

Evaluation du fonctionnement, des performances et de l'efficacité alimentaire de deux systèmes de polyculture-élevage : premiers enseignements de la diversification en systèmes autonomes

PUECH T. (1), STARK F. (2)

(1) ASTER, INRAE, 88500 Mirecourt, France.

(2) SELMET, Institut Agro Montpellier, Université Montpellier, INRAE, CIRAD, 34060 Montpellier, France

RESUME

Les systèmes de polyculture-élevage sont des pistes à explorer dans le cadre de la transition agroécologique de part les processus écologiques qu'ils mobilisent (autonomie, diversité, intégration). L'objectif de ce travail est d'évaluer le métabolisme azoté et les performances de production de deux systèmes de polyculture-élevage, issus d'une expérimentation système autonome en agriculture biologique depuis plus de quinze ans. La première expérimentation visait la conduite de systèmes à dominance « bovin lait », alors que la seconde est fortement diversifiée et vise un usage direct des sols pour l'alimentation humaine pour limiter les concurrences feed/food. Nos résultats montrent (i) que dans les deux cas, l'efficacité « système » est supérieure à l'efficacité de chaque composante de production et (ii) que du point de vue de la production de denrées alimentaires, si le système diversifié est moins productif que le système à dominance laitière, il est toutefois plus efficace dans la valorisation des ressources.

Assessment of the functioning, performances and food efficiency of two mixed crop-livestock systems: first results of diversification into self-sufficient systems

PUECH T. (1), STARK F. (2)

(1) ASTER, INRAE, 88500 Mirecourt, France.

SUMMARY

Mixed farming systems are of interest in the search of sustainability because of their ecological process (self-sufficiency, diversity, crop-livestock integration). The issue of their paper is to assess nitrogen metabolism and biotechnical performances of two crop-livestock systems from a whole-farm experimentation. This system are conducted in a self-sufficient logic and in organic farming for about fifteen years. The two configurations differed both in their type of production (dairy system versus diversified system) and in their strategies (striving for self-sufficiency versus maximizing food crop outputs). Our results show that in both cases, efficiency at farm system scale is higher than efficiency of each production component. We show also that the configuration geared to maximizing food production is the less productive of the two but is the more efficient in the use of resources.

INTRODUCTION

Durant la seconde moitié du XX^{ème} siècle, la spécialisation des systèmes agricoles européens a entraîné une progressive déconnexion entre (i) productions végétales et animales et (ii) systèmes agricoles et systèmes alimentaires. Cette spécialisation a entraîné une dépendance accrue des agrosystèmes aux intrants (fertilisants minéraux, produits phytosanitaires, alimentation animale). Ces développements ont eu des conséquences sur l'environnement (pollution de l'eau, érosion de la biodiversité) et sur les systèmes agricoles (Therond et al., 2017). Les systèmes basés sur les principes de l'agro-écologie (diversité biologique, intégration cultures-élevage, régulations biologiques...) font ainsi partie des pistes à explorer pour améliorer leur durabilité (Gliessman, 2004). Dans cet article, nous nous appuyons sur l'hypothèse que les systèmes mixtes cultures-élevages présentent des propriétés d'intérêt (autonomie, productivité, efficacité...) par les processus biologiques qu'ils mobilisent (Bonaudo et al., 2014). Pour autant, la capacité de ces systèmes à produire des denrées alimentaires n'a été que peu traitée dans la littérature et mérite d'être approfondie. En effet, la question de l'intégration cultures-élevages et du recyclage des nutriments questionne l'allocation qui est faite des ressources (alimentation humaine / animale) et par conséquent de « l'équilibre » notamment du point de vue de la finalité des ressources intermédiaires à destination de l'alimentation animale (Mottet et al., 2017).

D'un point de vue méthodologique, l'analyse des systèmes agricoles a fait l'objet de nombreux développements, en particulier du point de vue de leur durabilité, mais ces approches rendent généralement peu intelligibles le fonctionnement et la complexité des agrosystèmes. L'objectif de cet article est de rendre compte du métabolisme (i.e. l'organisation et l'intensité des flux de matière y circulant) et des performances biotechniques et alimentaires (au sens alimentation humaine) de deux agrosystèmes conduits à l'échelle ferme entière, le premier caractérisé par un système de polyculture-élevage autonome orienté « bovin-lait », alors que le second, très diversifié, visant un usage direct des terres pour l'alimentation humaine.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. DEUX EXPERIMENTATIONS « SYSTEME »

Ce travail s'appuie sur une expérimentation système conduite sur l'Installation Expérimentale (IE) INRAE ASTER à Mirecourt, France. Cette ferme expérimentale est composée de 135 ha de prairies permanentes et 106 ha de terres labourables sur des sols à dominance argileuse avec un climat de type semi-continentale. Les expérimentations dites « système » visent à concevoir et mettre en œuvre des systèmes cohérents, selon une démarche « pas à pas » permettant une amélioration continue basée sur l'expérience acquise en cours d'expérimentation. Deux configurations de système, mises en œuvre au cours de ces quinze dernières

années, ont servi de support à ce travail. Ces deux configurations ont intégralement été conduites selon le cahier des charges de l'agriculture biologique.

La première configuration correspond à un système orienté vers la production bovin lait (qualifié par la suite de « système laitier »). Cette configuration a été conduite entre 2006 et 2015, est dominée par la production de lait (env. 100 vaches laitières et leur suite) bien qu'une partie des céréales produites sont destinées à l'alimentation humaine (blé meunier et seigle ; les autres céréales et méteils sont autoconsommés par les bovins). Ce système correspond au regroupement des deux systèmes décrits par Coquil *et al.*, 2009. Ce système est conduit dans l'objectif de recherche d'autonomie : pas d'achat d'animaux, ni de fourrages ou de matières organiques fertilisantes sur la période d'étude (les effectifs animaux sont adaptés aux fourrages disponibles).

La configuration « diversifiée » est conçue depuis 2016 sur la même ferme (Coquil *et al.*, 2019). Elle s'appuie sur un unique système fondé sur des logiques d'autonomie et de diversification des productions animales et végétales. Ce système privilégie un usage direct des terres pour l'alimentation humaine : toutes les cultures annuelles sont strictement destinées à l'alimentation humaine avec une vingtaine d'espèces annuelles cultivées. Les conduites d'élevage des bovins ont évolué (vêlage de printemps, monotraite, croisement de races, élevage des génisses sous vaches nourrices) pour lever certaines difficultés vécues sur les troupeaux précédents, libérer de la surface et du temps de travail à destination de la diversification. Une troupe d'environ 120 brebis allaitantes a été introduite à l'automne 2017 en complément du troupeau laitier (pâturage simultané vaches laitières – brebis suitées au printemps, croisement de races, herbivorie stricte, plein air intégral). De la même façon, une troupe de porcs à l'engraissement en plein air intégral sur une parcelle de luzerne-graminées a été introduit en 2017 pour valoriser l'ensemble des productions non commercialisables en alimentation humaine produites sur le système (issues de tri des cultures annuelles, lait non commercialisable...).

1.2. MODELISATION DU METABOLISME DES SYSTEMES

Dans le cadre de ce travail, nous mobilisons la notion de métabolisme appliqué à des systèmes agricoles (Madelrieux *et al.*, 2017) et qui consiste à quantifier la nature et l'intensité des flux de nutriments entre les différentes composantes des systèmes sur un pas de temps annuel (par exemple : les flux de matières liés au pâturage des bovins sur les prairies permanentes). Les deux systèmes sont représentés sur la base d'un même formalisme, basé sur le système le plus diversifié de manière à pouvoir comparer certains indicateurs (voir 1.3). De ce fait, les systèmes sont représentés selon 5 composantes productives (bovins laitiers, ovins allaitants, porcs, prairies permanentes et terres labourables), complétées par 3 composantes de stockage (fourrages grossiers, effluents d'élevage, concentrés fermiers).

Dans ce cadre, nous étudions le métabolisme azoté des systèmes compte tenu que l'azote est couramment utilisé pour étudier le métabolisme des systèmes agricoles et alimentaires (Garnier *et al.*, 2016 ; Billen *et al.*, 2021), qu'il permet de représenter conjointement le métabolisme des systèmes de cultures et d'élevage et qu'il représente un proxy d'intérêt en matière d'alimentation humaine (protéines), au cœur de débats sur l'origine des protéines alimentaires en particulier du point de vue des concurrences d'usage des sols agricoles pour l'alimentation humaine versus animale (Solagro, 2016 ;

Gliessman, 2006) et un des principaux facteurs limitants en système biologique (Barbieri *et al.*, 2021).

Le métabolisme des systèmes est caractérisé à partir du système d'information rattaché au dispositif expérimental (Trommenschlager and Gaujour, 2010). Compte tenu des informations disponibles, il est caractérisé sur les années 2011-2015 pour le système laitier et des années 2018-2020 sur le système diversifié (les années 2016 et 2017 ont été retirées en l'absence du troupeau ovin). Les flux de matière sont exprimés en azote et calculés (i) par le traçage systématique dans les systèmes d'information des flux physiques (épandages organiques, effectifs pâturants, produits vendus) et les analyses associées (par ex. analyses d'effluents d'élevage, teneur en matières utiles du lait) et (ii) par une estimation de la fixation symbiotique (Anglade *et al.*, 2015), des pertes par lixiviation (Anglade, 2015) ou volatilisation (Peyraud *et al.*, 2012).

Les données utilisées dans cet article sont disponibles (Puech, 2021).

1.3. PERFORMANTES AGRO-ECOLOGIQUES ET ALIMENTAIRES

Nous mobilisons le cadre conceptuel de l'Ecological Network Analysis (ENA – Latham, 2006). L'ENA a été initialement développée en écologie pour étudier le fonctionnement d'écosystèmes et les propriétés associées à des configurations plus ou moins complexes (Ulanowicz *et al.*, 2009). Ces approches ont récemment été remobilisées en agronomie-zootecnie système pour étudier le fonctionnement et les performances d'agrosystèmes diversifiés (Rufino *et al.*, 2009a, Stark *et al.*, 2016; Steinmetz *et al.*, 2021). Ce cadre conceptuel permet d'évaluer :

- L'activité du système définie comme l'ensemble des flux circulants dans le système (Total System Throughflows - TST),
- L'intensité des flux internes (Total internal Throughflows - TT), correspondant aux flux circulants au sein du système,
- L'organisation du réseau de flux (Realized Uncertainty = AMI/Hr) à partir de sa configuration et de la distribution du réseau (voir Rufino *et al.*, 2009b pour des applications simples).

D'un point de vue agronomique, nous proposons de compléter ces descripteurs avec trois indicateurs permettant de caractériser les propriétés des systèmes pour produire des denrées alimentaires i.e. valorisables en alimentation humaine :

- La productivité P à l'échelle système défini par la production totale de denrées alimentaires par unité de surface agricole utile.
- Le Nitrogen Use Efficiency est classiquement utilisé en agronomie (NUE - Godinot *et al.*, 2014) pour évaluer l'efficacité d'un système, nous proposons de l'adapter pour rendre compte de l'efficacité du système pour produire des denrées pour l'alimentation humaine en définissant l'efficacité de conversion alimentaire (Food Conversion Efficiency - FCE) défini par la part alimentaire de la NUE (calculé à l'échelle système et de chaque composante, soit l'ensemble des productions valorisables en alimentation humaine rapporté aux intrants mobilisées).
- Un second indicateur d'efficacité qualifié d'efficacité de production alimentaire (Food Production Efficiency - FPE), calculé à l'échelle système, il est défini par l'ensemble des productions alimentaires ramené à la production primaire consommée durant le processus de production.

En effet, si le FCE permet de rendre compte de la capacité d'un système à convertir des ressources en denrées alimentaires, il ne permet pas d'intégrer le contexte dans lequel évolue le système. Or nous faisons l'hypothèse (i) que le potentiel agronomique d'un milieu est dynamique : il dépend des conditions climatiques pour son processus de production (particulièrement dans des systèmes herbagers autonomes ayant peu recours à des intrants exogènes type fertilisants ou irrigation) et (ii) que la production primaire (issu de la photosynthèse des prairies et des cultures annuelles) est un proxy permettant de rendre compte des dynamiques interannuelles de ces conditions de milieu (Dardonville *et al.*, 2020). Cet indicateur permet en particulier de comparer des configurations conduites de manière asynchrones ayant bénéficié de conditions météorologiques différentes pour leur processus de production et la construction de leurs performances alimentaires.

2. RESULTATS

2.1. METABOLISME DES CONFIGURATIONS ETUDIÉES

Du fait d'une priorisation de l'usage des terres labourables exclusivement à destination de l'alimentation humaine dans le système diversifié, les surfaces fourragères ont été réduites de 19 % (213 ha dans le système laitier, 173 ha dans le système diversifié). Avec un chargement animal identique entre les deux systèmes (0.8 UGB/ha fourragers), les effectifs animaux sont inférieurs dans le système diversifié (123 UGB bovins, 9 UGB ovins, 3 UGB porcs) que dans le système laitier (171 UGB bovins). La Figure 1 montre une diminution des ventes de produits bovins (lait et viande, - 36 %) liés à une baisse d'effectifs, un régime en herbivorie stricte sur l'ensemble du troupeau bovin et au passage en monotraite (- 35 % de lait produit par vache, en volume). Cette diminution des ventes de produits animaux s'est accompagnée d'une augmentation des productions végétales commercialisées pour le système diversifié (+ 40 %). La figure 1 montre que les productions de diversification ont entraîné une évolution relativement marginale du métabolisme entre les deux configurations (le troupeau bovin reste majoritaire dans le système diversifié); la configuration du réseau de flux est relativement similaire entre les deux configurations (AMI/Hr = 0.5) et intermédiaire entre des systèmes peu diversifiés et hétérogènes (AMI/Hr = 1) et des systèmes très diversifiés et relativement homogènes (AMI/Hr = 0, Stark *et al.*, 2018).

L'activité totale du système diversifié (TST=213.8 kgN/ha) est réduite de 27% par rapport au système spécialisé (TST=291.7 kgN/ha). De la même façon, l'activité interne du système diversifié (TT=161.9 kgN/ha) est inférieure de 29 % au système laitier. Ces différences s'expliquent d'une part par une diminution des effectifs animaux (donc moins de flux d'intégration cultures-élevages liés aux fourrages et aux effluents), et d'autre part par une baisse de la production primaire des prairies (- 33 % entre 2018-2020 par rapport à la période 2011-2015). Il nous semble que le principal facteur explicatif de cette baisse de production est un creusement du déficit hydrique estival (+ 140 % entre avril et octobre) sur les années d'étude du système diversifié (-346 mm) par rapport au système laitier (- 143 mm).

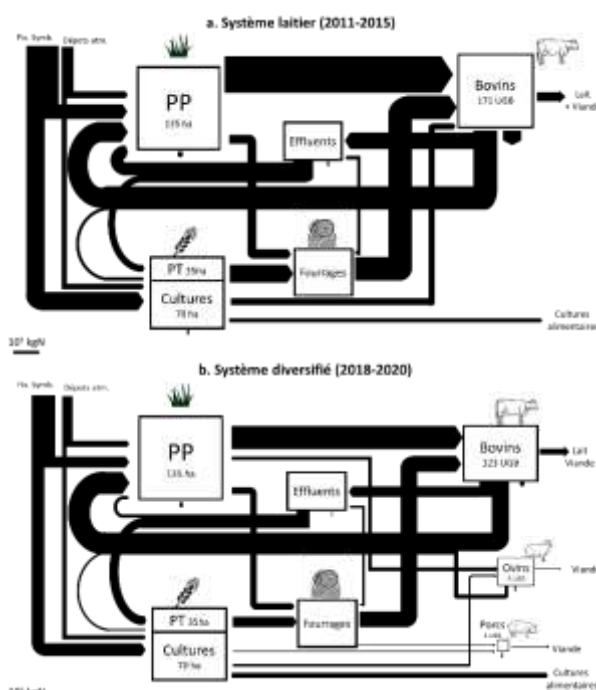


Figure 1 : Caractérisation du métabolisme azoté des configurations laitière (a) et diversifiée (b). PP : Prairies permanentes, PT : prairies temporaires

La figure 1 montre également que par les choix initiaux, le niveau d'autonomie des deux configurations est supérieur à 75% (78% pour le système laitier, 76% pour le système diversifié) : moins d'un quart de l'activité des configurations est liée à des importations de nutriments. Par ailleurs, on montre que les nutriments introduits dans le système sont exclusivement d'origine renouvelable (70% issu de la fixation symbiotique, 30% issu des dépôt atmosphériques).

Si les deux configurations se différencient peu du point de vue de la part de fourrages prélevés directement au pâturage (66%), la part des fourrages grossiers est plus conséquente dans le système diversifié (87%, du fait notamment de l'herbivorie stricte des herbivores) que dans le système laitier (79%). On note également, du point de vue de la production de fourrages grossiers, que le système laitier est globalement excédentaire sur la période étudiée (+7%), contrairement au second, déficitaire (-10%).

2.2. PERFORMANCES BIOTECHNIQUES ET ALIMENTAIRES

Du point de vue de la productivité (qui n'inclut que les ventes de denrées alimentaires et animaux car aucun produit non alimentaire type fumure ou fourrage n'est exporté du système), nous observons que la productivité du système diversifié est plus faible (P=15.4 kgN/ha) que celle du système laitier (P=18.3 kgN/ha). La part des protéines animales exportées a été réduite de 74% pour le système laitier à 57% pour le système diversifié, du fait de la stratégie de diversification végétale à visée alimentation humaine, de la réduction des effectifs animaux et de la production des vaches laitières (monotraite).

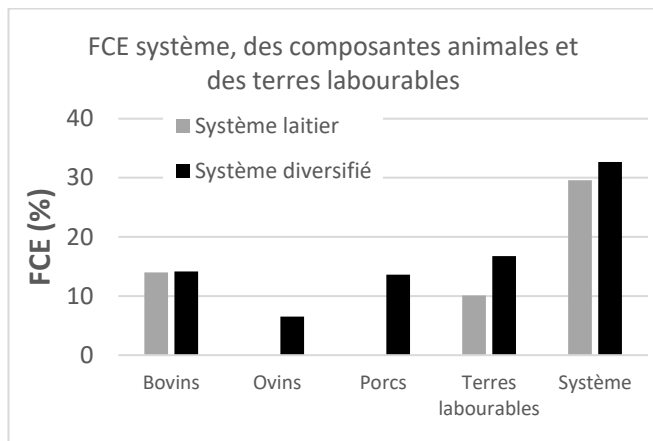


Figure 2 : Efficacité de conversion alimentaire des systèmes et de leurs composantes. Les prairies permanentes et les compartiments de stockage (effluents, fourrages) ne produisent pas de food products, l'ECA de ces composantes est nulle pour les deux systèmes, ils ne sont pas représentés sur la figure.

Du point de vue de l'efficacité de conversion alimentaire, la figure 2 présente deux résultats majeurs de ce travail. D'une part, nous montrons que dans les deux cas, l'efficacité « système » est supérieure à l'efficacité de chacune des composantes pour produire des denrées pour l'alimentation humaine. Cela traduit d'une part le rôle des animaux pour valoriser des ressources non valorisables en alimentation humaine (prairies) et d'autre part que la recherche de complémentarités fonctionnelles entre les composantes des deux configurations permet d'accroître l'efficacité globale du système (d'autant plus que le système est autonome). Par ailleurs, si l'efficacité de conversion alimentaire des terres labourables du système diversifié est directement liée aux choix de viser un usage direct pour l'alimentation humaine (47% des productions annuelles sous forme de grains valorisés en alimentation humaine dans le système laitier – principalement du blé meunier, 90% dans le système diversifié), on observe par ailleurs que la FCE du troupeau bovin est peu différente entre les deux systèmes : la diminution de la production laitière lié au passage à la monotraite dans le système diversifié est en grande partie compensée par (i) une meilleure efficacité du régime alimentaire (herbivorie stricte), (ii) une augmentation des taux de matière utile et en particulier protéiques (TP) des laits (TP : 35.7g/kg) par rapport au système laitier (TP=32.9g/kg) et (iii) une diminution des effectifs bovins improductifs liés pour partie à une avancée des vêlages de 36 mois dans le système laitier à 24 mois lié à l'élevage sous vaches nourrices (voir la communication de Puech et Brunet dans ce congrès). Enfin, on montre ici que le système diversifié (FCE=32.7 %) est, sur la période d'étude, plus efficace que le système laitier (FCE=29.6 %) pour produire des denrées alimentaires au regard des intrants mobilisés.

De la même façon, nous montrons que l'efficacité de production alimentaire du système diversifié (FPE=19.8 %) est supérieure à celle du système laitier (FPE=17.4 %). Cette différence traduit une meilleure efficacité du système diversifié pour valoriser la production primaire du système permise par les conditions singulières de milieu des 3 années d'étude au regard de la période étudiée pour le système laitier.

3. DISCUSSION

3.1. ANALYSER LES RELATIONS ENTRE PROPRIETES DES SYSTEMES

Nous mettons en avant l'intérêt de développer des indicateurs vis-à-vis des performances des agrosystèmes à produire des denrées alimentaires (alimentation humaine). Ces travaux peuvent alimenter le débat sur

l'usage des sols et le rôle des productions animales dans les agrosystèmes (Mottet *et al.*, 2017). En particulier dans le cas du système diversifié, nous considérons qu'il n'y a pas de concurrence dans l'usage des sols entre alimentation humaine et alimentation animale (Laisse *et al.*, 2018), considérant (i) que les productions déclassées pour cause de qualité (issues de tri des cultures, lait à comptages cellulaires élevés...) ne sont pas valorisables en alimentation humaine, (ii) que les prairies temporaires jouent un rôle essentiel dans le maintien de la fertilité et la maîtrise des adventices en système biologique autonome et par conséquent ne sont pas exclusivement substituables par des cultures annuelles et (iii) que les prairies permanentes ne peuvent pas être labourées compte tenu de la nature très argileuse et souvent peu profonde des sols, les rendant difficilement labourables. Nous montrons dans ce travail que si le système laitier est plus productif que le système diversifié du point de vue de la production de denrées pour l'alimentation humaine par unité de surface, ce dernier est plus efficace dans l'utilisation des ressources, notamment à travers un bouclage des cycles et une organisation des chaînes trophiques plus efficaces (herbivorie stricte des ruminants, cultures alimentaires destinées à l'alimentation humaine). De la même façon qu'Ulanowicz *et al.* (2009) montrent l'existence de compromis entre certaines propriétés émergentes dans des écosystèmes, ces résultats suggèrent qu'il existe une tension entre propriétés en système autonome (productivité, efficacité). Toutefois, les trois années d'étude du système diversifié ont été marquées par un régime hydrique estival de sécheresse : l'analyse des propriétés des systèmes, en particulier vis-à-vis de leur capacité à produire des denrées alimentaires dans une gamme plus variée de conditions de milieu permettrait de monter en généralité sur les résultats observés.

3.2. ANALYSER LES DYNAMIQUES DE TRANSITION

En effet, une partie des performances biotechniques et alimentaires du système diversifié ont été acquises à partir de ressources produites antérieurement à la période d'étude (en particulier du point de vue de la production fourragère où le système est déficitaire de 10% sur la période étudiée). Par conséquent, en système autonome, particulièrement dépendant des conditions de milieu pour leur métabolisme, le stockage de nutriments (par exemple sous forme de fourrages) est un levier majeur dans la régulation pluriannuelle du métabolisme et des performances des systèmes diversifiés pour limiter l'impact des conditions de milieu et de leur variabilité. Ce levier est d'autant plus important (i) que les composantes des systèmes diversifiés s'appuient sur des cycles biologiques hétérogènes de l'ordre de quelques mois à plusieurs années selon la nature des productions (Sabatier *et al.*, 2017) et (ii) que leurs inerties respectives ne permettent pas de valoriser la variabilité des conditions de milieu, d'autant que cette variabilité s'exprime conjointement à une échelle annuelle et pluriannuelle.

Nous proposons de prolonger ces travaux par une étude dynamique : les situations contrastées de ces dernières années (années humides 2016 et 2021, années sèches 2017 à 2020) constituent en ce sens des situations originales pour explorer les dynamiques des systèmes en transition agro-écologique. Les expérimentations « systèmes » pluriannuelles et leurs systèmes d'informations associés constituent en cela des situations exceptionnelles pour explorer des dynamiques difficilement accessibles en ferme commerciale généralement représentées par des fonctionnements et performances « moyennes » (Rufino *et al.*, 2009a; Stark *et al.*, 2018; Steinmetz *et al.*, 2021).

Par ailleurs, si les transitions peuvent être étudiées sous l'angle du métabolisme et des performances des

systèmes techniques, leur analyse sous l'angle des transformations des activités des acteurs présente un intérêt dans le cadre de la transition agro-écologique. Par exemple, dans le cas des systèmes expérimentés sur l'IE ASTER de Mirecourt, la diversification s'est faite avec une globale baisse d'effectifs du collectif technique. Outre les activités relevant de l'activité de production de connaissances scientifiques (relevés agronomiques – par ex relevés de flore spontanée, et zootechniques – par ex pesées et notations d'état corporels des animaux), le volume d'activités « agricoles » (soin des animaux, traite, conduite de cultures, fenaison...) a peu évolué entre les deux systèmes laitiers et diversifiés. En effet, Coquil *et al.* (2018a) estiment en 2015 à 11 300h le volume de travail agricole nécessaire sur le système laitier. Une analyse équivalente conduite en 2021 montre que le volume horaire de travail agricole s'élève à 10 700h annuelles (résultats non présentés dans cet article). Si cette approche « comptable » du travail agricole ne rend pas compte des évolutions des métiers, des compétences et des pratiques du collectif technique et plus généralement du travail dans le cadre de la transition agro-écologique (Coquil *et al.*, 2018b), elle montre toutefois que la diversification, à travers certains choix de système (monotraite, élevage des génisses sous nourrices, maximisation du pâturage) mis en place sur l'installation expérimentale, s'est faite sans augmentation majeure du volume de travail agricole. Ces dimensions restent toutefois largement à explorer.

CONCLUSION

Les systèmes diversifiés représentent une voie à explorer dans le cadre de la transition agro-écologique. A partir de l'étude du métabolisme et des performances alimentaires de deux systèmes autonomes conduits de manière asynchrone, nous montrons (i) que l'efficacité « système » est supérieure à l'efficacité de chacune de leurs composantes et (ii) que le système diversifié est moins productif mais plus efficace que le système laitier. Nous montrons enfin que les conditions de milieu et les processus biologiques jouent un rôle de premier ordre dans le métabolisme des systèmes biologiques autonomes et qu'il est nécessaire de les prendre en compte dans leur évaluation. L'analyse des relations entre propriétés émergentes (autonomie, productivité, efficacité) et des dynamiques de transitions de ces systèmes reste encore à explorer.

Les auteurs remercient le lecteur anonyme pour ses commentaires sur une version antérieure de cet article, Catherine Mignolet pour ses suggestions et l'ensemble du collectif technique sur l'IE ASTER pour leur engagement et la qualité des données nécessaires à ce travail.

Anglade J, Billen G, et al., 2015. *Ecosphere* 6, 37
Anglade J, 2015. These UMPC, Paris
Barbieri P, Pellerin S, et al., 2021. *Nat Food* 2:363–372
Bonaudo, T, Burlamaqui Bendahan A, et al., 2014. *Europ. J. Agronomy*, 57, 43–51.
Billen G, Aguilera E, et al., 2021. *One Earth* 4 : 839-850
Coquil, X, Blouet, A, et al., 2009. *Inra Prod. Anim.*, 22 (3), 221-234
Coquil X, Franck C, et al., 2018a. *Fourrages*, 235, 175-180
Coqui, X, Cerf M, et al., 2018b. *Agron. Sustain. Dev.*, 38 : 47
Coquil X, Anglade J, et al., 2019. *Innovations Agronomiques*, 72, 61-75
Dardonville M, Urruty N et al., 2020. *Agr. Systems*, 184
Garnier J, Anglade J, et al., 2016. *Environmental Science & Policy* 63:76–90.

Gliessman S, 2006. *In Agroecology: the ecology of sustainable food systems*, 269-285.
Gliessman S, 2004. *in: Diane & Francis (Eds.), Agronomy Monographs.* American Society of Agronomy, USA, pp. 19–29.
Godinot O, Carof M, et al., 2014. *Agr. Systems* 127:41–52.
Laise S, Baumont R, 2018. *INRA Prod. Anim.* 31 (3) 269-288
Latham LG, 2006. *Ecological Modelling* 192:586–600.
Madelrieux S, Buclet N, et al., 2017. *Cah. Agric.*, 26, 24001
Mottet A, de Haan C, et al., 2017. *Global food security*, 14, 1-8
Peyraud JL, Cellier P, 2012. EsCO INRA.
Puech T, 2021. Portail Data INRAE
Rufino M, Tiftonell P, et al., 2009a. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 85 (2)
Rufino M, Rowe E, et al., 2009b. *Agr. Ecosyst. Env.* 112, 261-282
Sabatier R, Joly F, Hubert B, 2017. *Agr. Systems* 157, 146–156.
SOLAGRO, 2016. *Afferres* 2050
Stark F, Fanchone A, et al., 2016. *Eur. J. Agron.*, 80, 9–20
Stark F, Gonzales-Garcia E, et al., 2018. *Agron. Sustain. Dev.*, 38: 4
Steinmetz L, Veyssset P, et al., 2021. *Agron. Sustain. Dev.*, 41:42
Therond O, Duru M, et al., 2017., *Agron. Sustain. Dev.* 37.
Ulanowicz RE, Goerner SJ, et al., 2009. *Ecological Complexity* 6:27–36.