



10 ans  
OCAPI



# Rebattre les cartes du système agro-alimentaire mondial

Un jeu sérieux pour comprendre les enjeux géopolitiques et biogéochimiques de l'alimentation

Gilles BILLEN, Josette GARNIER, CNRS, Sorbonne-Université



# Quelques notions préalables...

1. Nous allons (encore!) parler d'azote: pourquoi ?
2. Les règles du jeu des systèmes agro-alimentaires

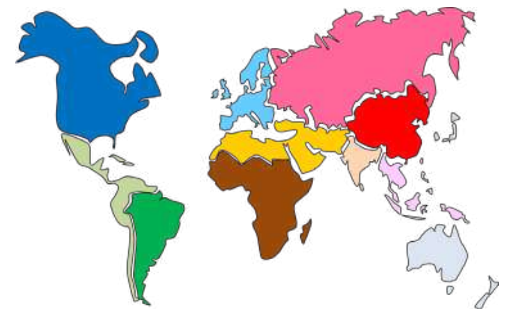
## Deux phases du jeu de plateau:

1. Reconstituer le fonctionnement actuel du système agro-alimentaire mondial

Chaque groupe pour l'une des 12 régions du monde qui lui a été attribuée  
Bilan et debrief collectif

2. Imaginer un fonctionnement alternatif: rebattre les cartes

Concertation pour se fixer un objectif collectif solidaire:  
Nourrir le Monde sans pourrir la Planète ?  
Bilan et debrief collectif



# 3 raisons de parler d'Azote

parce que l'azote est au cœur du fonctionnement des systèmes agro-alimentaires

1. L'azote des protéines est le constituant essentiel de la nourriture  
Avec un besoin universel de ~3.6 kgN/pers/an



2. L'azote est l'élément limitant principal de la production agricole:  
les apports d'N au sol déterminent le rendement des systèmes agricoles



3. Les pertes d'azote vers l'environnement ('N wastes') causent des perturbations majeures du fonctionnement des écosystèmes et dépassent les limites planétaires



Eutrophisation



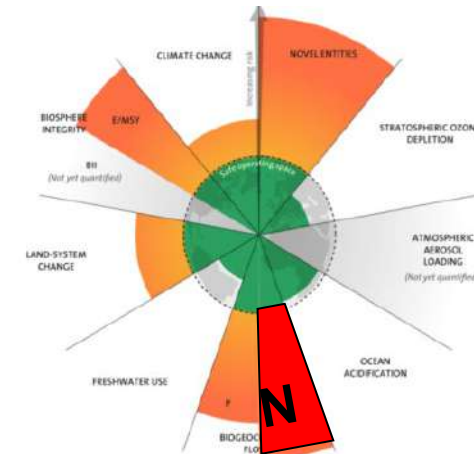
Contamination de l'eau potable



Pollution atmosphérique



Emission de N<sub>2</sub>O



Planetary limits:  
Steffen et al, 2015; Persson et al., 2022

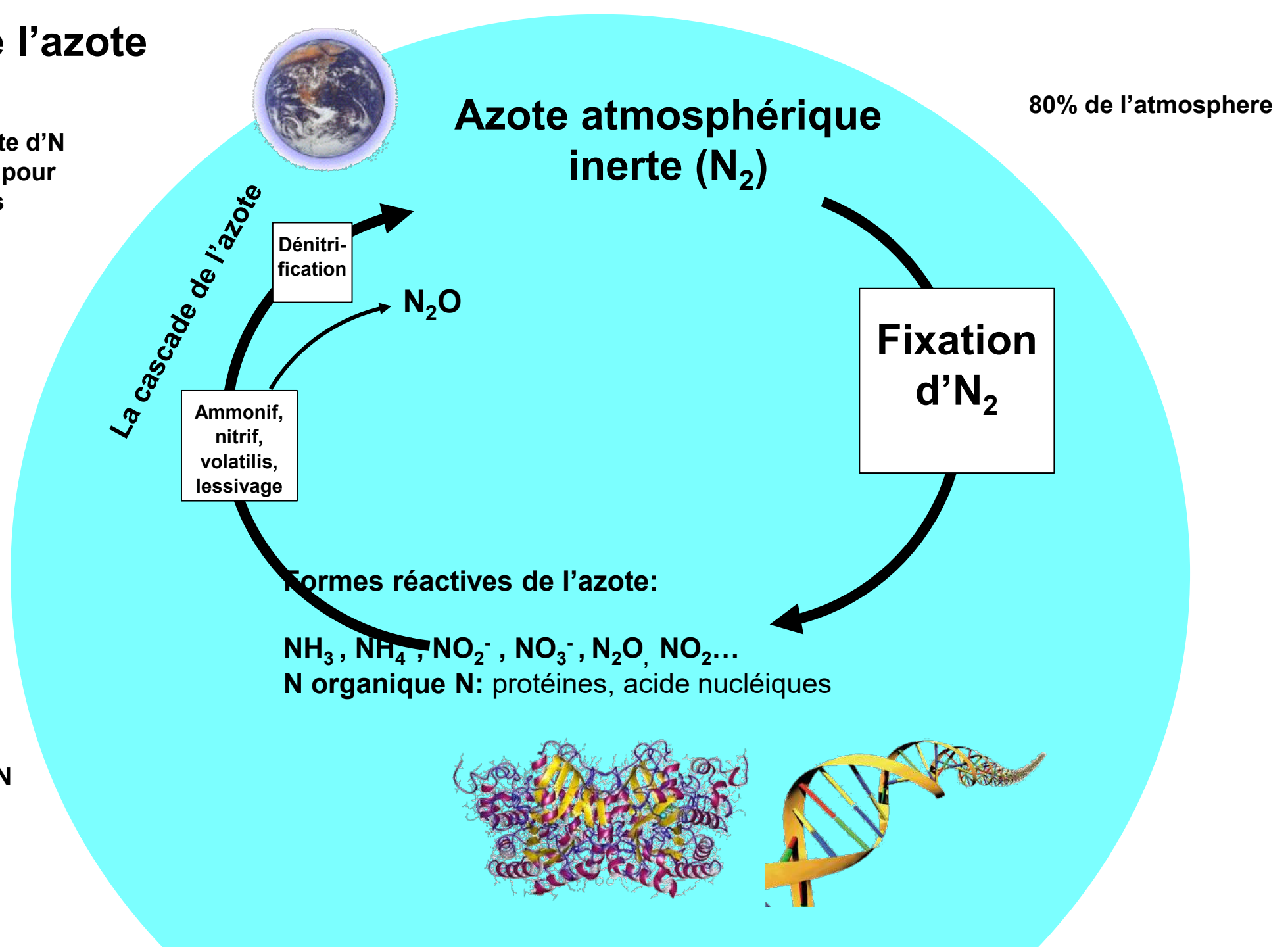
# Le paradoxe de l'azote

La forme la plus abondante d'N sur terre est inaccessible pour la plupart des organismes



Le supplice de Tantale

Les formes réactives de l'N sont très mobiles (gazeuses ou solubles) et retournent à la forme inerte  $N_2$







# Deux processus pour la fixation de l' N<sub>2</sub> atmosphérique

## (1) Fixation symbiotique

**Légumineuses graines**

Lentilles, pois, haricots, soja,...

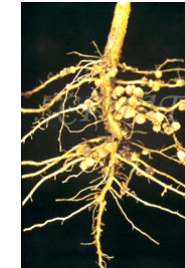
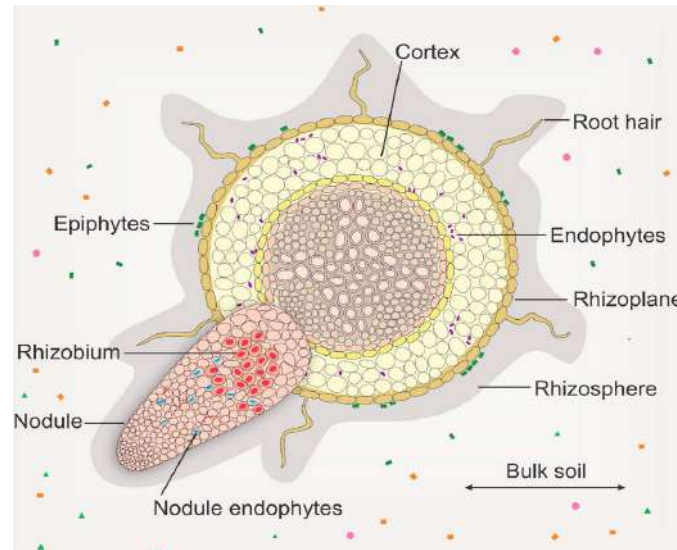
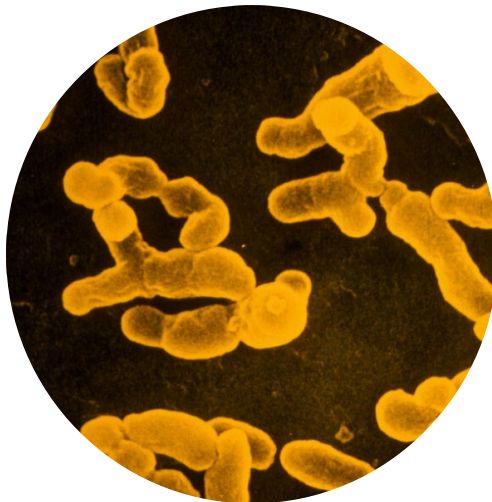
**Légumineuses Fourrage**

Trèfle, luzerne,...

**N<sub>2</sub> + sucre → protéines**

**Azotobacter**

**Rhizobium en symbiose avec les légumineuses**

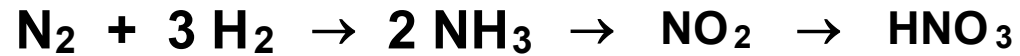




## Deux processus pour la fixation de l' N<sub>2</sub> atmosphérique

### (2) Les engrais de synthèse industriels

#### Le procédé Haber- Bosch (1909)

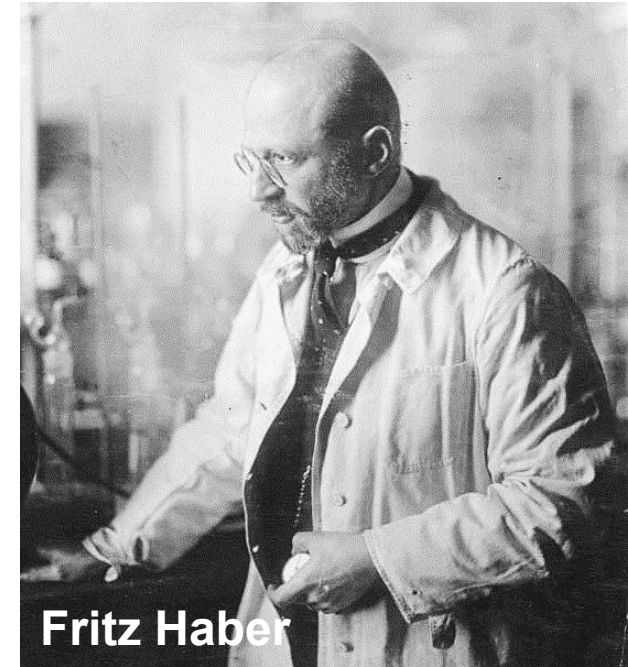


Haute température  
Haute pression  
Catalyseurs appropriés

D'abord pour la production d'explosifs,  
Ensuite pour la production d'engrais



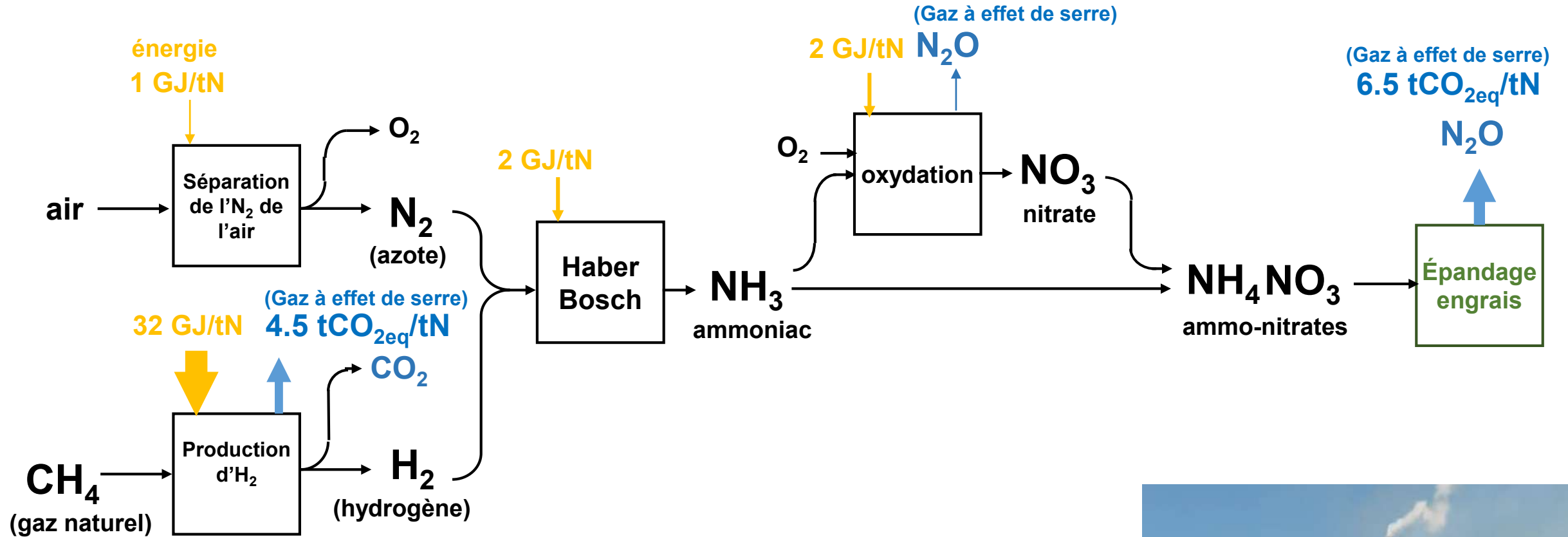
Carl Bosch



Fritz Haber



# Comment sont produits les engrais azotés?



## Procédé Haber-Bosch classique

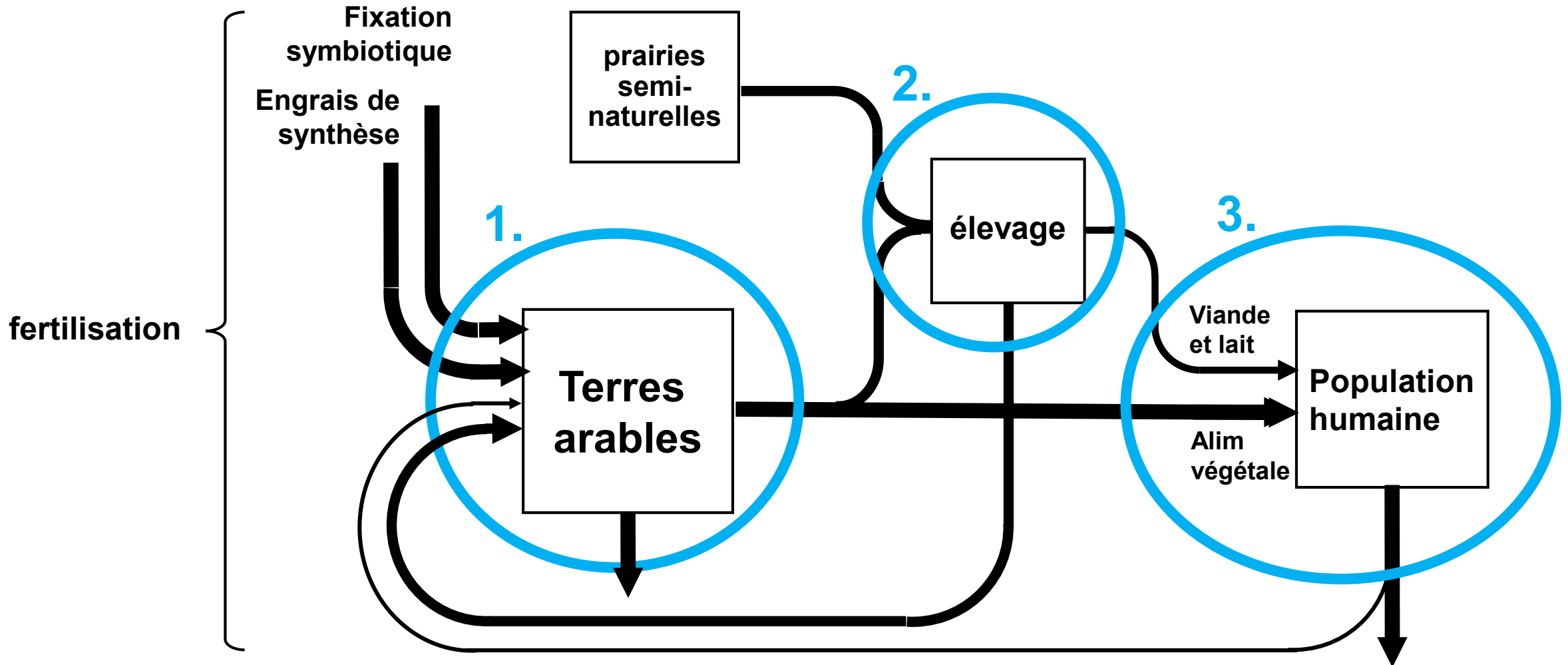
Total 36 GJ/tN = 0.85 tep/tN



Yara,  
usine d'engrais de Montoir-de-Bretagne

# Les règles du jeu des systèmes agro-alimentaires

GRAFS: Une vision des flux d'azote des cultures à l'assiette





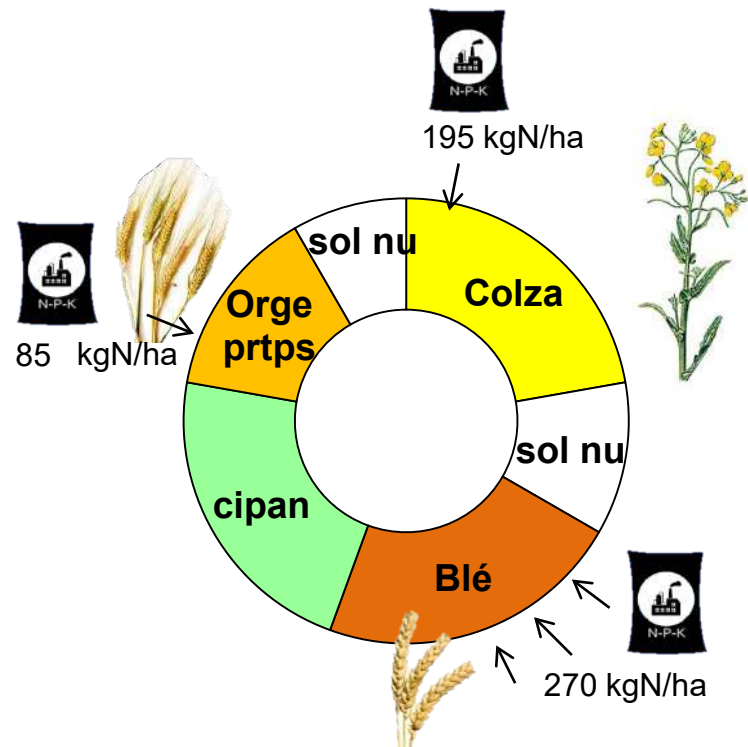
# 1. La relation rendement-fertilisation

## Rotations culturales et itinéraires techniques

### Exemple 1:

Colza-Blé-Orge en agriculture conventionnelle

- Apports d'engrais de synthèse
- Traitement pesticides: herbicides, insecticides, fongicides



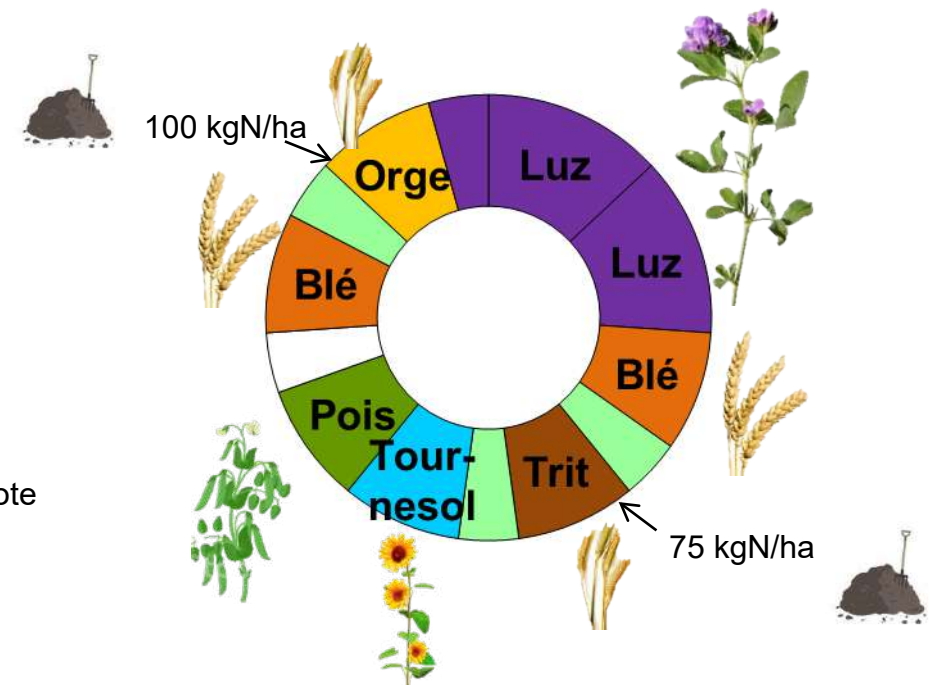
 Cipan: culture intermédiaire piège à azote

### Exemple 2:

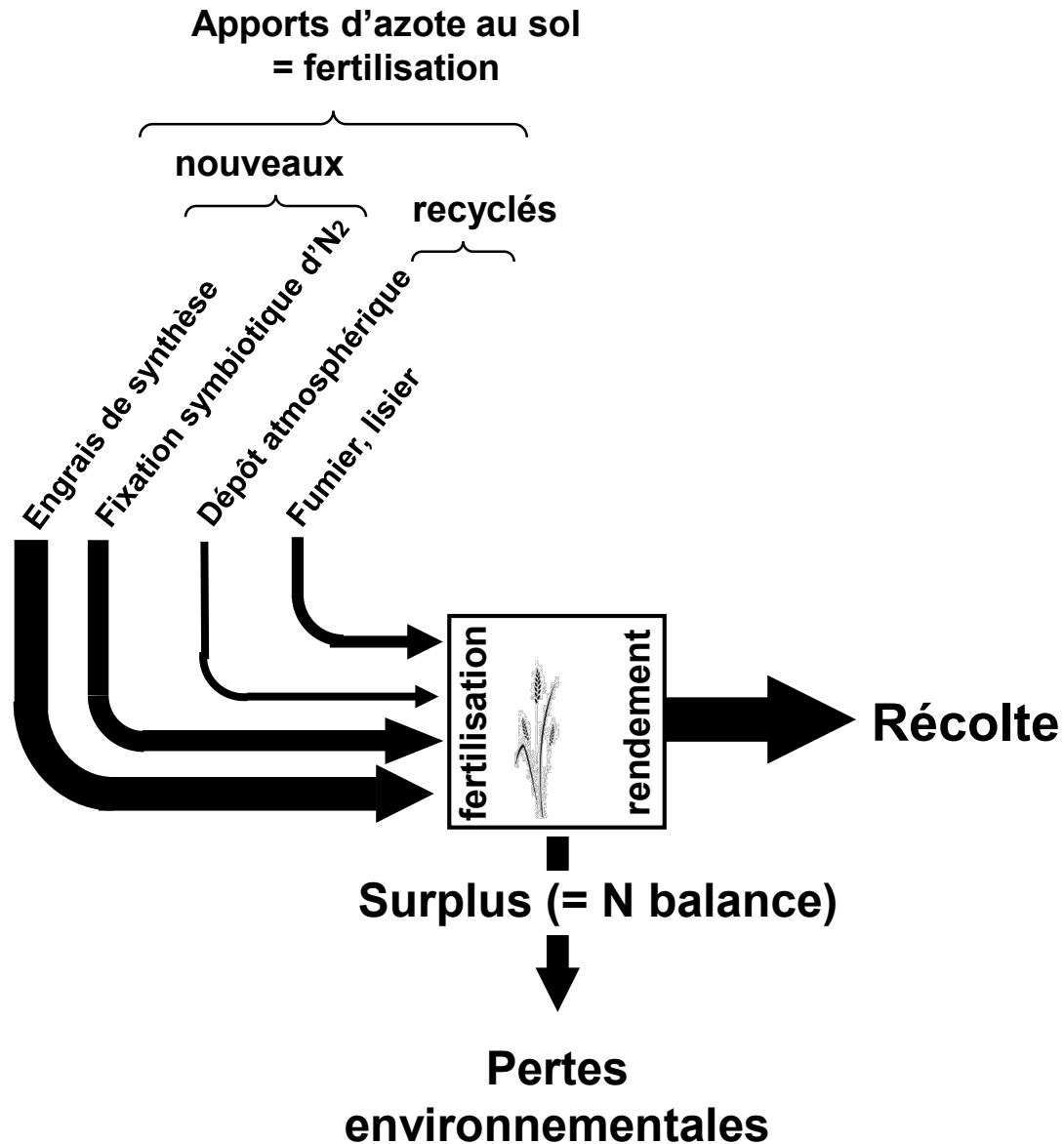
Rotation longue et diversifiée en AB



- Pas d'engrais de synthèse
- Possible fumure organique
- Pas de traitement pesticides

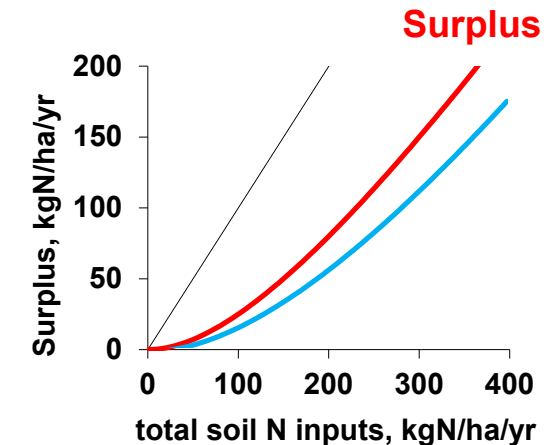
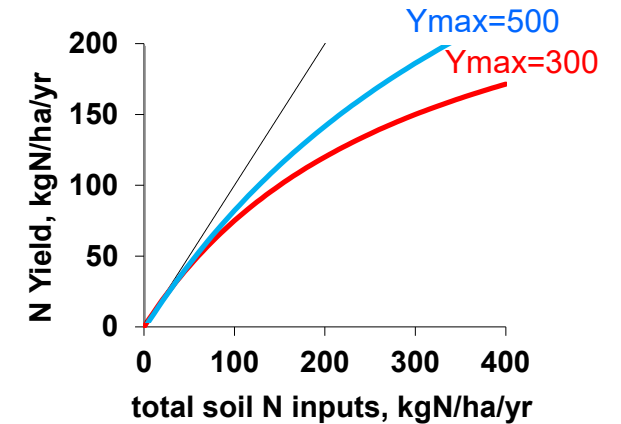


# La relation rendement vs. fertilisation à l'échelle de la rotation culturale



Relation rendement vs. fertilisation  
(intégrée sur l'ensemble du cycle de rotation)

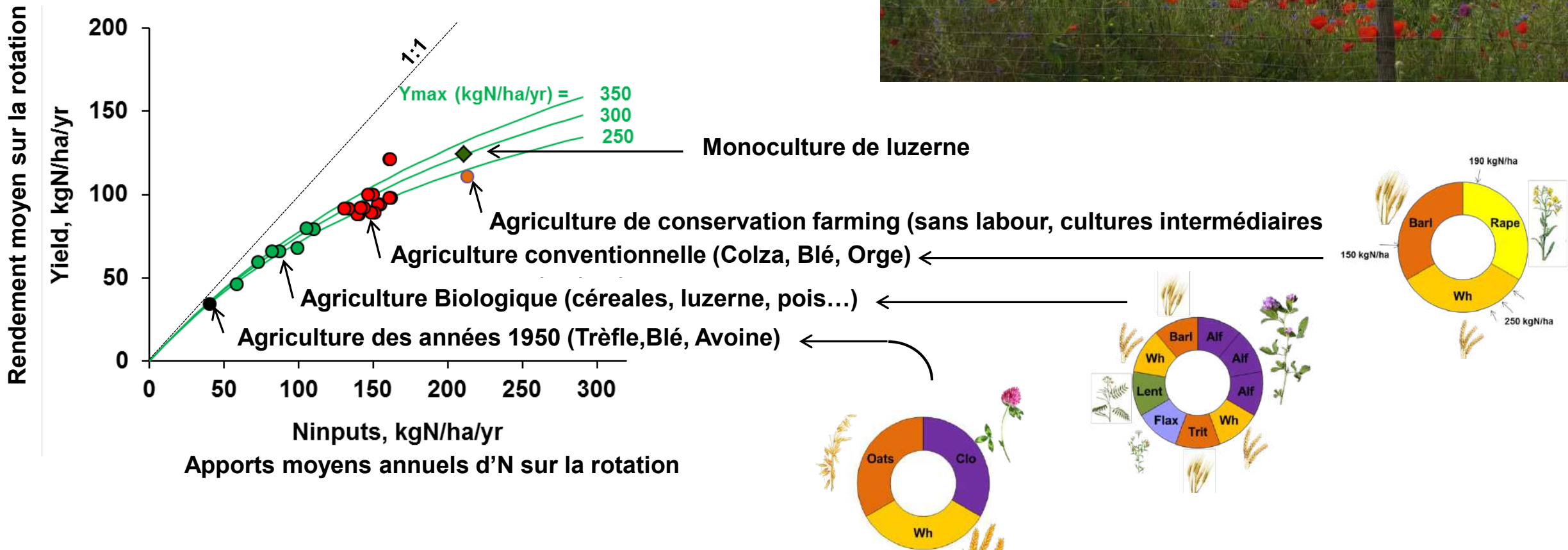
$$Y = Y_{\max} \times F / (F + Y_{\max})$$



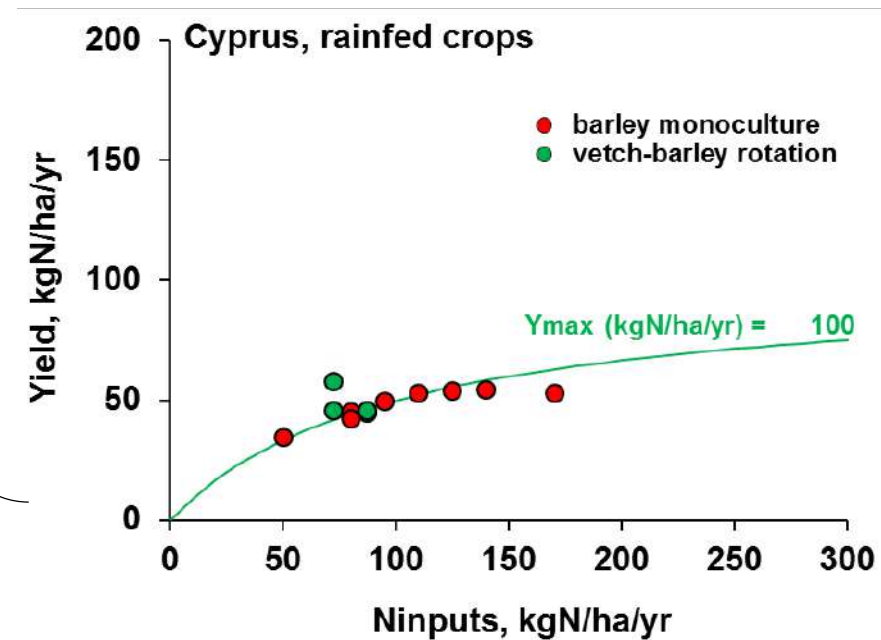
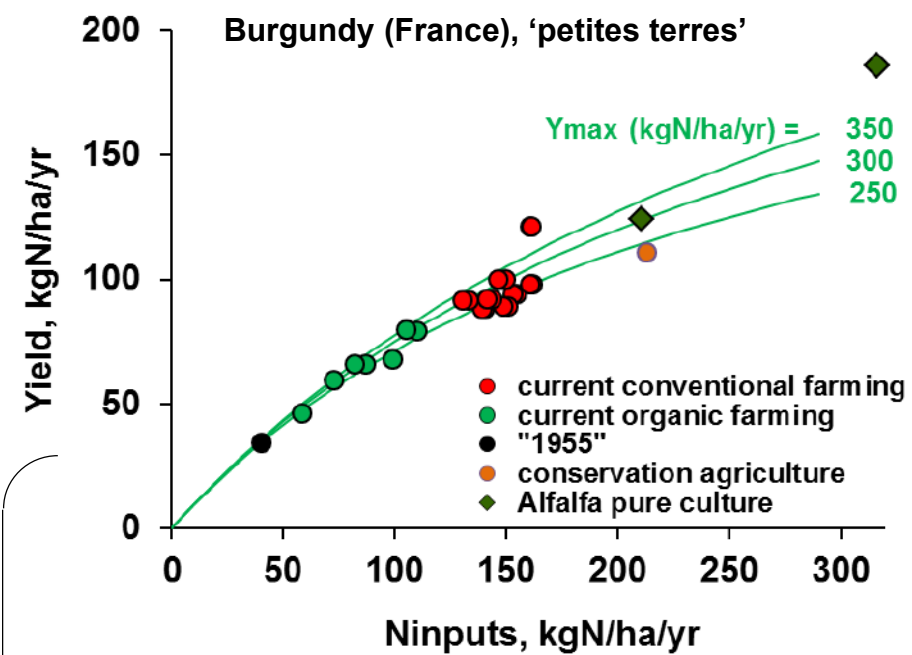
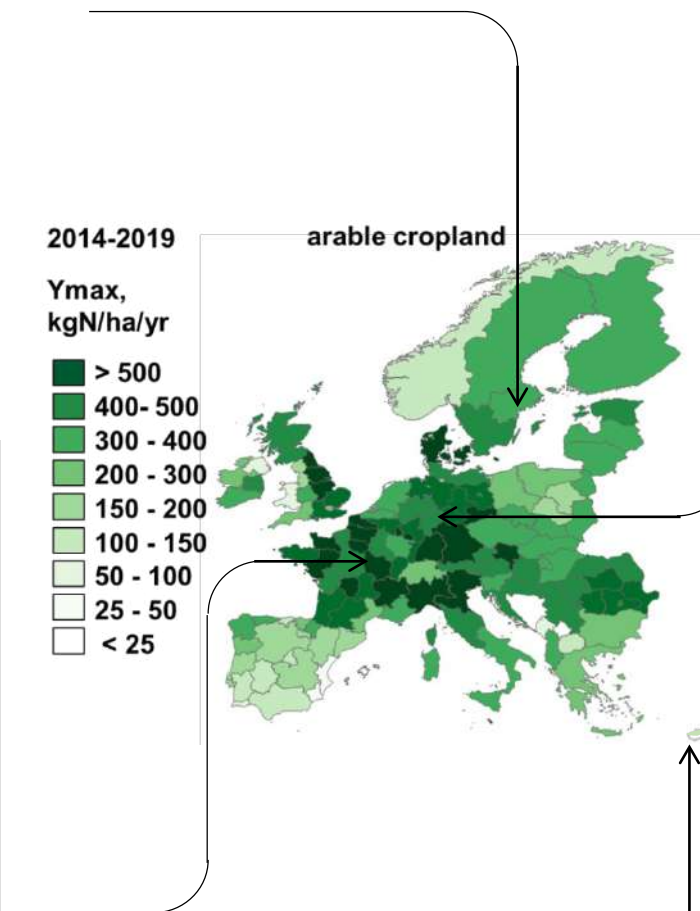
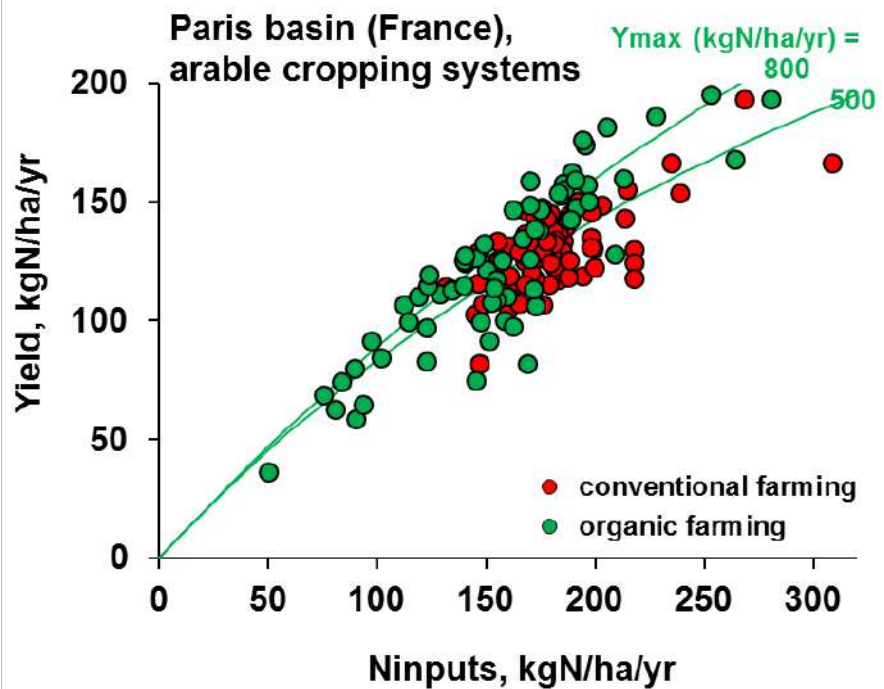
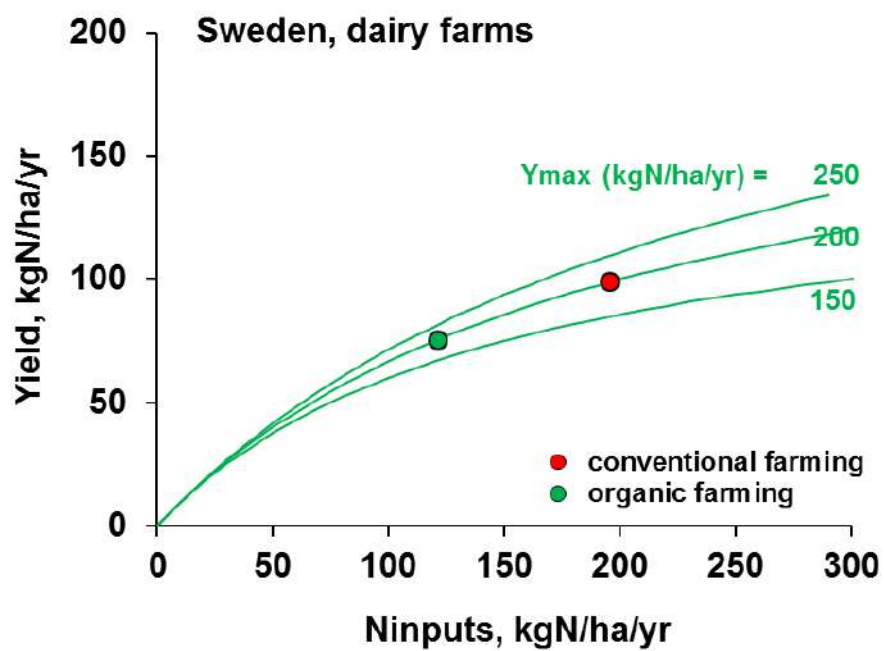
# Relation rendement vs. fertilisation et substituabilité des sources d'azote au sol

## L'exemple des «petites terres» des plateaux bourguignons

Anglade et al. (2015, 2017)

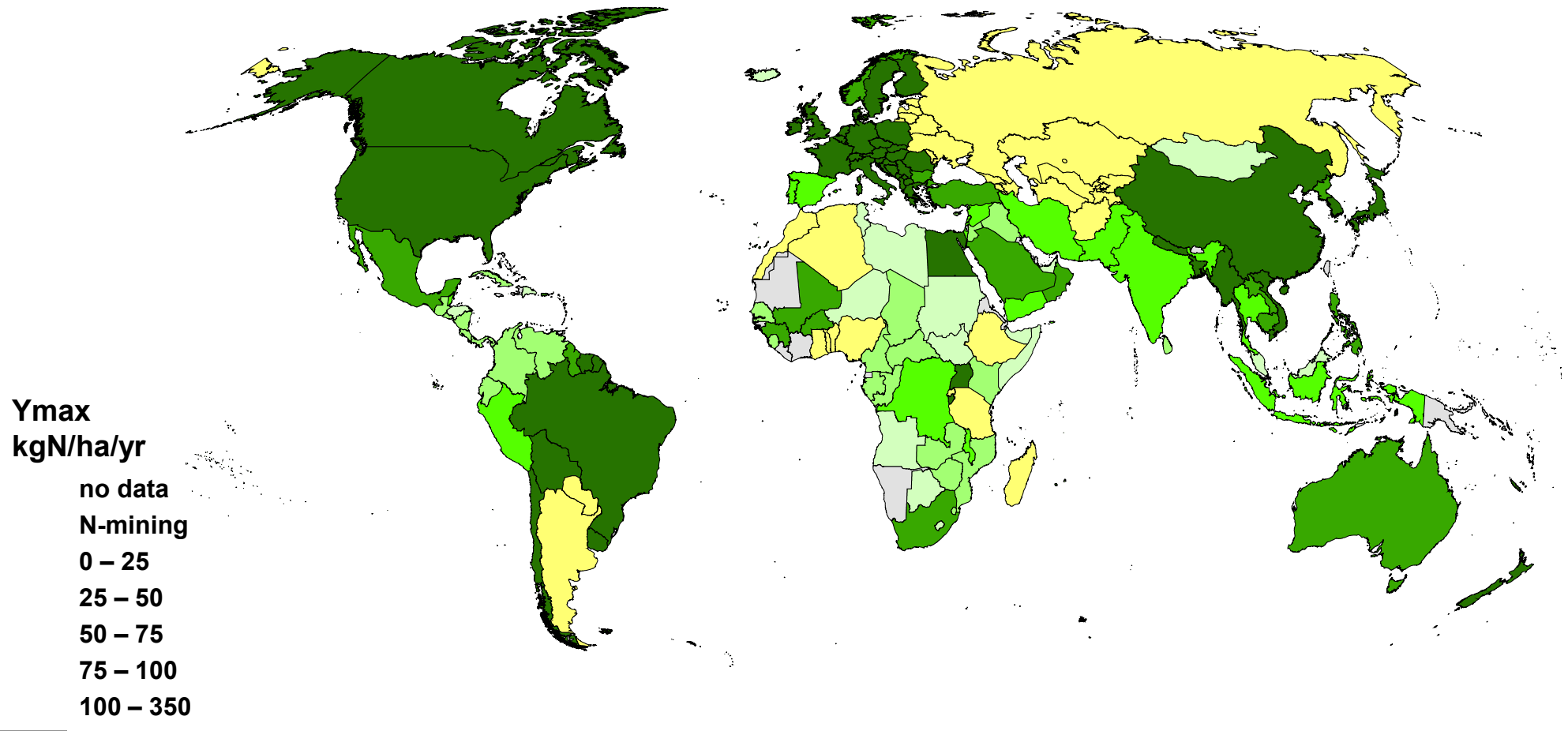


*L'Agriculture Biologique n'est pas intrinsèquement moins productive!*





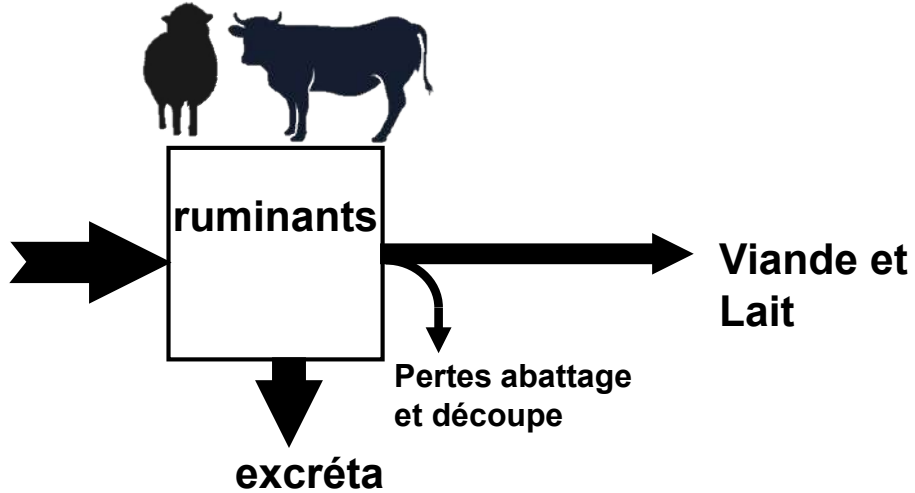
# Échelle mondiale : distribution des valeurs d'Ymax



## 2. L'élevage: monogastriques vs. ruminants

- Pas de concurrence avec l'alimentation humaine

- Herbe des prairies semi-naturelles
- Légumineuses fourragères
- Céréales

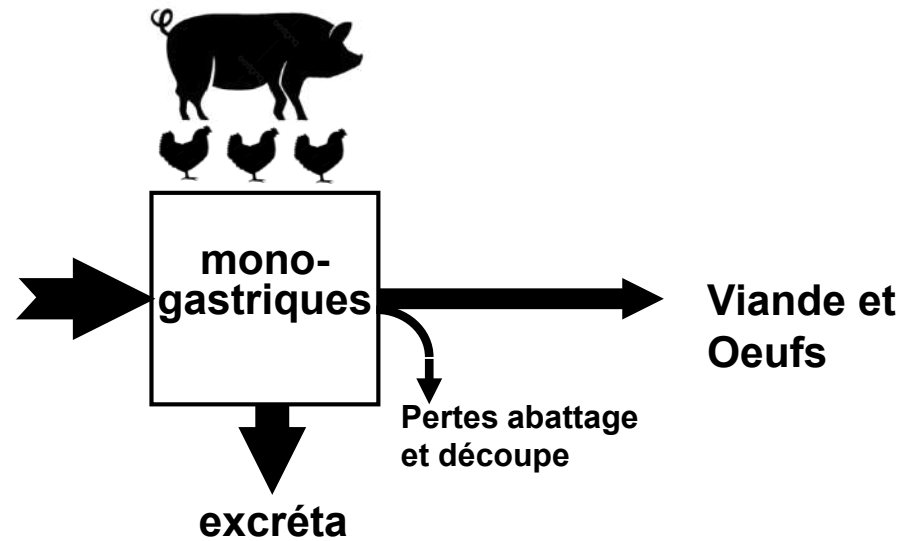


**Rendement de conversion**  
= prod. comestible / ingestion totale  
(en N)

5 - 20%

- Concurrence avec l'alimentation humaine

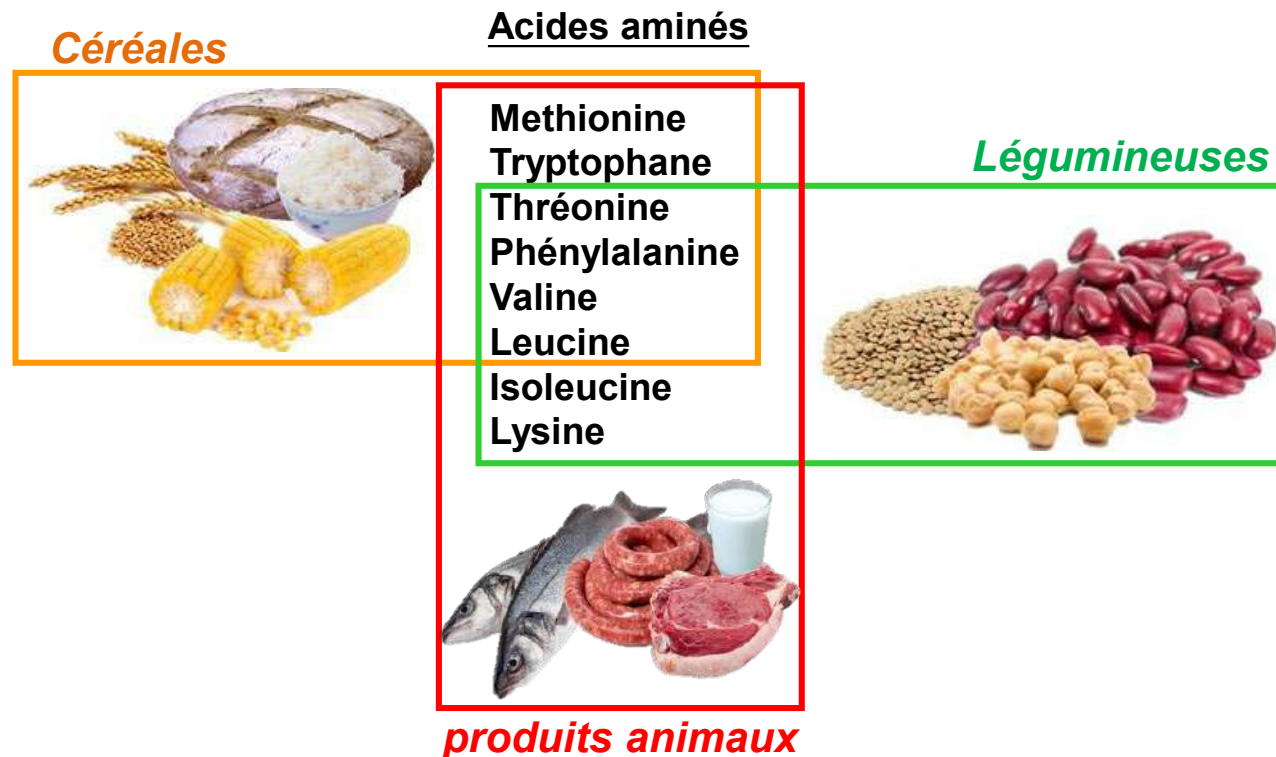
- Céréales
- Déchets et sous-produits



15 - 30 %

### 3. Le régime alimentaire humain

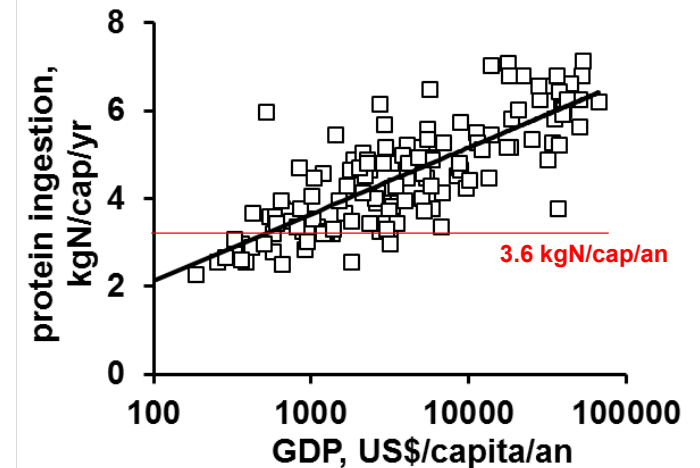
- Minimum vital : 2000-3000 kcal / pers. jour  
contenant **60 g protéines / pers.jour** (=10 gN/ pers.jour = 3.6 kgN/pers.an )  
= 200 kg equiv. céréales / pers. an



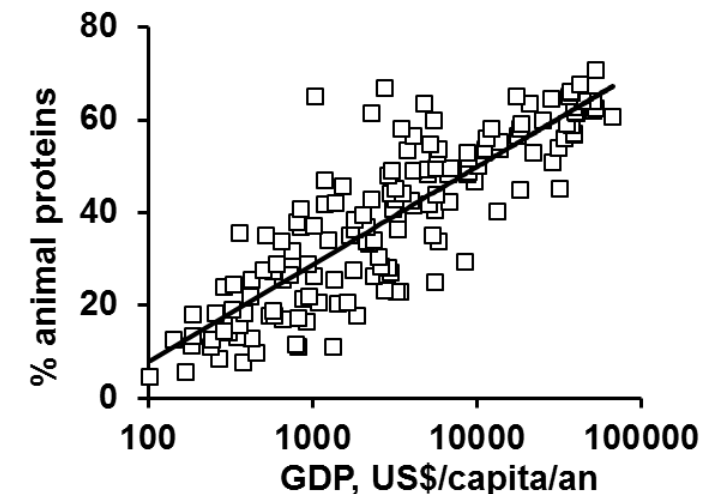
- L'alimentation traditionnelle de base associe :
  - Céréales et légumineuses
  - Céréales et produits animaux
  - Légumineuses et produits animaux

#### Consommation effective

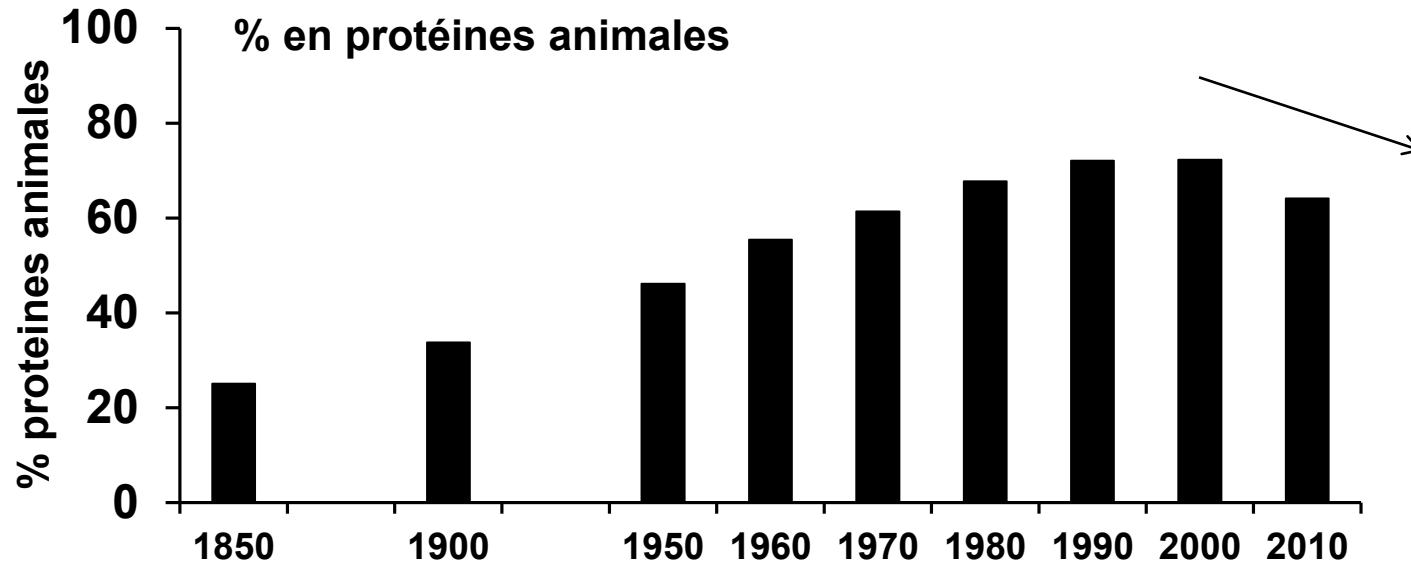
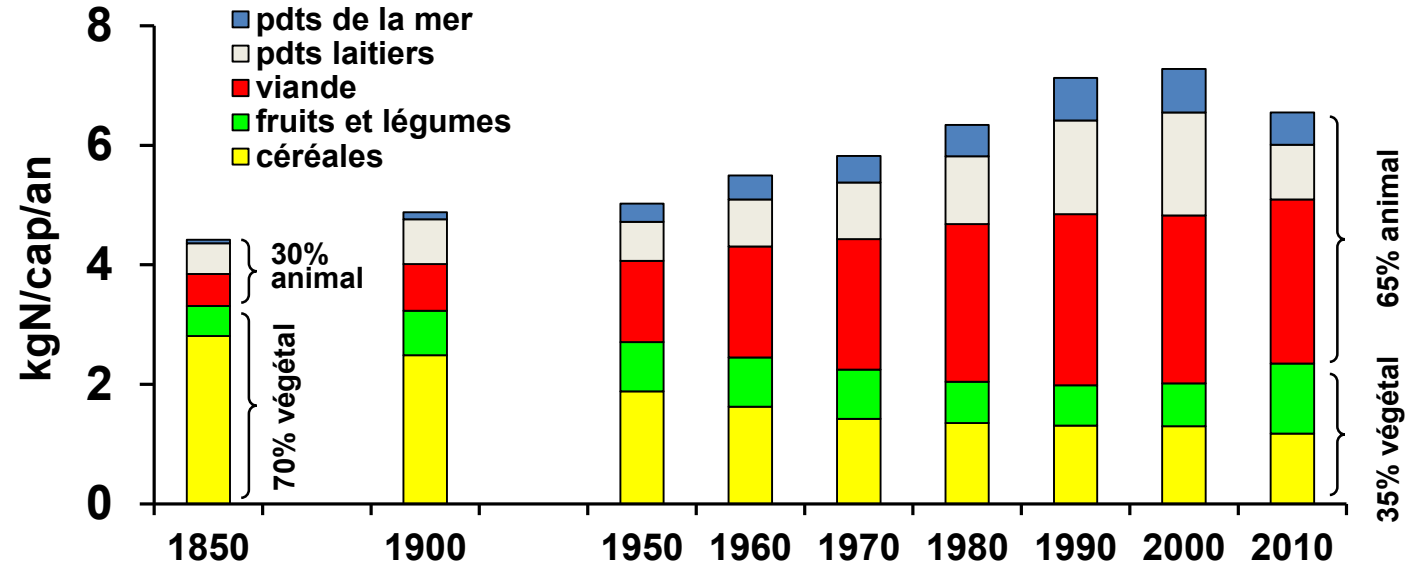
##### Consommation de protéines totales



##### % en protéines animales



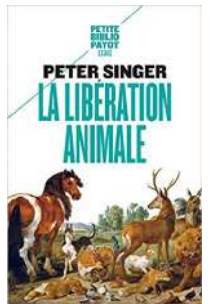
# L'assiette française depuis deux siècles...



Net recul de la consommation de viande ?

\*des raisons de santé

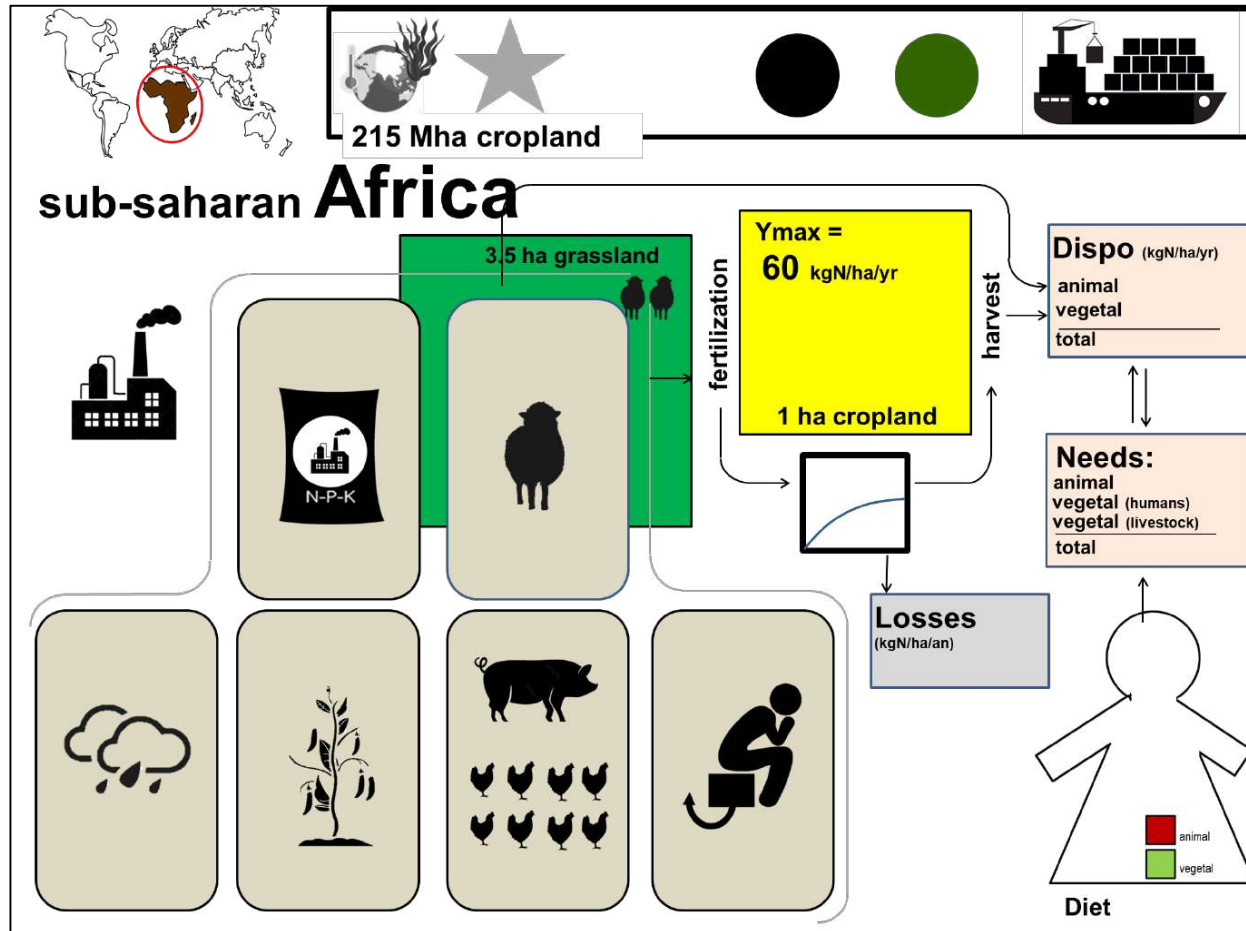
\*des raisons éthiques



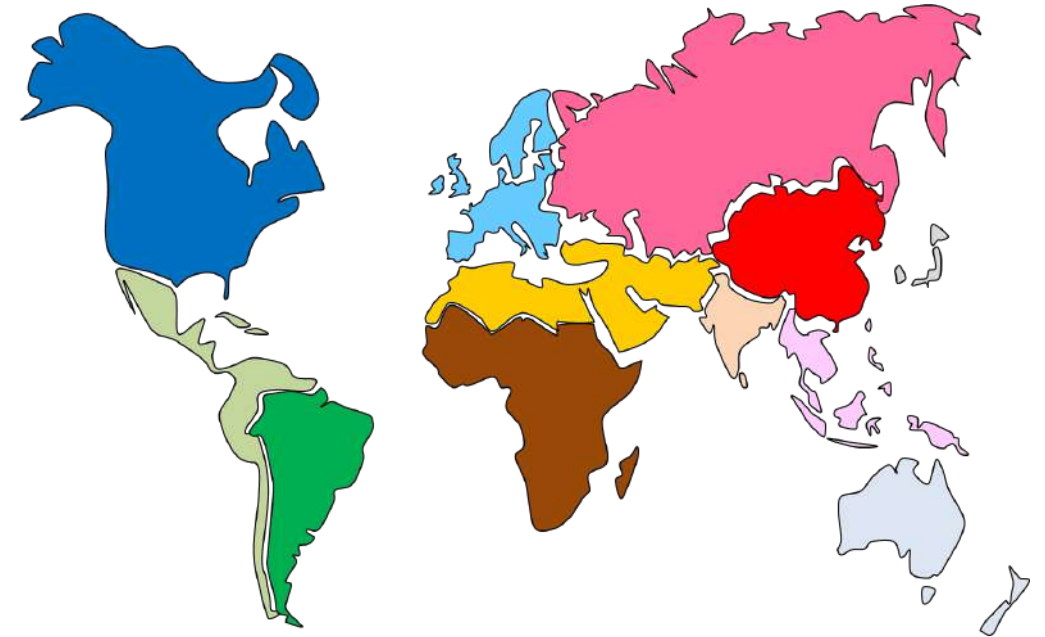
\*des raisons environnementales



# Place au Jeu !



## 12 Macro-Régions



# Le Plan de jeu:

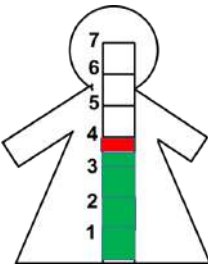


1 ha  
de terres arables

Terres  
Arables  
  
Ymax



Population  
(nb pers/ha)



Régime alimentaire  
(kgN/pers/an)

- Protéines animales
- Protéines végétales

**0.1**  
UGB à l'herbe

**Alimentation**  
Ravage 10 kgN/an d'herbe

**Fertilisation terres cultivées**  
1 Excrète 0 kgN/an de bouses dont 1 kgN/an utilisable pour kgN/ha les terres cultivées

**Production comestible**  
1 Produit 1 kgN/an de lait et viande

Bétail nourri à l'herbe  
(offrant nourriture et fertilisation)

Surfaces de prairies  
semi-naturelles  
(par ha de terres arables)



ressources de fertilisation:

**0.1**  
UGB au grain

**Alimentation**  
10 Mange 10 kgN/an de grain

**Fertilisation terres cultivées**  
5 Excrète 0 kgN/an de fumier dont 5 kgN/an utilisable pour kgN/ha les terres cultivées

**Production comestible**  
2 Produit 2 kgN/an de lait, de viande ou d'œufs

Bétail nourri au grain  
(offrant nourriture et fertilisation)

**10%**  
de la rotation  
(max 50%)

**Fixation d'azote par les légumineuses**

**Fertilisation terres cultivées**  
Les légumineuses sont capables de produire l'azote de l'air. Les parties non récoltées contribuent donc, en apportant du N, à la fertilité des sols pour les autres cultures.

**10%**  
Ymax  
kgN/ha

Fixation symbiotique  
Légumineuses

**10**  
kgN/ha

**Engrais industriels**

**Fertilisation terres cultivées**  
10 Contribution à la fertilisation des terres cultivées sous forme de produits industriels ou synthétiques nécessitant une dépense énergétique variable

Engrais  
de synthèse

**5**  
kgN/ha

**Dépôt atmosphérique**

**Fertilisation terres cultivées**  
5 La pluie apporte un peu d'azote, mais pas des débris ou des moteurs à explosions ou les centrales thermiques

Dépôt  
atmosphérique

**10%**  
de recyclage de l'urine humaine  
(max 70%)

**Recyclage des excréments humains**

**Fertilisation terres cultivées**  
10% Les excréments humains (et particulièrement l'urine qui contient 80% de l'azote ingéré) peuvent être utilisés comme engrais

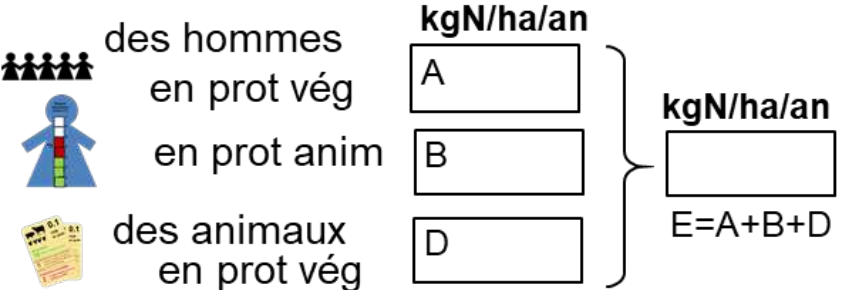
Recyclage de  
l'urine humaine

# Bilan d'approvisionnement par ha de cultures:

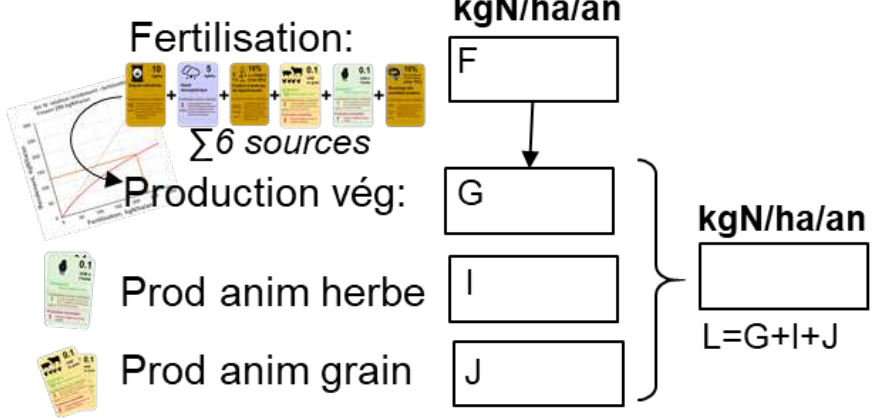
2016 Région.....

## Bilan par ha de terres arables

### ▪ Besoins:



### ▪ Disponibilités:



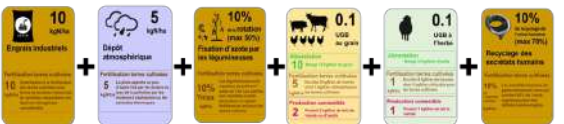
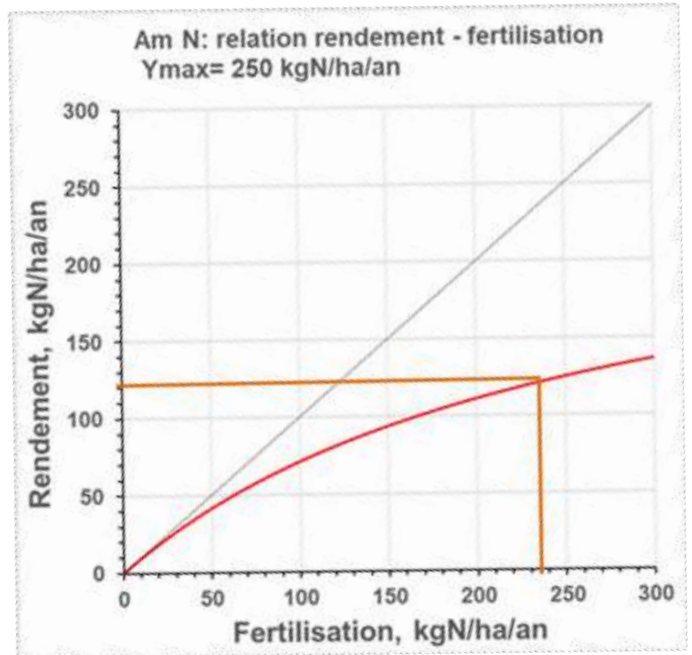
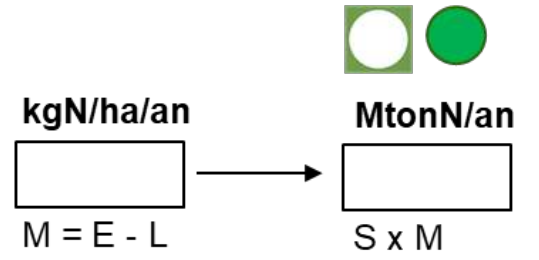
S, Surf totale terres arables

M ha/1000 = Md ha

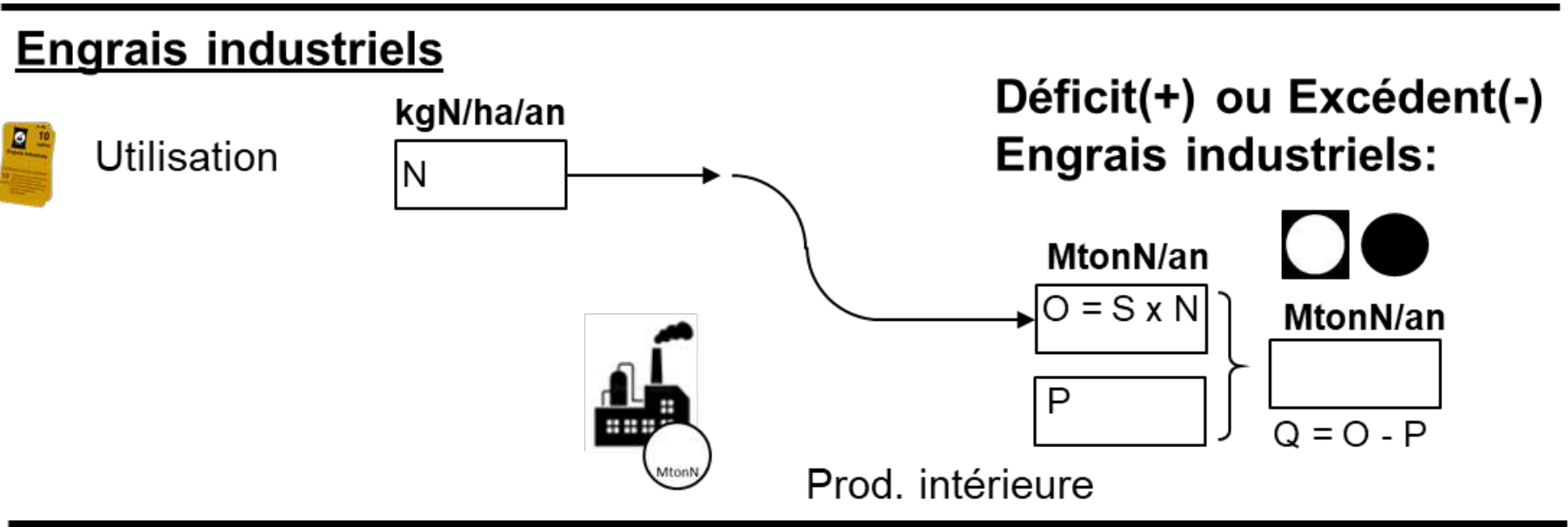
## Bilan en MtonN/an

= kgN/ha/an x Md ha

Déficit(+) ou Excédent(-) alimentaire:



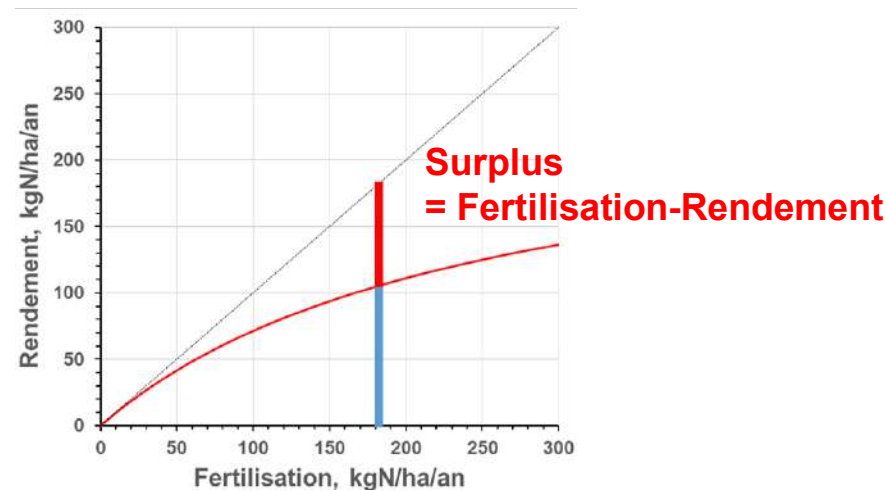
# Le Bilan d'approvisionnement en engrais de synthèse





# L'empreinte environnementale

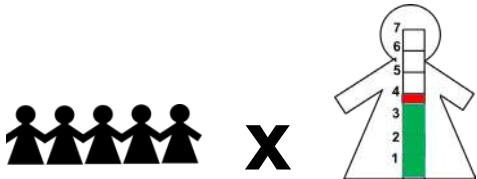
Surplus terres cultivées



## Pertes environnementales

Surplus fertilis°  
(fertil tot – prod veg)

H



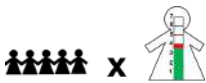
X

30% des excréments animaux  
volatilisés en NH3



Excrétion anim.  
Volatilisée

K



Eaux usées  
non récupérées

C

+

+

kgN/ha/an  
R=H+K+C



MtonN/an  
S x R

( Limite planétaire:  
60 MtonN/an )

Fraction non recyclée des  
excréments humains

# Bilan global

(pour la Macro-Région dans son ensemble, compte tenu de sa surface totale de terres arables)



**Déficits ou excédents de nourriture** (pour les hommes et les animaux)

**Déficits ou excédents d'engrais industriels**

**Pertes environnementales d'azote**

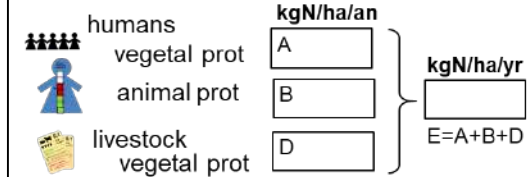
2	Bilan Situation actuelle			
3		import	import	pertes
4		alimentaires	engrais indus	environnement
5		MtonN/an	MtonN/an	MtonN/an
6	Europe	0.0	0	0
7	Amerique N	0.0	0	0
8	FSU	0.0	0	0
9	Am C&SW	0.0	0	0
10	Am SE (soya)	0.0	0	0
11	Chine	0.0	0	0
12	Inde	0.0	0	0
13	Asie SE	0.0	0	0
14	Japon	0.0	0	0
15	Maghreb & Pr Or	0.0	0	0
16	Afrique Sub Saharienne	0.0	0	0
17	Australie NZ	0.0	0	0
18				
19	Bilan	0.0	0.0	0
20	Commerce total	0.0	0.0	

2016 Region.....

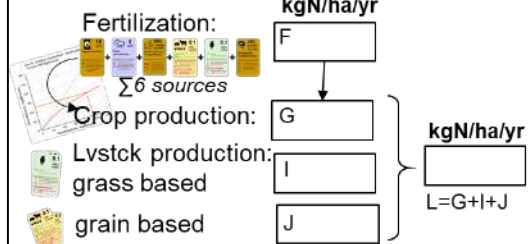
S, cropland surf area  
M ha/1000 =  
Md ha

## Balance per ha cropland

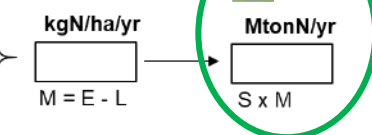
### Needs:



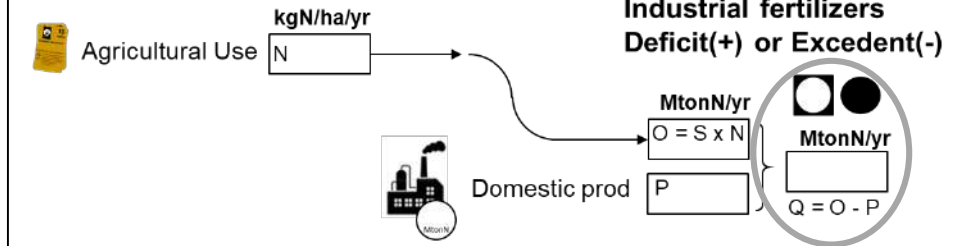
### Disponibility:



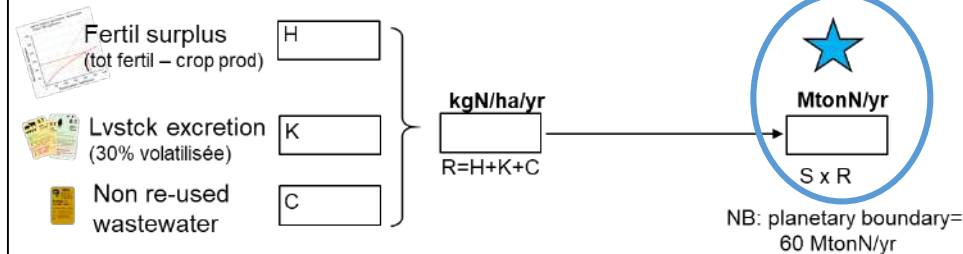
Food and feed  
Deficit(+) or Excedent(-)



## Industrial fertilizers



## Environmental losses

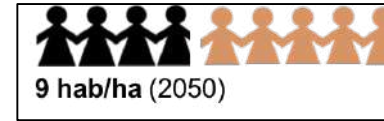


# Deuxième phase du jeu: Rêvons d'un monde meilleur

## Des contraintes:

Nourrir tout le monde

sans déforestation (surf agricoles identiques)



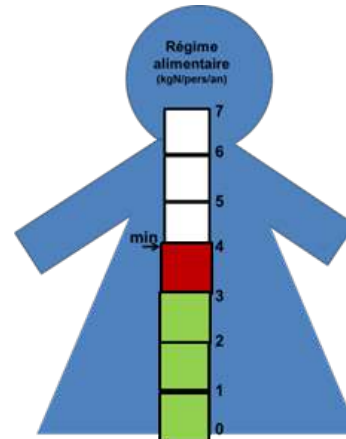
## Des objectifs:

Respecter les limites planétaires (minimiser les pertes environnementales)

Assurer le maximum de souveraineté alimentaire (minimiser le commerce international)

## Des leviers: rebattre les cartes

Ajuster le régime alimentaire et les modes de fertilisation



## 2ème phase du jeu:

Rebattre les cartes pour inventer un scénario avec

Des contraintes:

*La même surface cultivée*

*La population prédite pour 2050*

Des objectifs:

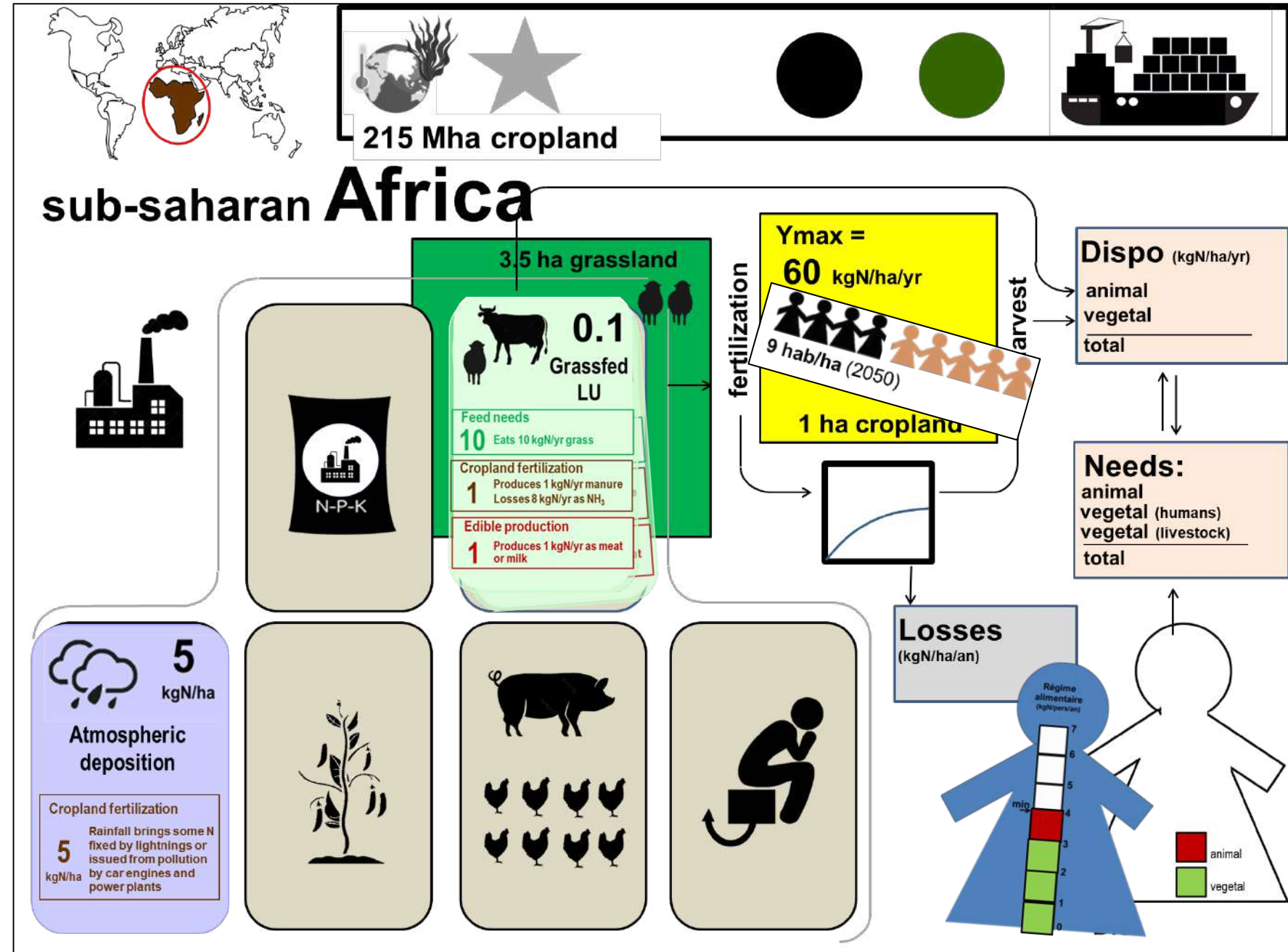
*Plus de souveraineté*

*Moins de pertes d'azote*

Des leviers:

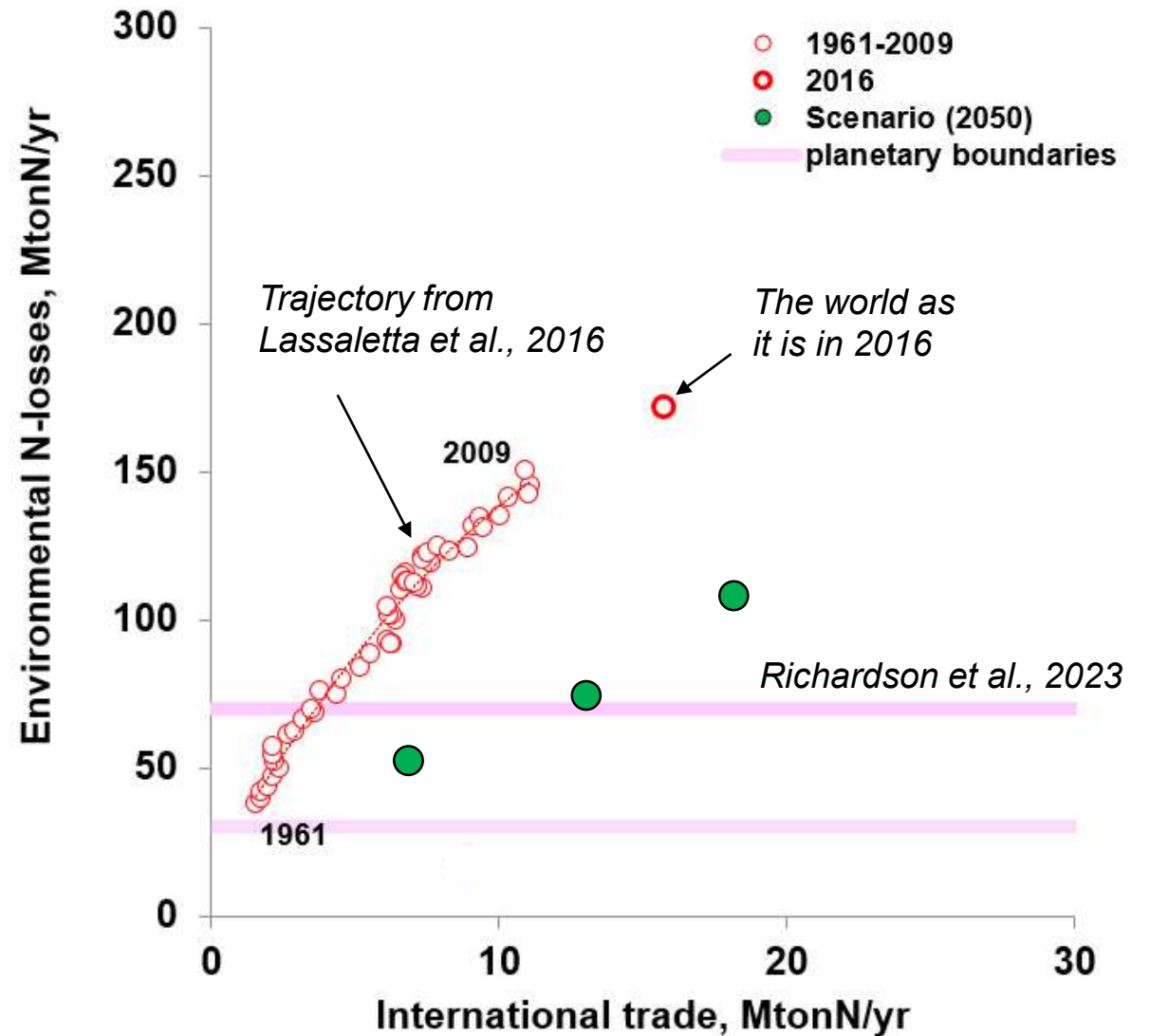
*Le régime alimentaire*

*Les modes de fertilisation*



# Debriefing 2ème phase du jeu

## Trajectoire des pertes environnementales et du commerce international



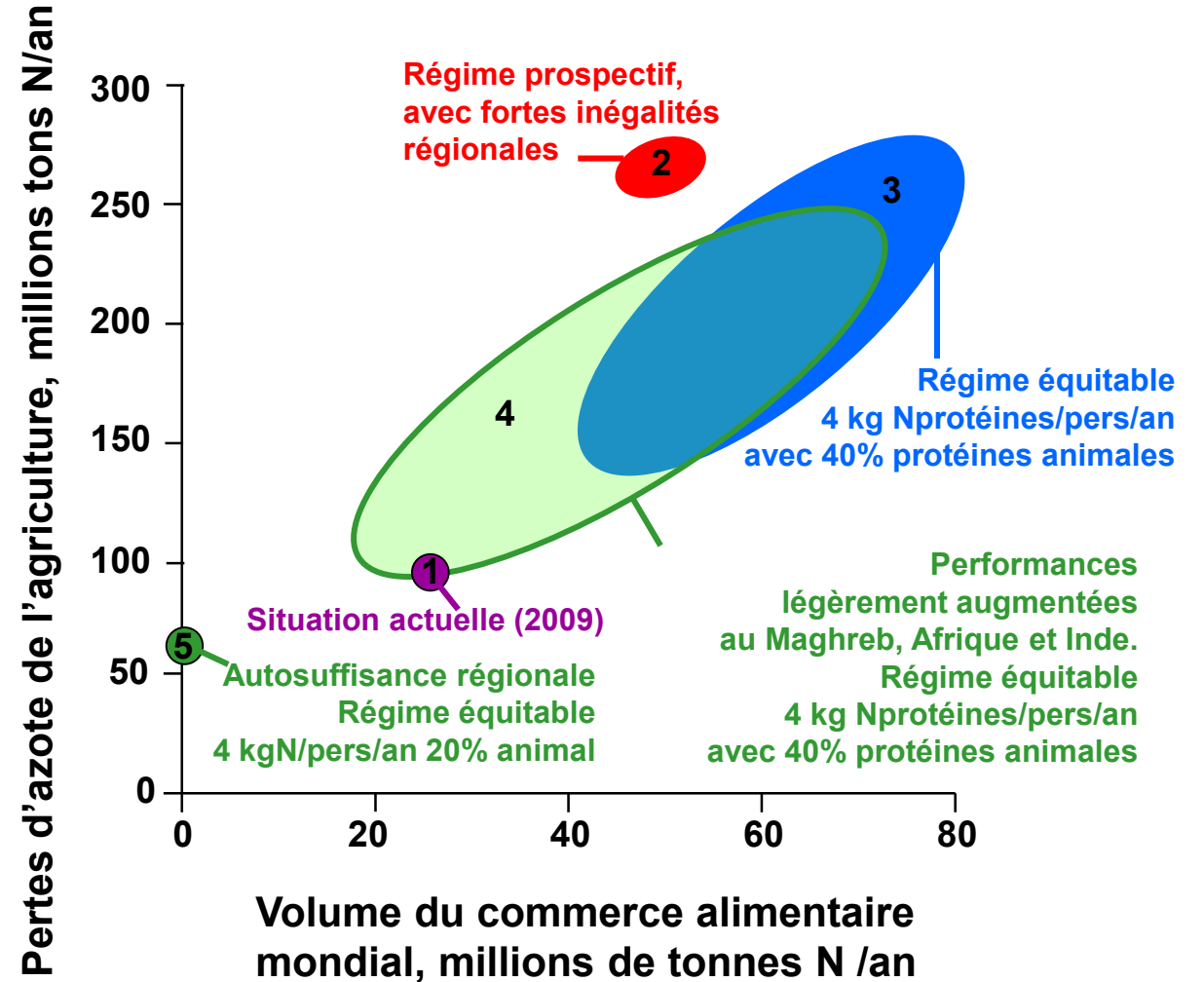


# A vast range of opportunities for feeding the world in 2050: trade-off between diet, N contamination and international trade

Gilles Billen<sup>1,2</sup>, Luis Lassaletta<sup>1</sup> and Josette Garnier<sup>1,2</sup>

doi:10.1088/1748-9326/10/2/025001

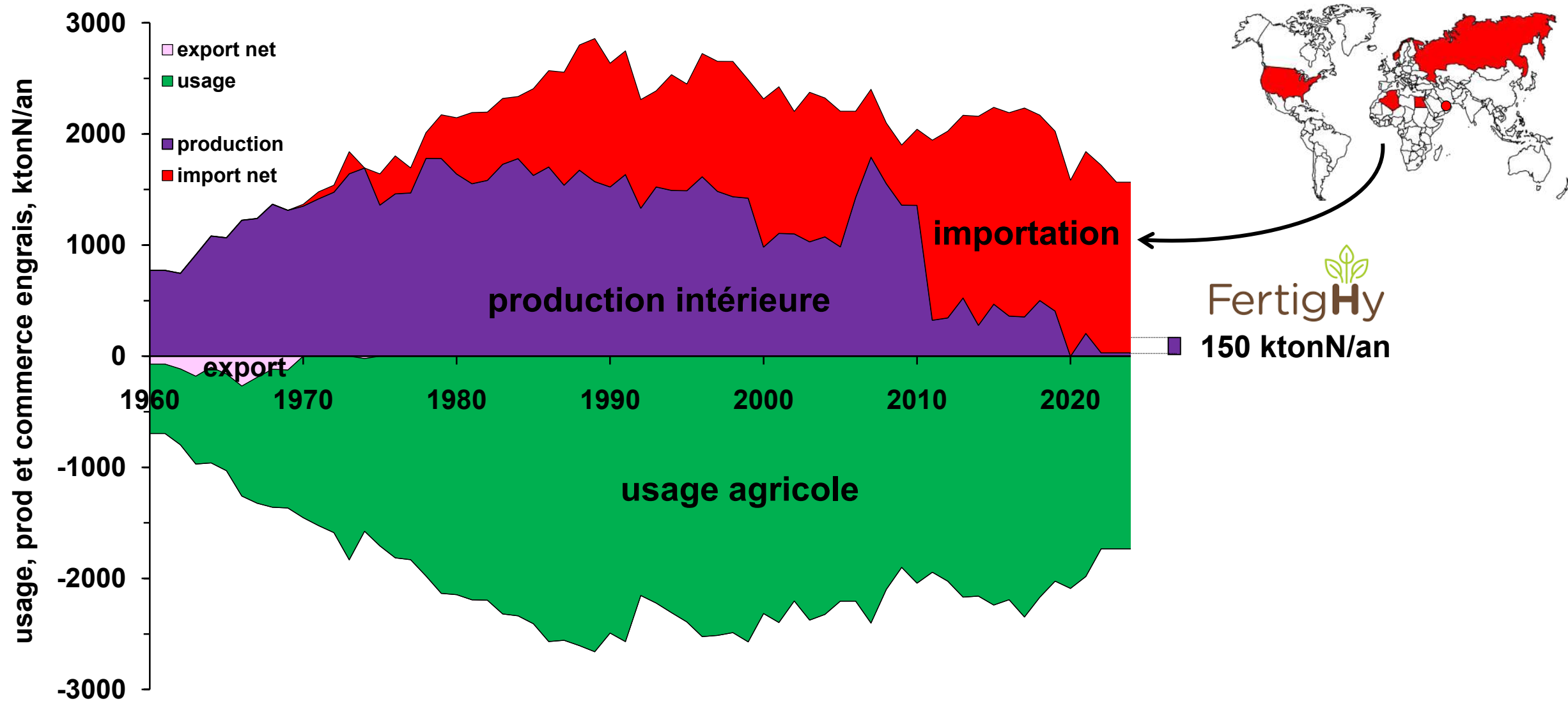
Independent Science News, March 9, 2015  
<http://www.independentsciencenews.org/environment/will-food-sovereignty-starve-the-poor-and-punish-the-planet/>



# **Éléments de débrief**

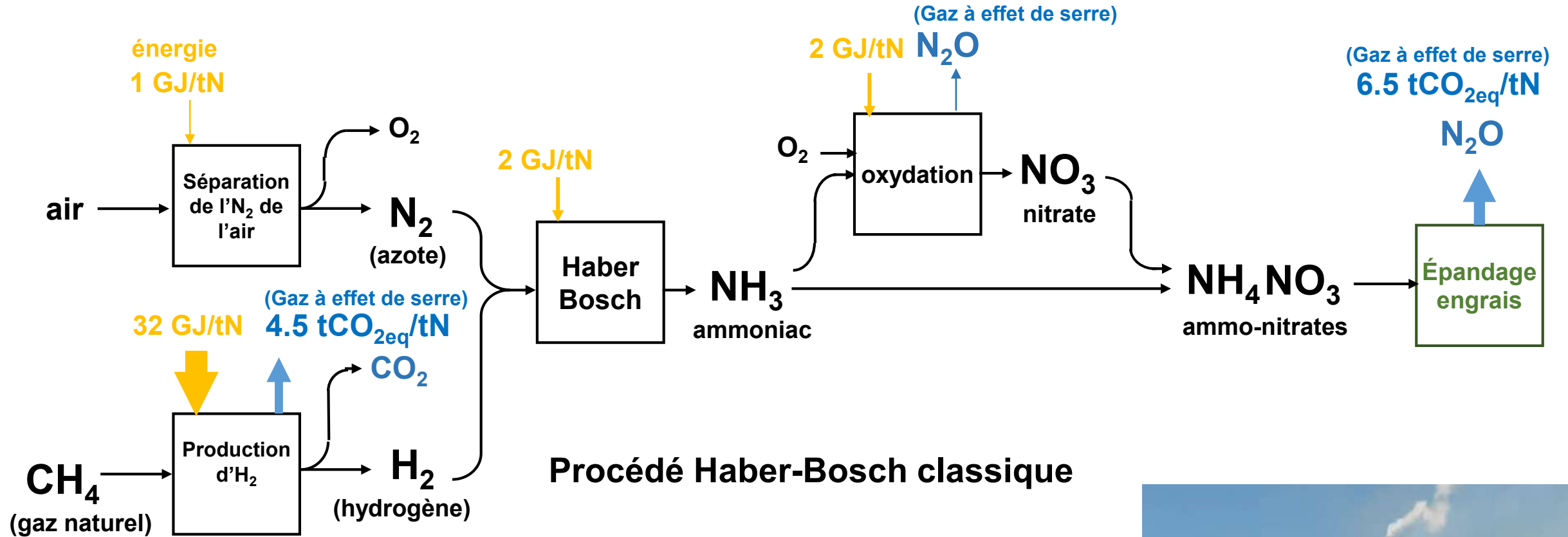
**L'usine FertigHy de Languevoisin-Quiquery**

# Utilisation, importation et production d'engrais azotés en France depuis 1960



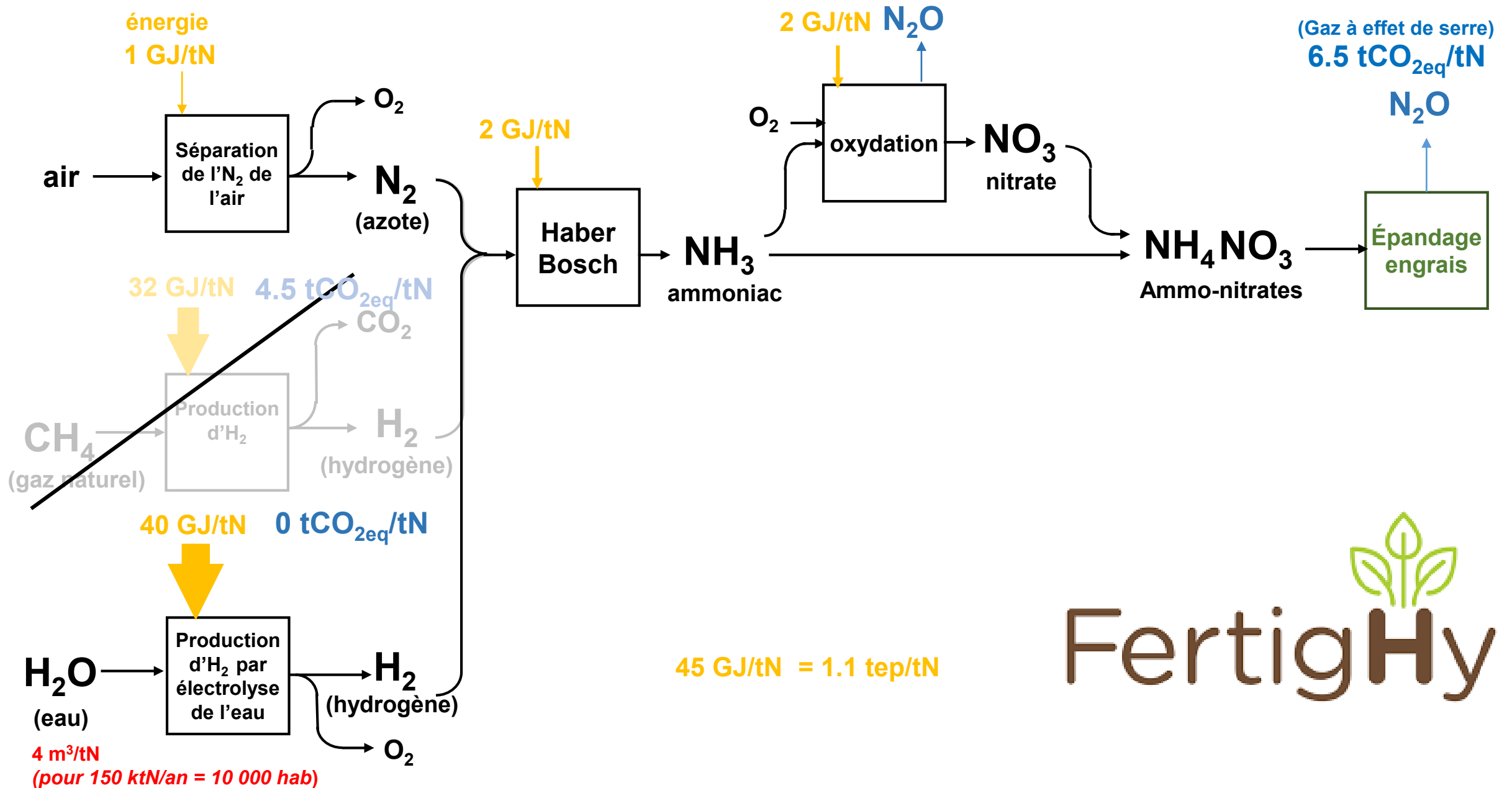
données FAOstat

# Comment sont produits les engrais azotés?



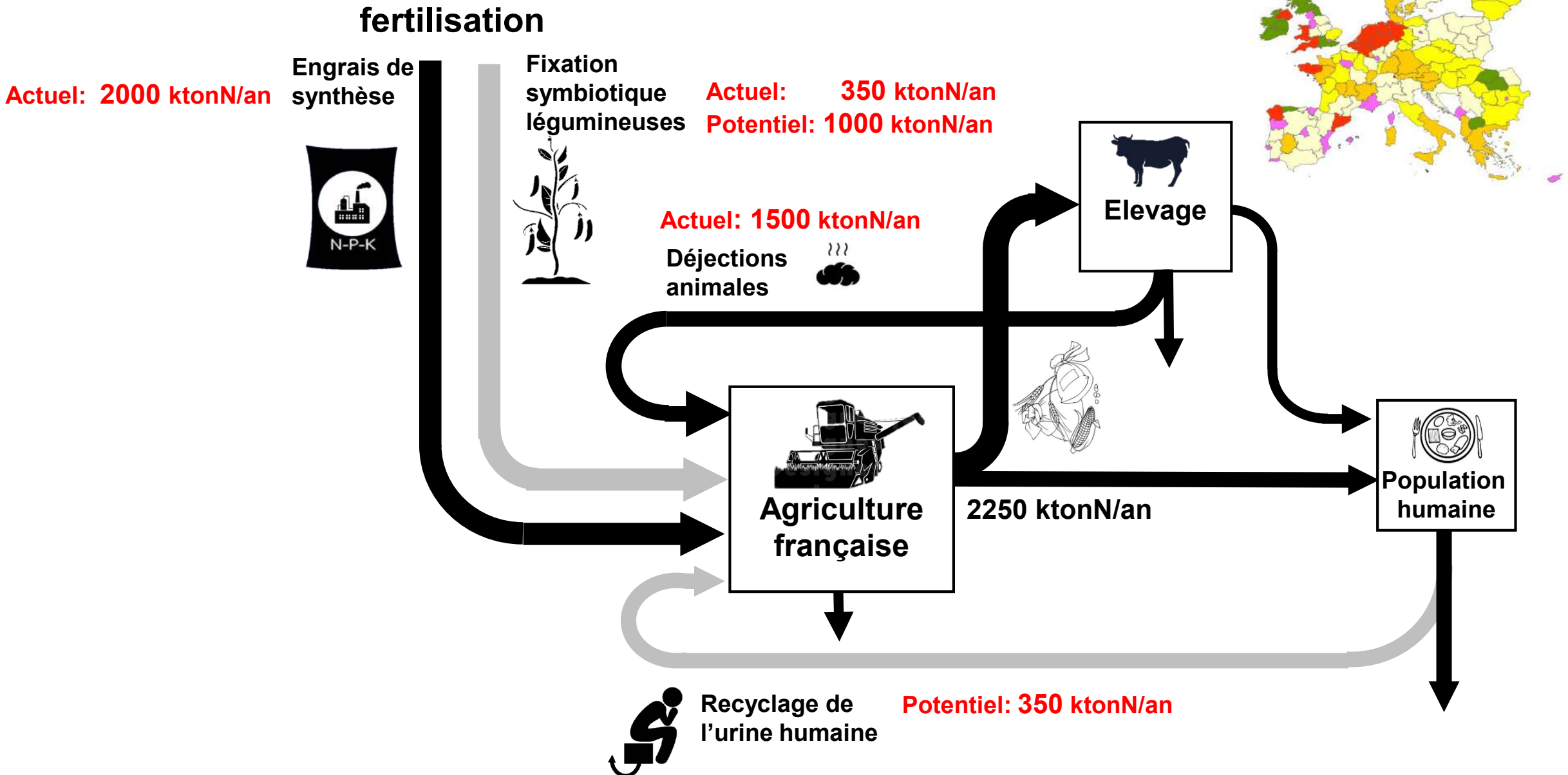
Yara,  
usine d'engrais de Montoir-de-Bretagne

# Comment sont produits les engrais azotés?





# Peut-on se passer des engrais azotés?



# Les trois leviers permettant de se passer des engrais industriels de synthèse



**Généraliser les rotations culturales incluant des légumineuses**



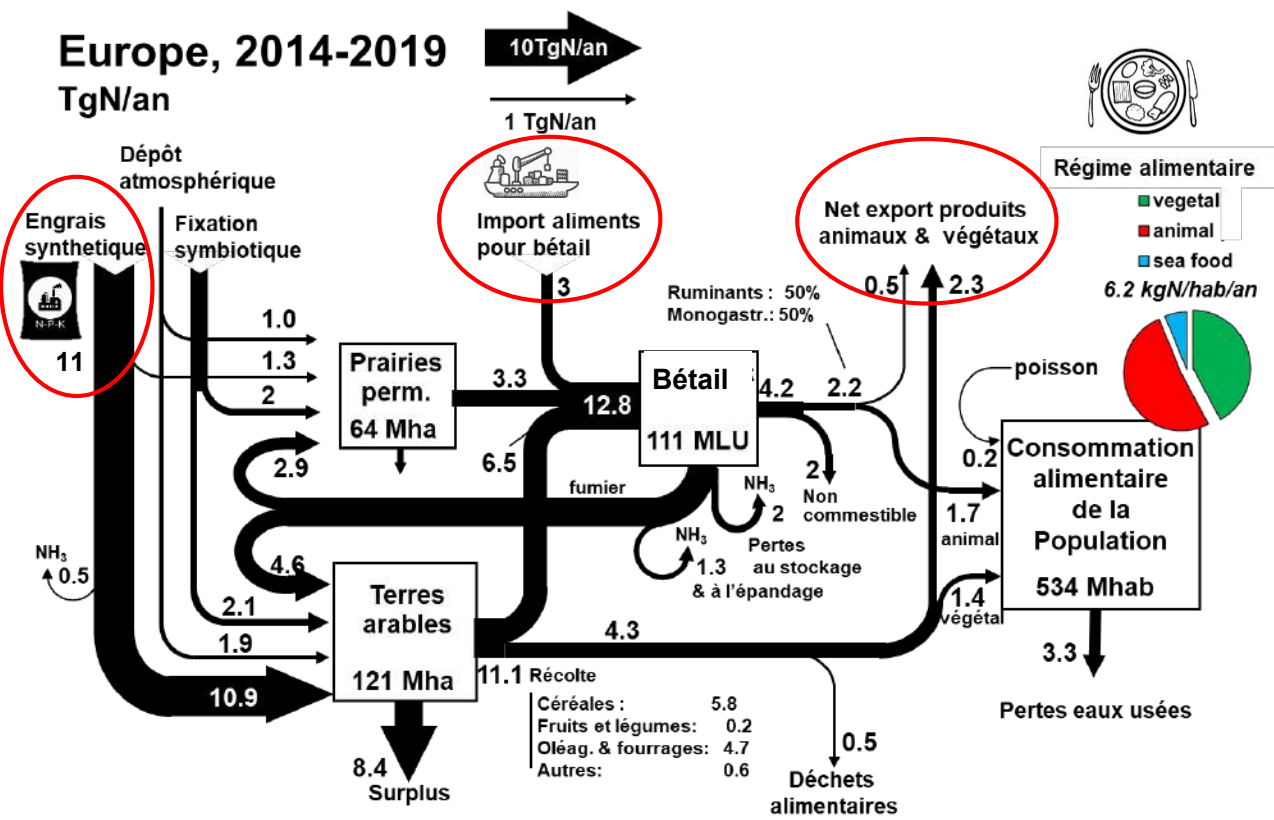
**Reconnecter l'élevage et les grandes cultures**



**Recycler l'urine humaine**

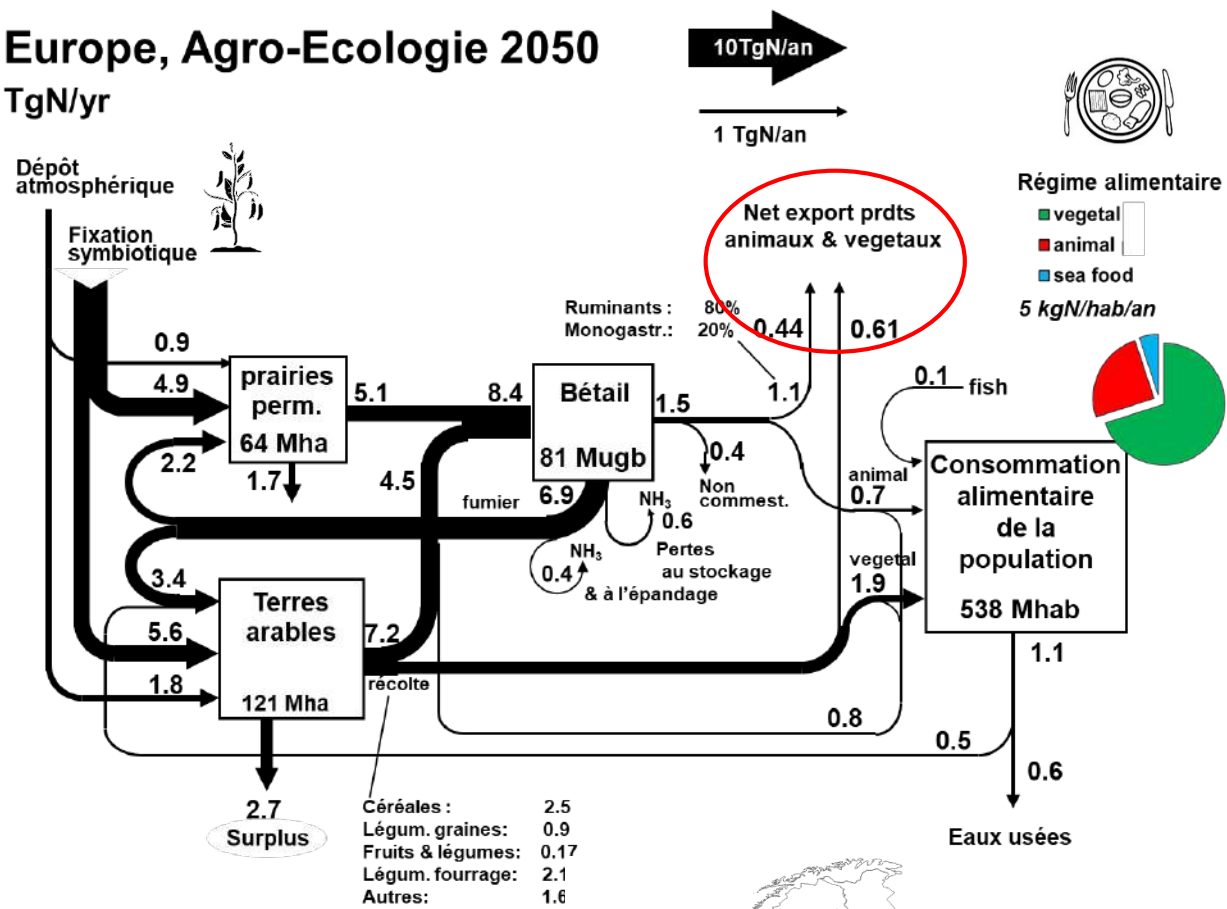
# Un tel modèle agricole permet de nourrir la France et l'Europe et même d'exporter encore des surplus

Billen et al, 2024. STOTEN



Émissions de GES (N<sub>2</sub>O):

Total Europe: 297 ktN/an



161 ktN/an

