Analyse de l'intégration agriculture-élevage dans les exploitations ovines de la zone méditerranéenne française : mise en place d'un modèle

Rapport de stage
deuxième année cycle ingénieur

Agathe MALZAC
26/08/2016

Maître de stage : **Charles-Henri MOULIN**, Professeur, UMR SELMET, Montpellier Supagro

Tuteur de stage : **Philippe Lescoat**, Enseignant-chercheur, AgroParisTech

Organisme d'accueil : **UMR SELMET** (Systèmes d'Elevage Méditerranéen et Tropicaux)

Remerciements :

Je tiens à remercier tout particulièrement mon maître de stage, Charles-Henri Moulin pour m'avoir offert cette opportunité, ainsi que pour son encadrement et sa disponibilité.
Je remercie également mon tuteur Philippe Lescoat pour son encadrement.
Merci à toute l'équipe du laboratoire pour leur aide et leur disponibilité, en particulier Fabien Stark, Marie-France Samatier et Martine Paradis.
Merci également aux stagiaires avec qui j'ai partagé le bureau : Clothilde, Guilhem, Léa, Marie et Thomas.
Enfin, merci à mon frère pour sur tous les aspects informatiques.

Table des matières

Table des illustrations 1
Figures 1
Tableaux 1
Equations 1
Introduction : 2
Matériels et méthodes : 2
Exploitations étudiées : 2
Modélisation des exploitations : 7
Estimation des flux : 12
Calcul des indicateurs 14
Résultats 17
Automatisation du calcul des indicateurs 17
Figures d'analyse des résultats des indicateurs : 20
Discussion 24
Conclusion : 25
Bibliographie 26
Annexes 28

Table des illustrations

Figures

Figure 1 : localisation de la zone d'étude 2
Figure 2 : Représentation du système en considérant chaque culture indépendamment 8
Figure 3 : représentation du système en considérant les systèmes de rotation 9
Figure 4 : Portion du système : détail des liens entre les compartiments animaux et céréales 9
Figure 5 : Portion du système : détails des liens entre les compartiments animaux et culture de vente 10
Figure 6 : Portion du système : détails des liens entre les compartiments animaux et culture ou PN 10
Figure 7 : Portion du système : détails des liens entre les compartiments animaux et les surfaces non productives 11
Figure 8 : système théorique à 2 compartiments 14
Figure 9 : matrice de flux théorique 14
Figure 10 : présentation des indicateurs choisis 14
Figure 11 : Relation entre point de vue système et point de vue culture 21
Figure 12 : Graphe de performance des exploitations 22
Figure 13 : Evaluation de l'intégration agriculture-élevage 23

Tableaux

Tableau 1 : présentation des exploitations étudiées. 2
Tableau 2 : Extrait du tableau des flux 13
Tableau 3 : culture_PREADIV1, matrice de flux 17
Tableau 4 : syst_PREADIV1, matrice de flux 18
Tableau 5 : tab_resultats : extrait du tableau de résultats du calcul des indicateurs 19
Tableau 6 : resultats : extrait du tableau de résultats du calcul des indicateurs permettant de tracer les graphes 19

Equations

Équation 1 : calcul des fèces 12
Équation 2 : calcul des pertes N des animaux 13

Introduction :

Ce travail s'inscrit dans la cadre du projet CLIMED (*The future of Mediterranean Livestock Farming Systems: Opportunity and efficiency of Crops – Livestock Integration*, http://climed.cirad.fr/the-project/the-project) du programme ARIMNET (http://www.arimnet.net/), qui étudie l'intégration entre agriculture et élevage dans trois pays : l'Egypte, la France et le Maroc. Cette étude se fait à la fois à l'échelle des exploitations et des territoires. Le sujet se concentre ici à l'échelle de l'exploitation, dans le cas français. L'objectif est de caractériser les formes d'intégration agriculture-élevage des exploitations ovines lait et viande du bassin méditerranéen, ainsi que leurs performances agro-écologiques (productivité, efficience, résilience et autonomie) à travers la méthode ENA (Ecological Network Analysis). Il s'agit ici de mettre en place un modèle sur un large panel d'exploitations. Ce modèle représente l'exploitation comme un système de flux d'azote sur lequel la méthode ENA est appliquée.

Matériels et méthodes :

Exploitations étudiées :

Les exploitations étudiées sont au nombre de 27, décomposées en 19 exploitations issues de cas-types et 8 exploitations réelles enquêtées. Elles sont localisées sur l'ensemble du pourtour méditerranéen (Figure 1).

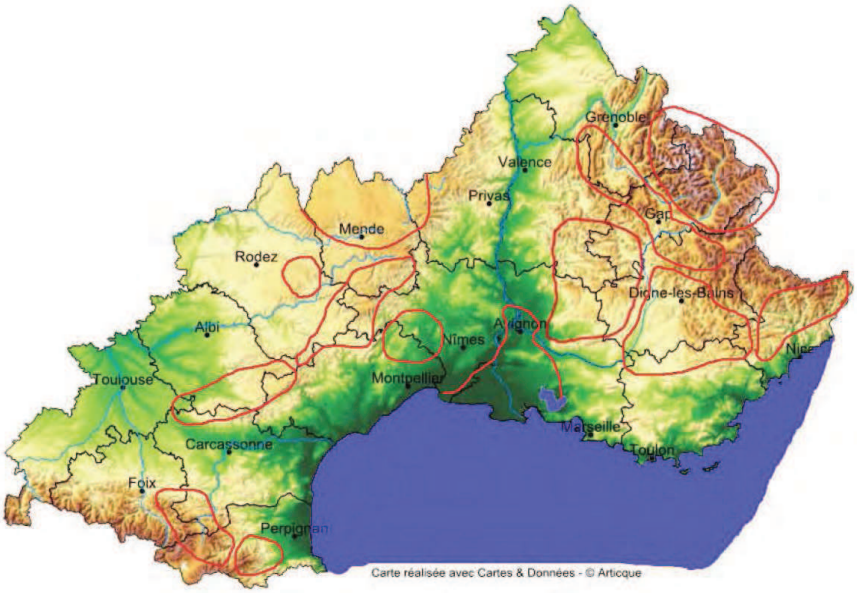


Figure 1 : localisation de la zone d'étude

Les exploitations réelles enquêtées sont plus précisément situées dans la région du Vallespir (66) pour 3 d'entre elles, sur le plateau du Lévézou (12) pour 2 autres, et dans les Cévennes (30) pour les 3 dernières.

L'étude porte sur des exploitations ovines, laitières ou allaitantes, en association ou non avec des cultures fourragères et/ou de vente. Un cas sort du lot dans le sens où il s'agit d'une exploitation caprine avec transformation fromagère. Cette exploitation cévenole a été enquêtée plutôt dans un objectif de test du guide d'entretien, et n'a pas été retirée du jeu de données pour l'instant. Le tableau ci-dessous présente brièvement ces différentes exploitations : Tableau 1 : présentation des exploitations étudiées.

Tableau 1 : Présentation des exploitations étudiées : cas type

	ROQ 3	ROQ 2	CRAU	HMONTPA	MARALPIN	MEDINOV	MONSPE2	MONSPE4
système	cas-type Roquefort	cas-type Roquefort	Crau	Cas-type, ovin viande haut montagnard alpes, pluriactif	Cas-type Alpes paritimes, ovin viande spécialisé, grand pastoral	Cas-type, ovin viande en reconquête pastorale, Pyrénnée, SE Massif Central	Cas-type Ovin viande spécialisé, montagnard fourrager (Alpes)	Cas-type ovin viande spécialisé, Alpes du sud, tendance pastorale
nombre animaux (EMP)	340 Lacaunes	250 Lacaunes	1500 Mérinos	240 Préalpes	400 Mérinos	250 BMC	450 Mérinos	450 Mérinos
SAU	396 ha	52 ha	463 ha	75 ha	480 ha	230 ha	52 ha	367 ha
parcours	300 ha	0 ha	300 ha	50 ha	480 ha	215 ha	15 ha	330 ha
PT	61 ha	26 ha	0 ha	0 ha	0 ha	0 ha	20 ha	28 ha
PN	13 ha	13 ha	163 ha	25 ha		15 ha	6 ha	5 ha
céréales	22 ha	13 ha					11 ha	4 ha
autres surfaces								
estive	NON	NON	individuelle	collective	individuelle	collective	collective	collective
production vendue	lait 85 000 L 435 agneaux engraissement bergerie 20 t céréales	lait 95 000 L 400 agneaux engraissement bergerie 40t céréales	foin Crau 1200 t 1300 agneaux finis herbe	215 agneaux finis bergerie	210 agneaux finis herbe	200 agneaux finis bergerie	530 agneaux finis bergerie	300 agneaux finis herbe et semis-finis bergerie (1/2)
autonomie massique fourragère	100%	100%	100%	86%	0%	0%	100%	98%
autonomie massique concentrés	67%	42%	0%	0%	0%	0%	80%	49%

Tableau 1 : Présentation des exploitations étudiées : cas type

	MONTSPE1	PASTPLAI	PASTPREA	PREADIV1	PREADIV2	PREALPSPE1	PREALPSPE2
système	Cas-type ovin viande spécialisé, montagnard (Alpes), traditionnel	Cas-type ovin viande spécialisé, Basse Provence (Crau), herbassier	Cas-type ovin viande spécialisés, Préalpes, grand pastoral	Cas-type ovin viande diversifié, Préalpes, noyer et céréales	Cas-type ovin viande diversifié, lavandin et cérélaes, Préalpes	Cas-type ovin viande spécialisé, Préalpes, troupeau transhumant	Cas-type ovin viande spécialisé, Préalpes, troupeau sédentaire
nombre animaux (EMP)	360 Préalpes	800 Mérinos	500 Mérinos	300 Préalpes	300 Mérinos	460 Préalpes	320 Préalpes
SAU	102 ha	192 ha	610 ha	132 ha	40 ha	192 ha	240 ha
parcours	70 ha	180 ha	600 ha	90 ha		140 ha	200 ha
PT	14 ha	0 ha	0 ha	20 ha	12 ha	35 ha	17 ha
PN	11 ha	12 ha	10 ha	4 ha	2 ha	6 ha	9 ha
céréales	7 ha			12 ha	6 ha	11 ha	11 ha
autres surfaces				noyer 6 ha	lavandins 20 ha		lavandins 3 ha
estive	collective	collective	collective	collective	collective	collective	NON
production vendue	300 agneaux finis bergerie	410 agneaux semis-finis herbe 120 agnelles reproduction herbe 45 t foin Crau	125 agneaux semis-finis bergerie, 180 agneaux semis finis herbe, 30 agnelles reproduction herbe	270 agneaux finis bergerie 25 t paille 30 t céréales	230 agneaux finis bergerie	480 agneaux finis bergerie 7,5 t céréales	260 agneaux finis bergerie 7 t céréales 5 t paille
autonomie massique fourragère	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
autonomie massique concentrés	64%	0%	0%	77%	77%	74%	77%

Tableau 1 : présentation des exploitations étudiées : cas type

	SPECAUD	SPECAUS	SPECEV	SIE2
système	Cas-type ovin viande spécialisé, Montagne Noire, conduite herbagère	Cas-type ovin viande spécialisé, Causses	Cas-type, ovin viande spécialisé, pastoral	Cas-type, ovin viande spécialisé Préalpes, transhumant
nombre animaux (EMP)	300 Lacaunes	600 BMC	350 BMC	370 Préalpes
SAU	59 ha	390 ha	253 ha	438 ha
parcours	0 ha	320 ha	245 ha	395 ha
PT	44 ha	54 ha	0 ha	28 ha
PN	9 ha		8 ha	4 ha
céréales	6 ha	16 ha		11 ha
autres surfaces			oignon doux AOP 0,1 ha	
estive	NON	NON	collective	collective
production vendue	340 agneaux finis bergerie 6 t céréales 5t foin PT et PN	660 agneaux finis bergerie 4,5 t céréales	330 agneaux pour l'engraissement bergerie	360 agneaux finis bergerie 1,6 t paille
autonomie massique fourragère	100%	100%	60%	100%
autonomie massique concentrés	42%	70%	0%	73%

Tableau 1 : présentation des exploitations étudiées : exploitation réelle enquêtée

	CANIGOUPDT	CANIGOU	CANIGOUVIGNE	CHEVRES	CEV	CEVOIGN	LEVEZOU	ROQLEVEZOU
système	Enquête Ovin viande, Vallespir, pomme de terre, bio	Enquête Ovin viande, Vallespir, agnelage toute l'année	Enquête Ovin viande, Vallespir, 50 chèvres, vignes	Enquête chèvres fromage Cévennes, bio	Enquête brebis viande, Cévennes	Enquête brebis viande, oignon, Cévennes	Enquête brebis lait lévézou	Enquête roquefort lévézou
nombre animaux (EMP)	230 Rouges du Roussillon	100 Rouges du Roussillon	150 Rouges du Roussillon	80 Chèvres Alpines	210 Tarasconnaises	380 Tarasconnaises	420 Lacaunes	520 Lacaunes
SAU	162 ha	66 ha	43 ha	109 ha	314 ha	1309 ha	87 ha	101 ha
parcours	150 ha	66 ha		100 ha	300 ha	1300 ha	0 ha	0 ha
PT	3 ha	0 ha	25 ha	0 ha	0 ha	1 ha	52 ha	75 ha
PN	9 ha			4 ha	14 ha	7 ha	20 ha	10 ha
céréales							15 ha	16 ha
autres surfaces	pomme de terre bio 0,5 ha		vignes "Côtes du Roussillon", "Rivesaltes", 18 ha	châtaigniers 5 ha		oignon doux AOP 0,8 ha		
estive	individuelle	NON	collective	NON	collective	collective	NON	NON
production vendue	130 agneaux finis bergerie, vente directe pomme de terre 1,5 t	140 agneaux finis bergerie, vente directe	120 agneaux finis bergerie, 20 agnelles reproduction, 5 mâles reproduction 100 t de raisins 30 t foin PT	lait 13 000 L (fromage) 70 chevreaux engraissement chèvrerie châtaignes 3 t	260 agneaux finis bergerie 20 agnelles reproduction herbe	400 agneaux finis bergerie 30 agneaux AID herbe 37,6 t oignons	130 000 L lait 375 agneaux engraissment (6 jours) bergerie	220 000 L lait 920 agneaux engraissement bergerie, 50 agnelles reproduction bergerie
autonomie massique fourragère	21%	22%	84%	80%	83%	34%	100%	84%
autonomie massique concentrés	0%	0%	0%	0%	0%	0%	54%	29%

Modélisation des exploitations :

Chaque exploitation est vue comme un système de compartiments reliés par des flux. Ces flux représentent des quantités d'azote (en kg N/an). Les choix quant à la compartimentation du système sont les suivants :

- Le compartiment animaux regroupe brebis, agnelles et agneaux. Les béliers ne sont pas pris en compte car leur nombre est négligeable devant celui des mères.
- Le compartiment fourrage représente le stock de fourrages ensuite vendus, distribués aux animaux ou distribués en litière. Les flux entrants représentent les récoltes ou les achats de fourrages.
- Le compartiment grain fonctionne sur le même principe que celui des fourrages : il représente le stock de grains, qu'ils soient produits, achetés, intra-consommés ou vendus.
- Le compartiment fumier constitue le stock de fumier de l'exploitation. Il est composé de la paille issue du compartiment « fourrage », et de l'excrétion azotée des animaux. Le fumier peut ensuite être épandu sur les surfaces de l'exploitation, ou vendu.
- Les surfaces en herbe peu productives sont représentées à travers deux compartiments : parcours et estive. Les estives peuvent être collectives ou non et dans ce dernier cas, la surface de l'estive ne rentre pas dans la SAU de l'exploitation. Ces compartiments sont reliés aux animaux par le prélèvement au pâturage et les déjections au pâturage.
- Un parc de nuit (compartiment « parc ») accompagne systématiquement la présence d'une estive, mais il peut exister aussi en l'absence d'estive. Il récupère les déjections des animaux pendant la période au cours de laquelle ils sont parqués.
- Les prairies naturelles se trouvent dans le compartiment « PN ». Elles peuvent être pâturées et/ou produire du foin à destination du compartiment fourrage.
- Pour les surfaces en culture, deux cas de figure sont envisagés, selon que sont considérés les différents types de culture indépendamment (modèle « culture »), ou la rotation dans son intégralité (modèle système). Ce dernier point permet de considérer le sol comme unité.
    - Les cultures de vente sont représentées par trois compartiments : « vigne_lavandin » produisant du raisin, des sarments et de l'essence de lavandin, « verger » produisant dans les cas étudiés ici des noix ou des châtaignes, « maraîchage » produisant ici des oignons doux AOP Cévennes ou des pommes de terre. Les productions sont vendues, et des pertes peuvent exister, ainsi que de l'autoconsommation qui est considérée comme un produit.
    - Le compartiment « céréales » modélise la culture de céréales. Les grains sont ensuite stockés dans le compartiment « grain » et la paille dans le compartiment « fourrage ».
    - Les cultures fourragères pouvant être des prairies temporaires ou des céréales récoltées en ensilage ou enrubannage (céréales immatures), se trouvent dans les compartiments « culture i », avec i allant de 1 à 4 dans cette étude.
    - Les systèmes de cultures : ils regroupent les trois surfaces précédemment décrites de façon à respecter l'assolement. Il y a dans cette étude jusqu'à 3 compartiments représentant une rotation différente.

Il est courant dans les exploitations agricoles de trouver des stocks. Ceux-ci ne sont pas pris en compte pour deux raisons principales :

- Il est difficile d'estimer les stocks qui varient fortement d'une année sur l'autre.
- Les stocks (notés x_i dans la description du modèle faite plus bas – Figure 8) ne sont pas pris en compte dans le calcul des indicateurs présentés en suivant (C'est à partir de la matrice de flux Figure 9 que sont calculés les indicateurs ENA. Cette méthode ayant été mise en place pour l'étude des écosystèmes, tous les indicateurs ne sont pas pertinents pour décrire les agro-systèmes. Les indicateurs choisis sont présentés Figure 10)

La Figure 2 et la Figure 3 représentent le système dans son intégralité, selon que sont considérées les cultures ou les rotations. Les flux entre les divers compartiments sont détaillés de la Figure 4 à la Figure 7.

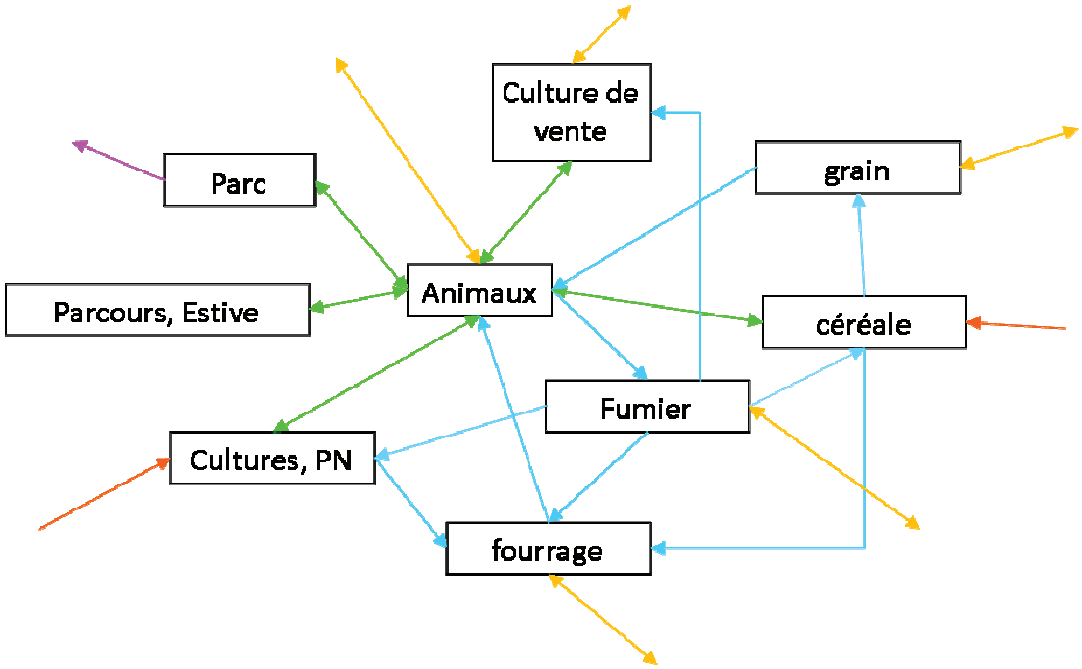


Figure 2 : Représentation du système en considérant chaque culture indépendamment

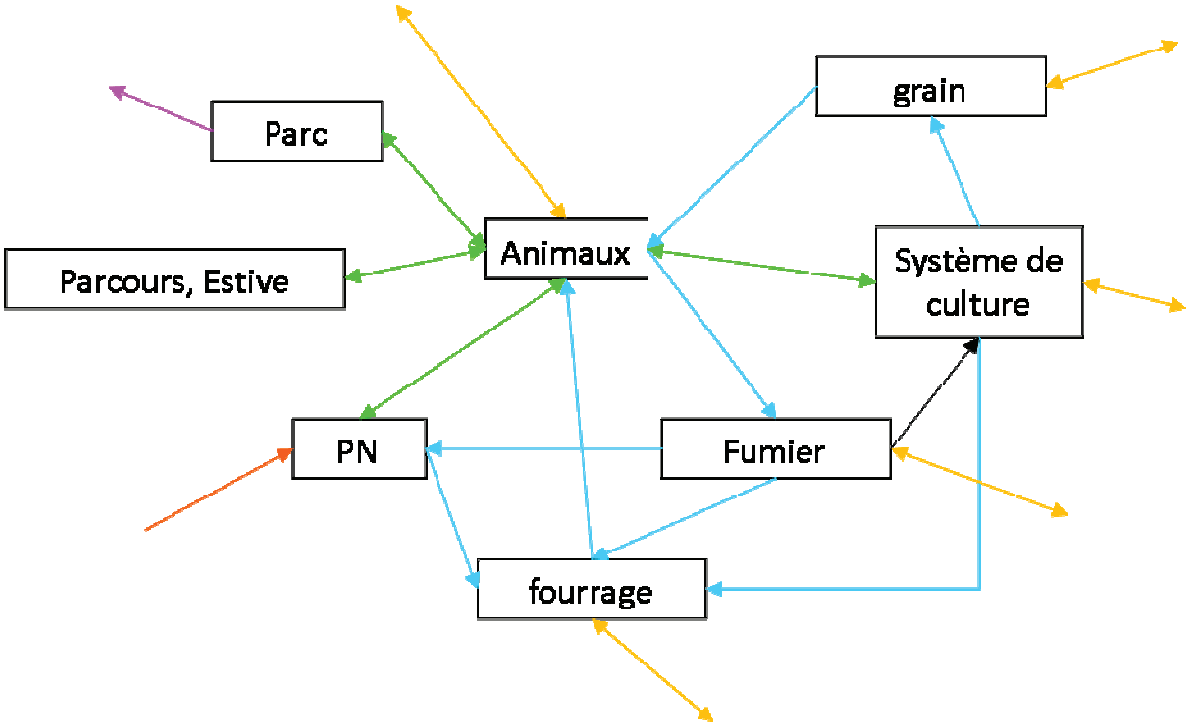


Figure 3 : représentation du système en considérant les systèmes de rotation

Les détails des flux entre les compartiments du système sont présentés de la Figure 4 à la Figure 7.

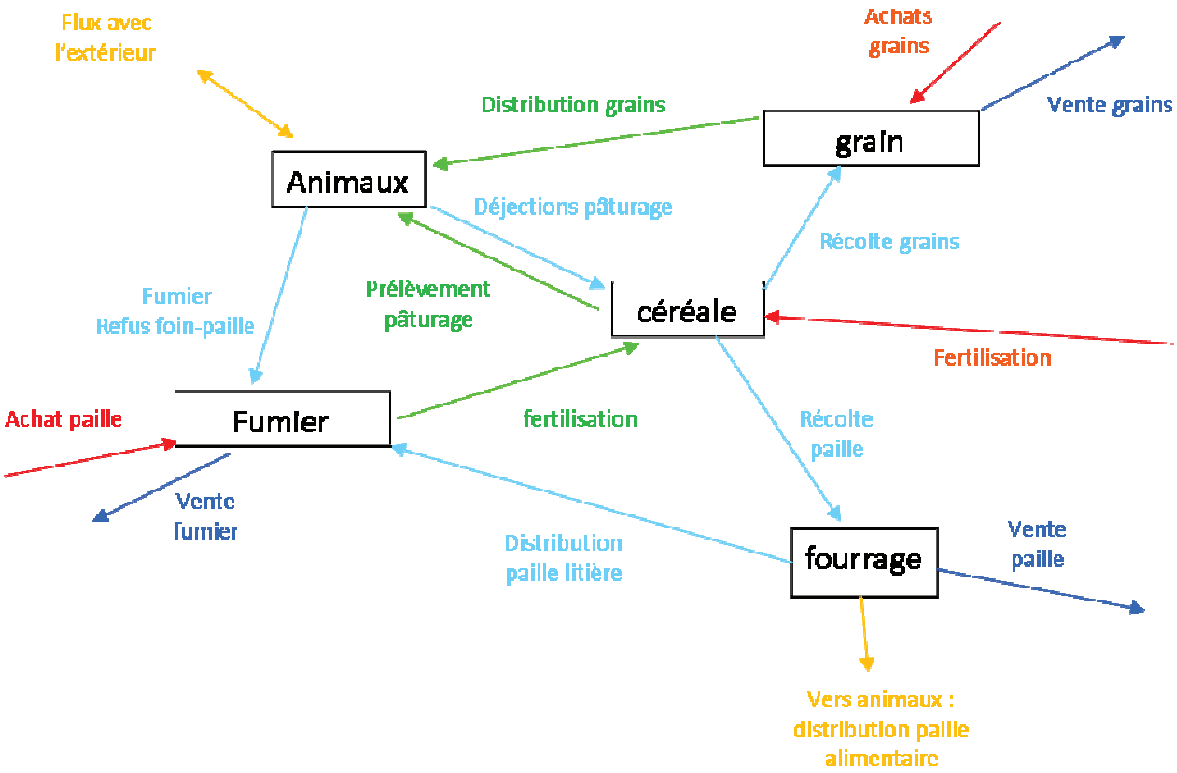


Figure 4 : Portion du système : détail des liens entre les compartiments animaux et céréales

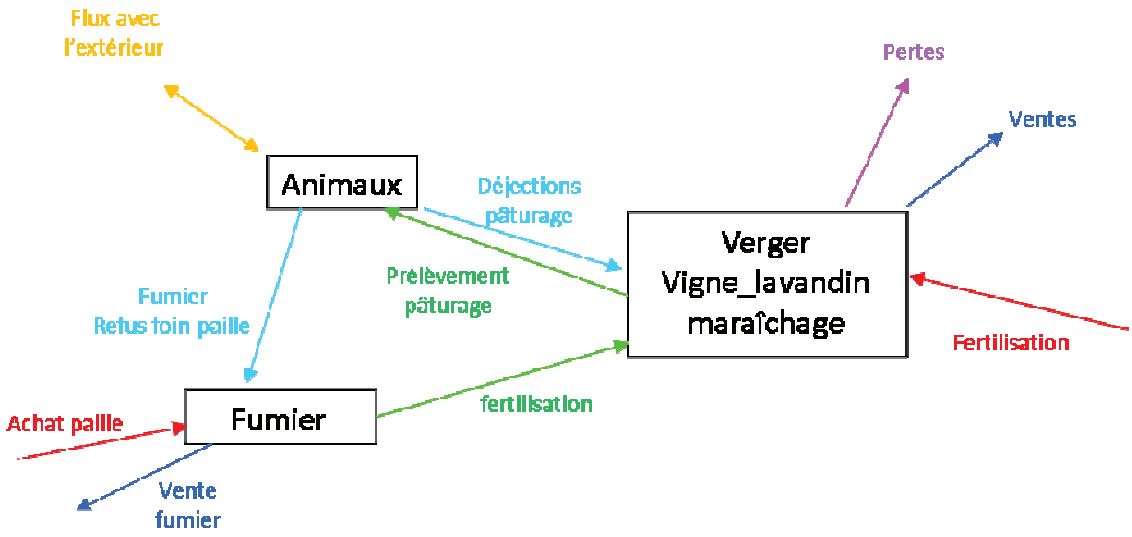


Figure 5 : Portion du système : détails des liens entre les compartiments animaux et culture de vente

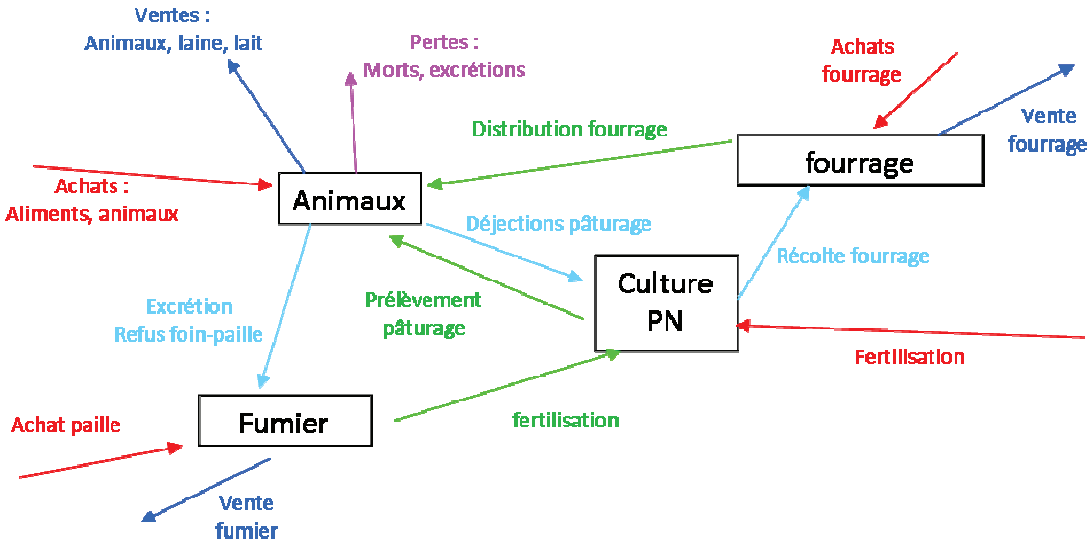


Figure 6 : Portion du système : détails des liens entre les compartiments animaux et culture ou PN

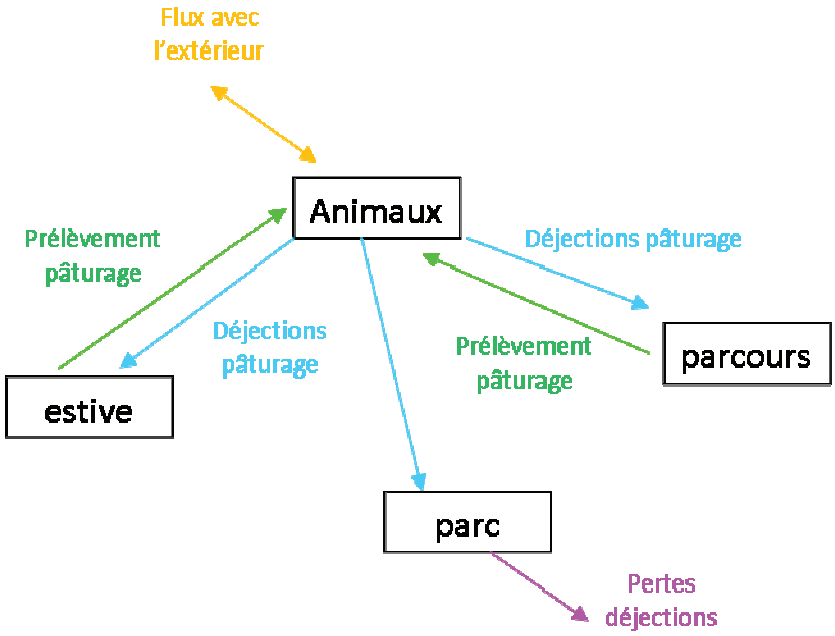


Figure 7 : Portion du système : détails des liens entre les compartiments animaux et les surfaces non productives

Estimation des flux :

Les flux au sein du système sont de trois types :

- entrant (de l'extérieur vers un compartiment),
- sortant (du compartiment vers l'extérieur), il s'agit des produits, différents des pertes qui sont les flux sortants perdus,
- intra (entre deux compartiments du système). Ces flux sont calculés à partir des quantités de matière circulant au sein de l'exploitation. Pour chaque exploitation, un bilan sur l'année est fait sur ces flux.

Des estimations doivent être faites pour la modélisation de certains flux.

- L'estimation des quantités prélevées au pâturage est calculée de façon différente selon que l'exploitation est issue d'un cas type ou d'une exploitation réelle :

Cas-type	Cas réel
Excepté dans le cas des ovins lait, l'information concernant la quantité pâturée sur chaque surface a déjà été calculée. Le travail consiste à distribuer les quantités pâturées dans le temps afin de pouvoir réaliser les calculs de fèces présentés en suivant.	La quantité pâturée est déduite des besoins des animaux et des quantités distribuées. Pour distribuer les quantités pâturées en fonction des différentes surfaces, l'information nécessaire est le temps passé au pâturage sur chacune de ces surfaces. Dans le cas où cette information manque (en particulier pour les surfaces fourragères : PN, cultures i), la quantité prélevée est proportionnelle à la surface.

- Concernant les déjections au pâturage, seules les fèces sont prises en compte. En effet, l'azote contenu dans l'urine se volatilise ou est lessivé (pertes non comptabilisées). Elles sont calculées à partir de la formule suivante :

Équation 1 : calcul des fèces

$$fèces\ (kg\ MS) = fourrage * (1 - dF) + concentré * (1 - dC) \quad (1)$$

avec dF : digestibilité des fourrages (sans) unité
dC : digestibilité des concentrés (sans unité)
$fourrage$ en kg MS
$concentré$ en kg MS

Les quantités de fourrage sont celles apportées en bergerie et prélevées au pâturage, et les concentrés sont apportés en bergerie. Dans le cas du pâturage de chênaie et châtaigneraies entre octobre et janvier, une ration par tête et par jour de 300g de concentrés prélevés au pâturage est ajoutée.
La quantité de fèces est calculée sur tout le troupeau et sur toute l'année, agneaux exceptés. En effet, l'impact des agneaux sur le pâturage est négligeable comparé à celui des mères. La

quantité restituée sur chacune des surfaces est proportionnelle au temps passé sur chaque surface. En l'absence d'information contraire, la durée de pâturage est choisie à 8h par jour lorsque les animaux rentrent en bergerie et à 12h lorsque les animaux sont parqués la nuit.

- La quantité de fumier produite par le troupeau est une donnée qui peut être difficile à estimer, et même si l'information existe, il est délicat d'estimer la quantité d'azote représentée par ce fumier, sa composition étant éminemment variable. Le choix est donc fait d'estimer la quantité d'azote totale (fèces + urines) émise par le troupeau.
  Un coefficient de temps passé en bergerie est ensuite appliqué à cette quantité d'azote excrétée par les animaux (Smith and Frost 2000). Le stock de fumier est constitué de ce flux et de l'apport de paille ou de refus non consommés par un autre atelier.
  A partir de la quantité de fumier utilisé (épandu ou vendu), il est possible de calculer les pertes azotées des animaux :

Équation 2 : calcul des pertes N des animaux

$$pertes\ N = kg\ N\ excrété\ en\ bergerie + kg\ N\ litière - kg\ N\ fumier\ utilisé \quad (2)$$

Les résultats des enquêtes et des calculs donnent un tableau dans lequel sont répertoriés tous les flux : leurs qualités, leurs directions (entrée : compartiment de départ du flux, sortie : compartiment d'arrivée du flux, direction : entrant, sortant ou intra) et leurs valeurs. Une portion de ce tableau est présentée **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**.

Tableau 2 : Extrait du tableau des flux

type_flux	entree	sortie	direction	ROQ 3	ROQ 2	CRAU
fertilisation PN	exterieur	PN	entrant	390.00	460.00	9780.00
fumier PN	fumier	PN	intra	134.00	0.00	3015.00
recolte PN	PN	fourrage	intra	264.00	369.60	24554.48
vente PN	fourrage	exterieur	sortant	0.00	0.00	22590.12
paturage PN	PN	animal	intra	663.68	1283.84	10016.19
dejection paturage PN	animal	PN	intra	156.50	262.58	2495.60
fertilisation cereale	exterieur	grain	entrant	1100.00	975.00	0.00
fumier cereale	fumier	grain	intra	1179.20	1742.00	0.00
recolte paille	cereale	fourrage	intra	348.48	299.52	0.00
recolte cereale	cereale	grain	intra	1425.60	1302.91	0.00
vente cereale	grain	exterieur	sortant	345.60	691.20	0.00
vente paille	fourrage	exterieur	sortant	0.00	0.00	0.00
paturage cereale	cereale	animal	intra	316.80	0.00	0.00
dejection paturage cereale	animal	cereale	intra	93.42	0.00	0.00

Calcul des indicateurs

A partir de la liste des flux obtenue, il s'agit de calculer les indicateurs ENA. La méthode ENA visualise le système de la façon suivante (Stark 2016) :

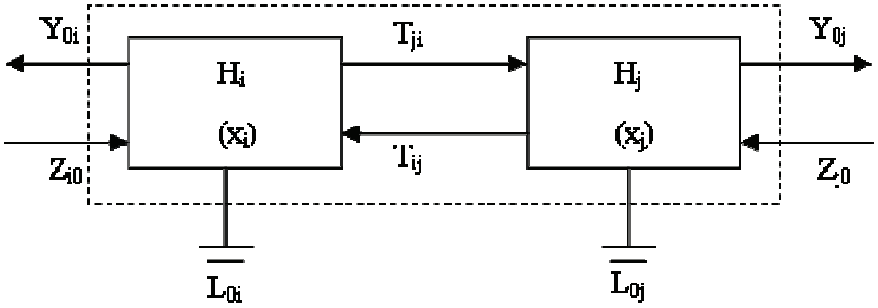


Figure 8 : système théorique à 2 compartiments

Avec : H_i : compartiment i
H_j : compartiment j
(x_i) : stock dans le compartiment i
(x_j) : stock dans le compartiment j
T_{ij} : flux du compartiment j au compartiment i
T_{ji} : flux du compartiment i au compartiment j
Y_{0i} : flux sortant du compartiment i vers l'extérieur : produits
Y_{0j} : flux sortant du compartiment j vers l'extérieur : produits
Z_{i0} : flux entrant de l'extérieur vers le compartiment i : intrants
Z_{j0} : flux entrant de l'extérieur vers le compartiment j : intrants
L_{0i} : flux sortant du compartiment i vers l'extérieur, pertes
L_{0j} : flux sortant du compartiment j vers l'extérieur, pertes

Le système est ensuite traduit sous forme de matrice de flux telle la matrice suivante (Finn 1976):

		1	2	3	...	n+1	
		Inflows	**H_1**	**H_2**	**...**	**H_n**	**Ti.**
1	**H_1**	$Z_{1,0} = T_{1,1}$	$T_{1,2}$	$T_{1,3}$	...	$T_{1,n}$	
2	**H_2**	$Z_{2,0} = T_{2,1}$	$T_{2,2}$	$T_{2,3}$	...	$T_{2,n}$	
.	.	.	.	.		.	
.	.	.	.	.		.	
.	.	.	.	.		.	
n	**H_n**	$Z_{n,0} = T_{n,1}$	$T_{n,2}$	$T_{n,3}$	...	$T_{n,n}$	
n+1	**outflows**	0	$Y_{0,1} = T_{n+1,2}$	$Y_{0,2} = T_{n+1,3}$	...	$Y_{0,1} = T_{n+1,n}$	
n+2	**losses**	0	$L_{0,1} = T_{n+2,2}$	$L_{0,2} = T_{n+2,3}$	...	$L_{0,n+1} = T_{n+2,n}$	
	T.j						

Figure 9 : matrice de flux théorique

C'est à partir de la matrice de flux Figure 9 que sont calculés les indicateurs ENA. Cette méthode ayant été mise en place pour l'étude des écosystèmes, tous les indicateurs ne sont pas pertinents pour décrire les agro-systèmes. Les indicateurs choisis sont présentés Figure 10 : présentation des indicateurs choisis. Le détail des formules se trouve en annexe (Rufino, Hengsdijk, and Verhagen 2009; Stark 2016; Latham II 2006).

Indicateurs ENA choisis pour l'analyse des agrosystèmes

Analyse de la structure du système

Mesure de la diversité des flux

1. Nombre de compartiments :

$$n \qquad (N)\,^{1}$$

2. Nombre de liens internes par compartiment :

$$\frac{F_i}{n} \qquad (Fi_n)^{1}$$

3. Nombre de liens par compartiment

$$LD = \frac{L}{n} \qquad (LD)^{1}$$

Mesure de l'organisation du système

4. Organisation des flux :

$$Org = 1 - \frac{AMI}{H_r} \qquad (Org)^{1}$$

1. nom de la variable correspondante sous R

Analyse du fonctionnement du système

5. Intensité de l'intégration (somme des flux internes par ha, en kg N/ha) :

$$TT_{ha} \qquad (TT_ha)^1$$

6. Activité du système en kg/N :

$$TST \qquad (TST)^1$$

7. Index cyclique de Finn :

$$FCI = \frac{TST_c}{TST} \qquad (FCI)^1$$

8. Mesure de l'intégration agriculture-élevage :

$$Integration = TT_{ha} * Org \qquad (Int)^1$$

Analyse de la performance du système

9. Résilience du système :

$$\frac{\Phi}{C} \qquad (O_C)^1$$

10. Productivité (en kg N/ha) :

$$P = \frac{Y_0}{ha} \qquad (P_ha)^1$$

11. Autosuffisance, quantité d'intrant (en kg N/ha) :

$$SS = \frac{Z_0}{ha} \qquad (SS_ha)^1$$

12. Efficience (sans unité) :

$$Eff = \frac{Y_0}{Z_0} \qquad (Eff)^1$$

Résultats

Automatisation du calcul des indicateurs

Un programme sous R est établi de manière à automatiser le passage d'un tableur listant les flux azotés dans une exploitation agricole à un tableau de résultats des indicateurs ENA calculés sur cette même exploitation.

Le choix a été fait de réaliser un tableur « flux » (dont un extrait est présenté Tableau 2), regroupant tous les types de flux (en ligne) et leurs valeurs pour chaque modèle étudié (en colonne). Le programme parcourt donc les colonnes de ce tableau, et à chaque modèle, il exécute deux actions :

- Tout d'abord, il construit les matrices de flux : une pour l'aspect culture et une seconde pour l'aspect système. Un exemple des matrices obtenues est représenté Tableau 3 pour l'aspect culture et Tableau 4 pour l'aspect système.

Tableau 3 : culture_PREADIV1, matrice de flux

	entrant	animal	cereale	culture.2	estive	fourrage	fumier	grain	parc	parcours	PN	verger
animal	166.8096	0	0	312.8	284.16	1360.0565	0	414.72	0	395.84	65.28	0
cereale	1320	0	0	0	0	0	589.6	0	0	0	0	0
culture 2	640	67.747466	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
estive	0	124.32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
fourrage	0	0	276.48	1333.248	0	0	0	0	0	0	268.8	0
fumier	0	3430.64	0	0	0	103.68	0	0	0	0	0	0
grain	0	0	933.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
parc	0	124.32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
parcours	0	135.07417	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PN	160	19.154524	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
verger	0	0	0	0	0	0	402	0	0	0	0	0
sortant	0	200.3504	0	0	0	288	0	1036.8	0	0	0	230.4
pertes	0	2580.1904	0	0	0	0	0	0	124.32	0	0	0

Le tableau se lit de la manière suivante, pour le compartiment « fourrage » par exemple :

- En sortie, par lecture de la colonne « fourrage » :
  - 1360 kg de N sont distribués aux animaux (distribution des aliments)
  - 103 kg de N vont dans le compartiment « fumier » (la paille)
  - 288 kg de N sortent du système (vente de fourrage)
- En entrée, par lecture de la ligne « fourrage » :
  - 276 kg de N proviennent de la récolte de paille
  - 1333 kg de N proviennent de la récolte de fourrages cultivés (culture 2)
  - 268 kg de N proviennent de la récolte de fourrages sur les prairies naturelles (PN)

Tableau 4 : syst_PREADIV1, matrice de flux

	entrant	animal	estive	fourrage	fumier	grain	parc	parcours	PN	Syst.1	Syst.2
animal	167	0	284	1360	0	415	0	396	65	0	313
estive	0	124	0	0	0	0	0	0	0	0	0
fourrage	0	0	0	0	0	0	0	0	269	0	1610
fumier	0	3431	0	104	0	0	0	0	0	0	0
grain	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	933
parc	0	124	0	0	0	0	0	0	0	0	0
parcours	0	135	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PN	160	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Syst 1	0	0	0	0	402	0	0	0	0	0	0
Syst 2	1960	68	0	0	590	0	0	0	0	0	0
sortant	0	200	0	288	0	1037	0	0	0	230	0
pertes	0	2580	0	0	0	0	124	0	0	0	0

- Puis le programme calcule les différents indicateurs et stocke les résultats de ceux-ci dans un tableau (Tableau 5). Un extrait du programme détaille le calcul d'un indicateur en annexe 4.

La dernière étape du travail du programme consiste à exporter sur tableur les résultats des calculs sur toutes les exploitations. Il en résulte deux fichiers excel (.xlsx) : le premier présente autant de feuilles que de matrices de flux (deux par modèle étudié), ainsi qu'une dernière feuille avec le tableau de résultats. Le second répertorie les différents fichiers de résultats :

- Celui déjà présent dans le premier tableur (Tableau 5)
- Les résultats du point de vue culture uniquement
- Les résultats du point de vue système uniquement
- Les résultats selon les différents points de vue, mais arrangés de façon à pouvoir tracer des graphes à partir de ces données : le caractère « culture » ou « système » passe en facteur par la création d'une colonne supplémentaire (Tableau 6).

Tableau 5 : tab_resultats : extrait du tableau de résultats du calcul des indicateurs

	SAU	n	Fi	Fi/n	AMI	Hr	Org	A	C	O	O_C	Ttot	TT	TT_ha	TST	TSTc	FCI	Z0	Y0	L0	P	SS	P_ha	SS_ha	Eff	Int
syst_ ROQ.2	52	8	22	2.75	1.50	3.05	0.51	38047	110120	72073	0.65	25405	18357	353.0	25546	5074	0.20	4533	2485	31	0.10	0.82	47.78	87.17	0.55	179.6
culture_ ROQ.2	52	10	22	2.20	1.70	3.22	0.47	43292	113018	69726	0.62	25405	18357	353.0	26125	3803	0.15	4533	2485	31	0.10	0.83	47.78	87.17	0.55	166.3
syst_ PREADIV1	132	10	18	1.80	1.82	2.68	0.32	31705	66824	35118	0.53	17388	10641	80.6	17942	1190	0.07	2287	1756	2705	0.10	0.87	13.30	17.32	0.77	25.7
culture_ PREADIV1	132	11	19	1.73	1.95	2.84	0.31	33865	69675	35810	0.51	17388	10641	80.6	18642	677	0.04	2287	1756	2705	0.09	0.88	13.30	17.32	0.77	25.3
syst_ CANIGOUVIGNE	43	9	13	1.44	1.79	2.62	0.32	16224	34227	18002	0.53	9063	5146	119.7	9464	343	0.04	1617	1668	633	0.18	0.83	38.78	37.61	1.03	38.0
culture_ CANIGOUVIGNE	43	11	19	1.73	1.79	2.84	0.37	16245	36233	19988	0.55	9063	5146	119.7	9464	323	0.03	1617	1668	633	0.18	0.83	38.78	37.61	1.03	44.0

Tableau 6 : resultats : extrait du tableau de résultats du calcul des indicateurs permettant de tracer les graphes

	modele	type	SAU	n	Fi	Fi/n	AMI	Hr	Org	A	C	O	O_C	Ttot	TT_ha	TT	TST	TSTc	FCI	Z0	Y0	L0	P	SS	P_ha	SS_ha	Eff	Int
1	*ROQ.2*	syst	52	8	22	2.75	1.50	3.05	0.51	38047	110120	72073	0.65	25405	353.0	18357	25546	5074	0.20	4533	2485	31	0.10	0.82	47.8	87.2	0.55	179.6
2	*PREADIV1*	syst	132	10	18	1.80	1.82	2.68	0.32	31705	66824	35118	0.53	17388	80.6	10641	17942	1190	0.07	2287	1756	2705	0.10	0.87	13.3	17.3	0.77	25.7
3	*CANIGOUVIGNE*	syst	43	9	13	1.44	1.79	2.62	0.32	16224	34227	18002	0.53	9063	119.7	5146	9464	343	0.04	1617	1668	633	0.18	0.83	38.8	37.6	1.03	38.0
4	*ROQ.2*	culture	52	10	22	2.20	1.70	3.22	0.47	43292	113018	69726	0.62	25405	353.0	18357	26125	3803	0.15	4533	2485	31	0.10	0.83	47.8	87.2	0.55	166.3
5	*PREADIV1*	culture	132	11	19	1.73	1.95	2.84	0.31	33865	69675	35810	0.51	17388	80.6	10641	18642	677	0.04	2287	1756	2705	0.09	0.88	13.3	17.3	0.77	25.3
6	*CANIGOUVIGNE*	culture	43	11	19	1.73	1.79	2.84	0.37	16245	36233	19988	0.55	9063	119.7	5146	9464	323	0.03	1617	1668	633	0.18	0.83	38.8	37.6	1.03	44.0

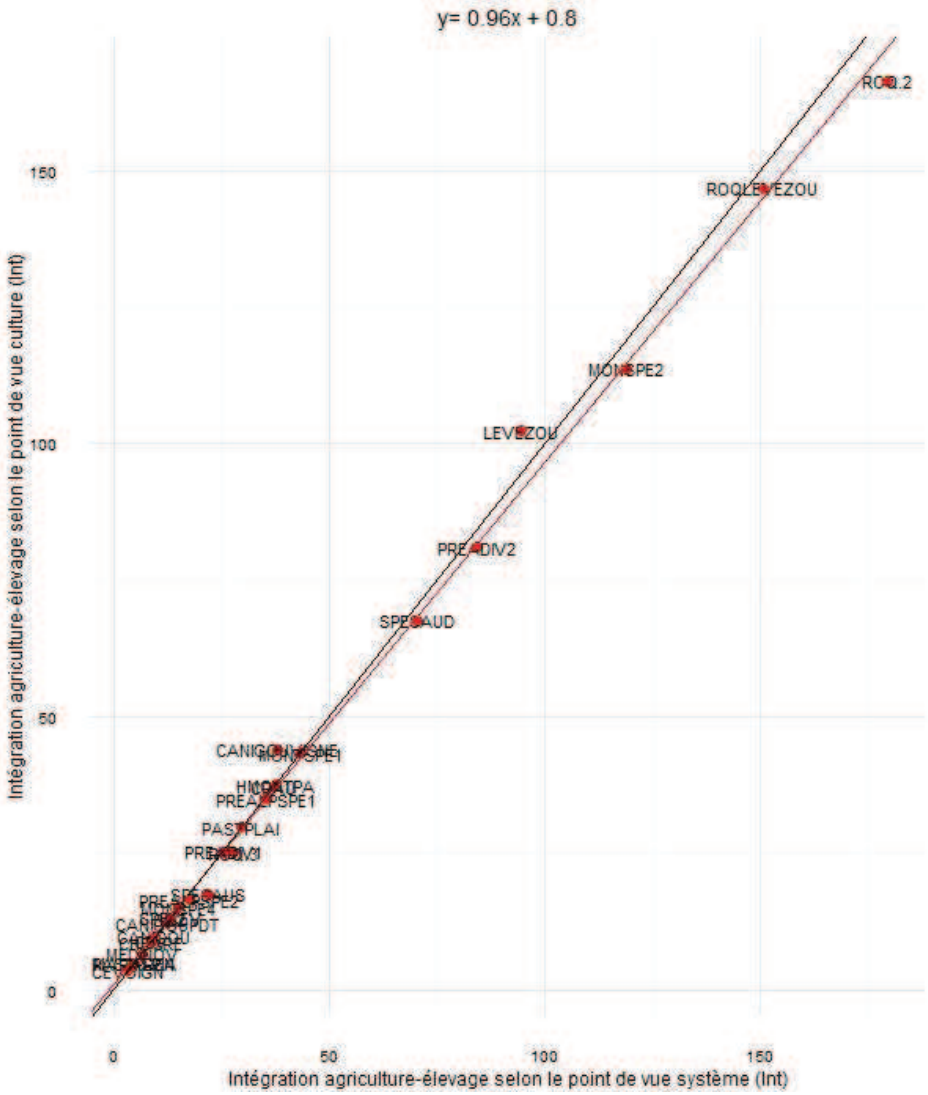
Figures d'analyse des résultats des indicateurs :

Une série de graphiques est tracée à partir du tableau « resultats ». Ces graphiques ont un double intérêt ici : celui de représenter le jeu de données et celui de repérer les éventuelles erreurs présentes dans la base de données. L'analyse des résultats obtenus ne sera pas faite ici.

Tout d'abord, il est possible de représenter la résilience des modèles « culture » en fonction de la résilience des modèles « système ». Ceci permettra d'étayer la réflexion quant au choix de deux représentations des agro-systèmes : du point de vue culture ou du point de vue système. Un graphe similaire est tracé pour l'organisation des systèmes. Tous deux sont regroupés Figure 11.

Pour l'organisation du réseau de flux, la régression linéaire faite sur l'échantillon (droite en rouge) ne diffère quasiment pas de la bissectrice tracée en noir (droite y = x). Il peut donc être considéré que regarder l'organisation du point de vue « culture » ou du point de vue « système » ne change pas l'appréciation globale du système modélisé sur cette dimension.
C'est un peu différent dans le cas de la résilience : les agro-systèmes vus sous le point de vue « culture » sont plutôt moins résilients (ils auraient moins de capacité de réserve) que ceux vus sous le point de vue système. Les points sont également moins bien alignés que dans le cas précédent : la différence entre culture et système est donc variable selon les exploitations. Une analyse plus poussée sera nécessaire pour choisir le modèle conceptuel (découpage du système par culture ou par rotation) qui est le plus pertinent pour apprécier la résilience.
Pour la suite, les modèles seront représentés selon l'aspect « culture » uniquement.

Organisation : aspect culture en fonction de l'aspect système



Résilience : aspect culture en fonction de l'aspect système

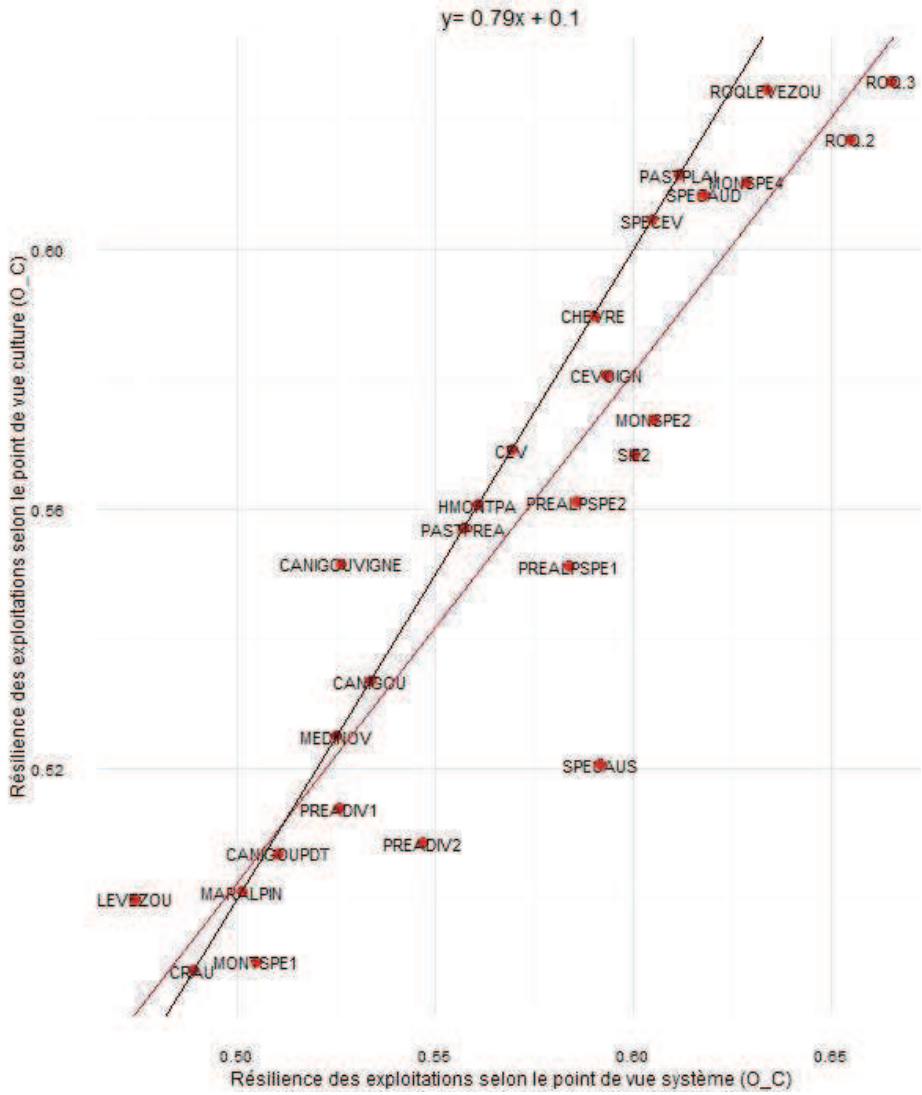


Figure 11 : Relation entre point de vue système et point de vue culture

Un deuxième graphe (Figure 12) permet de représenter les performances des exploitations. Celles-ci ne changent pas selon que l'agro-système est représenté sous son aspect culture ou sous son aspect système. En effet, les quantités d'intrants (entrées) et de produits (sorties sans les pertes) restent identiques dans les deux cas.

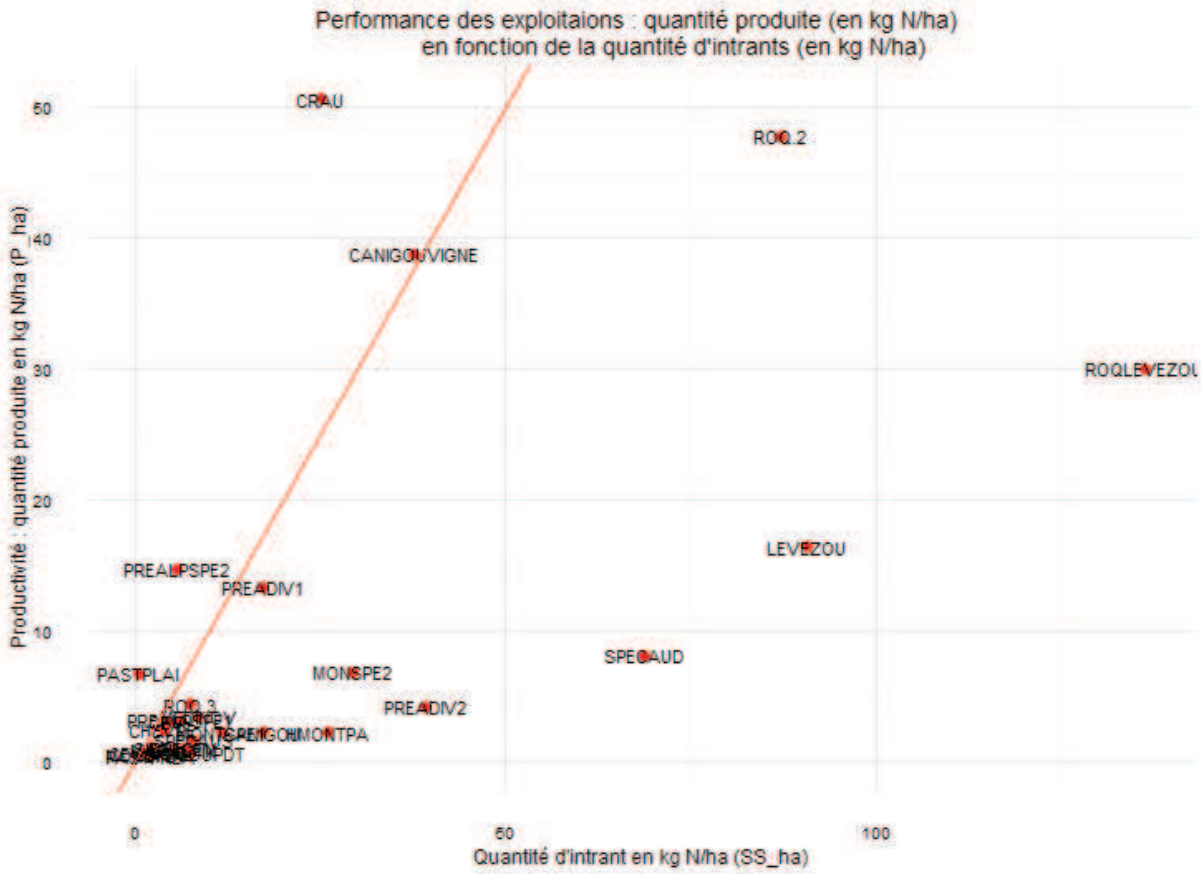


Figure 12 : Graphe de performance des exploitations

Un lot principal présente une production et une consommation d'intrant plus faible, avec une tendance à importer plus qu'ils n'exportent (Eff < 1) - . La droite en rouge représente la bissectrice (droite y = x). Quelques exploitations se détachent. Les exploitations consommant le plus d'intrant sont en système ovin lait (ROQLEVEZOU, LEVEZOU et ROQ2). Ils ont également une efficience faible (Eff < 1) : ils importent plus que ce qu'ils n'exportent. Les exploitations CRAU, et CANIGOUVIGNE dans une moindre mesure, ont une efficience supérieure à 1. En effet, la première produit du foin de Crau en grande quantité et achète très peu d'aliments pour ses brebis. La seconde produit du raisin pour vinification et du fourrage

Le graphe Figure 13 permet de caractériser l'intégration agriculture-élevage des exploitations, par leur intensité et leur organisation.

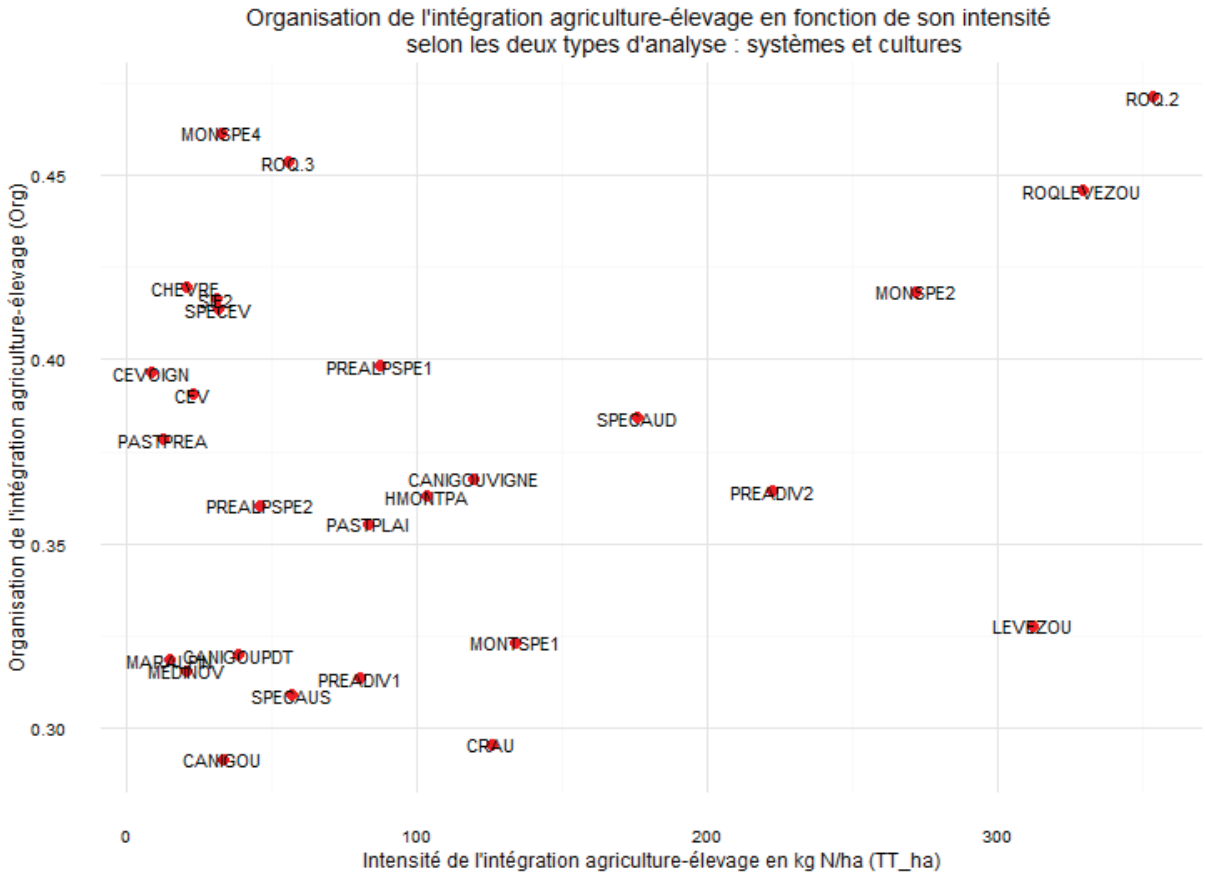


Figure 13 : Evaluation de l'intégration agriculture-élevage

Ce graphe permet de faire plusieurs groupes dans la base de données. ROQ2, ROQLEVEZOU et LEVEZOU se détachent de nouveau par leur forte intégration. Au regard des conclusions tirées du graphe précédent, il serait intéressant de caractériser le lien entre intégration et consommation d'intrants sur ces trois exploitations. Parmi elles, deux présentent également une forte organisation alors que ce n'est pas le cas de LEVEZOU. CRAU se détache de nouveau : il présente une intégration plutôt élevée, mais une organisation plus faible que tous les autres modèles. Deux autres exploitations se détachent par leur forte organisation pour une faible intégration : ROQ3 (ovin lait, système Roquefort) et MONSPE4 (ovin viande à tendance pastorale).

Discussion

Le travail de modélisation demande de faire des choix et des approximations pour représenter la complexité de la réalité.
La première difficulté consiste à récolter les données brutes. Cette question s'est posée uniquement pour les exploitations enquêtées, les cas-types regroupant déjà ces données. Il s'agit de récupérer toutes les informations suffisamment précisément dans un temps relativement court (1h-1h30). Lorsque les données manquent il faut ensuite faire des approximations à la lumière des réponses aux autres questions.

A ces premières approximations viennent s'ajouter celles faites sur les trois principaux points suivants :

- Les quantités pâturées
- Les fèces restituées au pâturage
- L'excrétion azotée en bâtiment aboutissant à la constitution d'un stock de fumier
- Le choix des coefficients azotés

Finalement, il est légitime de se demander quelle précision ce modèle a par rapport à la réalité. La base de données comporte 27 exploitations dont 8 cas réels. Toutes ces exploitations ont un fonctionnement différent. Il serait intéressant de compléter la base de données en cherchant des cas au fonctionnement similaire afin de comparer les résultats du calcul des indicateurs. Ceci permettrait d'estimer la précision du modèle, répondant à la question précédente.

Par ailleurs, une étude d'un système de flux impose une compartimentation des exploitations. Ce modèle cherche à être le plus détaillé possible, et à montrer deux approches possibles de la compartimentation. Il s'agit maintenant de déterminer jusqu'à quel point les compartiments peuvent être agrégés sans pour autant altérer la précision des résultats. Il faut aussi déterminer quel type de compartimentation système ou culture est plus cohérente, ou, si les deux modèles sont conservés, quels sont les apports de chacun d'entre eux.

Même si le programme sous R est capable de gérer des compartiments supplémentaires, notamment dans le cas d'un atelier d'élevage supplémentaire, ce n'est pas le cas du modèle conceptuel qui a été établi pour des exploitations ovines uniquement. Si des interactions existent avec d'autres ateliers d'élevage, le modèle tel que présenté Figure 2 et Figure 3 est à adapter, ainsi que le fichier « flux » qui calcule les flux d'azote à partir des données brutes.

Concernant l'aspect programmation, le script R permet de traiter un système avec une infinité de compartiments et une infinité de modèles, dans les limites de la capacité de l'ordinateur, mais surtout du fichier Excel sur lequel sont enregistrés les résultats en sortie ("Spécifications et Limites Relatives À Excel - Excel" 2016). Par ailleurs, il est indispensable de respecter certaines règles de construction du fichier « flux », détaillées précédemment. De plus, un deuxième fichier en entrée du programme est nécessaire pour connaître la SAU. Une amélioration du programme serait d'intégrer cette donnée manquante au fichier « flux ».
D'autres améliorations peuvent être apportées au programme. En effet, certaines variables sont utilisées pour calculer plusieurs indicateurs, et sont systématiquement calculées, à chaque appel de la variable. Une alternative moins coûteuse pour le programme consisterait à stocker ces variables

dans une structure intermédiaire et à aller chercher chaque variable au besoin.
Les calculs effectués dans le programme permettent de calculer certains indicateurs seulement, choisis au préalable. L'analyse des résultats montrera peut-être que certains indicateurs manquent. Il sera à ce moment possible de rajouter les calculs dans la structure.

Conclusion :

Ce travail a permis d'établir un modèle d'analyse des élevages ovins à travers la méthode ENA. Cette modélisation des exploitations par un système de flux fonctionne à partir d'une base de données de 27 exploitations ou modèles, construits pour la plupart à partir de cas-types, et à partir de cas réelsv pour les autres. Dans ces différents cas, les flux sont calculés sous tableur, puis un programme sous R permet de calculer les indicateurs ENA.
Les résultats obtenus vont permettre de caractériser les formes d'intégration agriculture-élevage et de mesurer les performances agro-écologiques des exploitations ovines du bassin méditerranéen.
Ce modèle peut également s'appliquer dans d'autres cas, en particulier en ce qui concerne les calculs des indicateurs ENA grâce au programme mis en place sous R.

Bibliographie

Finn, John T. 1976. “Measures of Ecosystem Structure and Function Derived from Analysis of Flows.” *Journal of Theoretical Biology* 56 (2): 363–80. doi:10.1016/S0022-5193(76)80080-X.

“Idele.fr.pdf.” 2016. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/72e2a8ae-75e5-4c0b-9f6e-b21e012439b7.

LAGIER, Elodie, Helene BAUDOUX, Rémi LECOMTE, and Jean François BATAILLE. 2016a. “1-HMONPA 2014_2015.pdf.” Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/72e2a8ae-75e5-4c0b-9f6e-b21e012439b7.

———. 2016b. “2-MONTSPE1 2014_2015.pdf.” Institut de l’Elevage. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/8a424a99-a3f5-44bf-9764-62b7cef1b07b.

———. 2016c. “3-MONTSPE2 2014_2015.pdf.” Institut de l’Elevage. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/69251ed9-e8ff-4f1b-ba48-59e6f756c738.

———. 2016d. “4-MONTSPE3 2014_2015.pdf.” Institut de l’Elevage. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/91a0b22b-0956-48e5-9d18-04373ad93579.

———. 2016e. “6-PREASPE2 2014_2015.pdf.” Institut de l’Elevage. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/fea630bd-4909-45fb-af0c-9c97897a230c.

———. 2016f. “7-PREADIV1 2014_2015.pdf.” Institut de l’Elevage. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/6b470196-f345-4c34-b0a4-a85ea86e861b.

———. 2016g. “8-PREADIV2 2014_2015.pdf.” Institut de l’Elevage. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/e0cd2094-7b0d-4ca3-a6c5-5cdbe7c17041.

———. 2016h. “10-MARALPIN-2014_2015.pdf.” Institut de l’Elevage. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/c7d9357c-2a7b-43c4-94dd-e38e8fa172da.

———. 2016i. “11-PASTPLA 2014_2015.pdf.” Institut de l’Elevage. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/707b4ed7-4d7a-448c-b8e6-8e240fd9a692.

———. 2016j. “13-MEDINOV 2014-2015.pdf.” Institut de l’Elevage. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/f397b9e3-6ee8-49ab-afc7-93fe9342c7ec.

———. 2016k. “14-SPECAUD 2014-2015.pdf.” Institut de l’Elevage. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/e455772f-ac92-48f6-9be9-aab25ea6f854.

———. 2016l. “15-SPECEVEN 2014-2015.pdf.” Institut de l’Elevage. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/50cc2c4b-7b22-40a4-b097-d1250b6b1690.

———. 2016m. “16-SPECAUS 2014-2015.pdf.” Institut de l’Elevage. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/f0b317ca-d8f6-4aa9-b217-1219efdd0e53.

Latham II, Luke G. 2006. “Network Flow Analysis Algorithms.” *Ecological Modelling* 192 (3–4): 586–600. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.07.029.

“ROQ2.” 2016. Institut de l’Elevage. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/9af3aa9f-8e5b-47c4-8e78-ffcfca771aee.

“ROQ3.” 2016. Institut de l’Elevage. Accessed August 26. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/b373bee0-93e3-4e6c-b9bd-b361fb01887d.

Rufino, M. C., H. Hengsdijk, and A. Verhagen. 2009. “Analysing Integration and Diversity in Agro-Ecosystems by Using Indicators of Network Analysis.” *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 84 (3): 229–47. doi:10.1007/s10705-008-9239-2.

Smith, K. A, and J. P Frost. 2000. “Nitrogen Excretion by Farm Livestock with Respect to Land Spreading Requirements and Controlling Nitrogen Losses to Ground and Surface Waters. Part 1: Cattle and Sheep.” *Bioresource Technology* 71 (2): 173–81. doi:10.1016/S0960-8524(99)00061-9.

“Spécifications et Limites Relatives À Excel - Excel.” 2016. Accessed August 25. https://support.office.com/fr-fr/article/Sp%C3%A9cifications-et-limites-relatives-%C3%A0-Excel-1672b34d-7043-467e-8e27-269d656771c3.

Stark, Fabien. 2016. “Évaluation Agroécologique Des Pratiques D’intégration Agriculture-Élevage: Application de L’analyse de Réseau Écologique À Des Exploitations Agricoles En Milieu Tropical Humide.” http://prodinra.inra.fr/?locale=fr#!ConsultNotice:355944.

Annexes

Annexe 1

Liste des cas-types (Institut de l'Elevage)

ROQ 3, Cas type ovin lait ("ROQ3" 2016, 3)
ROQ 2, Cas-type ovin lait ("ROQ2" 2016)
HMONTPA, Cas-type ovin viande(LAGIER et al. 2016a)
MARALPIN, Cas-type ovin viande (LAGIER et al. 2016h)
MEDINOV, Cas-type ovin viande (LAGIER et al. 2016j)
MONSPE2, Cas-type ovin viande (LAGIER et al. 2016c)
MONSPE3 (MONSPE4 ici), Cas-type ovin viande (LAGIER et al. 2016d)
MONSPE1, Cas-type ovin viande (LAGIER et al. 2016b)
PASTPLAI, Cas-type ovin viande (LAGIER et al. 2016i)
PASTPREA, Cas-type ovin viande (LAGIER et al. 2016i)
PREADIV1, Cas-type ovin viande (LAGIER et al. 2016f)
PREADIV2, Cas-type ovin viande (LAGIER et al. 2016g)
PREALPSPE2, Cas-type ovin viande (LAGIER et al. 2016e)
SPECAUD, Cas-type ovin viande (LAGIER et al. 2016k)
SPECAUS, Cas-type ovin viande (LAGIER et al. 2016m)
SPECEV, Cas-type ovin viande (LAGIER et al. 2016l)
SIE2, Cas-type ovin viande

Annexe 2

Tableau des flux pour les trois exploitations ROQ2, ROQ3 et CRAU

objet_flux	type_flux	entree_depart	sortie_arrivee	direction	ROQ 3	ROQ 2	CRAU
fertilisation	fertilisation verger	exterieur	verger	entrant	0	0	0
fertilisation	fumier verger	fumier	verger	intra	0	0	0
vente	vente verger	verger	exterieur	sortant	0	0	0
autoconsommation	autoconsommation verger	verger	exterieur	sortant	0	0	0
paturage	paturage verger	verger	animal	intra	0	0	0
dejections paturage	dejection paturage verger	animal	verger	intra	0	0	0
fertilisation	fertilisation vigne_lavandin	exterieur	vigne_lavandin	entrant	0	0	0
fertilisation	fumier vigne_lavandin	fumier	vigne_lavandin	intra	0	0	0
vente	vente vigne_lavandin	vigne_lavandin	exterieur	sortant	0	0	0
autoconsommation	autoconsommation vigne_lavandin	vigne_lavandin	exterieur	sortant	0	0	0
paturage	paturage vigne_lavandin	vigne_lavandin	animal	intra	0	0	0
dejections paturage	dejection paturage vigne_lavandin	animal	vigne_lavandin	intra	0	0	0
fertilisation	fertilisation maraichage	exterieur	maraichage	entrant	0	0	0
fertilisation	fumier maraichage	fumier	maraichage	intra	0	0	0
vente	vente maraichage	maraichage	exterieur	sortant	0	0	0
autoconsommation	autoconsommation maraichage	maraichage	exterieur	sortant	0	0	0
perte	perte maraichage	maraichage	exterieur	sortant	0	0	0
paturage	paturage maraichage	maraichage	animal	intra	0	0	0
dejections paturage	dejection paturage maraichage	animal	maraichage	intra	0	0	0
fertilisation	fertilisation culture 1	exterieur	culture 1	entrant	0	250	0
fertilisation	fumier culture 1	fumier	culture 1	intra	402	1005	0
recolte	recolte culture 1	culture 1	fourrage	intra	0	616	0
vente	vente culture 1	fourrage	exterieur	sortant	0	0	0
paturage	paturage culture 1	culture 1	animal	intra	156.6	483.3666487	0
dejections paturage	dejection paturage culture 1	animal	culture 1	intra	44.51159074	153.9722767	0
fertilisation	fertilisation culture 2	exterieur	culture 2	entrant	366.6666667	500	0
fertilisation	fumier culture 2	fumier	culture 2	intra	1326.6	0	0
recolte	recolte culture 2	culture 2	fourrage	intra	2583.36	632	0
vente	vente culture 2	fourrage	exterieur	sortant	0	0	0
paturage	paturage culture 2	culture 2	animal	intra	1789.08	0	0
dejections paturage	dejection paturage culture 2	animal	culture 2	intra	424.7185399	0	0
fertilisation	fertilisation culture 3	exterieur	culture 3	entrant	0	0	0

Annexe 2

Tableau des flux pour les trois exploitations ROQ2, ROQ3 et CRAU

objet_flux	type_flux	entree_depart	sortie_arrivee	direction	ROQ 3	ROQ 2	CRAU
fertilisation	fumier culture 3	fumier	culture 3	intra	0	0	0
recolte	recolte culture 3	culture 3	fourrage	intra	0	921.6	0
vente	vente culture 3	fourrage	exterieur	sortant	0	0	0
paturage	paturage culture 3	culture 3	animal	intra	0	181.8619469	0
dejections paturage	dejection paturage culture 3	animal	culture 3	intra	0	38.96873156	0
fertilisation	fertilisation culture 4	exterieur	culture 4	entrant	0	500	0
fertilisation	fumier culture 4	fumier	culture 4	intra	0	603	0
recolte	recolte culture 4	culture 4	fourrage	intra	0	934	0
vente	vente culture 4	fourrage	exterieur	sortant	0	0	0
paturage	paturage culture 4	culture 4	animal	intra	0	710.0928155	0
dejections paturage	dejection paturage culture 4	animal	culture 4	intra	0	179.9234795	0
fertilisation	fertilisation PN	exterieur	PN	entrant	390	460	9780
fertilisation	fumier PN	fumier	PN	intra	134	0	3015
recolte	recolte PN	PN	fourrage	intra	264	369.6	24554.48
vente	vente PN	fourrage	exterieur	sortant	0	0	22590.1216
paturage	paturage PN	PN	animal	intra	663.68	1283.84	10016.1882
dejections paturage	dejection paturage PN	animal	PN	intra	156.5044733	262.5793622	2495.603833
fertilisation	fertilisation cereale	exterieur	cereale	entrant	1100	975	0
fertilisation	fumier cereale	fumier	cereale	intra	1179.2	1742	0
recolte	recolte paille	cereale	fourrage	intra	348.48	299.52	0
recolte	recolte cereale	cereale	grain	intra	1425.6	1302.912	0
vente	vente cereale	grain	exterieur	sortant	345.6	691.2	0
vente	vente paille	fourrage	exterieur	sortant	0	0	0
paturage	paturage cereale	cereale	animal	intra	316.8	0	0
dejections paturage	dejection paturage cereale	animal	cereale	intra	93.42422793	0	0
fertilisation	fertilisation Syst 1	exterieur	Syst 1	entrant	806.6666667	1125	0
fertilisation	fumier Syst 1	fumier	Syst 1	intra	1792.92	1675	0
recolte	recolte paille	Syst 1	fourrage	intra	190.08	115.2	0
recolte	recolte cereale	Syst 1	grain	intra	777.6	501.12	0
vente	vente cereale	grain	exterieur	sortant	188.5090909	265.8461538	0
vente	vente paille	fourrage	exterieur	sortant	0	0	0
recolte	recolte fourrages	Syst 1	fourrage	intra	1456.075636	1248	0

Annexe 2

Tableau des flux pour les trois exploitations ROQ2, ROQ3 et CRAU

objet_flux	type_flux	entree_depart	sortie_arrivee	direction	ROQ 3	ROQ 2	CRAU
vente	vente fourrages	fourrage	exterieur	sortant	0	0	0
vente	vente autre culture	Syst 1	exterieur	sortant	0	0	0
autoconsommation	autoconsommation	Syst 1	exterieur	sortant	0	0	0
perte	pertes maraichage	Syst 1	exterieur	sortant	0	0	0
paturage	paturage Syst 1	Syst 1	animal	intra	1337.790545	483.3666487	0
dejections paturage	dejection paturage Syst 1	animal	Syst 1	intra	334.8570739	153.9722767	0
fertilisation	fertilisation Syst 2	exterieur	Syst 2	entrant	660	75	0
fertilisation	fumier Syst 2	fumier	Syst 2	intra	1114.88	134	0
recolte	recolte paille	Syst 2	fourrage	intra	158.4	23.04	0
recolte	recolte cereale	Syst 2	grain	intra	648	100.224	0
vente	vente cereale	grain	exterieur	sortant	157.0909091	53.16923077	0
vente	vente paille	fourrage	exterieur	sortant	0	0	0
recolte	recolte fourrage	Syst 2	fourrage	intra	1127.284364	921.6	0
vente	vente fourrages	fourrage	exterieur	sortant	0	0	0
vente	vente autre culture	Syst 2	exterieur	sortant	0	0	0
autoconsommation	autoconsommation	Syst 2	exterieur	sortant	0	0	0
paturage	paturage Syst 2	Syst 2	animal	intra	924.6894545	181.8619469	0
dejections paturage	dejection paturage Syst 2	animal	Syst 2	intra	227.7972847	38.96873156	0
fertilisation	fertilisation Syst 3	exterieur	Syst 3	entrant	0	1025	0
fertilisation	fumier Syst 3	fumier	Syst 3	intra	0	1541	0
recolte	recolte paille	Syst 3	fourrage	intra	0	161.28	0
recolte	recolte cereale	Syst 3	grain	intra	0	701.568	0
vente	vente cereale	grain	exterieur	sortant	0	372.1846154	0
vente	vente paille	fourrage	exterieur	sortant	0	0	0
recolte	recolte fourrage	Syst 3	fourrage	intra	0	934	0
vente	vente fourrages	fourrage	exterieur	sortant	0	0	0
vente	vente autre culture	Syst 3	exterieur	sortant	0	0	0
autoconsommation	autoconsommation	Syst 3	exterieur	sortant	0	0	0
paturage	paturage Syst 3	Syst 3	animal	intra	0	710.0928155	0
dejections paturage	dejection paturage Syst 3	animal	Syst 3	intra	0	179.9234795	0
paturage	paturage parcours	parcours	animal	intra	472.32	0	2220.48
dejection paturage	dejection parcours	animal	parcours	intra	389.8838122	0	809.55

Annexe 2

Tableau des flux pour les trois exploitations ROQ2, ROQ3 et CRAU

objet_flux	type_flux	entree_depart	sortie_arrivee	direction	ROQ 3	ROQ 2	CRAU
paturage	paturage estive	estive	animal	intra	0	0	4133.726208
dejection paturage	dejection estive	animal	estive	intra	233.3793389	0	1004.72512
dejection	dejection parc	animal	parc	intra	0	0	1406.615168
perte	perte dejection parc	parc	exterieur	sortant	0	0	1406.615168
fumier	paille	fourrage	fumier	intra	339.52	253.44	0
fumier	refus	animal	fumier	intra	0	0	0
fumier	dejection bergerie	animal	fumier	intra	3706.176471	2858.179838	6772.747151
fumier	achat paille litiere	exterieur	fumier	entrant	0	0	172.8
perte	perte N fumier	animal	exterieur	sortant	1003.896471	0	3930.547151
alimentation	paille	fourrage	animal	intra	8.96	46.08	0
alimentation	PT F1	fourrage	animal	intra	0	335.664	0
alimentation	PT F2	fourrage	animal	intra	0	0	0
alimentation	PN F1	fourrage	animal	intra	126.72	103.84	0
alimentation	PN F2	fourrage	animal	intra	0	0	0
alimentation	Crau F1	fourrage	animal	intra	0	0	911.7696
alimentation	Crau F2	fourrage	animal	intra	0	0	636.352
alimentation	Crau F3	fourrage	animal	intra	0	0	416.2368
alimentation	Luzerne F1	fourrage	animal	intra	3539.52	0	0
alimentation	Luzerne F2	fourrage	animal	intra	1056.96	391.68	0
alimentation	Sainfoin F1	fourrage	animal	intra	0	0	0
alimentation	Sainfoin F2	fourrage	animal	intra	0	0	0
alimentation	Sainfoin Gram F1	fourrage	animal	intra	0	0	0
alimentation	Sainfoin Gram F2	fourrage	animal	intra	0	0	0
alimentation	RG F2	fourrage	animal	intra	0	472.32	0
alimentation	avoine cereale immatures	fourrage	animal	intra	0	0	0
alimentation	maïs ensilage	fourrage	animal	intra	0	610.4	0
alimentation	ensilage herbe	fourrage	animal	intra	0	1136.64	0
alimentation	enrubannage herbe	fourrage	animal	intra	0	0	0
alimentation	cereale	grain	animal	intra	841.536	428.544	0
achat	maïs grain	exterieur	animal	entrant	0	0	0
achat	complements	exterieur	animal	entrant	239.04	221.184	1671.84
achat	lait en poudre	exterieur	animal	entrant	0	0	0

Annexe 2

Tableau des flux pour les trois exploitations ROQ2, ROQ3 et CRAU

objet_flux	type_flux	entree_depart	sortie_arrivee	direction	ROQ 3	ROQ 2	CRAU
achat	tourteaux	exterieur	animal	entrant	667.44	1626.48	0
achat	luzopulpe	exterieur	animal	entrant	0	0	0
achat	luzerne deshydratee	exterieur	animal	entrant	132.48	0	0
vente	lait	animal	exterieur	sortant	813.2256	912	0
vente	vente agneau	animal	exterieur	sortant	107.184	97.8208	681.12
vente	vente agnelles	animal	exterieur	sortant	0	0	0
vente	brebis reforme	animal	exterieur	sortant	118.8	92.4	176
vente	vente laine	animal	exterieur	sortant	0	0	0
vente	vente fumier	fumier	exterieur	sortant	0	0	0
perte	brebis mortes	animal	exterieur	sortant	26.4	19.8	66
perte	agnelles mortes	animal	exterieur	sortant	0	0	0
perte	agneaux morts	animal	exterieur	sortant	14.2912	11.3344	100.32
achat	cereale	exterieur	grain	entrant	0	0	0
achat	fourrages	exterieur	fourrage	entrant	0	0	0
achat	paille alimentaire	exterieur	fourrage	entrant	0	0	0
achat	foin avoine	exterieur	fourrage	entrant	0	0	0
sortie	refus pour chevaux	animal	exterieur	sortant	0	0	0

Annexe 3
Détail des formules des indicateurs ENA

Calcul de $\frac{F_i}{n}$ (2) :

F_i : nombre de liens internes (sans compter les entrées, les produits et les pertes) $(Fi)^1$

n : nombre de compartiments $(N)^1$

$$Fi_n = \frac{F_i}{n} \qquad (Fi_n)^1 \tag{3}$$

Calcul de LD (3) :

L : Nombre de liens du système (entrées, produits et pertes compris) $(L)^1$

n : nombre de compartiments $(N)^1$

$$LD = \frac{L}{n} \qquad (LD)^1 \tag{4}$$

Calcul de Org (4) :

AMI : Average Mutual Information

$$AMI = \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=1}^{n+1} \frac{T_{ij}}{T_{..}} log_2 \frac{T_{ij} T_{..}}{T_{i.} T_{.j}} \qquad (AMI)^1 \tag{5}$$

avec $T_{ij} = matrice[i, j]$: flux du compartiment j vers le compartiment i $\quad (matrice[i, j])^1$

$T_{i.} = \sum_{j=1}^{n+1} T_{ij}$ total inflows for compartiment i $\quad (Ti)^1$

(somme des flux entrants dans le compartiment j)

$T_{.j} = \sum_{i=1}^{n+2} T_{ij}$ total outflows for compartiment j $\quad (Tj)^1$

(somme des flux sortant, pertes comprise, du compartiment j)

$T_{..} = \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=1}^{n+1} T_{ij}$ Total System Throughput $\quad (Ttot)^1$

(somme de tous les liens du système, entrées, sorties et pertes comprises)

H_r : Stastical Uncertainty

$$H_r = -\sum_{j=1}^{n+1} \frac{Tij}{T_{..}} \log_2 \frac{T_{ij} T_{..}}{T_{i.} T_{.j}} \qquad (Hr)^1 \tag{6}$$

avec $T_{ij} = matrice[i, j]$: flux du compartiment j vers le compartiment i $\quad (matrice[i, j])$

$T_{i.} = \sum_{j=1}^{n+1} T_{ij}$ total inflows for compartiment i $\quad (Ti)^1$

(somme des flux entrants dans le compartiment j)

$T_{.j} = \sum_{i=1}^{n+2} T_{ij}$ total outflows for compartiment j $\quad (Tj)^1$

(somme des flux sortant, pertes comprise, du compartiment j)

$T_{..} = \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=1}^{n+1} T_{ij}$ Total System Throughput $\quad (Ttot)^1$

(somme de tous les liens du système, entrées, sorties et pertes comprises)

Org : Organisation

$$Org = 1 - \frac{AMI}{H_r} \qquad (Org)^1 \tag{7}$$

Calcul de TT_{ha} (5) :

TT : Total Internal Throughflows (en kg N)

$$TT_{ha} = \frac{TT}{SAU} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=2}^{n+1} T_{ij}}{SAU} \qquad (TT_ha)^1 \tag{8}$$

avec $T_{ij} = matrice[i, j]$: flux du compartiment j vers le compartiment i $\quad (matrice[i, j])^1$

SAU : Surface Agricole Utile de l'exploitation $\quad (sau)^1$

Calcul de TST (6) :

TST : Total System Throughflows (en kg N)

$$TST = \sum_{i=1}^{n} T_i \qquad (TST)^1 \tag{9}$$

avec $T_i = T_{i.} + (\dot{x_i})_-$

et $(\dot{x_i})_-$ negative state derivative for compartiment i

il s'agit des valeurs négatives des $(\dot{x_i}) = T_{i.} - T.j \quad (dxi)^1$

$T_{i.} = \sum_{j=1}^{n+1} T_{ij}$ total inflows for compartiment i $\quad (Ti)^1$

(somme des flux entrants dans le compartiment j)

$T_{.j} = \sum_{i=1}^{n+2} T_{ij}$ total outflows for compartiment j $\quad (Tj)^1$

(somme des flux sortant, pertes comprise, du compartiment j)

Calcul de FCI (7) :

$TSTc$: Total System Cycled Throughflow (en kg N)

$$TSTc = \sum_{i=1}^{n} T_i.RE_i \qquad (TSTc)^1 \tag{10}$$

avec $T_i = T_{i.} + (\dot{x_i})_-$

et $(\dot{x_i})_-$ negative state derivative for compartiment i,

il s'agit des valeurs négatives des $(\dot{x_i}) = T_{i.} - T.j \quad (dxi)^1$

$T_{i.} = \sum_{j=1}^{n+1} T_{ij}$ total inflows for compartiment i $\quad (Ti)^1$

(somme des flux entrants dans le compartiment j)

$T_{.j} = \sum_{i=1}^{n+2} T_{ij}$ total outflows for compartiment j $\quad (Tj)^1$

(somme des flux sortant, pertes comprise, du compartiment j)

$RE_i = \frac{1-X_{ii}}{X_{ii}} \quad (REi)^1$

et X_{ii} : valeurs diagonales de la matrice X

$X = (I - Q)^{-1} \quad (X)^1$

avec I : matrice identité de dimension n (nombre de compartiments)

Q : matrice interne au système (sans les entrées, les sorties et les pertes)

puis $Q[i, j] = \frac{Q[i,j]}{T_{i.}} \quad (Q)^1$

FCI : Finn's cycling Index

$$FCI = \frac{TST_c}{TST} \qquad (FCI)^1 \tag{11}$$

Calcul de la Résilience $\frac{\Phi}{C}$ (9) :

Φ *: Overhead*

$$\Phi = -\sum_{i=1}^{n+2}\sum_{j=1}^{n+1} T_{ij}\log_2\frac{T_{ij}^2}{T_{i.}T_{.j}} \quad (O)^1 \tag{12}$$

avec $T_{ij} = matrice[i, j]$: flux du compartiment j vers le compartiment i $(matrice[i, j])^1$

$T_{i.} = \sum_{j=1}^{n+1} T_{ij}$ total inflows for compartiment i $(Ti)^1$

(somme des flux entrants dans le compartiment j)

$T_{.j} = \sum_{i=1}^{n+2} T_{ij}$ total outflows for compartiment j $(Tj)^1$

(somme des flux sortant, pertes comprise, du compartiment j)

C : Development Capacity

$$C = -\sum_{i=1}^{n+2}\sum_{j=1}^{n+1} T_{ij}\log_2\frac{T_{ij}}{T_{..}} \quad (C)^1 \tag{13}$$

avec $T_{ij} = matrice[i, j]$: flux du compartiment j vers le compartiment i $(matrice[i, j])^1$

$T_{..} = \sum_{i=1}^{n+2}\sum_{j=1}^{n+1} T_{ij}$ Total System Throughput $(Ttot)^1$

(somme de tous les liens du système, entrées, sorties et pertes comprises)

puis $\Phi = C - A$, avec :

A : Ascendancy

$$A = \sum_{i=1}^{n+2}\sum_{j=1}^{n+1} T_{ij}\log_2\frac{T_{ij}T_{..}}{T_{i.}T_{.j}} \quad (A)^1 \tag{14}$$

avec $T_{ij} = matrice[i, j]$: flux du compartiment j vers le compartiment i $(matrice[i, j])$

$T_{i.} = \sum_{j=1}^{n+1} T_{ij}$ total inflows for compartiment i $(Ti)^1$

(somme des flux entrants dans le compartiment j)

$T_{.j} = \sum_{i=1}^{n+2} T_{ij}$ total outflows for compartiment j $(Tj)^1$

(somme des flux sortant, pertes comprise, du compartiment j)

$T_{..} = \sum_{i=1}^{n+2}\sum_{j=1}^{n+1} T_{ij}$ Total System Throughput $(Ttot)^1$

(somme de tous les liens du système, entrées, sorties et pertes comprises)

$\frac{\Phi}{C}$ *: Résilience*

$$O_C = \frac{\Phi}{C} \quad (O_C)^1 \tag{15}$$

Calcul de P (10) :

P : Productivité (en kg N/ha)

$$P = \frac{Y_0}{SAU} \qquad (P)^1 \tag{16}$$

avec $Y_0 = \sum_{j=2}^{n+1} T_{n+1,j}$ somme des produits (sorties sans les pertes, en kg N)

SAU : Surface Agricole Utile de l'exploitation $(sau)^1$

Calcul de SS (11) :

SS : Autosuffisance (en kg N/ha)

$$SS = \frac{Z_0}{SAU} \qquad (SS)^1 \tag{17}$$

avec $Z_0 = \sum_{i=1}^{n} T_{i1}$ somme des entrées (en kg N)

SAU : Surface Agricole Utile de l'exploitation $(sau)^1$

Calcul de Eff (12) :

Eff : Efficience (sans unité)

$$Eff = \frac{Y_0}{Z_0} \qquad (Eff)^1 \tag{18}$$

avec $Y_0 = \sum_{j=2}^{n+1} T_{n+1,j}$ somme des produits (en kg N)

$Z_0 = \sum_{i=1}^{n} T_{i1}$ somme des entrées (en kg N)

Annexe 4
Calcul de ”Org” : détail du code

```
# fonction Ti : Total inflow for compartiment i : à i fixé, colonnes 1 à n+1 : entrées
#               et flux intra
# variable d'entr?e :
# matrice calcul?e dans le programme principal,
# n : nombre de lignes-2 de la matrice ou nombre de colonne-1 de la matrice
#     (tout sauf les entrées, les sorties et les pertes)
# i : le numéro de la ligne sur laquelle est effectuée la somme
# variable de sortie : Ti
# fonctionnement :
# somme des colonnes de la ligne i, entrées comprises

calc_Ti<-function(matrice, n, i){
  Ti=0
  for (j in 1:(n+1)){
    Ti=Ti+matrice[i,j]
  }
  return(Ti)
}


# fonction Tj : Total des sorties pour le compartiment j : à j fixé,
#               lignes 1 à n+2 : sorties, pertes et flux intra
# variable d'entrée :
# matrice calculée dans le programme principal,
# n : nombre de lignes-2 de la matrice ou nombre de colonne-1 de la matrice
#     (tout sauf les entrées, les sorties et les pertes)
# j : le numéro de la colonne surlaquelle est effectuée la somme
# variable de sortie : Tj
# fonctionnement :
# somme des lignes de la colonne j, sorties et pertes comprises

calc_Tj<-function(matrice, n, j){
  Tj=0
  for (i in 1:(n+2)){
    Tj=Tj+matrice[i,j]
  }
  return(Tj)
}


## AMI : Average Mutual Information
# indicateur

```

```
# calcul de la somme interne ? AMI
# variables d'entr?es
# i : indice de ligne
# j : indice de colonne
# matrice calcul?e dans le programme principal,
# n : nombre de lignes-2 de la matrice ou nombre de colonne-1 de la matrice
#     (tout sauf les entrées, les sorties et les pertes)
# Ttot calculé par la fonction calc_Ttot
# Variables intermédiaires
# Tj calculé par la fonction calc_Tj
# Ti calculé par la fonction calc_Ti
# Variable de sortie :
# S : somme interne à AMI, dépendant de Ttot, Ti et Tj
# fonctionnement :
# vérifie que les variables à l'intérieur du log ne soient pas nulles
# (Ti, Tj, matrice[i,j] et Ttot)
# appel des fonctions Ti et Tj (d?pendant de i et de j) pour le calcul de la somme
# interne à la formule numéro (XXX) du calcul de AMI

calc_S<-function(matrice, n, i, j, Ttot){
  S=0
  if (matrice[i,j]!=0){
    Ti=calc_Ti(matrice, n, i)
    if (Ti!=0){
      Tj=calc_Tj(matrice, n, j)
      if (Tj!=0) {
        S=(matrice[i,j]/Ttot)*log2((matrice[i,j]*Ttot)/(Ti*Tj))
      }
    }
  }
  return(S)
}


# calcul de AMI
# Variables d'entrée
# matrice calculée dans le programme principal,
# n : nombre de lignes-2 de la matrice ou nombre de colonne-1 de la matrice
# (tout sauf les entrées, les sorties et les pertes)
# Ttot calculé par la fonction calc_Ttot
# Variable intermédiaire :
# S appelé par la fontion calc_S
# Variable de sortie : AMI
# fonctionnement :
# applcation de la formule numéro (XXXXXXXX)
# appel de la fonction S à chaque passage de la boucle, somme de ces valeurs

calc_AMI<-function(matrice, n, Ttot){
```

```
  AMI=0
  if (Ttot!=0){
    for (i in 1:(n+2)){
      for(j in 1:(n+1)){
        S=calc_S(matrice, n, i, j, Ttot)
        AMI=AMI+S
      }
    }
    return(AMI)
  }
}


# calcul de Hr
# indicateur
# variables d'entrée :
# matrice calculée dans le programme principal,
# n : nombre de lignes-2 de la matrice ou nombre de colonne-1 de la matrice
# (tout sauf les entrées, les sorties et les pertes)
# Ttot calculé par la fonction calc_Ttot
# Variables intermédiaires :
# Tj calculé par la fonction calc_Tj
# Variable de sortie : Hr
# fonctionnement :
# vérifie que Ttot ne soit pas nul (division par 0)
# application de la formule numéro (XXXXX)
# appel de la fonction calc_Tj à chaque passage de la boucle
# (Tj dépand de j dans la formule)

calc_Hr<-function(matrice, n, Ttot){
  res=0
  if (Ttot!=0){
    for (j in 1:(n+1)){
      Tj=calc_Tj(matrice, n, j)
      if (Tj!=0){
        res=res+((Tj/Ttot)*log2(Tj/Ttot))
      }
    }
  }
  res=-res
  return(res)
}


## fonction calcul des indicateurs
# variable d'entrée :
# matrice calcul?e dans le programme principal,
# SAU : tableau des surfaces (SAU uniquement) pour chaque modèle, obtenu à partir
```

```
#       du tableau de données "surfaces"
# nom_colonne : "syst_modele" ou "culture_modele", nom du modèle dans le tableau
#                des résultats
# nom_modele : nom de modèle (donc de l'exploitation)
# variable de sortie :
# resutltats_indic : tableau : une ligne uniquement pour "syst_modele"
#                    ou "culture_modele" avec les résultats de tous les
#                    indicateurs (nom des colonnes)
# variables interm?diaires :
# tous les indicateurs et les variables n?cessaires pour le calcul de chacun
# des indicateurs
# fonctionnement :
# initialisation du tableau de résultats, nom de la ligne : "syst_modele"
# ou "culture_modele"
# appel des fonctions de chaque indicateur et des variables nécessaires au calcul
# de ces indicateurs
# remplissage des une à une des cases du tableau

calc_indic_un_cas <-function(matrice, SAU, nom_colonne, nom_modele){
  resultats_indics <-data.frame(matrix(NA, ncol=28, nrow=1))
  colnames(resultats_indics)=c("sau, n", "Fi", "Fi/n", "L", "LD", "AMI", "Hr", "Org",
  "Ttot", "TT", "TT_ha", "TST", "TSTc", "Finn", "Int", "A", "C", "O", "O_C", "Z0",
  "YO", "L0", "P", "SS", "P_ha", "SS_ha", Eff)
  rownames(resultats_indics)=nom_colonne

  n=ncol(matrice)-1 # en entrée des fonctions de calcul des indicateurs nombre de
                    # lignes-2 de la matrice ou nombre de colonne-1 de la matrice
                    # (tout sauf les entrées, les sorties et les pertes)
  N=calc_N(matrice) # indicateur : nombre de compartiments
  Ttot=calc_Ttot(matrice, n) # variable interm?diaire
  TT=calc_TT(matrice, n) # indicateur
  Y0=calc_Y0(matrice, n) # variable intermédiaire : somme des sorties (pas les pertes)
  Z0=Calc_Z0(matrice, n) # variable intermédiaire : somme des entrées
  L0=calc_L0(matrice, n) # variable intermédiaire : somme des pertes
  TST=calc_TST(matrice, n) # indicateur : TST
  L=calc_L(matrice, n) # indicateur : nombre de liens total du système
  Fi=calc_Fi(matrice, n) # indicateur : nombre de liens internes du système
  Fi_n=Fi/N # indicateur : nombre de lien interne par compartiment
  LD=L/N # indicateur : nombre de lien total par compartiment
  A=calc_A(matrice, n, Ttot) # indicateur A : Ascendancy
  C=calc_C(matrice, n, Ttot) # indicateur C : Development capacity
  O=calc_O(matrice, n) # indicateur Phy : Overhead
  O_C=O/C # indicateur
  P=Y0/TST # indicateur : Productivit? en %
  SS=(TST-Z0)/TST # indicateur : Self-suffuciency en %
  Eff=Y0/Z0 # indicateur : Efficiency en %
  AMI=calc_AMI(matrice, n, Ttot) # indicateur : Average Mutual Information
  Hr=calc_Hr(matrice, n, Ttot) # indicateur :
```

```
  Org=1-(AMI/Hr) # indicateur
  TSTc=calc_TSTc(matrice, n) # variable intermédiaire
  FCI=TSTc/TST # indicateur : index de Finn
  ind<-which(colnames(SAU)==nom_modele) # dans la table "SAU", recherche du numéro
                                        # de la colonne correspondante au nom du modèle
  sau=SAU[1,ind] # extrait la variable sau (SAU du modèle correspondant) du tableau SAU
                 # à partir du numéro de colonne trouvé précedemment
  P_ha=Y0/sau # indicateur : Productivité en kg N/ha
  SS_ha=Z0/sau # indicateur : Self-sufficiency en kg N/ha
  TT_ha=TT/sau # indicateur : Total des flux internes en kg N/ha
  Int=TT_ha*Org

        # remplissage de la table

  resultats_indics[1, 1]=sau
  resultats_indics[1, 2]=N
  resultats_indics[1, 3]=Fi
  resultats_indics[1, 4]=Fi_n
  resultats_indics[1, 5]=L
  resultats_indics[1, 6]=LD
  resultats_indics[1, 7]=AMI
  resultats_indics[1, 8]=Hr
  resultats_indics[1, 9]=Org
  resultats_indics[1, 10]=Ttot
  resultats_indics[1, 11]=TT
  resultats_indics[1, 12]=TT_ha
  resultats_indics[1, 13]=TST
  resultats_indics[1, 14]=TSTc
  resultats_indics[1, 15]=FCI
  resultats_indics[1, 16]=Int
  resultats_indics[1, 17]=A
  resultats_indics[1, 18]=C
  resultats_indics[1, 19]=O
  resultats_indics[1, 20]=O_C
  resultats_indics[1, 21]=Z0
  resultats_indics[1, 22]=Y0
  resultats_indics[1, 23]=L0
  resultats_indics[1, 24]=P
  resultats_indics[1, 25]=SS
  resultats_indics[1, 26]=P_ha
  resultats_indics[1, 27]=SS_ha
  resultats_indics[1, 28]=Eff

  return(resultats_indics)
}
```

Annexe 5

Tableaux des résultats

SYST		**ROQ.3**	**ROQ.2**	**CRAU**	**HMONTPA**	**MARALPIN**	**MEDINOV**
	SAU	396	52	463	75	480	230
	Nombre animaux	340	250	1500	240	400	250
Analyse structurale							
Diversité	**N**	9	8	7	8	7	8
	Fi/n	2.33	2.75	1.57	1.50	1.14	1.25
Organisation	**AMI/Hr**	0.50	0.51	0.30	0.36	0.32	0.32
Analyse fonctionnelle							
intensité	**TT_ha** (kg N/ha)	55.61	353.02	126.12	103.53	15.24	20.98
	TST (kg N/ha)	28915	25546	93838	12479	10897	9044
Index de Finn	**FCI**	0.25	0.20	0.09	0.13	0.10	0.06
Intégration	**Int**	11023	9339	17266	2818	2331	1523
Performances							
Résilience	**O/C**	0.66	0.65	0.49	0.56	0.50	0.53
Productivité	**P_ha** (kg N/ha)	4.37	47.78	50.64	2.19	0.92	3.39
Auto-suffisance	**SS_ha** (kg N/ha)	7.31	87.17	25.11	26.02	5.17	8.44
Efficience	**Eff**	0.60	0.55	2.02	0.08	0.18	0.40

CULTURE							
Analyse structurale							
Diversité	**N**	10	10	7	8	7	8
	Fi/n	2.30	2.20	1.57	1.50	1.14	1.25
Organisation	**AMI/Hr**	0.45	0.47	0.30	0.36	0.32	0.32
Analyse fonctionnelle							
intensité	**TT_ha** (kg N/ha)	55.61	353.02	126.12	103.53	15.24	20.98
	TST (kg N/ha)	29486	26125	93838	12479	10897	9044
Index de Finn	**FCI**	0.21	0.15	0.09	0.13	0.10	0.06
Intégration	**Int**	9986	8649	17266	2818	2331	1523
Performances							
Résilience	**O/C**	0.63	0.62	0.49	0.56	0.50	0.53
Productivité	**P_ha** (kg N/ha)	4.37	47.78	50.64	2.19	0.92	3.39
Auto-suffisance	**SS_ha** (kg N/ha)	7.31	87.17	25.11	26.02	5.17	8.44
Efficience	**Eff**	0.60	0.55	2.02	0.08	0.18	0.40

Annexe 5

Tableaux des résultats

SYST		**MONSPE2**	**MONSPE4**	**MONTSPE1**	**PASTPLAI**	**PASTPREA**	**PREADIV1**
	SAU	52	367	102	192	610	132
	Nombre animaux	450	450	360	800	500	300
Analyse structurale							
Diversité	**N**	10	10	9	8	8	10
	Fi/n	2.30	2.20	1.89	1.50	1.38	1.80
Organisation	**AMI/Hr**	0.44	0.46	0.33	0.36	0.38	0.32
Analyse fonctionnelle							
intensité	**TT_ha** (kg N/ha)	271.82	32.76	134.08	83.62	12.69	80.61
	TST (kg N/ha)	18489	16393	17707	26884	10945	17942
Index de Finn	**FCI**	0.20	0.13	0.29	0.11	0.17	0.07
Intégration	**Int**	6183	5576	4454	5706	2929	3390
Performances							
Résilience	**O/C**	0.61	0.63	0.50	0.61	0.56	0.53
Productivité	**P_ha** (kg N/ha)	6.83	0.57	2.17	6.71	0.34	13.30
Auto-suffisance	**SS_ha** (kg N/ha)	29.36	1.34	11.61	0.33	2.07	17.32
Efficience	**Eff**	0.23	0.43	0.19	20.33	0.16	0.77

CULTURE							
Analyse structurale							
Diversité	**N**	11	12	10	8	8	11
	Fi/n	2.27	2.17	1.80	1.50	1.38	1.73
Organisation	**AMI/Hr**	0.42	0.46	0.32	0.36	0.38	0.31
Analyse fonctionnelle							
intensité	**TT_ha** (kg N/ha)	271.82	32.76	134.08	83.62	12.69	80.61
	TST (kg N/ha)	19375	16781	19139	26884	10945	18642
Index de Finn	**FCI**	0.13	0.09	0.12	0.11	0.17	0.04
Intégration	**Int**	5913	5546	4422	5706	2929	3337
Performances							
Résilience	**O/C**	0.57	0.61	0.49	0.61	0.56	0.51
Productivité	**P_ha** (kg N/ha)	6.83	0.57	2.17	6.71	0.34	13.30
Auto-suffisance	**SS_ha** (kg N/ha)	29.36	1.34	11.61	0.33	2.07	17.32
Efficience	**Eff**	0.23	0.43	0.19	20.33	0.16	0.77

Annexe 5

Tableaux des résultats

SYST		**PREADIV2**	**PREALPSPE1**	**PREALPSPE2**	**SPECAUD**	**SPECAUS**	**SPECEV**
	SAU	40	192	240	59	390	253
	Nombre animaux	300	460	320	300	600	350
Analyse structurale							
Diversité	**N**	11	10	10	9	8	9
	Fi/n	2.00	2.20	2.50	2.22	2.63	1.44
Organisation	**AMI/Hr**	0.38	0.40	0.38	0.40	0.38	0.41
Analyse fonctionnelle							
intensité	**TT_ha** (kg N/ha)	222.25	87.61	45.96	176.01	56.90	31.86
	TST (kg N/ha)	12060	23829	20247	18033	33559	12194
Index de Finn	**FCI**	0.24	0.15	0.03	0.07	0.18	0.16
Intégration	**Int**	3371	6795	4234	4158	8541	3336
Performances							
Résilience	**O/C**	0.55	0.58	0.59	0.62	0.59	0.60
Productivité	**P_ha** (kg N/ha)	4.15	3.15	14.72	8.06	1.63	0.99
Auto-suffisance	**SS_ha** (kg N/ha)	39.13	5.98	4.85	68.65	7.71	6.49
Efficience	**Eff**	0.11	0.53	3.04	0.12	0.21	0.15

CULTURE							
Analyse structurale							
Diversité	**N**	12	12	12	10	7	9
	Fi/n	1.75	2.17	1.75	2.10	2.00	1.44
Organisation	**AMI/Hr**	0.36	0.40	0.36	0.38	0.31	0.41
Analyse fonctionnelle							
intensité	**TT_ha** (kg N/ha)	222.25	87.61	45.96	176.01	56.90	31.86
	TST (kg N/ha)	12981	25103	20448	18033	33691	12194
Index de Finn	**FCI**	0.10	0.06	0.03	0.08	0.19	0.16
Intégration	**Int**	3239	6700	3976	3990	6862	3336
Performances							
Résilience	**O/C**	0.51	0.55	0.56	0.61	0.52	0.60
Productivité	**P_ha** (kg N/ha)	4.15	3.15	14.72	8.06	1.63	0.99
Auto-suffisance	**SS_ha** (kg N/ha)	39.13	5.98	5.47	68.65	7.71	6.49
Efficience	**Eff**	0.11	0.53	2.69	0.12	0.21	0.15

Annexe 5

Tableaux des résultats

SYST		**SIE2**	**CANIGOUPDT**	**CANIGOU**	**CANIGOUVIGNE**	**CHEVRE**	**CEV**
	SAU	438	162	66	43	109	314
	Nombre animaux	370	230	100	150	80	210
Analyse structurale							
Diversité	**N**	10	9	5	9	7	8
	Fi/n	2.10	1.78	1.00	1.44	1.43	1.50
Organisation	**AMI/Hr**	0.42	0.32	0.29	0.30	0.42	0.39
Analyse fonctionnelle							
intensité	**TT_ha** (kg N/ha)	31.01	38.34	33.23	119.68	20.87	23.15
	TST (kg N/ha)	19133	8708	3694	9464	3761	11654
Index de Finn	**FCI**	0.14	0.19	0.10	0.04	0.03	0.05
Intégration	**Int**	5738	2006	639	1544	954	2834
Performances							
Résilience	**O/C**	0.60	0.51	0.53	0.50	0.59	0.57
Productivité	**P_ha** (kg N/ha)	1.05	0.62	2.18	194.87	2.38	3.05
Auto-suffisance	**SS_ha** (kg N/ha)	2.22	7.39	17.23	37.61	3.81	4.28
Efficience	**Eff**	0.47	0.08	0.13	5.18	0.62	0.71

CULTURE							
Analyse structurale							
Diversité	**N**	12	10	5	11	7	8
	Fi/n	2.00	1.60	1.00	1.73	1.43	1.50
Organisation	**AMI/Hr**	0.42	0.32	0.29	0.34	0.42	0.39
Analyse fonctionnelle							
intensité	**TT_ha** (kg N/ha)	31.01	38.34	33.23	119.68	20.87	23.15
	TST (kg N/ha)	19969	8786	3694	9464	3761	11654
Index de Finn	**FCI**	0.08	0.17	0.10	0.03	0.03	0.05
Intégration	**Int**	5654	1988	639	1740	954	2834
Performances							
Résilience	**O/C**	0.57	0.51	0.53	0.52	0.59	0.57
Productivité	**P_ha** (kg N/ha)	1.05	0.62	2.18	194.87	2.38	3.05
Auto-suffisance	**SS_ha** (kg N/ha)	2.22	7.39	17.23	37.61	3.81	4.28
Efficience	**Eff**	0.47	0.08	0.13	5.18	0.62	0.71

Annexe 5

Tableaux des résultats

SYST		**CEVOIGN**	**LEVEZOU**	**ROQLEVEZOU**
	SAU	1309	87	101
	Nombre animaux	380	420	520
Analyse structurale				
Diversité	**N**	8	6	6
	Fi/n	1.75	1.67	1.67
Organisation	**AMI/Hr**	0.41	0.21	0.46
Analyse fonctionnelle				
intensité	**TT_ha** (kg N/ha)	8.82	312.13	329.20
	TST (kg N/ha)	17540	36566	47108
Index de Finn	**FCI**	0.15	0.30	0.27
Intégration	**Int**	4680	5810	15204
Performances				
Résilience	**O/C**	0.59	0.38	0.63
Productivité	**P_ha** (kg N/ha)	0.61	16.40	30.00
Auto-suffisance	**SS_ha** (kg N/ha)	1.45	605.69	136.43
Efficience	**Eff**	0.42	0.03	0.22

CULTURE				
Analyse structurale				
Diversité	**N**	9	9	7
	Fi/n	1.56	1.78	1.71
Organisation	**AMI/Hr**	0.40	0.24	0.45
Analyse fonctionnelle				
intensité	**TT_ha** (kg N/ha)	8.82	312.13	329.20
	TST (kg N/ha)	17540	36918	47108
Index de Finn	**FCI**	0.15	0.25	0.25
Intégration	**Int**	4577	6407	14824
Performances				
Résilience	**O/C**	0.58	0.41	0.62
Productivité	**P_ha** (kg N/ha)	0.61	16.40	30.00
Auto-suffisance	**SS_ha** (kg N/ha)	1.45	605.69	136.43
Efficience	**Eff**	0.42	0.03	0.22