %, avec une valeur médiane de 1 211 %).
- A droite de la figure, on trouve des systèmes intensifs, plus productifs (compris entre 38 et 72 $\text{kg N.ha}^{-1}.an^{-1}$) et très consommateurs d'intrants (dépendance $\geq 102 \text{ kg N.ha}^{-1}.an^{-1}$). Il s'agit de l'ensemble des exploitations Guadeloupéennes et d'une exploitation cubaine ($n=9$). Par conséquent, ces systèmes sont les moins efficaces (14 à 47%),
- En haut du graphique, on trouve des systèmes ayant des niveaux de productivités plus élevés ($\leq 68 \text{ kg N.ha}^{-1}.an^{-1}$) et présentant des niveaux de dépendance intermédiaires (compris entre 60 et 66 $\text{kg N.ha}^{-1}.an^{-1}$). Il s'agit de 2 exploitations cubaines présentant des niveaux d'efficacité proches de 100 %.

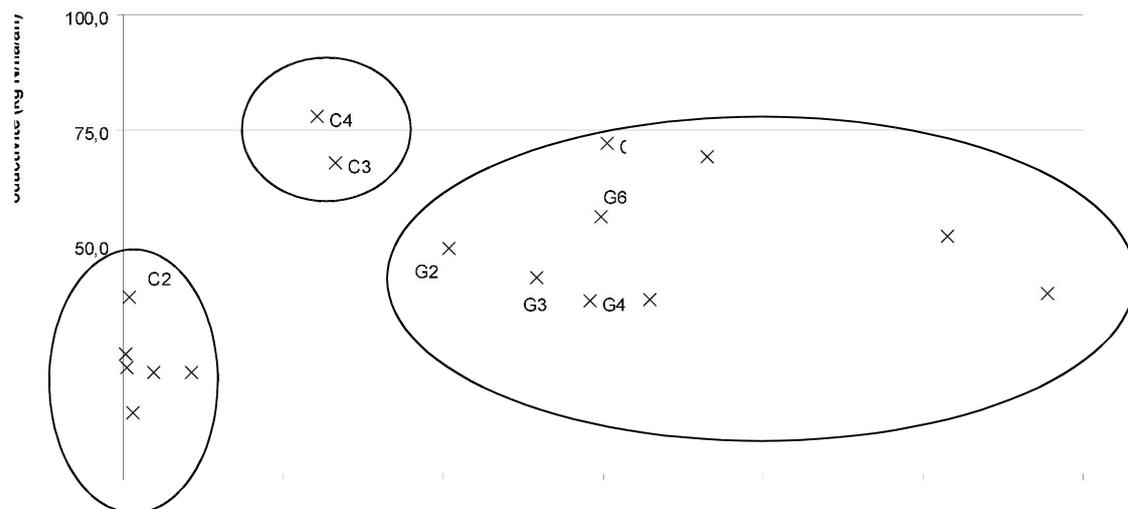


Figure 4 : Relation entre indicateurs de productivité et de dépendance, et profils d'efficacité qui en découlent.

En ce qui concerne la mesure de la résilience, cette dernière varie entre 0,31 et 0,82 (valeur médiane de 0.62). L'analyse statistique bivariée des indicateurs de performances ne permet pas d'identifier de relation particulière entre la résilience et les autres indicateurs de performance à ce stade (dépendance, productivité, efficacité).

4.3 Contribution de l'IAE aux performances des SMAE

L'analyse multivariée des variables de caractérisation de l'IAE et d'évaluation des performances des SMAE nous a permis à la fois de mesurer les relations entre ces variables et de regrouper les systèmes ayant des propriétés similaires. Les résultats présentés, issus de l'ACP, concernent les deux premières dimensions qui expliquent 79 % de la variabilité de notre échantillon.

Le cercle de corrélation de la Figure 5a, qui représente la distribution des six variables retenues pour l'ACP montre que, pour notre échantillon :

- La dépendance et l'activité du système sont étroitement corrélées, ce qui signifie que la majorité de l'azote circulant dans les systèmes étudiés provient des intrants, et dans une moindre mesure de l'IAE (flux internes) ;
- La résilience et l'organisation des flux sont étroitement corrélées, ce qui est cohérent avec le fait que plus un système présente une diversité de flux connectant ses compartiments, plus l'azote est en capacité de prendre des « chemins » différents, et donc de contribuer à la capacité d'adaptation du système face à des aléas ou aux exigences des cycles productifs ;
- La résilience et l'organisation des flux sont négativement corrélés à la dépendance et à l'activité du système, ce qui s'explique par le fait que lorsque la majorité de l'activité du système est déterminée par des intrants, la répartition des flux à l'échelle du système qui en résulte est hétérogène (flux concentrés sur les intrants), et que par conséquent, le nombre de voies possible pour l'azote circulant en est réduit (N circulant concentré sur les inputs), conduisant à de faibles niveaux de résilience ;
- La productivité et l'intensité de l'IAE sont partiellement corrélées, alors que, contrairement à nos hypothèses, l'intensité de l'IAE et la dépendance ne sont pas corrélées. Il semble donc que dans les situations étudiées, les pratiques d'IAE n'apparaissent pas comme des pratiques de substitution à l'usage d'intrants (d'un point de vue quantitatif en termes d'azote) mais qu'elles sont complémentaires et contribuent de fait à la productivité globale des systèmes étudiés.

La Figure 5b représente la projection des études de cas sur le premier plan de l'ACP. La lecture du plan permet d'identifier quatre situations en termes de système de pratiques d'IAE et de performances agroécologiques :

- Des systèmes à haut niveau d'intrant (SD), peu résilients et peu efficaces malgré de bonnes productivités. Ces systèmes mettent en œuvre peu de pratiques d'IAE qui sont de faible intensité. Il s'agit de la majorité des exploitations Guadeloupéennes;
- Des systèmes à bas niveaux d'intrants et à bas niveau de productivité, mais résilients (SE). Ces systèmes mettent en œuvre toute une diversité de pratiques d'IAE, mais de faible intensité. Il s'agit d'exploitations brésiliennes et de 2 exploitations intermédiaires cubaines;
- Des systèmes qui sont efficaces, productifs grâce aux intrants et à l'intensité de l'IAE, et quand même résilients (SI). Ils mettent en œuvre une diversité de pratiques d'IAE d'intensité conséquente. Il s'agit de 2 exploitations cubaines et d'une exploitation Guadeloupéenne ;
- Des systèmes intermédiaires en termes d'usage d'intrants (Spl), ayant un niveau de résilience moyen, et un faible niveau d'efficacité (consommation d'input et productivité moyenne), et

mettant en œuvre peu de pratiques d'IAE. Il s'agit principalement d'exploitations guadeloupéennes et d'une exploitation brésilienne.

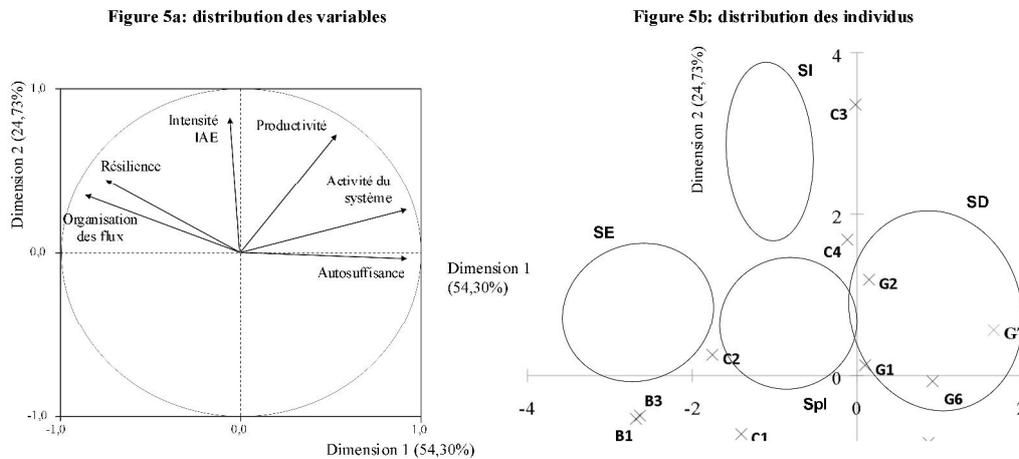


Figure 5: Cercle de corrélation des indicateurs d'IAE et de performances (5a) et projection des 16 études de cas sur le premier plan (5b) de l'analyse en composante principale.

5. Discussion et conclusion

5.1 Apports des réseaux écologiques à l'étude des systèmes agricoles

Pour évaluer le rôle de l'IAE dans l'interprétation des performances des SMAE, il nous apparaissait essentiel de pouvoir caractériser l'IAE à l'échelle du système. Nous avons fait le choix de l'analyser comme un réseau de flux d'azote, en mobilisant la méthode d'analyse des réseaux écologiques. Nous avons ainsi identifié deux propriétés qui permettent de caractériser l'IAE : l'intensité des flux et leur organisation.

L'évaluation des performances s'est faite aussi sur la base des flux d'azote, afin d'avoir une analyse qui soit homogène avec celle de l'IAE. En s'inspirant des travaux d'Altieri et Nicholls (2012) et Bonaudo *et al.* (2014), nous avons décliné les enjeux de l'agriculture à travers le prisme de l'agroécologie, en quatre types de performance : l'efficacité, la productivité, la dépendance et la résilience. S'agissant d'une analyse de type « input-output » (Fath *et al.*, 2007), les indicateurs développés pour évaluer l'efficacité, la productivité et la dépendance ne sont pas nouveaux mais présentent un intérêt dès lors qu'ils sont mobilisés conjointement dans une dimension commune. De plus, l'évaluation de la résilience, vue à travers l'analyse des réseaux contribue fortement aux enjeux d'évaluation multicritère des systèmes agricoles.

La résilience peut être définie comme la capacité d'un système à absorber une perturbation, à se réorganiser et à continuer de fonctionner, tout en conservant la même fonction, la même structure, la même identité (Walker *et al.*, 2004). L'un des enjeux de l'analyse des exploitations agricoles en tant que systèmes socio-écologiques (Darnhofer *et al.*, 2010), concerne la capacité à apprécier cette résilience. Or la résilience fait référence à un processus dynamique d'adaptation vis-à-vis d'une perturbation, ce qui rend difficile son évaluation.

L'indicateur que nous proposons n'a pas pour ambition d'appréhender toute la complexité du concept de résilience d'une exploitation agricole (vue comme un socio-écosystème, Darnhofer *et al.*, 2010), mais de l'évaluer à l'image de ce qui est fait pour analyser les écosystèmes. Ulanowicz *et al.* (2009), en se fondant sur la théorie de l'information, ont en effet développé ce qui est communément appelé la « *ascendancy suite* », pour évaluer de façon concomitante le niveau de développement effectif observé

d'un système (ascendancy) et sa capacité de réserve (overhead), deux attributs mutuellement exclusifs qui constituent la capacité de développement du système (Ulanowicz, 2004). La résilience est ainsi vue comme l'attribut complémentaire de l'efficacité, à savoir la capacité de réserve du système pour faire face à des perturbations, ne correspondant pas au chemin le plus efficace mais aux chemins redondants (parallèles) pour s'adapter. L'indicateur que nous avons mobilisé permet finalement de quantifier la capacité de réserve permise par le réseau de flux, sans préjuger toutefois de la dynamique du système vis-à-vis d'une perturbation.

5.2 Relations entre structure, fonctionnement et performance des systèmes agricoles

Ces travaux ont mis en avant les relations entre pratiques d'IAE et performances agroécologiques, mais de manière partielle. En effet, l'efficacité globale du système telle que mesurée, est bien entendu fonction des pratiques mises en œuvre, mais surtout de l'efficacité relative de chaque production (Godinot *et al.*, 2015). L'efficacité relative renvoie aux besoins théoriques de chaque espèce pour se développer, et au niveau de productivité théorique de chacune d'entre elle, elle aussi différente. Ainsi, l'efficacité relative d'un hectare de canne à sucre sera différente de l'efficacité relative d'un hectare de légumineuse, elle-même différente de l'efficacité relative d'un monogastrique ou encore d'un ruminant.

Le type de productions présentes, couplé à la proportion de chacune de ces productions au sein du SMAE, renforce encore ces écarts d'efficacité, quel que soit le type de pratiques d'IAE mises en œuvre. Notre échantillon étant constitué de SMAE aux structures très différentes, l'évaluation de la contribution « absolue » de l'IAE aux performances des SMAE étudiés est à relativiser au regard des contextes et de la nature même des systèmes étudiés.

L'échantillonnage de notre étude a été fait de manière à couvrir des SMAE présentant une grande diversité de systèmes de pratiques d'IAE alors que d'autres travaux ont par exemple mobilisé l'ENA pour montrer des différences d'intégration et de performances en fonction du niveau de « santé » des ménages (Rufino *et al.*, 2009). Un échantillon basé sur des critères d'intensification, de niveaux de ressources, permettraient sans doute de mettre en exergue cette contribution directe de l'IAE aux performances de type efficacité. Une autre piste est la simulation par modélisation des pratiques d'IAE pour mieux apprécier les conséquences de différentes modalités de l'IAE sur les performances du système.

Pour autant, nous avons pu identifier des types de SMAE aux propriétés d'IAE similaires et aux profils de performances proches présentant une cohérence d'ensemble, notamment vis-à-vis à l'accès aux facteurs de production des territoires étudiés. Des tendances se dégagent de l'analyse des liens entre IAE et performances : les exploitations peu intégrées sont peu efficaces et peu résilientes ou peu productives et fortement résilientes. En revanche, des exploitations fortement intégrées combinent un niveau élevé de productivité, d'efficacité et un niveau intermédiaire de résilience.

5.3 Analyse comparative de dynamiques agraires contrastées

Les contextes socio-économiques des territoires sont en effet plus ou moins propices à la mise en œuvre de pratiques d'IAE (accès aux intrants, politiques publiques, structuration des filières) comme nous pouvons le voir à travers les terrains de cette étude.

En Guadeloupe, les systèmes étudiés mettent en œuvre des pratiques d'IAE de manière marginale. L'accès aux intrants de synthèse y est facilité (politiques publiques, conseil agricole) et le coût de la main d'œuvre reste élevé, malgré de faibles surfaces exploitées. L'une des pistes portée par les acteurs locaux pour favoriser les pratiques d'IAE réside dans la fourniture d'équipement adapté à ces pratiques d'une part, et à la taille de ces exploitations d'autre part (Stark *et al.*, 2016).

En Amazonie brésilienne, le constat est différent, même si l'intensité de l'IAE reste faible également. Dans ce cas-ci, l'activité totale est faible, tant en termes d'entrées, de sorties, que d'IAE, même si de nombreuses pratiques d'IAE sont mises en œuvre. L'enjeu principal de ces exploitations réside dans le maintien de la fertilité du sol dans les surfaces cultivées (Bommel et *al.*, 2010). L'agriculture des fronts pionniers est, en effet, une agriculture de mobilité, mais compte tenu des enjeux liés à la déforestation, ces agricultures ne pourront plus s'étendre sur de nouveaux territoires. Il est donc nécessaire de sécuriser l'accès à la terre et d'entretenir la fertilité et la qualité des sols.

Les exploitations cubaines qui sont les plus intégrées, en termes d'intensité, correspondent à des SMAE qui transforment les déjections animales et les ressources végétales, à travers le vermicompostage, la biodigestion ou encore l'ensilage. Il ne s'agit pas simplement de valoriser des résidus, mais bien de les transformer pour en améliorer les qualités.

L'expérience cubaine montre que pour que l'IAE puisse jouer un rôle conséquent à l'échelle de l'exploitation, cette dernière doit être considérée comme un système de pratiques à part entière. Il ne s'agit pas uniquement de valoriser quelques résidus à la marge, mais de se doter réellement des moyens nécessaires pour en optimiser le fonctionnement. Les résidus prennent alors le statut de ressources et sont gérées en tant que telles.

Remerciements

Les auteurs remercient les deux relecteurs pour la pertinence de leurs suggestions et pour avoir permis de gagner en clarté, ainsi qu'aux éditeurs de ce numéro spécial sur la polyculture-élevage pour cette opportunité de publier ces travaux à destination de la communauté francophone.

Références bibliographiques

- Altieri M.A., Funes-Monzote F.R., Petersen P., 2012. Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 1–13.
- Altieri M.A., Nicholls C.I., 2012. Agroecological diversification strategies to enhance biological pest regulation in horticultural systems. *Xxviii International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (ihc2010): International Symposium on Organic Horticulture: Productivity and Sustainability* 933, 35–41.
- Bommel P., Bonaudo T., Barbosa T., da Veiga J.B., Pak M.V., Tourrand J.F., 2010. La relation complexe entre l'élevage et la forêt en Amazonie brésilienne: une approche par la modélisation multi-agents. *Cahiers Agricultures*, 19(2), 104-111.
- Bonaudo T., Bendahan A.B., Sabatier R., Ryschawy J., Bellon S., Leger F., Magda D., Tichit M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *Eur J Agron* 57, 43-51.
- Bonneviale J.-R., Jussiau R., Marshall É., 1989. Approche globale de l'exploitation agricole: comprendre le fonctionnement de l'exploitation agricole: une méthode pour la formation et le développement, Institut national de recherches pédagogiques.
- Darnhofer I., Fairweather J., Moller H., 2010. Assessing a farm's sustainability: insights from resilience thinking. *International Journal of Agricultural Sustainability* 8, 186–198.
- Fath B.D., Scharler U.M., Ulanowicz R.E., Hannon B., 2007. Ecological network analysis: network construction. *Ecol Modell* 208, 49–55.
- Finn J.T., 1980. Flow analysis of models of the Hubbard Brook ecosystem. *Ecology* 562–571.
- Gliessman S.R., 2005. Agroecology and agroecosystems. In: Pretty J. (Ed.), *The earth-scan reader in sustainable agriculture*. Earthscan, London, UK.
- Godinot O., Leterme P., Vertès F., Faverdin P., Carof M., 2015. Relative nitrogen efficiency, a new indicator to assess crop livestock farming systems. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 857-868.

González-García E., Gourdine J.L., Alexandre G., Archimede H., Vaarst M., 2012. The complex nature of mixed farming systems requires multidimensional actions supported by integrative research and development efforts. *Animal* 6, 763–777.

Iiyama M., Kaitibie S., Kariuki P., Morimoto Y., 2007. The status of crop–livestock systems and evolution toward integration. *Ann. Arid Zone* 46, 301–323.

Lau M.K., Borrett S.R., Baiser B., Gotelli N.J., Ellison A.M., 2017. Ecological network metrics: opportunities for synthesis. *Ecosphere* 8:8.

Lê S., Josse J., Husson F., 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*. 25(1). pp. 1-18.

Malézieux E., 2012. Designing cropping systems from nature. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 15–29.

Rufino M.C., Hengsdijk H., Verhagen A., 2009. Analysing integration and diversity in agro-ecosystems by using indicators of network analysis. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 84, 229–247.

Stark F., Fanchone A., Semjen I., Moulin C.H., Archimède H., 2016. Crop-livestock integration, from single practice to global functioning in the tropics: Case studies in Guadeloupe. *Eur J Agron* 80, 9-20.

Stark F., González-García E., Navegantes L., Miranda T., Pocard-Chappuis R., Archimède H., Moulin C.H., 2018. Crop-livestock integration determines the agroecological performance of mixed farming systems in Latino-Caribbean farms. *Agron. Sustain. Dev.*, 2018, 38: 4.

Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R., Polasky S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671–677.

Ulanowicz R.E., 2004. Quantitative methods for ecological network analysis. *Comput Biol Chem* 28, 321–339.

Ulanowicz R.E., Goerner S.J., Lietaer B., Gomez R., 2009. Quantifying sustainability: Resilience, efficiency and the return of information theory. *Ecol. Complex.* 6, 27–36.

Walker B., Holling C.S., Carpenter S.R., Kinzig A., 2004. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and society*, 9(2), 5.

Wezel A., Bellon S., Dore T., Francis C., Vallod D., David C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(4), 503-515.

Zahm F., Viaux P., Girardin P., Vilain L., Mouchet C., 2007. Farm Sustainability Assessment using the IDEA Method From the concept of farm sustainability to case studies on French farms. In : Sustainable agriculture. From common principles to common practice. Proceedings from the international forum on assessing sustainability in agriculture (INFASA), march 16, 2006, Bern, Switzerland, 77-110.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL ou DOI).