

Cours transversal  
Uni Mail – M2170  
Le jeudi 19 mars 2026

# Penser l'Anthropocène

Le sens d'être humain sur Terre

*Les cycles biogéochimiques dans le référentiel des limites planétaires*

Intervenant : Aurélien Boutaud

# A Ciel Ouvert

## Science et Spiritualité





# Les cycles biogéochimiques

**dans le référentiel des limites planétaires**

**Aurélien Boutaud**

Environnementaliste

353 ch. de la fruitière, 74290 Talloires - France

[www.aboco.net](http://www.aboco.net) / [aurelien@aboco.net](mailto:aurelien@aboco.net)

---

Docteur en sciences et génie de l'environnement

Professeur associé à l'Université Jean Moulin

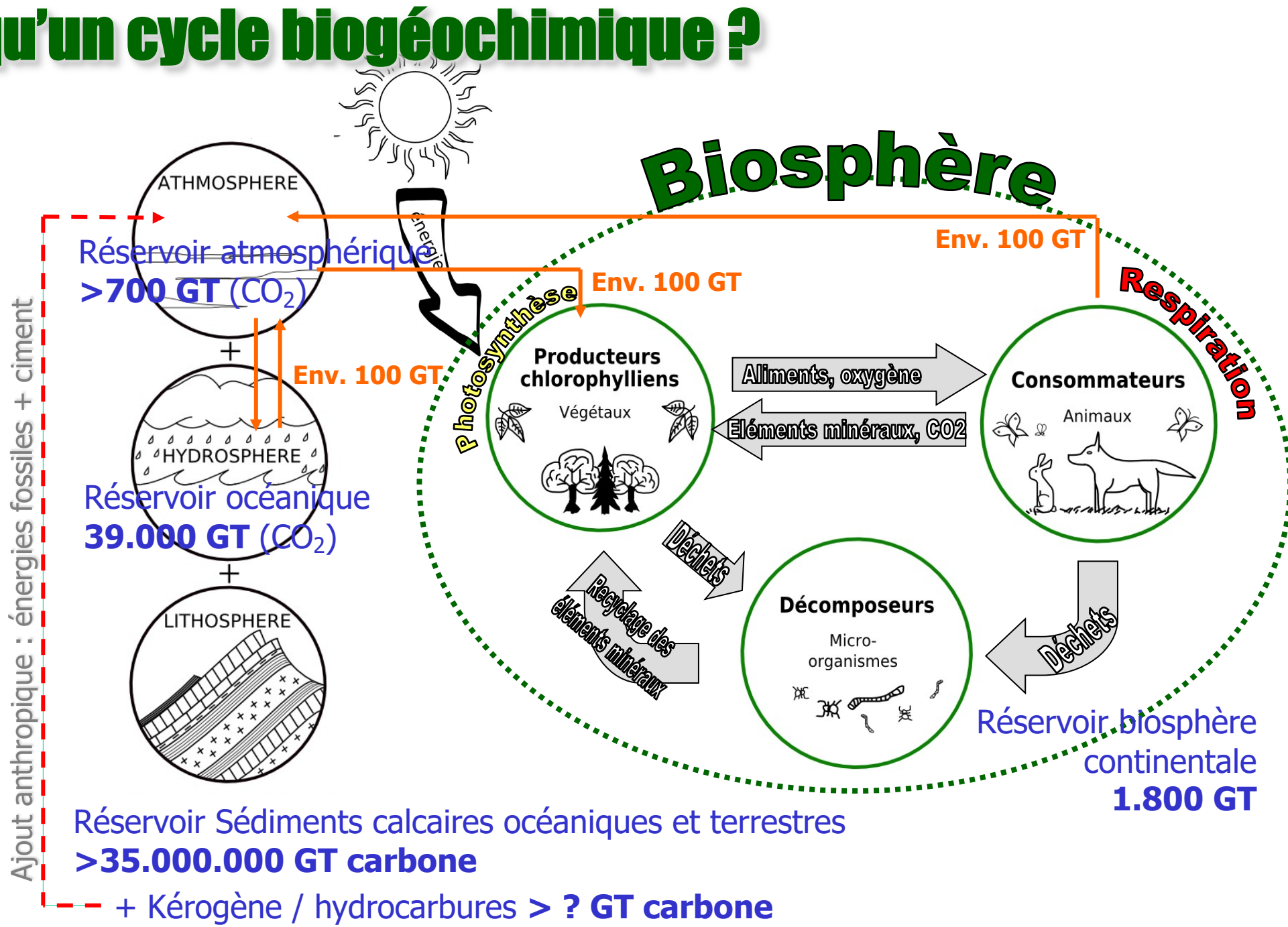
# Les cycles biogéochimiques dans le référentiel des limites planétaires : Sommaire

- 1) Une **introduction** aux cycles biogéochimiques et au référentiel des limites planétaires
- 2) Les déséquilibres du **cycle du carbone** : effets sur le climat et les océans
- 3) Les déséquilibres du **cycle de l'azote** (et quelques mots sur le cycle du **phosphore**)
- 4) Quelques **perspectives** / débat.

# Qu'est-ce qu'un cycle biogéochimique ?

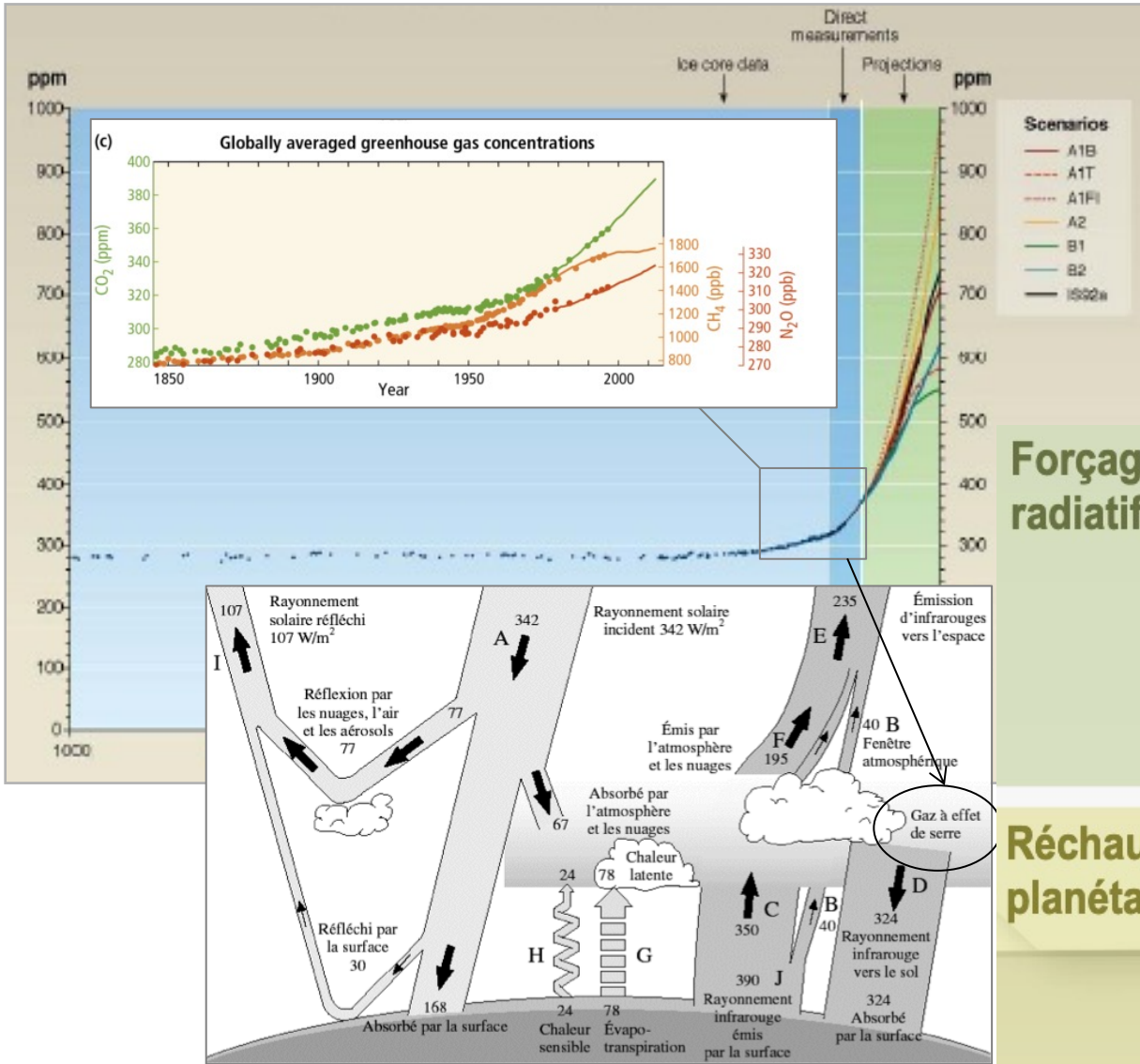
Processus de transport et de transformation cyclique d'un élément ou composé chimique entre les grands réservoirs que sont la **lithosphère**, l'**hydrosphère** (océans), l'**atmosphère** et la **biosphère**.

L'exemple du cycle « court » du **carbone** =>



+ Kérogène / hydrocarbures > ? GT carbone

# Davantage de carbone dans l'atmosphère ?

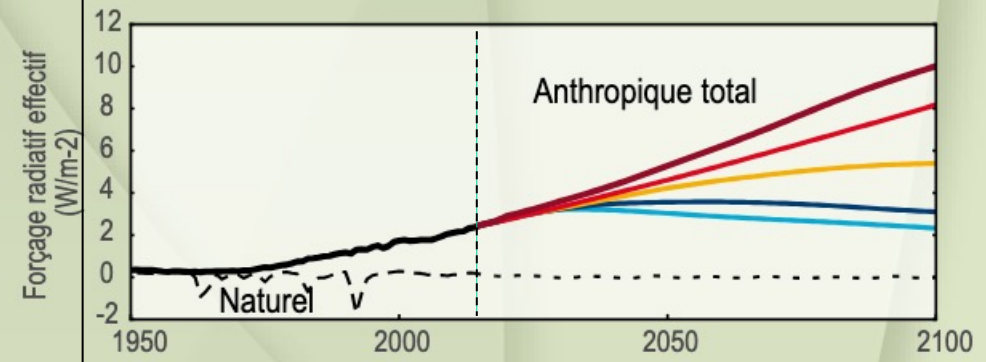


Les **concentrations de GES** ont augmenté fortement depuis le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle (émissions anthropiques, yc combustion énergies fossiles)

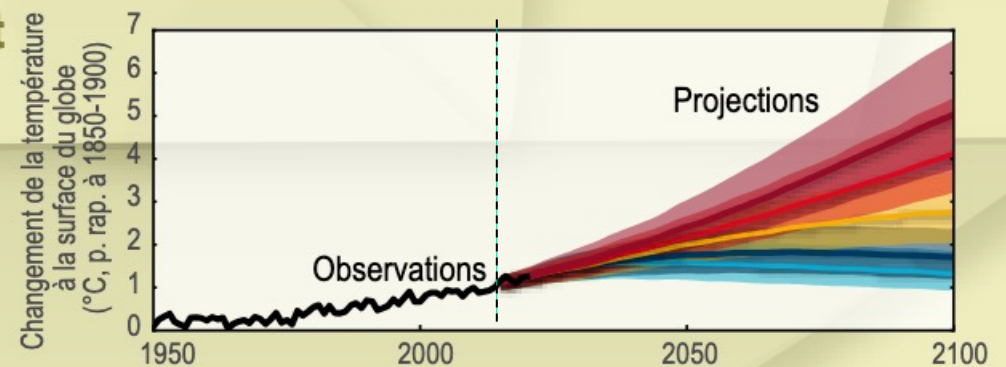
Cette augmentation modifie **le bilan radiatif** de l'atmosphère terrestre...

...se traduisant par une augmentation de la température moyenne à la surface terrestre (**réchauffement global**)

## Forçage radiatif



## Réchauffement planétaire



Le changement climatique est la conséquence d'un « déséquilibre » **du cycle biogéochimique du carbone**

# Limites planétaires et cycles biogéochimiques

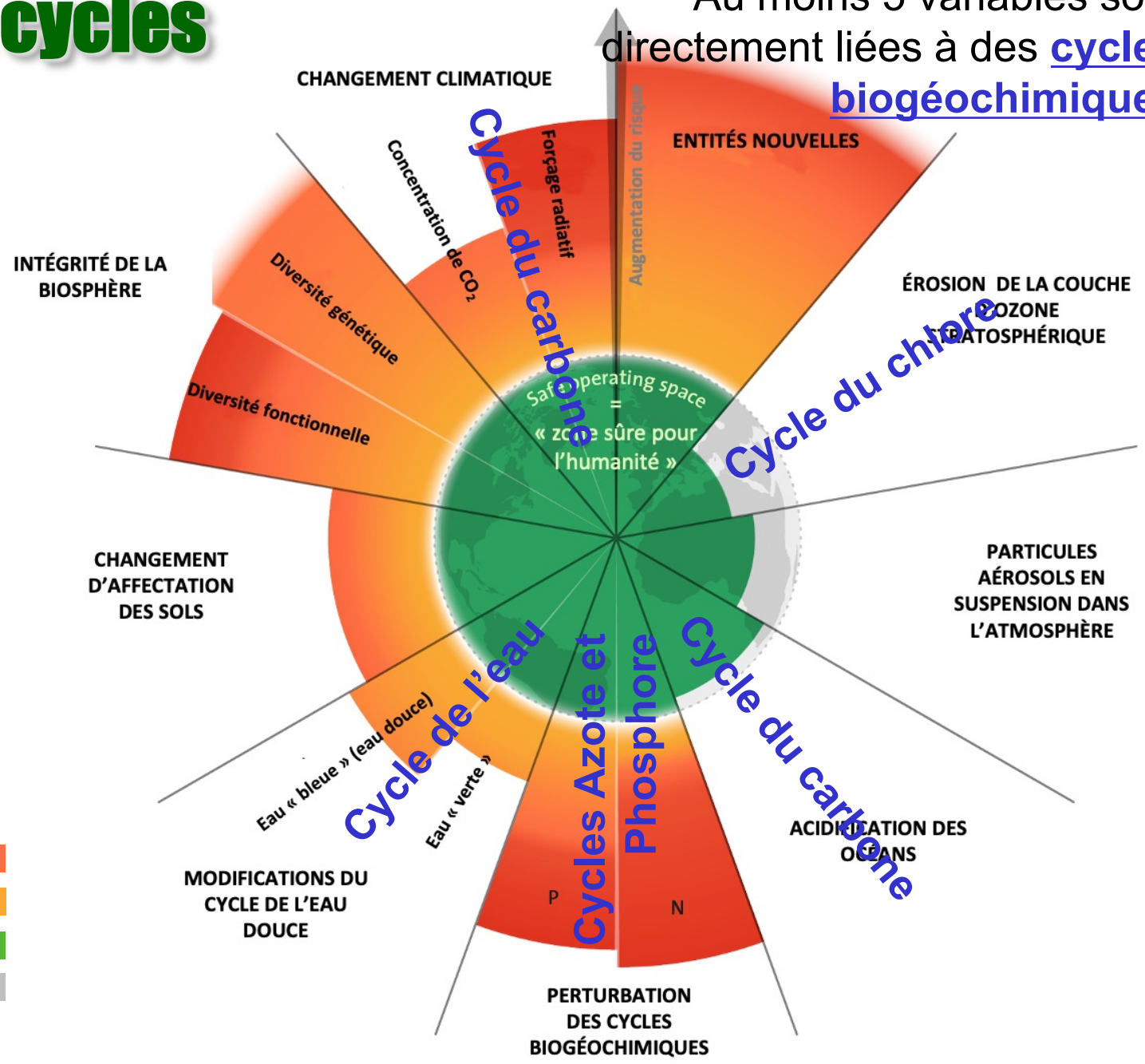
Le concept clé : « espace opérationnel sécurisé pour l'humanité ».

9 variables du système Terre perturbées par les activités humaines.

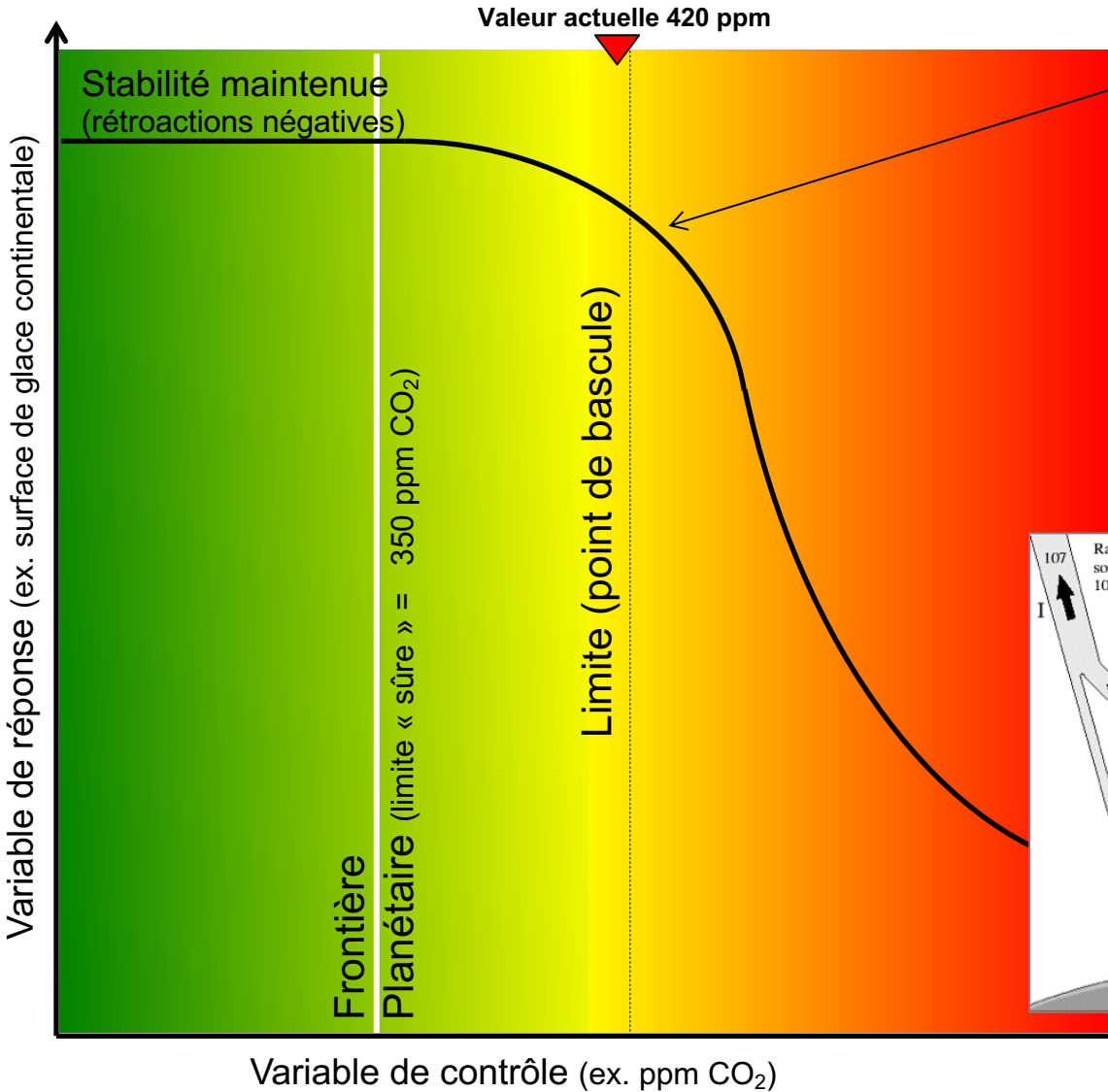
Pour chacune, on identifie une « frontière » : seuil en deçà duquel le fonctionnement du système Terre n'est pas menacé de sortir du « régime » de l'Holocène

- Au-delà de la zone d'incertitude (risque élevé)
- Dans la zone d'incertitude (risque accru)
- En deçà des limites (zone de sûreté = frontière)
- Limite non encore déterminée

Au moins 5 variables sont directement liées à des cycles biogéochimiques



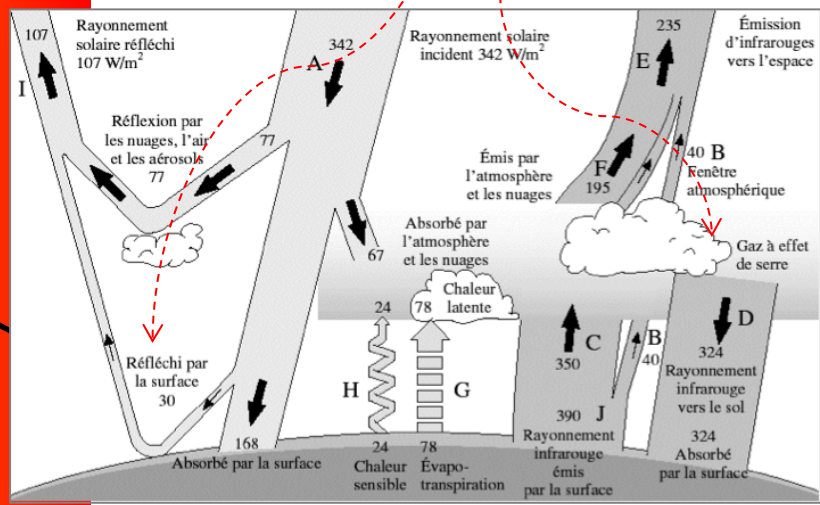
# La notion de « frontière » appliquée au climat et au CO<sub>2</sub>



Enclenchement de rétroactions positives => risque de point de bascule (« shift », changement de régime)

RC → fonte de la glace continentale  
 ↓  
 baisse de l'albédo  
 ↓  
 fonte du permafrost  
 ↓  
 émissions de CH<sub>4</sub>

etc.

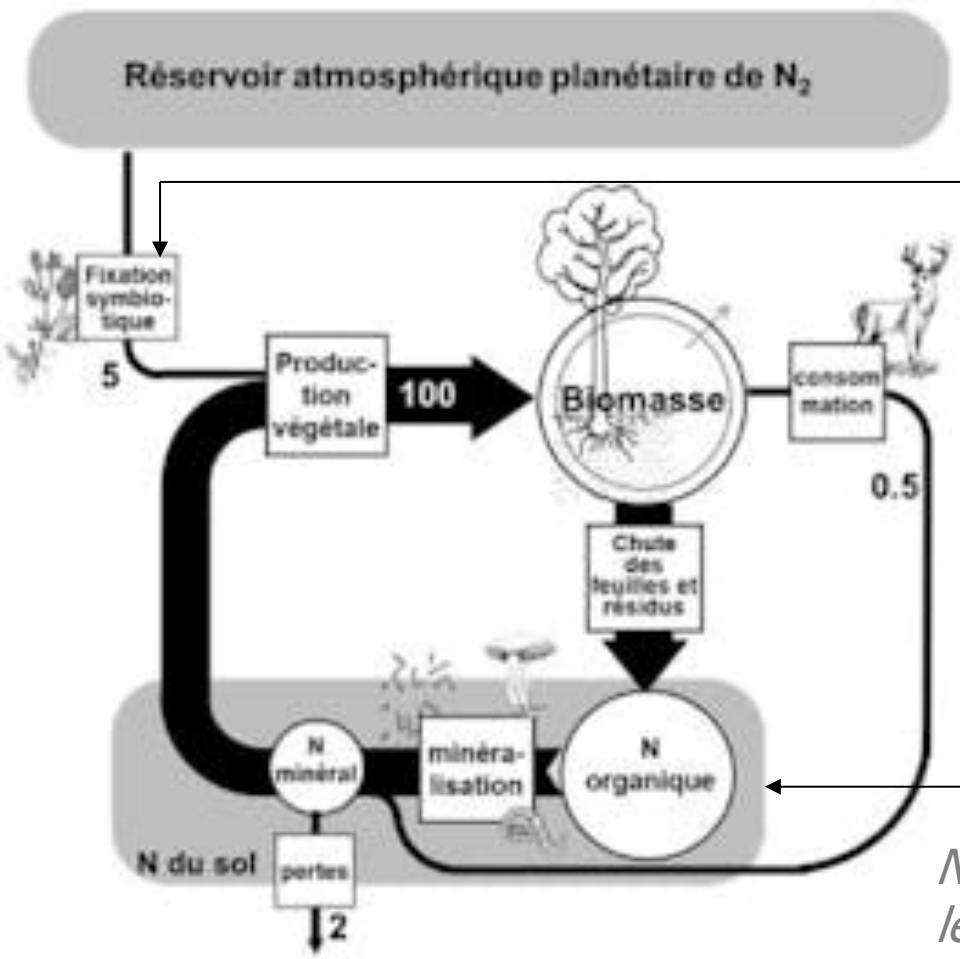


■ Espace de sécurité    ■ Zone d'incertitude (risque accru)    ■ Niveau dangereux (risque élevé de point de bascule)

# Le cycle biogéochimique « naturel » de l'azote

## Cycle de l'azote en milieu naturel (ex. forêt)

Flux en kgN/ha/an



Le principal stock d'azote du système Terre est l'**atmosphère**, constitué à 78% d'azote

L'azote est un élément déterminant (et limitant) de **la productivité de la biomasse**. Mais...

...l'azote de l'atmosphère n'est pas assimilable par les plantes. Seules quelques bactéries associées à certaines plantes (not. légumineuses) sont capables de fixer l'azote atmosphérique pour le rendre disponible (ammonium (NH<sub>4</sub>) ou nitrates (NO<sub>3</sub>)).

L'azote est donc massivement décomposé et recyclé « localement » au sein du couple sol-biosphère (azote organique => minéral => organique, etc.)

*NB. L'agriculture traditionnelle a mobilisé la polyculture et les légumineuses pour augmenter et recycler la part d'azote dans les écosystèmes agraires. Mais...*

# La perturbation du cycle de l'azote par l'agriculture

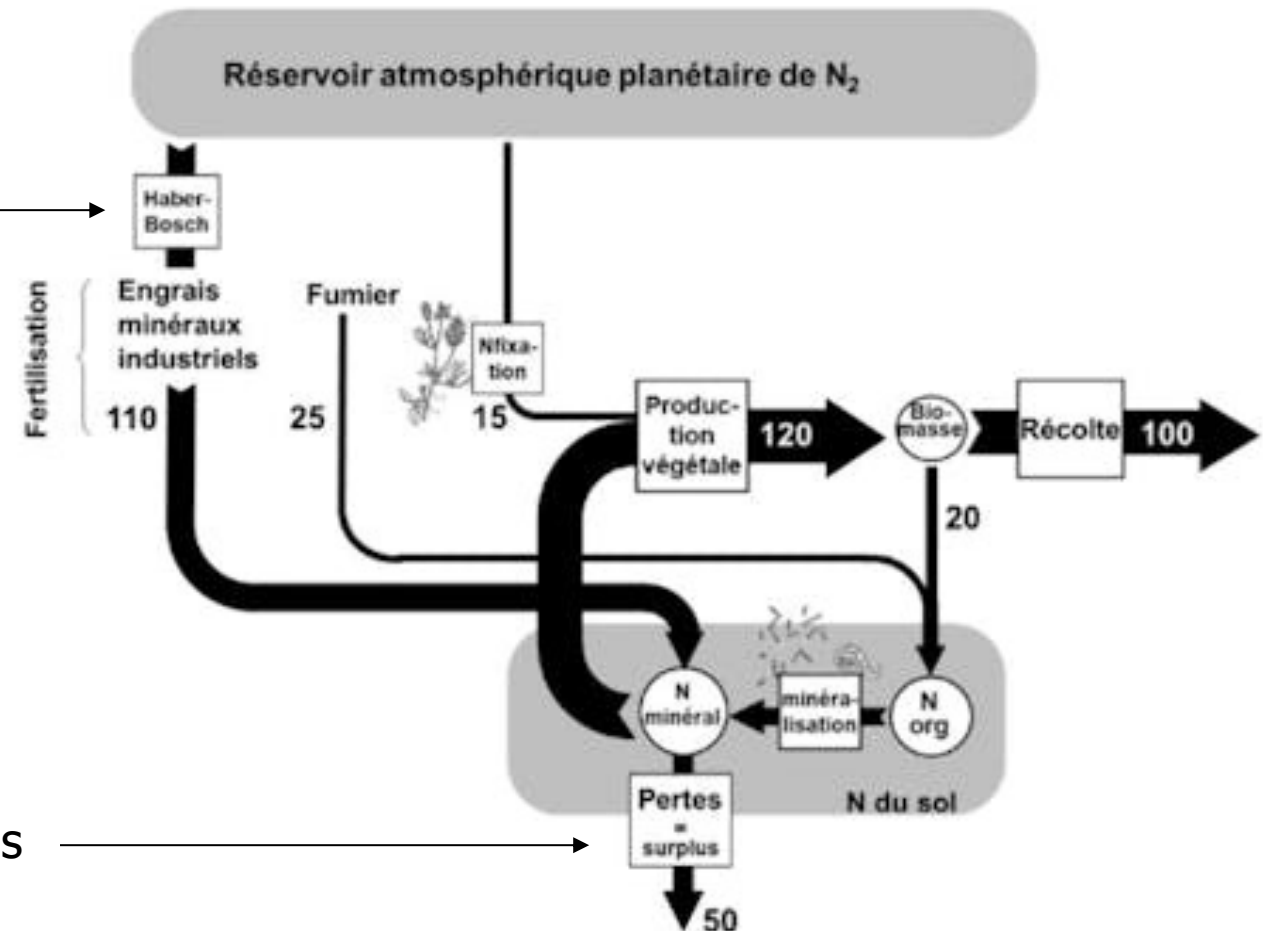
En 1908, Fritz Haber et Karl Bosch inventent un procédé qui permet (sous haute pression et à haute température) de forcer la réaction de l'azote de l'air avec l'hydrogène (issu du gaz naturel) pour produire de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) puis de l'acide nitrique. C'est la naissance des **engrais minéraux industriels**...

Cette invention a permis de **doubler la vitesse de circulation de l'azote**, d'accroître la productivité des systèmes agricoles et de spécialiser les zones de production (fin de la polyculture élevage)...

...mais cela génère des pertes environnementales d'azote dans les écosystèmes (« **surplus azotés** »)

## Cycle de l'azote dans un agrosystème moderne

Flux en kgN/ha/an



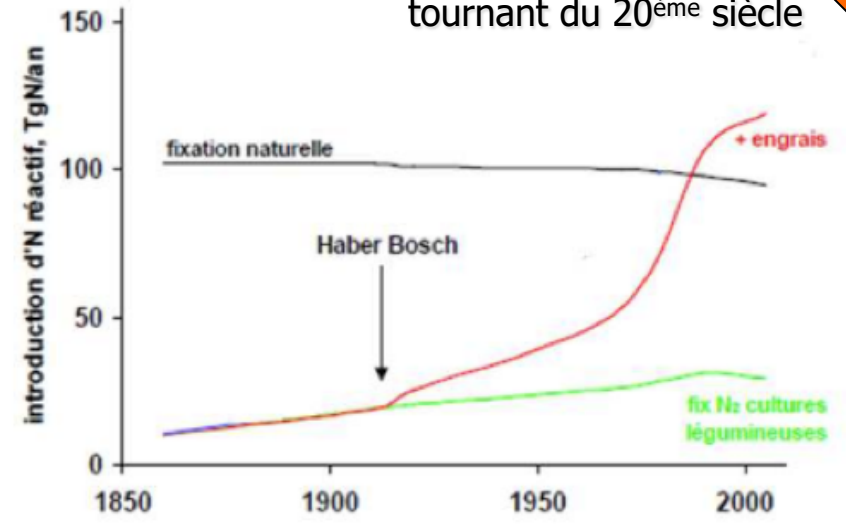
# La perturbation du cycle de l'azote et ses effets

**Variable de contrôle** : azote réactif d'origine anthropique rejeté dans le milieu naturel

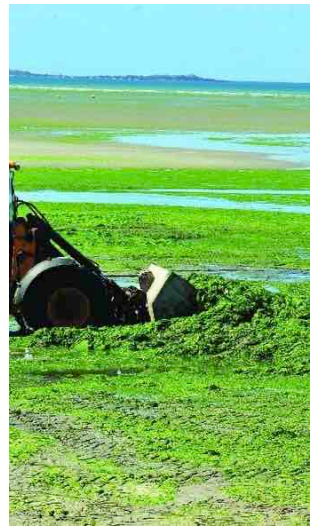
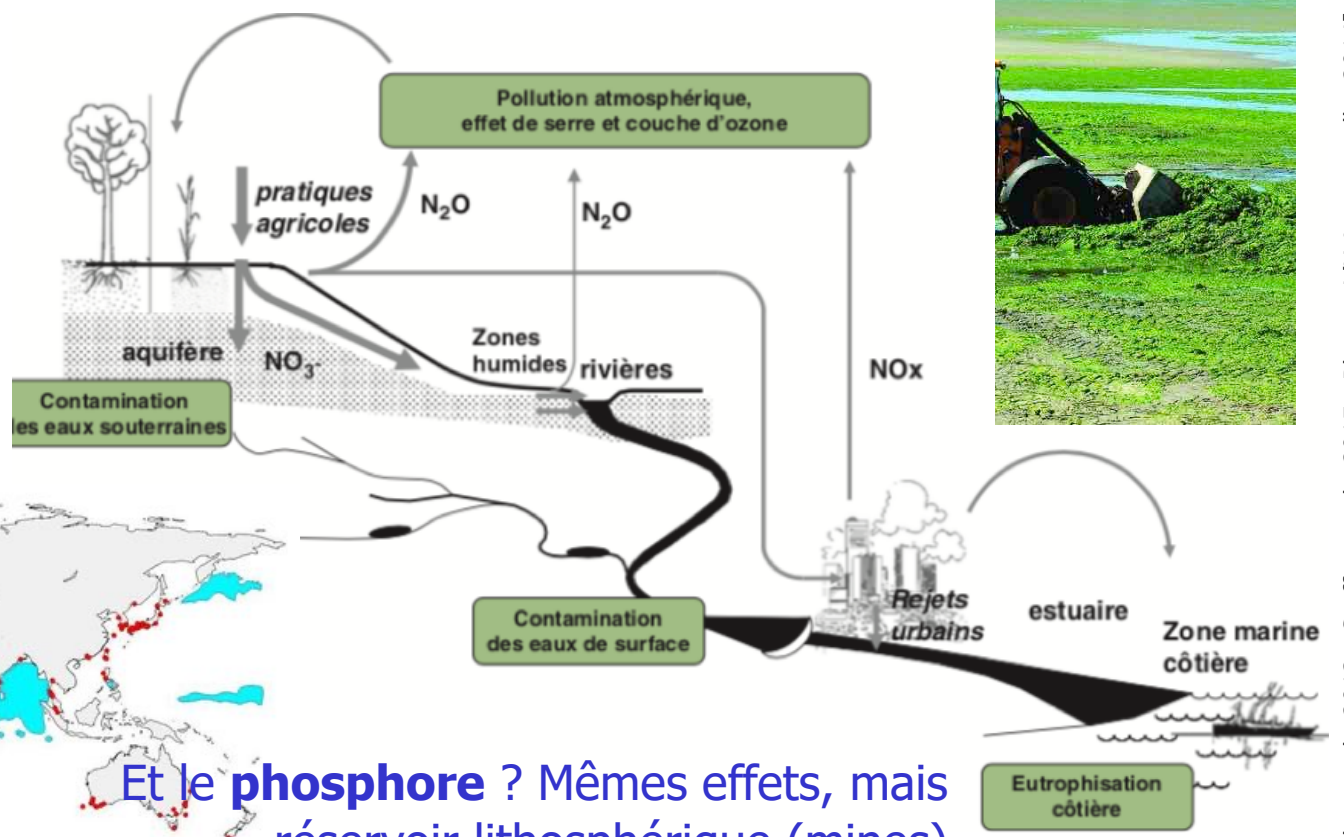


**Frontière planétaire** : capacité estimée de « recyclage » de l'azote (Tg/an)

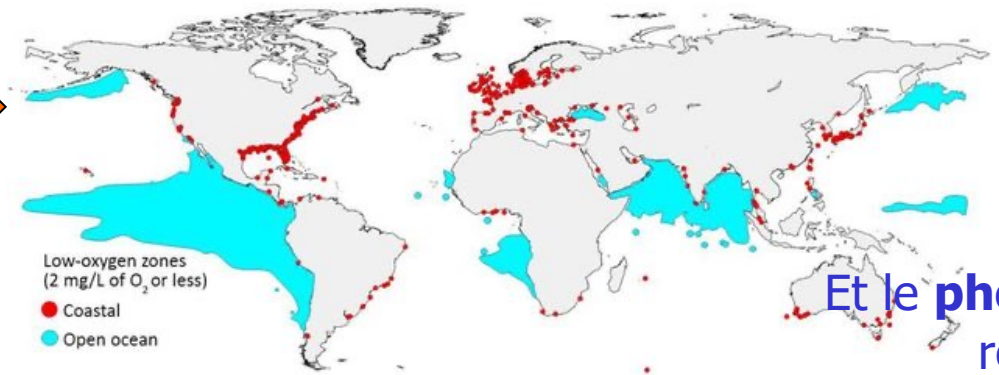
1. Une **injection massive d'azote réactif** initiée au tournant du 20<sup>ème</sup> siècle



2. Des **effets en cascade**, des sols agricoles aux zones côtières



3. Une **globalisation** du phénomène via les océans (zones hypoxiques)



Et le **phosphore** ? Mêmes effets, mais réservoir lithosphérique (mines)

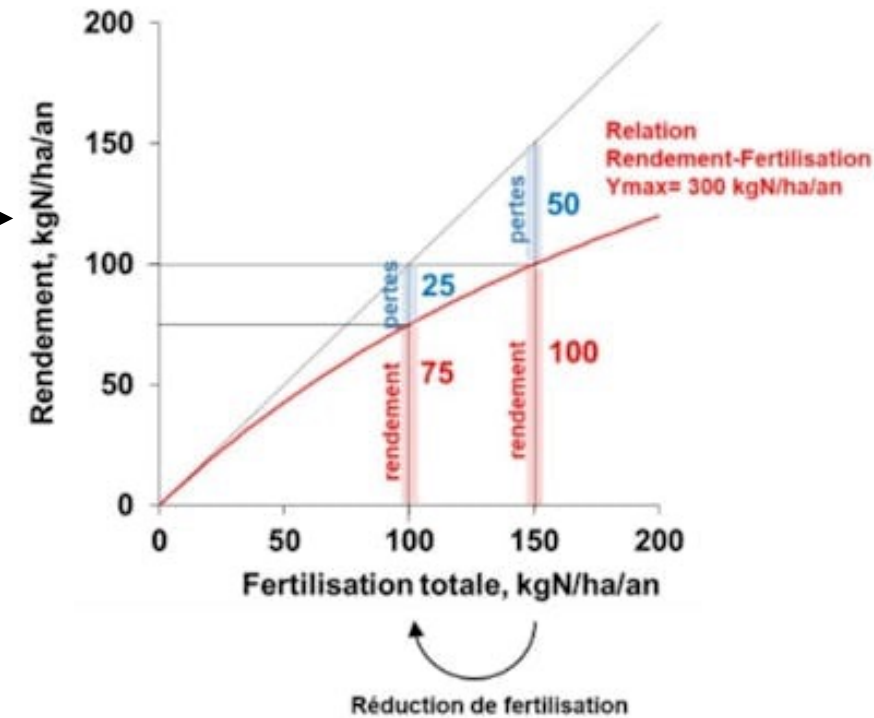
# Comment réduire les pertes d'azote ?

**Sobriété** : les pertes d'azote augmentent plus vite que le rendement. *Ex. réduire d'un tiers l'apport ne réduit que de 25 % le rendement... => accepter un rendement plus faible ?*

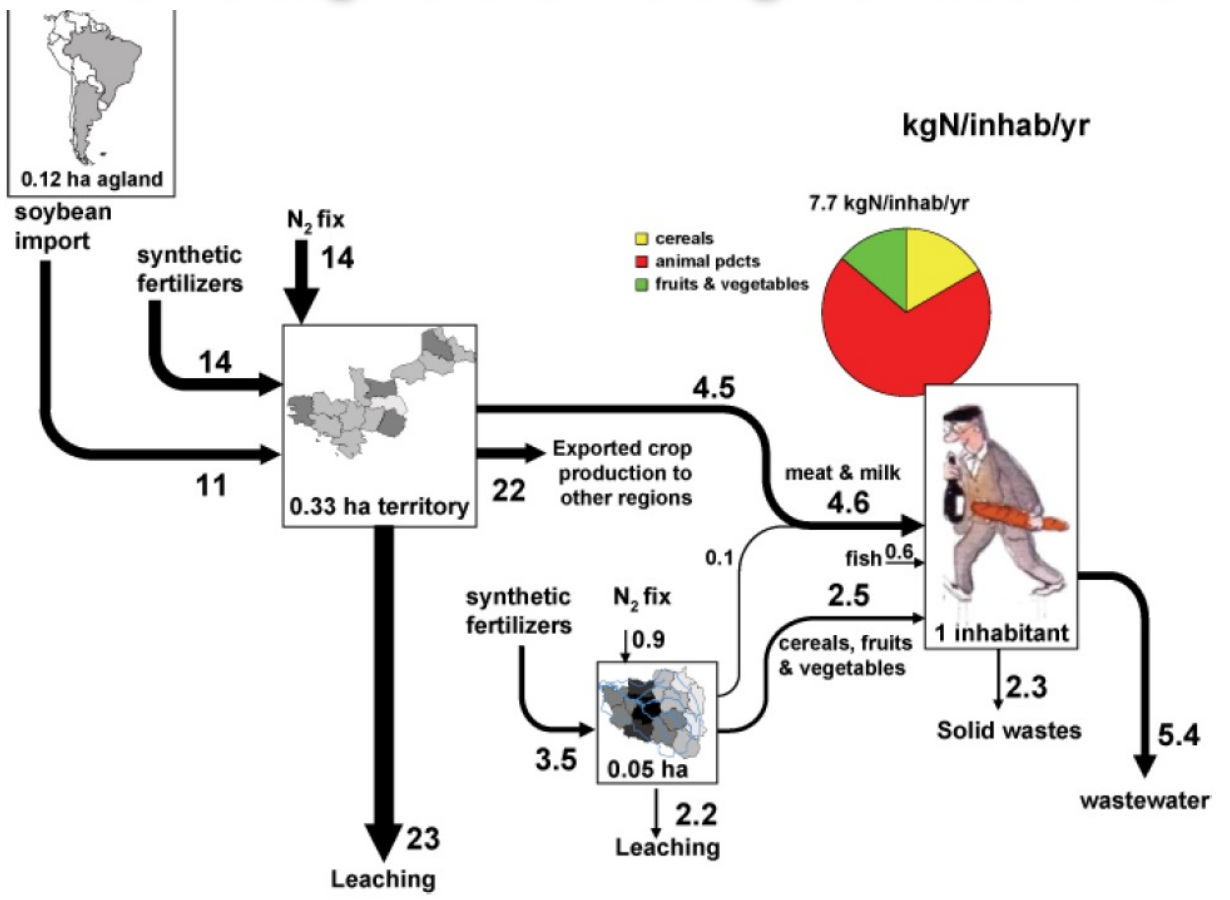
**Ajustement du régime alimentaire** : aligner l'apport de protéines animales sur les recommandations sanitaires (30 % de protéines animales au lieu de 65 % actuellement).

**Substitution des engrais minéraux** : s'inspirer de l'agriculture biologique et de l'agroécologie, mobiliser d'autres sources d'azote :

- Davantage de légumineuses (yc rotation de culture légumineuses / céréales)
- Davantage de polyculture-élevage (complémentarité fumier - cultures végétales), arrêt de la spécialisation des cultures (végétale *versus* animale, ex. Île-de-France *versus* Bretagne).
- Davantage de recyclage des effluents urbains (déchets organiques : compostage, épandages de boues issues des Step...)

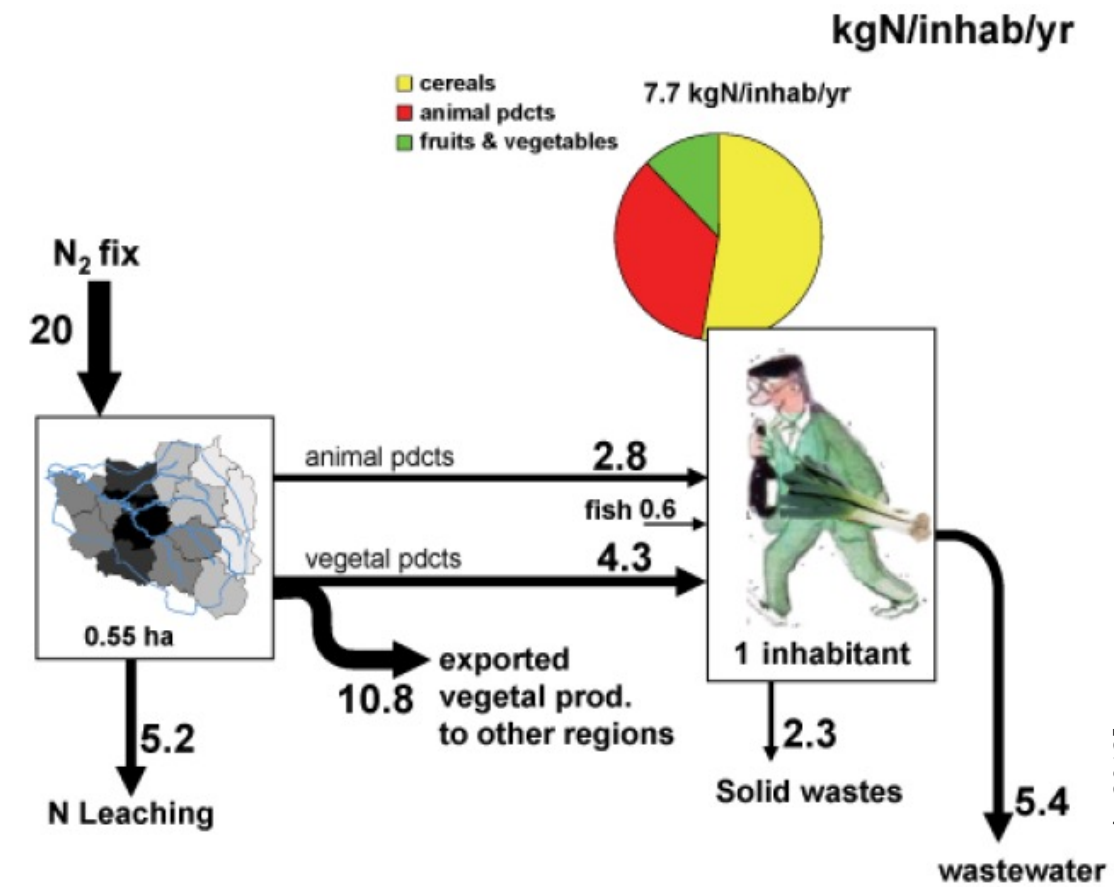


# L'exemple de l'empreinte azote d'un parisien



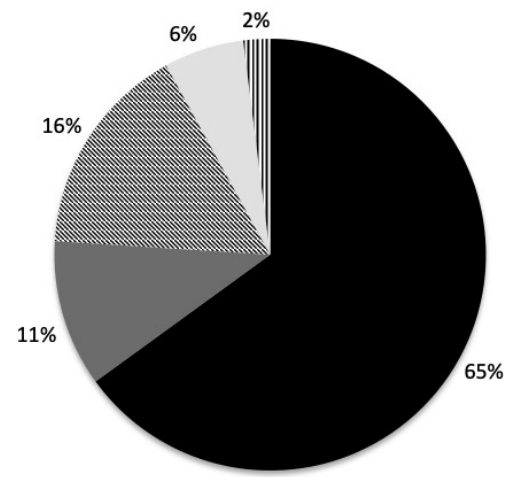
**Situation actuelle** : ¾ d'azote incorporé dans l'alimentation animale, majoritairement produite en Bretagne et dépendante d'intrants importés (engrais minéraux, soja). + Pertes azotées importantes liées à la monoculture intensive.

**Scénario d'équilibre** : polyculture élevage local & bio, avec augmentation de l'alimentation végétale (60% protéines... dont des légumineuses !)



# Les principales pressions exercées sur les cycles BGC

- CO2 fossile (énergies fossiles et process industriels)
- CO2 organique (forêts et autres usages des terres)
- ▨ CH4
- N2O
- ▨ Gaz fluorés



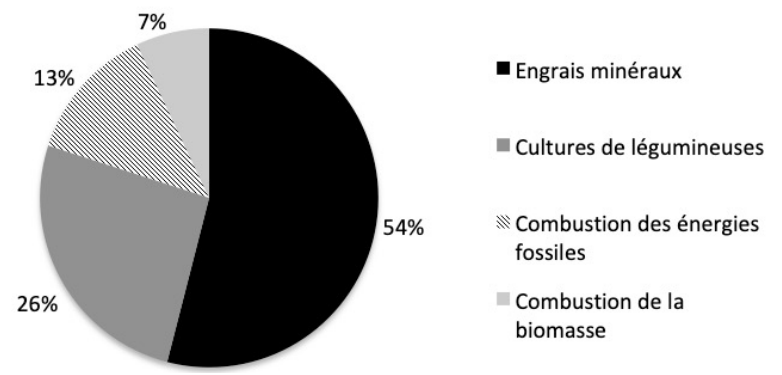
**1) Les énergies fossiles** représentent 65% des émissions de GES et plus de 80% des émissions de CO<sub>2</sub> anthropique

=> Principal secteur responsable de la perturbation du **cycle du carbone** (changement climatique et l'acidification des océans)

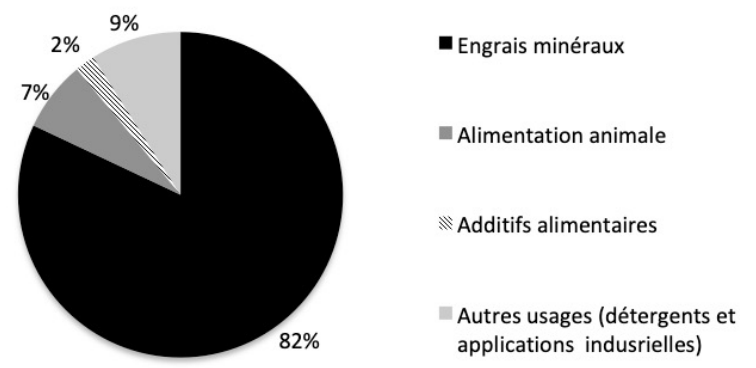
**2) L'agriculture** représente 80% des flux d'azote et plus de 90% des flux de phosphore.

=> Principal secteur responsable de la perturbation des **cycles de l'azote et du phosphore** (mais aussi du changement d'affectation des sols, de l'érosion de la biodiversité et de la perturbation du **cycle de l'eau douce** (+ pesticides / entités nouvelles).

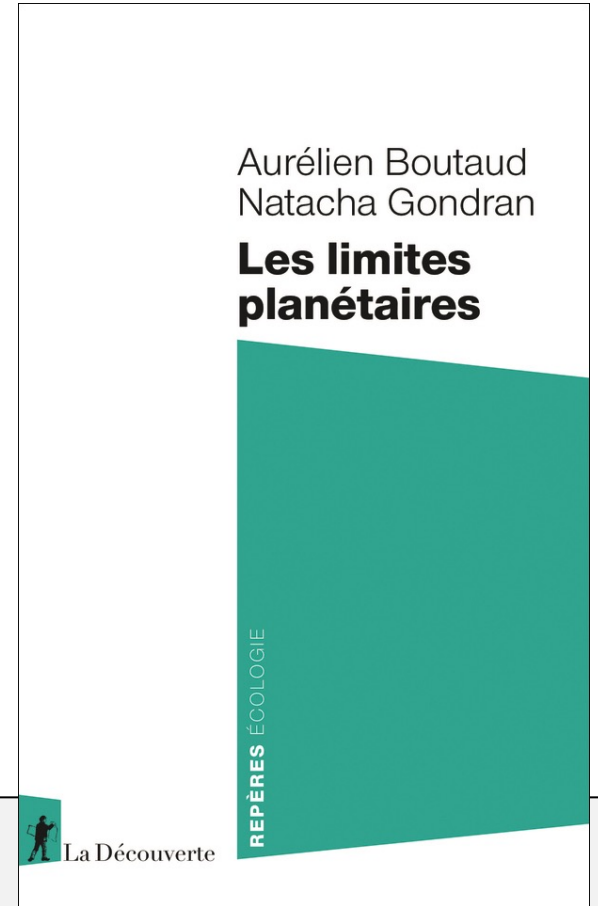
Azote



Phosphore



# Merci de votre attention



## Bibliographie indicative

Boutaud A., Gondran N., 2020. *Les limites planétaires*. Coll. Repères, La Découverte, Paris.

Billen G., 2023. « Comment l'agriculture industrielle bouleverse le cycle de l'azote et compromet l'habitabilité de la terre », *The Conversation*, 7 décembre 2023

Billen G., Garnier J., Thieu V., Silvestre M., Barles S., Chatzimpiros P., 2012. « Localising the nitrogen imprint of the Paris food supply: the potential of organic farming and changes in human diet », *Biogeosciences*, n°9, pp. 607–616