

---

# Impacts des activités humaines sur le cycle de l'azote et leurs contributions au changement climatique

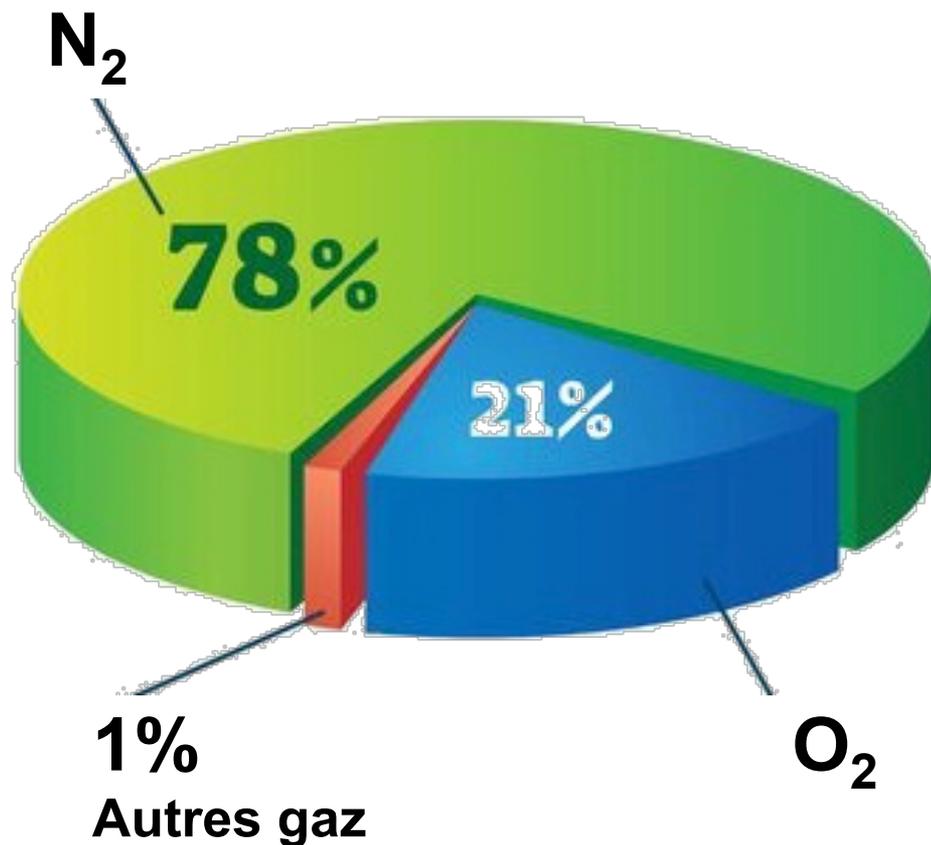
Nicolas Vuichard

*Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement*



# Composition de l'atmosphère

- **Le diazote, principal composant de l'atmosphère**
  - **3,8 milliards de TgN**
  - **N<sub>2</sub>, gaz inerte, peu réactif**
- => Pas d'effet sur le climat**



# Azote réactif

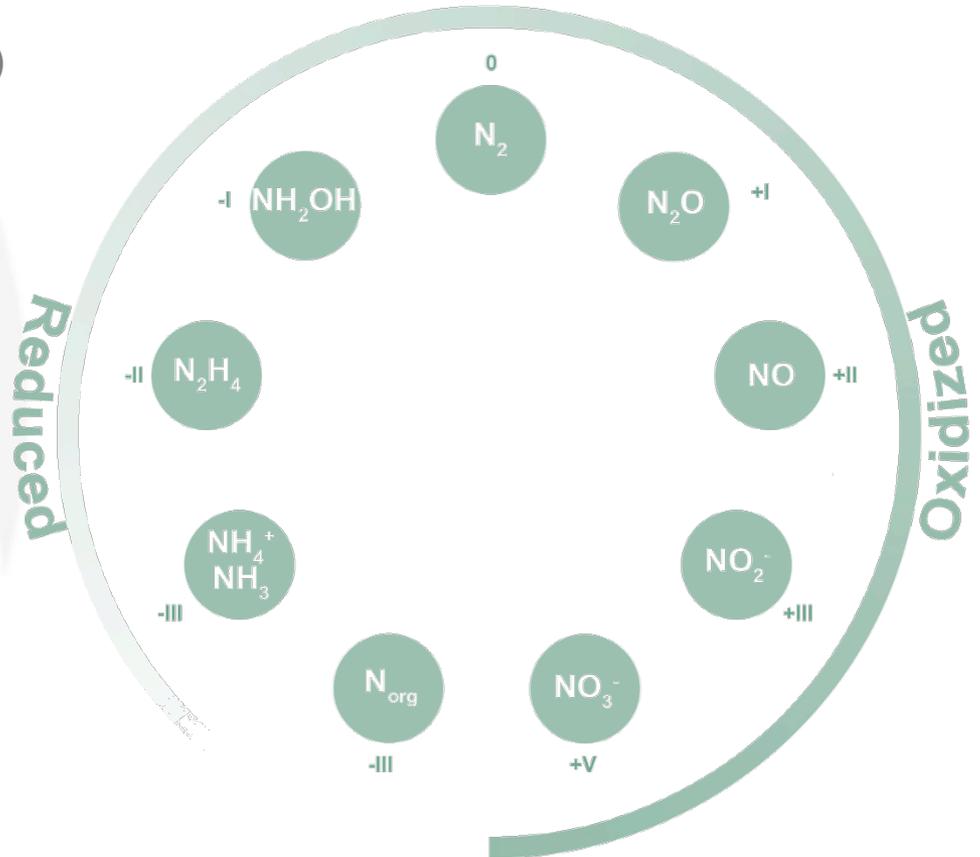
- Formes biologiquement ou chimiquement réactives

- Formes oxydées

- Oxydes d'azote ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ )
- Protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ )
- Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ )

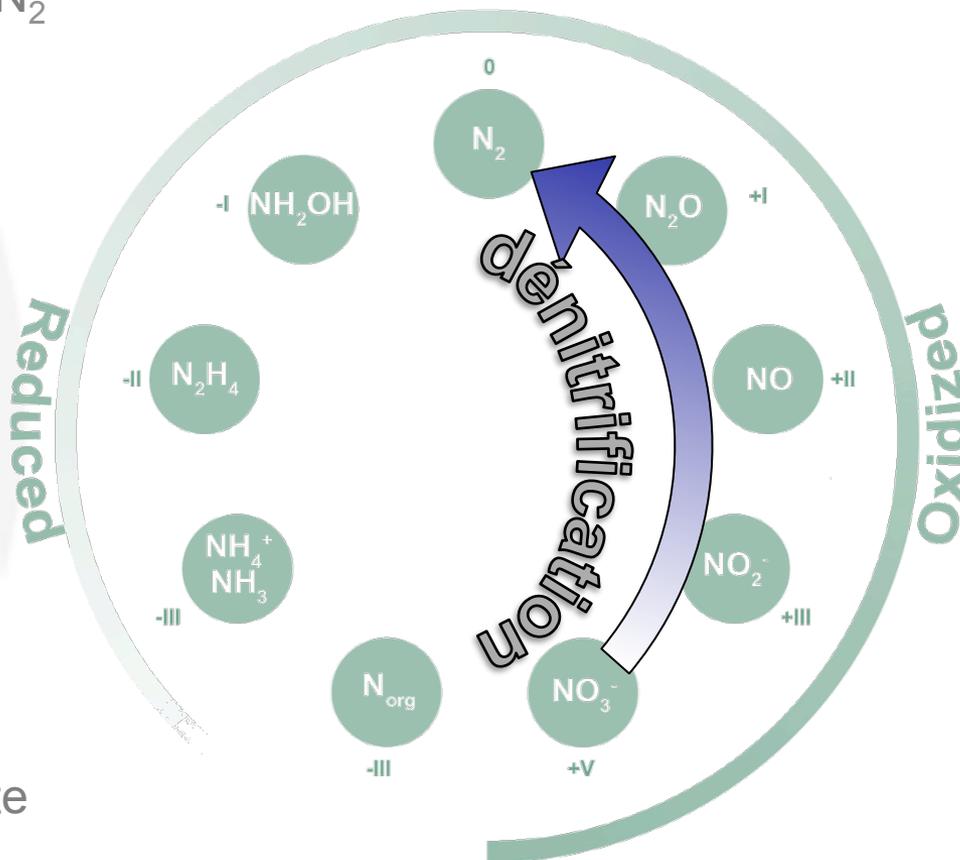
- Formes réduites

- Ammoniac ( $\text{NH}_3$ )  
/ Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ )



# Comment crée-t-on de l'azote réactif naturellement ?

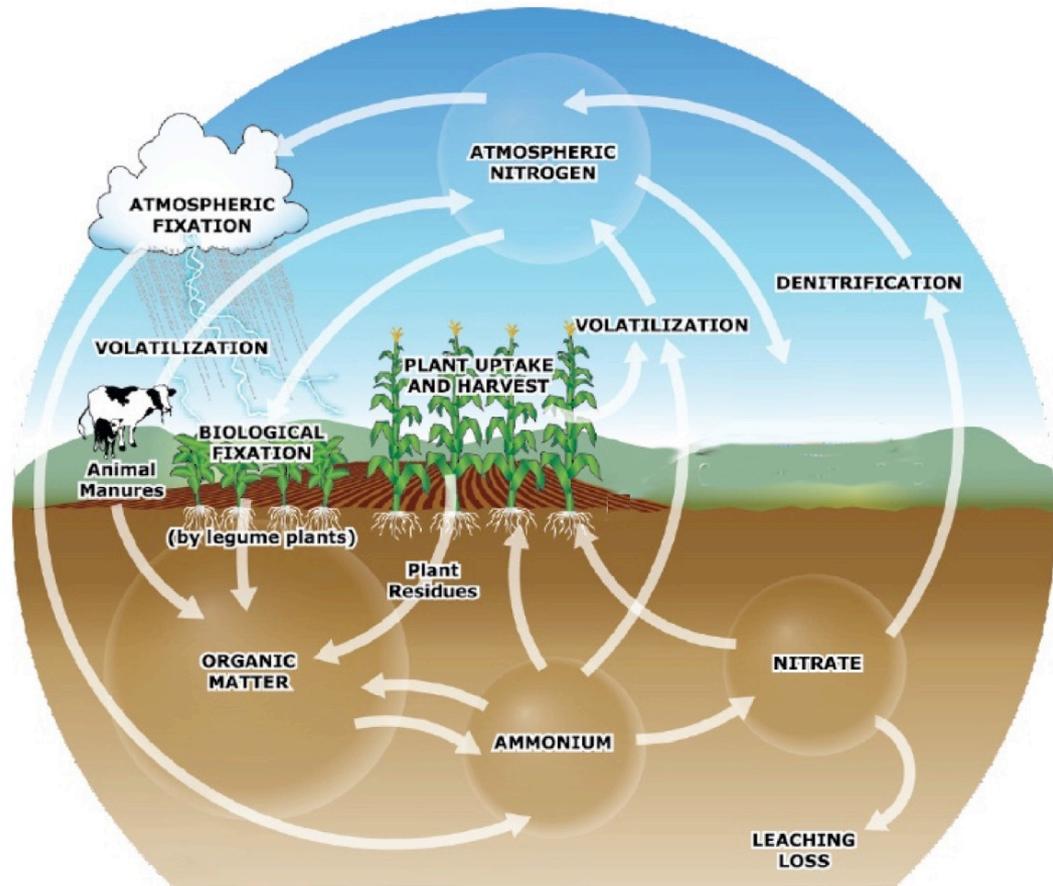
- Par fixation biologique
  - ⇒ Formation de  $\text{NH}_4^+$  à partir de  $\text{N}_2$
  - Sur Terre: ~60 TgN par an
  - Par les océans: ~140 TgN
- Par l'énergie des éclairs
  - ⇒ Formation de  $\text{NO}_x$  à partir de  $\text{N}_2$  (~5 TgN par an)
- La dénitrification, un processus "inverse"
  - ⇒ Formation de  $\text{N}_2$  à partir d'azote réactif



# Le cycle de l'azote avant l'ère industrielle

- L'azote réactif est présent dans tous les compartiments de la biosphère

- Un nutriment essentiel pour la croissance des plantes  
=> Ammonium et nitrate sont assimilés par les végétaux
- Une ressource longtemps limitée



# L'azote, une ressource optimisée



**Système agricole "mixte": culture / élevage**

***Transhumance d'hiver***



# L'azote, une ressource optimisée ... et convoitée

- Exploitation du guano, des îles Chincha (Pérou) durant le 19<sup>ème</sup> siècle
- 1879-1884 guerre du Pacifique (guerre du salpêtre) entre le Chili et le Pérou – conflit pour le guano et salpêtre du désert d'Atacama



***Récolte de guano (Iles Chincha, Pérou)***



# La synthèse de l'ammoniac par le procédé Haber-Bosch

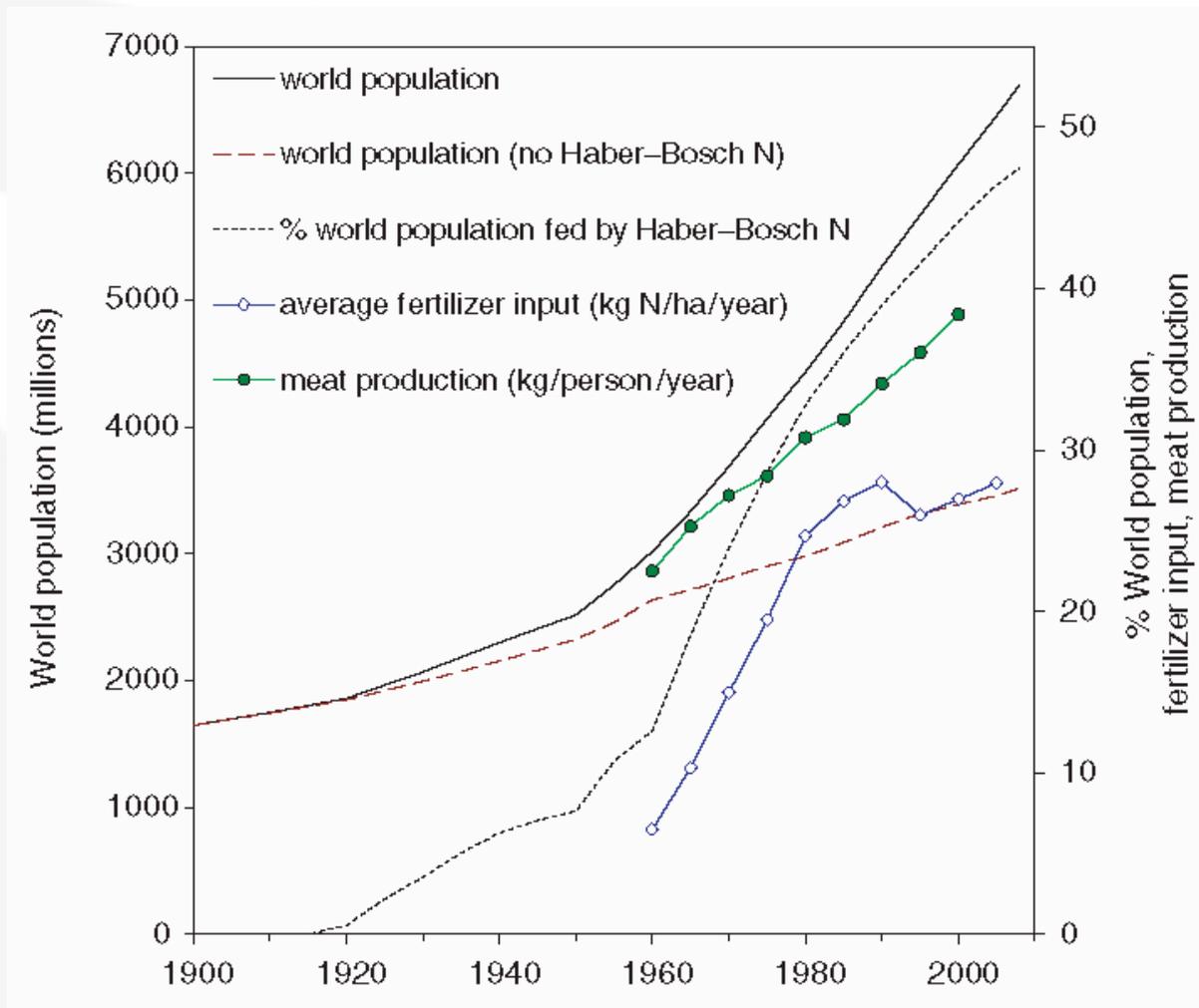


**Fritz Haber (1868-1934) –  
Prix Nobel de Chimie 1918**

- **1909** Invention du Procédé par Fritz Haber
- **1913** Contribution de Carl Bosh permet le début de production industrielle par BASF
- **1917** Deuxième usine à Leuna



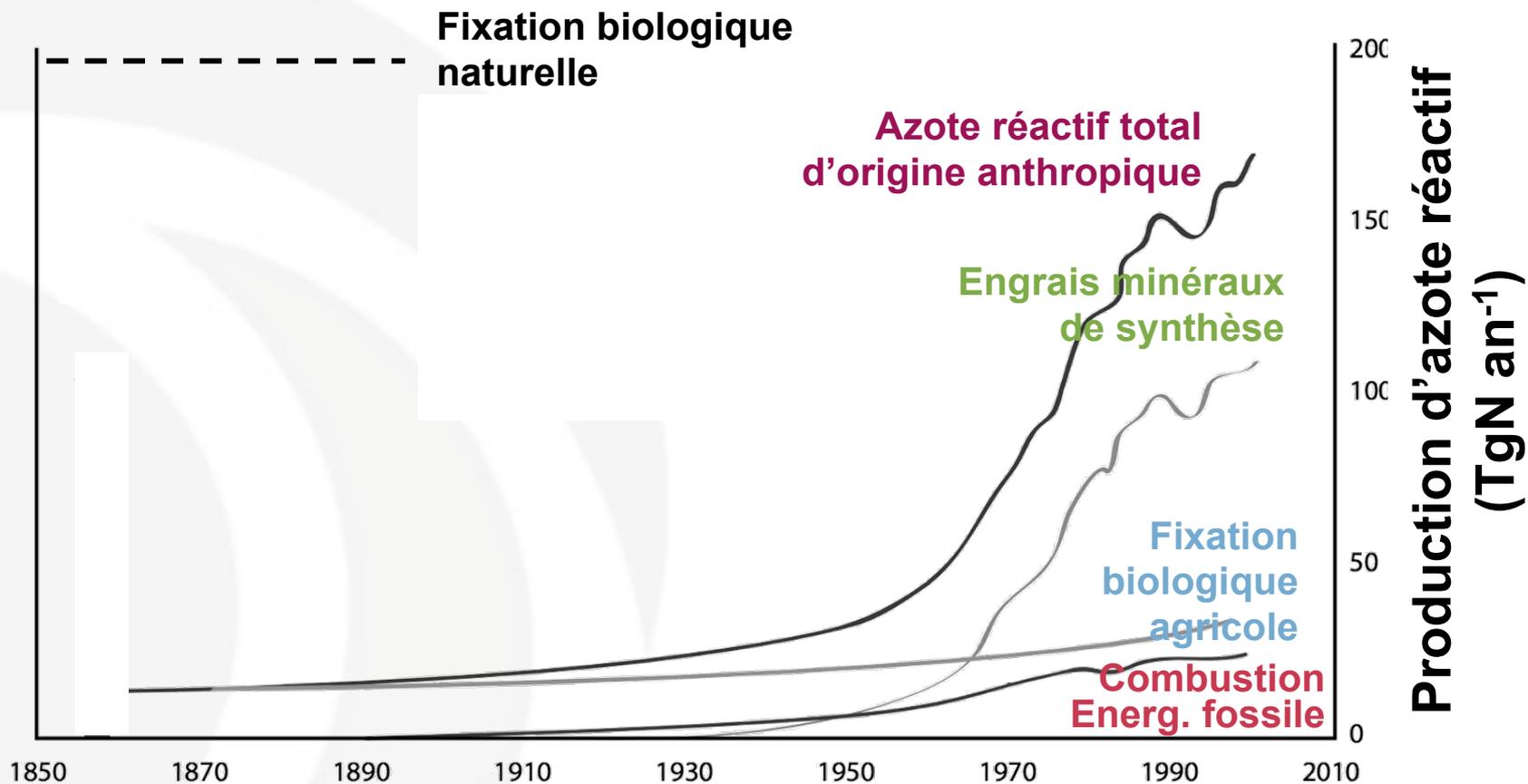
# Le procédé Haber-Bosch et la révolution agricole



European Nitrogen Assessment, 2011



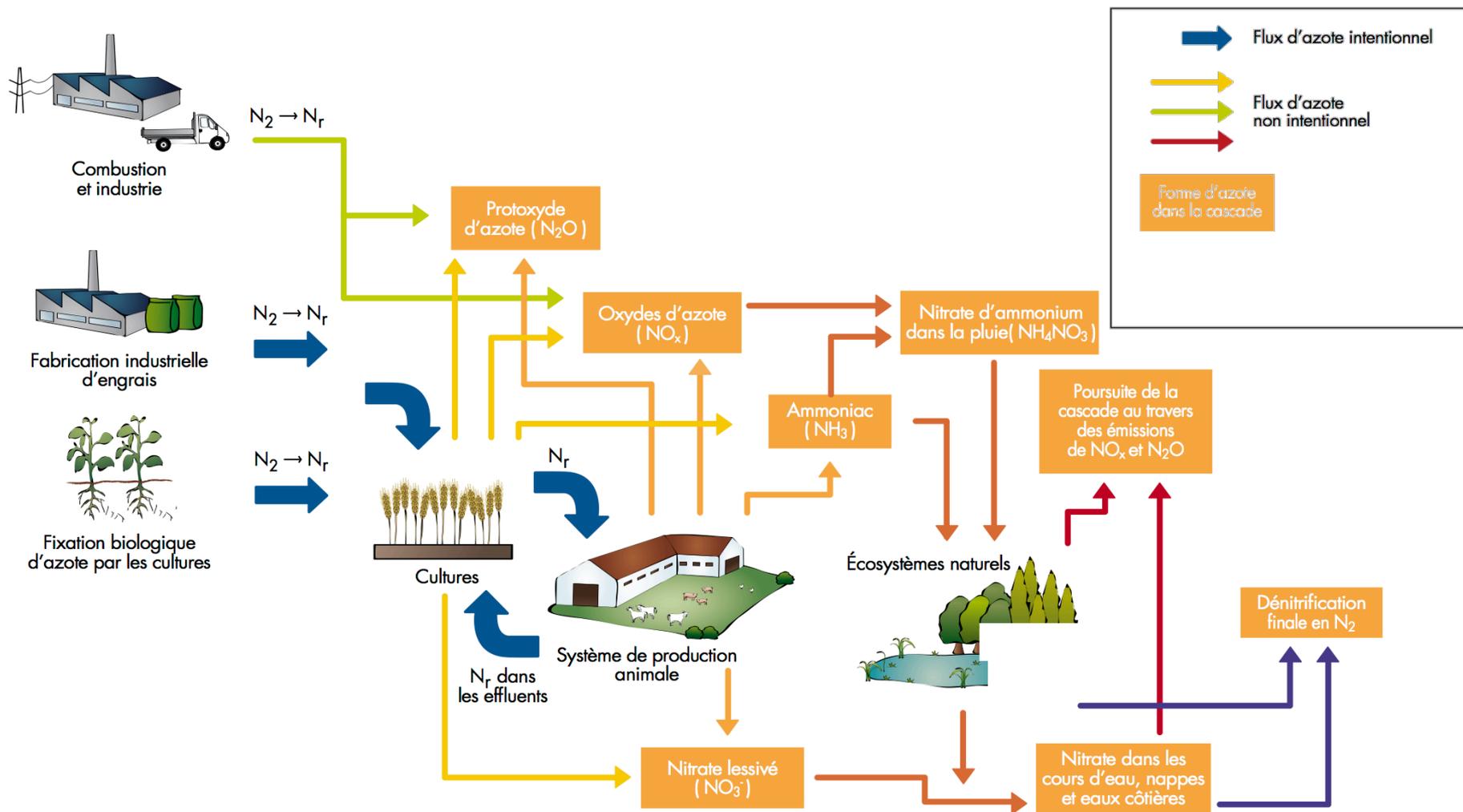
# Production globale d'azote réactif depuis 1850



*Expertise scientifique collective INRA, 2012, adapté de Galloway et al., 2003*



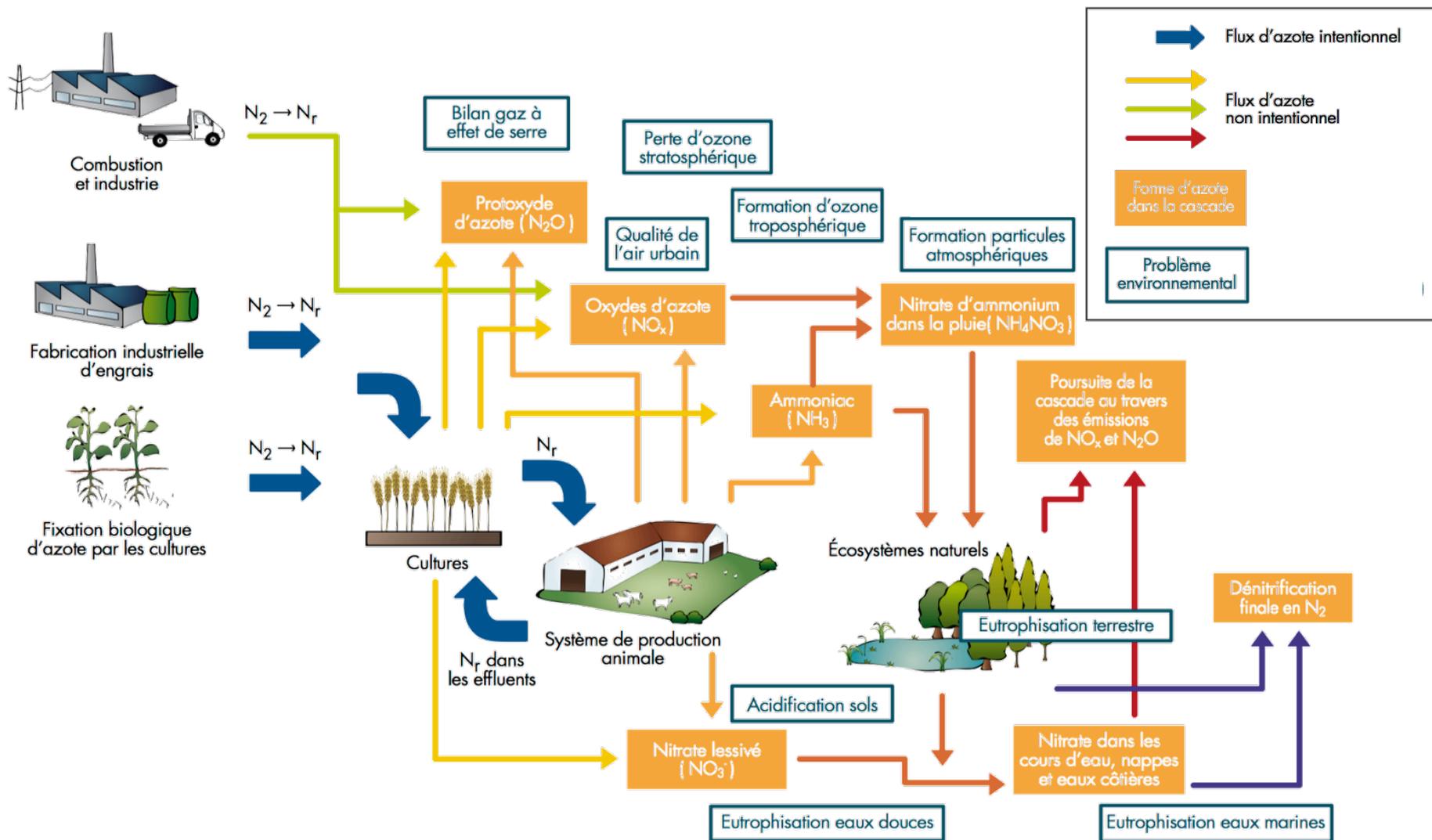
# La cascade de l'azote



Expertise scientifique collective INRA, 2012



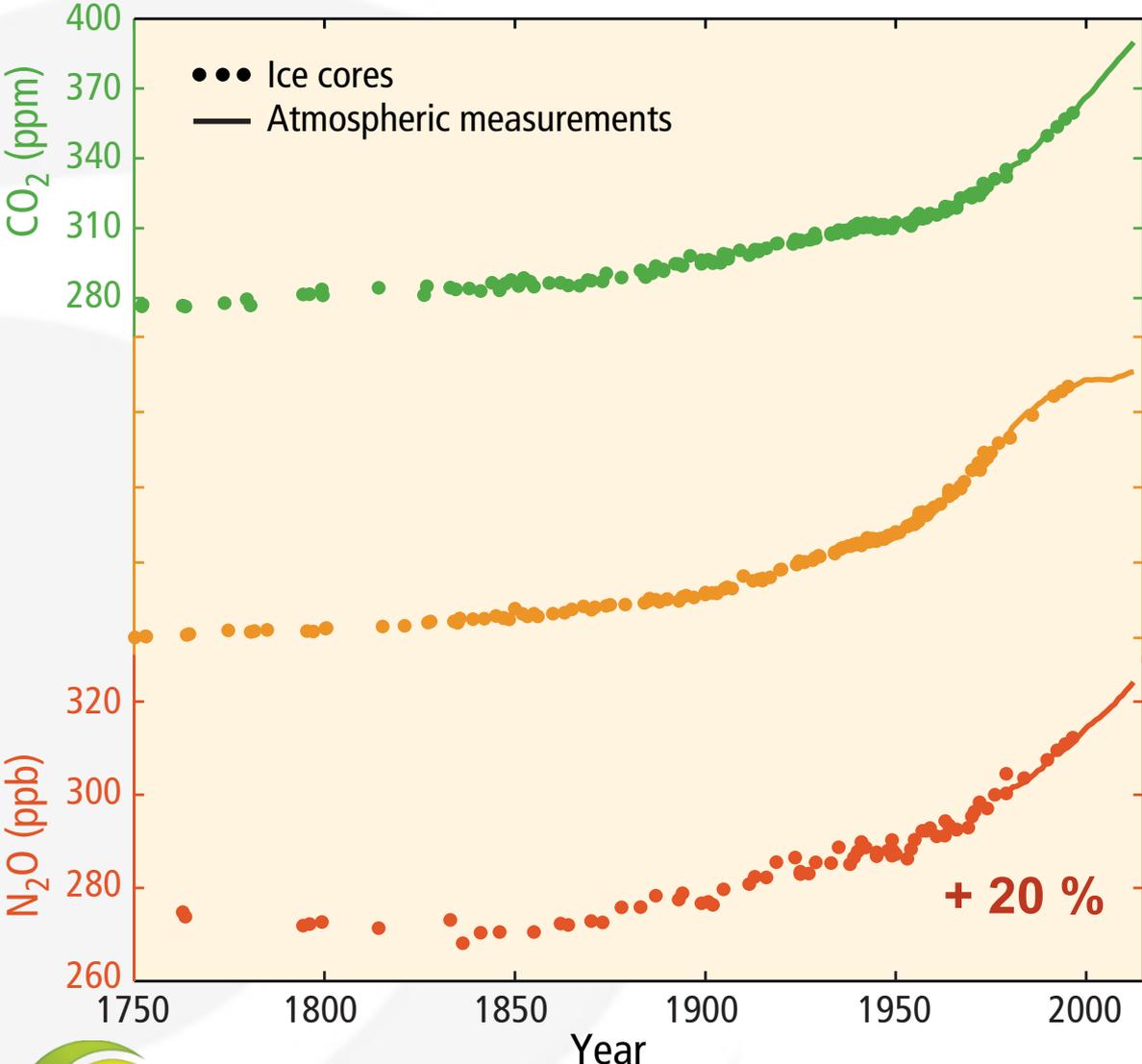
# La cascade de l'azote



Expertise scientifique collective INRA, 2012



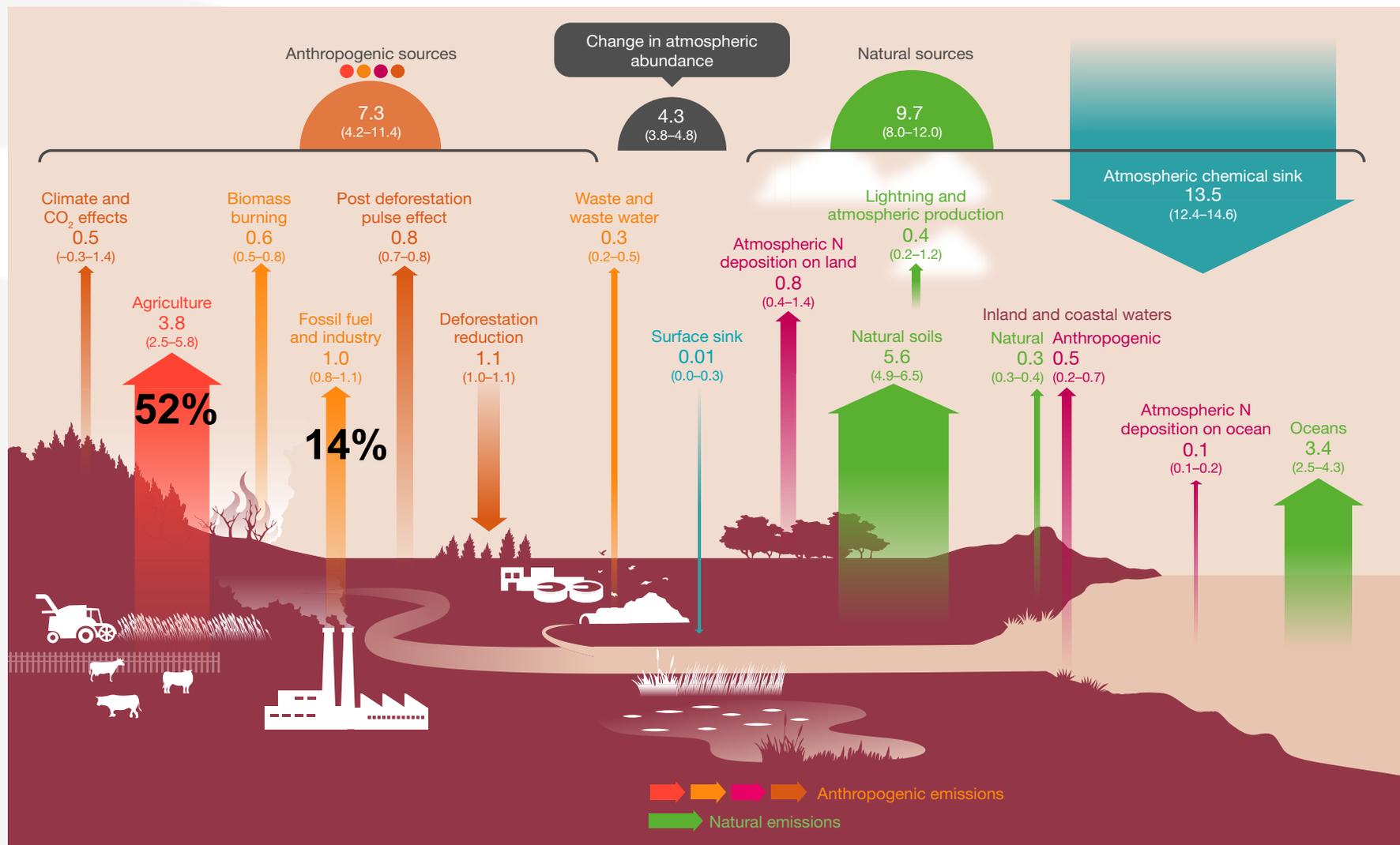
# Evolution des concentrations de GES dans l'atmosphère



- durée de vie de 120 ans
- 300 fois plus réchauffant que le CO<sub>2</sub>



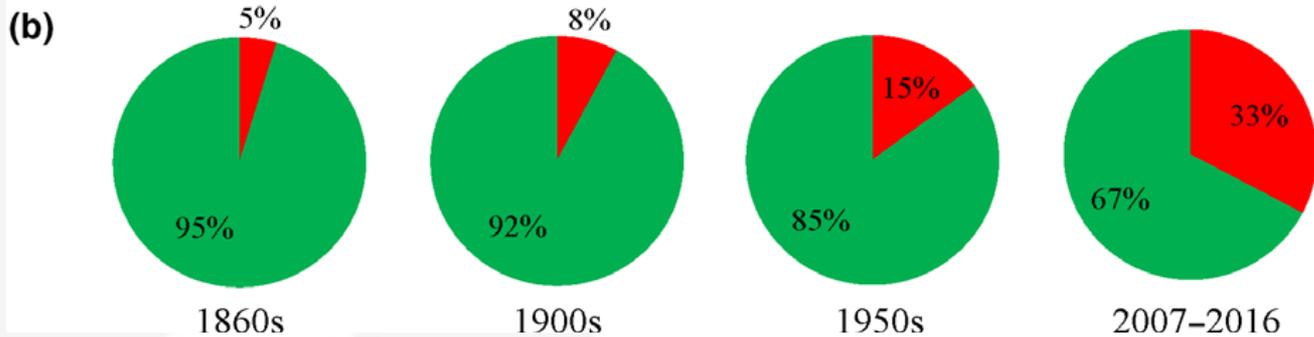
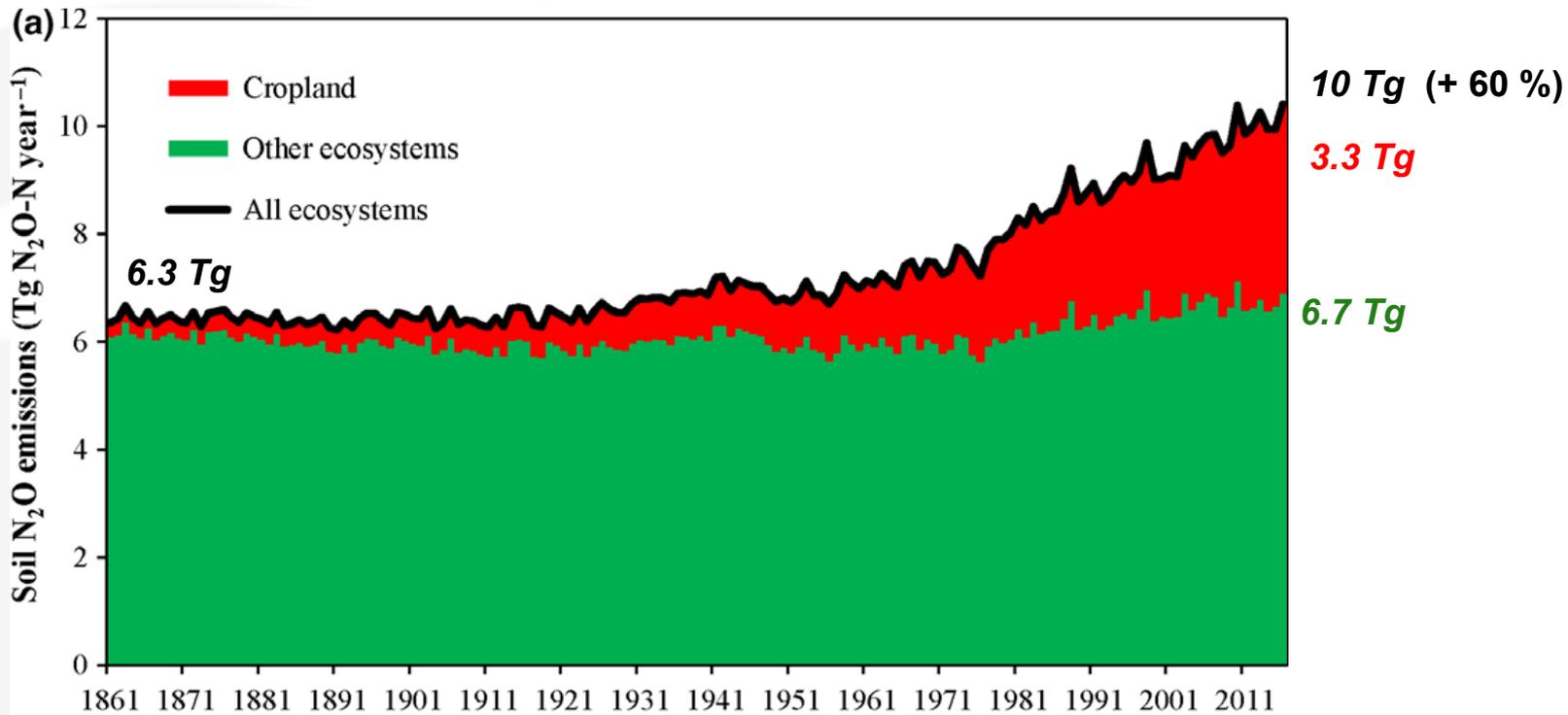
# Bilan global de N<sub>2</sub>O 2007-2016 (TgN/an)



Tian et al., 2020



# Emissions de N<sub>2</sub>O par les sols 1861–2016

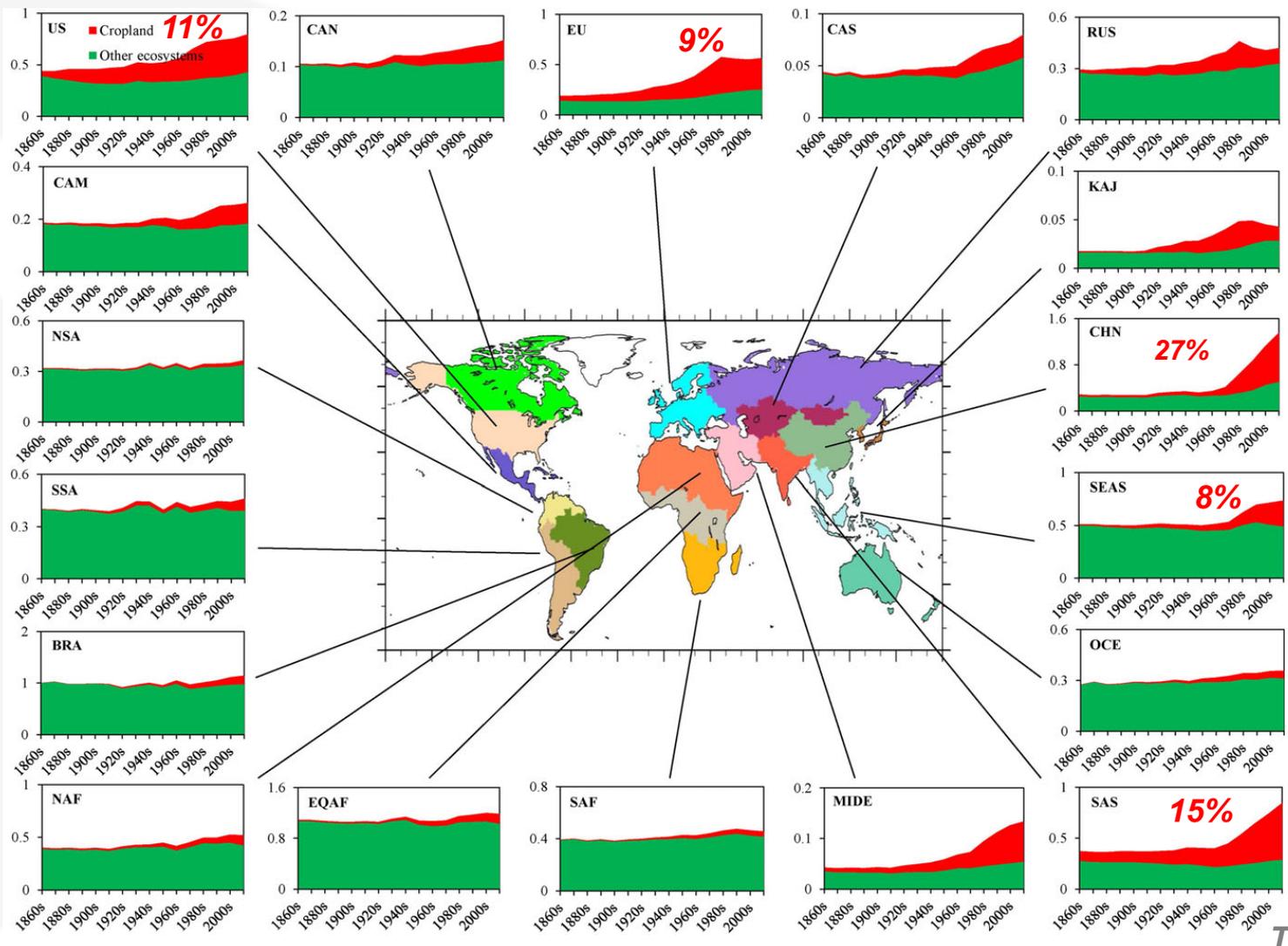


*Répartition entre zones cultivées et zones naturelles*

Tian et al., 2019



# Emissions de N<sub>2</sub>O par les sols à l'échelle régionale



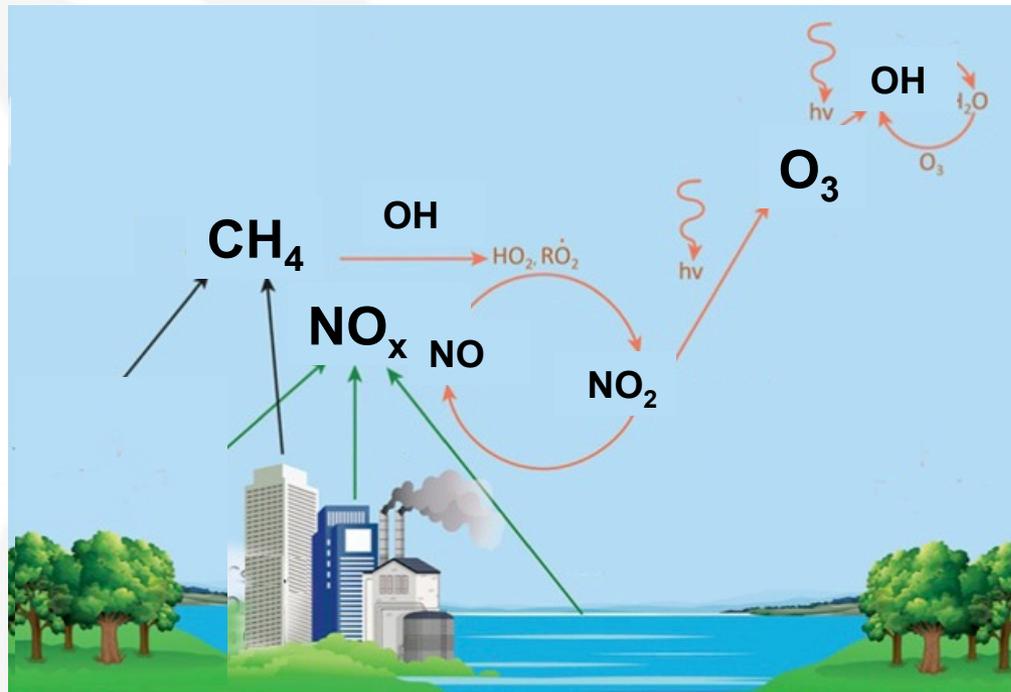
Tian et al., 2019



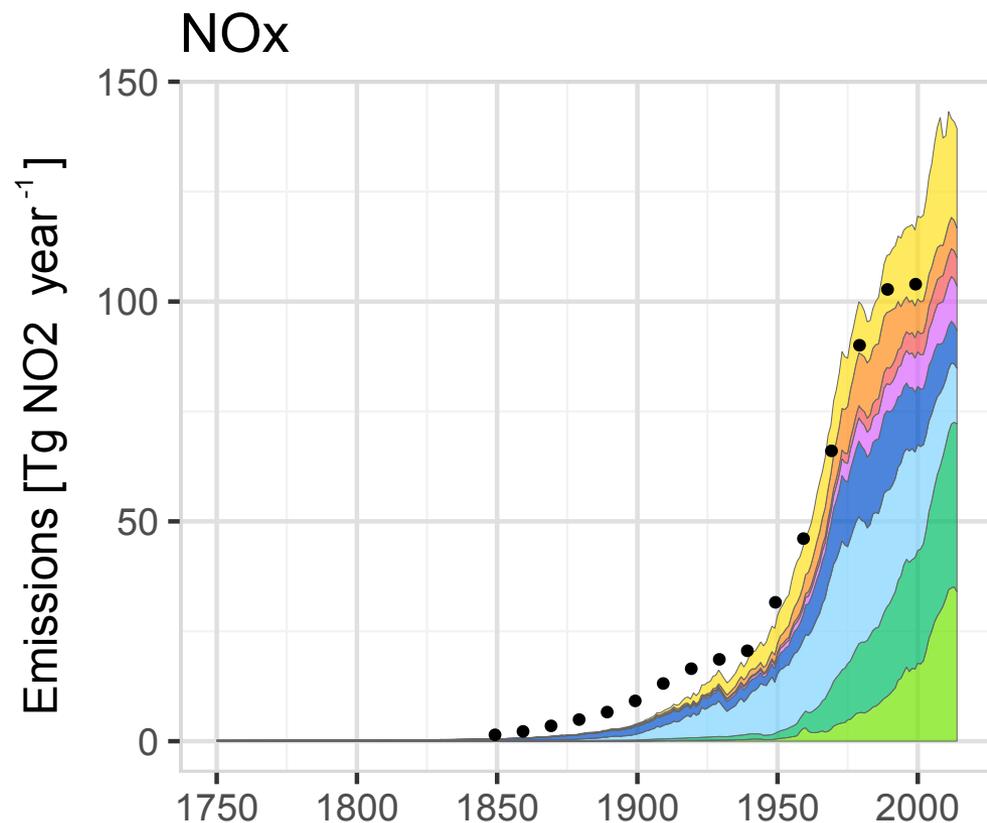
# Les interactions entre NO<sub>x</sub>, ozone et méthane

- **Rôle du radical hydroxyle (OH), « agent nettoyant » de l'atmosphère**

- NO<sub>x</sub> précurseurs de l'ozone troposphérique (O<sub>3</sub>), gaz à effet de serre
- Photolyse de l'ozone, source majeure de production de OH
- Oxydation du méthane, puits de OH



# Evolution des émissions de NOx 1750-2010

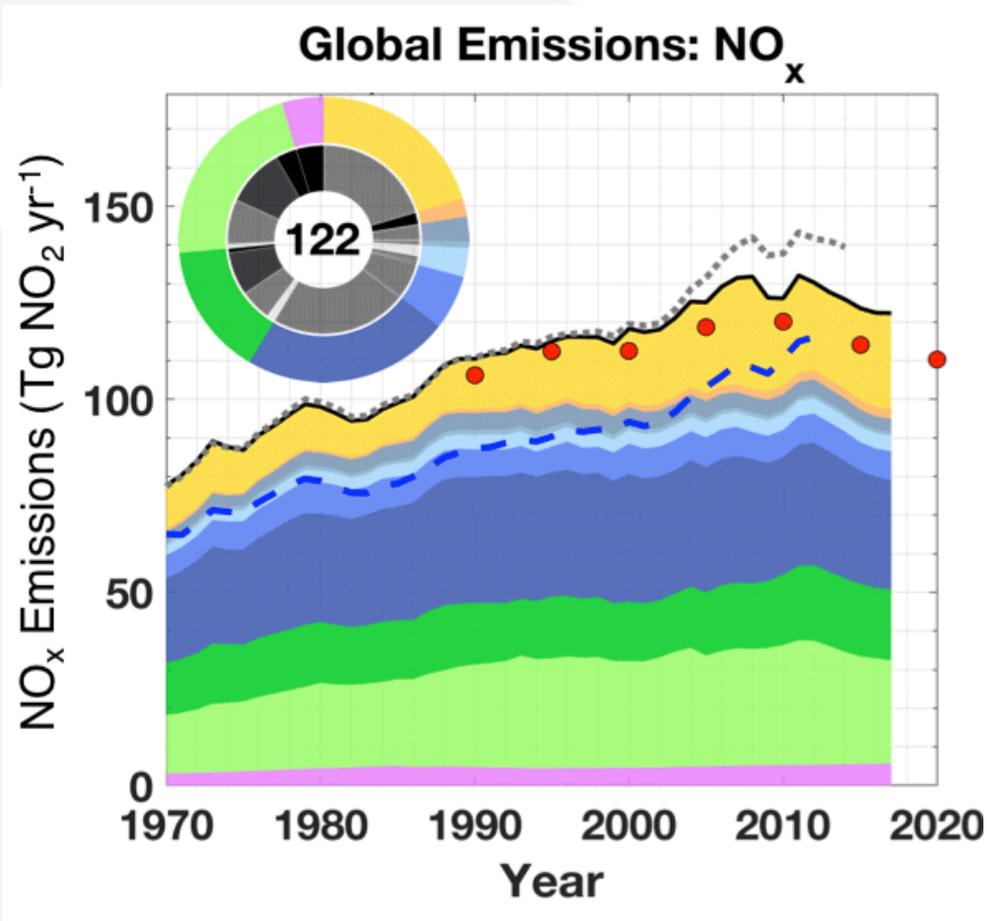


- Contribution historique de l'Amérique du Nord et de l'Europe
- Forte augmentation de l'Asie depuis 1950 = la moitié des émissions actuelles

*Hoesly et al., 2018*



# Emissions de NO<sub>x</sub> par secteur



## Legend:

### Inventories

- CEDS<sub>GBD-MAPS</sub>
- ⋯ CEDS<sub>Hoesly</sub>
- - - EDGAR v4.3.2
- ECLIPSE v5a (GAINS)

### Sectors/Fuels

- Agriculture
- Energy
- Industry
- Road Transportation
- Non-Road Trans.
- Residential
- Commercial
- RCO-Other
- Solvents
- Waste
- International Shipping
- Process
- Coal
- Oil + Gas
- Biofuel

Mc Duffie et al., 2020



# Emissions de $\text{NH}_3$ et formation d'aérosols secondaires

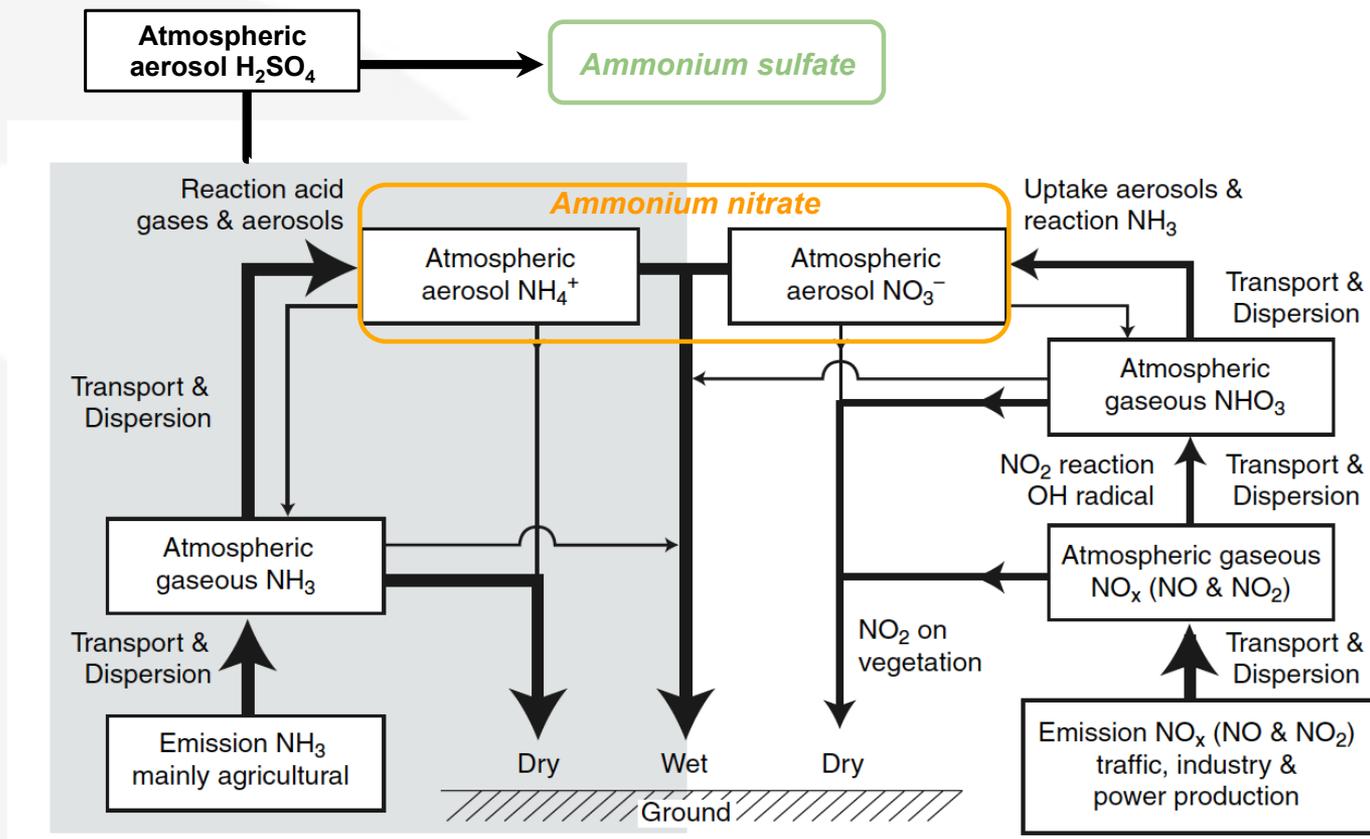
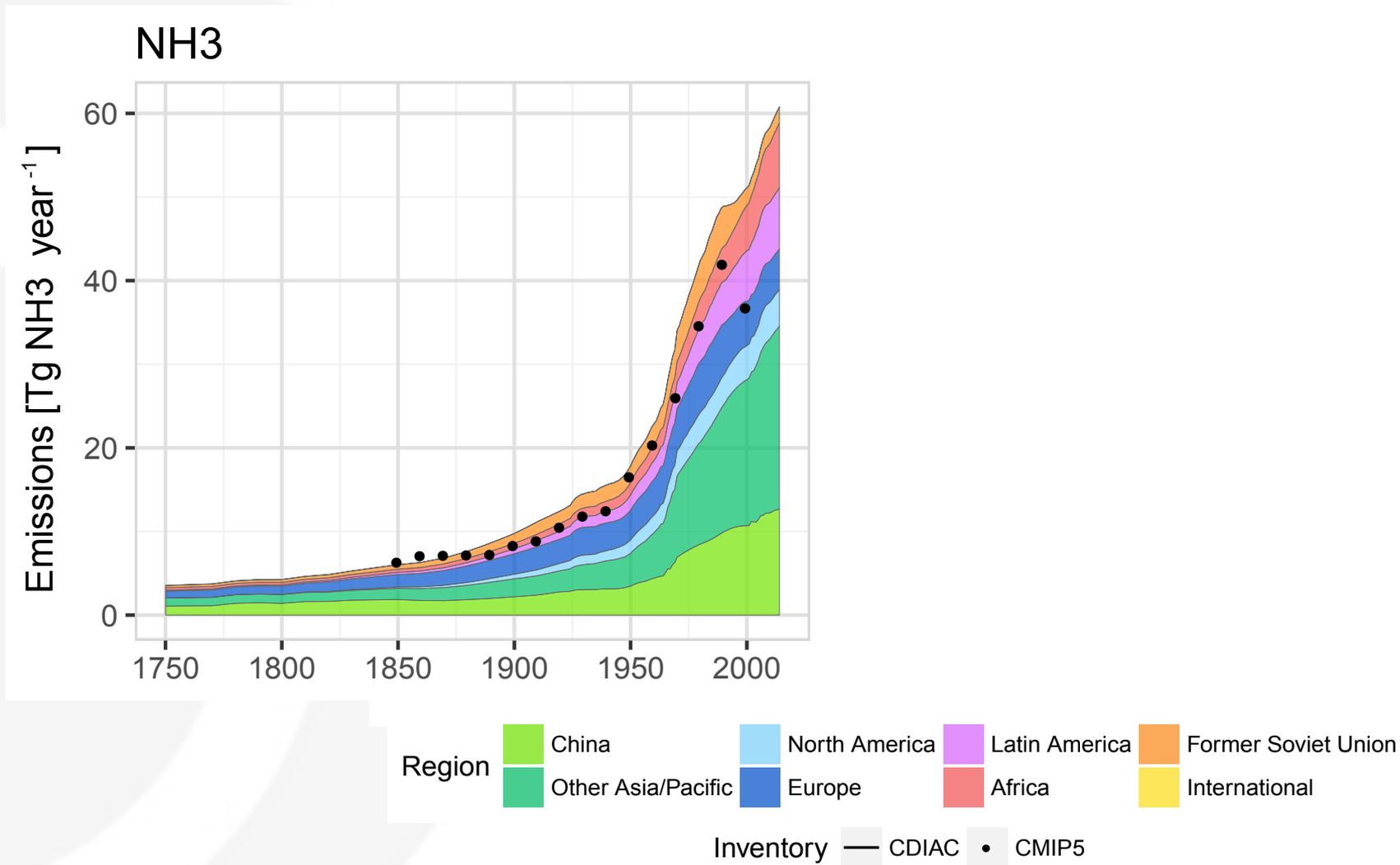


Schéma détaillant les voies de devenir de l'azote réactif dans l'atmosphère.  
Hertel et al., 2006



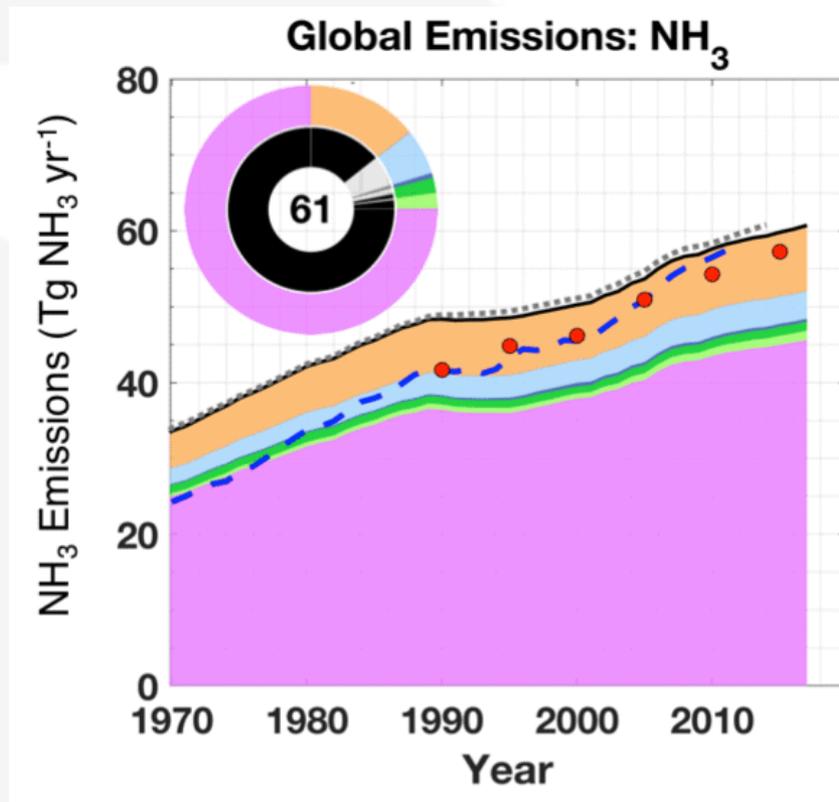
# Evolution des émissions de NH<sub>3</sub> 1750-2010



*Hoesly et al., 2018*



# Emissions d'ammoniac par secteur



## Legend:

### Inventories

- CEDS<sub>GBD-MAPS</sub>
- ⋯ CEDS<sub>Hoesly</sub>
- - - EDGAR v4.3.2
- ECLIPSE v5a (GAINS)

### Sectors/Fuels

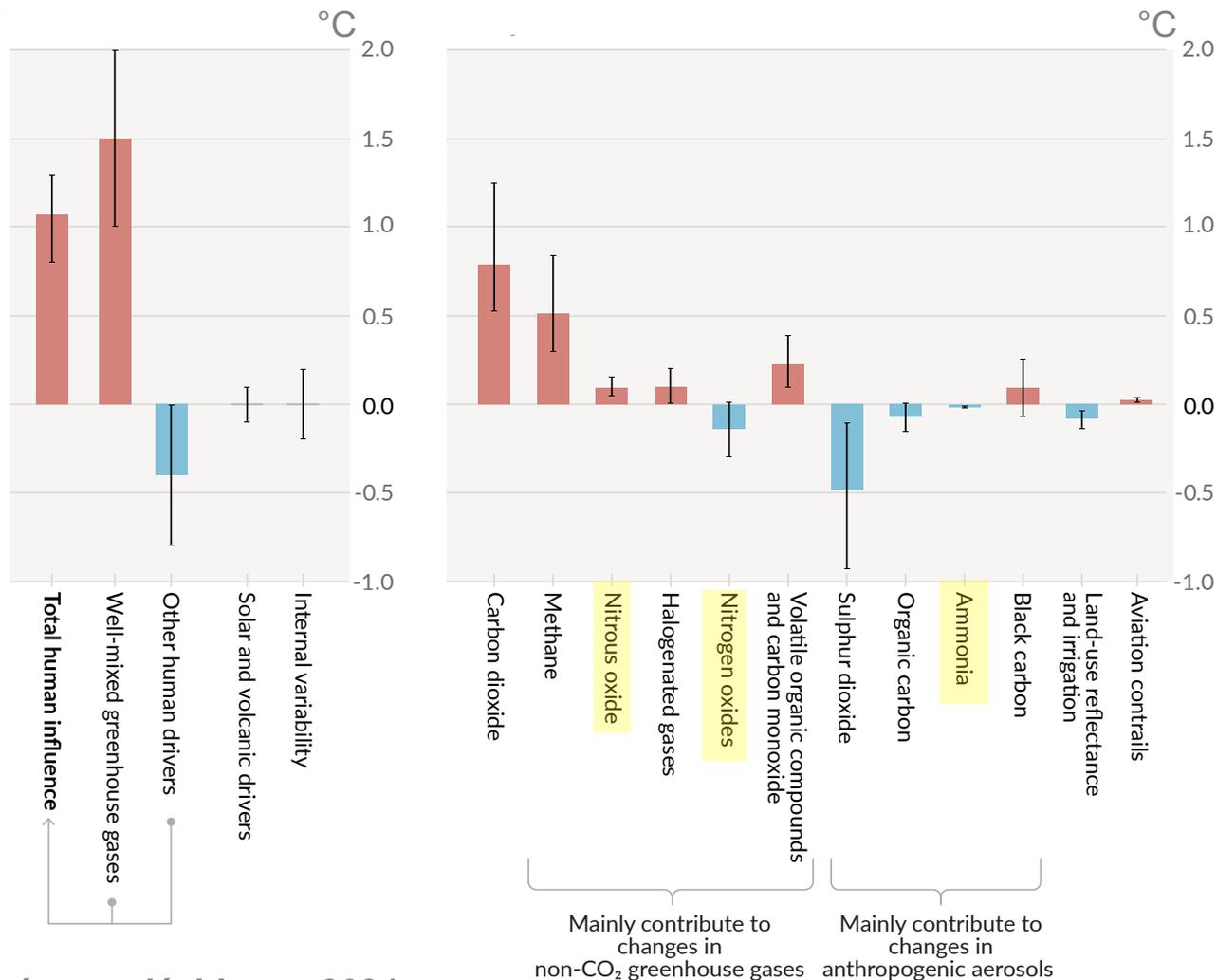
- Agriculture
- Energy
- Industry
- Road Transportation
- Non-Road Trans.
- Residential
- Commercial
- RCO-Other
- Solvents
- Waste
- International Shipping
- Process
- Coal
- Oil + Gas
- Biofuel

Mc Duffie et al., 2020



# Contributions au réchauffement global

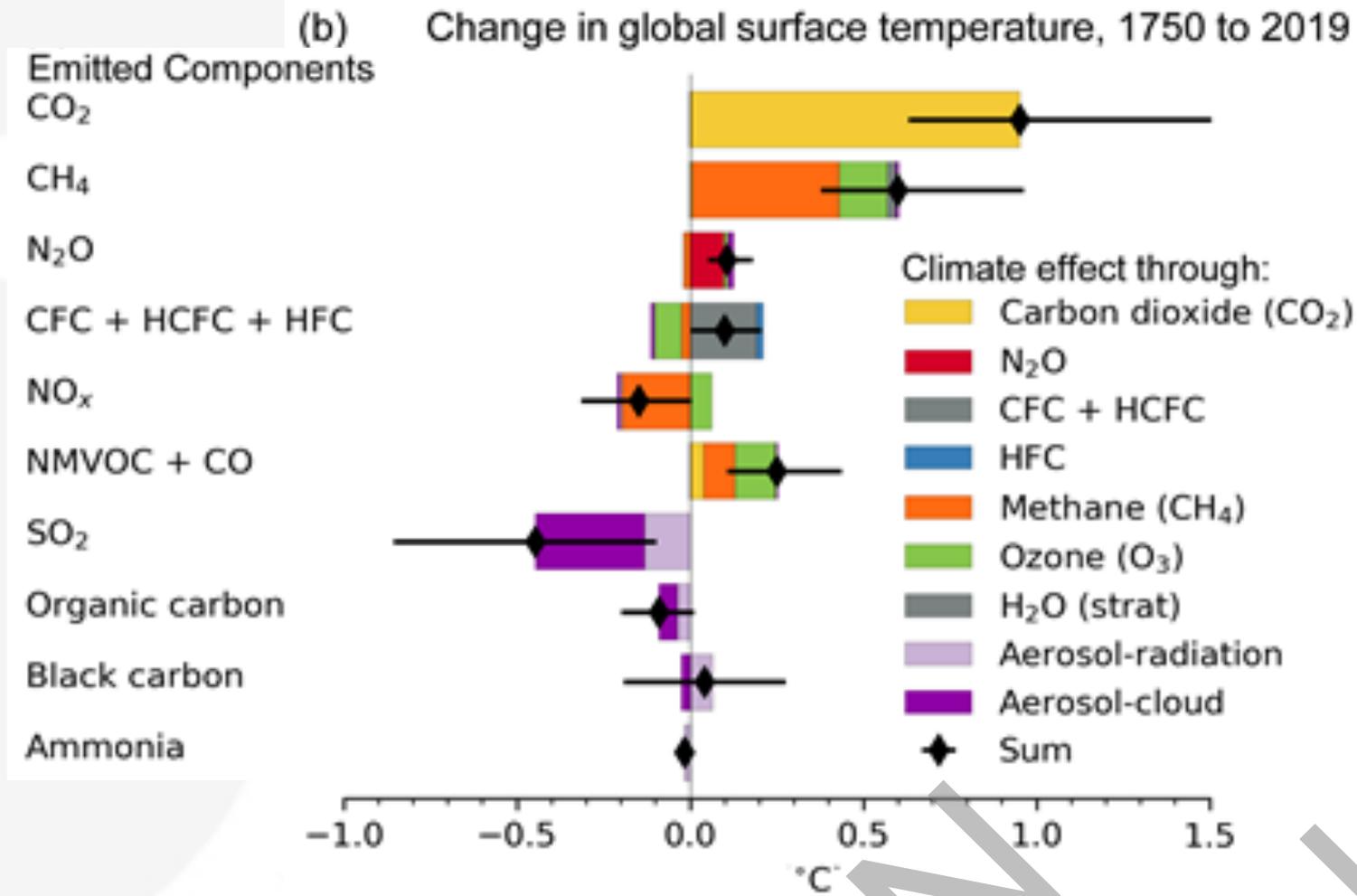
2010-2019 relativement à la période 1850-1900



GIEC, AR6 WG1, résumé pour décideurs, 2021

Université d'été de Sauvons le Climat - 2-5 Novembre 2021 - Chinon

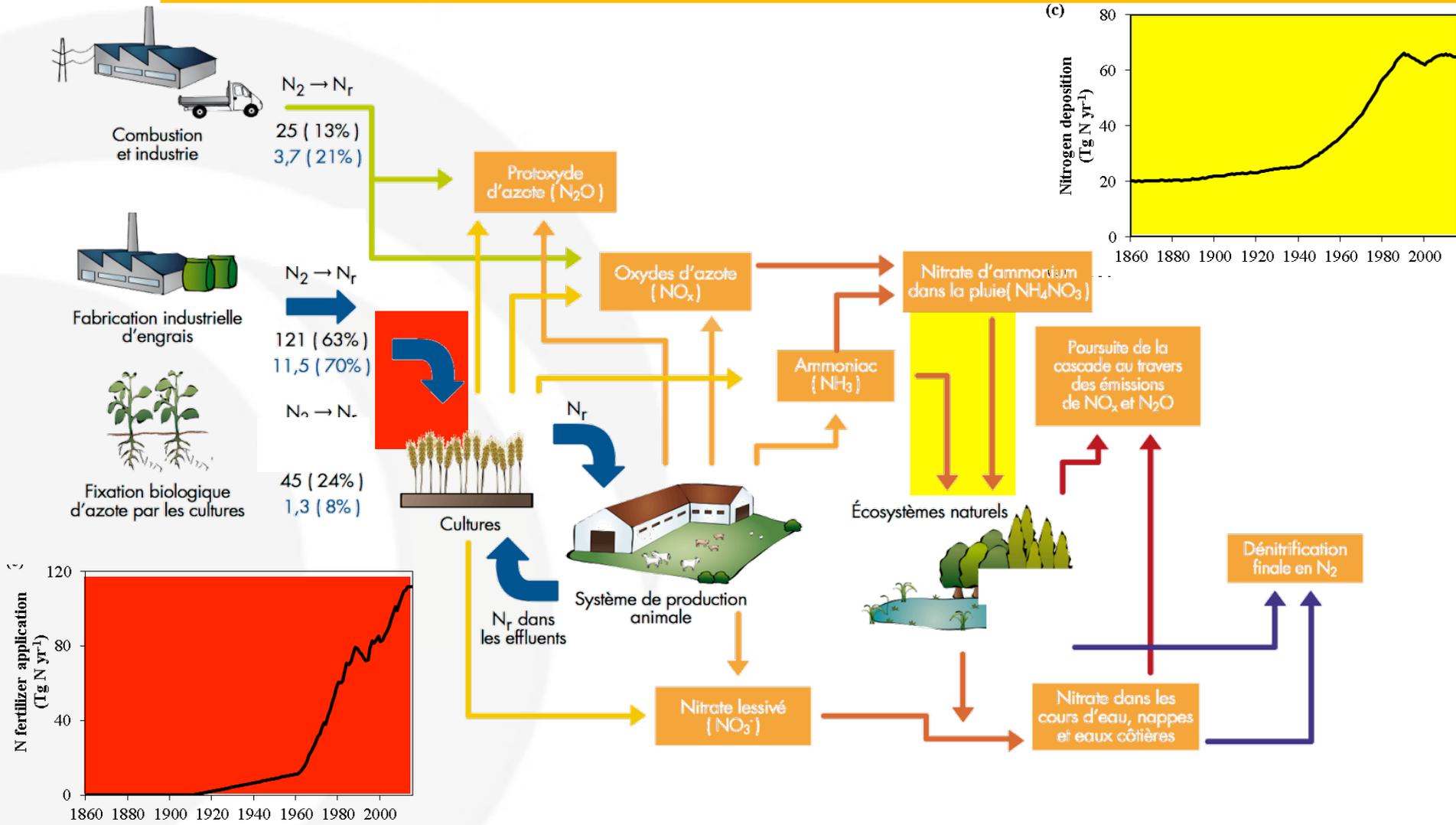
# Contributions au réchauffement global



GIEC, AR6 WG1, résumé technique, 2021



# Augmentation des dépôts atmosphériques d'azote

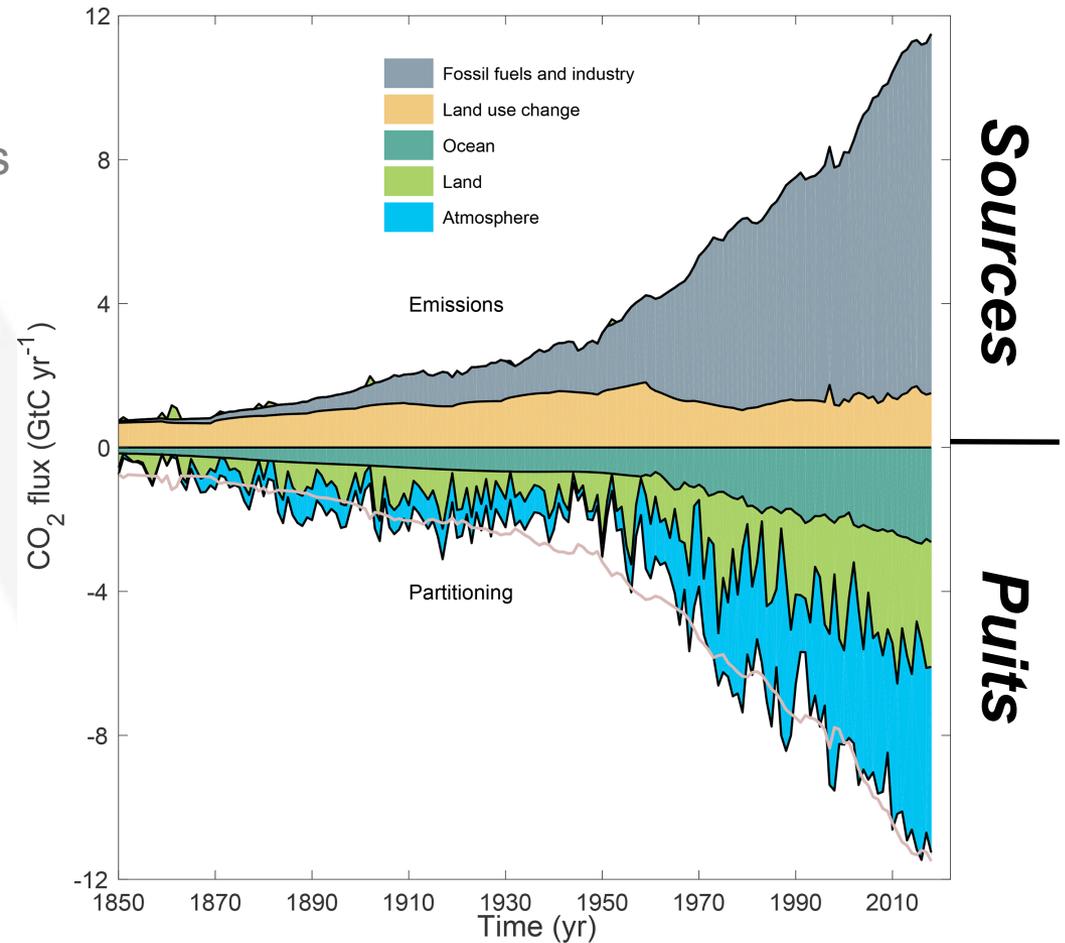


Expertise scientifique collective INRA, 2012



# Sources et puits de CO<sub>2</sub>

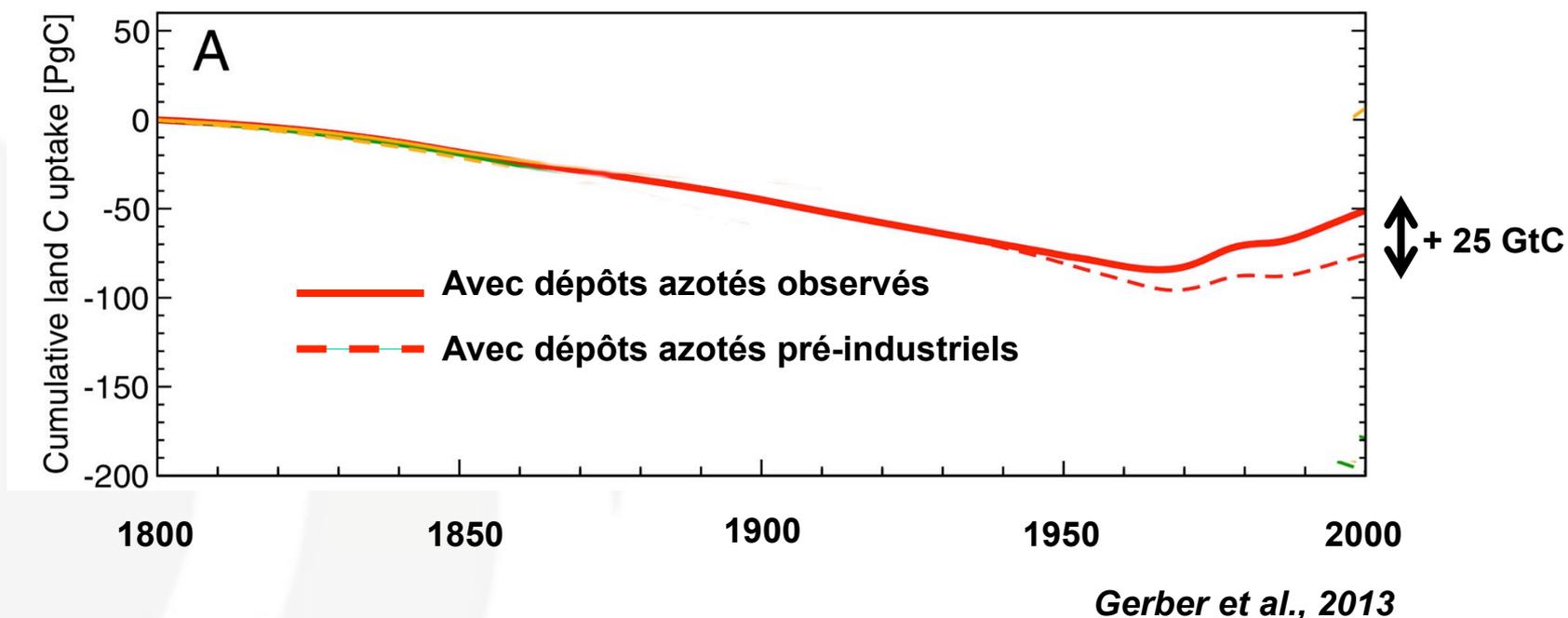
- Puits biosphérique terrestre  
~33% des émissions anthropiques



*Friedlingstein et al., ESSD, 2019*



# Renforcement du puits biosphérique de C par les dépôts azotés



**Puits biosphérique terrestre :**

**33% avec dépôts azotés → 26% sans l'augmentation des dépôts**



# Conclusions

---

- **Très forte perturbation anthropique du cycle de l'azote** sur les 100 dernières années: +100% d'augmentation de création d'azote réactif !
- **Emissions de multiples composés azotés** ( $N_2O$ ,  $NO_x$ ,  $NH_3$ ) ayant **différents impacts directs ou indirects sur le climat**
- Interconnection des cycles du Carbone et de l'Azote, **le cycle de l'azote a aussi un impact sur le cycle du carbone !**

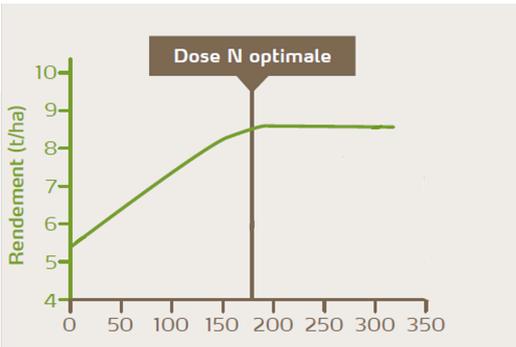


# Quelques voies d'atténuation

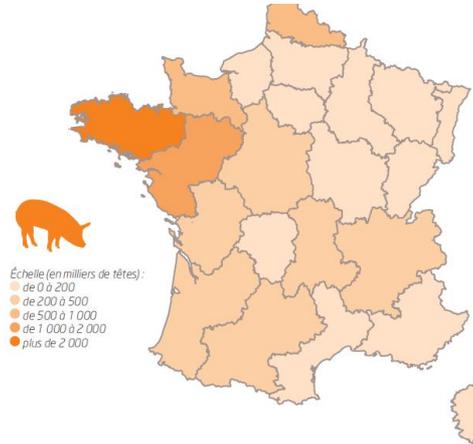
## Des productions plus efficaces

## Des consommations plus sobres

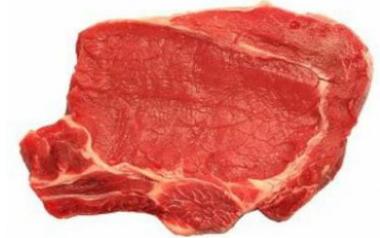
Rendement en fonction de la dose d'engrais azoté



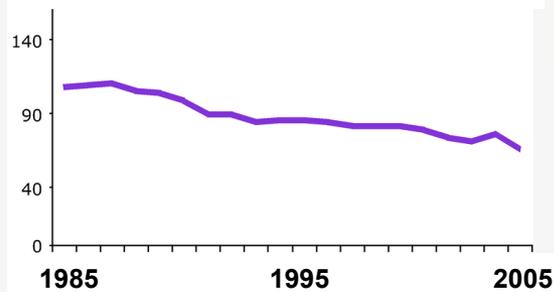
Nombre de porcs élevés par grandes régions



Emissions de N<sub>2</sub>O par kg de viande produit



Surplus d'azote dans les pays de l'OCDE (kgN ha<sup>-1</sup>)



Origine de l'alimentation du bétail

