

➤ Café Metabio du 12 décembre 2025 Énergie et l'agriculture biologique: une évaluation sur la base du cycle de l'azote

Souhil Harchaoui¹, Petros Chatzimpiros²

¹UMR SAS, Institut Agro, INRAE

²Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain, Université Paris Cité

➤ Plan de l'animation

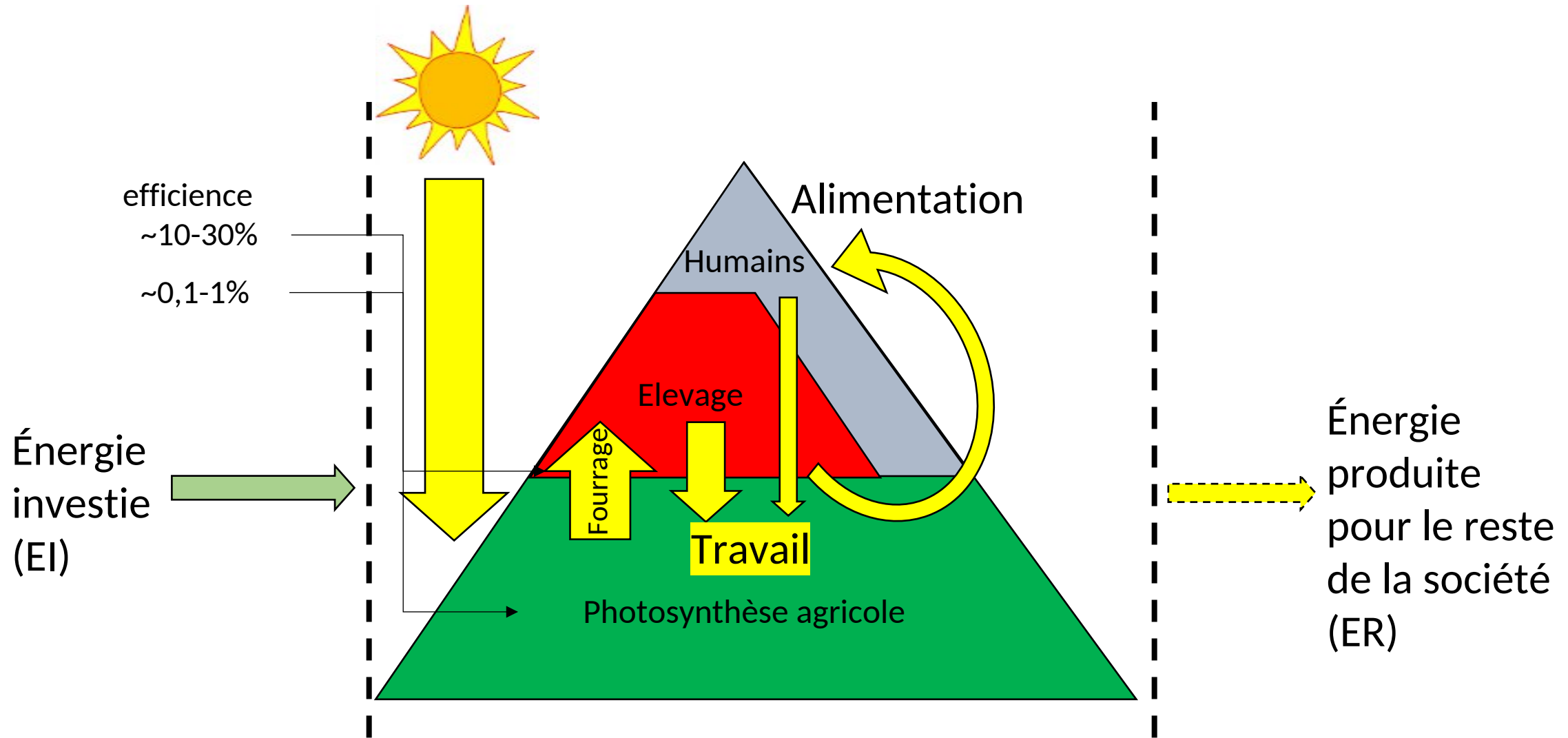
- Métabolisme agricole et bilan énergétique
- L'AB comme toute agriculture consomme de l'énergie
- Modélisation énergétique et azote
- Implications sur l'énergie investie et l'énergie valorisée
- Perspectives

➤ Focus actuel des travaux sur l'énergie en agriculture biologique

- Des travaux centrés sur la comparaison des niveaux de performance énergétique AB et AC (Smith et al. 2015, Chmelikova et al. 2024)
- Peu de travaux sur l'énergie dans les transformations des systèmes agri-alimentaires
- Peu de travaux sur la réduction de la dépendance aux énergies non renouvelables (fossiles)
- Nombreux travaux sur la disponibilité en azote comme facteur limitant de l'expansion de l'AB (Barbieri et al. 2021)

➡ Pas de travaux intégrant les flux d'azote et bilan énergétique (des systèmes AB)

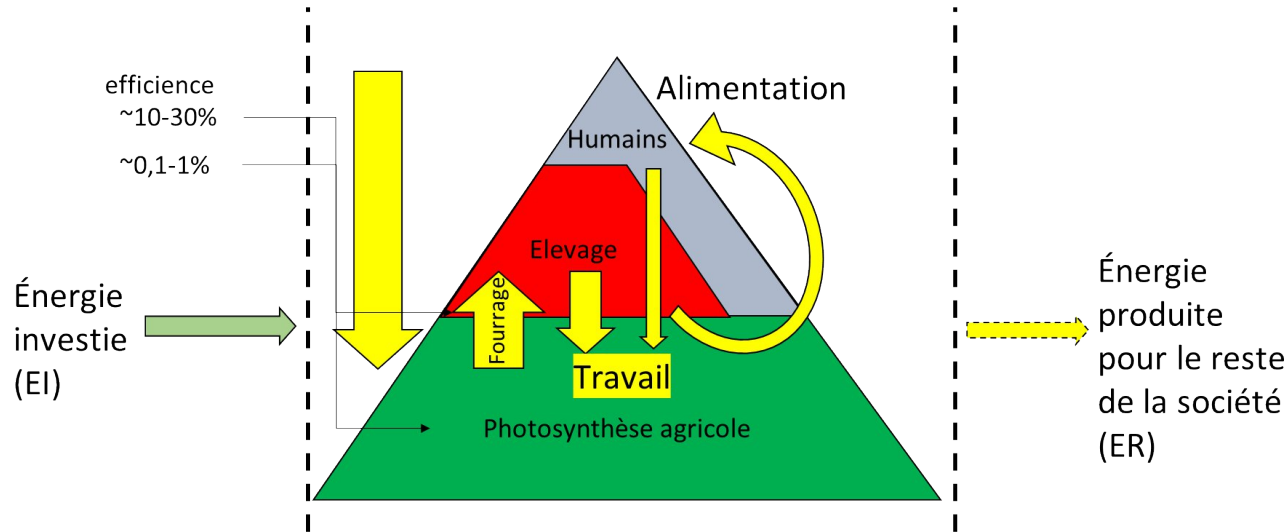
➤ Métabolisme agricole et bilan énergétique



➤ Et selon ce bilan énergétique...

Auto-suffisance

Déficit
énergétique



$EI < ER$

Agriculture

Autres secteurs

$EI > ER$

Agriculture

Autres secteurs

➤ L'AB consomme un peu différemment



Energie investie

Energie directe

Energie indirecte

Travail du sol

Epandage

Récolte

Bâtiments d'élevage

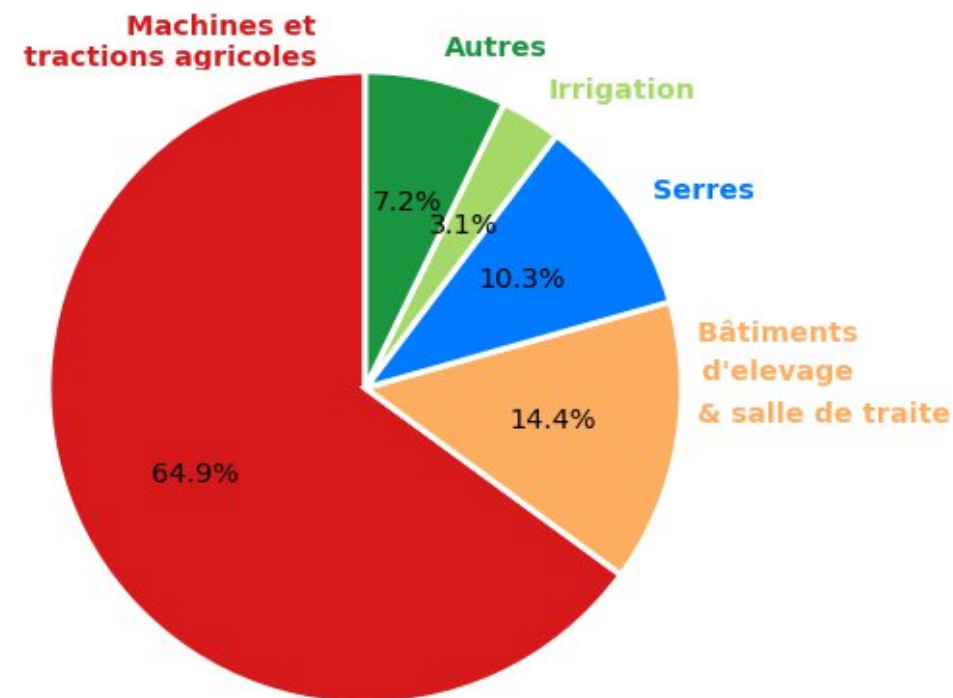
Transport des matières organiques

~~Engrais~~

~~Pesticides~~

Fabrication des engins agricoles

Energie directe en France (Agreste, 2014)



Source: Harchaoui et Chatzimpiros

➤ Objectif

Développement d'un modèle d'évaluation énergétique appliqué à l'agriculture biologique, intégrant:

- les bilans d'azote
- le rendement alimentaire
- l'énergie investie et le potentiel d'énergie valorisée

➤ Méthodes

Fonctionnement énergétique construit sur le ALPHA-model de flux N (Chatzimpiros et Harchaoui, 2024)

- Variables principales:

- Part des prairies dans la SAU: τ
- Part des cultures pour l'alim animale: α_{crop}
- Rendement des cultures et des prairies: Y_{crop}, Y_{grass}
- Efficience (cultures, élevage, effluents) :

NUE_{crop}, NUE_{grass}, β , NCE et recyclage biodéchets ρ

- Rendement alimentaire: Y_{food}

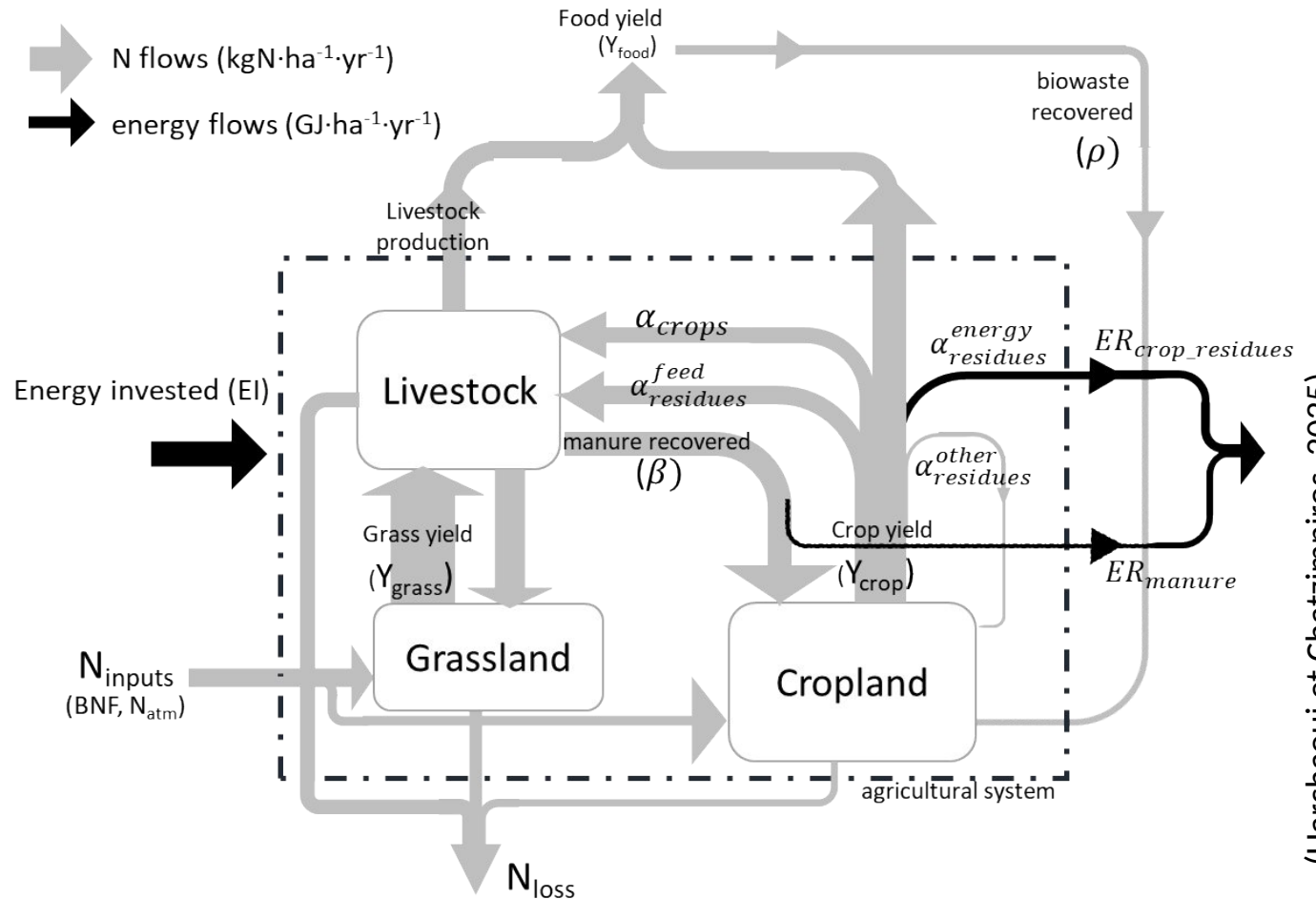
- Estimation de l'énergie investie (EI):

- Energie pour les cultures destinées à l'alimentation humaine: EI_{human_crops}
- Energie pour les systèmes d'élevage: $EI_{livestock}$
- Energie pour le transfert N: $EI_{N_transfer}$

- Estimation de l'énergie valorisée (ER):

- Part des résidus de culture: $EI_{crop\ residues}$
- Part des effluents d'élevage: EI_{manure}

- Energie investie est exprimée en équiv. biomasse pour estimer un bilan net énergétique



(Harchaoui et Chatzimpiros, 2025)

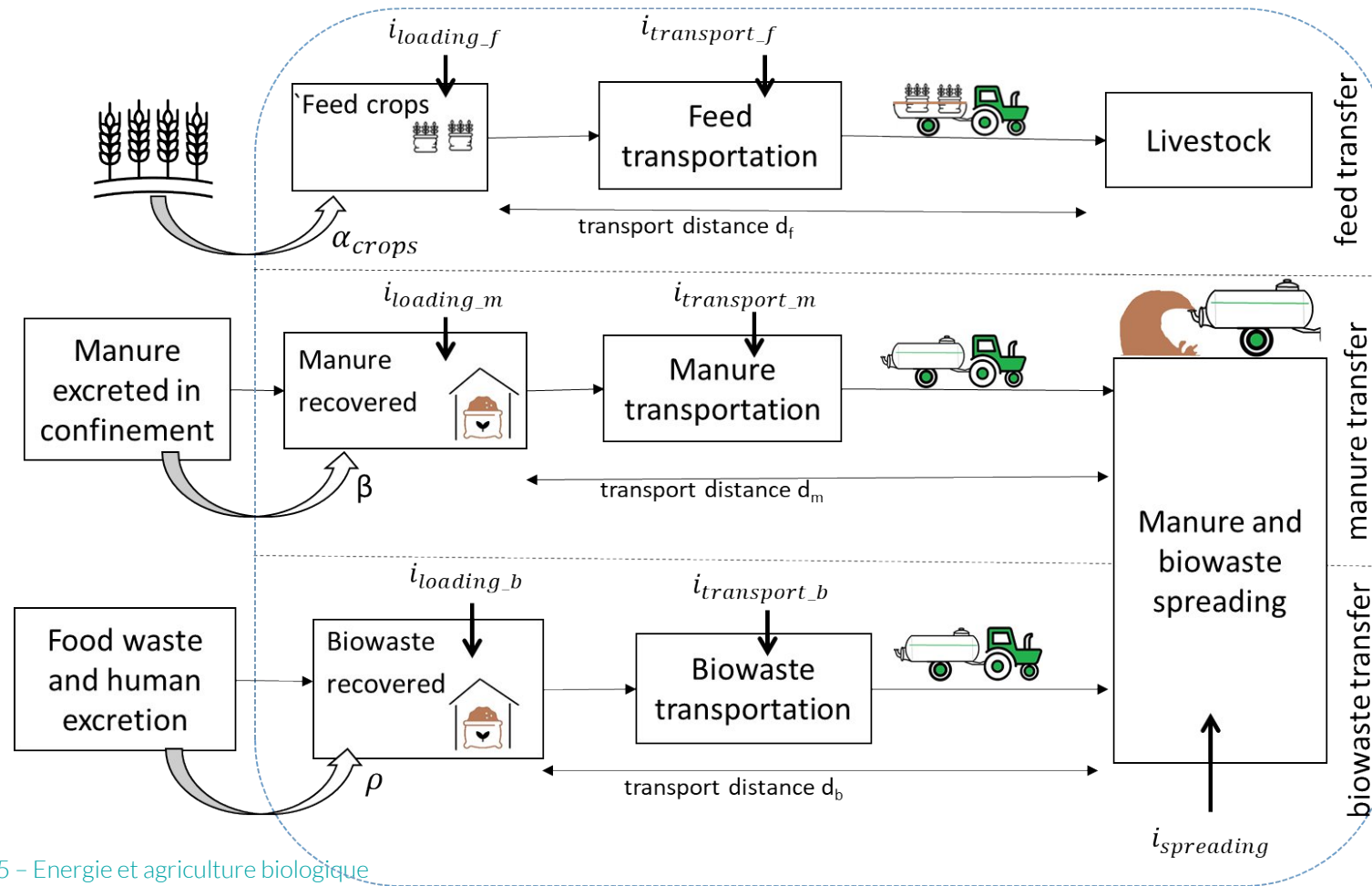
$$EI = EI_{human_crops} + EI_{livestock} + EI_{N_transfer}$$

$$ER = ER_{crop\ residues} + ER_{manure}$$

➤ Energie pour le recyclage de N

$EI_{N_transfer}$ est fonction de:

- facteurs d'intensité (pompage, transport et épandage) et distances de transport
- taux de recyclage des effluents d'élevage (β) et d'excreta humains et biodéchets (ρ)



> Calibration du modèle et simulations

Facteurs d'intensité énergétique à des valeurs fixes dans les simulations

Facteurs d'intensités	Abbrev.	Unité	Energie finale	References	Energie en equivalent biomasse
Intensité énergétique pour les cultures	i_{crop}	GJ ha ⁻¹ (of cropland) an ⁻¹	4	Revue de littérature	13.33
Intensité énergétique pour les prairies	i_{grass}	GJ ha ⁻¹ (of grassland) an ⁻¹	1.33	Revue de littérature	4.44
Intensité énergétique des bâtiments d'élevage	$i_{LV_buildings}$	GJ kgN ⁻¹ (of production)	0.2	Revue de littérature	0.44
Pompage des effluents	$i_{loading_f}$ = $i_{loading_m}$ = $i_{loading_b}$	GJ kgN ⁻¹	1.5·10 ⁻³	(Souček et al., 2017)	5·10 ⁻³
Transport des effluents	$i_{spreading}$	GJ ha ⁻¹ (of cropland) an ⁻¹	0.8	hypothèse	2.66
Epandage des effluents/biodéchets	$i_{transport_f}$ = $i_{transport_m}$ = $i_{transport_b}$	GJ kgN ⁻¹ km ⁻¹	2·10 ⁻³	hypothèse	6.6·10 ⁻³
Fraction de l'énergie valorisée des effluents réinvestie dans le processus de valorisation	rf_{manure}	%	0.17	(Harchaoui and Chatzimpiros, 2018b)	NA
Fraction de l'énergie valorisée par des résidus de cultures réinvestie dans le processus de valorisation	$rf_{residues}$	%	0.32	(Harchaoui and Chatzimpiros, 2018b)	NA

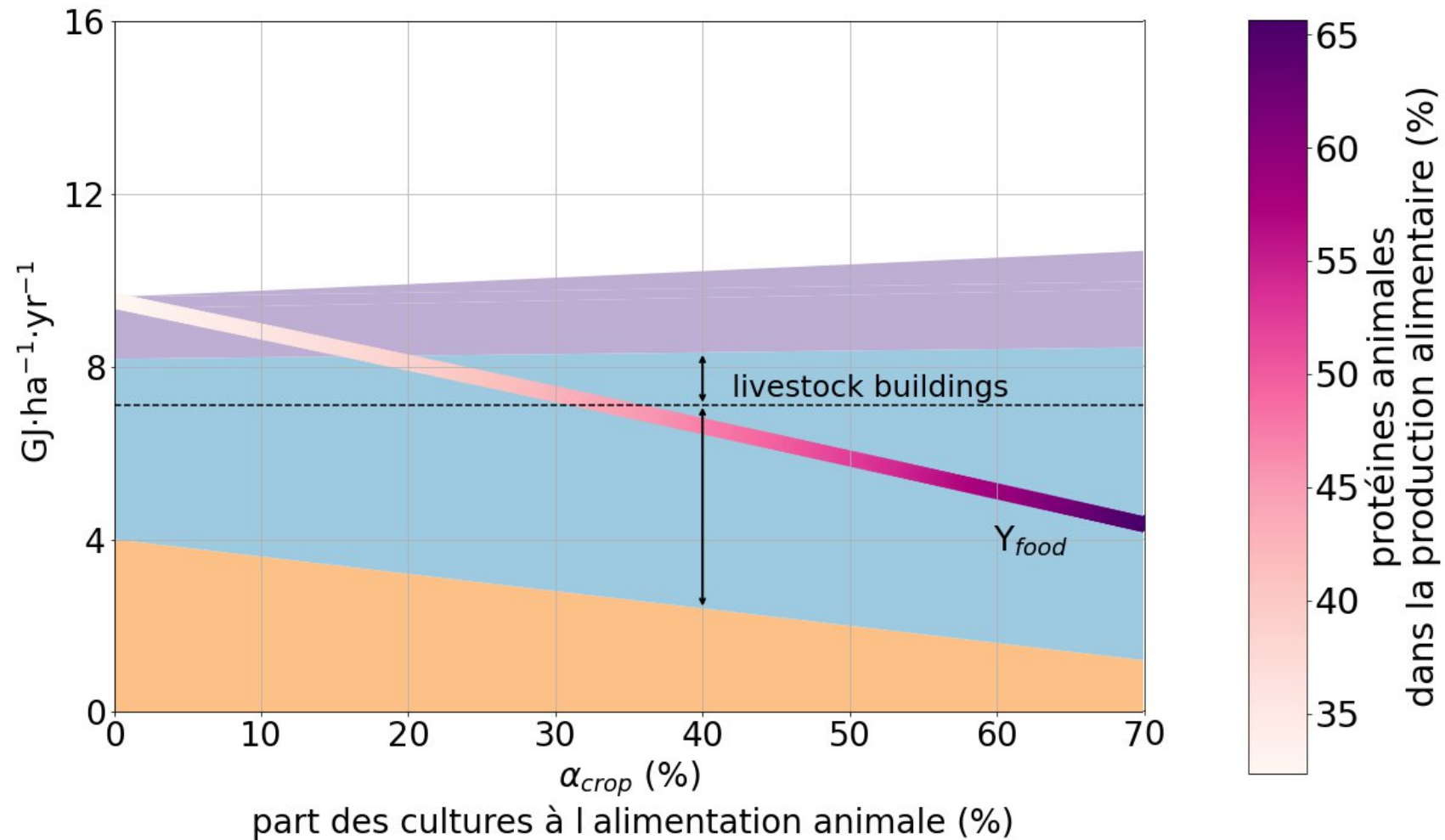
➤ Gamme de valeurs pour les déterminants pour les simulations

Déterminants clés	Gamme de valeurs
Part des prairies dans la SAU (τ)	[30 ; 80] %
Part des cultures à l'alimentation animale (α_{crop})	[0 ; 70] %
Efficience d'utilisation de l'azote des cultures (NUE_{crop})	[45 ; 70] %
Taux de recyclage N (β et ρ)	[30 ; 80] %
Distances de transport (d_m , d_b)	[20 ; 100] km

➤ Impact de la compétition alimentation animale et alimentation humaine sur énergie investie (EI)

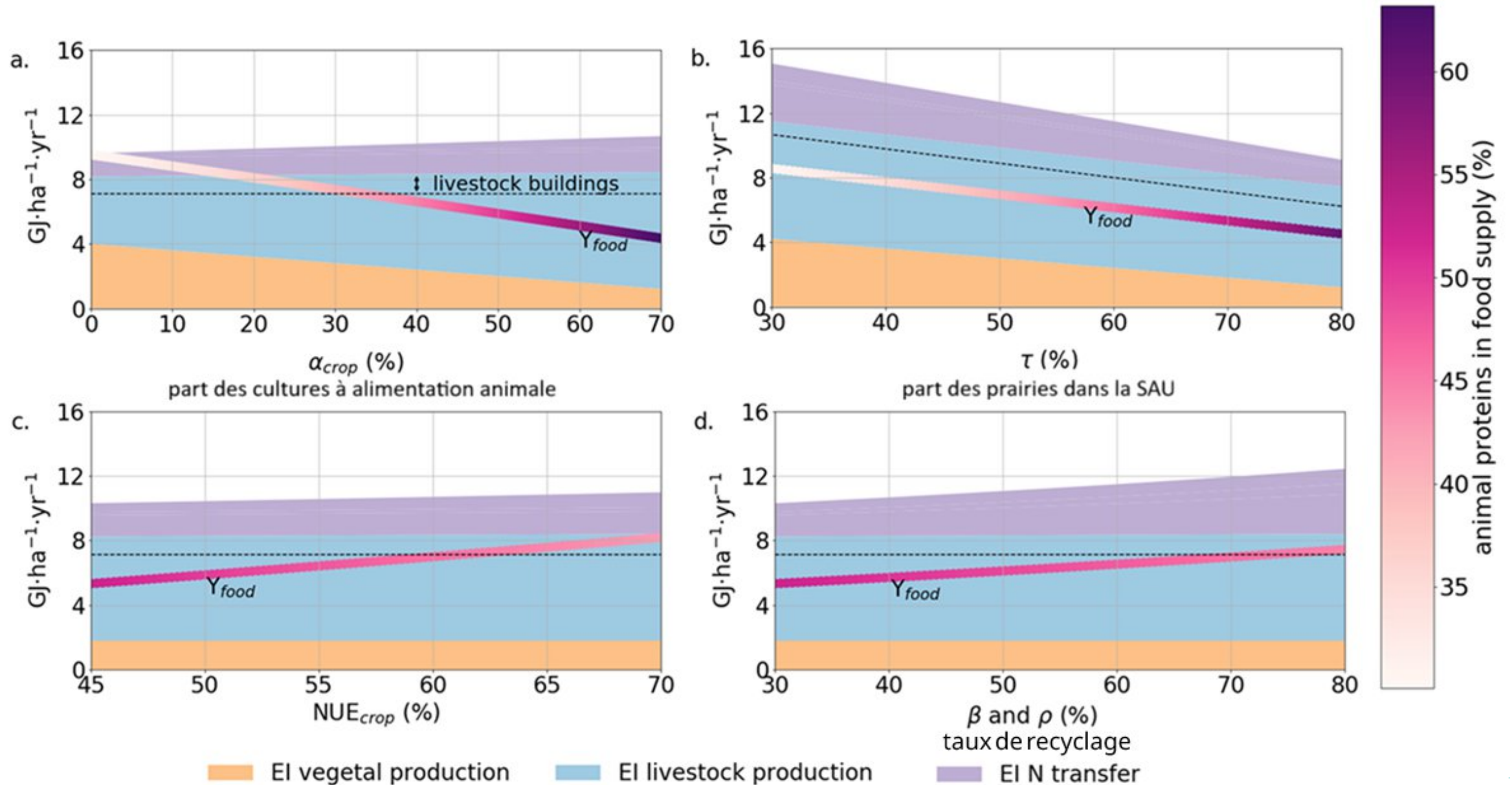
Pour rappel, Y_{food} est le rendement alimentaire (exprimé $\text{GJ ha}^{-1} \text{an}^{-1}$)

Energie investie $EI = EI_{\text{human_crops}} + EI_{\text{livestock}} + EI_{\text{N_transfer}}$

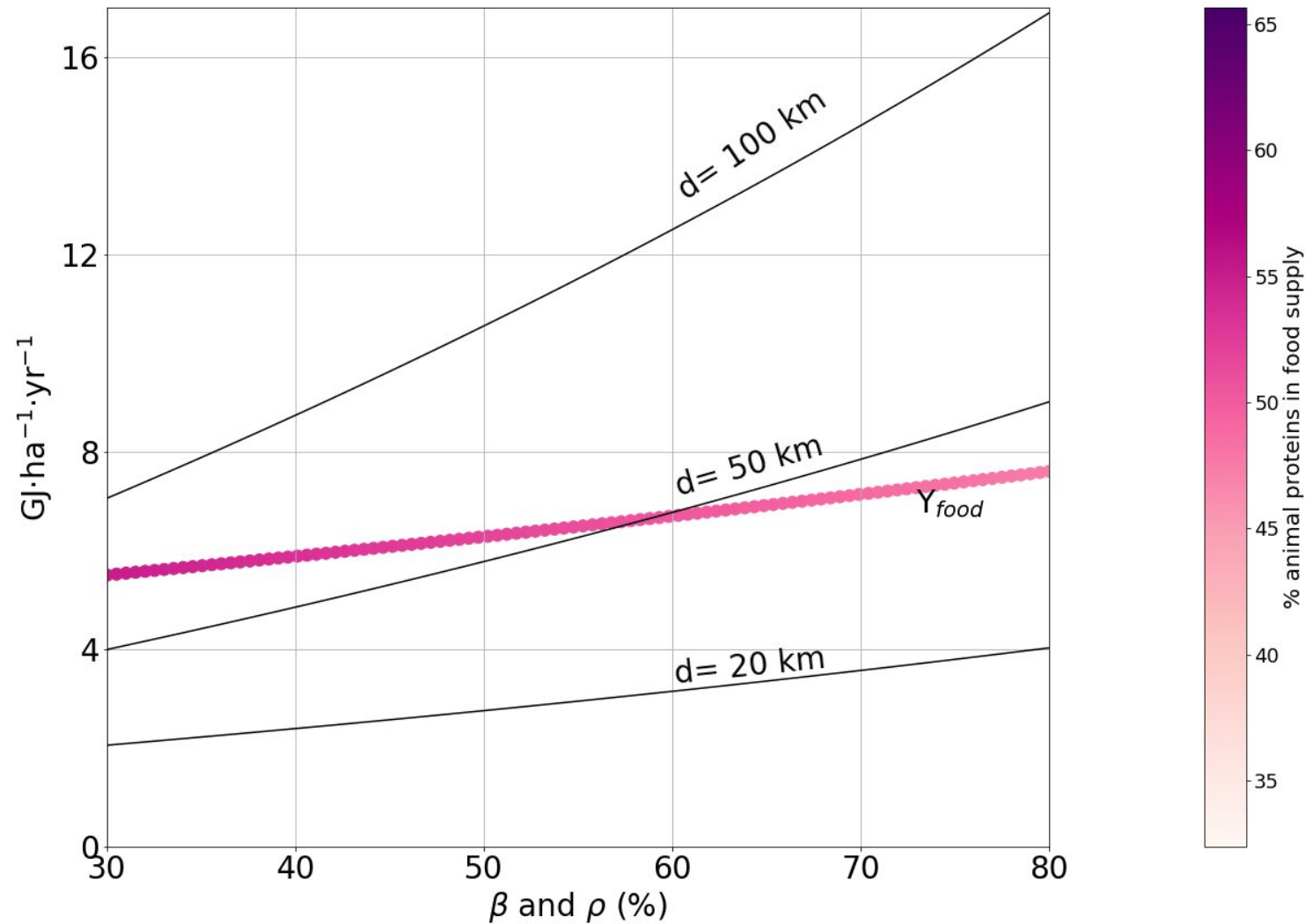


EI vegetal production
 EI livestock production
 EI N transfer

➤ Impact de la part des prairies, efficacité des cultures et taux de recyclage sur FI



➤ Impact des taux de recyclage N et distances d'échanges des nutriments sur EI



% animal proteins in food supply

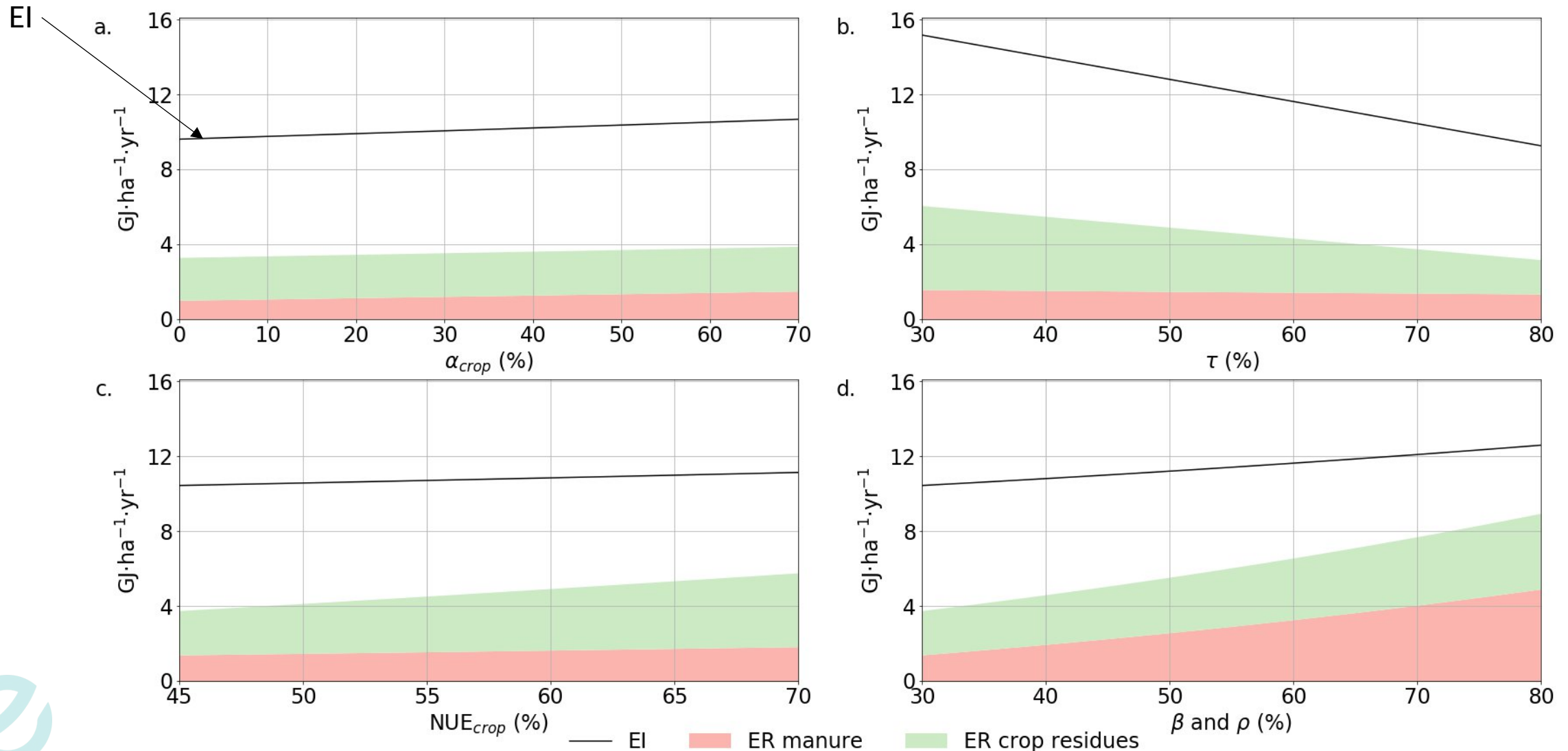
(Harchaoui et Chatzimpiros, 2025)



Intégration culture-élevage et agriculture-ville impactent le bilan énergétique

➤ Valorisation énergétique de biomasse (ER)

En fonction de la compétition alim.humain/animale, de la part des prairies, efficience d'utilisation des cultures et les taux de recyclage



➤ Conclusion

- Rendement alimentaire et bilan énergétique s'améliorent avec une meilleure efficacité et circularité de l'azote
- Doubler la part des prairies peut réduire le déficit énergétique de 25 %.
- Augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'azote peut augmenter la production alimentaire de 50 % et réduire le déficit énergétique de 20 %.
- Les systèmes d'élevage (compétition alim hum./animale, part des prairies, gestion des effluents) ont un rôle prépondérant dans le bouclage du cycle de l'azote et dans le bilan énergétique de l'AB

➤ Perspectives

- Intégrer une analyse énergétique plus fine des pratiques agronomiques (travail du sol, diversification des rotations, culture intermédiaires,...)
- Confrontation de l'outil d'analyse avec le terrain et évaluation de scénarios
- Réaliser une analyse spatiale des flux dans un territoire pour affiner cette modélisation azote-énergie

➤ Merci pour votre attention et vos questions

Petros Chatzimpiros LIED, Université Cité Paris
petros.chatzimpiros@u-paris.fr



Souhil Harchaoui, UMR SAS, INRAE
souhil.harchaoui@inrae.fr



Harchaoui, S., Chatzimpiros, P., 2025. Energy invested in organic agriculture: An assessment focusing on nitrogen circularity. Sci. Total Environ. 996, 180112. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180112>



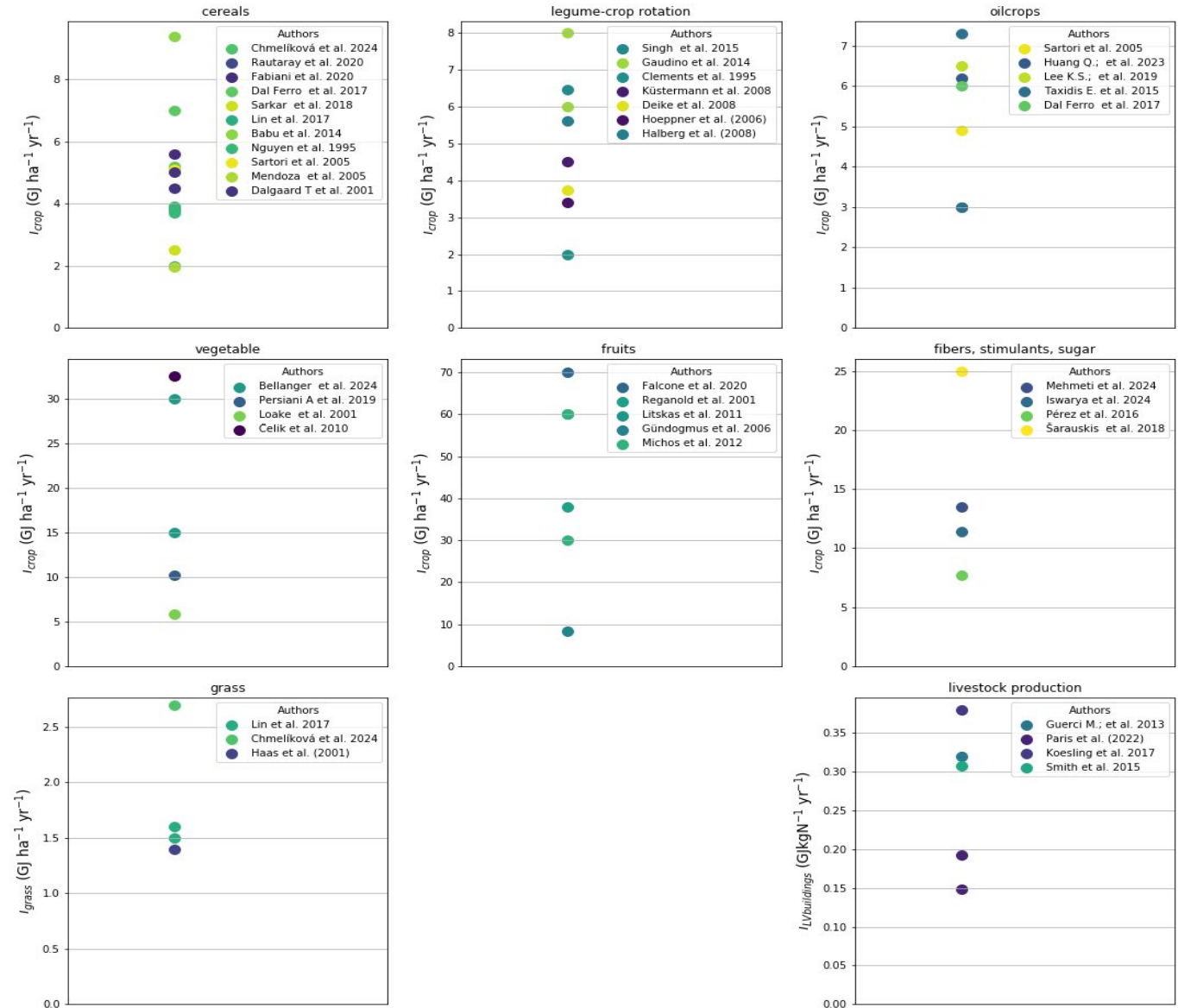
PROGRAMME
DE RECHERCHE
CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX



Café du METABIO
12 décembre 2025 – Énergie et agriculture biologique

➤ Exemple de calibration des intensités énergétiques

Analysis of energy intensity factors for crop (per crop type), grass and livestock production based of selected 39 usable case studies.



INRAE

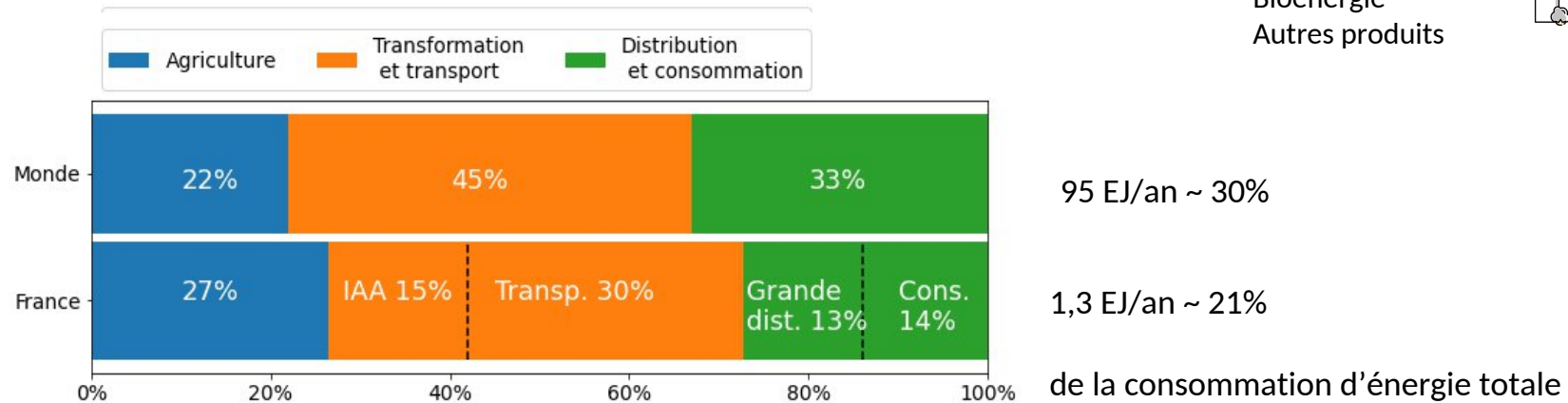
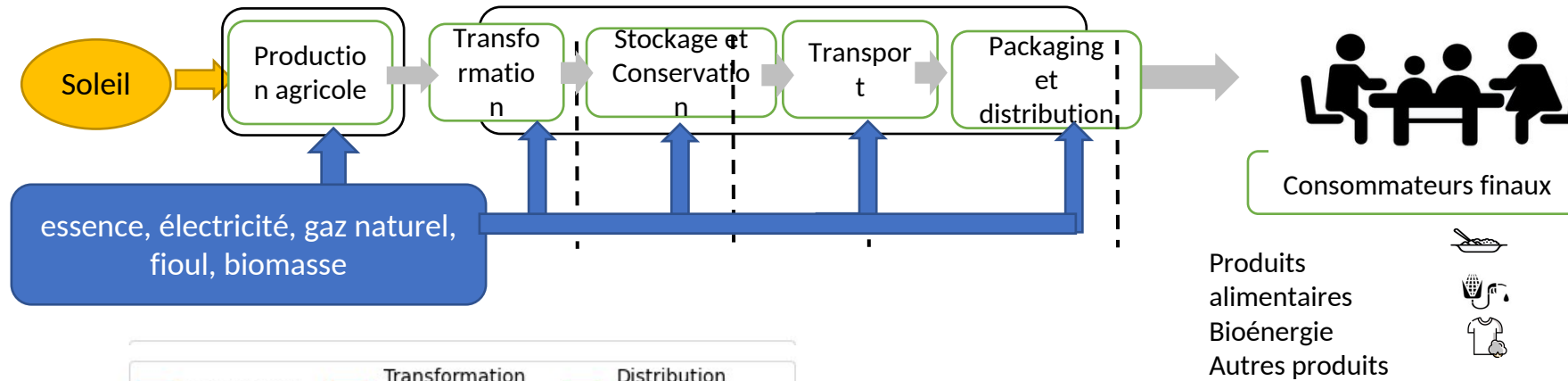


Annexes

➤ Calibration des variables utilisées dans le modèle ALPHA

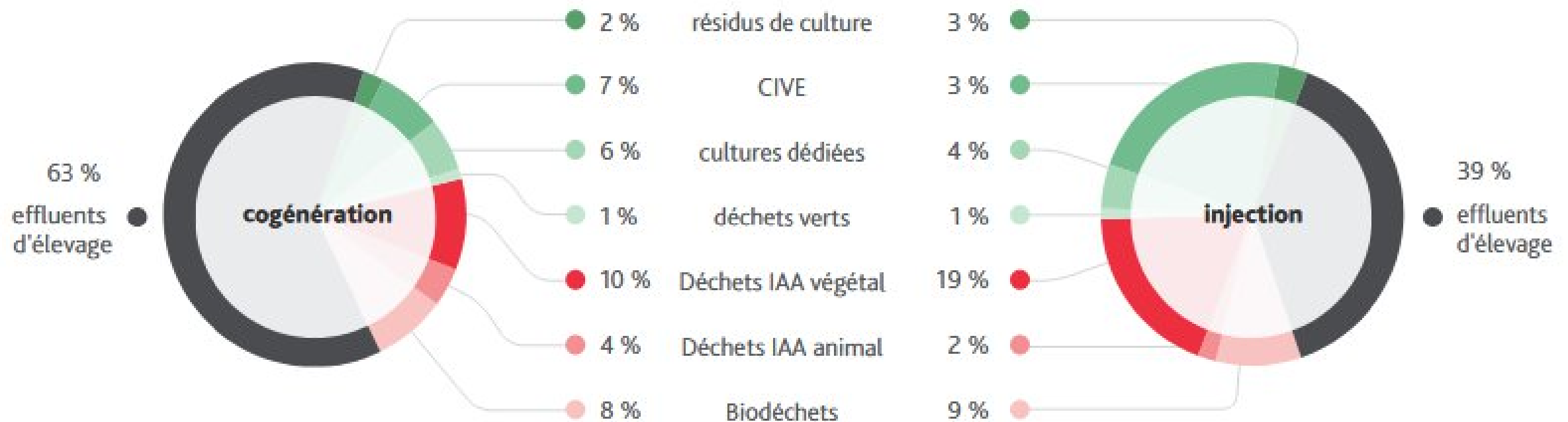
Name	Abbreviation	Unit	Values
Livestock nitrogen conversion efficiency i.e the ratio of nitrogen in animal products to the total nitrogen ingested by livestock in feed	NCE	%	11.2
Share of crop residues used for feed	$\alpha_{residues}^{feed}$	%	30%
Grassland share	τ	%	[0-100]
Share of crops used for feed	α_{crops}	%	[0-70]
Atmospheric deposition rate in cropland	r_{atm}^{crop}	kgN·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹ of cropland	8
Atmospheric deposition rate in grassland	r_{atm}^{grass}	kgN·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹ of grassland	8
Biological N fixation rate in cropland ¹	r_{BNF}^{crop}	kgN·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹ of cropland	30
Biological N fixation rate in grassland ¹	r_{BNF}^{grass}	kgN·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹ of grassland	18
N use efficiency in cropland	NUE _{crop}	%	[44 – 70]
N use efficiency in grassland	NUE _{grass}	%	75
Nitrogen harvest index of crops	HI	%	70
Fraction of N voided on grassland	γ	%	50
Share of manure N recovered to cropland	β	%	[30-80]
Biowaste N return to agriculture	χ	%	[30-80]
Weighted average food yield allocation to food supply for vegetal/animal proteins	δ_w	%	72

➤ Energie investie tout au long de la chaine agro-alimentaire



Source: à partir de FAO (2011) pour l'année 2010 pour le Monde; et Barbier et al. (2019) pour la France

➤ (Répartition (en proportion de matière brute méthanisée)
par type de la biomasse agricole méthanisée en 2024 à l'échelle France



Source : auteurs, d'après FranceAgriMer (2024), sur la base d'estimations de Solagro.

➤ Pourquoi l'agriculture consomme-t-elle de l'énergie ?

- Agriculture: système piloté par les agriculteurs qui mettent en œuvre des pratiques agricoles pour optimiser la photosynthèse (cultures, efficacité ~0,1-1%) et sa conversion en produits animaux (agriculture animale, efficacité ~10-30%).
- Conditions de croissance des cultures : travail des sols, fertilisation, irrigation, pesticides.
- Conditions de production animale : plein air/pâturage, bâtiment conditionné, type de fourrage.
- La réalisation des conditions de production implique la consommation d'énergie au sein des fermes (directe) et en amont (indirecte) :
 - sous forme de travail (agriculteurs, traction mécanique, pompes, importations de fourrage..),
 - chaleur (chauffage des installations)
 - intrants (agrochimie).



Tout type d'agriculture consomme de l'énergie

➤ Contexte

- Grande dépendance de l'agriculture aux énergies fossiles
- Impératifs de transition et sobriété énergétique pour toutes les activités humaines