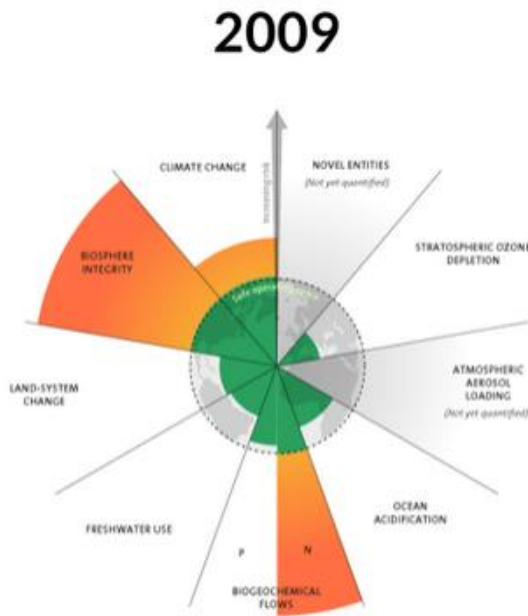


L'autonomie en azote, un indicateur pour l'évaluation et la (re)conception des systèmes

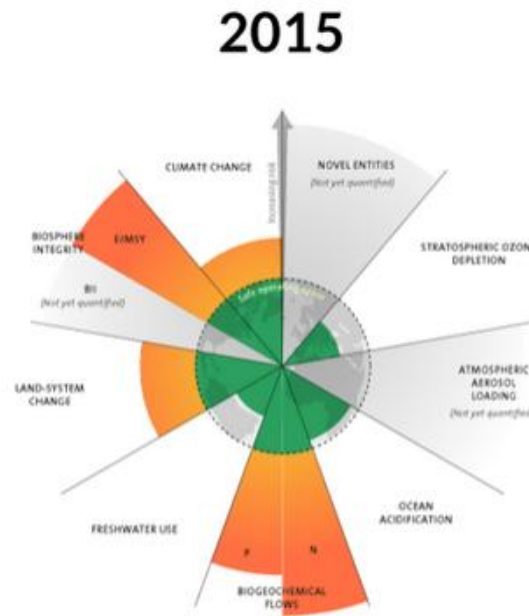
Fabrice Beline, INRAE, UMR SAS

Juin 2026

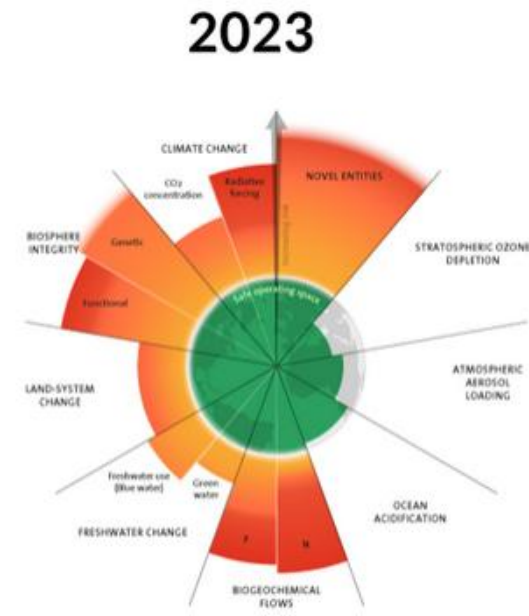
Limites planétaires & nutriments



3 boundaries crossed



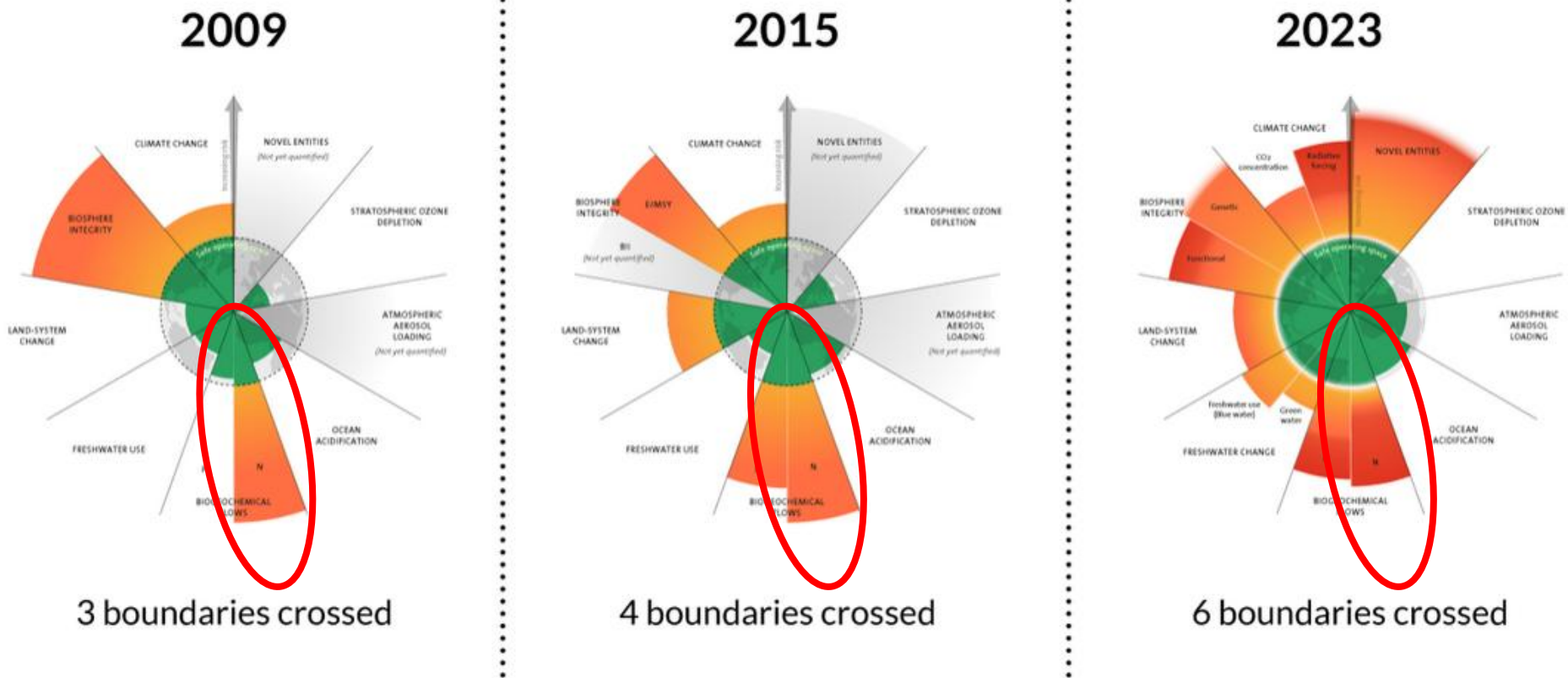
4 boundaries crossed



6 boundaries crossed

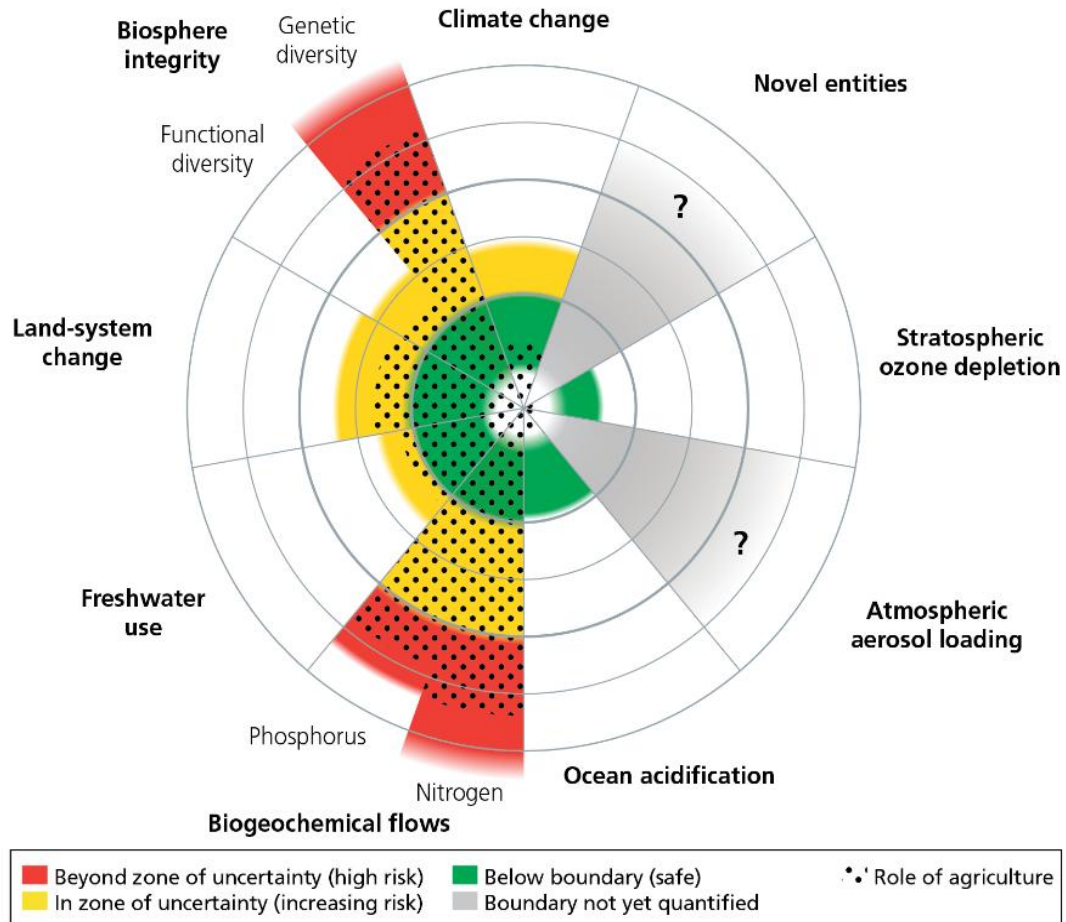
L'évolution du cadre des limites planétaires. Source : [Stockholm Resilience Center](#) Licence CC BY-NC-ND 3.0.

Limites planétaires & nutriments



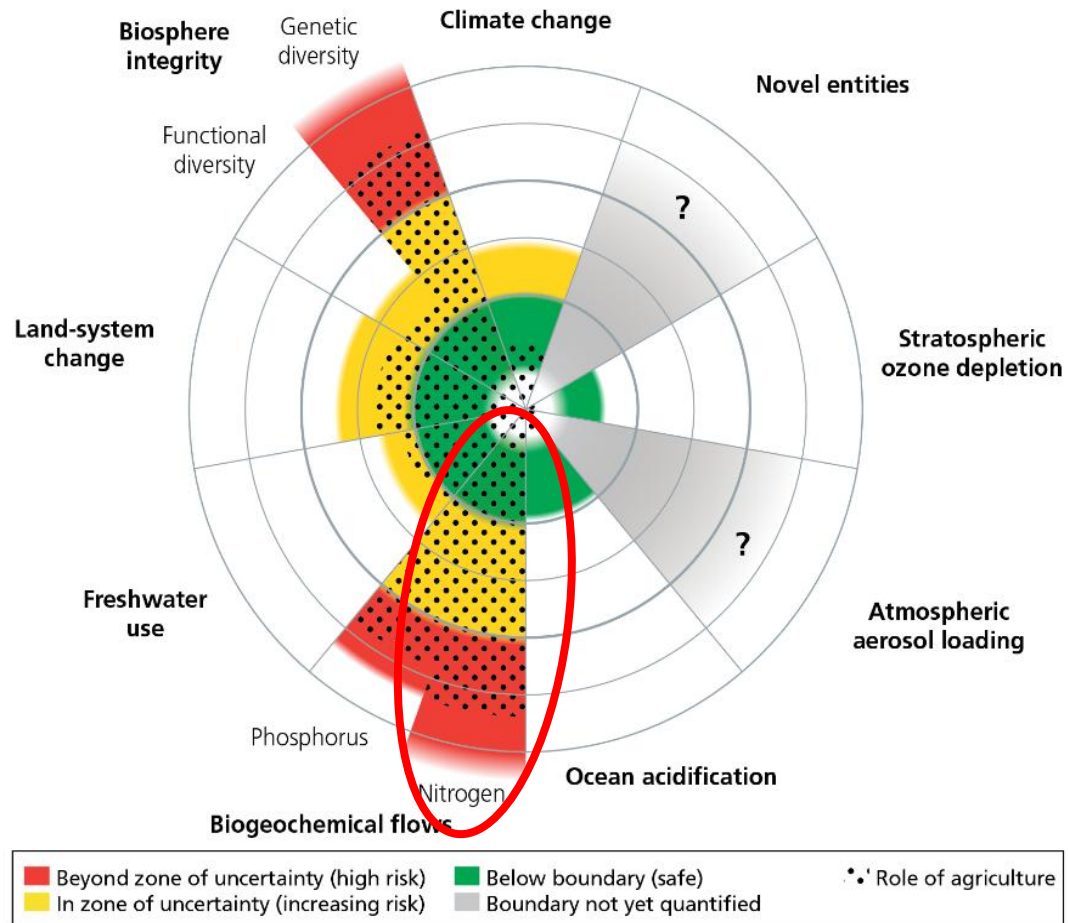
L'évolution du cadre des limites planétaires. Source : [Stockholm Resilience Center](#) Licence CC BY-NC-ND 3.0.

Limites planétaires & nutriments & agriculture



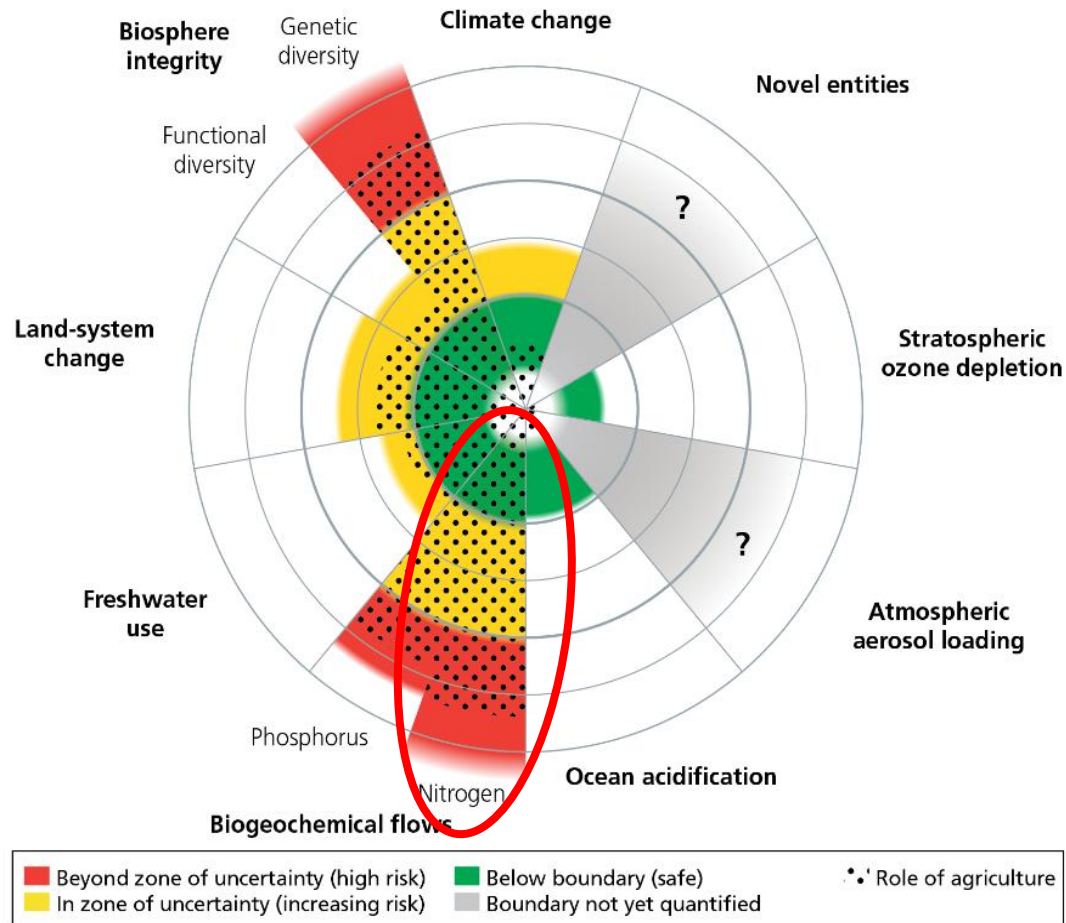
Source: Campbell et al., 2017

Limites planétaires & nutriments & agriculture



Source: Campbell et al., 2017

Limites planétaires & nutriments & élevage



A l'échelle européenne, la contribution de l'élevage au sein du secteur agricole est :

- 80% pour l'acidification des sols et la pollution de l'air (NH_3)
- 73% pour la pollution de l'eau (NO_3^-)

Source: Leip et al., 2015

Source: Campbell et al., 2017

Limites planétaires & solutions

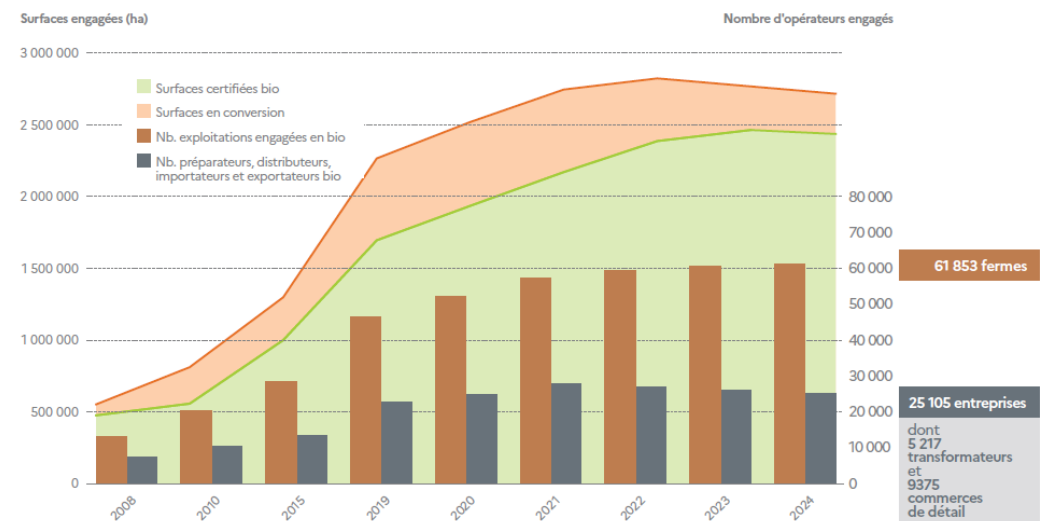
- L'agriculture biologique (AB) peut contribuer à résoudre les problèmes environnementaux et de ressources et est, à juste titre, considérée comme une approche clé pour une utilisation durable des terres (*Sanders et al. 2025*).
- Un soutien des territoires, de la France et de l'Europe (Pacte vert, PAC, ...) avec des objectifs de passer de 10 à 20-25% de la SAU

- Une évolution marquée depuis 2010

- Garder le cap malgré les difficultés

Évolution des surfaces, des fermes et des entreprises engagées en bio

Source: Agence BIO/Organismes certificateurs 2024



L'azote est aussi au cœur des problématiques AB

- Des rendements inférieurs à l'AC de 20-25% principalement dus à une carence en N (*De Ponti et al., 2012 ; Ponisio et al., 2015 ; Seufert et al., 2012*)
 - Et une dépendance à l'AC pour sa fertilisation des terres (*Barbieri et al., 2021 ; Smith et al., 2018; Vergely et al. 2024*)
- ⇒ Une expansion de l'AB, avec mécaniquement une contraction de l'AC, qui pourrait accroître les carences N
- ⇒ **Un objectif d'autonomie crucial pour l'AB au croisement de son expansion et de sa capacité nourricière**

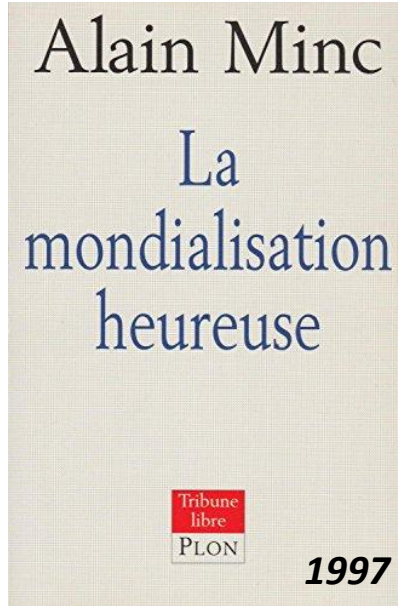
Des solutions proposées ...

- Généralisation des cultures de légumineuses
- Reconnexion de l'élevage et des cultures
- Réduction de la consommation de produits animaux
- Réduction du gaspillage alimentaire
- Recyclage des biodéchets
- Recyclage des excréments humains

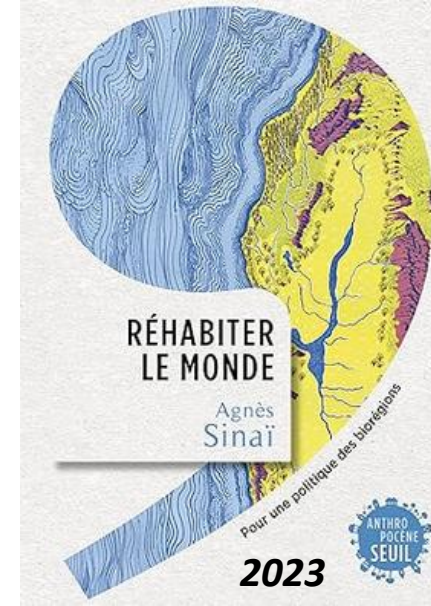
Des solutions proposées ...

- Généralisation des cultures de légumineuses
 - Reconnexion de l'élevage et des cultures
 - Réduction de la consommation de produits animaux
 - Réduction du gaspillage alimentaire
 - Recyclage des biodéchets
 - Recyclage des excréments humains
-
- ⇒ Des travaux réalisés plutôt à des « échelles globales » ou des niveaux d'organisation « macro »
 - ⇒ Qu'en est-il des contraintes territoriales et de l'appropriation des acteurs des territoires ?
 - ⇒ **Développement d'une approche à des niveaux d'organisation « micro »: de l'exploitation au territoire (EPCI)**

L'autonomie des territoires, c'est aussi une notion plus large & politique



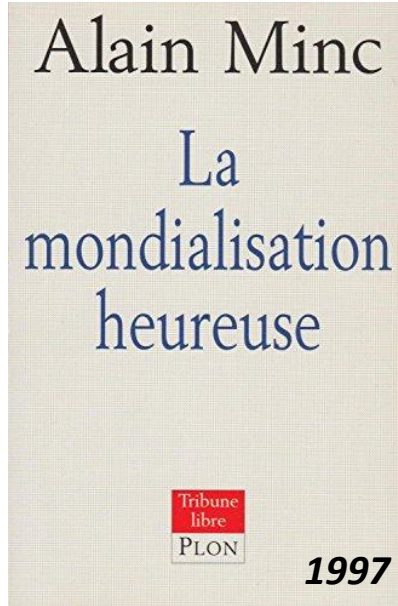
VS



- ✓ Intense accélération des échanges & des productions basées sur les atouts compétitifs des territoires
- ✓ Plus de richesse, plus de diversité de biens, etc..
- ✓ Mais aussi des problèmes sociaux & environnementaux majeurs
- ✓ **Concepts phares de la mondialisation : productivité et compétitivité**

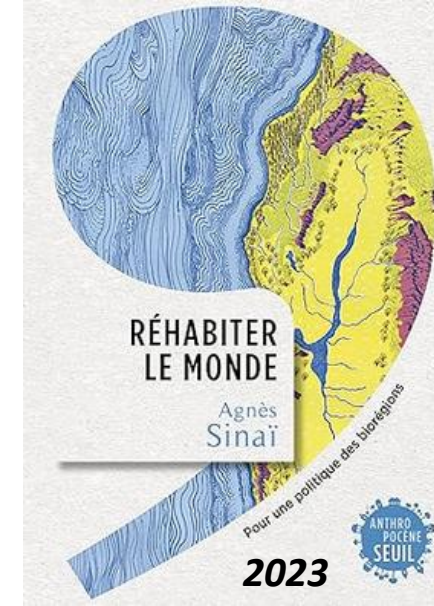
- ✓ Limite des ressources, capacité de charge des écosystèmes
- ✓ Production dans les limites de la région naturelle
- ✓ **Concept phare de la vision biorégionale : l'autonomie**

L'autonomie des territoires, c'est aussi une notion plus large & politique



- ✓ Intense accélération des échanges & des productions basées sur les atouts compétitifs des territoires
- ✓ Plus de richesse, plus de diversité de biens, etc..
- ✓ Mais aussi des problèmes sociaux & environnementaux majeurs
- ✓ **Concepts phares de la mondialisation : productivité et compétitivité**

VS



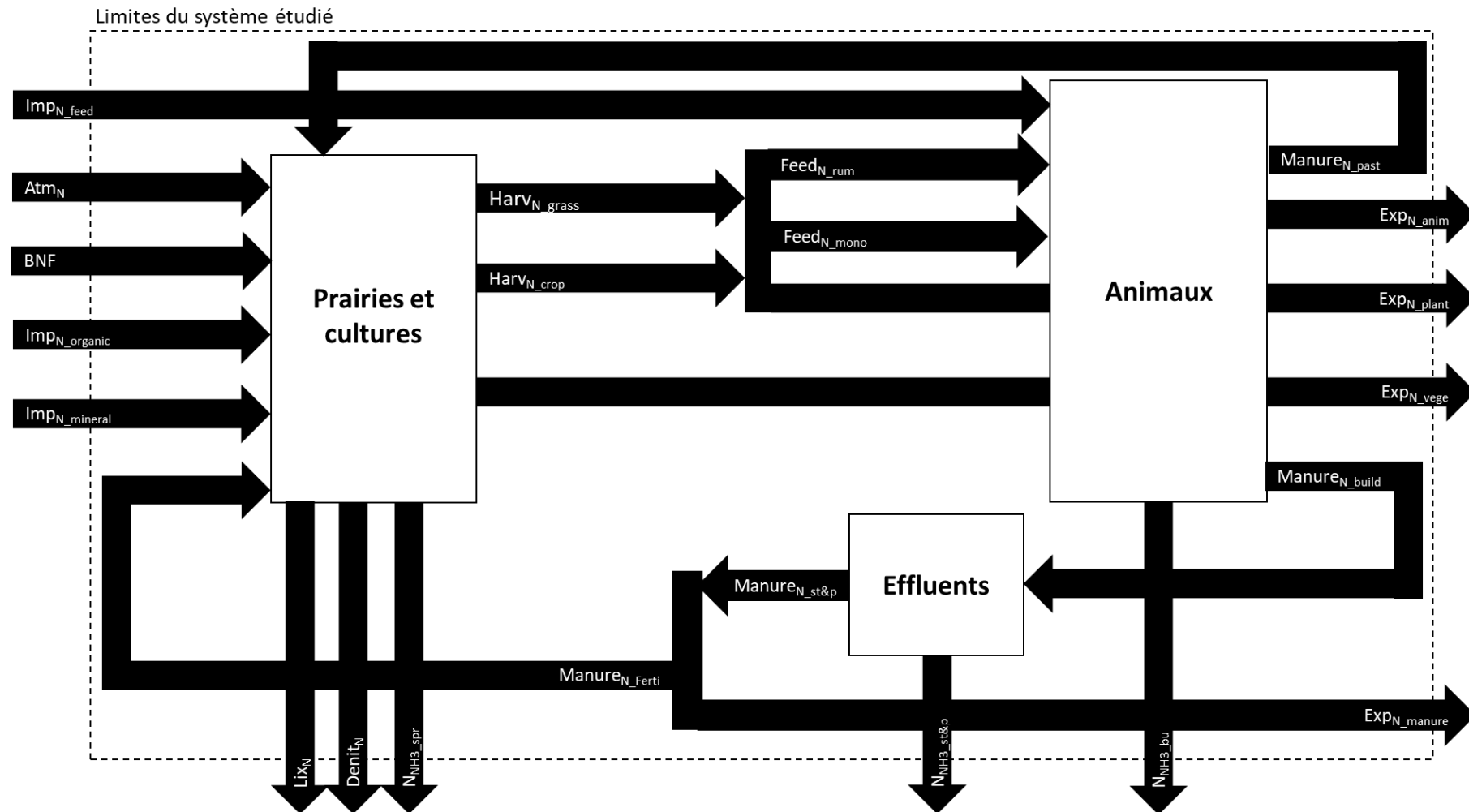
- ✓ Limite des ressources, capacité de charge des écosystèmes
- ✓ Production dans les limites de la région naturelle
- ✓ **Concept phare de la vision biorégionale : l'autonomie**

Méthodologie générale

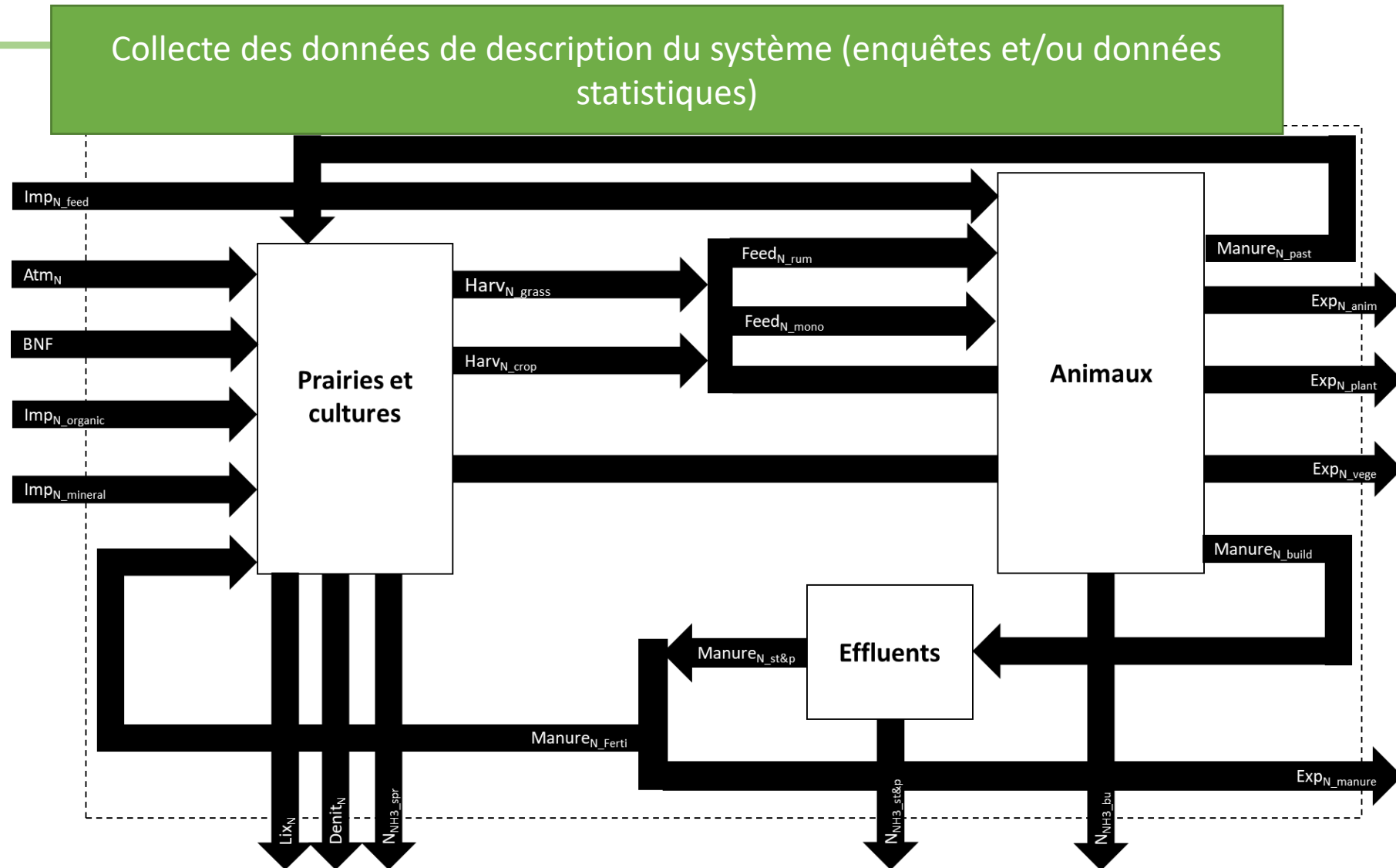
- Définition du périmètre du système
- Conceptualisation, modélisation des flux d'azote et évaluation du système étudié (état initial)
- Partage de connaissance sur l'état initial et sur les objectifs à atteindre
- Re-conception du système pour atteindre les objectifs fixés
- Modélisation des flux d'azote et évaluation du système re-conçus

=> Application à des niveaux d'organisation allant de l'exploitation au territoire

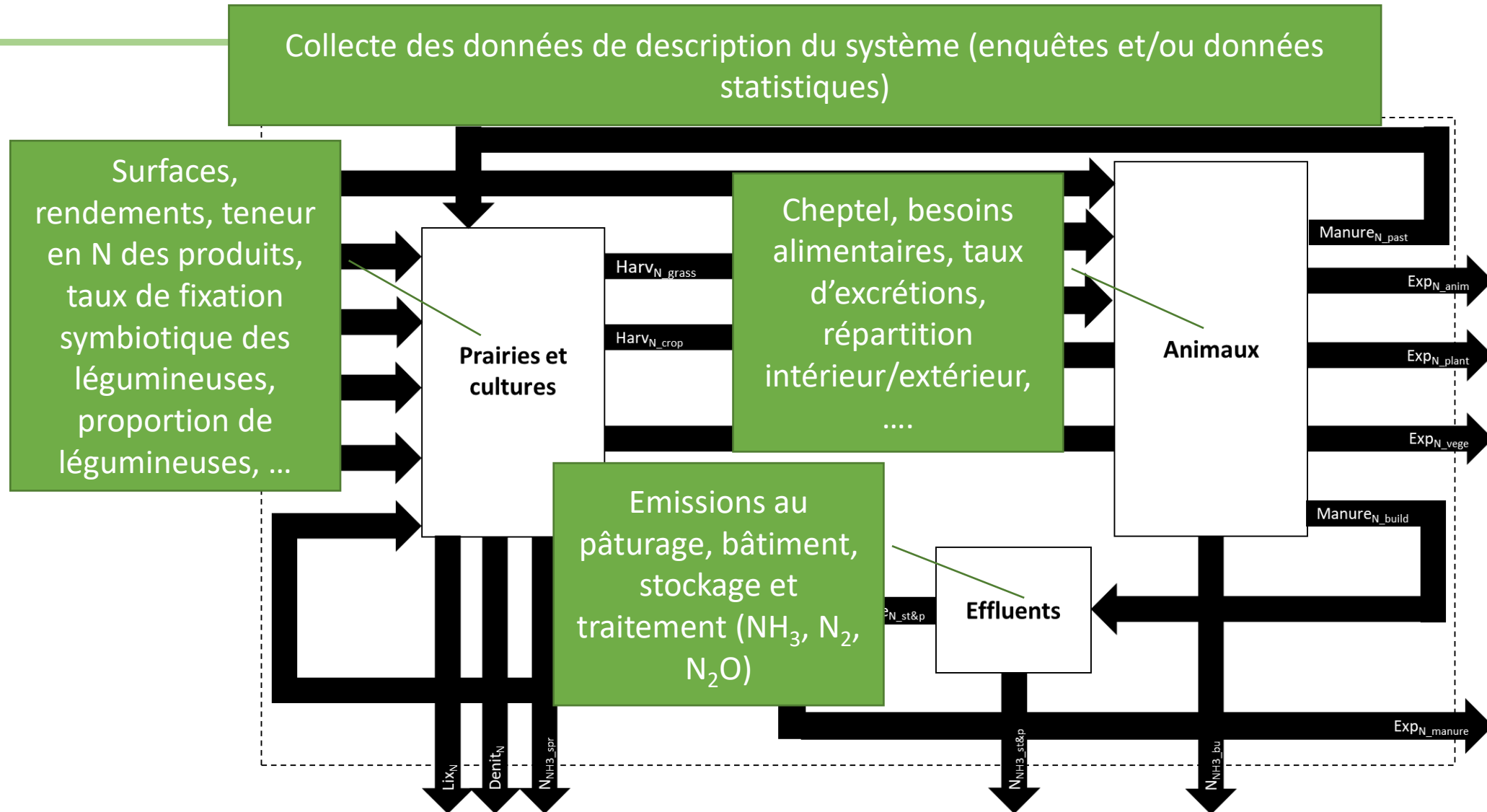
Méthodologie « Conceptualisation - modélisation - évaluation »



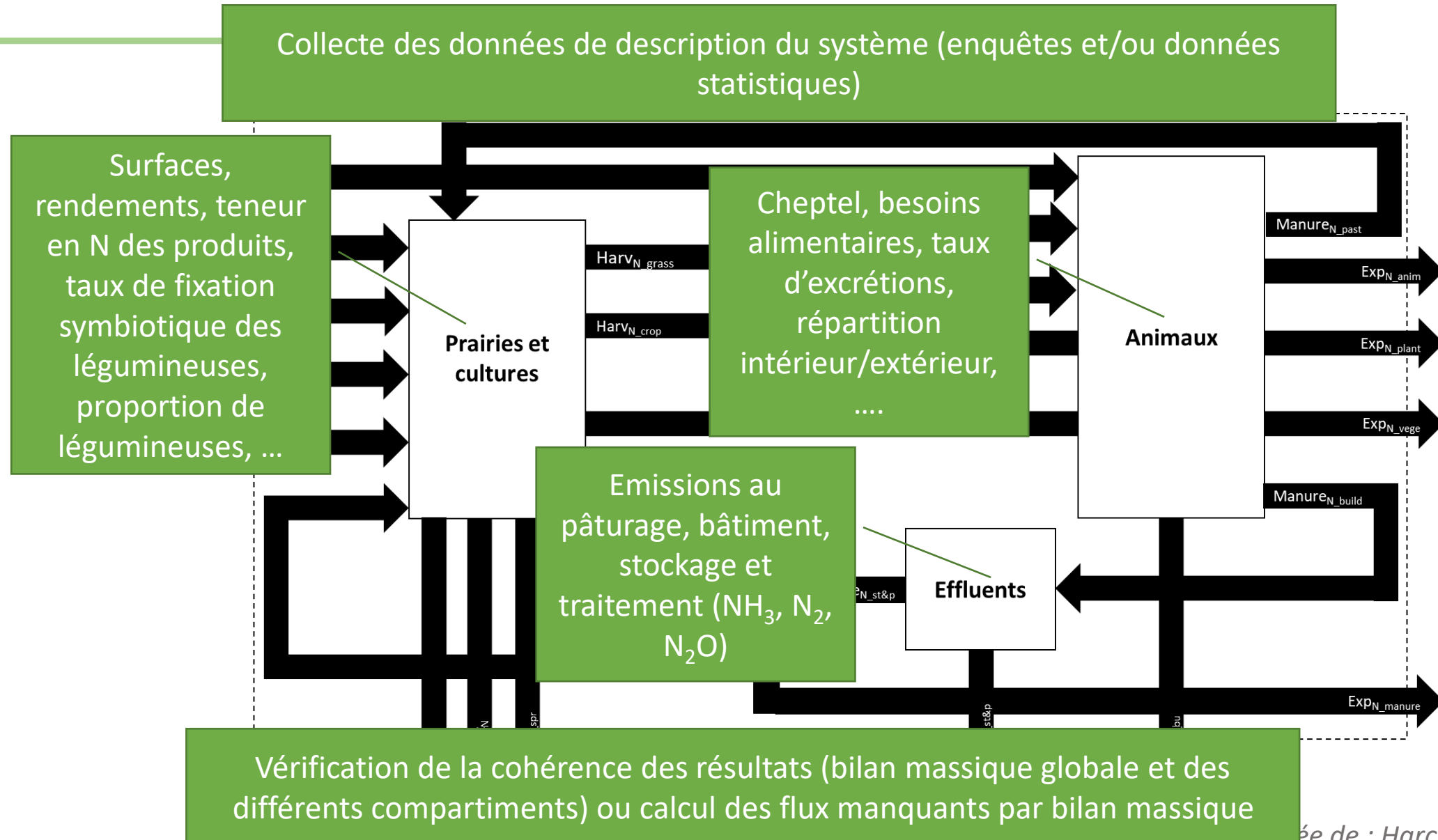
Méthodologie « Conceptualisation - modélisation - évaluation »



Méthodologie « Conceptualisation - modélisation - évaluation »



Méthodologie « Conceptualisation - modélisation - évaluation »



Méthodologie « Conceptualisation - modélisation - évaluation »

Pour évaluer les systèmes à partir de cette modélisation, nous nous intéressons plus particulièrement à 2 indicateurs :

- Autonomie en N du système %

$$A_N = (\text{AtmN} + \text{BNF}) / (\text{AtmN} + \text{BNF} + \text{ImpN_feed} + \text{ImpN_straw} + \text{ImpN_organic} + \text{ImpN_mineral}) \times 100$$

- Productivité surfacique du système en **kgN.ha⁻¹.an⁻¹**

$$N_{\text{out}} = (\text{Exp}_{N_{\text{anim}}} + \text{Exp}_{N_{\text{plant}}} + \text{Exp}_{N_{\text{vege}}} + \text{Exp}_{N_{\text{manure}}}) / \text{SAU}$$

Méthodologie « Conception »

- Ateliers impliquant des acteurs (groupes de 5-10 personnes)
- Phase initiale de partage des connaissances et des objectifs
- Liste de leviers mobilisables fournie initialement (littérature) et/ou construite collectivement
- Des « post-it » ou autres formes d'animation

Résultats, enseignements & limites

Complémentarité des niveaux d'organisation considérés

Niveau d'organisation	Exploitation	« Territoire » (EPCI, département, ...)	Global (pays, continent, monde)
Organisation de l'exploitation	+++	-	-
Pratiques et performances agronomiques	+++	++	+
Caractéristiques pédoclimatiques (sols, climat, ...)	+++	++	+
Interactions avec les acteurs « locaux » (circularité, ...)	+	+++	+
Interaction avec les consommateurs (régimes alimentaires, gaspillage, ...)	-	+/-	+++

Documenter les disparités territoriales

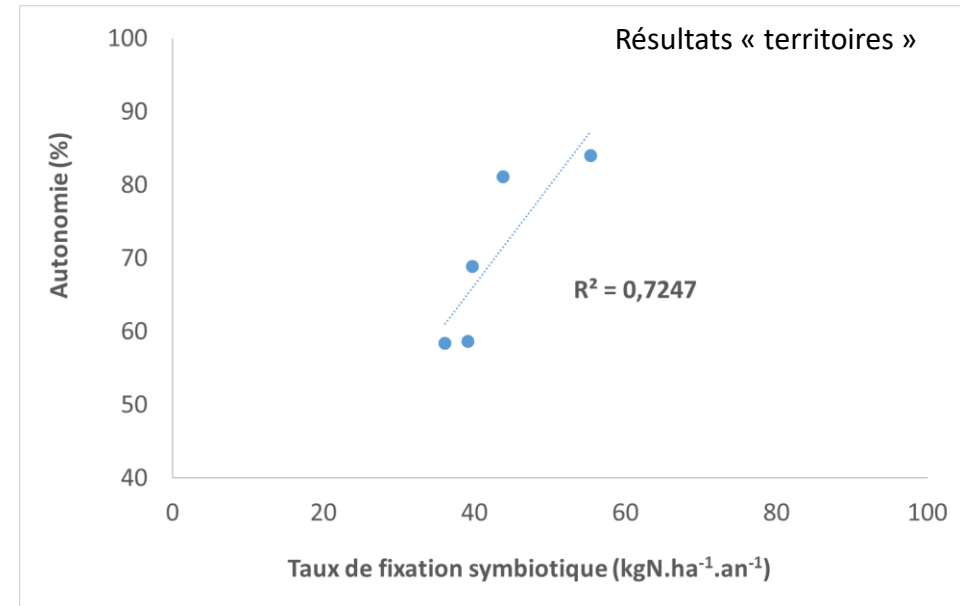
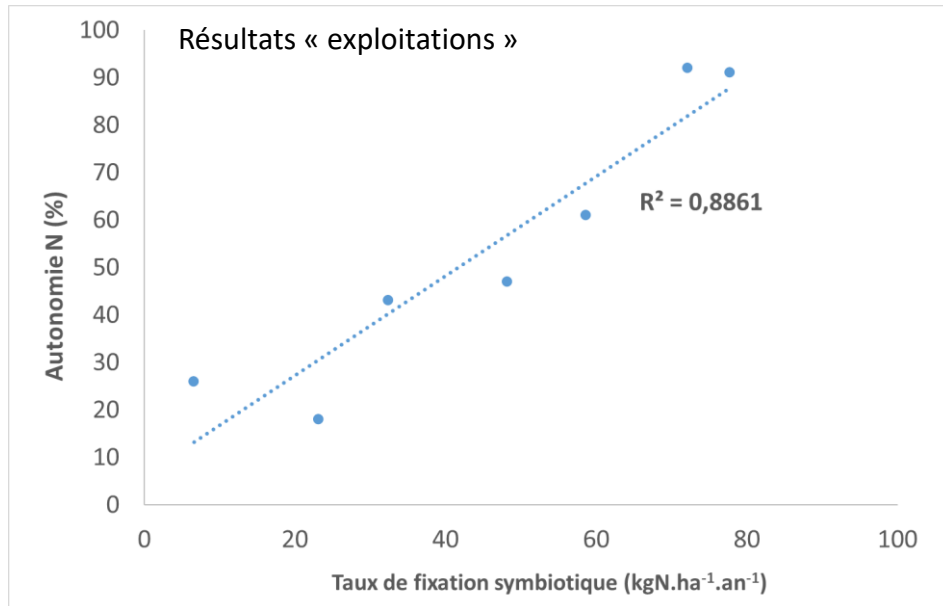
Des leviers pour l'autonomie qui dépendent des territoires:

- Généralisation des cultures de légumineuses
- Reconnexion de l'élevage et des cultures
- Réduction de la consommation de produits animaux
- Réduction du gaspillage alimentaire
- **Recyclage des biodéchets**
- Recyclage des excréments humains

Territoire	N des biodéchets kgN/ha ⁻¹ .an ⁻¹
Ille de France (Région)	15-20
Ille et Vilaine (Département)	3-4
Vienne (Département)	<2

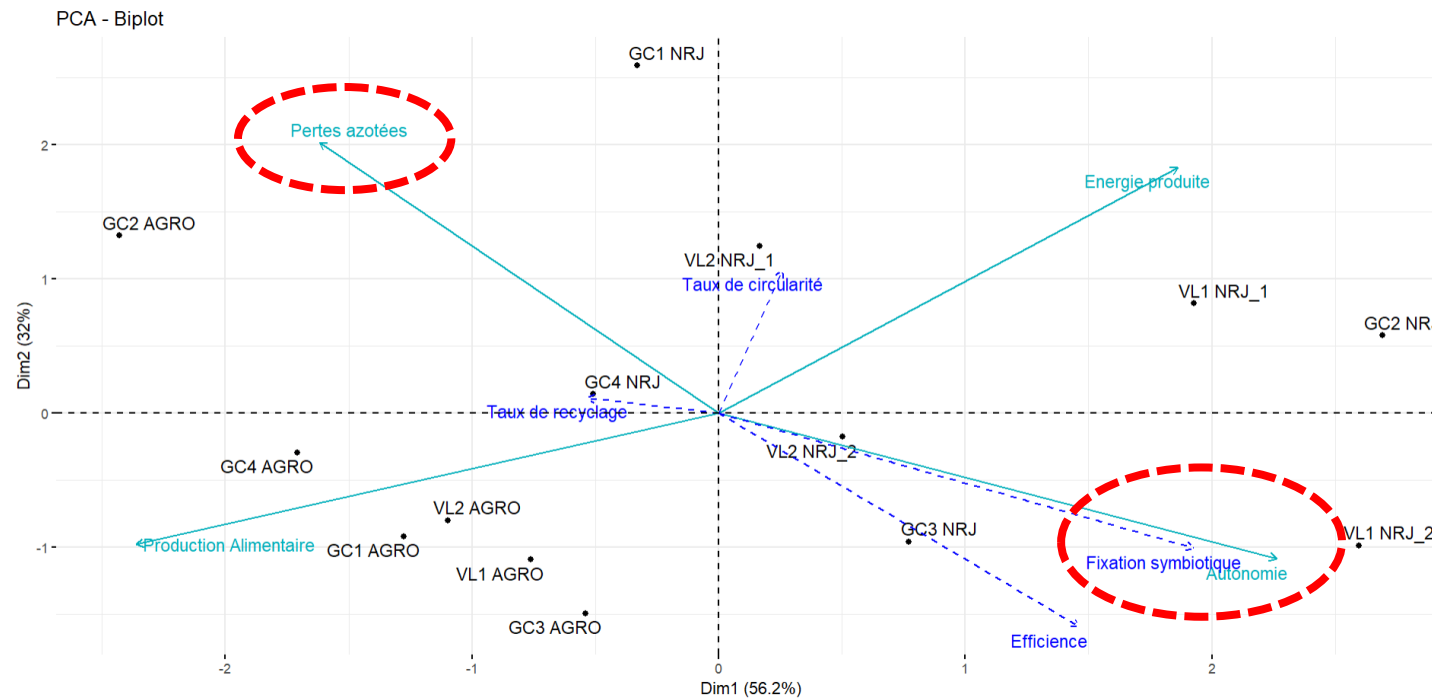
Les déterminants de l'autonomie N

- Analyse d'exploitations ou de scénarios territoriaux contrastés: **la fixation symbiotique**



Les déterminants de l'autonomie N

- Analyse d'exploitations ou de scénarios territoriaux contrastés: **la fixation symbiotique**
- Analyse d'exploitations « similaires (AB) » et de leurs évolutions: **les pertes (NH_3 , N_2 , NO_3^-)**



Les déterminants de l'autonomie N

⇒ L'élevage en situation paradoxale car il favorise la fixation symbiotique (ruminants) mais tend à augmenter les pertes à travers la gestion des effluents (NH_3)

- Diminuer l'élevage de ruminants tend à réduire l'autonomie avec la diminution des cultures fourragères avec légumineuses que la culture de légumineuses à graine compense difficilement (S3)

INDICATEURS	S1 « TENDANCIEL »	S2 OPTIMISATION AGRONOMIQUE, ZOOTECNIQUE ET TECHNIQUE	S3 VERS PLUS DE PROTEINES VEGETALES	S4 VERS UNE PRODUCTION DE PROTEINES VEGETALE ET D'ENERGIE	S5 ATTENTE S TERRITORIALES
ANT (%)	58.4	68.9	58.6	84.0	81.1
ANAA (%)	93.1	100	100	100	100
NUE (%)	37.5	45.8	48.2	40.6	39.6
N _{FIX} (KGN.HA ⁻¹ .AN ⁻¹)	36.1	39.7	39.1	55.4	43.8
N _{IN} (KGN.HA ⁻¹ .AN ⁻¹)	78.9	72	83.9	80.7	66.3
N _{OUT} (KGN.HA ⁻¹ .AN ⁻¹)	29.6	33	40.4	32.8	26.3
N _{LOSS} (KGN.HA ⁻¹ .AN ⁻¹)	49.3	39	43.4	48	40.1
N _{CIRC}	0.49	0.53	0.40	0.41	0.55

Les déterminants de l'autonomie N

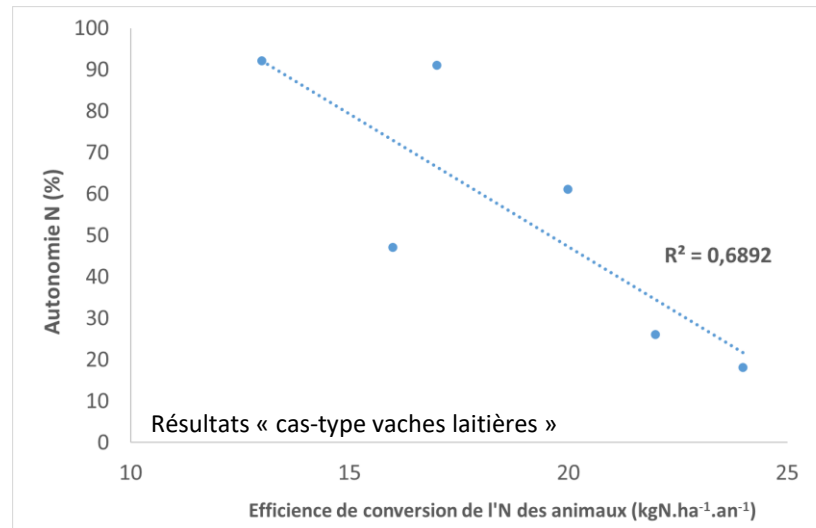
⇒ L'élevage en situation paradoxale car il favorise la fixation symbiotique (ruminants) mais tend à augmenter les pertes à travers la gestion des effluents (NH_3)

- Diminuer l'élevage de ruminants tend à réduire l'autonomie avec la diminution des cultures fourragères avec légumineuses que la culture de légumineuses à compense difficilement (S3)
- Malgré une baisse de cheptel, la méthanisation (S4) et/ou l'extensification de l'élevage (S5) peut permettre de maintenir ou augmenter la fixation symbiotique et donc l'autonomie

INDICATEURS	S1 « TENDANCIEL »	S2 OPTIMISATION AGRONOMIQUE, ZOOTECNIQUE ET TECHNIQUE	S3 VERS PLUS DE PROTEINES VEGETALES	S4 VERS UNE PRODUCTION DE PROTEINES VEGETALE ET D'ENERGIE	S5 ATTENTE S TERRITORIALES
ANT (%)	58.4	68.9	58.6	84.0	81.1
ANAA (%)	93.1	100	100	100	100
NUE (%)	37.5	45.8	48.2	40.6	39.6
N _{FIX} (KGN.HA ⁻¹ .AN ⁻¹)	36.1	39.7	39.1	55.4	43.8
N _{IN} (KGN.HA ⁻¹ .AN ⁻¹)	78.9	72	83.9	80.7	66.3
N _{OUT} (KGN.HA ⁻¹ .AN ⁻¹)	29.6	33	40.4	32.8	26.3
N _{LOSS} (KGN.HA ⁻¹ .AN ⁻¹)	49.3	39	43.4	48	40.1
N _{CIRC}	0.49	0.53	0.40	0.41	0.55

Les déterminants de l'autonomie N

- ⇒ L'élevage en situation paradoxale car il favorise la fixation symbiotique (ruminants) mais tend à augmenter les pertes à travers la gestion des effluents (NH_3)
- Diminuer l'élevage de ruminants tend à réduire l'autonomie avec la diminution des cultures fourragères avec légumineuses que la culture de légumineuses à compense difficilement (S3)
 - Malgré une baisse de cheptel, la méthanisation (S4) et/ou l'extensification de l'élevage (S5) peut permettre de maintenir ou augmenter la fixation symbiotique et donc l'autonomie
 - Une optimisation poussée à l'échelle animale-troupeau (cas BL) tend à réduire l'autonomie N

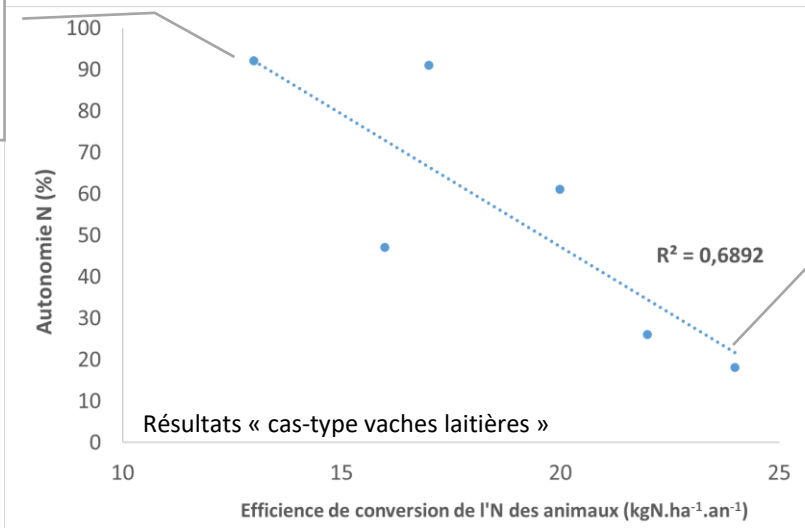


Les déterminants de l'autonomie N

⇒ L'élevage en situation paradoxale car il favorise la fixation symbiotique (ruminants) mais tend à augmenter les pertes à travers la gestion des effluents (NH_3)

- Diminuer l'élevage de ruminants tend à réduire l'autonomie avec la diminution des cultures fourragères avec légumineuses que la culture de légumineuses à compense difficilement (S3)
- Malgré une baisse de cheptel, la méthanisation (S4) et/ou l'extensification de l'élevage (S5) peut permettre de maintenir ou augmenter la fixation symbiotique et donc l'autonomie
- Une optimisation poussée à l'échelle animale-troupeau (cas BL) tend à réduire l'autonomie N

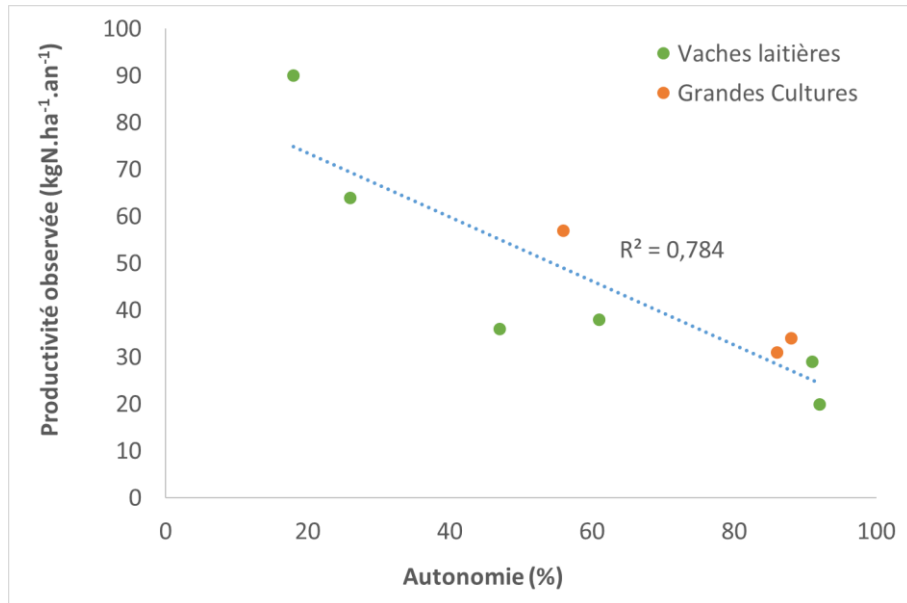
Chargement de 1,1 UGB/ha SFP
Surface en herbe $\approx$ 100% SFP
<0,4 t de concentré/vache & > 90% auto-produits



Chargement de 1,7 UGB/ha SFP
Surface en herbe $\approx$ 50% SFP
1,2 t de concentré/vache 100% acheté

Lien entre autonomie et productivité

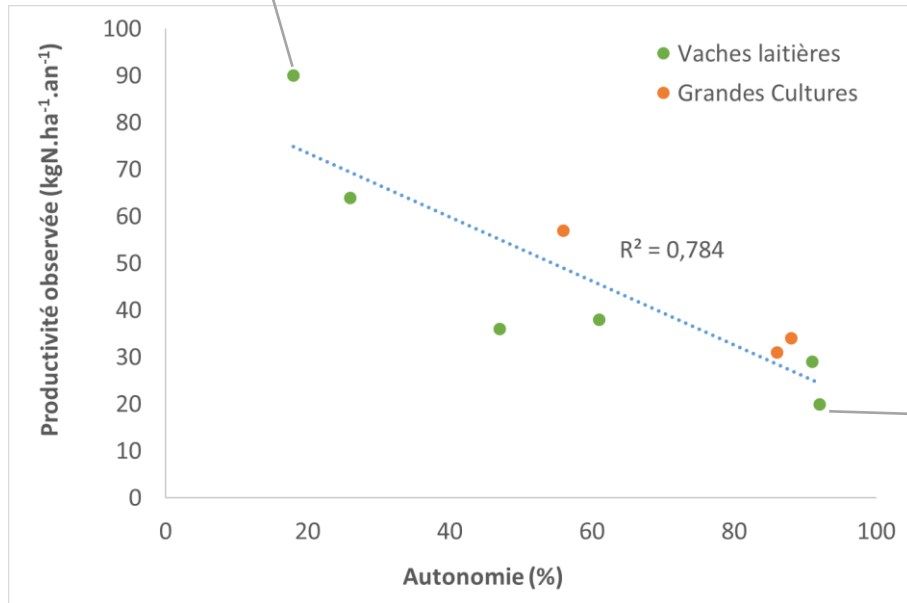
- L'autonomie nécessite l'usage de surfaces internes au système dédiées à la production de fertilité réduisant la productivité surfacique observée à l'échelle du système par rapport aux systèmes moins autonomes



Lien entre autonomie et productivité

- L'autonomie nécessite l'usage de surfaces internes au système pour la production de fertilité réduisant la productivité surfacique observée à l'échelle du système par rapport aux systèmes moins autonomes

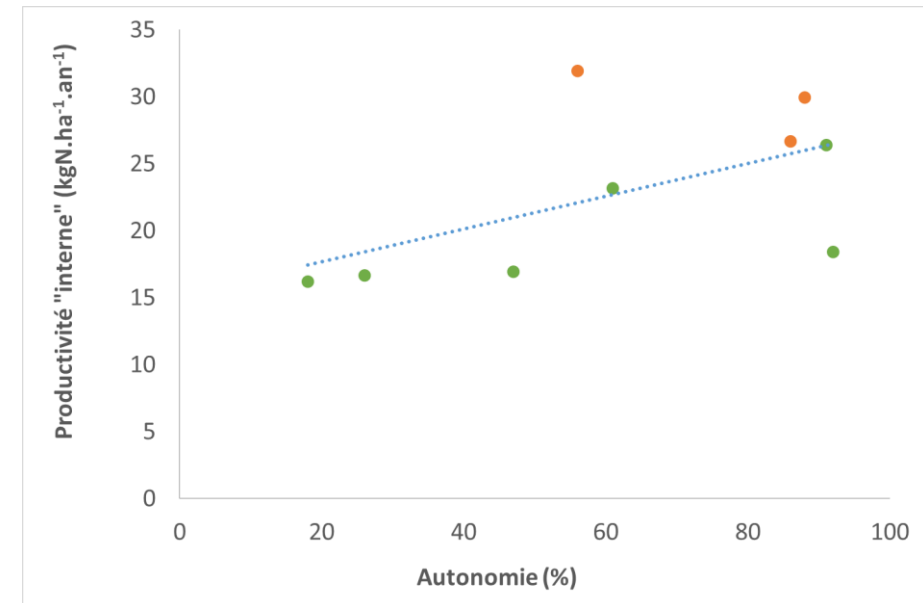
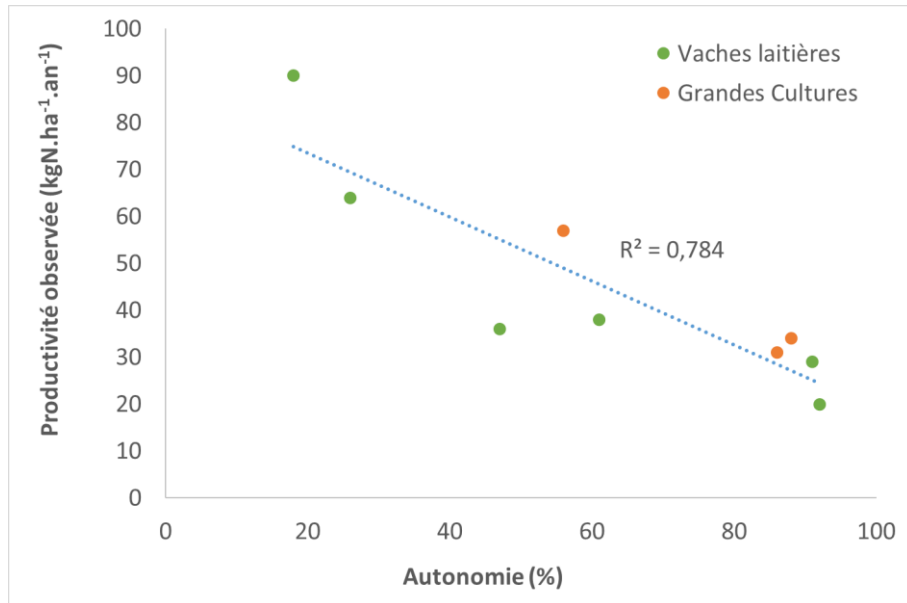
Chargement de 1,7 UGB/ha SFP
Surface en herbe $\approx$ 50% SFP
1,2 t de concentré/vache 100% acheté



Chargement de 1,1 UGB/ha SFP
Surface en herbe $\approx$ 100% SFP
<0,4 t de concentré/vache & > 90% auto-produits

Lien entre autonomie et productivité

- L'autonomie nécessite l'usage de surfaces internes au système pour la production de fertilité réduisant la productivité surfacique observée à l'échelle du système par rapport aux systèmes moins autonomes
- En faisant l'hypothèse que la productivité observée = productivité « interne » + productivité « externe » et en considérant que la productivité « interne » est proportionnelle à l'autonomie du système:
 - Productivité « interne » = $\text{Autonomie}/100 \times \text{Productivité observée}$
 - Des performances assez proches



Des attentes territoriales parfois éloignées de la vision académique

- Résultats de conception du territoire AB de Morlaix Communauté

	S1 Tendanciel	S2 Optimisation agronomique, zootechnique et technique	S3 Vers plus de protéines végétales	S4 Vers une production de protéines végétales et d'énergie	S5 Attentes territoriales
Surface	x3	x3	x3	x3	x3
Cheptel/surface - Ruminants - Monogastriques	≈	≈	↘	↘	≈ ↘
Prairies/surface	≈	≈	↘	↘	↗
Légumineuses fourragères/surface	≈	≈	≈	↗ ↗	≈
Légumineuses à graine/surface	≈	≈	↗ ↗	↗ ↗	↗
Maraichage/surface	≈	≈	≈	↘	↘
Effcience & rendement Culture Animal Effluent	≈	↗ ↗	≈	≈	↗ ↘ ↗
Méthanisation/surface	≈	≈	≈	↗ ↗	≈

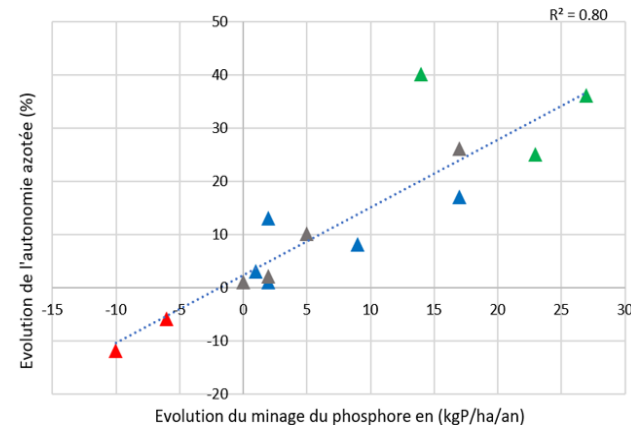
=> Importance de l'histoire du territoire

Quelques réflexions supplémentaires et limites

- L'autonomie, un indicateur d'évaluation « pragmatique » intrinsèquement multicritère dans un cadre conceptuel de « biorégion » ?
=> un regard sur l'N est toutefois largement insuffisant !
- Dans la plupart des modélisations réalisées, nous faisons l'hypothèse d'une variation nulle de stock de N dans les sols !
=> Les sols, un compartiment à mieux prendre en compte!
- Achats d'animaux et de semences la plupart du temps considérés comme négligeables
- L'évaluation des systèmes avec des exportations significatives de produits non consommables par l'homme (fourrages & effluents) est difficile
- Les légumineuses (taux de fixation & proportion dans les prairies) et les variations en fonction des pratiques (chargement animal, fertilisation, espèces, ...) et les rendements des prairies (notamment pâturées) sont des facteurs d'incertitudes majeurs
- Le rôle des monogastriques en lien avec co-produits & produits déclassés reste peu étudié

Perspectives

- Une meilleure prise en compte des sols en termes de stockage mais également de santé/fertilité
 - ⇒ Nouvelle compartimentation, prise en compte des dynamiques spatiales & temporelles, intégration de la notion de fertilité des sols dans le concept de circularité (thèse en cours & projet ABMC)
- Un élargissement de la vision de l'autonomie à l'énergie & au phosphore (travaux en cours, UMR SAS)



- Consolidation et élargissement méthodologique de la (co)conception (PostDoc en cours et thèse à venir)
 - ⇒ Développement d'une méthodologie de co-conception(-évaluation) basée sur une méthode de prospective par analyse morphologique (Mora et al., 2020)
 - ⇒ Application à différents niveaux d'organisation (de l'exploitation au territoire) et croisement des résultats pour identifier les propriétés émergentes, compromis et freins