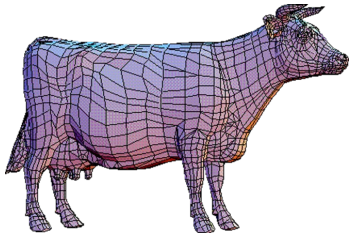
Habilitation
à Diriger des Recherches



Modélisation intégrée et pluri-niveaux des stock-flux de matière et d'énergie dans les systèmes agricoles

pour l'évaluation multicritère et l'accompagnement de transitions en élevage

Jonathan Vayssières
UMR Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux (SELMET)

Montpellier, 15 décembre 2021

Plan de l'exposé

1- Contexte

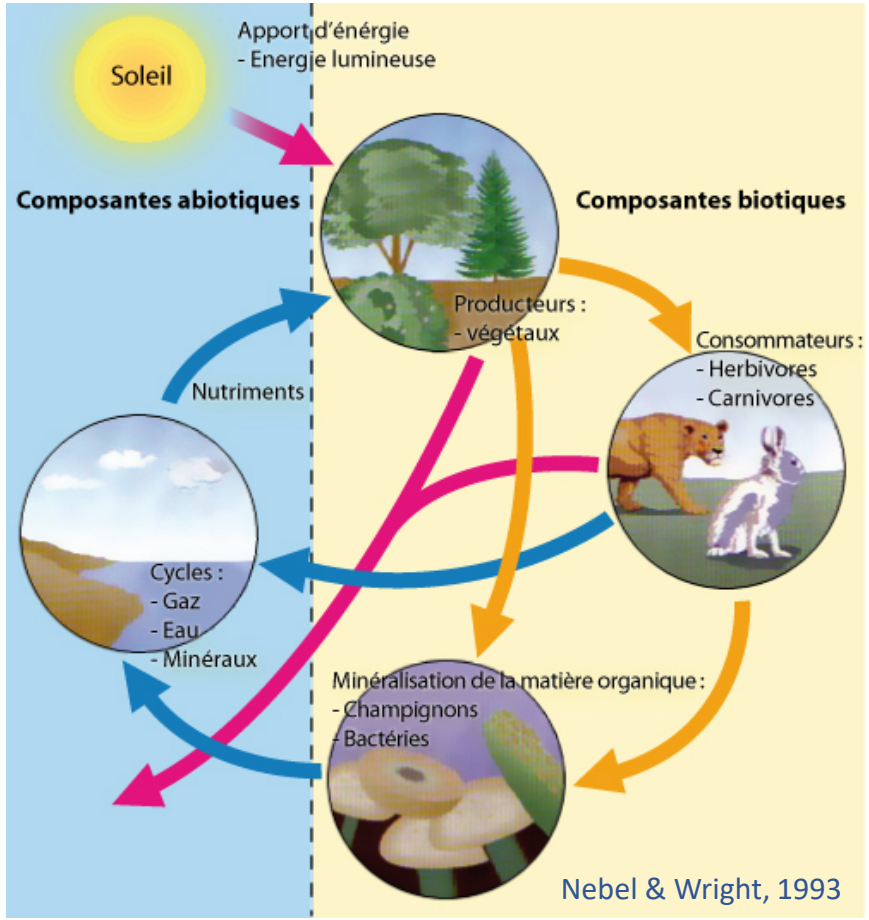
2- Positionnement scientifique

3- Travaux réalisés

4- Mon projet de recherche

Cycles biogéochimiques, circulation de l'énergie et services écosystémiques

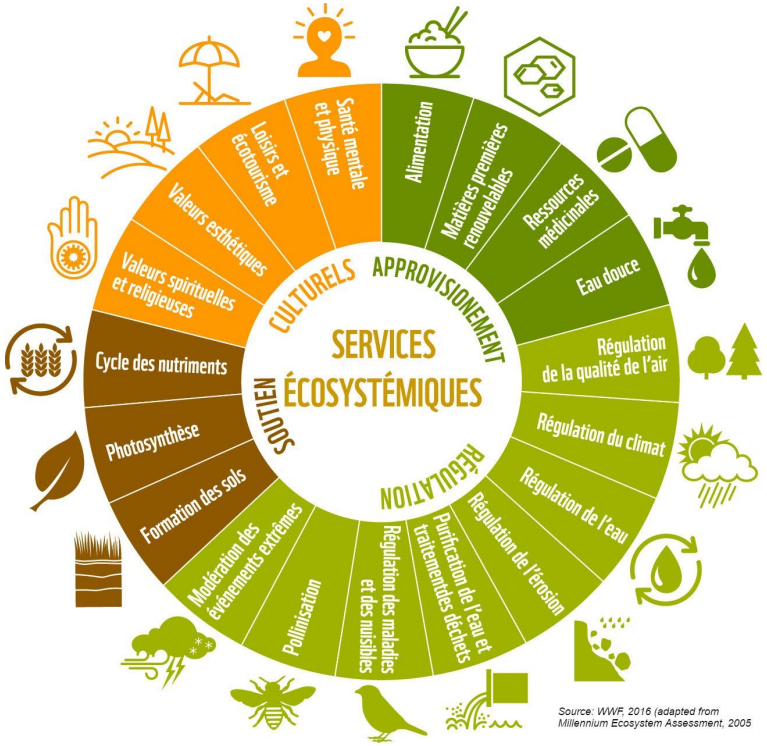
Fonctionnement des écosystèmes naturels et anthropisés



Nebel & Wright, 1993

Services écosystémiques

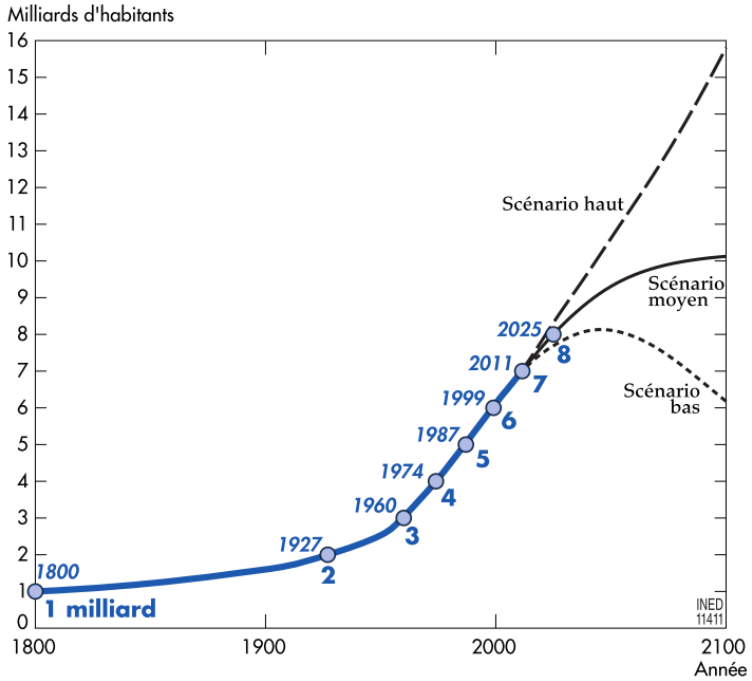
Costanza et al., 1997



WWF, 2016

Anthropocène, agriculture et réorganisation des cycles

Population mondiale (1800-2100)



Nations Unies, 2011

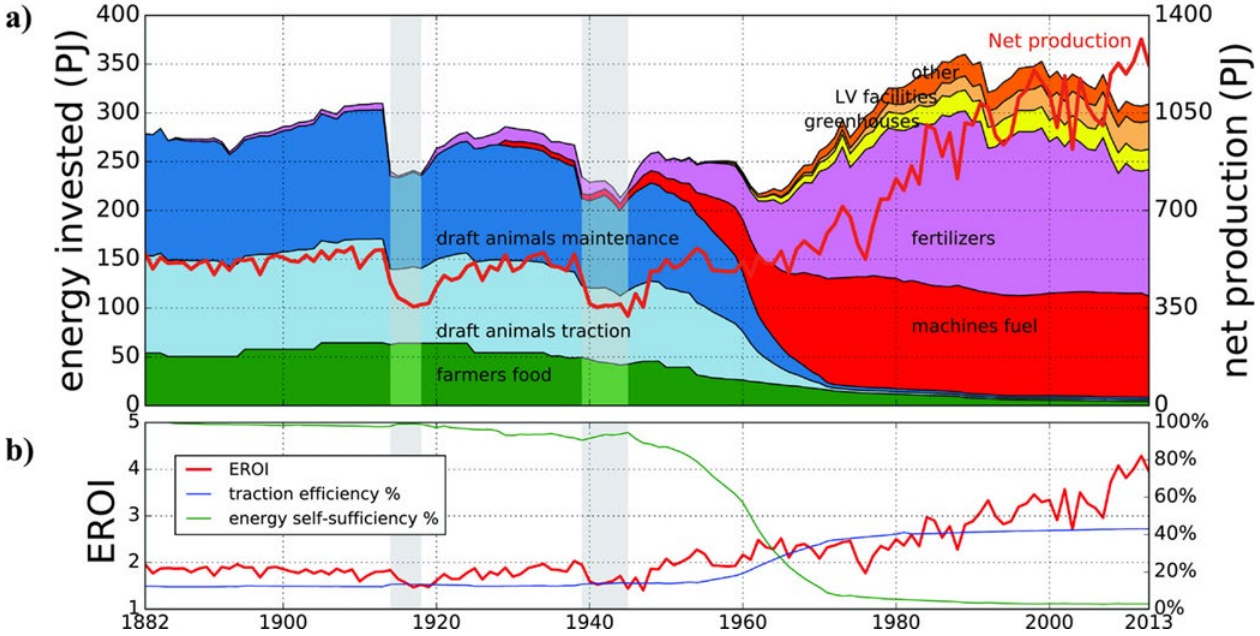
7 milliards d'humains dans le monde en 2010 !

1,5 milliard de bovins dans le monde en 2010 !

24 milliards de poulets dans le monde en 2010 !

Gilbert et al., 2018 (FAO)

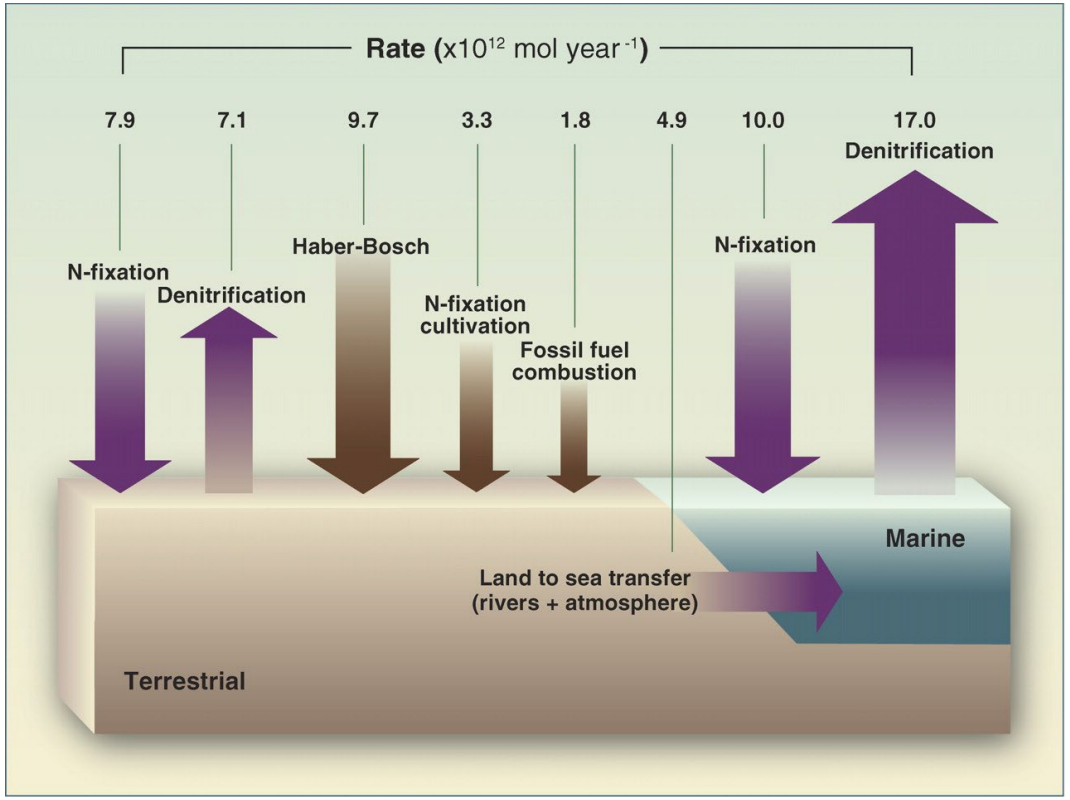
Système énergétique du secteur agricole français (1882-2013)



Harchaoui & Chatzimpiros, 2018

Agriculture et réorganisation des grands cycles

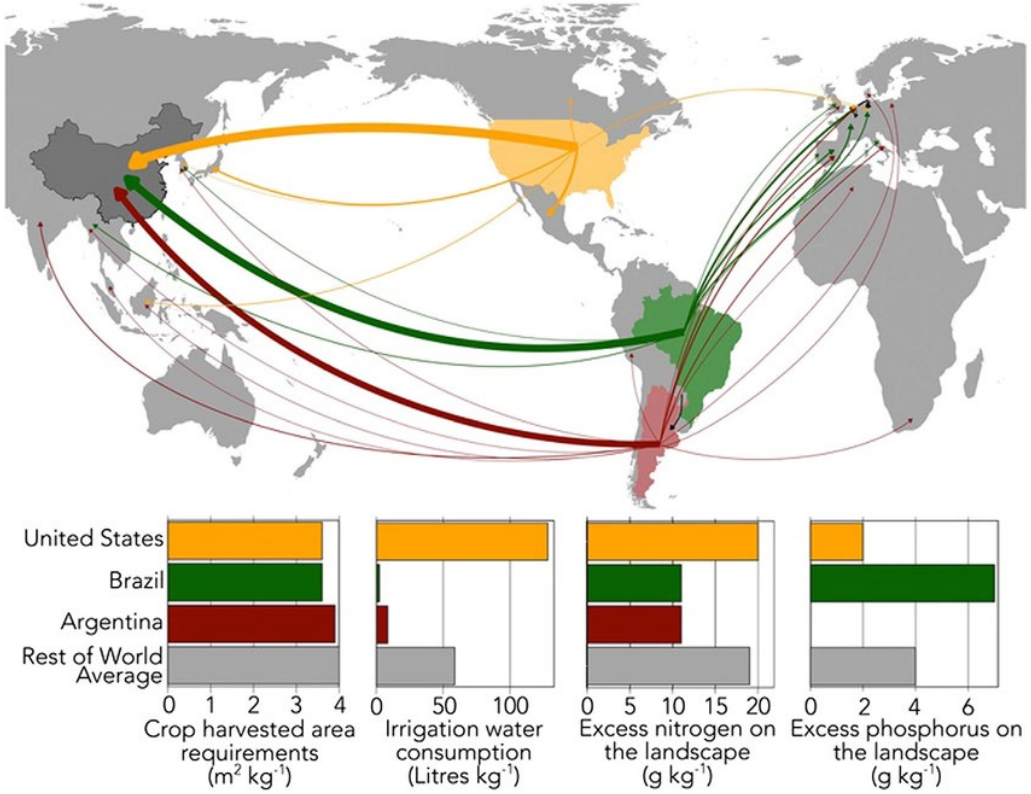
Perturbation du cycle global de l'N (2008)



Sources anthropiques: ont doublé l'apport d'N terrestre !

Canfield et al., 2010

Commerce international du soja (2008)



Fry et al., 2016

Impacts de l'élevage sur la biosphère

- Gain de productivité des agro-écosystèmes
  - Productivité végétale — Cassman et al., 2002
- Usage des terres
  - Déforestation — Cederberg et al., 2011
- Mobilisation importante de ressources (N, P, ENR)
  - Appauvrissement des ressources — Cordell et al., 2009
- Fuite et accumulation dans l'environnement (N, P):
  - Cascade azotée --> eutrophisation, acidification — Galloway et al., 2003
- Ouverture des cycles (N, C)
  - Émissions de GES --> changement climatique — Gerber et al., 2013

Grande diversité de systèmes d'élevage et d'impacts !

des systèmes feed-lot aux USA aux systèmes pastoraux en Afrique sub-saharienne

Californie

Nouvelle-Zélande

Sénégal

Basset-Mens et al., 2009

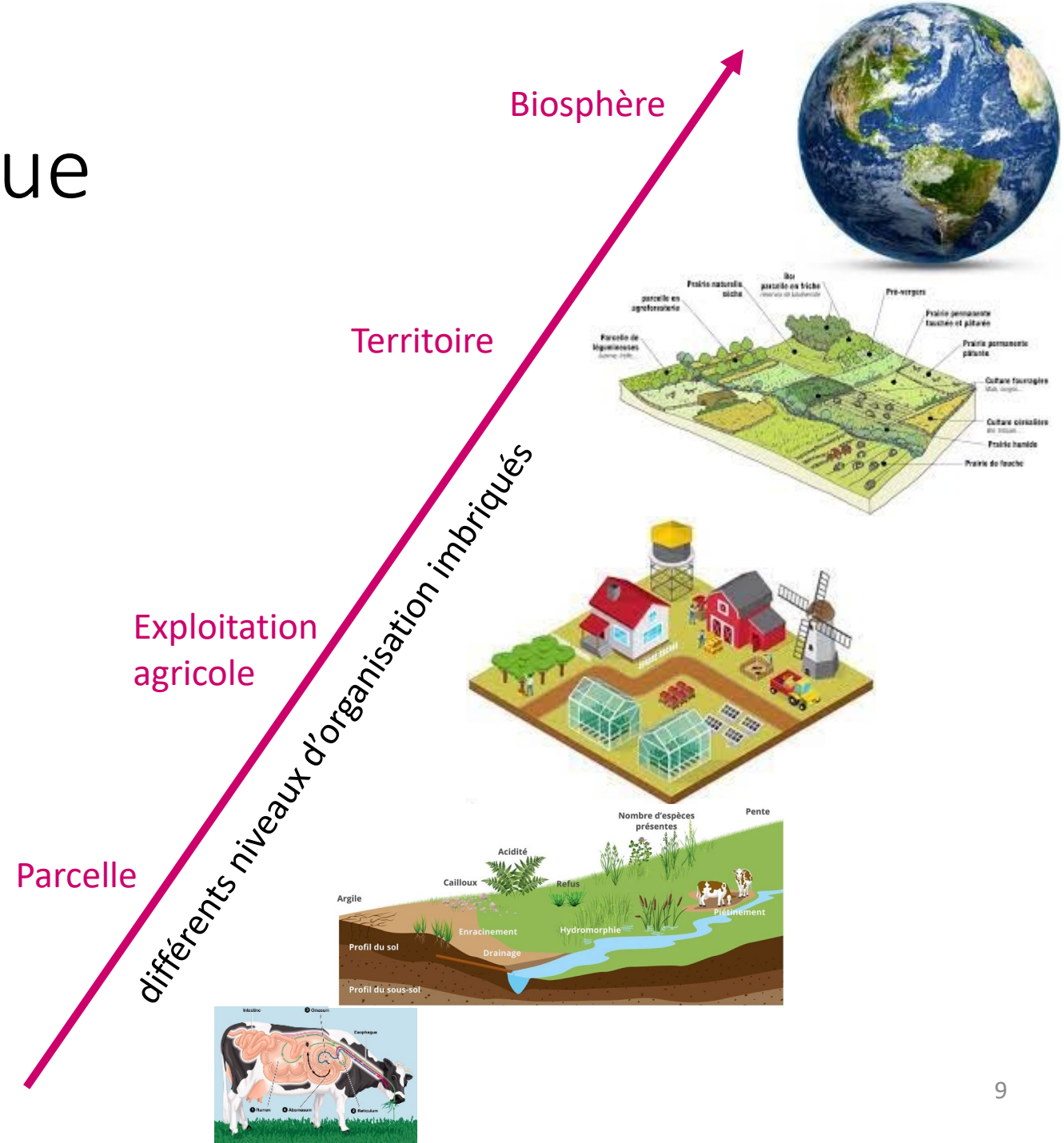
Assouma et al., 2017

Mes travaux

- Question: rôles de l'élevage dans **l'organisation des cycles biogéochimiques et la définition des systèmes énergétiques**?
  - à un niveau local (exploitation, ménage, filière, territoire)
  - les pratiques qui déterminent les flux de matière et d'énergie
- Hypothèse: différentes possibilités de faire progresser l'élevage selon:
  - nature des systèmes agricoles
  - contexte pédo-climatique
  - contexte socio-économique

Approche systémique

- L'élevage appartient à des systèmes agricoles
- Systèmes complexes: nombreux sous-systèmes en interaction O'Neill et al., 1986
  - différents niveaux d'organisation imbriqués
  - propriétés émergentes



Agricultural Systems

- L'analyse des systèmes agricoles (SA) s'intéresse aux **interactions**:
  - entre les composantes des SA
  - entre les différents niveaux d'organisation des SA
  - entre les SA et les autres systèmes d'utilisation des terres
  - entre les SA et leur environnement:
    - Ecologique
    - Social
    - Economique

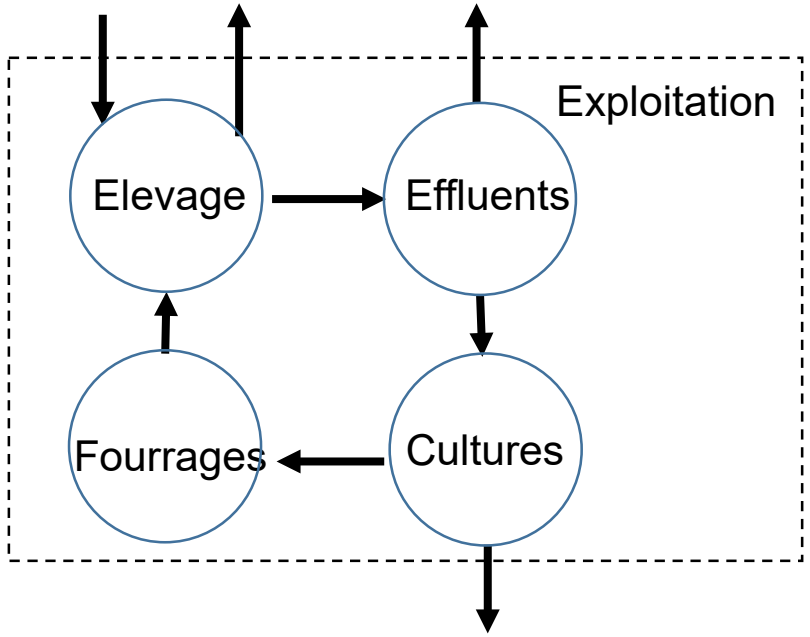
Importance de la modélisation stock-flux

- Modélisation conceptuelle, empirique et informatique

Le périmètre

Les sous-systèmes: des stocks et/ou des processus de transformation

Les interactions: des flux de matières et d'énergie



Vayssières et al., 2009b

Intégration de la décision des acteurs

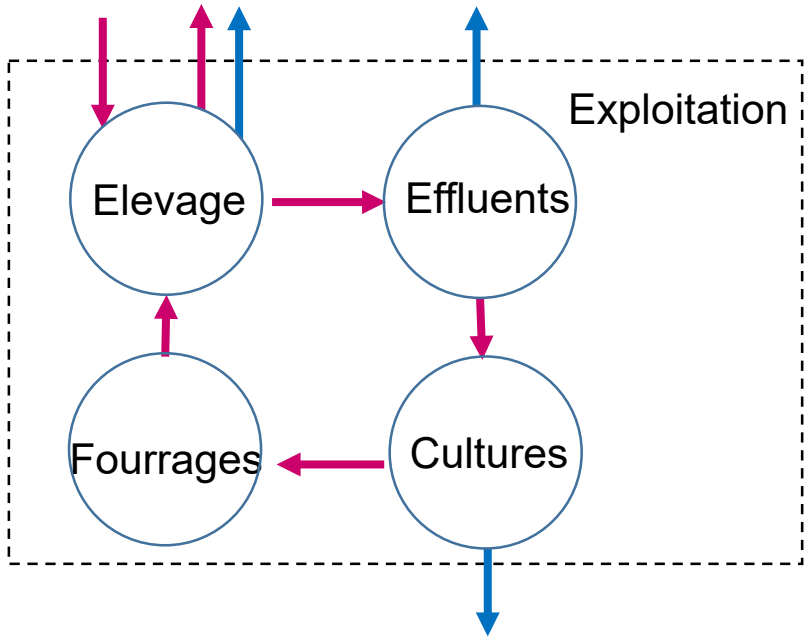
Flux actionnables VS flux biophysiques

Le périmètre

Les stocks et/ou des processus de transformation

Les flux actionnables (opérations techniques)

Les flux biophysiques (processus biophysiques)



Vayssières et al., 2007

Guerrin, 2008

Intégration de méthodes d'évaluation

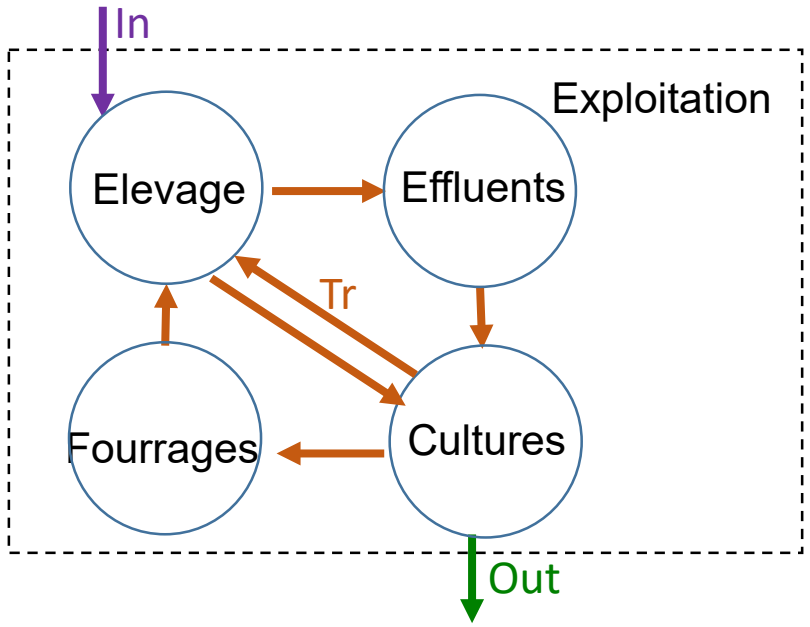
Flux entrants VS sortants VS internes

« nutrient use efficiency » = $\frac{\sum_j Out_j}{\sum_i In_i}$

« nutrient surplus » = $\frac{\sum_i In_i - \sum_j Out_j}{\text{Total used area}}$

« cycling intensity » = $\frac{\sum_t Tr_t}{\sum_i In_i + \sum_j Out_j + \sum_t Tr_t}$ ≠ « recycling rate »

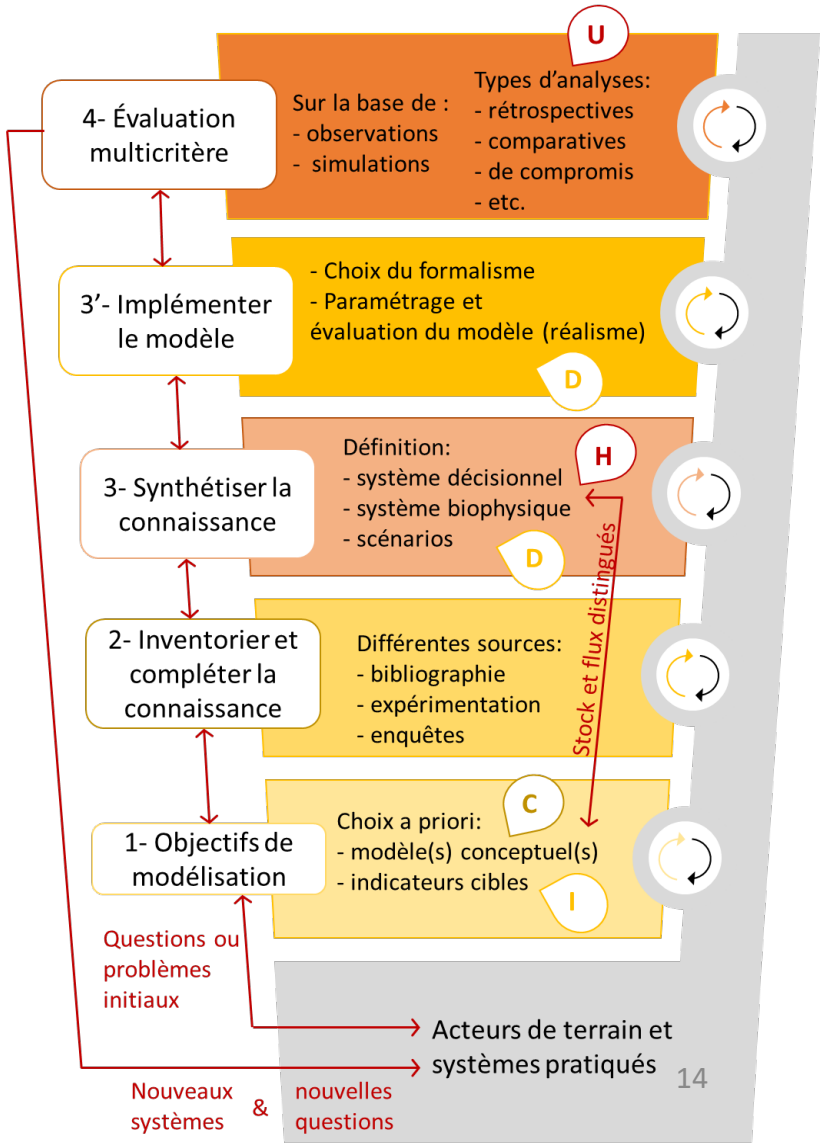
etc.



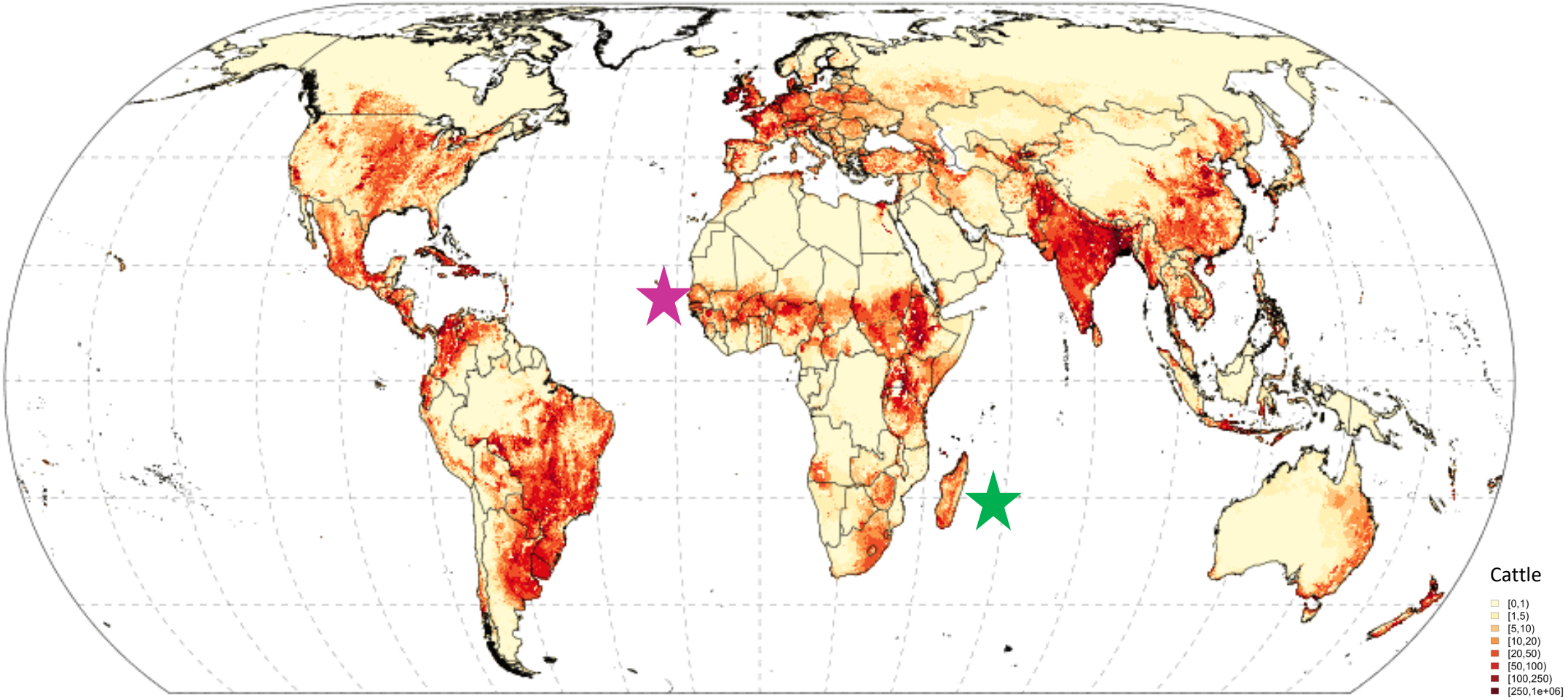
Vayssières et al., 2011

Une démarche d'accompagnement de transitions

- Basée sur 2 grands principes:
  - La modélisation outil d'accompagnement ComMod, 2005
  - La modélisation ad-hoc Affholder et al., 2012
- Démarche exploratoire, ascendante, itérative:
  - en 4 (ou 5) grandes étapes
- 2 approches de modélisation-évaluation:
  - M. empirique: observation-évaluation
  - M. informatique: simulation-évaluation



Deux contextes d'intervention



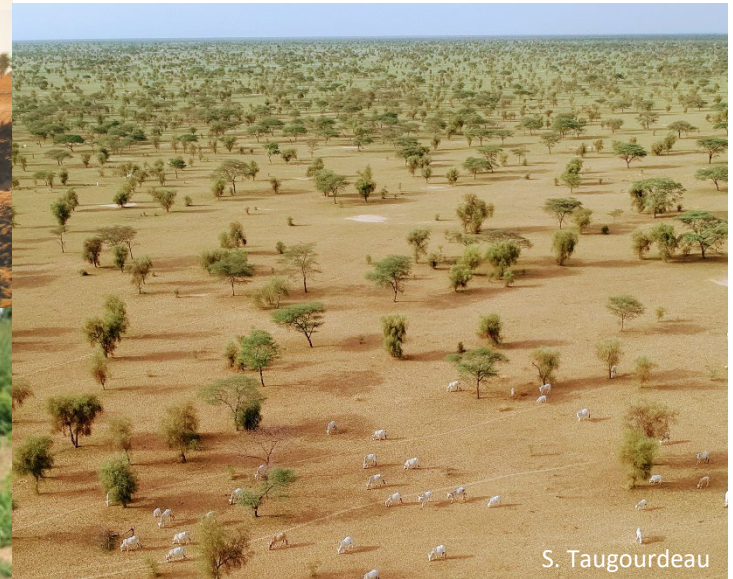
Répartition de la charge animale (bovins) sur la planète Gilbert et al., 2018 (FAO)

Deux contextes d'intervention contrastés

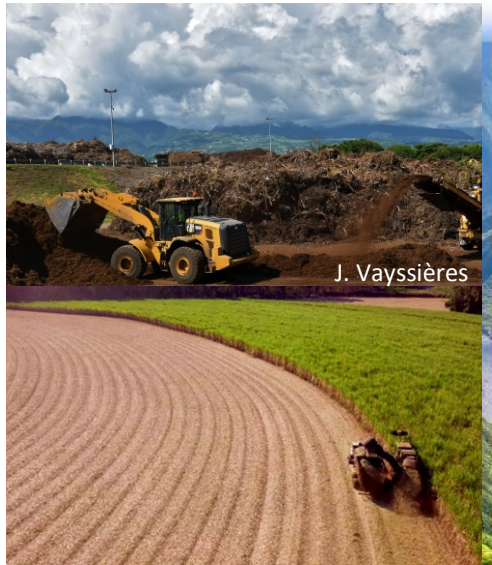
- Afrique de l'Ouest (7 ans)
  - Systèmes diversifiés (mobiles) à faible niveau d'intrants
  - Climat tropical sec, sols pauvres

C. Birnholz

M. Odru


S. Taugourdeau

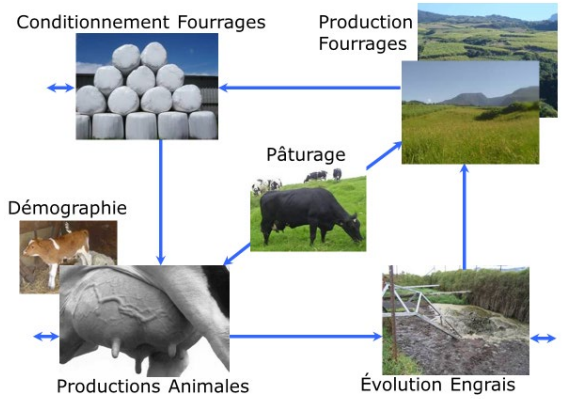
- La Réunion (11 ans)
  - Systèmes spécialisés (à l'étable ou hors-sol) à haut niveau d'intrants
  - Climat tropical humide, sols riches


J. Vayssières

Deux contextes d'intervention

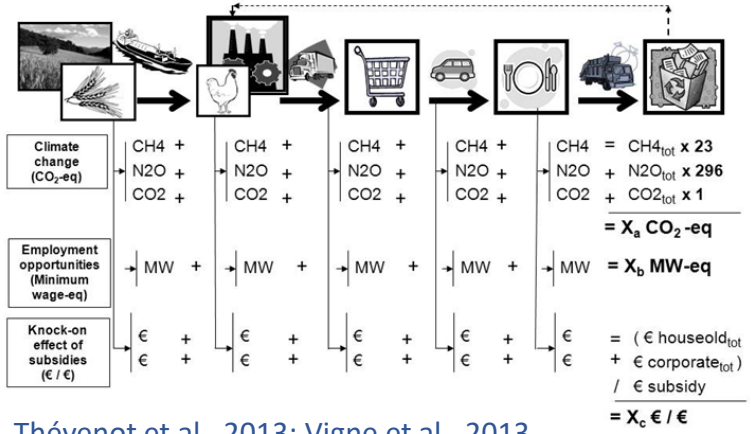
La Réunion

1)



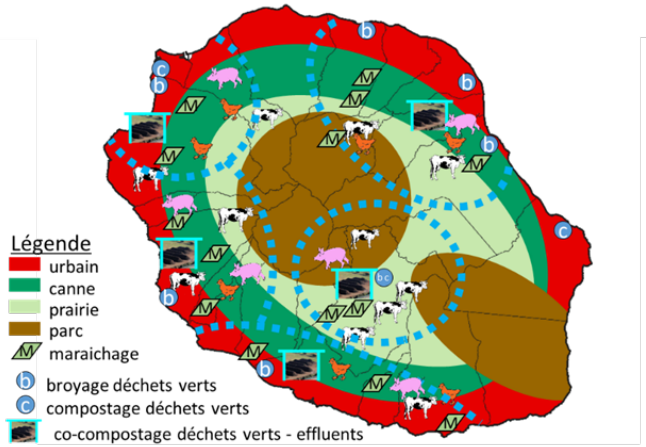
Vayssières et al., 2011; Berre et al., 2013

2)



Thévenot et al., 2013; Vigne et al., 2013

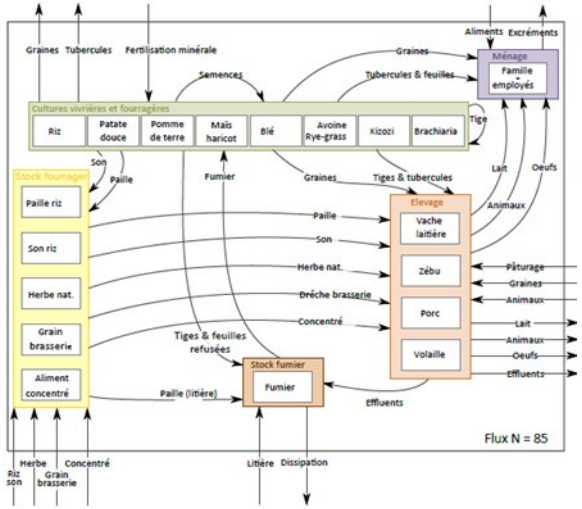
3)



Kleinpeter et al., 2021

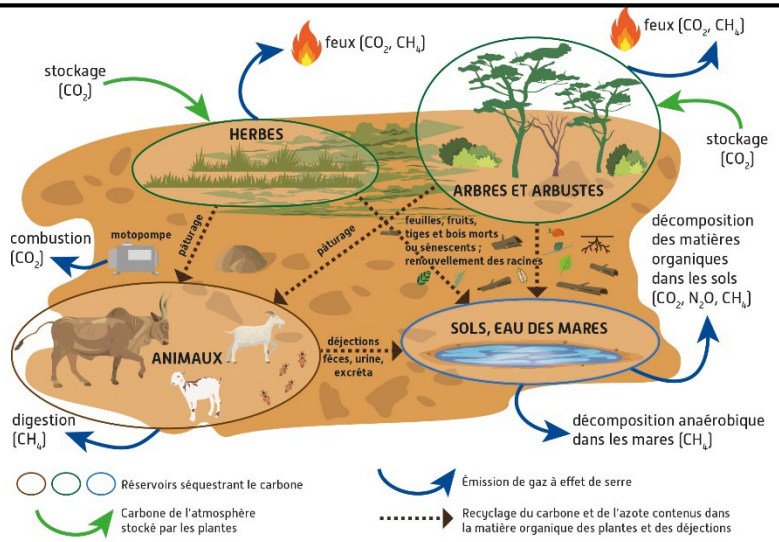
Afrique de l'Ouest

4)



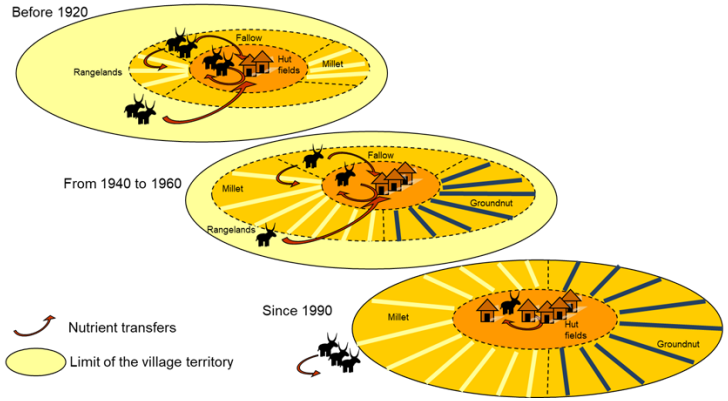
Vigne et al., 2013; Alvarez et al., 2014; Bénagabou et al. 2017

5)



Assouma et al., 2019

6)



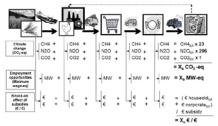
Grillot et al., 2018

Différentes problématiques

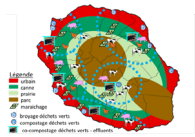
1)

La Réunion

Boucler le cycle de l'azote au niveau des exploitations agricoles pour réduire le **risque environnemental** lié aux activités d'élevage intensif

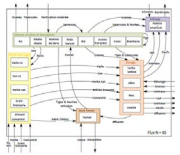
2) 

Analyser le cycle de vie des matières au sein de filières d'élevage pour réduire l'**impact environnemental** des productions animales

3) 

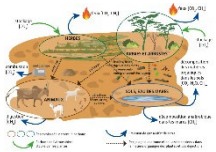
Recycler la biomasse à l'échelle territoriale pour inscrire l'élevage dans une **économie circulaire**

---

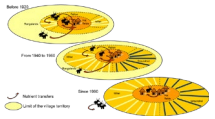
4) 

Afrique de l'Ouest

Recycler la biomasse, l'énergie et les nutriments pour accroitre la **productivité, l'efficience et l'autonomie des agroécosystèmes** mixtes agriculture-élevage

5) 

Évaluer le bilan C d'un territoire pastoral au Sénégal par approche écosystémique dans une perspective de **paiement pour services environnementaux**

6) 

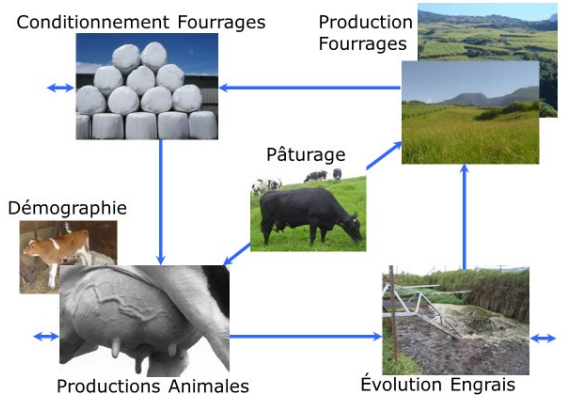
Évaluer les effets de la **transition agraire** sur la réorganisation du cycle de l'N et l'évolution de la **fertilité des sols** en territoires agro-sylvo-pastoraux

Différents niveaux d'organisation

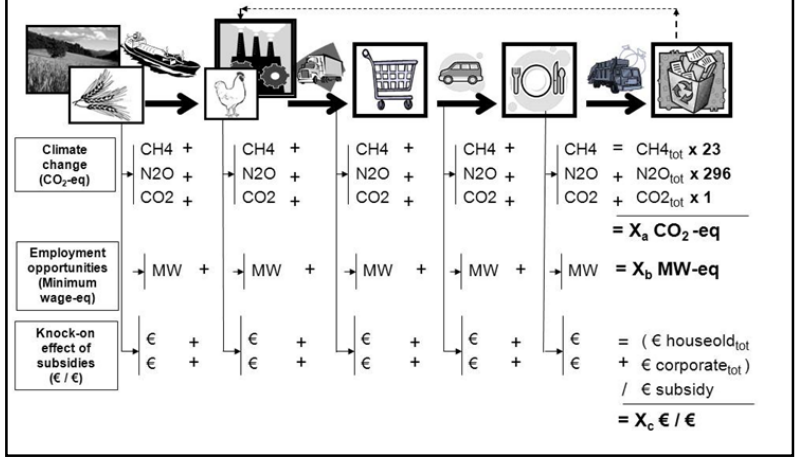
La Réunion

Afrique de l'Ouest

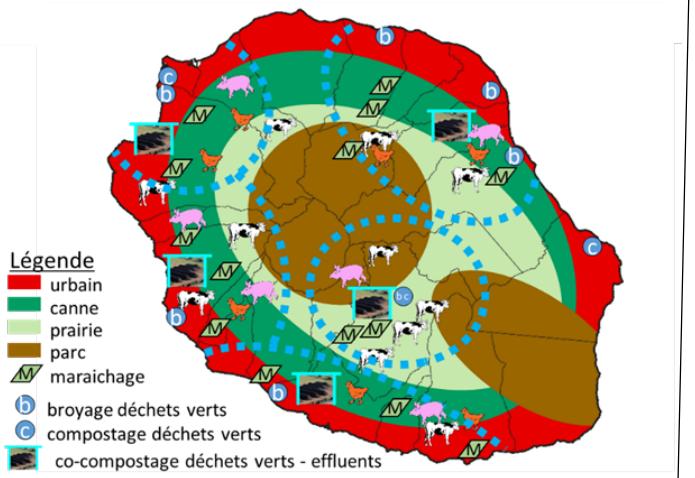
1) Exploitation



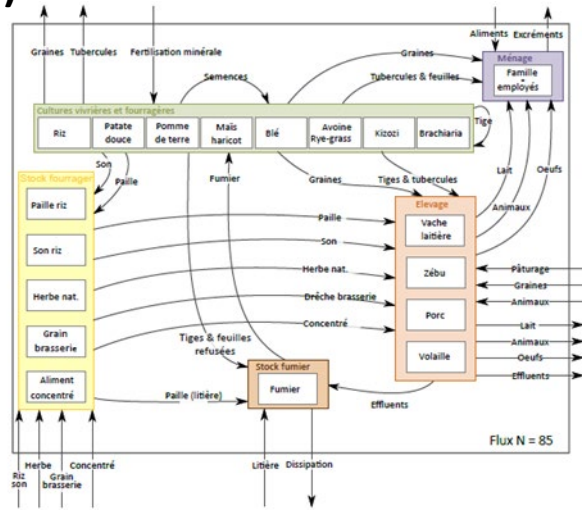
2) Filière



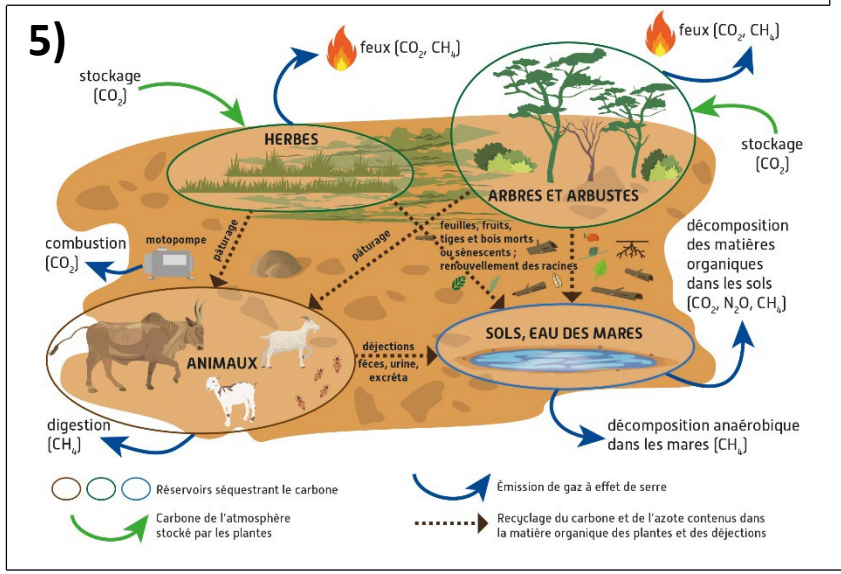
3) Territoire



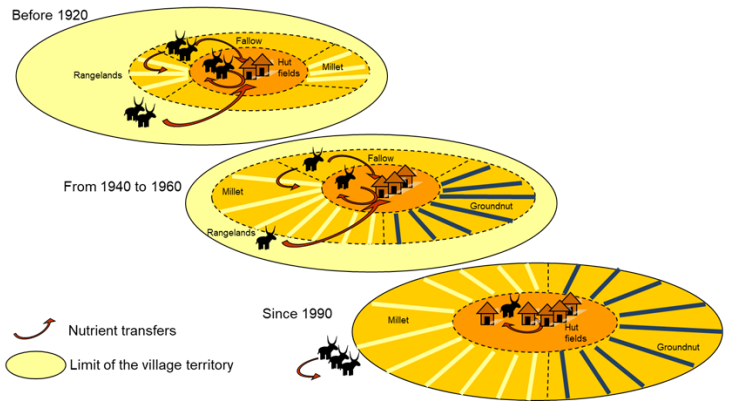
4)



5)



6)

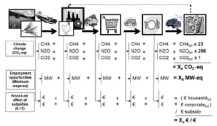


Différentes méthodes

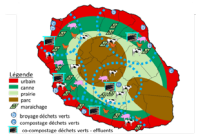
La Réunion

1)

Simulation-évaluation Vensim®
Modèle dynamique hybride
Efficience multicritère
Analyse de frontière d'efficience
Modélisation inverse

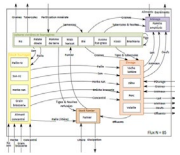
2) 

Simulation-évaluation
Tableur statique
Analyse de cycle de vie SimaPro
Intégration ACV – méthode des effets

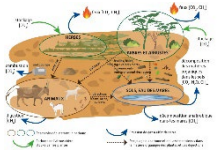
3) 

Simulation-évaluation
Modèle dynamique et spatialement explicite orienté interactions
Evaluation circularité ocelet
Analyse de cycle de vie

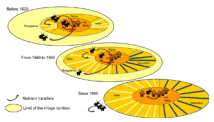
Afrique de l'Ouest

4) 

Observation-évaluation
Analyse des réseaux écologiques
Efficience d'utilisation

5) 

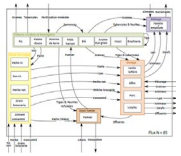
Observation-évaluation
Bilan C « écosystémique »

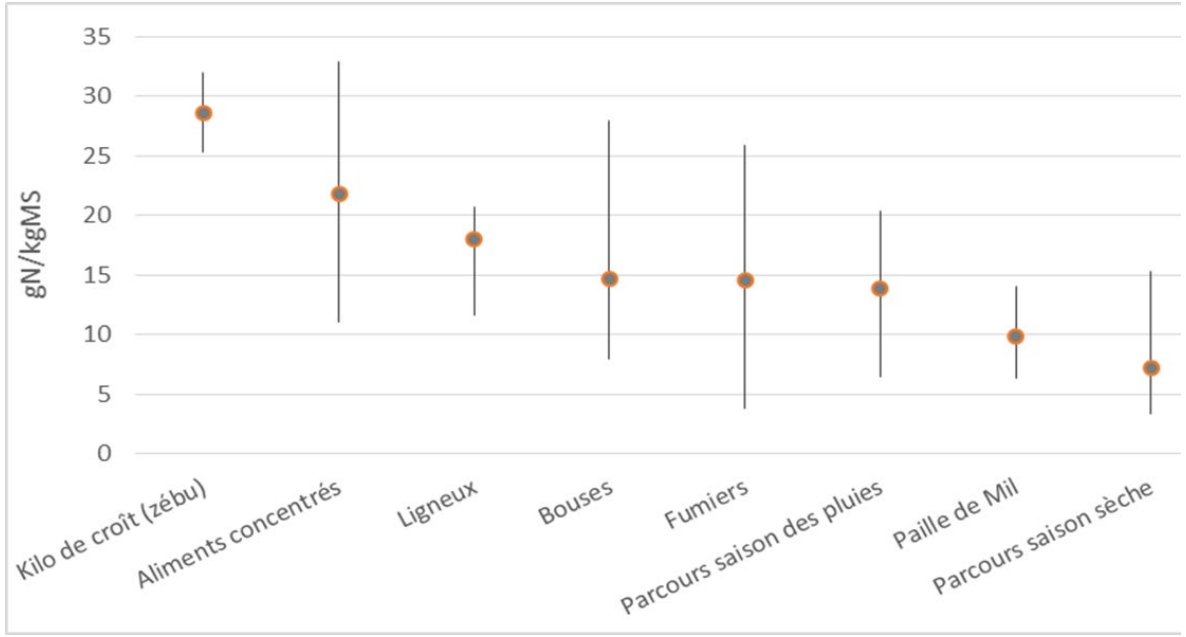
6) 

Simulation-évaluation
Modèle dynamique et spatialement explicite centré agent (SMA)
Analyse pluri-niveaux
Evaluation intégration

Principaux résultats

- Concentration des nutriments dans la biomasse

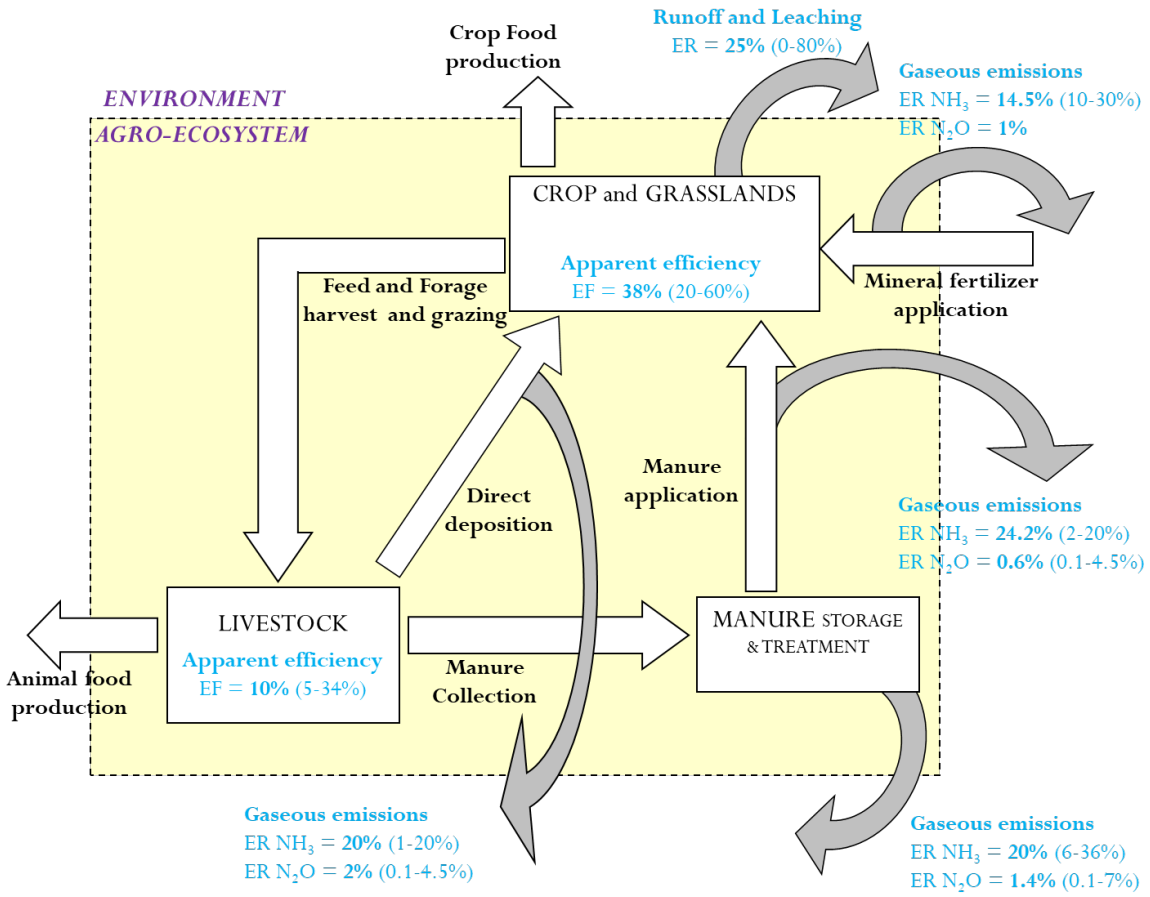




Teneur azotée des biomasses recyclées dans un syst. Agro-sylvo-pastoral

Grange, 2015

- Ouverture cycle N &C

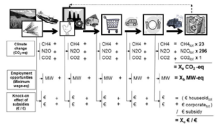


Pertes d'N aux différentes étapes du cycle de l'N dans les agro-écosystèmes

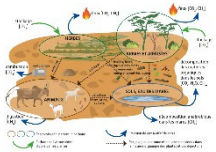
Vayssières & Rufino, 2012

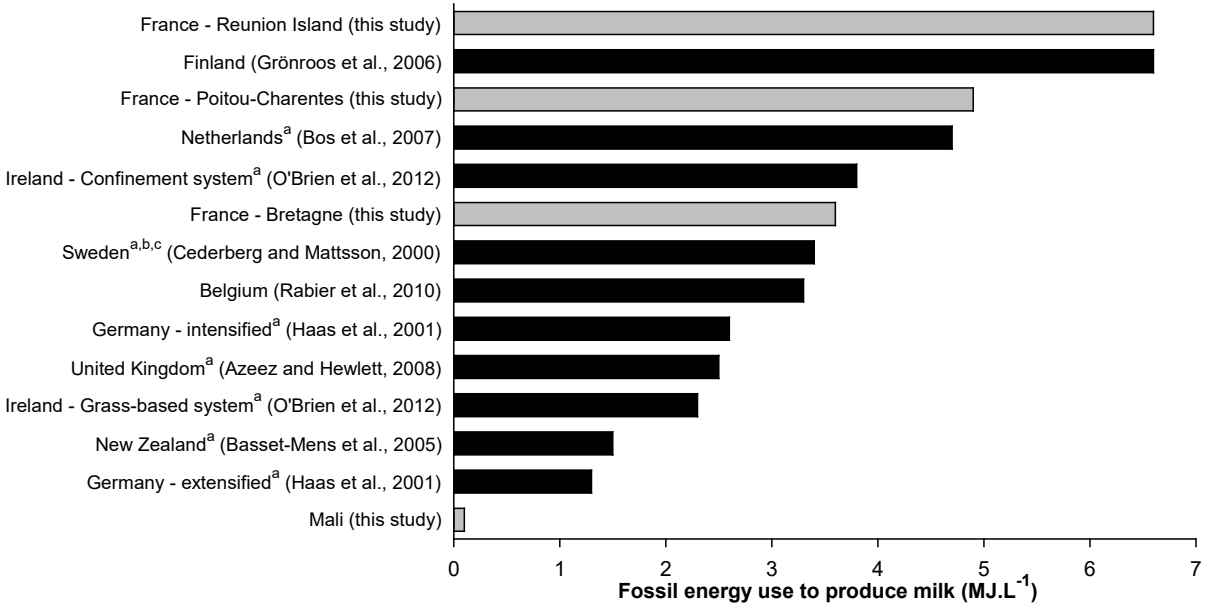
Principaux résultats

- Transfert d'impact



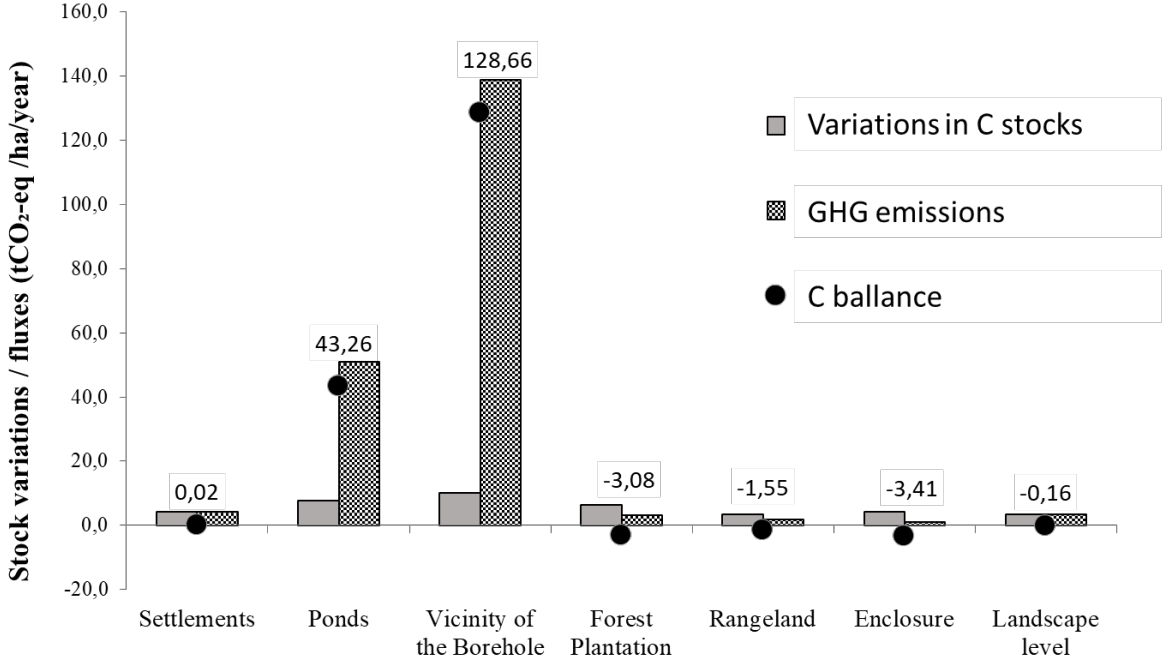
- Equilibre potentiel





Consommation d'énergie fossile par différents systèmes laitiers

Vigne et al., 2013

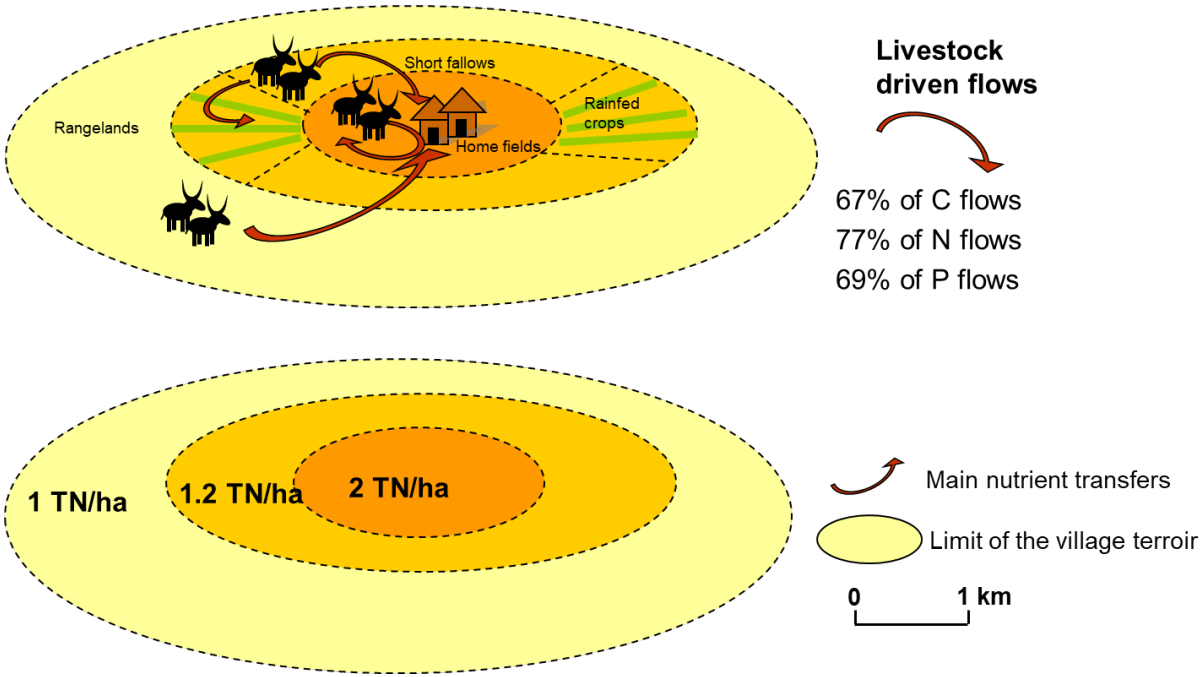


Variation spatiale du bilan C d'un territoire pastoral

Assouma et al., 2019

Principaux résultats

- Concentration spatiale bénéfique



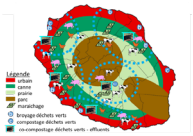
Organisation spatiale des stocks et flux de nutriments dans un terroir villageois au Sénégal

Manlay et al., 2004; Vayssières et al., 2015; Grillot et al., 2018, Bisson et al.,2019

A. Wezel

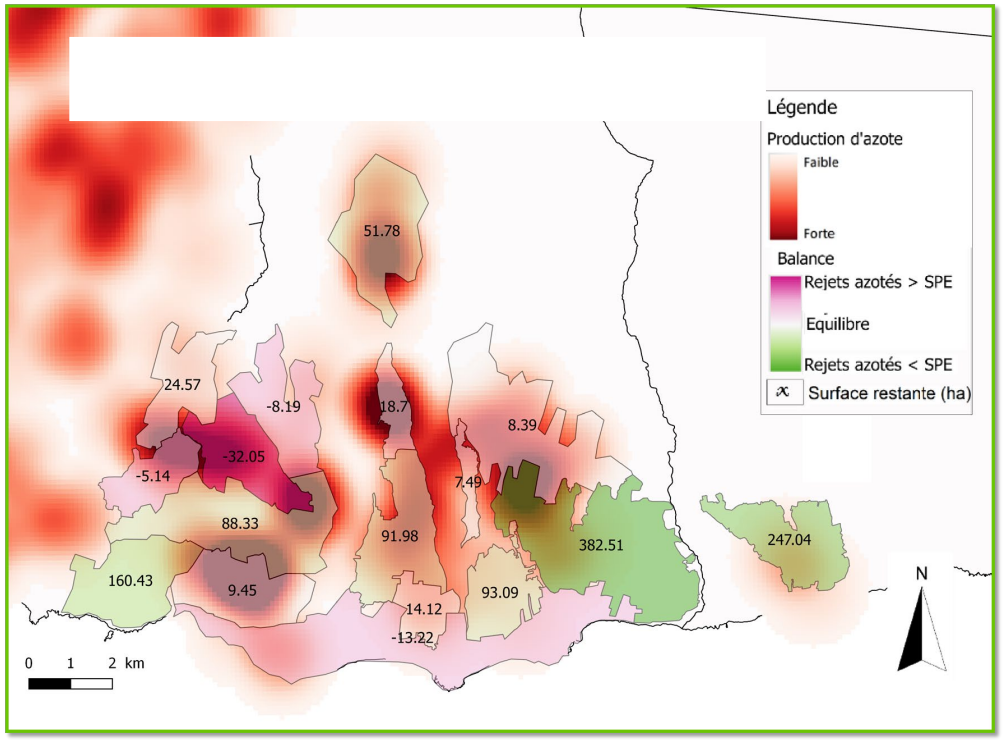
Principaux résultats

- Concentration spatiale néfaste



Simulation flux de biomasse (ex. foin)

Kleinpeter et al., 2021



Superposition des zones de disponibilité et de besoins en nutriments (ex. N)

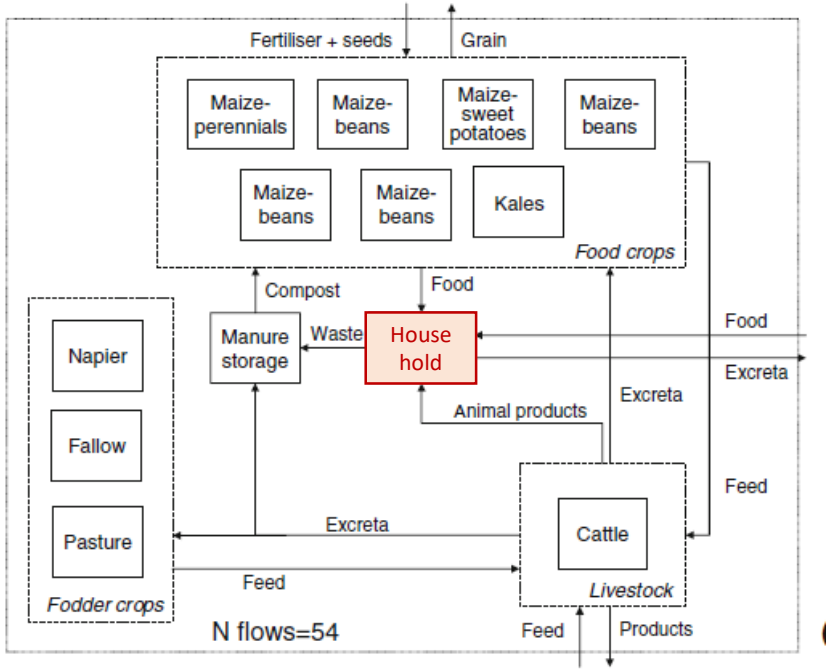
Jarry, 2019

Quel est le point central de ces travaux?

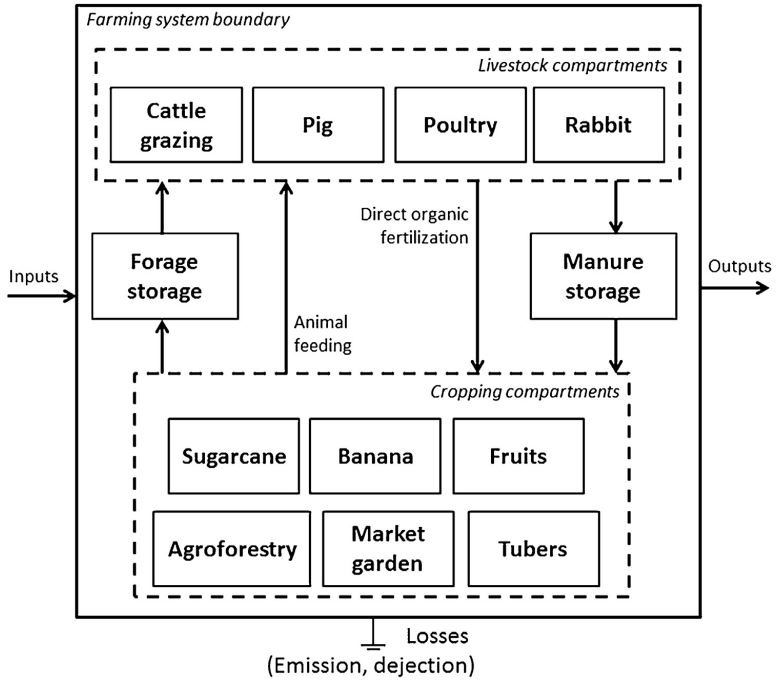
La modélisation stock-flux

Nécessité de justifier le choix des compartiments

Systèmes mixtes culture-élevage



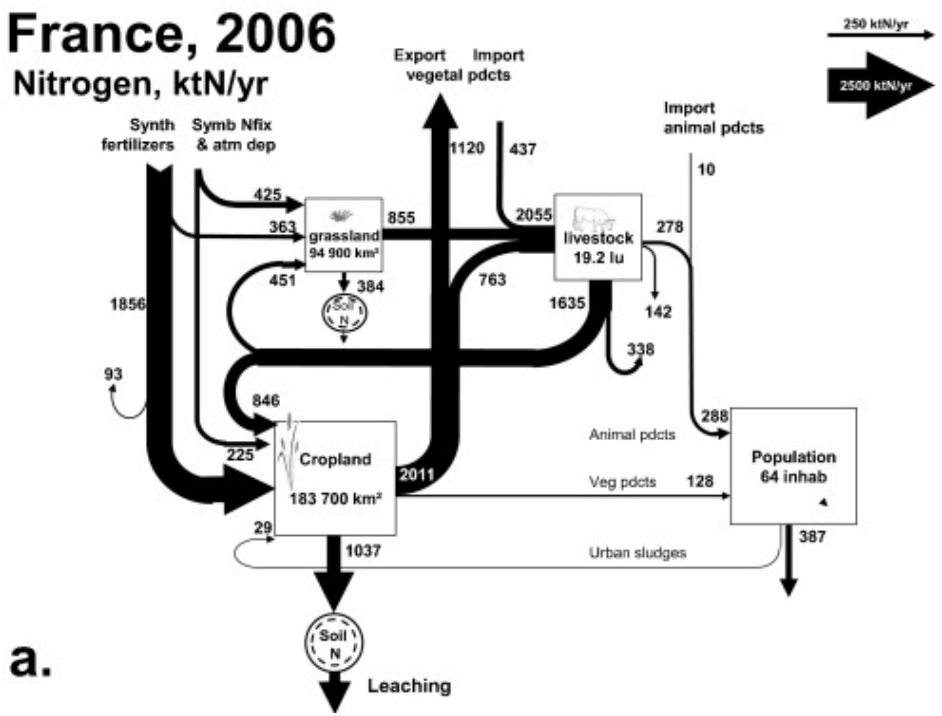
Rufino et al., 2009a & b



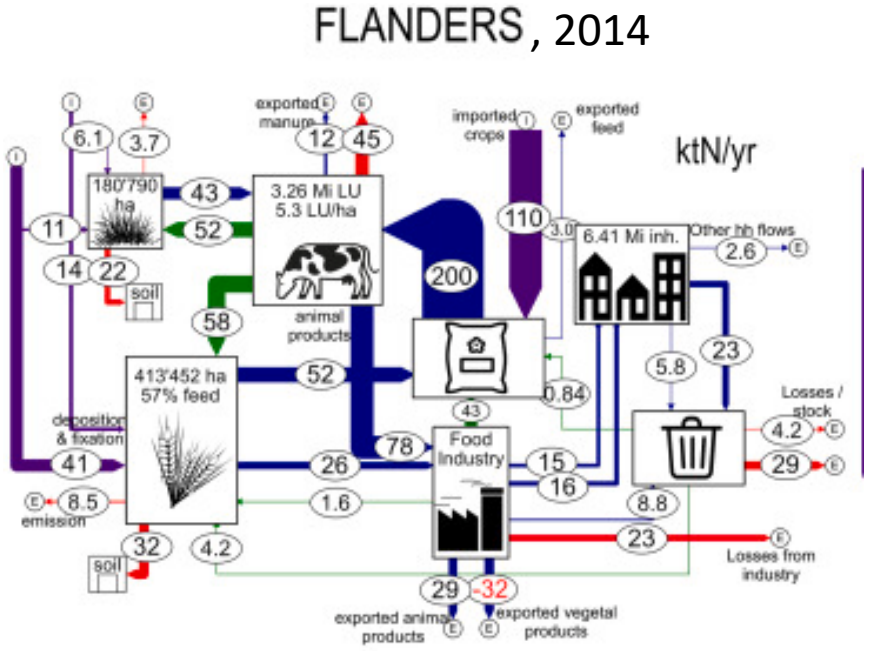
Stark et al., 2016

Nécessité de clarifier la nature des modèles

Agro-food system



Le Noë, Billen & Garnier, 2017



Papangelou & Mathijs, 2021

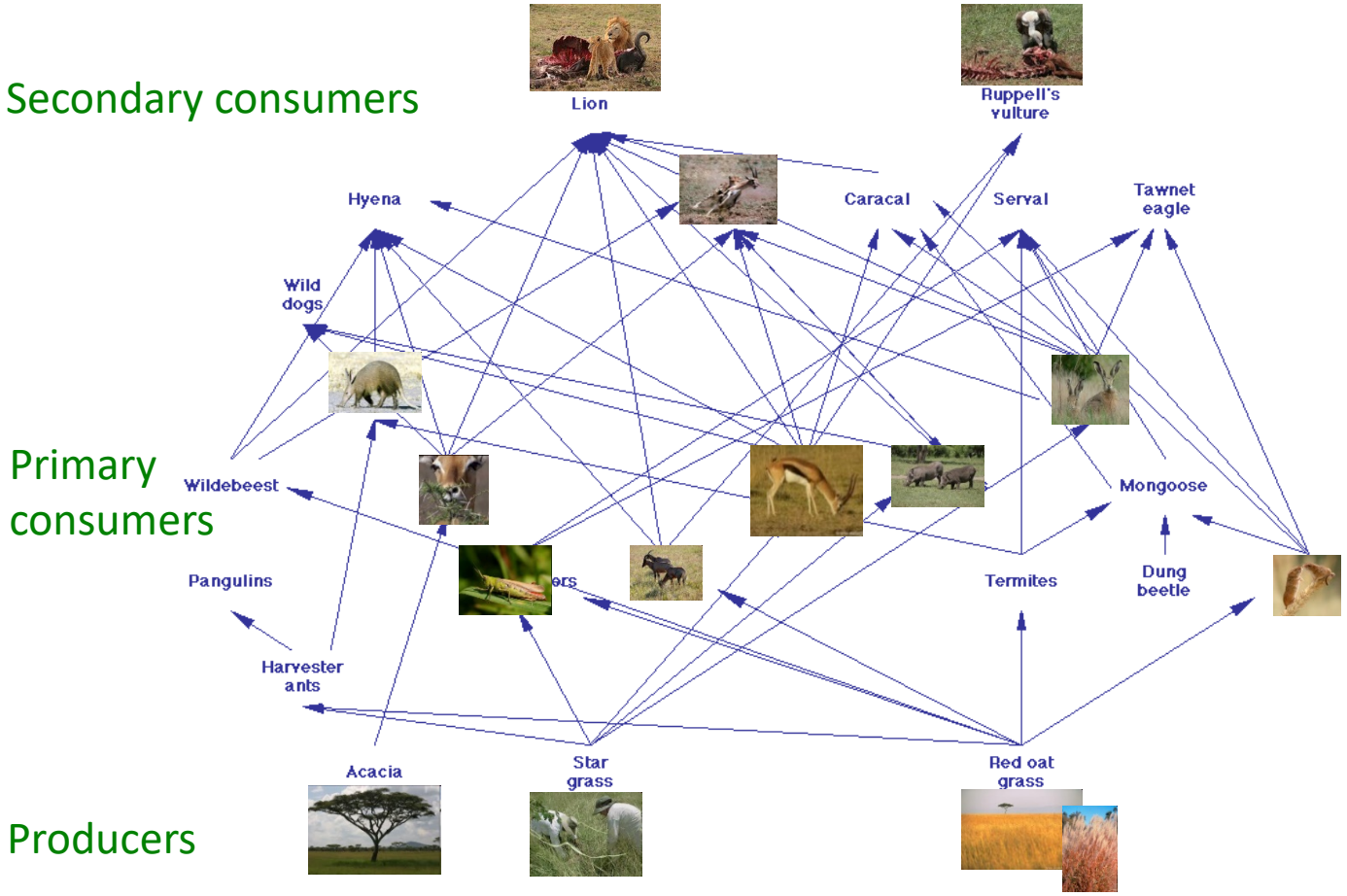
Proposer un cadre conceptuel de modélisation stock-flux à vocation générique

- Applicable à différent niveaux d'organisation
  - exploitation, ménage, territoires
- Permettant d'étudier les flux de différentes natures
  - biomasses, nutriments, carbone, énergie
  - trésorerie, information
- Pour réaliser des évaluation multi-critères
  - de systèmes réels et alternatifs
- Dans une démarche d'accompagnement de la transition des systèmes agricoles

A) Définir le cadre conceptuel

- Distinguer 5 modèles conceptuels différents de systèmes agricoles
  - L'agro-écosystème
  - Le paysage
  - Le socio-système
  - La chaine de valeur
  - Le système économique

1- L'agro-écosystème

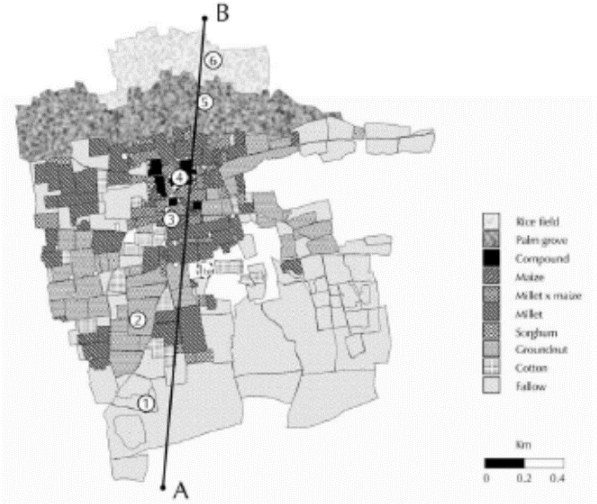


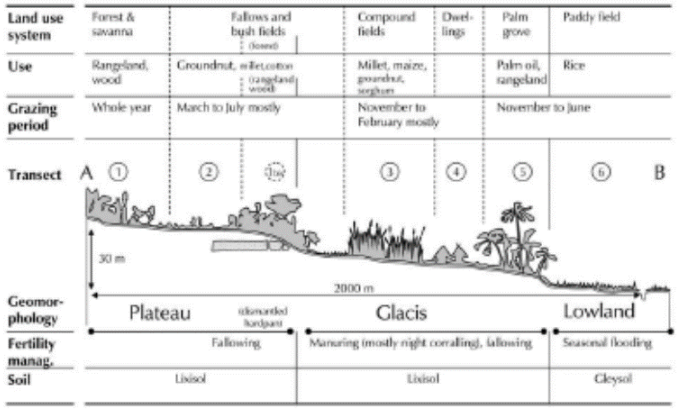
Hyparrhenia rufa = african star grass

- Discipline(s) d'origine: écologie fonctionnelle
- Sous-systèmes: niveaux trophiques avec des processus écologiques particuliers
- Application(s) emblématique(s): étude de l'intégration cultures-élevage

Rufino et al., 2006

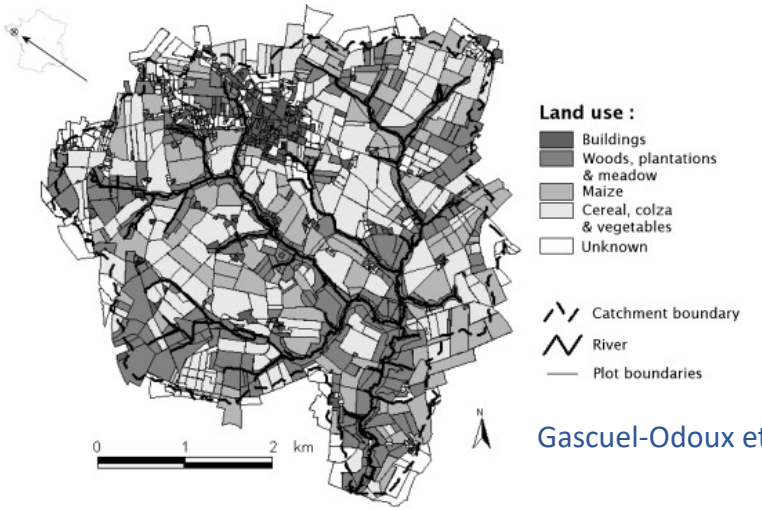
2- Le paysage





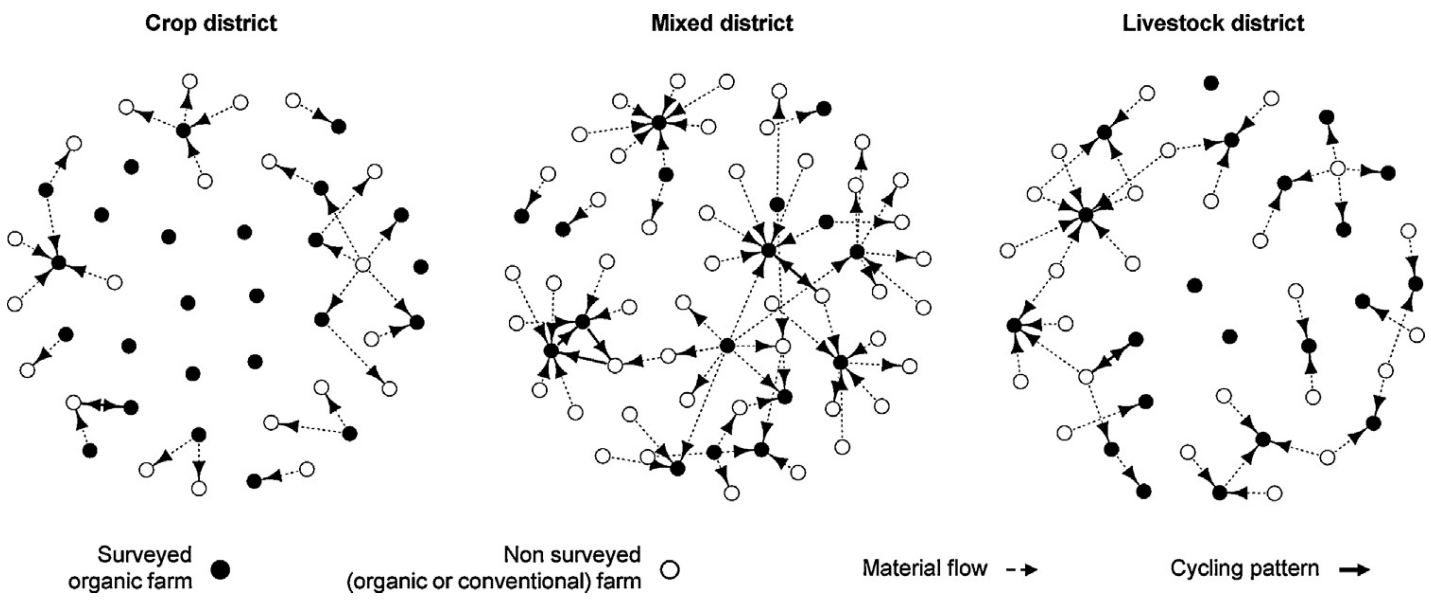
Manlay et al., 2004

- Discipline(s) d'origine: géographie, écologie du paysage
- Sous-systèmes: unités paysagères
- Application(s) emblématique(s): transfert fertilité, propagation de contaminants dans bassin versant



Gascuel-Odoux et al., 2009

3- Le sociosystème

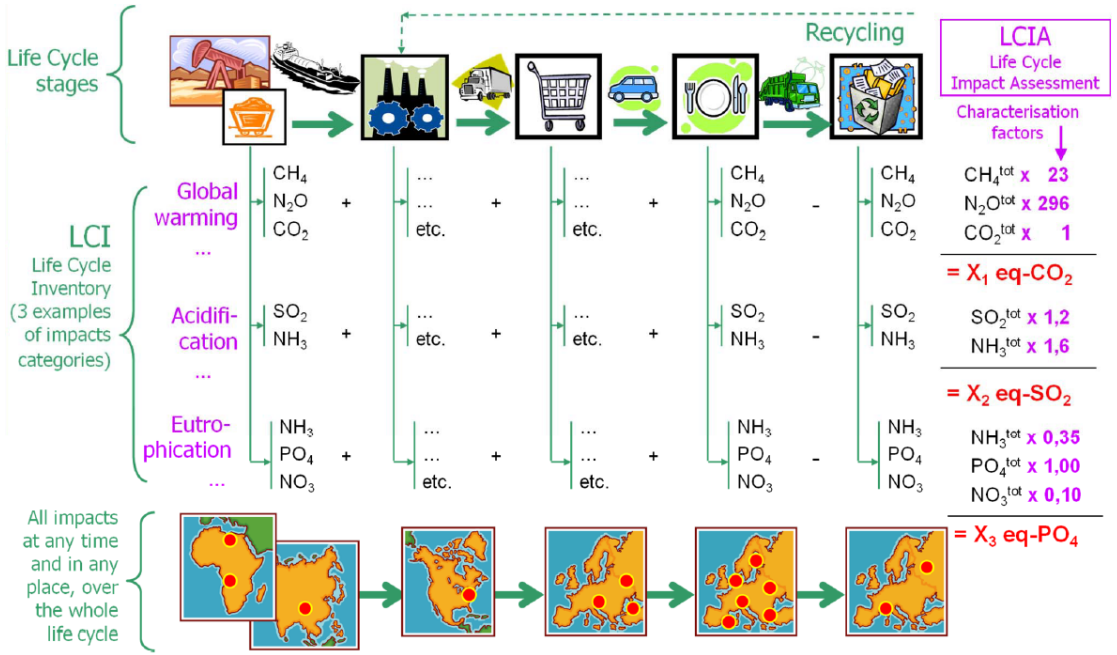


Flux de biomasses entre exploitations agricoles

Nowak et al., 2015

- Discipline(s) d'origine: Sociologie, éthologie
- Sous-systèmes: acteurs ou groupes d'acteurs
- Application(s) emblématique(s): échanges de biomasses entre agriculteurs, diffusion de ressources génétiques ou de maladies

4- La chaine de valeur

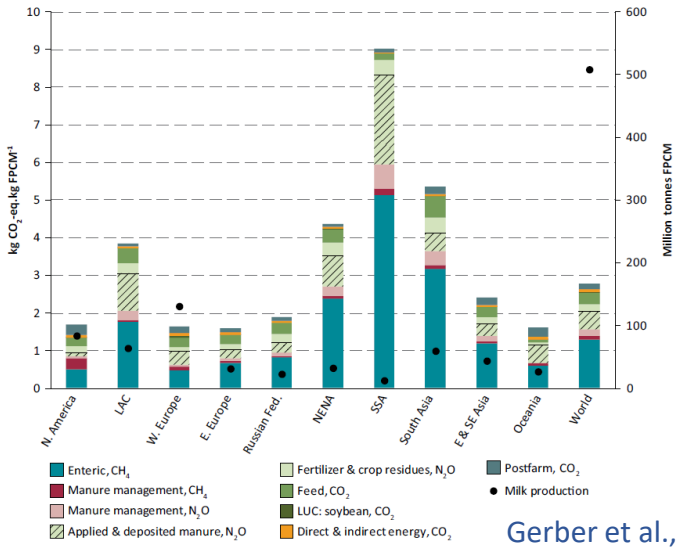


Analyse de cycle de vie environnementale

Biard, 2021

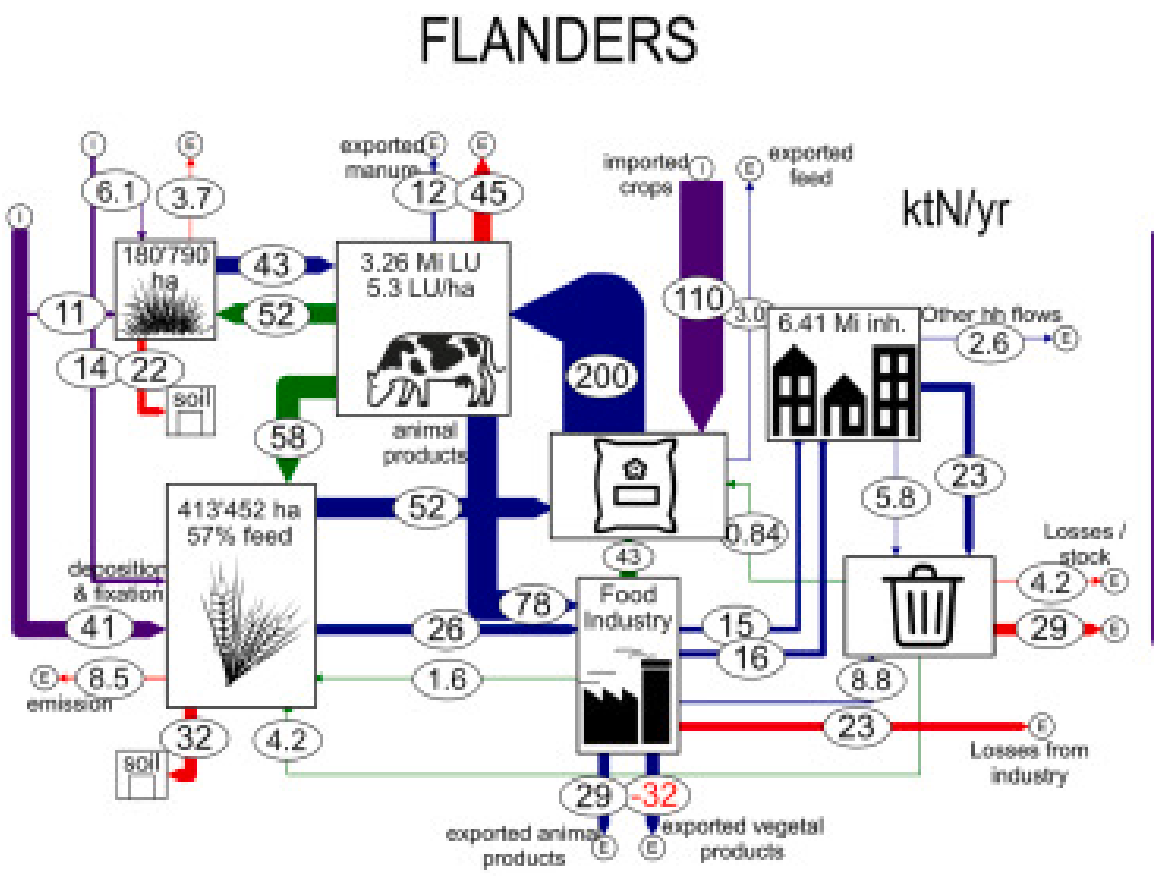
- Discipline(s) d'origine: méso-économie, sciences environnementales
- Sous-systèmes: activités
- Application(s) emblématique(s): analyse de cycle de vie, logistique

FIGURE 9. Regional variation in cattle milk production and GHG emission intensities



Gerber et al., 2013

5- Le système économique



Flux d'azote entre secteurs

Papangelou & Mathijs, 2021

- Discipline(s) d'origine: macro-économie, écologie industrielle
- Sous-systèmes: secteurs
- Application(s) emblématique(s): métabolisme territorial

A) Définir le cadre conceptuel

- 5 regards différents sur les systèmes agricoles
  - L'agro-écosystème: diversité, intégration
  - Le paysage: connectivité
  - Le socio-système: solidarité
  - La chaine de valeur: coordination
  - Le système économique: circularité, complémentarité

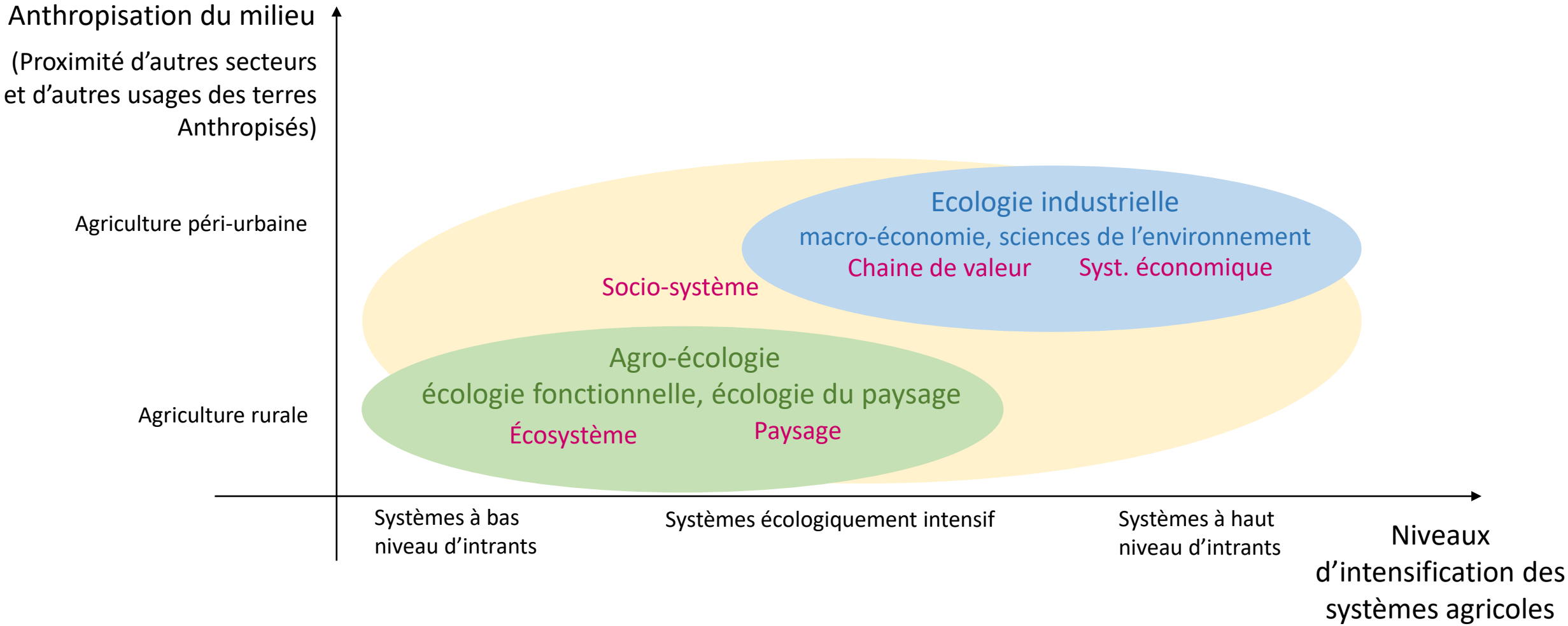
A) Définir le cadre conceptuel

- 5 regards différents sur les systèmes agricoles
  - L'agro-écosystème: diversité, intégration
  - Le paysage: connectivité
  - Le socio-système: solidarité
  - La chaine de valeur: coordination
  - Le système économique: circularité, complémentarité
  - Besoin d'autres modèles?

4- Mon projet de recherche

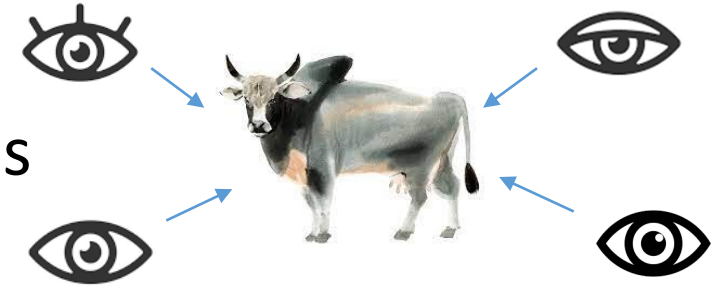
5 modèles conceptuels complémentaires

2 cadres disciplinaires Dumont et al., 2013



B) Éprouver ce cadre conceptuel

- Approfondir chacun des modèles conceptuels
- Comprendre la complémentarité des différents modèles
- Réfléchir à comment intégrer les différents modèles



Approfondir l'application des différents modèles

Ex. l'agro-écosystème

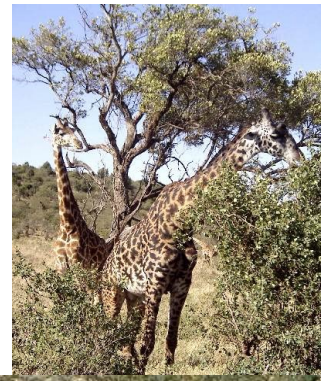
écosystèmes ouverts

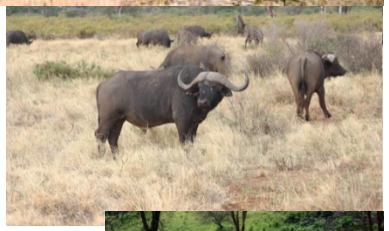
tropicaux

tempérés

Approfondir l'application des différents modèles

Ecosystèmes naturels





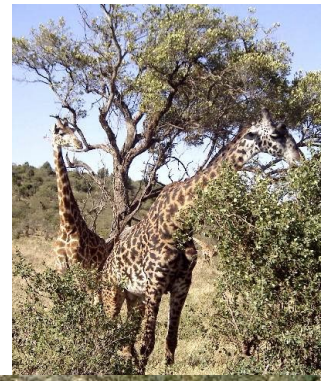
Mimétisme?

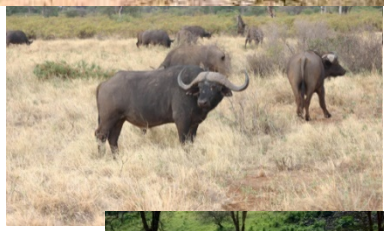
Systèmes pastoraux

Vayssières et al., 2015

Approfondir l'application des différents modèles

Ecosystèmes naturels





Mimétisme?

Systèmes pastoraux

Coprophages

Croiser différents modèles conceptuels

- Agro-écosystème:

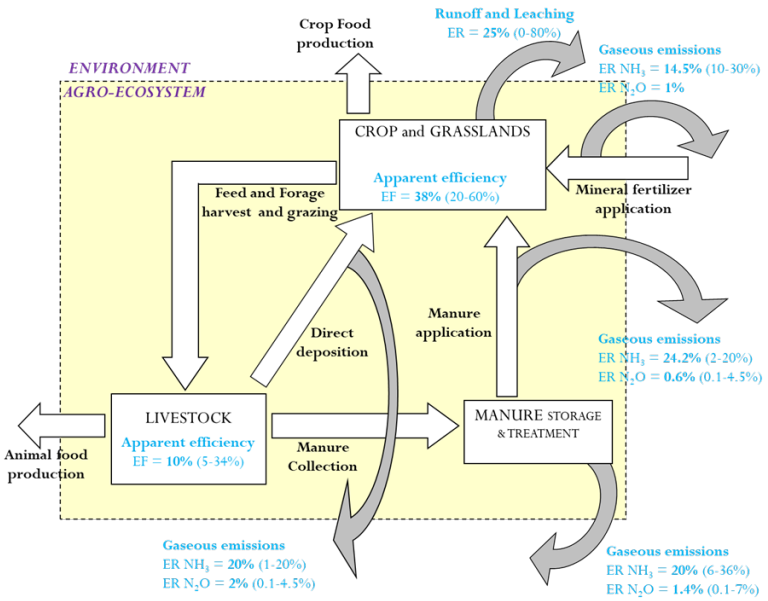
Elevage → Ouverture des cycles

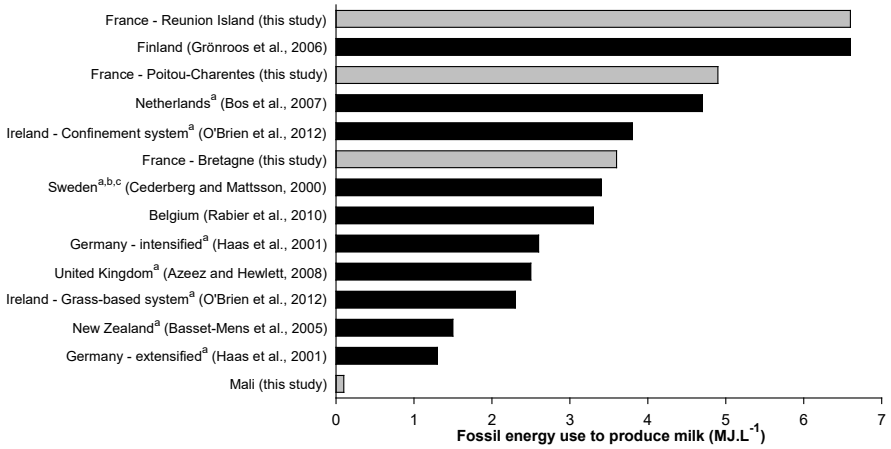
- Paysage:

Elevage → Concentration de la fertilité

- Chaine de valeur:

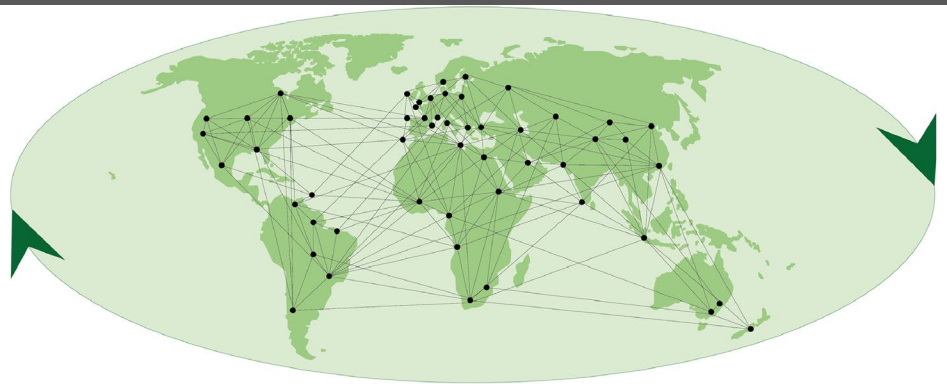
Elevage → Transfert d'impact faible !



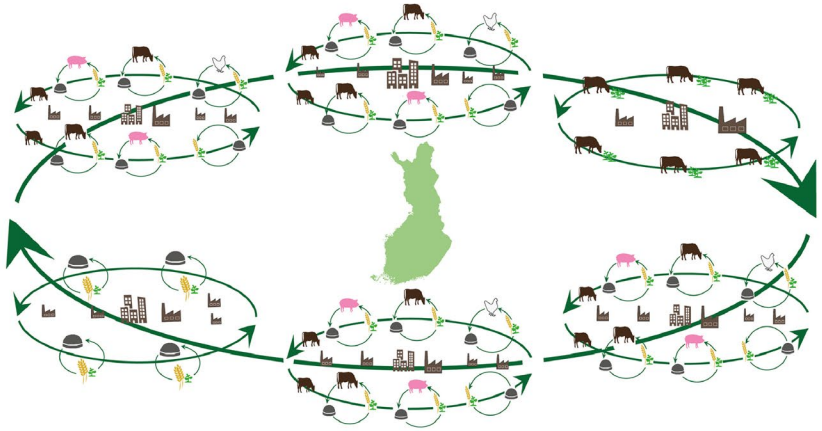


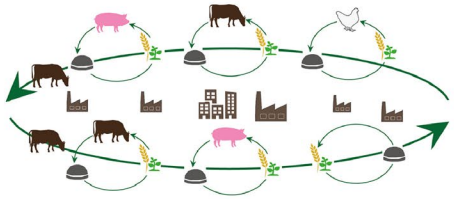
4- Mon projet de recherche

Intégration des niveaux d'organisation



Circularité emboitée





Koppelmäki et al., 2021

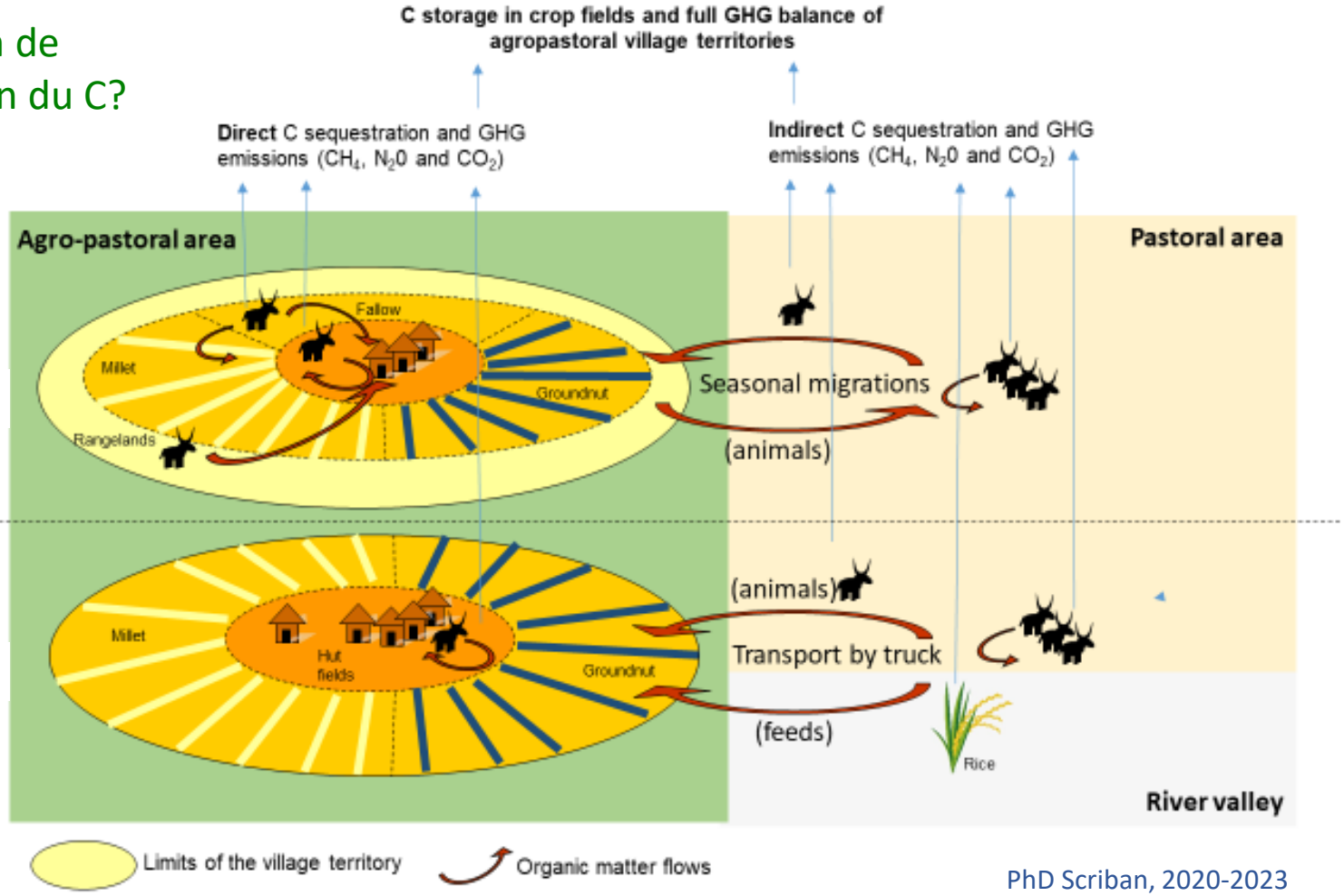
Intégrer différents modèles conceptuels

Lien entre intensification de l'élevage et séquestration du C?

Scénario 1 – Système extensif

Intensification

Scénario 2 – Système intensif



PhD Scriban, 2020-2023

4- Mon projet de recherche

Intégration de niveaux d'organisation

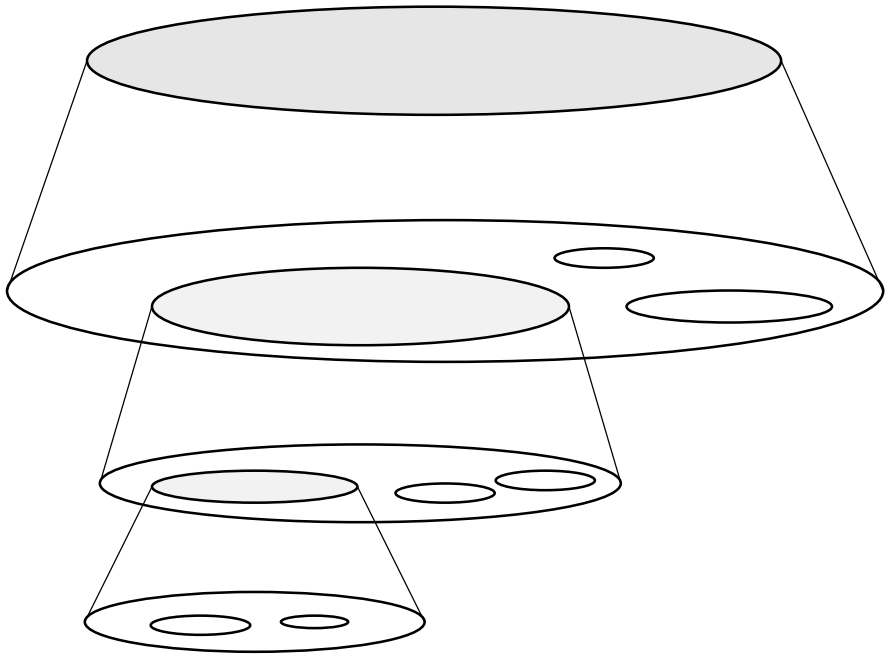
Systèmes emboités

Echelle spatiale

500 millions km2

ha

1 m2



Biosphère

Ecosystème

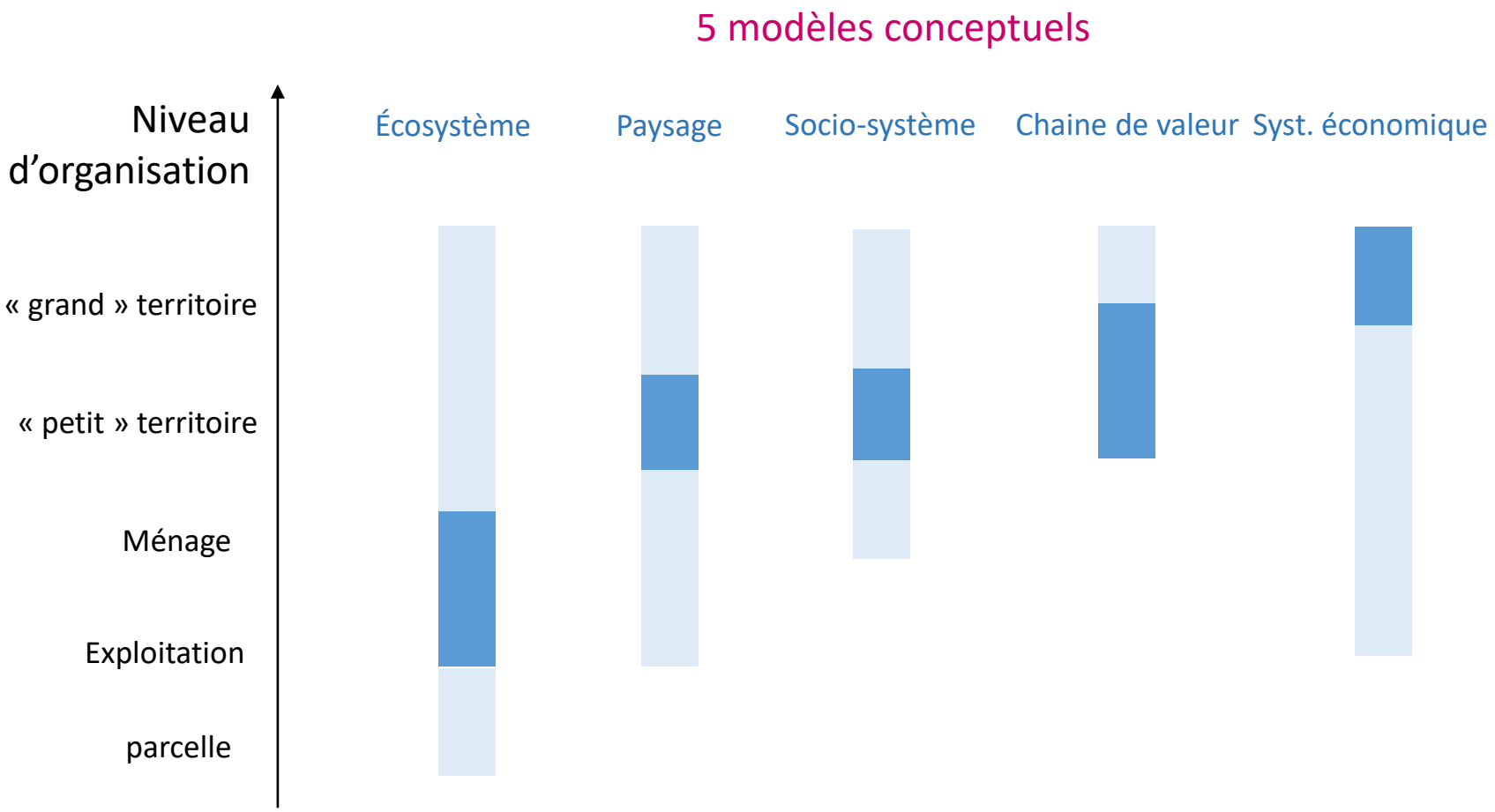
Organisme

Plateformes:
SEAMLESS, RECORD, MAELIA, etc.

Changement d'échelle (agrégation / désagrégation)

Bierkens et al., 2000

Intégration de modèles conceptuels



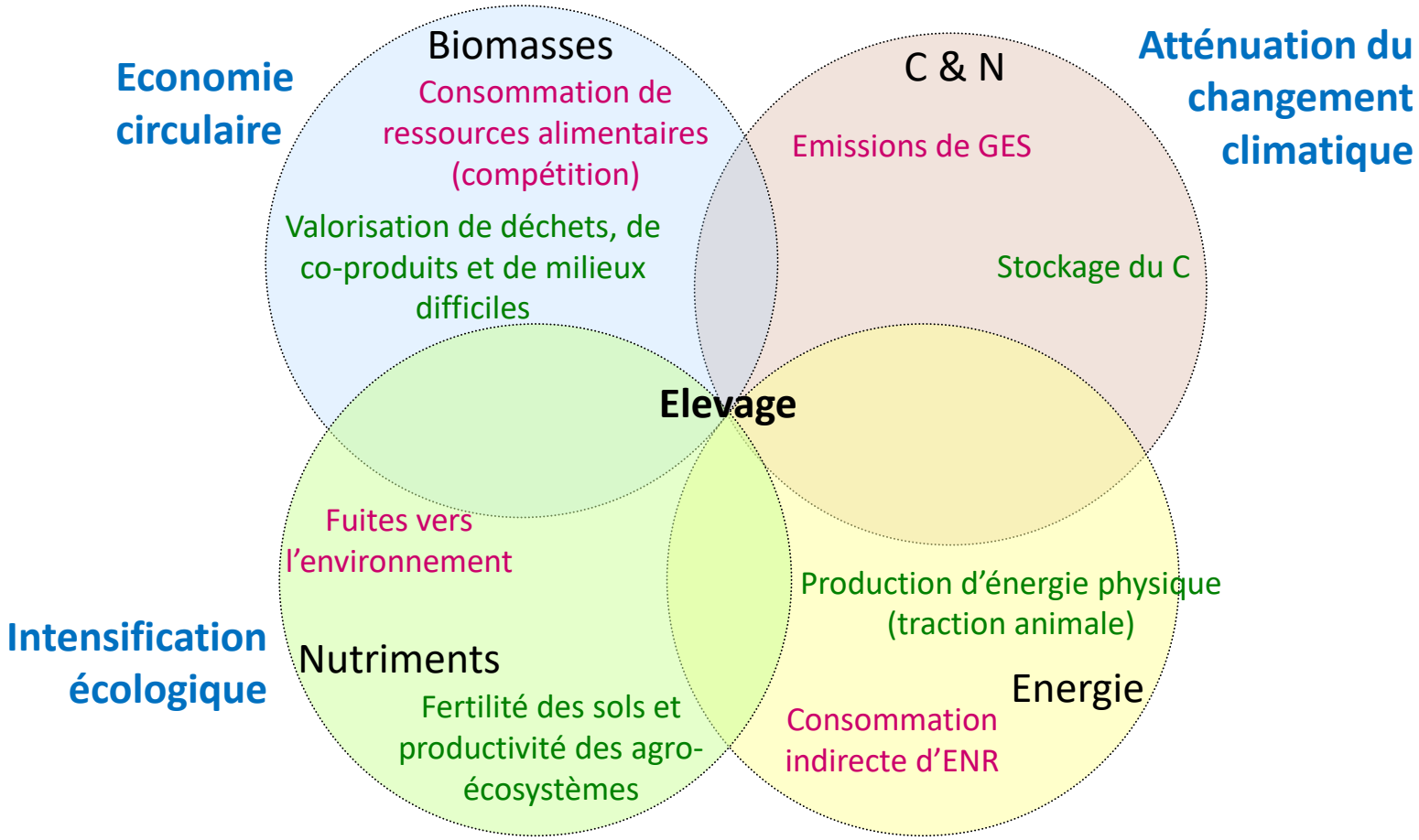
Changement d'échelle & allocation (azotée, énergétique, économique)

Par ex. en référence à l'ACV Cederberg & Stadig, 2003

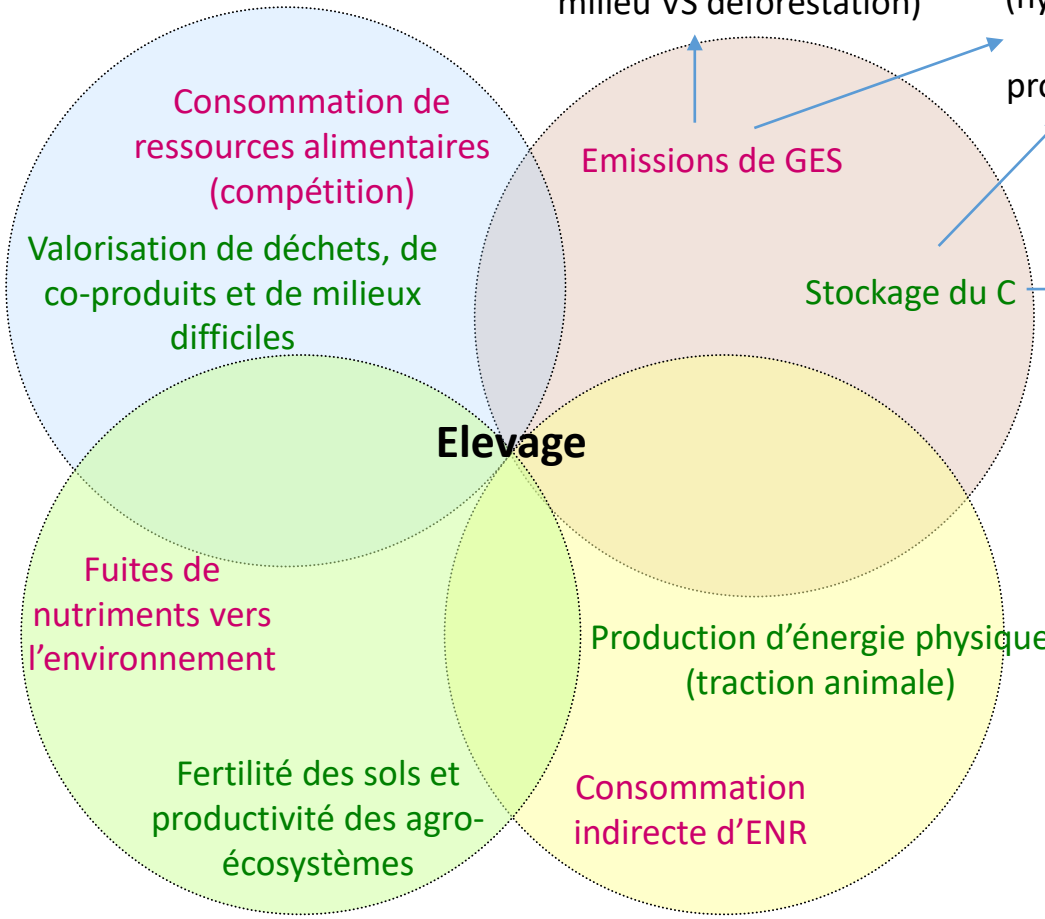
Avancées en analyse des systèmes agricoles

- Utilité des **modèles stock-flux** pour:
  - Synthétiser la connaissance et détecter les manques de connaissance
  - Etudier 4 types d'interactions:
    - entre composantes des SA
    - entre niveaux d'organisation des SA
    - entre SA et autres usage des sols
    - entre SA et environnement écologique, social et économique
  - Evaluer les SA en termes de:
    - Propriétés (ex. intégration, circularité)
    - Services écosystémiques (ex. fourniture de protéines, stockage du C)
    - Impacts (ex. consommation de ressources, émissions de GES)
    - etc.

Avancées sur la connaissance du rôle de l'élevage



Perspectives



Effet de l'élevage sur les feux? (hyp. ouverture du milieu VS déforestation)

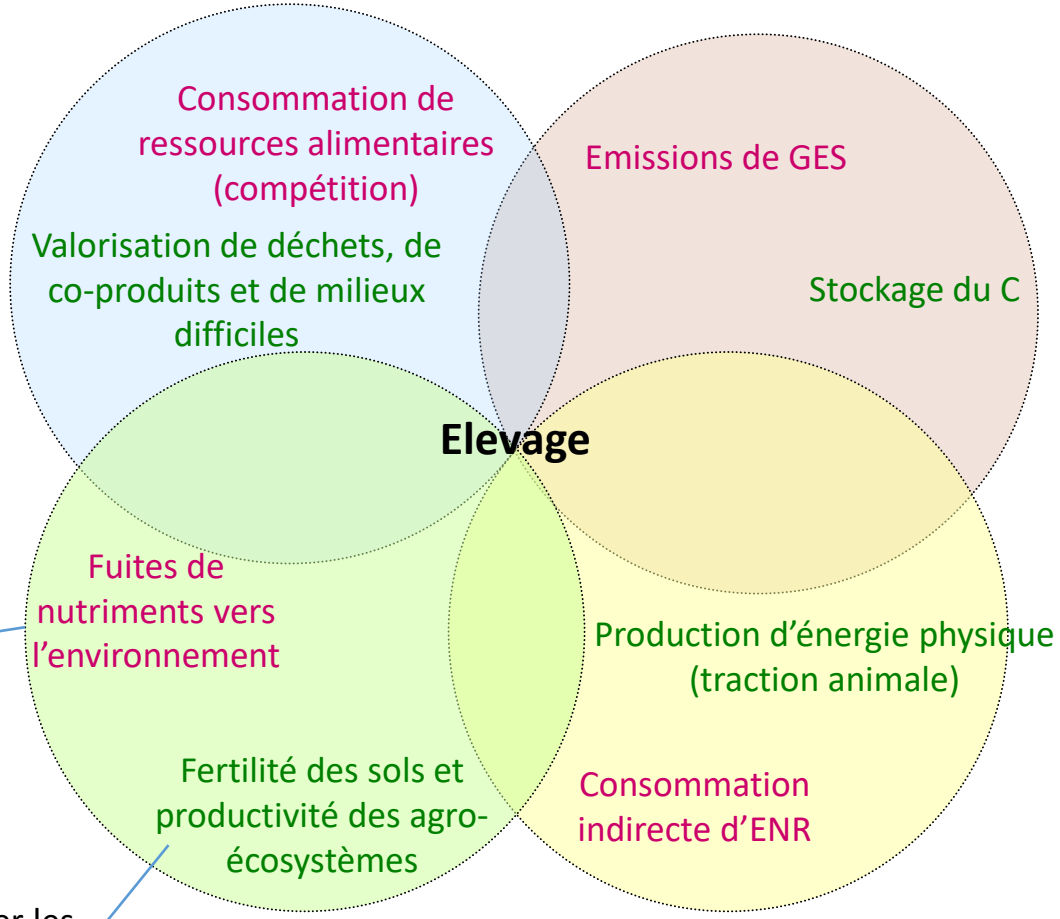
Conditions de l'équilibre du bilan C? (hyp. adapter la charge animale à la productivité du milieu)

Atténuation du changement climatique

Quelles interactions entre biodiversité des animaux d'élevage – diversité de l'entomofaune et séquestration du C ? (hyp. coprophages)

Perspectives

Pourquoi intensifier par l'élevage? (hyp. double retour sur investissement)



Intensification écologique

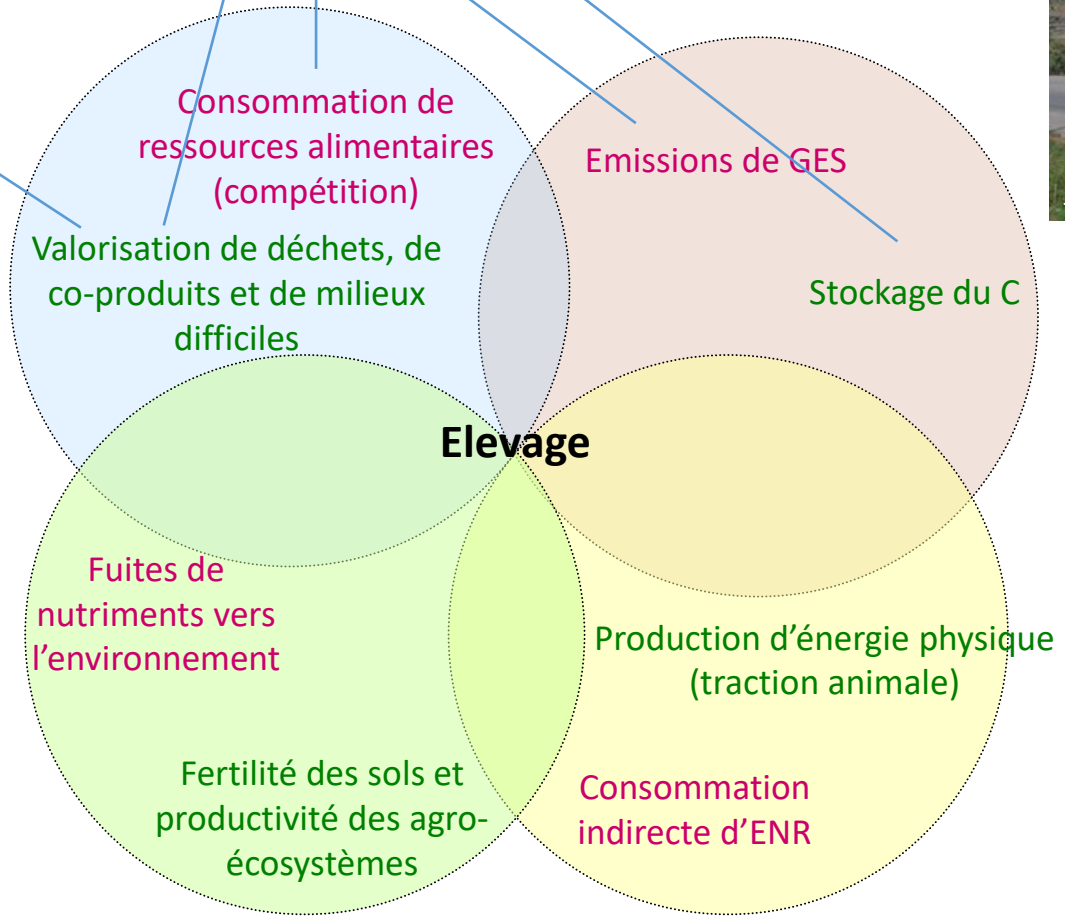
Pourquoi concentrer les nutriments quand la ressource est rare? (hyp. augmenter l'efficience)

Conclusion

Economie circulaire

Quelles capacités de transformation / recyclage? (hyp. complémentarité ruminants VS monogastriques)

Quels effets indirects de la valorisation de ressources locales? (hyp. transport)



Perspectives

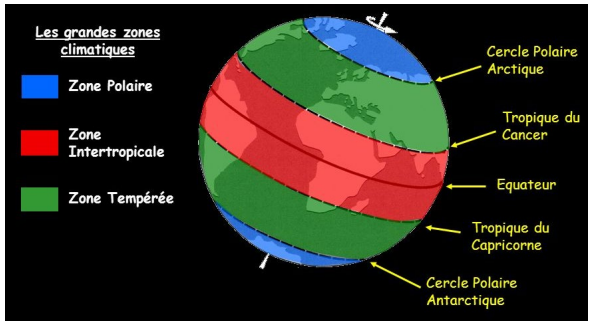
- Proposer un **cadre conceptuel** de modélisation stock-flux
  - Définir différents modèles conceptuels: n= 5?
    - Identifier les concepts clefs communs et spécifiques → ontologie?
    - Clarifier leur nature → comment définir périmètre, composantes, types de flux?
    - Décrire les méthodes d'évaluation et indicateurs associés
  - Résoudre un certain nombre de questions méthodologiques
    - Intégration de modèles conceptuels (changement d'échelle, allocation)
    - Intégration de méthodes d'évaluation (périmètre, salient stakeholders)
  - Réfléchir à un cadre hybride intégrant ces différents modèles conceptuels?
    - Lien avec d'autres cadre d'analyse englobant?
      - Socio-agro-écosystème? Lescourret et al., 2015
      - Agro-food-waste-energy system?
      - etc.

Hamilton et al., 2015

Perspectives

Eprouver et utiliser ce **cadre conceptuel** :

- Proposer des recommandations sur l'utilisation des différents modèles conceptuels
- Approfondir chacun des modèles conceptuels
- Approfondir le rôle de l'élevage au travers de gradients:
  - de chargement animal
  - d'intensification
  - de contextes pédo-climatiques
  - d'anthropisation du milieu



Gradient d'intensification

A. Thévenot
(2011-2014)

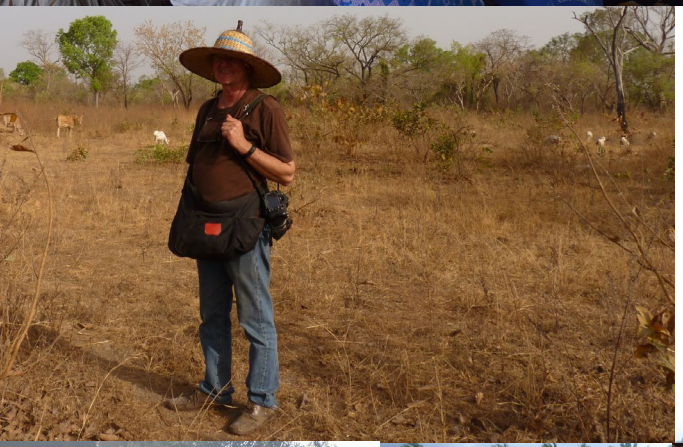
Responsable R&D process, du volet « responsabilité sociétale des entreprises » (RSE) et du bilan carbone d'un groupe agroalimentaire de produits de la mer à Cancale

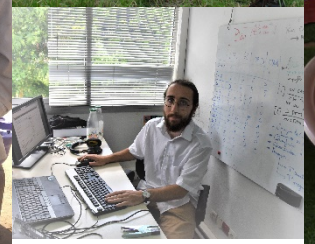
M.H. Assouma
(2013-2016)

Chercheur au CIRAD à l'UMR Selmet à Bobo-Dioulasso

M. Grillot
(2015-2018)

Chargée de Recherche INRAe à l'UMR AGIR à Toulouse



Merci !

Seul on va plus vite,
ensemble on va plus loin !