



**HAL**  
open science

# Analyser le fonctionnement et les performances de systèmes de polyculture-élevage diversifié: Application aux systèmes autonomes expérimentés à Mirecourt

Thomas Puech, Fabien Stark

## ► To cite this version:

Thomas Puech, Fabien Stark. Analyser le fonctionnement et les performances de systèmes de polyculture-élevage diversifié: Application aux systèmes autonomes expérimentés à Mirecourt. 2021. hal-03248469

**HAL Id: hal-03248469**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03248469>**

Preprint submitted on 3 Jun 2021

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

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

Analyser le fonctionnement et les performances de systèmes de polyculture-élevage diversifié :

➤ Application aux systèmes autonomes expérimentés à Mirecourt

Thomas PUECH<sup>1</sup>  
Fabien STARK<sup>2</sup>

1. ASTER Mirecourt, INRAE. [thomas.puech@inrae.fr](mailto:thomas.puech@inrae.fr)

2. SELMET, Univ Montpellier, INRAE, CIRAD, Montpellier SupAgro. [fabien.stark@inrae.fr](mailto:fabien.stark@inrae.fr)

## Contexte

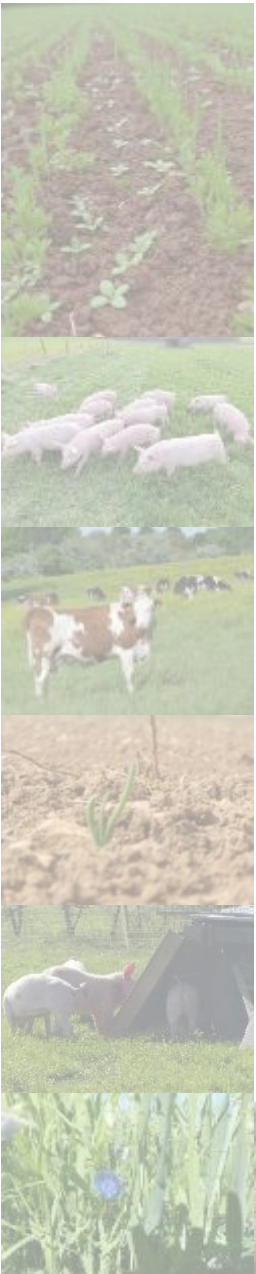
- Spécialisation des exploitations et des territoires agricoles européens (Jepsen et al, 2015; Schott et al, 2018))
- Déconnexion productions végétales / productions animales + systèmes agricoles / systèmes alimentaires (Billen et al, 2014)
- Incertitudes croissantes (contexte économique, climatique, sanitaire) + demande alimentaire croissante

➔ Enjeux de transition des systèmes agricoles vers des formes plus durables et résilientes (Bonaudo et al, 2014; Dumont et al, 2014; Gaudare et al, 2021))

- Capacité d'adaptation des système
- Performances court terme – long terme
- Concurrences feed food

Principes de l'agroécologie = une des pistes à explorer (Gliessman, 2005; Malezieux, 2009; Kremen et al, 2012; Martin et al, 2020)

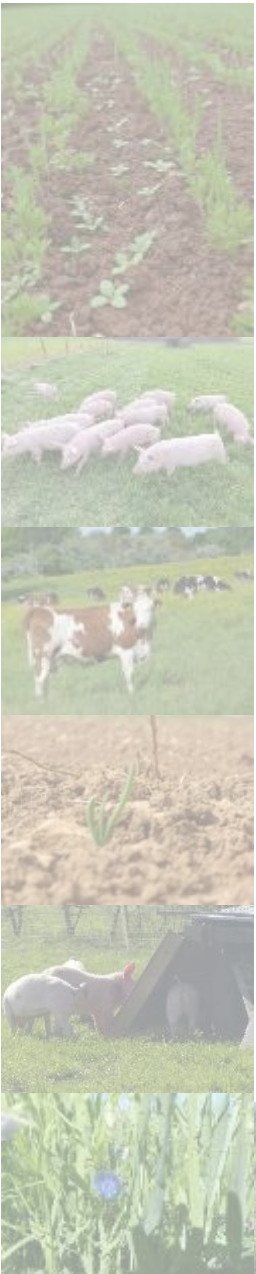
- Favoriser la diversité biologique dans les systèmes agricoles
- Tirer partie des complémentarités entre les composantes biologiques des systèmes agricoles (recyclage des éléments minéraux, régulation des populations)



# Problématique

- Objet d'étude : systèmes agricoles diversifiés
- Comment rendre compte de l'organisation, du fonctionnement et des performances de systèmes agricoles très diversifiés ?
  - Analyse des dynamiques temporelles de l'organisation et des performances des systèmes
  - Capacité des systèmes diversifiés à produire des biens à destination de l'alimentation humaine ?

Cadre de travail → Analyse des Réseaux Ecologiques (Ecological Network Analysis – ENA) (Fath et Patern,; Ulanowicz et al, 2004; 1999; Rufino et al, 2009 ; Latham, 2005; Stark et al, 2016, Stark et al, 2019)





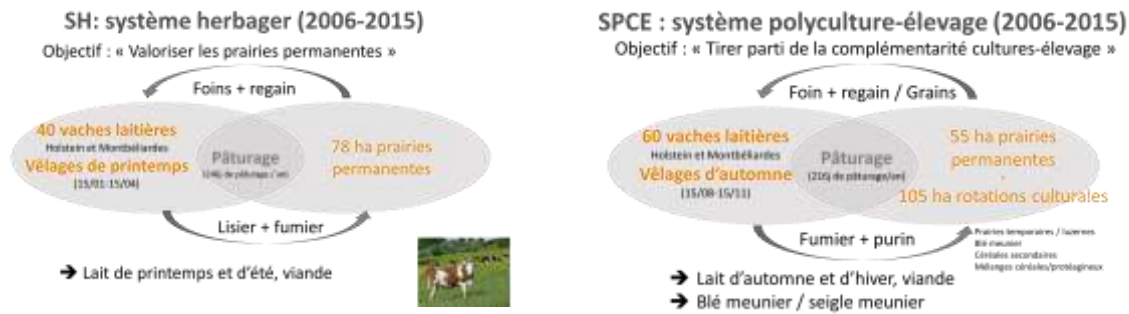
# Matériel et Méthodes : Les expérimentations systèmes sur le dispositif expérimental INRAE de Mirecourt

## 2004-2015 : Deux systèmes autonomes et économes

Expérimentation système « ferme entière », conception « pas à pas »

Objectif = « valoriser au mieux les ressources du milieu »

➔ Logique très forte d'autonomie et économies; 2 systèmes expérimentés



## 2016 ... Un système diversifié à visée alimentation humaine

Expérimentation système « ferme entière », conception « pas à pas »

Objectifs =

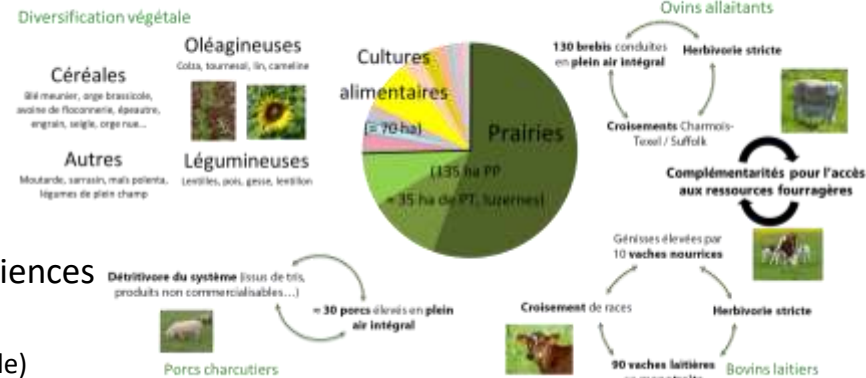
- Favoriser un usage direct des terres à destination de l'alimentation humaine et contribuer à une alimentation locale
- Lever les difficultés vécues sur les systèmes autonomes SH et SPCE
- Proposer des formes d'agriculture résilientes et créatrices d'emplois agricoles
- Proposer des situations décalées et interpellantes pour favoriser le partage d'expériences

➔ Diversification des productions animales et végétales (bovins – ovins – porcs, diversification végétale)

➔ Logique d'autonomie et d'économies de gamme

➔ Adaptation aux aléas

Objectif : « Favoriser un usage direct des terres à destination de l'alimentation humaine »



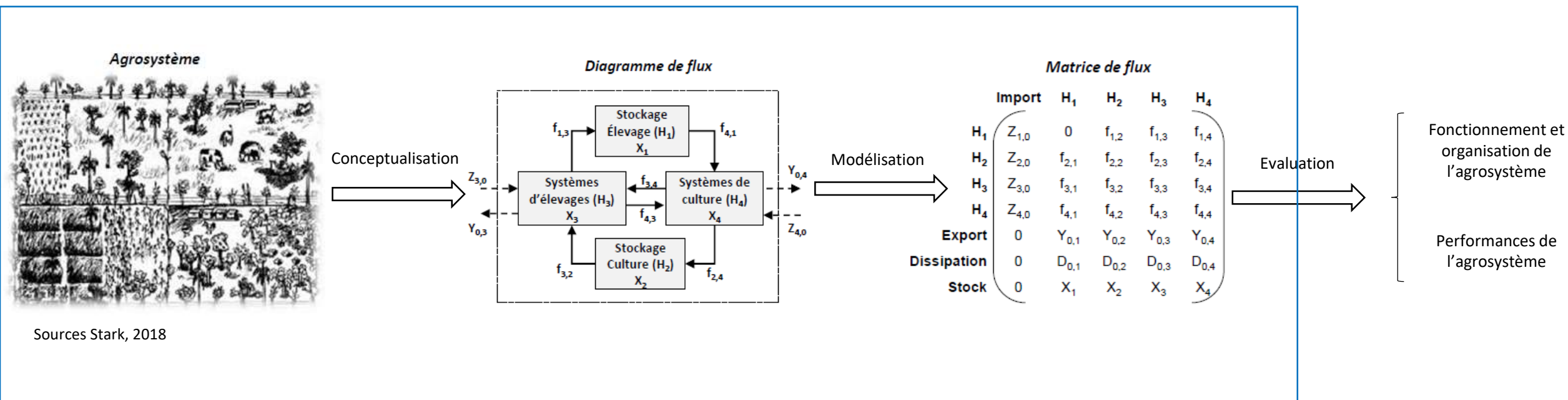
➔ TEMPO



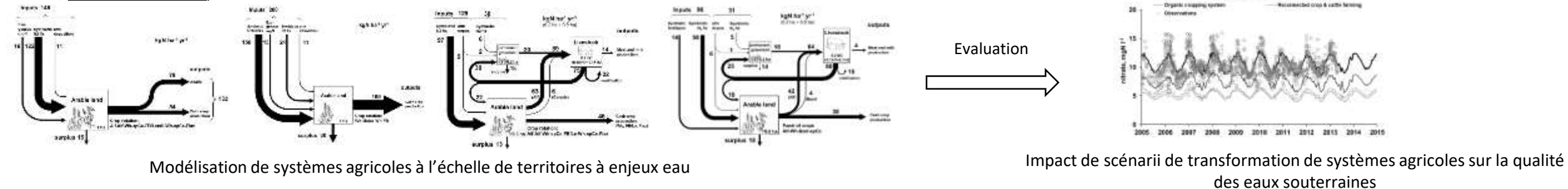


# Matériel et Méthodes : Les principes de l'analyse de réseaux écologiques (ENA)

- Modélisation de l'organisation des systèmes et des flux au sein du système et avec son environnement

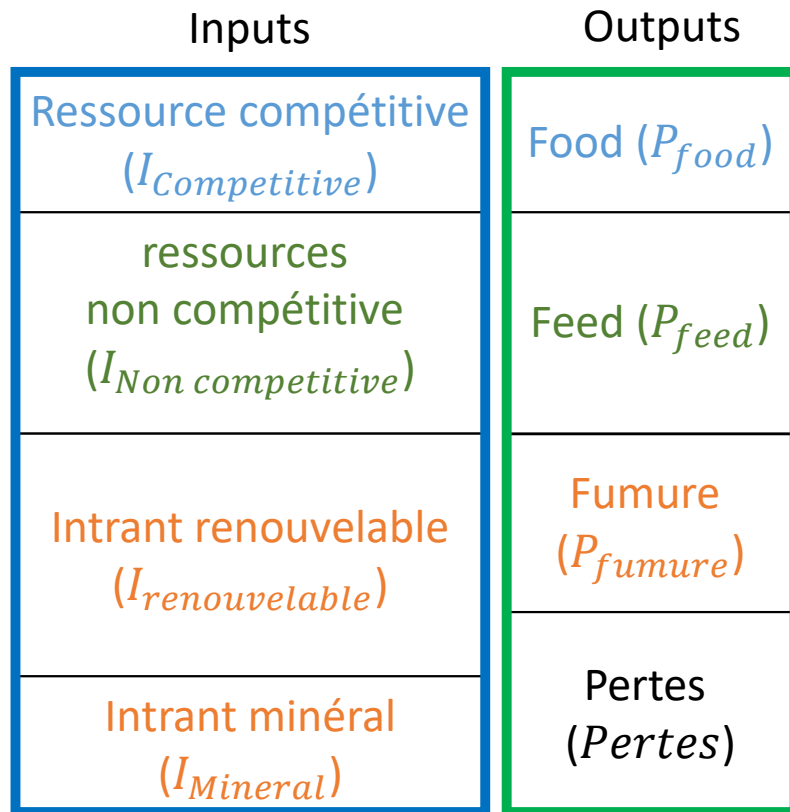


Formalisations communes avec des approches de type métabolisme territorial; avec des applications en agriculture dont l'objectif est d'évaluer des systèmes notamment du point de vue de leurs performances environnementales (Billen et al, 2014; Billen et al, 2018; Garnier et al, 2016)

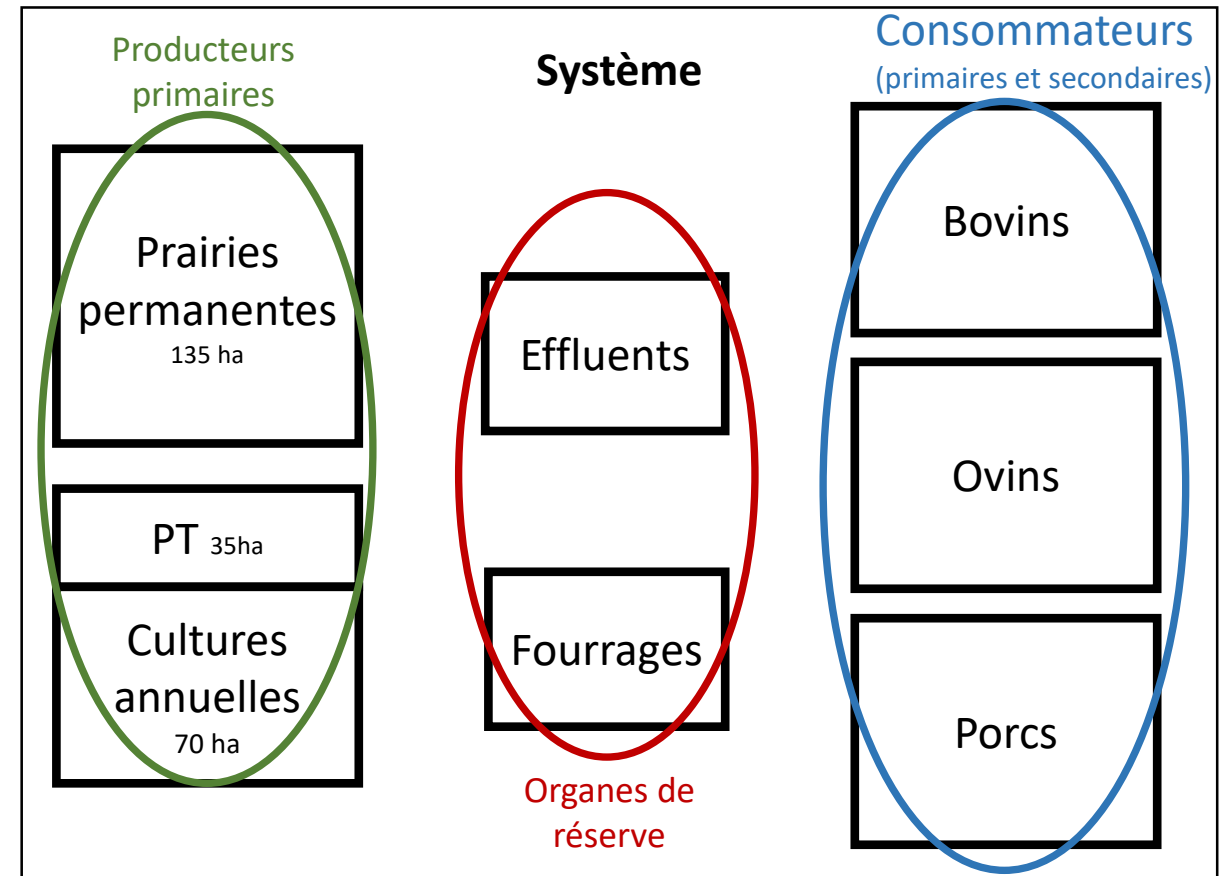


## Matériel et Méthodes : conceptualisation du système et modélisation des flux

- Choix méthodologiques et conceptualisation du système



→ Distinction des flux selon leur fonction

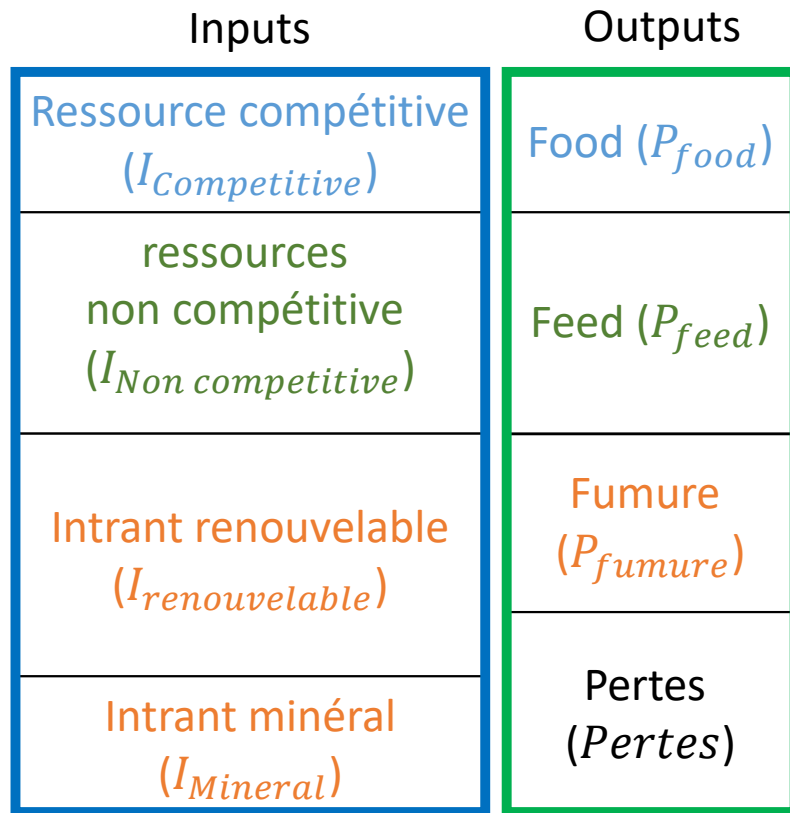


→ Distinction des composantes selon leur rôle dans le système

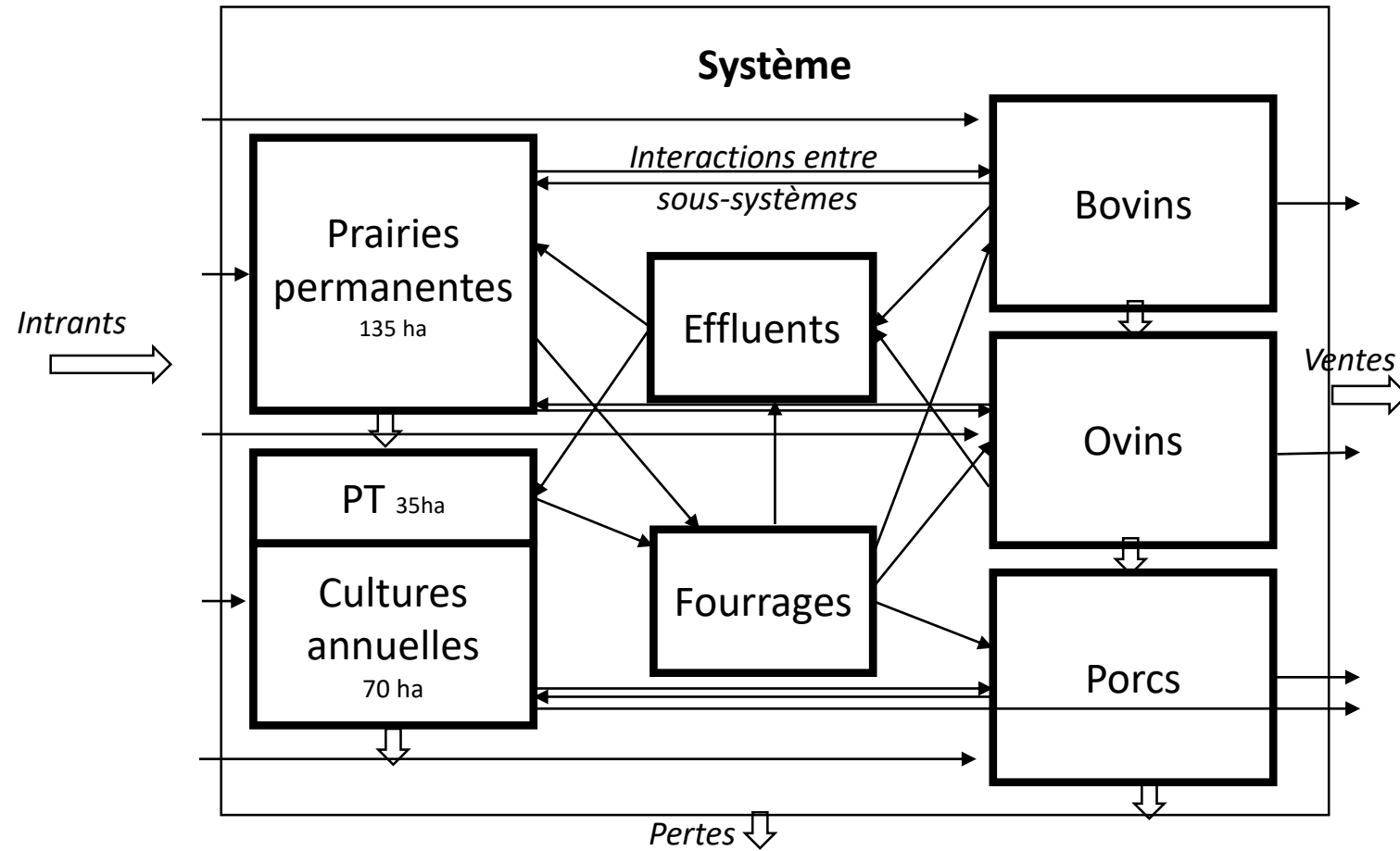


## Matériel et Méthodes : conceptualisation du système et modélisation des flux

- Choix méthodologiques et conceptualisation du système



→ Distinction des flux selon leur fonction



→ Distinction des composantes selon leur rôle dans le système

→ Caractérisation des flux entre les composantes du système

## Matériel et Méthodes : conceptualisation du système et modélisation des flux

- Choix méthodologiques et conceptualisation du système
  - Frontière du système : le système expérimenté (productions végétales, productions animales). Les filières (approvisionnement, commercialisation), l'environnement biotique (faune sauvage) et abiotique (atmosphère, aquifères) ne font pas partie du système. En revanche, le sol fait partie du système.
  - Compartimentation : approche systémique s'appuyant sur le système le plus diversifié (TEMPO / porcs & ovins)
  - Choix méthodologiques :
    - Ensemble cohérent des terres labourables (ne pas distinguer prairies temporaires et cultures annuelles)
    - Les sous-systèmes producteurs incluent le sol.
    - Échelle ferme entière (regroupement du SH et du SPCE)
    - Années d'étude :
      - SH-SPCE : 2011 – 2012 – 2013 – 2014 – 2015
      - TEMPO : 2018 – 2019 – 2020

# Matériel et Méthodes : conceptualisation du système et modélisation des flux

- Modélisation du système

- Analyse des flux de N (Stark et al, 2016; Stark et al, 2019; Rufino et al, 2009; Steinmetz et al, 2021; Base de données Animal feed resources information system)

- Bases de données ASTER-ix (Trommenchlager et al, 2010, Trommenchlager et gaujour, 2010) et ALADIN

- Localisation et composition des lots d'animaux
- Alimentation des animaux (type de fourrage, origine, destination, composition)
- Ventes (nature, poids, composition)
- Épandages de matières organiques (nature, quantité, origine, destination, composition)
- Très peu d'achats (animaux, semence)

}] Systèmes d'information IE ASTER  
➔ Connaissance fine de l'organisation et du  
Fonctionnement des systèmes expérimentés

- Dépôts atmosphériques (station météo ASTER)

- Fixation symbiotique par les légumineuses (Anglade et al, 2015)

- Pertes par lixiviation (Anglade, 2015) et volatilisation (Peyraud, J.L, Cellier, P. et al. 2012)

}] Méthodes et outils issus de l'analyse des performances  
environnementales des systèmes agricoles

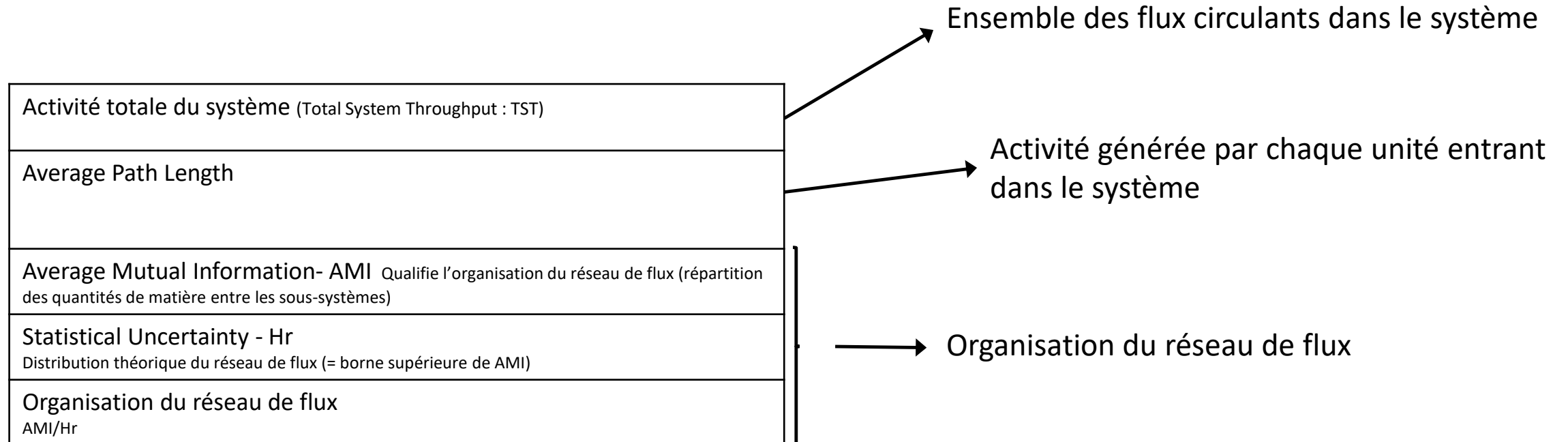
- Distinction des flux « alimentation humaine » / « alimentation animale »

}] Singularité de l'approche proposée

## Matériel et Méthodes : Les indicateurs pour analyser les systèmes diversifiés

- Fonctionnement et organisation des systèmes

➔ Les indicateurs de l'analyse de réseaux écologiques (Rutledge et al, 1976; Finn et al, 1976; Rufino et al, 2009; Ulanowicz et al, 2009, Stark et al, 2016, 2018; Fath et al, 2019; Steinmetz et al, 2021)

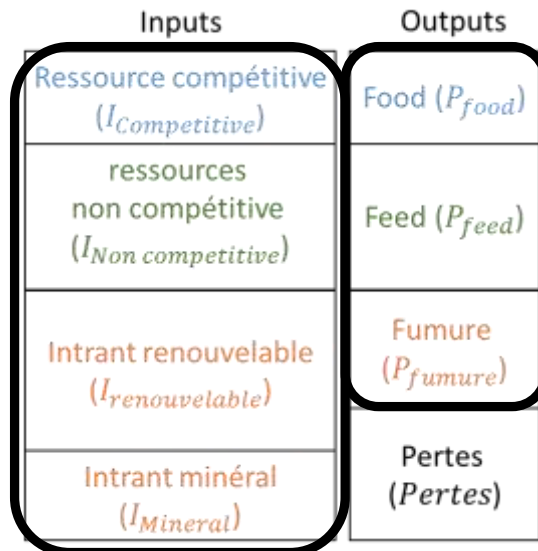




# Matériel et Méthodes : Les indicateurs pour analyser les systèmes diversifiés

- Performances des systèmes : efficacité

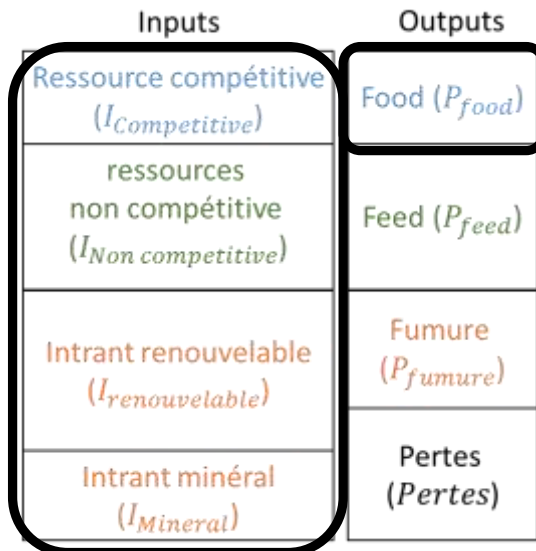
Efficience		
<p><b>Nitrogen Use Efficiency NUE</b>                      Efficience de valorisation des ressources (en ressources alimentaires ou non alimentaires)                      = 1 – pertes / inputs</p>	$NUE = \frac{Sum(Output\ valorisables)}{Sum(Input)}$	Sous-systèmes productifs (producteurs primaires + consommateurs) Système
	Godinot et al, 2014	



## Matériel et Méthodes : Les indicateurs pour analyser les systèmes diversifiés

- Performances des systèmes : efficacité

Efficience		
<p><b>Efficience de conversion alimentaire (ECA)</b>            Caractérise l'efficacité de chaque composante à convertir des ressources en ressources alimentaires</p>	$ECA = \frac{P_{food}}{sum(inputs)}$	Sous-systèmes productifs (producteurs primaires + consommateurs) Système



→ Part alimentaire de la « Nitrogen Use Efficiency »

## Matériel et Méthodes : Les indicateurs pour analyser les systèmes diversifiés

- Performances des systèmes : efficacité relative aux conditions de milieu

Hypothèses :

- Potentialité du milieu dynamique et dépendante des conditions climatiques.
- Dans un contexte de changements climatiques, l'eau est un facteur déterminant du fonctionnement des agrosystèmes

Proxy de la potentialité du milieu = production primaire à la base du réseau trophique du système

Efficience		
Production primaire Base du réseau trophique	$\sum_{i=1:n \text{ producteurs primaires}} \text{Production (feed + food) + intrants (feed + food)}$	Système

Inputs	Outputs
Ressource compétitive ( $I_{Competitive}$ )	Food ( $P_{food}$ )
ressources non compétitive ( $I_{Non competitive}$ )	Feed ( $P_{feed}$ )
Intrant renouvelable ( $I_{renouvelable}$ )	Fumure ( $P_{fumure}$ )
Intrant minéral ( $I_{Mineral}$ )	Pertes ( $Pertes$ )

➔ Uniquement pour les productions végétales (consommées dans le système ou exportées)

En système autonome : inputs (production végétale) = 0

➔ Ressources à la base du réseau trophique (= issus de la photosynthèse)

## Matériel et Méthodes : Les indicateurs pour analyser les systèmes diversifiés

- Performances des systèmes : efficacité relative aux conditions de milieu

Efficience		
<b>Production primaire nette</b> Caractérise le potentiel du système à produire la ressource de base du réseau trophique	$\sum_{i=1:n \text{ producteurs primaires}} \text{Production (feed + food) + intrants (feed + food)}$	Système
<b>Efficience de production alimentaire (EPA)</b> Traduit la capacité du système à produire des ressources alimentaires à partir de son milieu.	$EPA = \frac{\sum_i \text{production alimentaire (food)}}{\sum_{i=1:n \text{ producteurs primaires}} \text{Production (feed + food) + intrants (feed + food)}}$	

Inputs	Outputs
Ressource compétitive ( $I_{Competitive}$ )	<b>Food (<math>P_{food}</math>)</b>
ressources non compétitive ( $I_{Non\ competitive}$ )	Feed ( $P_{feed}$ )
Intrant renouvelable ( $I_{renouvelable}$ )	Fumure ( $P_{fumure}$ )
Intrant minéral ( $I_{Mineral}$ )	Pertes ( $Pertes$ )

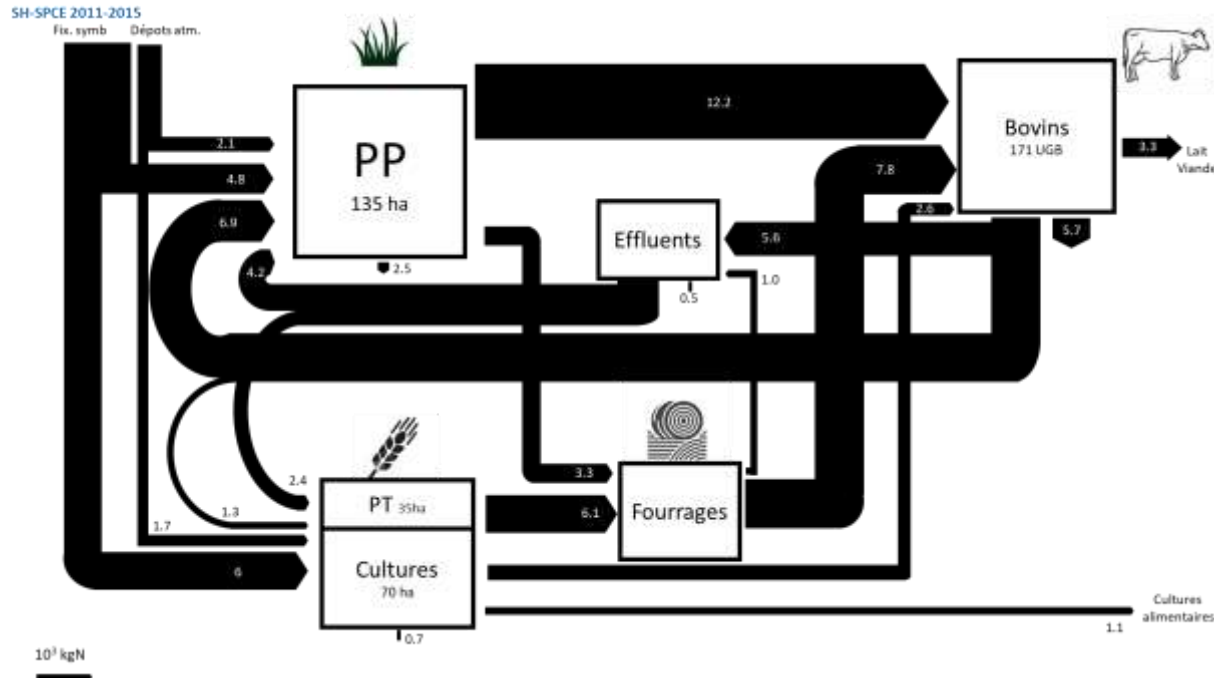
- Uniquement la capacité du système à produire des biens alimentaires (d'origine végétale ou animale) à partir de photosynthèse
- Apprécier les dynamiques temporelles des performances des agrosystèmes soumis à des aléas



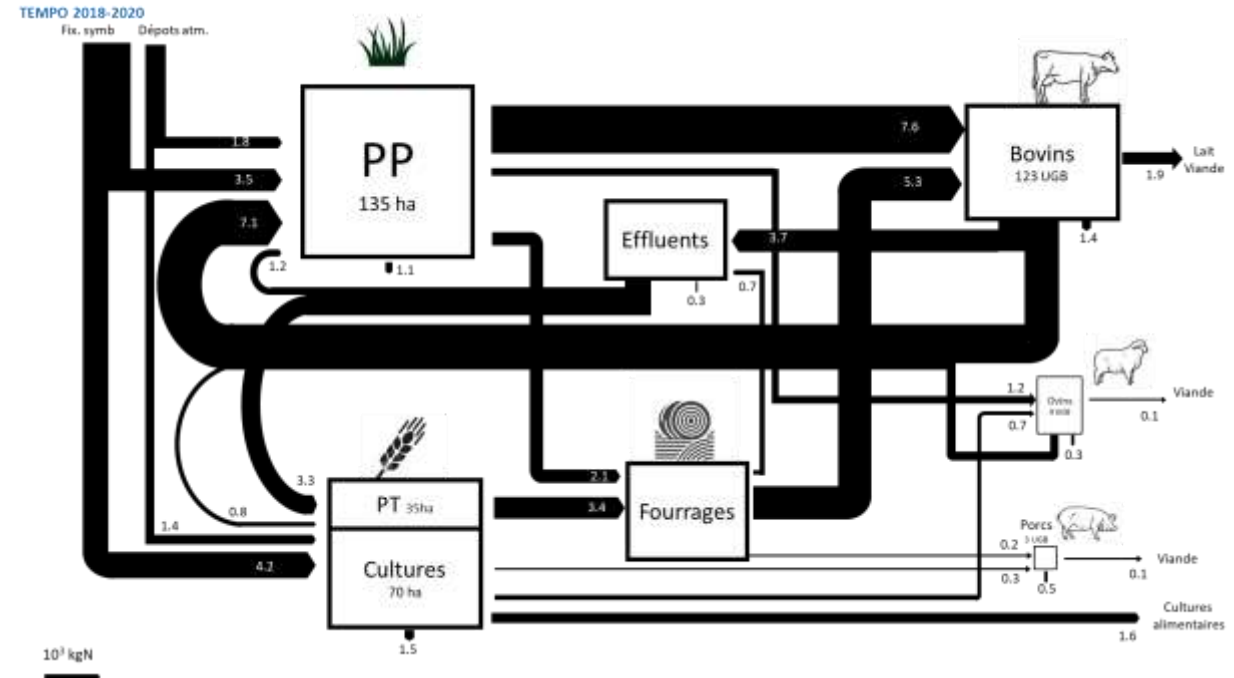
# Résultats : conceptualisation du système et modélisation des flux

- Modélisation du système

SH-SPCE (2011 – 2015)

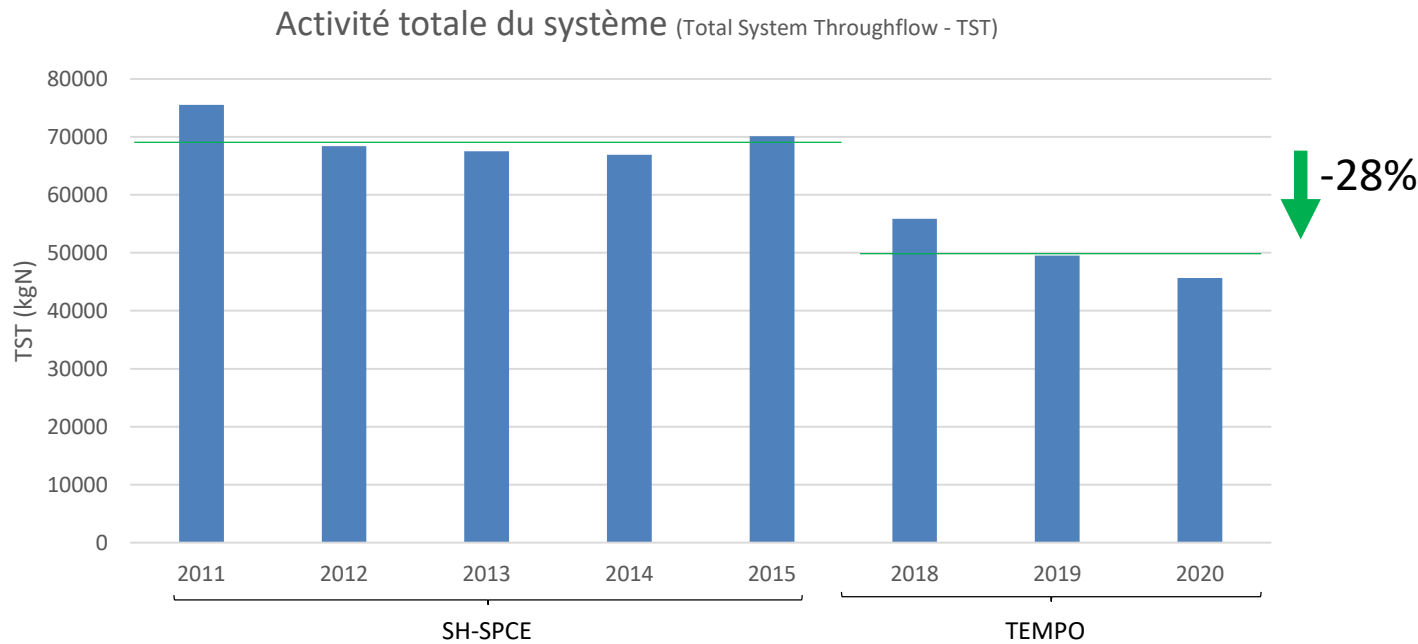


TEMPO (2018 – 2020)

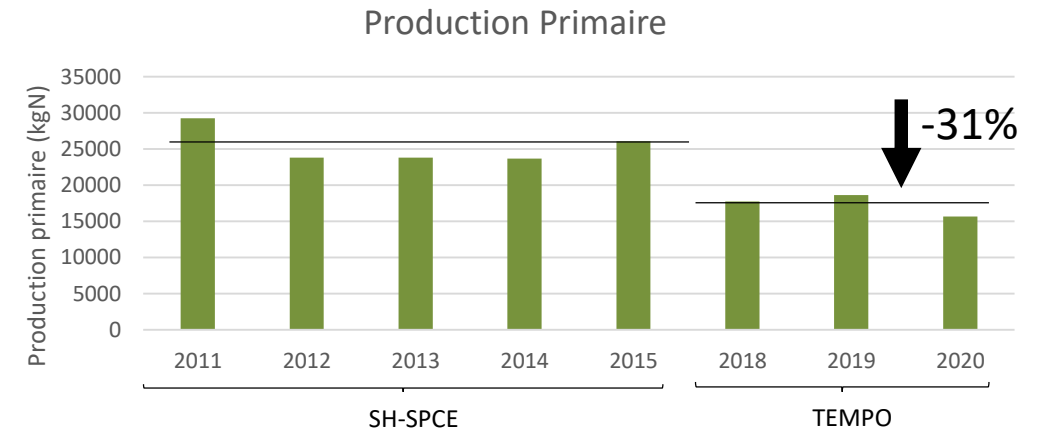
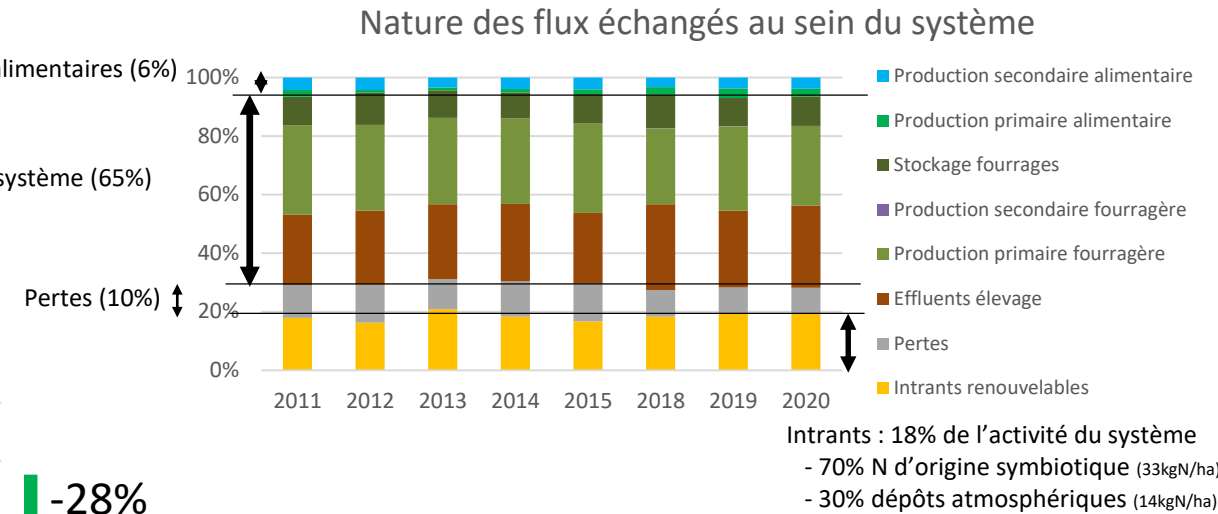


# Résultats : Dynamique de fonctionnement des systèmes

## 1. Des systèmes très autonomes



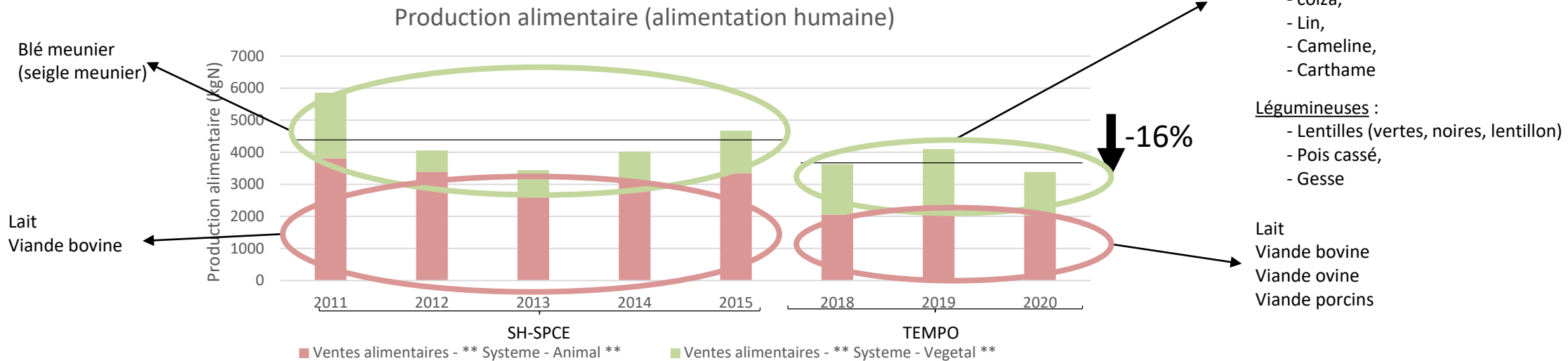
Ventes alimentaires (6%)  
Bouclage des cycles à l'échelle du système (65%)  
Pertes (10%)



- Une baisse non négligeable de l'activité du système TEMPO (-28% 2018-2020 / 2011-2015).
- Des systèmes très autonomes : pas d'achat de fertilisants (minéraux / organiques) ni de fourrages (paille, foin). Fertilité du système assurée par le bouclage des cycles (complémentarités cultures-élevages) et des intrants renouvelables : processus biologiques (fixation symbiotique) & dépôts atmosphériques
- Systèmes autonomes très dépendants des conditions de milieu (déficit hydrique estival marqué entre 2018 et 2020)

# Résultats : Dynamique de fonctionnement des systèmes

## 1. Une réorganisation des productions alimentaires

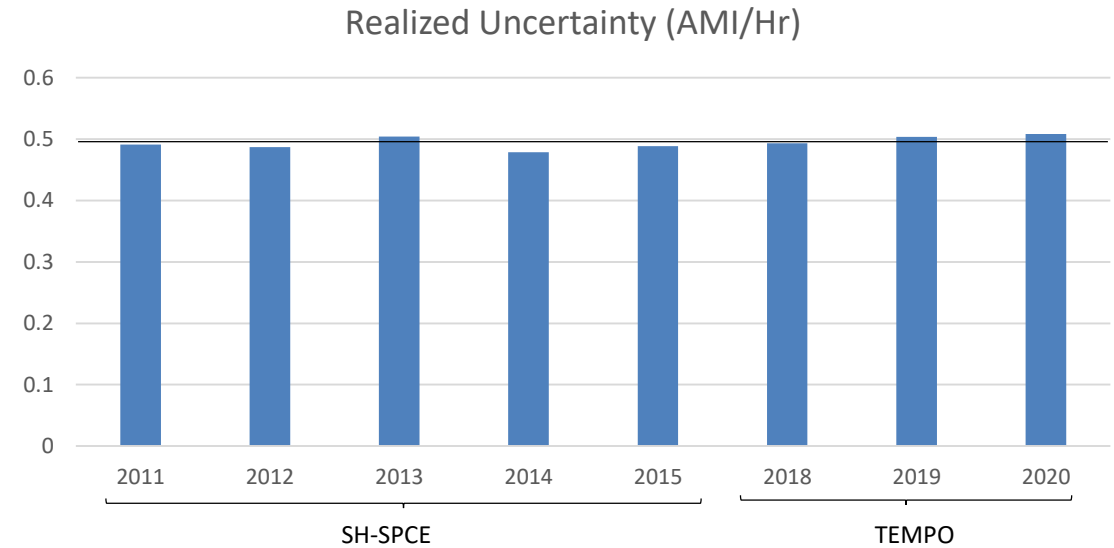
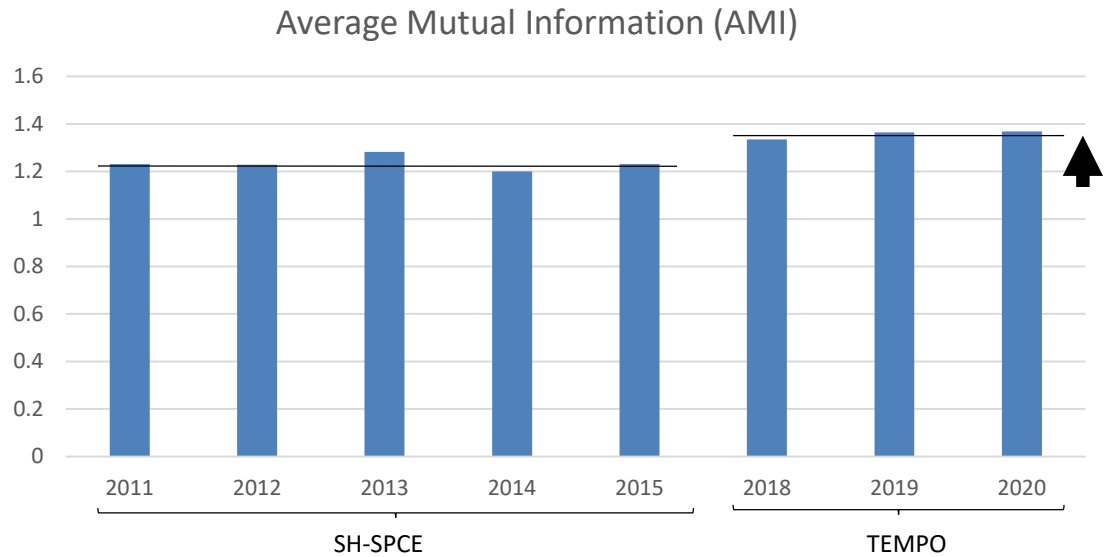


- SH-SPCE : ventes alimentaires essentiellement basées sur des produits animaux (74%)
  - TEMPO : Ventes alimentaires : 56% d'origine animale + 46% d'origine végétale
- ➔ Objectif = usage des sols à destination directe de l'alimentation humaine (diversification végétale)

- ➔ Diminution de la production alimentaire totale (-16% TEMPO / SH-SPCE)
- ➔ Diminution des productions animales (- 36 % : monotraite, nb UGB) compensée en partie par les productions végétales orientées alimentation humaine (+ 40 %).

## Résultats : Dynamique de fonctionnement des systèmes

### 1. Organisation du système et distribution du réseau de flux



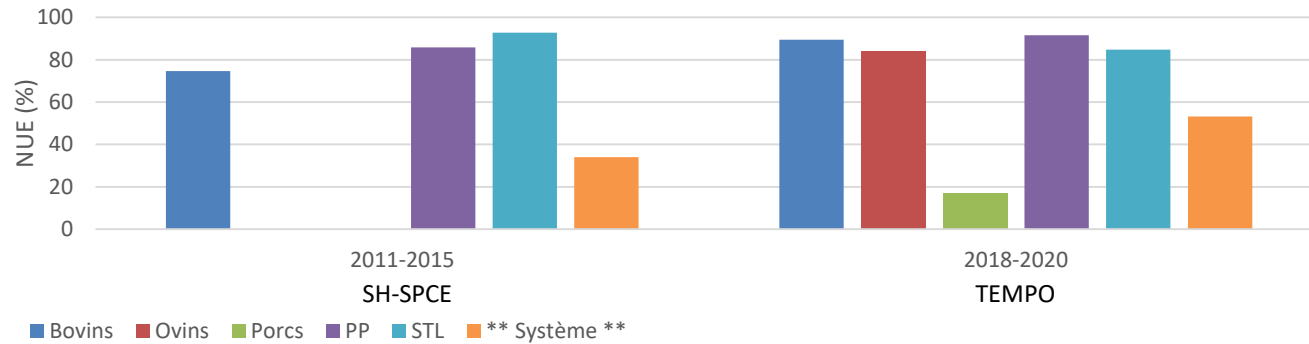
- Distribution plus hétérogène du réseau de flux (AMI)
- Stabilité de l'organisation du système
  - ➔ Flux dispersés selon un niveau élevé de chaînes trophiques
  - ➔ Réseau trophique diversifié (AMI/Hr  $\approx$  0.5)



# Résultats : Dynamique de fonctionnement des systèmes

## 2. Efficacité de valorisation des ressources des systèmes autonomes

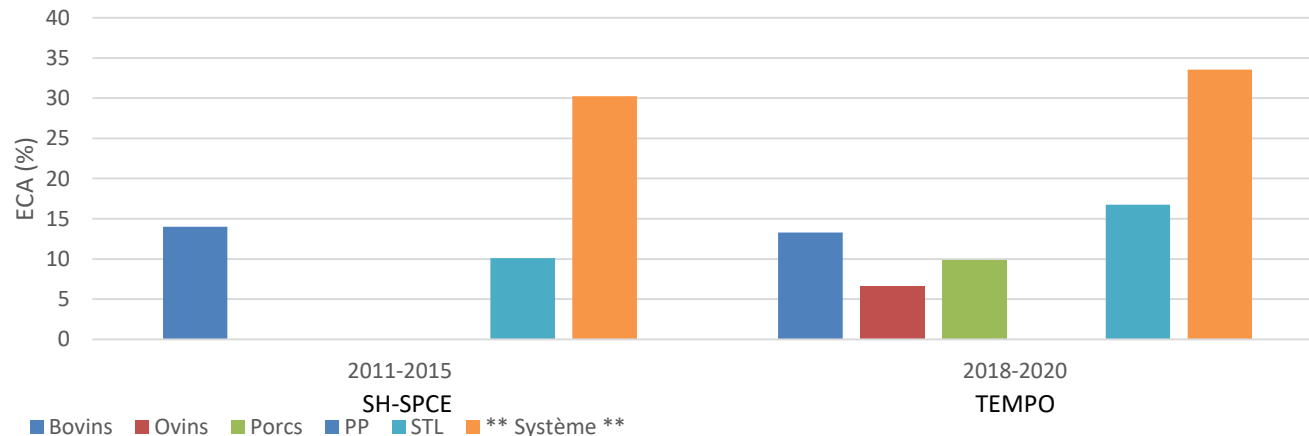
Nitrogen Use Efficiency



- ➔ Peu d'évolution de l'efficacité des productions végétales
- ➔ Amélioration de l'efficacité du troupeau bovin
- ➔ TEMPO plus efficace que SH-SPCE (moins de pertes).

### Focus part alimentaire de l'efficacité de valorisation des ressources

Efficacité de conversion alimentaire



- ➔ Stabilité de l'efficacité de conversion alimentaire du troupeau bovin  
(baisse de production des VL / monotraite compensée par des taux de matière utile + élevés, modification du régime alimentaire, diminution des effectifs improductifs)

- ➔ Terres labourables plus efficaces (diversification alimentation humaine)

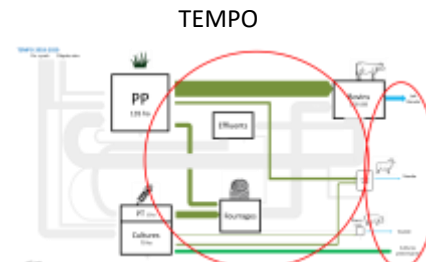
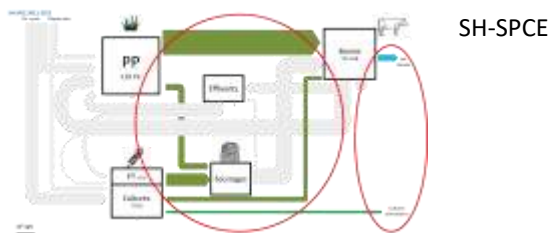
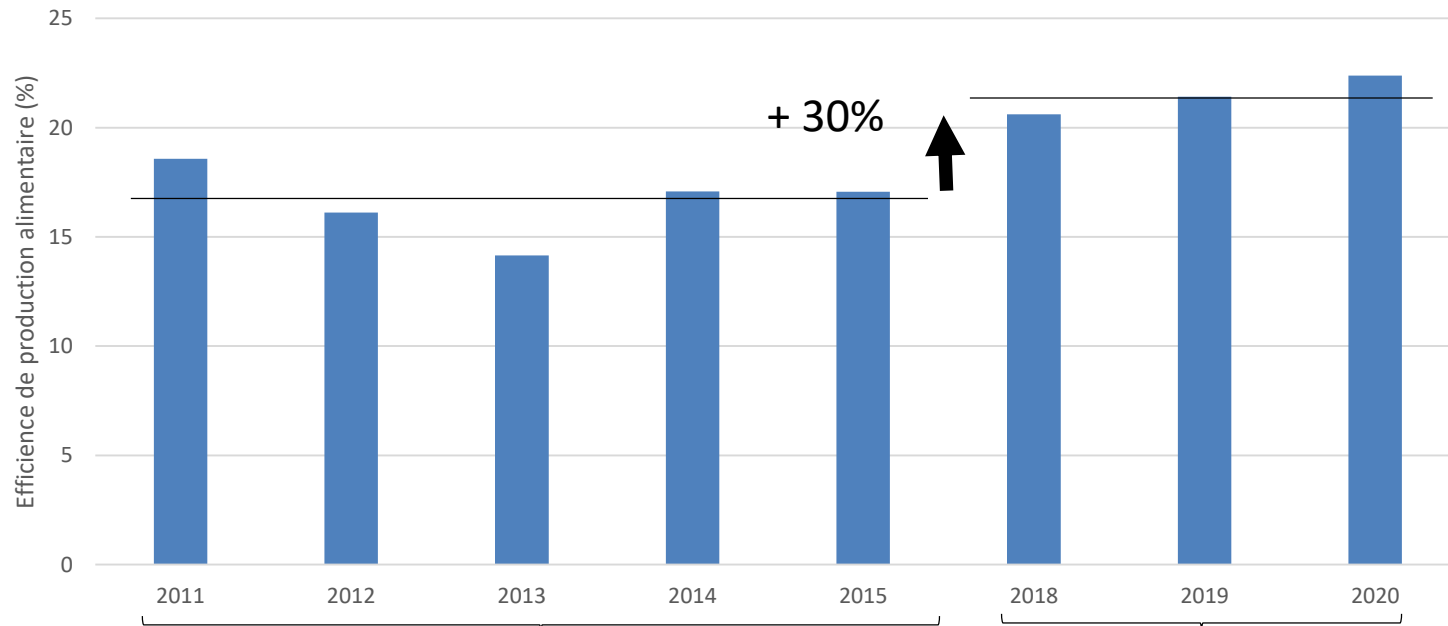
- ➔ TEMPO plus efficace pour produire des denrées alimentaires

# Résultats : Dynamique de fonctionnement des systèmes

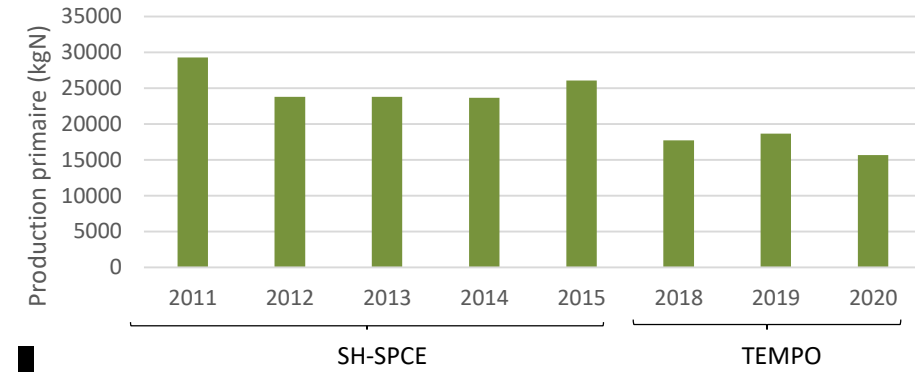
## 2. Efficience de valorisation des ressources des systèmes autonomes

Systèmes autonomes : « valoriser au mieux les ressources du milieu ».

Efficience de production alimentaire EPA (%)



Production Primaire Brute



Production primaire = proxy des conditions de milieu

→ TEMPO : efficient pour valoriser le milieu en conditions climatiques difficiles

## Discussion - Conclusion

ENA → apports méthodologiques à l'étude des systèmes agricoles, et en particulier les systèmes complexes (Stark 2016-2019, Rufino 2009; Steinmetz et al, 2021).

### Enjeu méthodologique multiples :

- Rendre compte du fonctionnement et des performances d'un système diversifié
- Prendre en charge les dynamiques temporelles
- Instruire la place des productions alimentaires dans l'analyse de systèmes diversifiés

### Hypothèses et résultats présentés aujourd'hui

- Dynamiques de fertilité des sols dans les systèmes autonomes (stockage de matière organique dans les sols)
- Conclusions partielles : TEMPO plus efficient que SH-SPCE dans l'usage des ressources (3 années semblables 2018-2020).



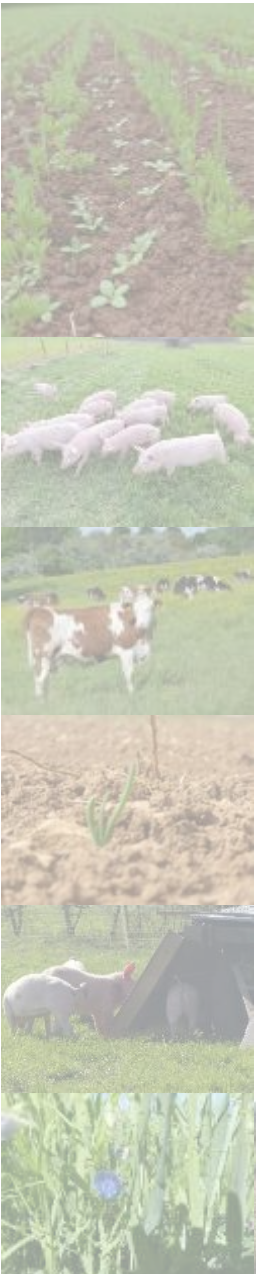
## Discussion - Conclusion

### Pistes de travail à explorer :

- Explorer les indicateurs de l'Analyse de Réseaux Ecologiques, en particulier l'Ascendancy Suite (Ulanowicz et al, 2009)

- Explorer d'autres manières de décrire le système, en particulier via l'analyse des flux de carbone (Ulanowicz et al, 2009, Fath et al, 2019)

- Modéliser l'introduction de formations arborées en tant que « composante » du système diversifié





A vos questions ...



# Bibliographie

- Anglade J, Billen G, Garnier J (2015) Relationships for estimating N<sub>2</sub> fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere* 6:art37. <https://doi.org/10.1890/ES14-00353.1>
- Anglade J (2015) Agriculture biologique et qualité des ressources en eau dans le bassin de la Seine: caractérisation des pratiques et applications territorialisées. Thèse de l'université Pierre et Marie Curie. Paris.
- Billen G, Lassaletta L, Garnier J (2014) A biogeochemical view of the global agro-food system: Nitrogen flows associated with protein production, consumption and trade. *Global Food Security* 3:209–219. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.08.003>
- Billen G, Le Noë J, Garnier J (2018) Two contrasted future scenarios for the French agro-food system. *Science of The Total Environment* 637–638:695–705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.043>
- Bonaudo T., Bendahan A.B., Sabatier R., Ryschawy J., Bellon S., Leger F., Magda D., Tichit M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *Eur J Agron* 57, 43-51.
- Dumont, B., González-García, E., Thomas, M., Fortun-Lamothe, L., Ducrot, C., Dourmad, J.Y., Tichit, M., 2014. Forty research issues for the redesign of animal production systems in the 21st century. *Animal* 8, 1382–1393. <https://doi.org/10.1017/S1751731114001281>.
- Fath B, Pattern B (1999) Review of the Foundations of Network Environ Analysis. *Ecosystems* 2: 167–179
- Fath, B., Asmus, H., Asmus, R., Baird, D., Borret, S., De Jonge, V., Ludovisi, A., Niquil, N., Sharler, U.? Scückel, U., Wolff, M. (2019). Ecological network analysis metrics: The need for an entire ecosystem approach in management and policy. *Ocean and Coastal Management* 174 (2019) 1–14
- Gaudare, U., Pellerin, S., Benoit, M., Durand, G., Dumont; B., Berbieri, P., Nesme, T. (2021). Comparing productivity and feed-use efficiency between organic and conventional livestock animals. *Environ. Res. Lett.* 16 (2021) 024012
- Garnier J, Anglade J, Benoit M, et al (2016) Reconnecting crop and cattle farming to reduce nitrogen losses to river water of an intensive agricultural catchment (Seine basin, France): past, present and future. *Environmental Science & Policy* 63:76–90. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.04.019>
- Gliessman S.R., 2005. Agroecology and agroecosystems. In: Pretty J. (Ed.), *The earth-scan reader in sustainable agriculture*. Earthscan, London, UK
- Godinot, O., Carof, M., Vertès, F., Leterne, P. (2014). SyNE: An improved indicator to assess nitrogen efficiency of farming systems. *Agricultural Systems* 127 (2014) 41–52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2014.01.003>
- Jepsen, M. R., Kuemmerle, T., Müller, D., Erb, K., Verburg, P. H., Haberl, H., Vesterager, J. P., Andrič, M., Antrop, M., Austrheim, G., Björn, I., Bondeau, A., Bürgi, M., Bryson, J., Caspar, G., Cassar, L. F., Conrad, E., Chromý, P., Daugirdas, V., ... Reenberg, A. (2015). Transitions in European land-management regimes between 1800 and 2010. *Land Use Policy*, 49, 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.07.003>
- Kremen, C., Iles, A., Bacon, C., 2012. Diversified farming systems: an agroecological, systems-based alternative to modern industrial agriculture. *Ecol. Soc.* 17. <https://doi.org/10.5751/ES-05103-170444>.
- Latham LG (2006) Network flow analysis algorithms. *Ecological Modelling* 192:586–600. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.029>
- MacArthur, R., 1955. Fluctuations of animal populations, and a measure of community stability. *Ecology* 36, 533–536.
- Malézieux E., 2012. Designing cropping systems from nature. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 15–29.
- Martin, G., Barth, K., Benoit, M., Brock, C., Destruel, M., Dumont; B., Grillot, M., Hübner, S., Magne, M.-A., Moerman, M., Mosnier, C., Parsons, D., Ronchi, B., Schanz, L., Steinmetz, L., Werne, S., Winkler, C., Primi, R. (2020). Potential of multi-species livestock farming to improve the sustainability of livestock farms: A review. *Agricultural Systems* 181 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102821>
- Perraud, J.L., Cellier, P. (coord) (2012). Les flux d'azote liés aux élevages. Réduire les pertes, rétablir les équilibres. Synthèse de l'expertise scientifique collective réalisée par l'INRA à la demande des ministères en charge de l'Agriculture et de l'Écologie. Paris.
- Rufino, M.C., Hengsdijk, H., Verhagen, A. (2009). Analysing integration and diversity in agro-ecosystems by using indicators of network analysis. *Nutr Cycl Agroecosyst* (2009) 84:229-247. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9239-2>
- Rutledge, R.W., Basorre, B.L., Mulholland, R.J., 1976. Ecological stability: an information theory viewpoint. *J. theor. Biol.* 57, 355–371.
- Schott C, Puech T, Mignolet C (2018) Dynamiques passées des systèmes agricoles en France : une spécialisation des exploitations et des territoires depuis les années 1970. *Fourrages* 235:153–161
- Shannon, C. E. (1948) A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27, 379–423 and 623–656.
- Stark F, Fanchone A, Semjen I, et al (2016) Crop-livestock integration, from single practice to global functioning in the tropics: Case studies in Guadeloupe. *European Journal of Agronomy* 80:9–20. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.004>
- Stark F, Archimède H, Gonzalez-Garcia E, et al (2019) Evaluation des performances agroécologiques des systèmes de polyculture élevage en milieu tropical humide : application de l'analyse de réseaux écologiques. *Innovations Agronomiques* 72:1–14
- Steinmetz, L., Veysset, P., Benoit, M., Dumont, B. (2021). Ecological network analysis to link interactions between system components and performances in multispecies livestock farms. *Agronomy for Sustainable Development* (2021) 41:42. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00696-x>
- Trommenschlager, J.M., Gaujour, E., Fontana, E., Harmand, M., Foissy, D. et al.. Gérer et organiser les données agricoles et de recherche d'un site expérimental. *Cahier des Techniques de l'INRA, INRA*, 2010, pp.5-27.
- Trommenschlager, J.-M., Gaujour, E. (2010). ASTER-ix : Application pour la Saisie et le Traitement des Évènements Recensés sur l'Installation eXpérimentale [Base de données].
- Ulanowicz RE, Goerner SJ, Lietaer B, Gomez R (2009) Quantifying sustainability: Resilience, efficiency and the return of information theory. *Ecological Complexity* 6:27–36. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2008.10.005>
- Wezel A., Bellon S., Dore T., Francis C., Vallod D., David C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(4), 503-515