

# 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 par 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<sup>ème</sup> 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

98 configurations ont intégralement été conduites selon le  
99 cahier des charges de l'agriculture biologique.

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

115  
116 La configuration « diversifiée » est conçue depuis 2016  
117 sur la même ferme (Coquil *et al.*, 2019). Elle s'appuie sur  
118 un unique système fondé sur des logiques d'autonomie et  
119 de diversification des productions animales et végétales.  
120 Ce système privilégie un usage direct des terres pour  
121 l'alimentation humaine : toutes les cultures annuelles sont  
122 strictement destinées à l'alimentation humaine avec une  
123 vingtaine d'espèces annuelles cultivées. Les conduites  
124 d'élevage des bovins ont évolué (vêlage de printemps,  
125 monotraite, croisement de races, élevage des génisses  
126 sous vaches nourrices) pour lever certaines difficultés  
127 vécues sur les troupeaux précédents, libérer de la surface  
128 et du temps de travail à destination de la diversification.  
129 Une troupe d'environ 120 brebis allaitantes a été  
130 introduite à l'automne 2017 en complément du troupeau  
131 laitier (pâturage simultané vaches laitières – brebis  
132 suitées au printemps, croisement de races, herbivorie  
133 stricte, plein air intégral). De la même façon, une troupe  
134 de porcs à l'engraissement en plein air intégral sur une  
135 parcelle de luzerne-graminées a été introduit en 2017  
136 pour valoriser l'ensemble des productions non  
137 commercialisables en alimentation humaine produites sur  
138 le système (issues de tri des cultures annuelles, lait non  
139 commercialisable...).

## 141 1.2. MODELISATION DU METABOLISME DES 142 SYSTEMES

143 Dans le cadre de ce travail, nous mobilisons la notion de  
144 métabolisme appliqué à des systèmes agricoles  
145 (Madelrieux *et al.*, 2017) et qui consiste à quantifier la  
146 nature et l'intensité des flux de nutriments entre les  
147 différentes composantes des systèmes sur un pas de  
148 temps annuel (par exemple : les flux de matières liés au  
149 pâturage des bovins sur les prairies permanentes). Les  
150 deux systèmes sont représentés sur la base d'un même  
151 formalisme, basé sur le système le plus diversifié de  
152 manière à pouvoir comparer certains indicateurs (voir  
153 1.3). De ce fait, les systèmes sont représentés selon 5  
154 composantes productives (bovins laitiers, ovins allaitants,  
155 porcs, prairies permanentes et terres labourables),  
156 complétées par 3 composantes de stockage (fourrages  
157 grossiers, effluents d'élevage, concentrés fermiers).

158  
159 Dans ce cadre, nous étudions le métabolisme azoté des  
160 systèmes compte tenu que l'azote est couramment utilisé  
161 pour étudier le métabolisme des systèmes agricoles et  
162 alimentaires (Garnier *et al.*, 2016 ; Billen *et al.*, 2021), qu'il  
163 permet de représenter conjointement le métabolisme des  
164 systèmes de cultures et d'élevage et qu'il représente un  
165 proxy d'intérêt en matière d'alimentation humaine  
166 (protéines), au cœur de débats sur l'origine des protéines  
167 alimentaires en particulier du point de vue des  
168 concurrences d'usage des sols agricoles pour  
169 l'alimentation humaine versus animale (Solagro, 2016 ;

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

172  
173 Le métabolisme des systèmes est caractérisé à partir du  
174 système d'information rattaché au dispositif expérimental  
175 (Trommenschlager and Gaujour, 2010). Compte tenu des  
176 informations disponibles, il est caractérisé sur les années  
177 2011-2015 pour le système laitier et des années 2018-  
178 2020 sur le système diversifié (les années 2016 et 2017  
179 ont été retirées en l'absence du troupeau ovin). Les flux  
180 de matière sont exprimés en azote et calculés (i) par le  
181 traçage systématique dans les systèmes d'information  
182 des flux physiques (épandages organiques, effectifs  
183 pâturants, produits vendus) et les analyses associées  
184 (par ex. analyses d'effluents d'élevage, teneur en  
185 matières utiles du lait) et (ii) par une estimation de la  
186 fixation symbiotique (Anglade *et al.*, 2015), des pertes par  
187 lixiviation (Anglade, 2015) ou volatilisation (Peyraud *et al.*,  
188 2012).

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

## 191 1.3. PERFORMANTES AGRO-ECOLOGIQUES ET 192 ALIMENTAIRES

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

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

214  
215 D'un point de vue agronomique, nous proposons de  
216 compléter ces descripteurs avec trois indicateurs  
217 permettant de caractériser les propriétés des systèmes  
218 pour produire des denrées alimentaires i.e. valorisables  
219 en alimentation humaine :

- 220 - La productivité P à l'échelle système défini par la  
221 production totale de denrées alimentaires par unité de  
222 surface agricole utile.
- 223 - Le Nitrogen Use Efficiency est classiquement utilisé  
224 en agronomie (NUE - Godinot *et al.*, 2014) pour  
225 évaluer l'efficacité d'un système, nous proposons de  
226 l'adapter pour rendre compte de l'efficacité du  
227 système pour produire des denrées pour  
228 l'alimentation humaine en définissant l'efficacité de  
229 conversion alimentaire (Food Conversion Efficiency -  
230 FCE) défini par la part alimentaire de la NUE (calculé  
231 à l'échelle système et de chaque composante, soit  
232 l'ensemble des productions valorisables en  
233 alimentation humaine rapporté aux intrants  
234 mobilisés).
- 235 - Un second indicateur d'efficacité qualifié d'efficacité  
236 de production alimentaire (Food Production Efficiency  
237 - FPE), calculé à l'échelle système, il est défini par  
238 l'ensemble des productions alimentaires ramené à la  
239 production primaire consommée durant le processus  
240 de production.

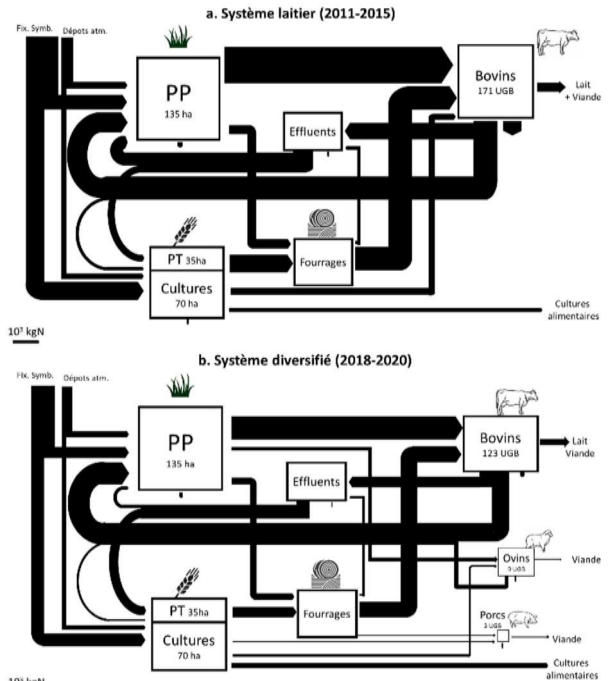
242 En effet, si le FCE permet de rendre compte de la  
 243 capacité d'un système à convertir des ressources en  
 244 denrées alimentaires, il ne permet pas d'intégrer le  
 245 contexte dans lequel évolue le système. Or nous faisons  
 246 l'hypothèse (i) que le potentiel agronomique d'un milieu 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

260  
 261 **2. RESULTATS**

262  
 263 **2.1. METABOLISME DES CONFIGURATIONS**  
 264 **ETUDIÉES**

265 Du fait d'une priorisation de l'usage des terres  
 266 labourables exclusivement à destination de l'alimentation  
 267 humaine dans le système diversifié, les surfaces  
 268 fourragères ont été réduites de 19 % (213 ha dans le  
 269 système laitier, 173 ha dans le système diversifié). Avec  
 270 un chargement animal identique entre les deux systèmes  
 271 (0.8 UGB/ha fourragers), les effectifs animaux sont  
 272 inférieurs dans le système diversifié (123 UGB bovins,  
 273 9 UGB ovins, 3 UGB porcs) que dans le système laitier  
 274 (171 UGB bovins). La Figure 1 montre une diminution des  
 275 ventes de produits bovins (lait et viande, - 36 %) liés à  
 276 une baisse d'effectifs, un régime en herbivorie stricte sur  
 277 l'ensemble du troupeau bovin et au passage en monotraite (- 35 % de lait produit par vache, en volume).  
 278 Cette diminution des ventes de produits animaux s'est  
 279 accompagnée d'une augmentation des productions  
 280 végétales commercialisées pour le système diversifié  
 281 (+ 40 %). La figure 1 montre que les productions de  
 282 diversification ont entraîné une évolution relativement  
 283 marginale du métabolisme entre les deux configurations  
 284 (le troupeau bovin reste majoritaire dans le système  
 285 diversifié); la configuration du réseau de flux est  
 286 relativement similaire entre les deux configurations  
 287 (AMI/Hr = 0.5) et intermédiaire entre des systèmes peu  
 288 diversifiés et hétérogènes (AMI/Hr = 1) et des systèmes  
 289 très diversifiés et relativement homogènes (AMI/Hr = 0,  
 290 Stark *et al.*, 2018).

292  
 293 L'activité totale du système diversifié  
 294 (TST=213.8 kgN/ha) est réduite de 27% par rapport au  
 295 système spécialisé (TST=291.7 kgN/ha). De la même  
 296 façon, l'activité interne du système diversifié  
 297 (TT=161.9 kgN/ha) est inférieure de 29 % au système  
 298 laitier. Ces différences s'expliquent d'une part par une  
 299 diminution des effectifs animaux (donc moins de flux  
 300 d'intégration cultures-élevages liés aux fourrages et aux  
 301 effluents), et d'autre part par une baisse de la production  
 302 primaire des prairies (- 33 % entre 2018-2020 par rapport  
 303 à la période 2011-2015). Il nous semble que le principal  
 304 facteur explicatif de cette baisse de production est un  
 305 creusement du déficit hydrique estival (+ 140 % entre  
 306 avril et octobre) sur les années d'étude du système  
 307 diversifié (- 346 mm) par rapport au système laitier  
 308 (- 143 mm).  
 309

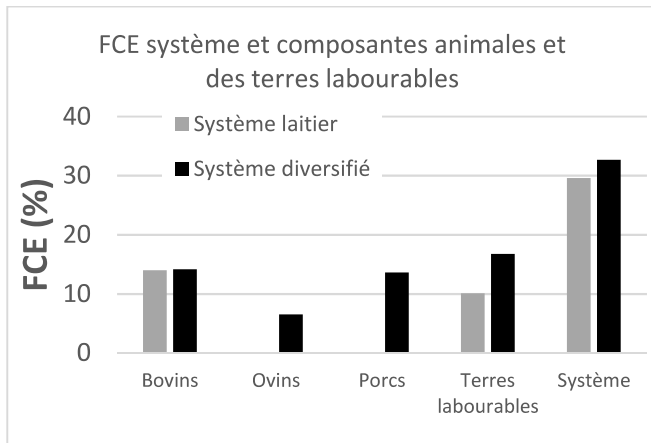


310  
 311 **Figure 1** : Caractérisation du métabolisme azoté des  
 312 configurations laitière (a) et diversifiée (b). PP : Prairies  
 313 permanentes, PT : prairies temporaires  
 314

315 La figure 1 montre également que par les choix initiaux,  
 316 le niveau d'autonomie des deux configurations est  
 317 supérieur à 75% (78% pour le système laitier, 76% pour  
 318 le système diversifié) : moins d'un quart de l'activité des  
 319 configurations est liée à des importations de nutriments.  
 320 Par ailleurs, on montre que les nutriments introduits dans  
 321 le système sont exclusivement d'origine renouvelable  
 322 (70% issu de la fixation symbiotique, 30% issu des dépôt  
 323 atmosphériques).  
 324 Si les deux configurations se différencient peu du point de  
 325 vue de la part de fourrages prélevés directement au  
 326 pâturage (66%), la part des fourrages grossiers est plus  
 327 conséquente dans le système diversifié (87%, du fait  
 328 notamment de l'herbivorie stricte des herbivores) que  
 329 dans le système laitier (79%). On note également, du  
 330 point de vue de la production de fourrages grossiers, que  
 331 le système laitier est globalement excédentaire sur la  
 332 période étudiée (+7%), contrairement au second,  
 333 déficitaire (-10%).  
 334

335  
 336 **2.2. PERFORMANCES BIOTECHNIQUES ET**  
 337 **ALIMENTAIRES**

338 Du point de vue de la productivité (qui n'inclut que les  
 339 ventes de denrées alimentaires et animaux car aucun  
 340 produit non alimentaire type fumure ou fourrage n'est  
 341 exporté du système), nous observons que la productivité  
 342 du système diversifié est plus faible (P=15.4 kgN/ha) que  
 343 celle du système laitier (P=18.3 kgN/ha). La part des  
 344 protéines animales exportées a été réduite de 74% pour  
 345 le système laitier à 57% pour le système diversifié, du fait  
 346 de la stratégie de diversification végétale à visée  
 347 alimentation humaine, de la réduction des effectifs  
 348 animaux et de la production des vaches laitières  
 349 (monotraite).  
 350  
 351



**Figure 2 :** Efficience 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'efficience de conversion alimentaire, la figure 2 présente deux résultats majeurs de ce travail. D'une part, nous montrons que dans les deux cas, l'efficience « système » est supérieure à l'efficience 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'efficience globale du système (d'autant plus que le système est autonome). Par ailleurs, si l'efficience 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 efficience 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'efficience de production alimentaire du système diversifié (FPE=19.8 %) est supérieure à celle du système laitier (FPE=17.4 %). Cette différence traduit une meilleure efficience 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 (Laise *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, efficience). 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

484 systèmes techniques, leur analyse sous l'angle des  
485 transformations des activités des acteurs présente un  
486 intérêt dans le cadre de la transition agro-écologique. Par  
487 exemple, dans le cas des systèmes expérimentés sur l'IE  
488 ASTER de Mirecourt, la diversification s'est faite avec une  
489 globale baisse d'effectifs du collectif technique. Outre les  
490 activités relevant de l'activité de production de  
491 connaissances scientifiques (relevés agronomiques – par  
492 ex relevés de flore spontanée, et zootechniques – par ex  
493 pesées et notations d'état corporels des animaux), le  
494 volume d'activités « agricoles » (soin des animaux, traite,  
495 conduite de cultures, fenaison...) a peu évolué entre les  
496 deux systèmes laitiers et diversifiés. En effet, Coquil *et al.*  
497 (2018a) estiment en 2015 à 11 300h le volume de travail  
498 agricole nécessaire sur le système laitier. Une analyse  
499 équivalente conduite en 2021 montre que le volume  
500 horaire de travail agricole s'élève à 10 700h annuelles  
501 (résultats non présentés dans cet article). Si cette  
502 approche « comptable » du travail agricole ne rend pas  
503 compte des évolutions des métiers, des compétences et  
504 des pratiques du collectif technique et plus généralement  
505 du travail dans le cadre de la transition agro-écologique  
506 (Coquil *et al.*, 2018b), elle montre toutefois que la  
507 diversification, à travers certains choix de système  
508 (monotraite, élevage des génisses sous nourrices,  
509 maximisation du pâturage) mis en place sur l'installation  
510 expérimentale, s'est faite sans augmentation majeure du  
511 volume de travail agricole. Ces dimensions restent  
512 toutefois largement à explorer.

## 513 CONCLUSION

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

531  
532 Les auteurs remercient (i) le relecteur anonyme pour ses  
533 commentaires sur une version antérieure de cet article,  
534 Catherine Mignolet pour ses suggestions et l'ensemble du  
535 collectif technique sur l'IE ASTER pour leur engagement  
536 et la qualité des données nécessaires à ce travail.

537  
538 **Anglade J, Billen G, *et al.*, 2015.** *Ecosphere* 6, 37  
539 **Anglade J, 2015.** These UMPC, Paris  
540 **Barbieri P, Pellerin S, *et al.*, 2021.** *Nat Food* 2:363–372  
541 **Bonaudo, T, Burlamaqui Bendahan A, *et al.*, 2014.**  
542 *Europ. J. Agronomy*, 57, 43–51.  
543 **Billen G, Aguilera E, *et al.*, 2021.** *One Earth* 4 : 839-850  
544 **Coquil, X, Blouet, A, *et al.*, 2009.** *Inra Prod. Anim.*, 22  
545 (3), 221-234  
546 **Coquil X, Franck C, *et al.*, 2018a.** *Fourrages*, 235, 175-  
547 180  
548 **Coqui, X, Cerf M, *et al.*, 2018b.** *Agron. Sustain. Dev.*,  
549 38 : 47  
550 **Coquil X, Anglade J, *et al.*, 2019.** *Innovations*  
551 *Agronomiques*, 72, 61-75  
552 **Dardonville M, Urruty N *et al.*, 2020.** *Agr. Systems*, 184  
553 **Garnier J, Anglade J, *et al.*, 2016.** *Environmental*  
554 *Science & Policy* 63:76–90.  
555 **Gliessman S, 2006.** *In Agroecology: the ecology of*  
556 *sustainable food systems*, 269-285.

557 **Gliessman S, 2004.** *in: Diane & Francis (Eds.),*  
558 *Agronomy Monographs.* American Society of Agronomy,  
559 USA, pp. 19–29.  
560 **Godinot O, Carof M, *et al.*, 2014.** *Agr. Systems* 127:41–  
561 52.  
562 **Laisse S, Baumont R, 2018.** *INRA Prod. Anim.* 31 (3)  
563 269-288  
564 **Latham LG, 2006.** *Ecological Modelling* 192:586–600.  
565 **Madelrieux S, Buclet N, *et al.*, 2017.** *Cah. Agric.*, 26,  
566 24001  
567 **Mottet A, de Haan C, *et al.*, 2017.** *Global food security*,  
568 14, 1-8  
569 **Peyraud JL, Cellier P, 2012.** EsCO INRA.  
570 **Puech T, 2021.** Portail Data INRAE  
571 **Rufino M, Tiftonell P, *et al.*, 2009a.** *Nutrient Cycling in*  
572 *Agroecosystems*, 85 (2)  
573 **Rufino M, Rowe E, *et al.*, 2009b.** *Agr. Ecosyst. Env.* 112,  
574 261-282  
575 **Sabatier R, Joly F, Hubert B, 2017.** *Agr. Systems* 157,  
576 146–156.  
577 **SOLAGRO, 2016.** *Afterres* 2050  
578 **Stark F, Fanchone A, *et al.*, 2016.** *Eur. J. Agron.*, 80, 9–  
579 20  
580 **Stark F, Gonzales-Garcia E, *et al.*, 2018.** *Agron.*  
581 *Sustain. Dev.*, 38: 4  
582 **Steinmetz L, Veysset P, *et al.*, 2021.** *Agron. Sustain.*  
583 *Dev.*, 41:42  
584 **Therond O, Duru M, *et al.*, 2017.**, *Agron. Sustain. Dev.*  
585 37.  
586 **Ulanowicz RE, Goerner SJ, *et al.*, 2009.** *Ecological*  
587 *Complexity* 6:27–36.