

# ➤ Métriques pour évaluer la consommation d'énergie en agriculture

Christian Bockstaller, Arnaud Helias

INRAE, Université Lorraine, Laboratoire Agronomie et Environnement (LAE),  
68000 Colmar, France

INRAE, Université Montpellier, Institut Agro, ITAP – Technologies & méthodes pour les agricultures de demain,  
34060 Montpellier, France

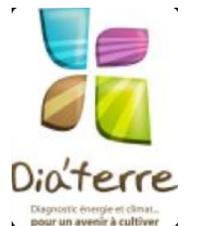
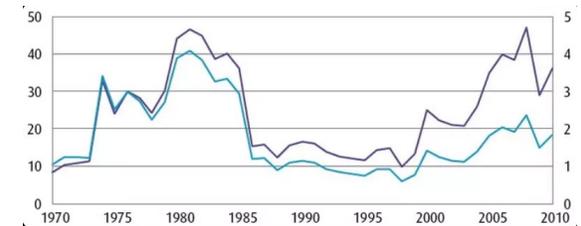
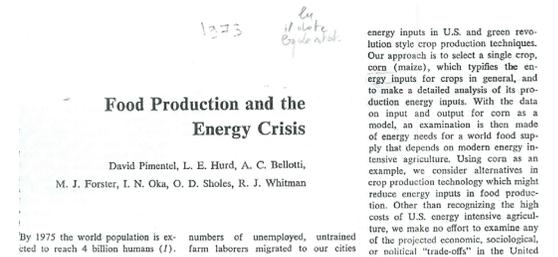
INRAE

➤ Introduction



# ➤ L'évaluation des performances énergétiques en agriculture : une longue histoire

- Article pionnier de Pimentel (1973) :
  - 1<sup>ère</sup> crise du pétrole
  - Diminution de l'efficacité du maïs entre 1945 et 1970
- Années 70-80s : développement des travaux
  - Acquisition de données (consommation machine, etc.)
- Années 90s
  - Chute des prix du pétrole
  - Remise en question de la chute de l'efficacité (Bonny, 1993)
- Années 2000s : reprise
  - En France, méthode Planète (2002), Dia'terre (2009)



INRAE

Métriques pour évaluer la consommation d'énergie en agriculture

24.05.22/ Séminaire énergies fossiles / A. Helias et C. Bockstaller

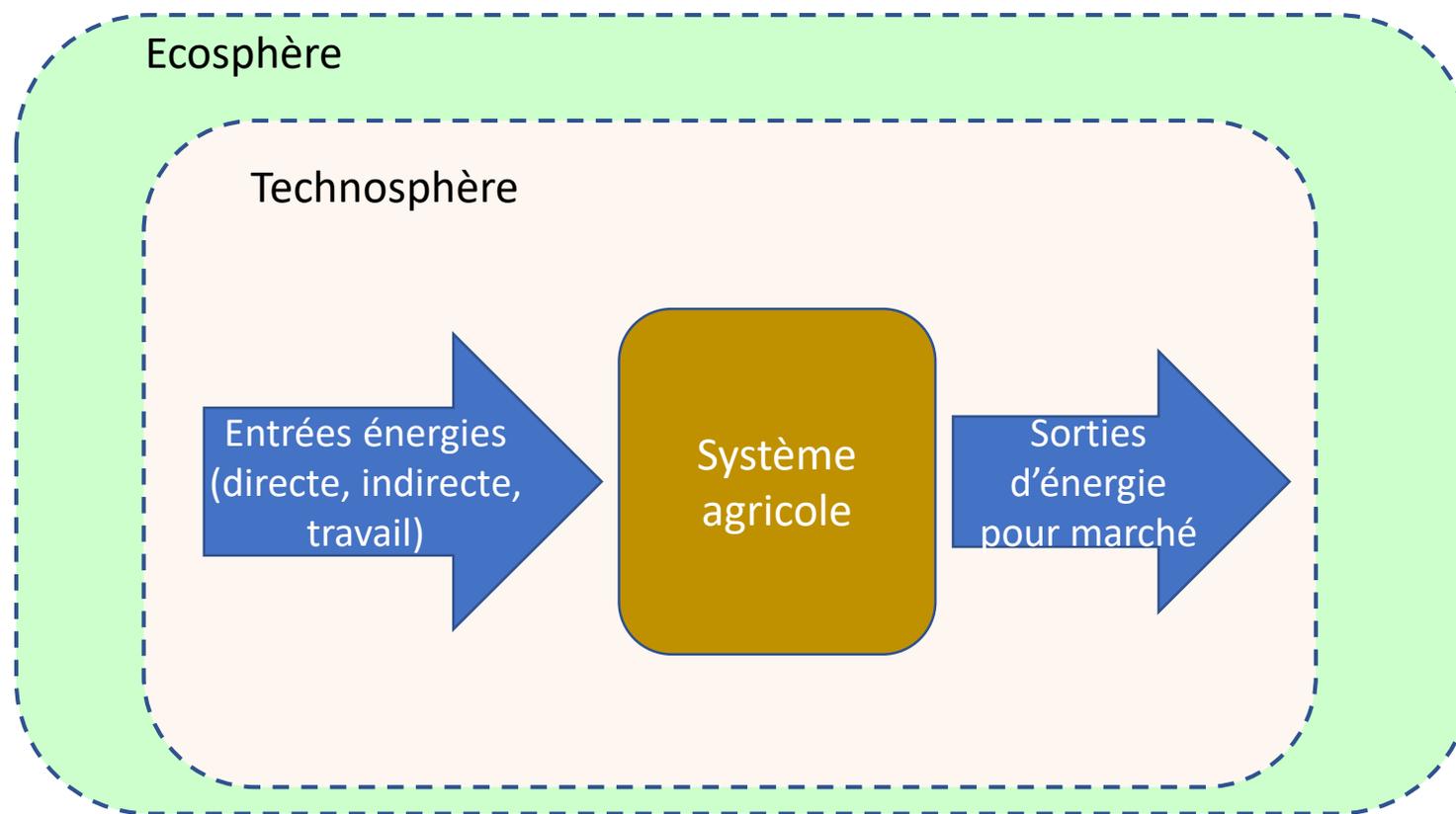
# ➤ Approche conventionnelle



## Energetic assessment of the agricultural production system. A review

Jean Hercher-Pasteur<sup>1,2</sup> • Eleonore Loiseau<sup>1,2</sup> • Carole Sinfort<sup>1,2</sup> • Arnaud Hélias<sup>1,2</sup>

Accepted: 2 June 2020  
© INRAE and Springer-Verlag France SAS, part of Springer Nature 2020



La majorité des travaux  
(loin devant)

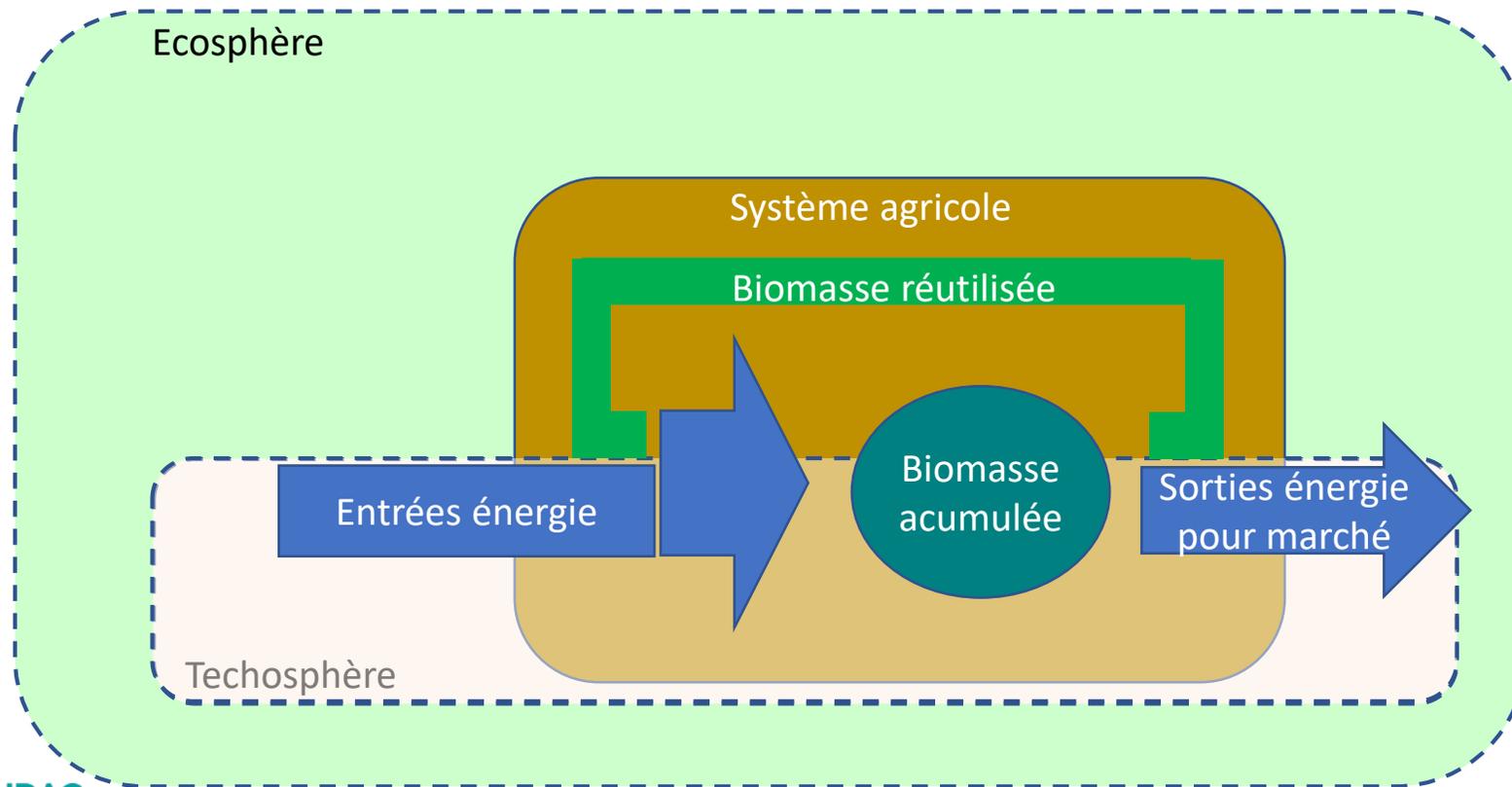


## Energetic assessment of the agricultural production system. A review

Jean Hercher-Pasteur<sup>1,2</sup> · Eleonore Loiseau<sup>1,2</sup> · Carole Sinfort<sup>1,2</sup> · Arnaud Hélias<sup>1,2</sup>

Accepted: 2 June 2020  
© INRAE and Springer-Verlag France SAS, part of Springer Nature 2020

# ➤ Approche «« Agro-écologique »»



“l'école espagnole”  
Echelle macro

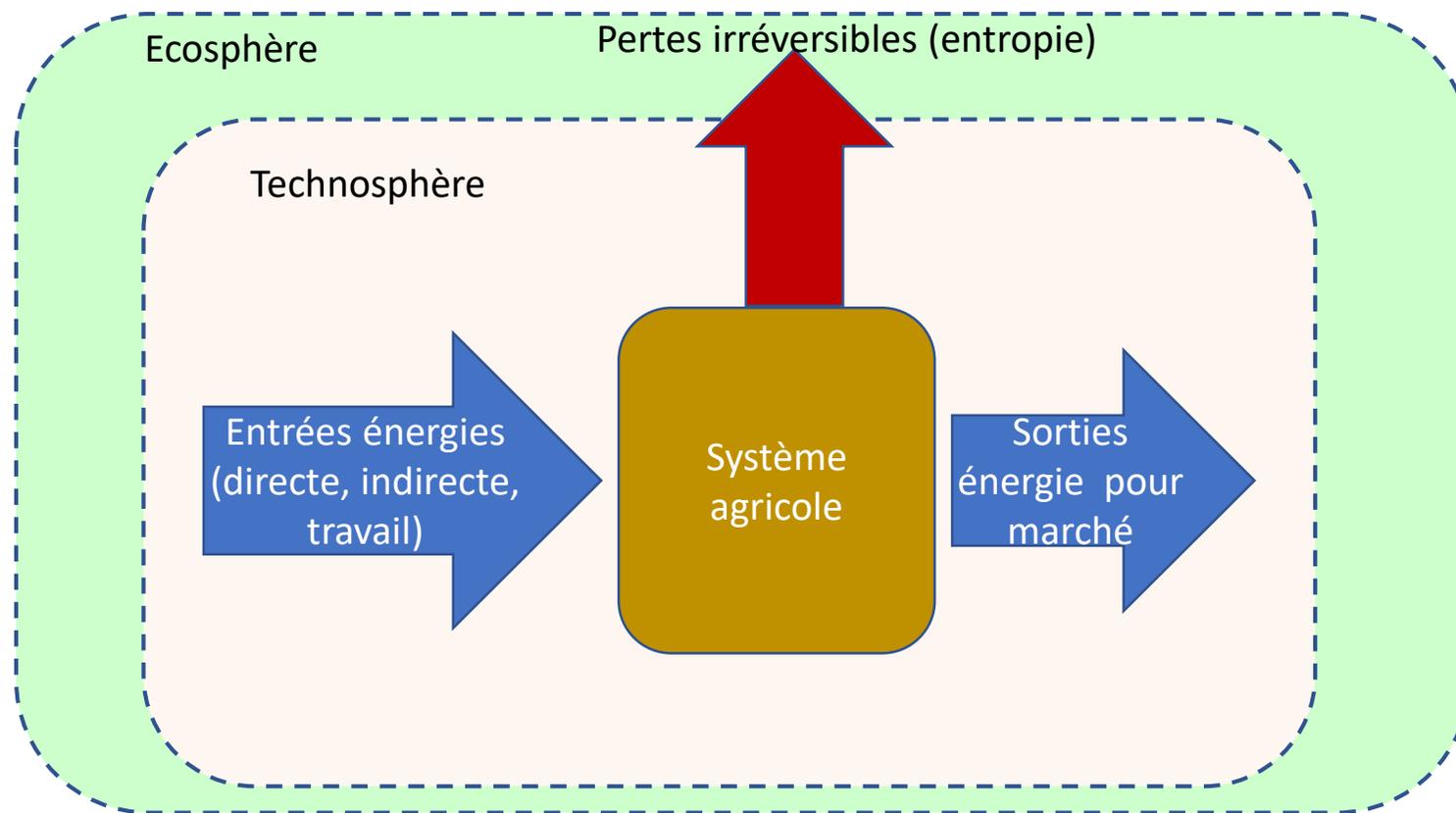
# ➤ Approche eXergétique



## Energetic assessment of the agricultural production system. A review

Jean Hercher-Pasteur<sup>1,2</sup> • Eleonore Loiseau<sup>1,2</sup> • Carole Sinfort<sup>1,2</sup> • Arnaud Hélias<sup>1,2</sup>

Accepted: 2 June 2020  
© INRAE and Springer-Verlag France SAS, part of Springer Nature 2020



...la qualité d'une énergie (partie utilisable)  
L'unité est différente  
Littérature assez conséquente

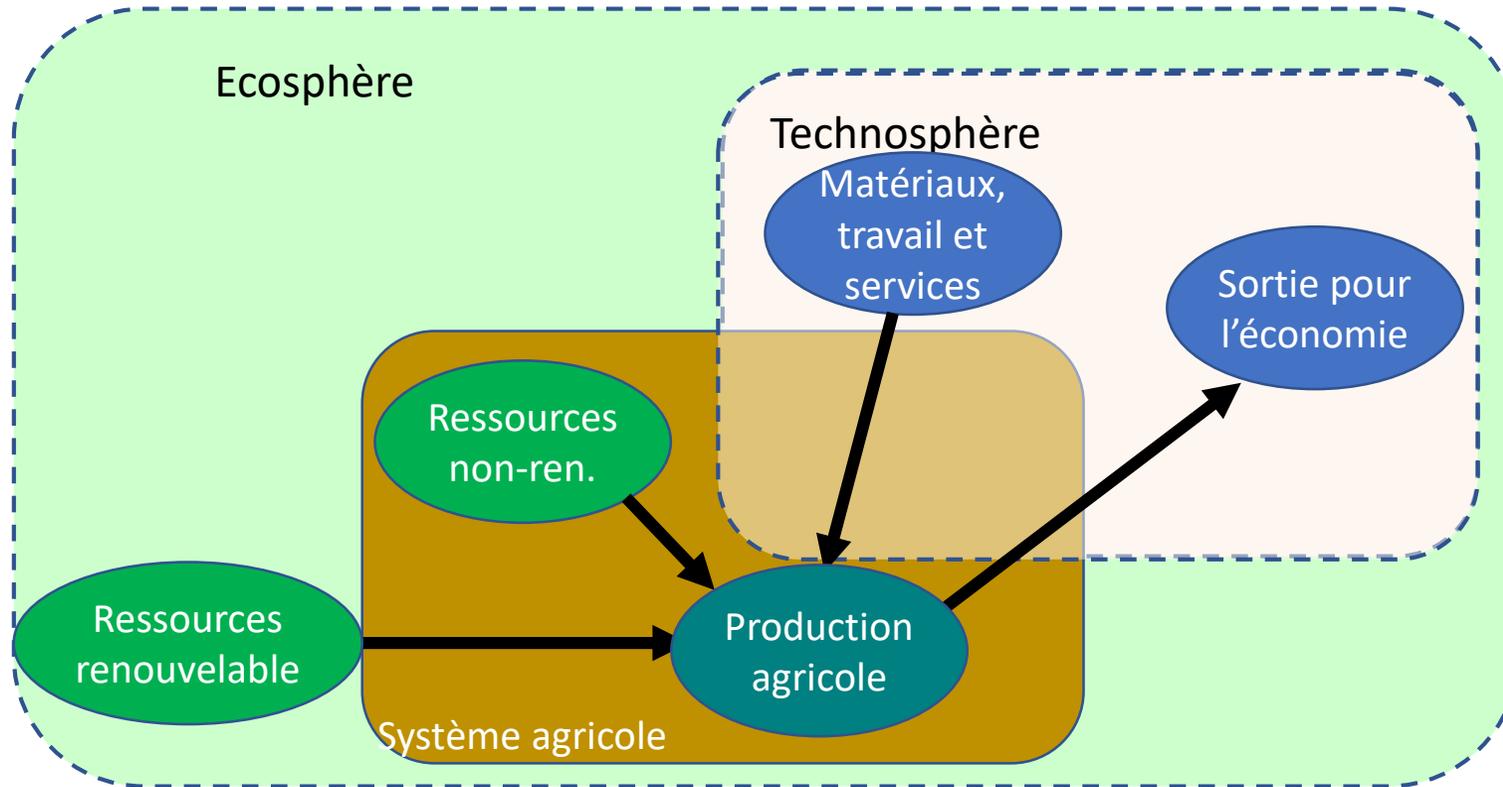


## Energetic assessment of the agricultural production system. A review

Jean Hercher-Pasteur<sup>1,2</sup> • Eleonore Loiseau<sup>1,2</sup> • Carole Sinfort<sup>1,2</sup> • Arnaud Hélias<sup>1,2</sup>

Accepted: 2 June 2020  
© INRAE and Springer-Verlag France SAS, part of Springer Nature 2020

# ➤ Approche eMergétique



Prise en compte des flux de la nature  
Règles de répartition différente /!\  
Unité différente (solarJ)

# ➤ Synthèse (source J. Hercher)

Energy flows mobilized by the agricultural system

Internal flows	Human labor		Direct energy		Indirect energy	Capital amortization		Planetary flow
Biomass reuse	Metabolism	Life style	Fuel Elec.	External Biomass	Embodied energy	Facilities & tools	Local resource	Sun, rain, win, geothermal
								

Type of account

Energetic approaches

Flows considered ( ⚡ account, ⚡ not account, ⚡ variable)

Caloric power (Joule)	Convention energy analysis									
	Pluri-energy analysis									
	Agroecology energy analysis									
Useful work (Joule)	Exergy analysis									
Solar Joule	Emergy									

CexD

EEA

Eco-exergy

CEENE



INRAE

Métriques pour évaluer la consommation d'énergie en agriculture

24.05.22/ Séminaire énergies fossiles / A. Helias et C. Bockstaller

## ➤ Des métriques/indicateurs pour deux finalités

- Evaluation de l'impact sur l'épuisement des ressources fossiles
- Evaluer la durabilité et analyser le fonctionnement
  - Utilisation d'une unité synthétique physique
  - Corrélation entre les critères



INRAE

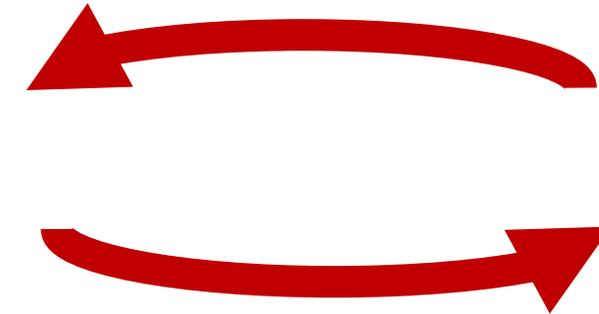
- Evaluation de l'impact sur l'épuisement des ressources fossiles

## ➤ Deux grandes familles de méthodes

- Deux grandes familles de méthodes d'évaluation de la durabilité

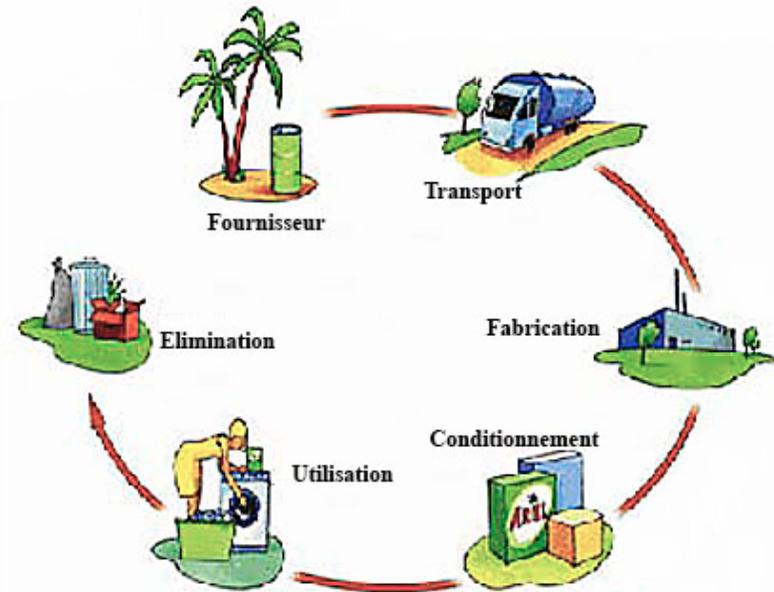
### Méthodes « conventionnelles »

*Prise en compte de l'amont  
dans les indicateurs « énergie »*



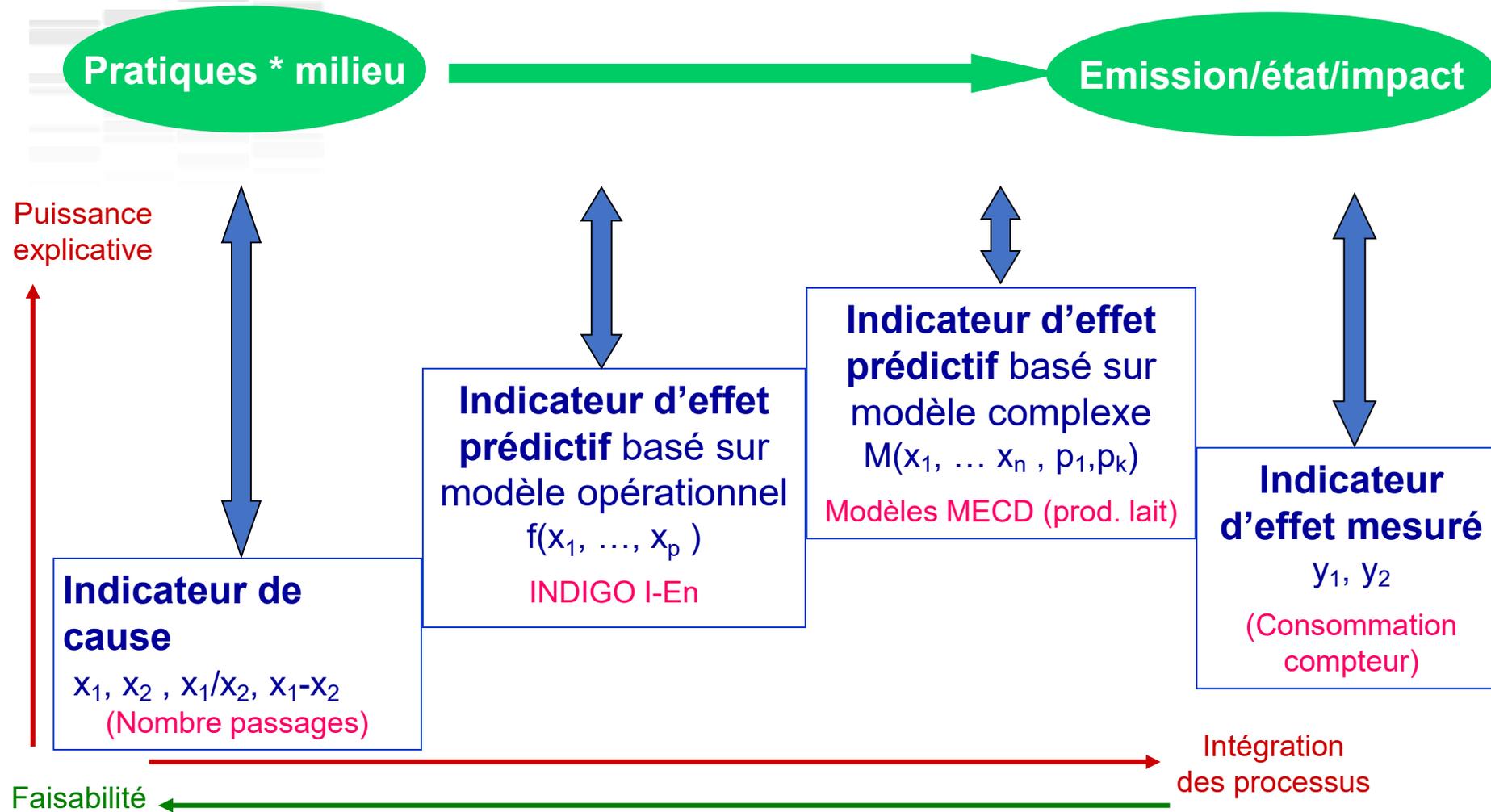
*Indicateurs évaluant les  
effets directs du système*

### Analyse cycle de vie (ACV)



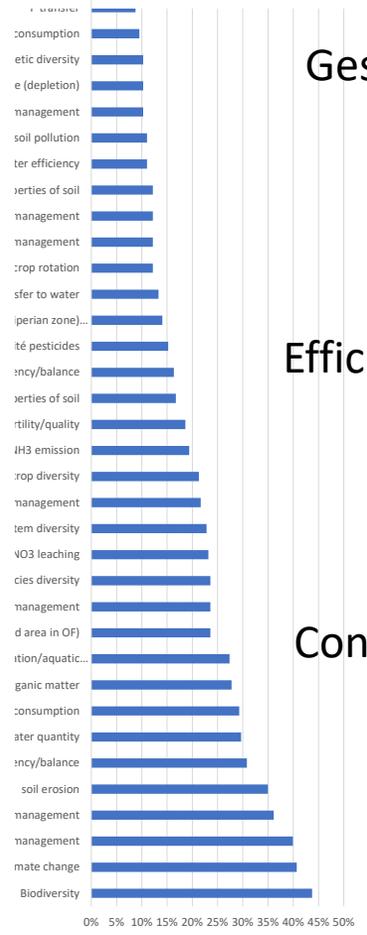
(Bockstaller et al., 2015; Repar et al. 2017)

## ➤ Différents types d'indicateurs



# ➤ L'énergie dans l'évaluation multicritère

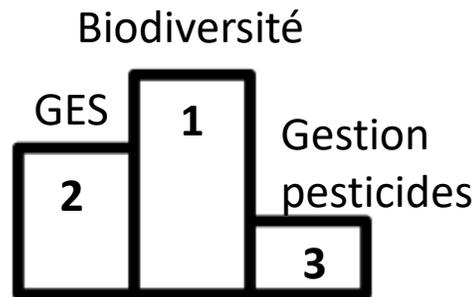
Revue 262 méthodes (Soulé et al. (2021))



Gestion éner. = 31ème

Efficience/bilan éner. = 21ème

Consommation éner. = 8ème



Base INDIC (Bockstaller et al., 2015, Thomas-Deliille, 2015; Hufschmitt, 2021)

Dimension	Code sub-criteria	Sub-criteria	Number of indicators (out of 4688)
ENV	ENV30_01	<b>Total/fossil energy consumption</b>	<b>106</b>
ENV	ENV24_05	<b>Energy efficiency</b>	<b>37</b>
ENV	ENV30_02	<b>Renewable energy consumption</b>	<b>19</b>
ENV	ENV25_04	<b>Energy balance</b>	<b>18</b>
ENV	ENV21_03	Good practices (energy saving practices)	14
ENV	ENV21_02	Use and maintenance of machinery	11
ENV	ENV30_04	<b>Renewable energy production</b>	10
ENV	ENV30_03	<b>Production, bilan, efficience (cultures énergétiques)</b>	<b>7</b>
ENV	ENV21_01	Energy storage and lubricants	4
ENV	ENV21_06	Practices to reduce GHG and other atmospheric pollutants	4
ENV	ENV30_05	<b>Emergy</b>	4
ENV	ENV30_06	Other (general assessment)	4
ENV	ENV21_04	Area of energetic crops	1
ENV	ENV21_05	Amounts of animal waste recycled into energy production	1

➡ Indicateurs d'effet (gras) majoritaire (pas le cas pour d'autre thème)

# ➤ Méthode estimation de la consommation énergétique

## Tout le système

## Certains postes

Énergie  
directe

énergie  
indirecte

Énergie  
directe

énergie  
indirecte



ADEME, 2015

Factures  
(relevé compteur\*),

Coefficients  
Énergétiques (CE)

*\*Algorithme pour estimer  
consommation personnelle*



Zahm et al. 2018

Factures  
(relevé compteur)

CE (engrais N,  
aliments bétail)



Pervanchon et al. 2002

Modèle empirique  
(machines;  
irrigation )

CE (engrais,  
pesticides)

INRAE

## ➤ Consommation d'énergie: approches prédictives

Coefficient énergétique: **Conso = Q. CE**  
Q: quantité (intrants, heures), CE : coefficient énergétique

Equation simplifiée : **Conso = (0,22. X + 0,096).Ppto** *Todde et al. (2018)*  
Ppto: puissance tracteur, X: charge partielle (entre 0 et 1)

Approche semi mécanistique **Conso = 1,1 . [(36 P . C / (V . L . F)) + D / S]+ K** *Pervanchon et al. (2002)*

avec  $P = a . V . L + b . V + c . L + d$

P: puissance absorbée, V: vitesse, L: largeur outil, C: facteur correctif,  
F: efficacité liée à taille parcelle S, D: distance à exploitation, K: terme de  
calibrage, a, b, c, d : coefficient régression

Approche mécanistique **Conso = 2,64. P<sub>ratio</sub> + 3,91- 0,203 . (738 P<sub>ratio</sub> +173)<sup>1/2</sup> . P<sub>required</sub>** *Lampridi et al. (2020)*

P<sub>ratio</sub>: ratio puissance, P<sub>required</sub>: puissance requise par l'outil

$P_{required} = F_i . (e + f . V + g . V^2) . L . Prof . V / 1000 . (Ct . 0,83)$

F<sub>i</sub>: paramètre lié à la texture du sol, e, f, g : paramètres liés à l'outil, V: vitesse, L: largeur,  
Prof : profondeur de sol travaillée, Ct : coefficient traction, e

## ➤ Analyse énergétique & analyse du cycle de vie

~1980



~2000



~2020

- **Construction de la méthode ACV à partir des bilans énergétiques** (et des approches flux de matières)
- Evolution du vocabulaire, du formalisme mathématique
- Base de données, automatisation des ACV
  
- **Utilisé comme l'un des critères**
  - De moins en moins (explicitement)
    - Energie ≠ environnement
    - Autres métriques pour les ressources
  - Reste présent pour les bioénergies
  - Encore indirectement
    - via la catégorie « fossil resource depletion » (e.g. méthode EF 3.0 européen)



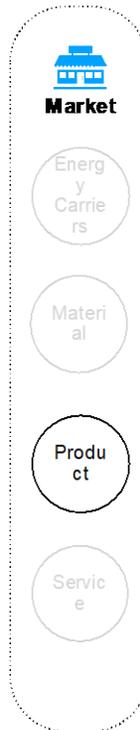
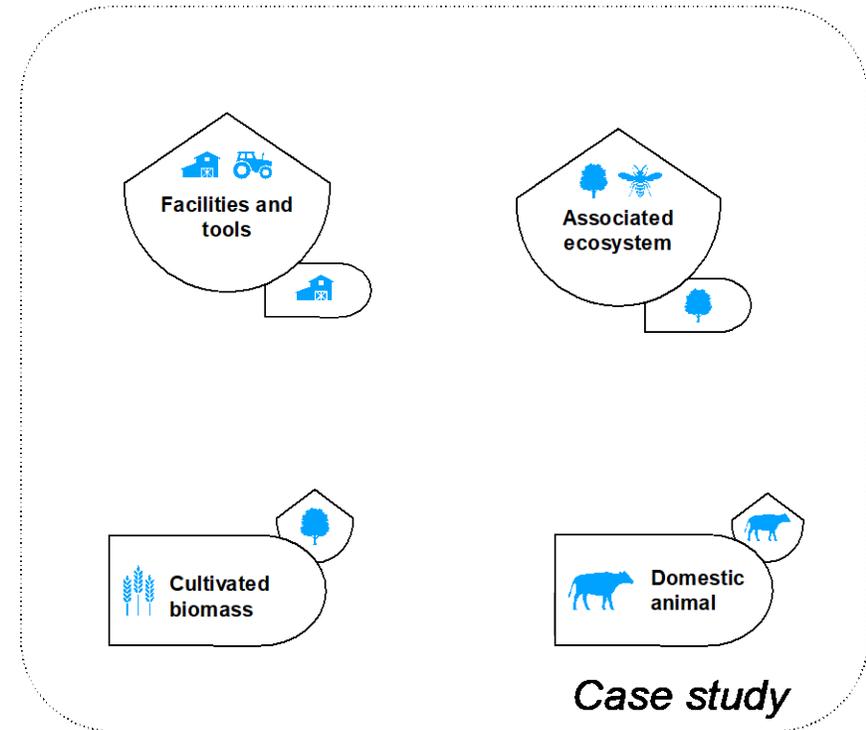
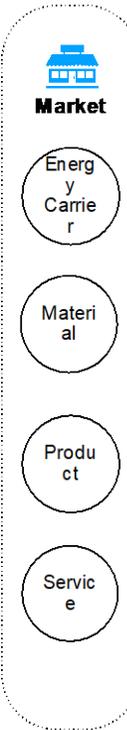
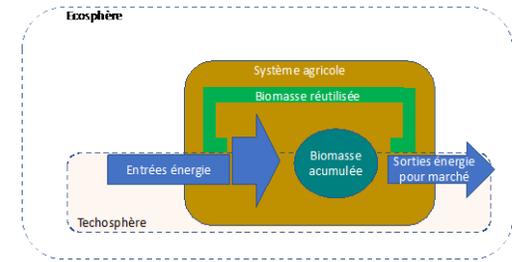
## ➤ Analyse énergétique: au-delà de l'entrée-sortie

Décrire les flux d'énergie pour évaluer la « durabilité » de l'exploitation

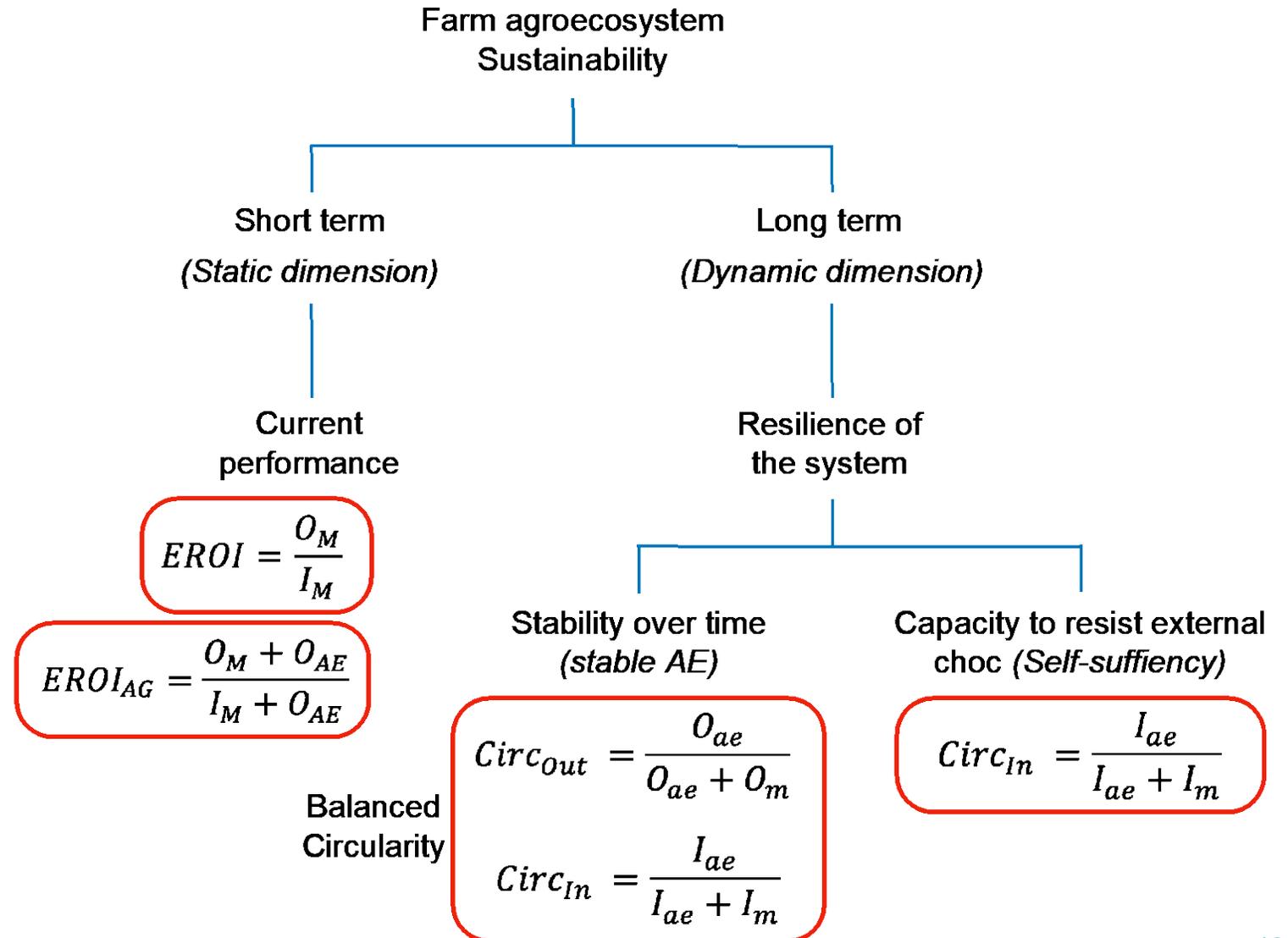
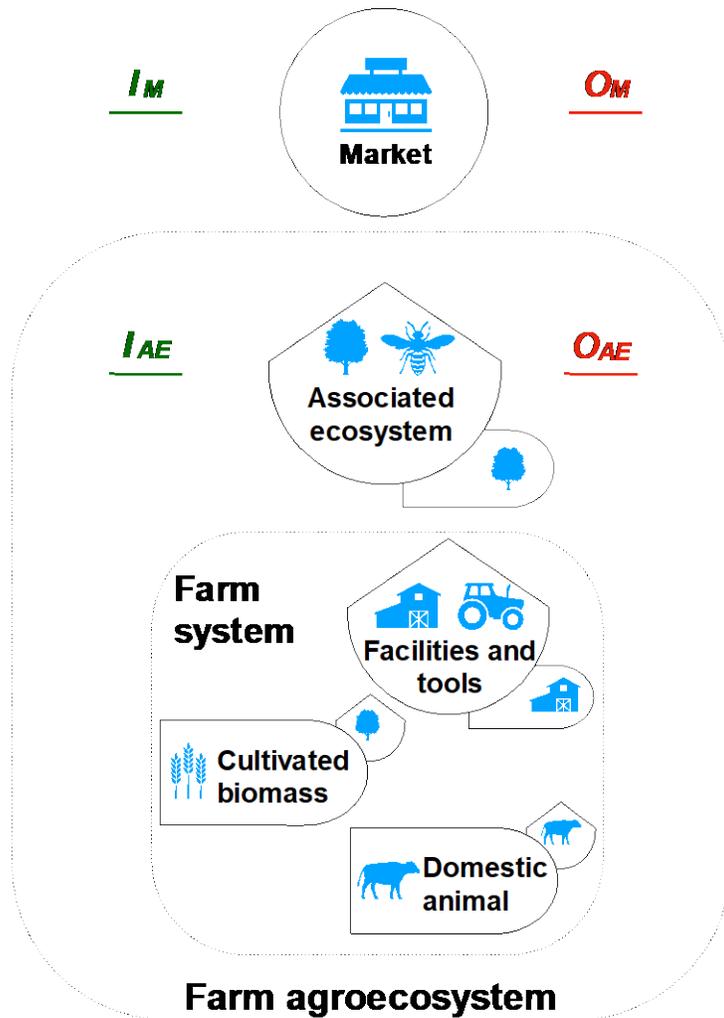
Exemple des travaux J. Hercher

## ➤ Représentation de l'exploitation

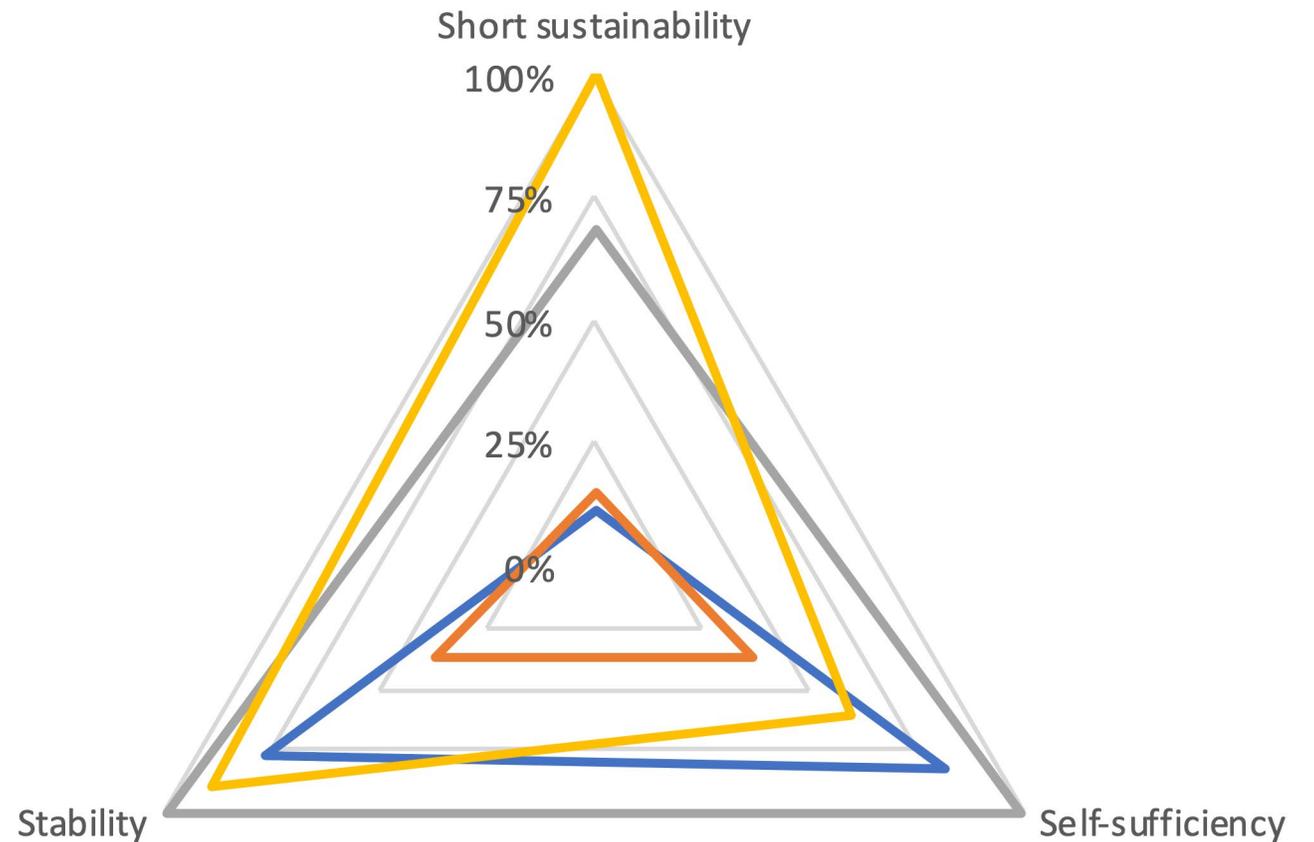
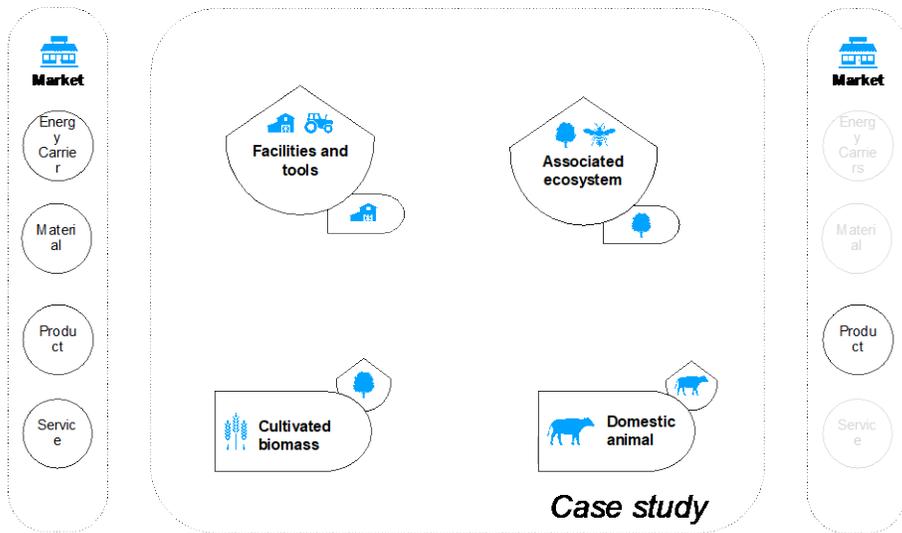
- L'exploitation : 4 sous-systèmes
- Des processus de production
  - Transformation, sortie = matière
- Des processus de stockage
  - Fourniture d'un service ("dissipation" d'énergie)



# ➤ Durabilité à travers des ratios



# ➤ Exemple : scénarios d'évolution d'une exploitation



— Mixed-farming case study  
— Extensive mixed-farming

— Intensive breeding production  
— Intensive vegetal production



**INRAE**

Métriques pour évaluer la consommation d'énergie en agriculture  
24.05.22/ Séminaire énergies fossiles / A. Helias et C. Bockstaller

INRAE

➤ Discussion



## ➤ Où en sommes-nous ?

- L'énergie classiquement présente dans les approches d'évaluation multicritère
- Pas de front de recherche en analyse énergétique mais
  - Les enjeux méthodologiques sont discutés ailleurs (autres communautés)
  - Des tentatives pour prendre en compte les aspects qualitatifs, émergies, exergies
  - L'approche agroécologique : prise en compte des flux internes

## ➤ La nécessité d'une définition rigoureuse du système

- Énergie contenue & énergie embarquée
  - Pouvoir calorifique & la demande en énergie cumulée
  - Directe & indirecte
- Coefficient vs base de donnée ?
- Système souvent mal explicité (hors ACV)
  - Difficulté d'analyse
  - Comparaison impossible

## ➤ Quels indicateurs ?

- **Fonction des finalités**
  - Analyses des systèmes: efficacité, indicateurs de circularité, de stabilité, etc.
  - Evaluation des impacts: consommation vs efficacité
- **Une amélioration de la performance (efficacité) ≠ une réduction de l'impact (consommation).**
  - cf. paradoxe de Jevons (charbon au XIX<sup>ème</sup> siècle)
  - Énergie renouvelable vs énergie non renouvelable
- **Utilisation de deux indicateurs**
  - Consommation et efficacité/bilan
  - 13 méthodes sur 262 (Soulé et al., 2021) : MASC, SAFE, SOSTARE,



## ➤ Méthodes de calcul

- Peu d'approches prédictives basées sur modèles empiriques ou mécanistiques
  - Un besoin pour la conception/amélioration des systèmes agricoles
  - Effort en production laitière (Shine et al., 2020; Todde et al. 2018; Upton et al. 2014)
- Variabilité des coefficients énergétiques des engrais
  - 15 % tous les 10 ans ? (Pervanchon et al., 2002)
- Nécessite de bases réactualisées
  - EcoInvent/Agribalyse sur plateforme INRAE Means, Gest'im des Instituts techniques
- Talon d'Achille pour les approches alternatives
  - ex: émergie, Dardonville et al., (2022)



## ➤ Une variabilité accrue à l'avenir ?

### Yara

## Des engrais décarbonés en 2023

Le groupe norvégien a annoncé une future mise sur le marché d'engrais dotés d'une empreinte **carbone réduite de 80 à 90 %** grâce à l'utilisation d'énergies renouvelables.

**D**es engrais décarbonés, produits par électrolyse, seront bientôt disponibles, selon Yara. La société a annoncé un premier contrat commercial avec Lantmännen, une coopérative agricole du nord de l'Europe, à partir de 2023. « Nous avons plusieurs projets avec des électrolyseurs, un en Australie, un autre aux Pays-Bas, et puis en Norvège où l'hydroélectricité est disponible », indique Nicolas

Broutin, président de l'entreprise Yara France. Au niveau mondial, l'objectif du groupe est que 30 % de sa production soit décarbonée d'ici à 2030. « Il est important de dire qu'on a déjà fait la moitié du chemin, précise le président. En France, nous avons des usines déjà très décarbonées. Par rapport à la référence 2005, nous avons décarboné plus de 50 % de notre activité », appuie-t-il. Le développement de ces



types d'engrais fait partie du programme Solution'ÈRE, de Yara, dont le lancement a été annoncé au Salon de

l'agriculture. Ce programme inclut aussi des outils d'aide à la décision, tels que N-Tester, N-Sensor et Atfarm. C. S.

INRAE

Métriques pour évaluer la consommation d'énergie en agriculture  
24.05.22/ Séminaire énergies fossiles / A. Helias et C. Bockstaller

(La France Agricole 6 mai 2022)

## ➤ Conclusions

- Pas de grand front de recherche méthodologique
- Indicateurs : efficacité (ratio) vs consommation (somme)
  - Fonction de la finalité
- Pour l'évaluation des impacts, rester en multicritère
  - Corrélation énergie – émission GES
- Un effort de modélisation (opérationnelle) vs. coefficients énergétiques ?



# Merci pour votre attention

