



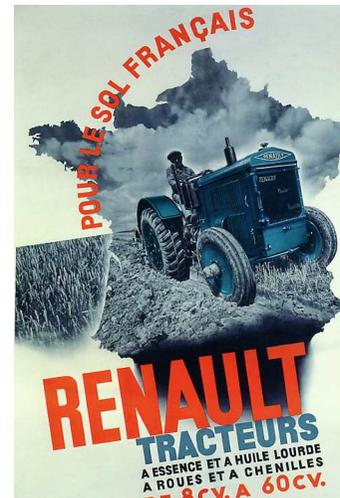
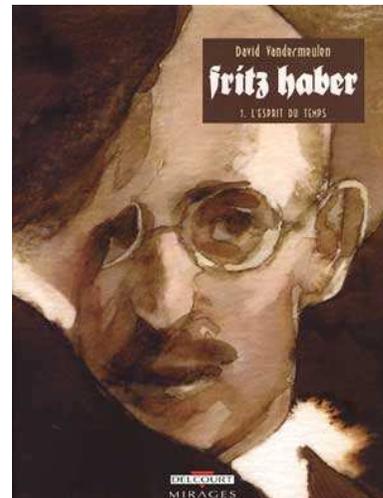
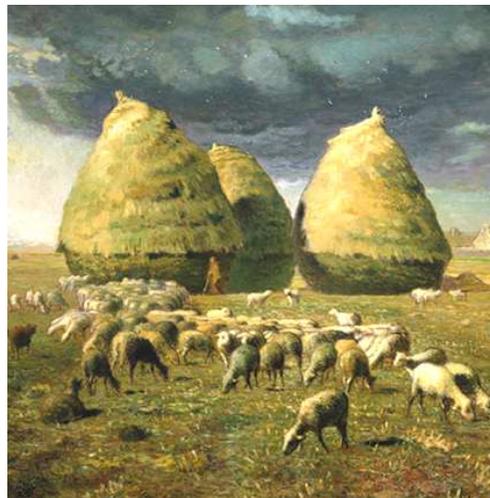
SÉMINAIRE CASCADE DE L'AZOTE

Mardi 1er juin 2010

INRA - Paris

La Cascade de l'Azote de l'échelle régionale à l'échelle mondiale

Gilles BILLEN, CNRS/UPMC, UMR Sisyphe



Les mobilités de l'azote

produits agricoles

hydrologique

atmosphérique

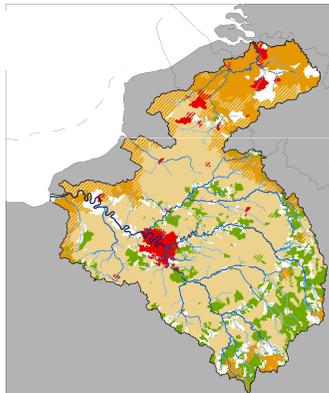


Echelles



paysage rural

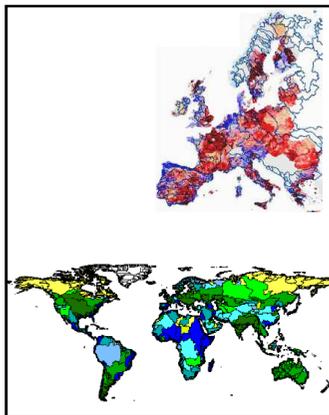
Une mosaïque d'écosystèmes terrestres et aquatiques profondément modifiés par l'agriculture



bassin versant régional

Des mosaïques paysagères rurales et urbaines, structurées par un réseau hydrographique

Des systèmes marins côtiers perturbés par les apports fluviaux



continents et planète

Des bassins versant régionaux échangeant entre eux de plus en plus de matière

Une seule atmosphère conditionnant le climat

Transferts de fertilité
Export de la récolte

Spécialisation des territoires

Mondialisation des échanges

Pertes par lessivage

Contamination des ressources hydriques

Transfert et élimination dans le continuum aquatique

Eutrophisation côtière

Volatilisation et redistribution locale

Dénitrification et production de N₂O

Dénitrification et production de N₂O

à l'échelle de l'atmosphère globale

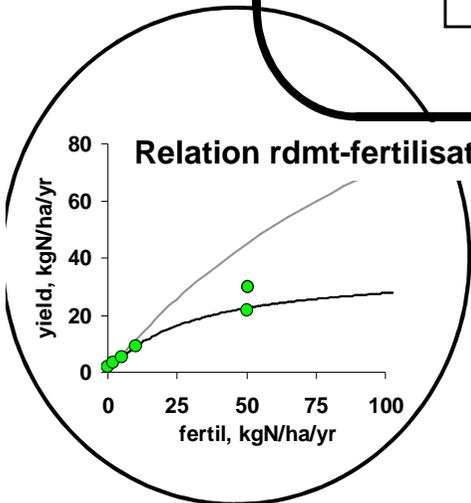
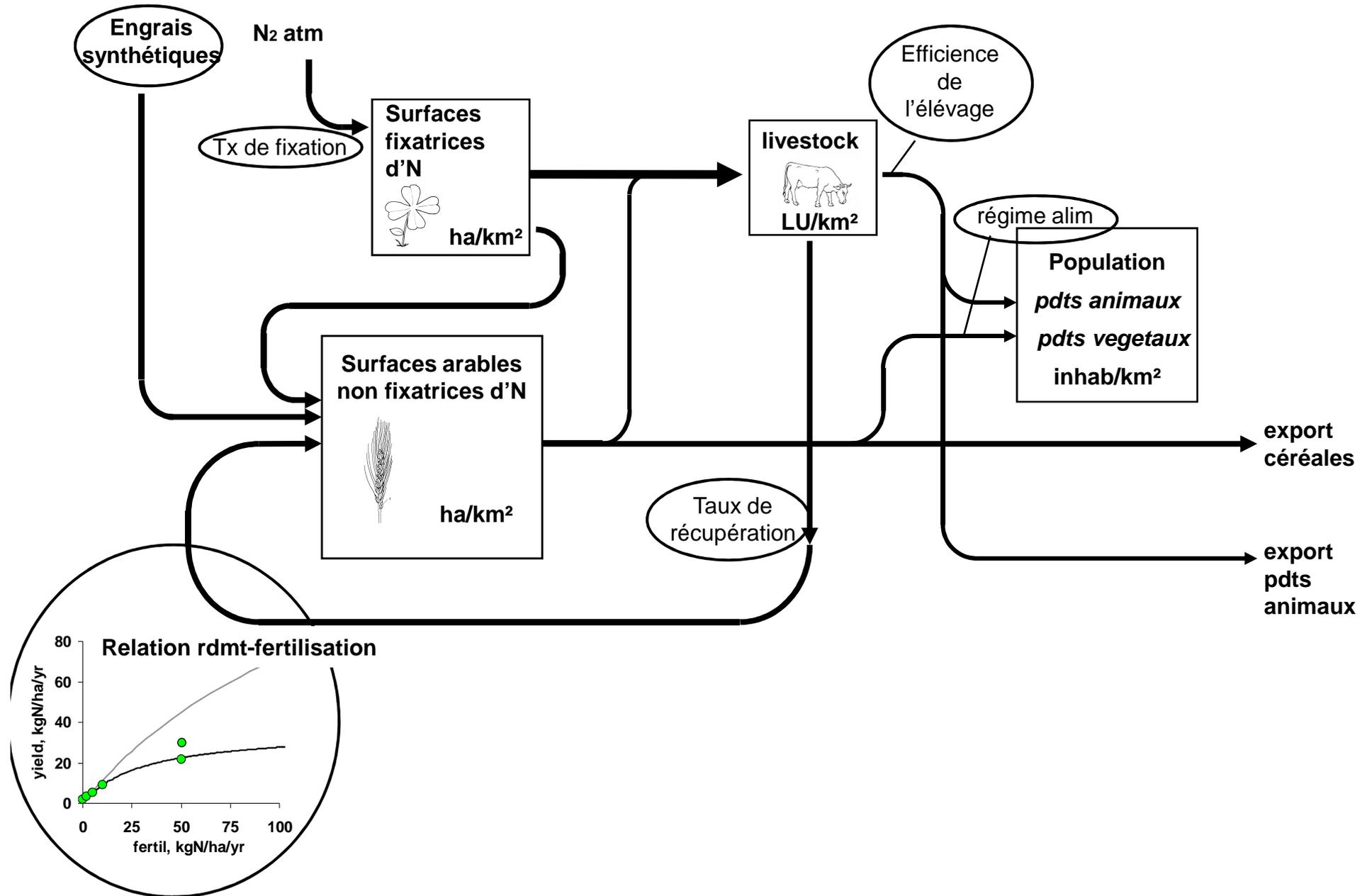
Prospective planétaire

1. Mobilité 'commerciale' de l'azote des produits agricoles



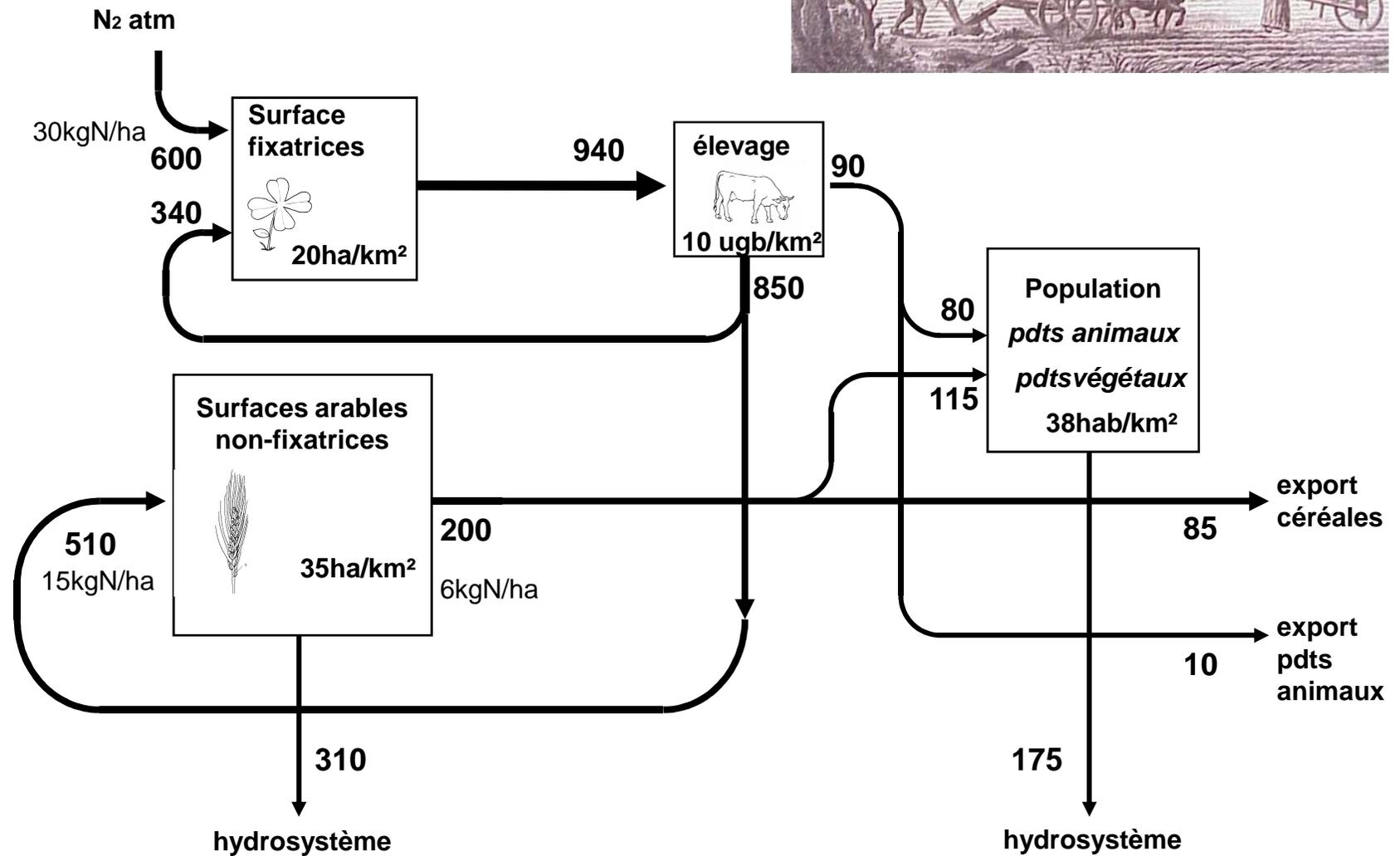
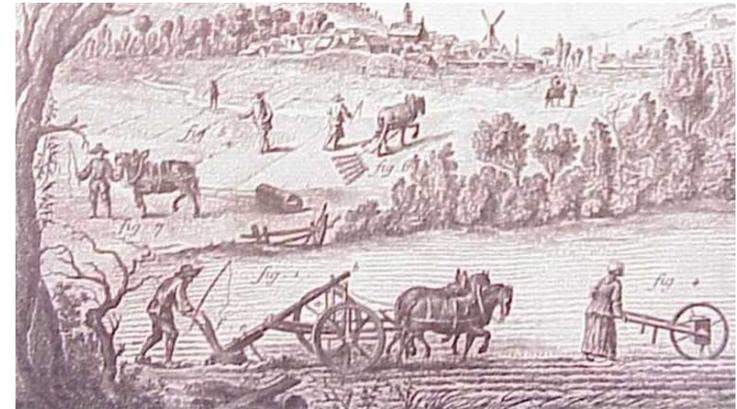
Céréalière chargeant au Havre

Analyse régionale du système agricole:



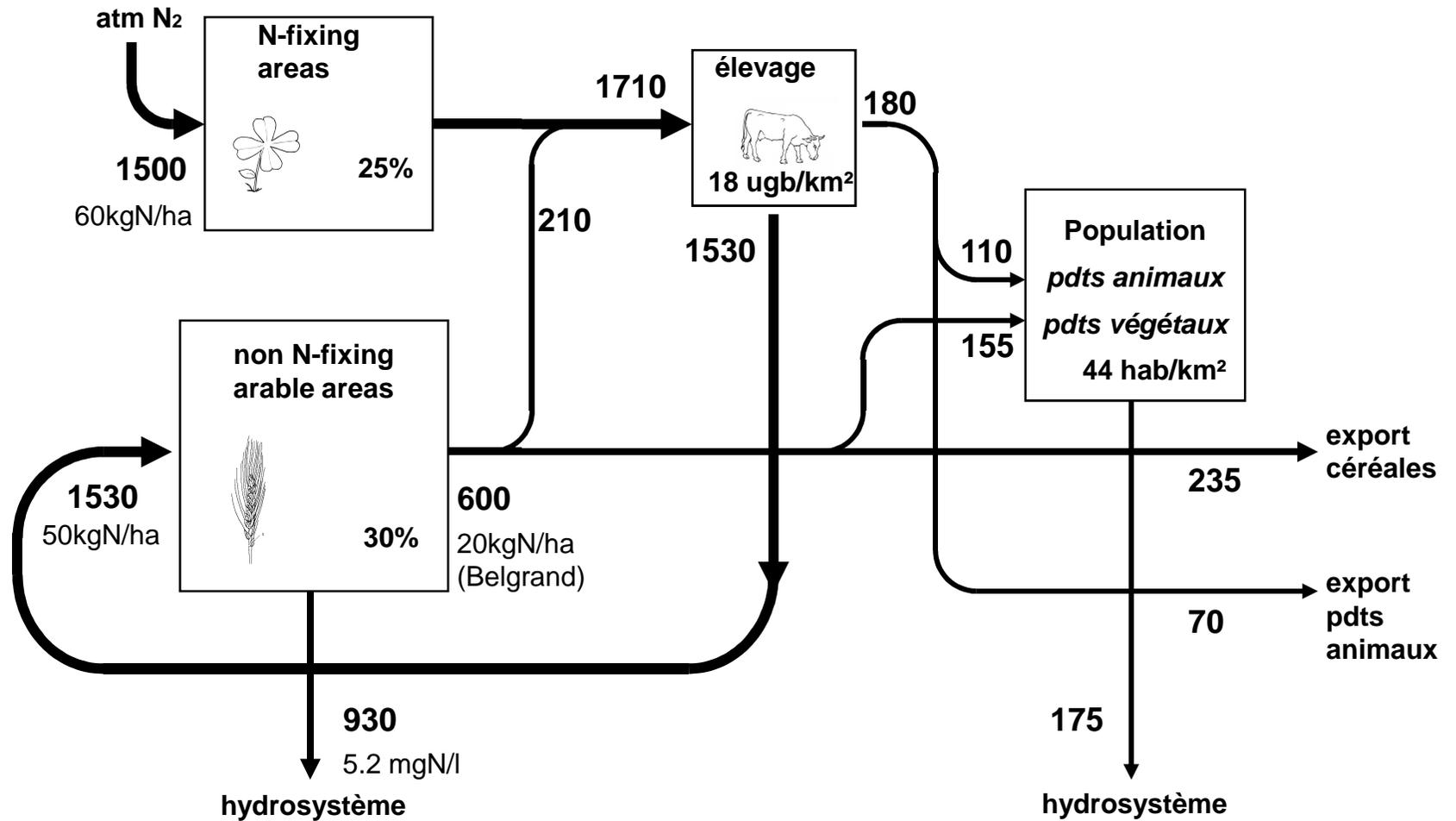
Bassin Parisien central, fin XVIIIe

kgN/km²/an



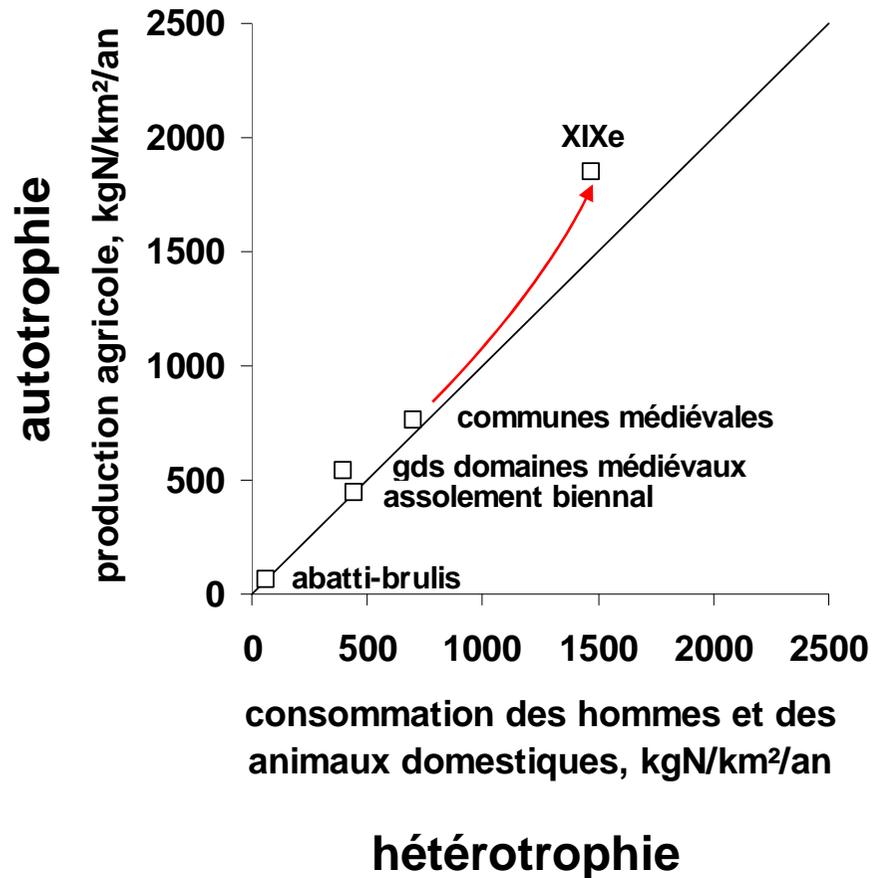
Bassin Parisien central, 1866

kgN/km²/yr



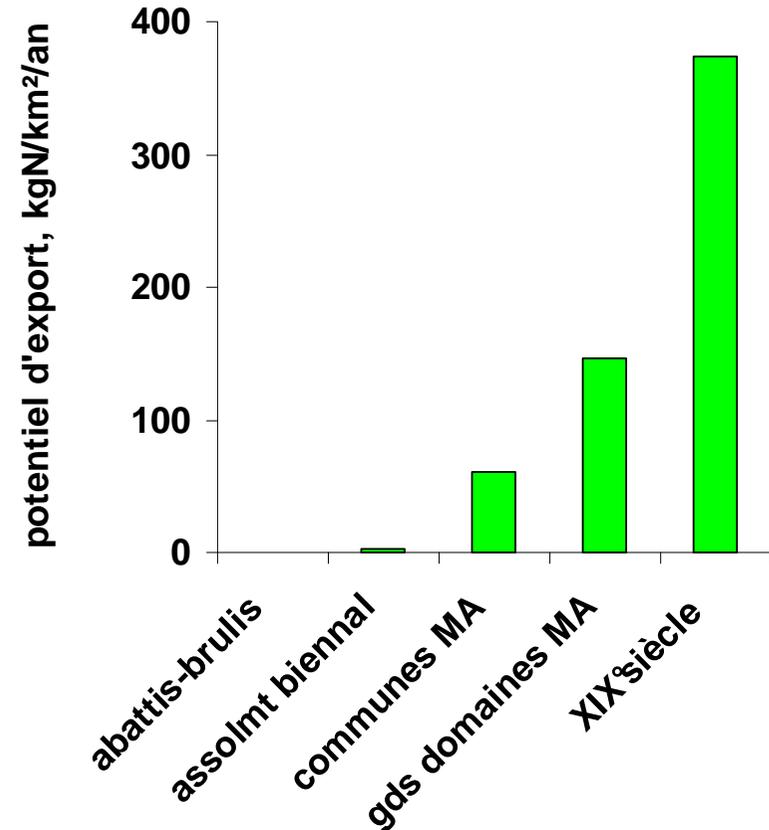
À l'échelle d'un territoire rural

ANAH: Anthropogenic Nitrogen Autotrophy and Heterotrophy



Potentiel d'exportation commerciale de la campagne vers la ville,

lié au potentiel de fixation d'azote atmosphérique par les composantes fixatrices de la mosaïque paysagère

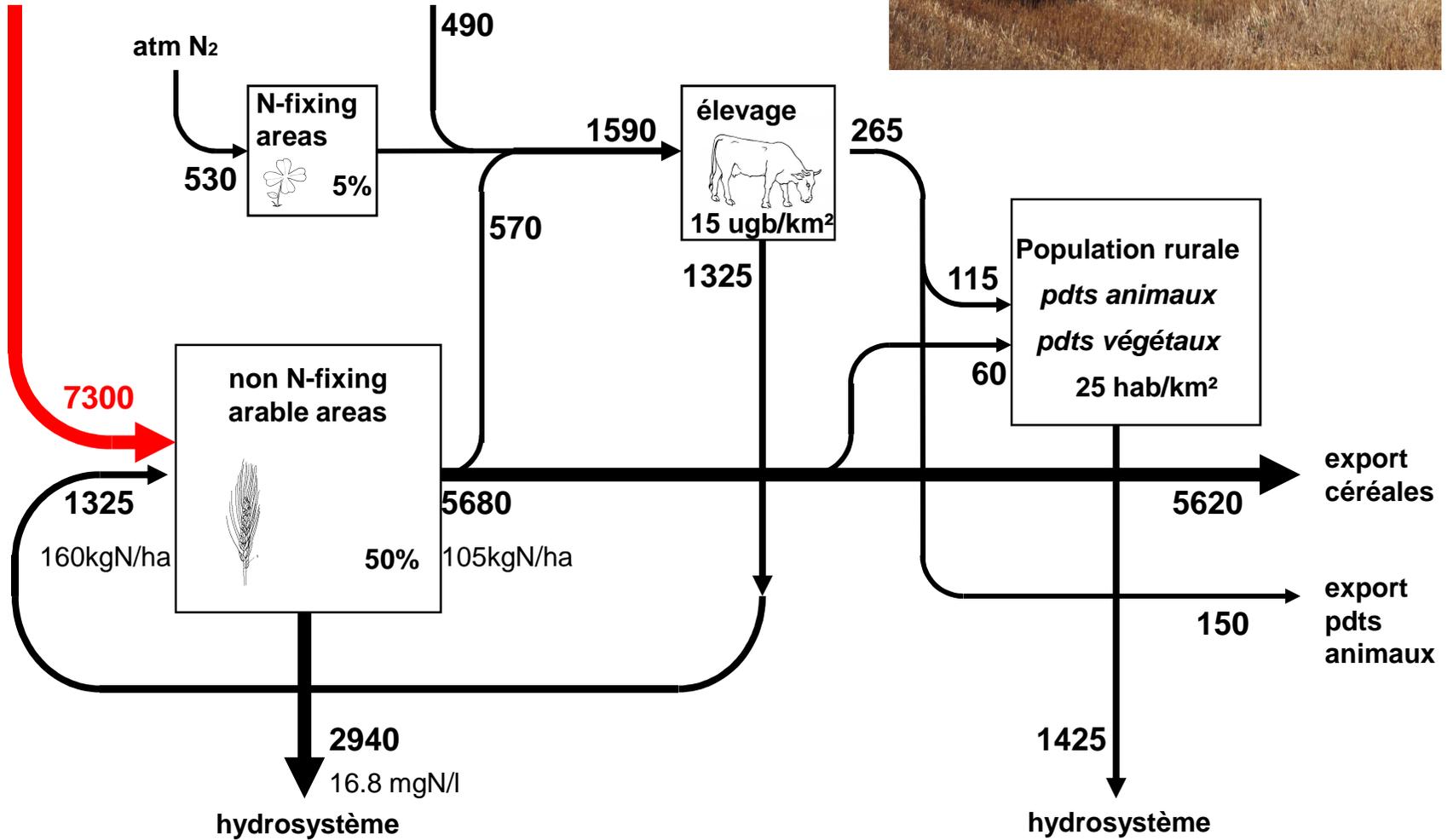


Territoires ruraux du Bassin de la Seine, 2005

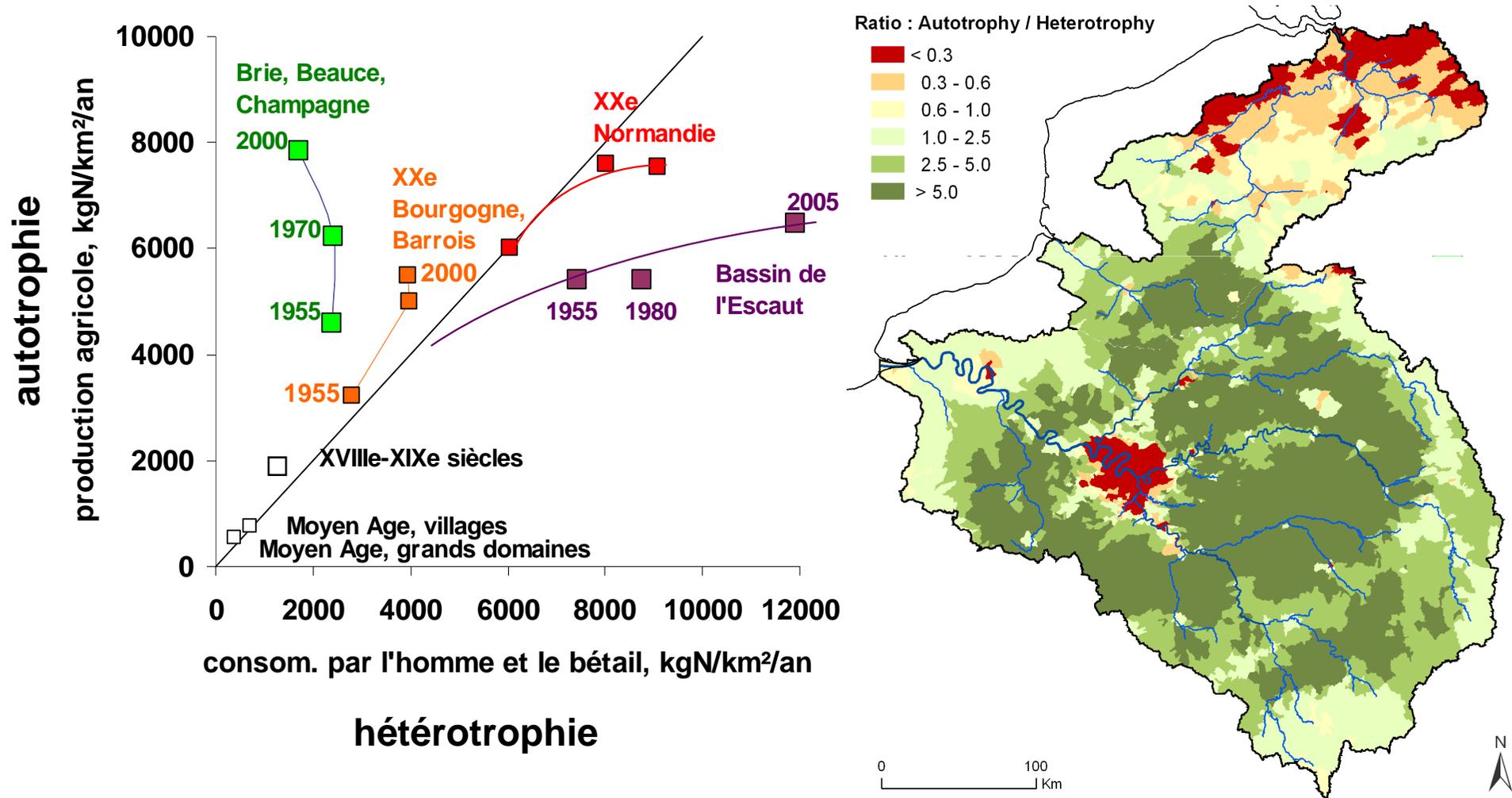
kgN/km²/yr



Engrais industriels



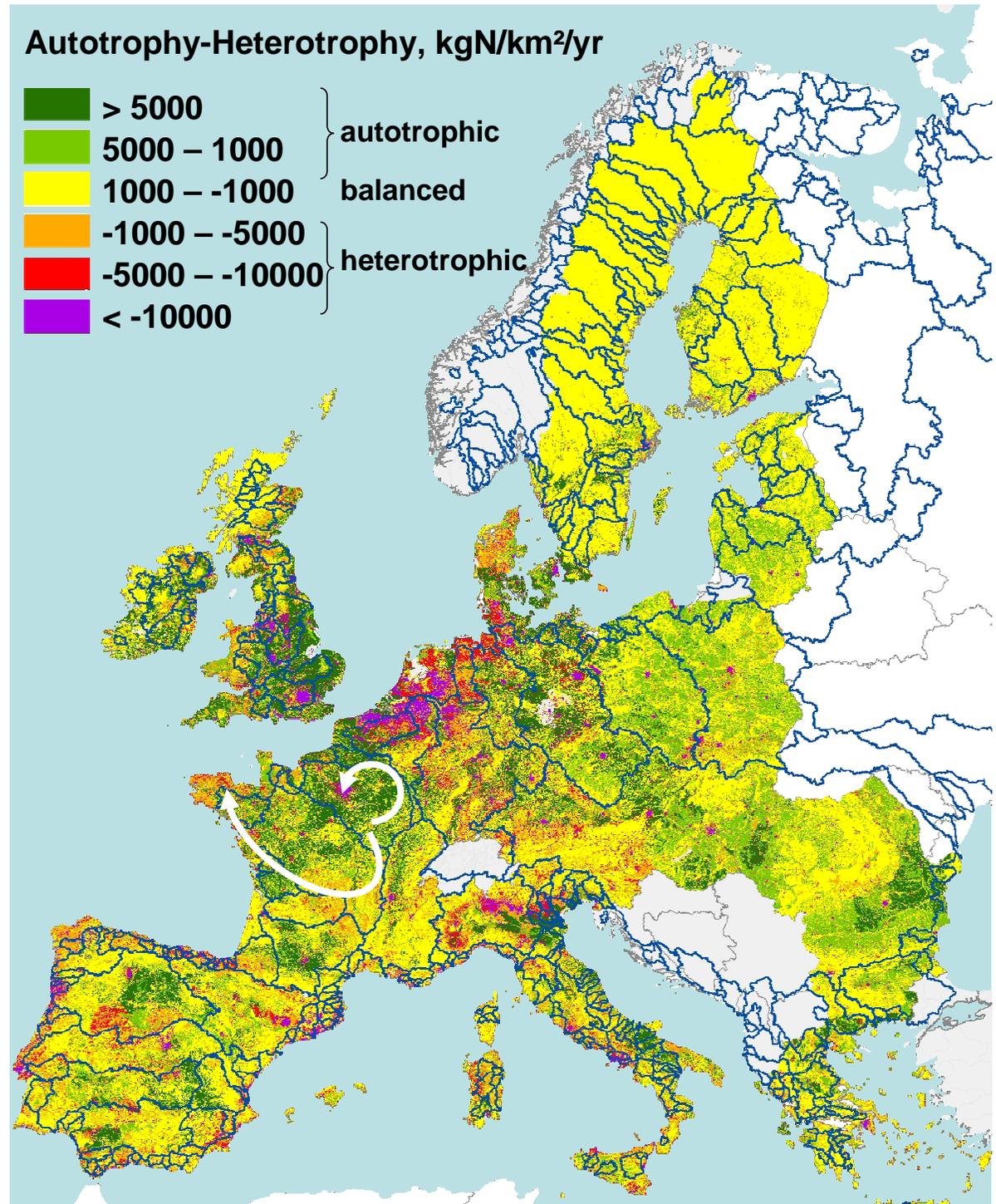
Séparation géographique des zones autotrophes et hétérotrophes



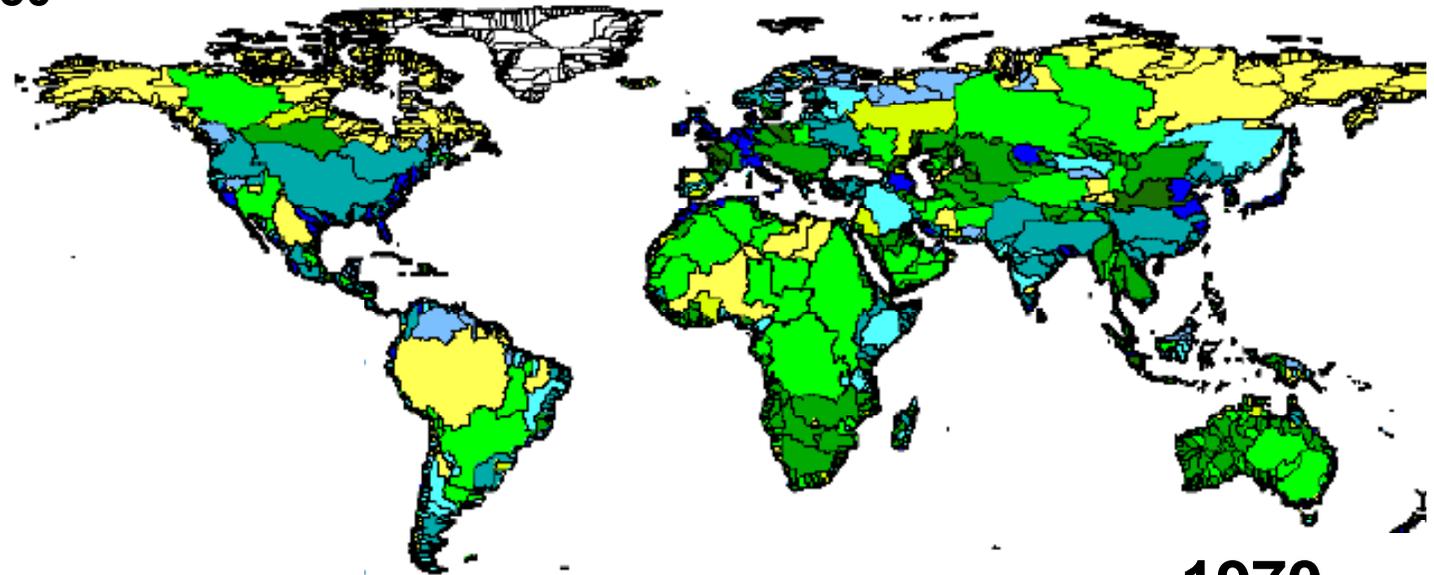
À l'échelle européenne

Spécialisation régionale

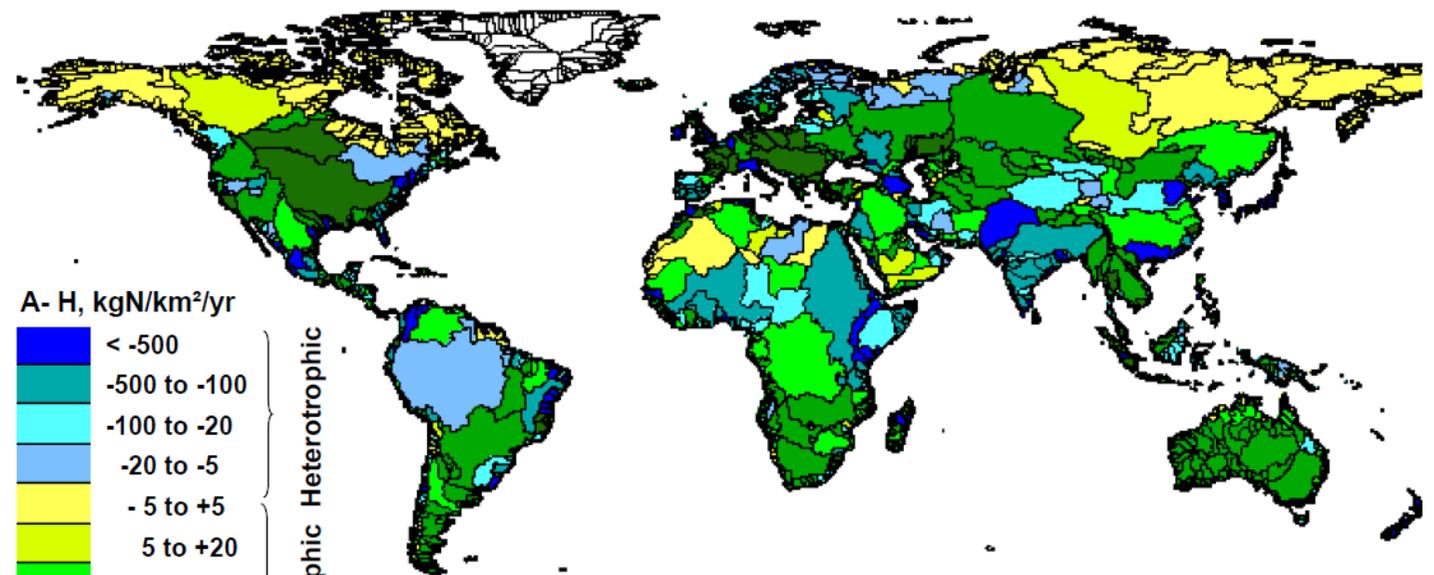
Mobilité de l'azote à travers les échanges commerciaux à longue distance de produits agricoles



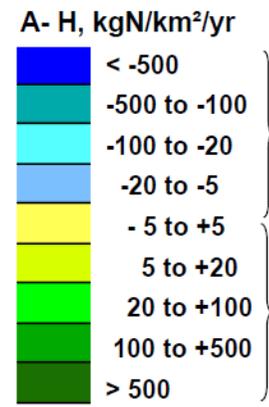
Autotrophie-Hétérotrophie à l'échelle globale: trajectoire 1970-2050



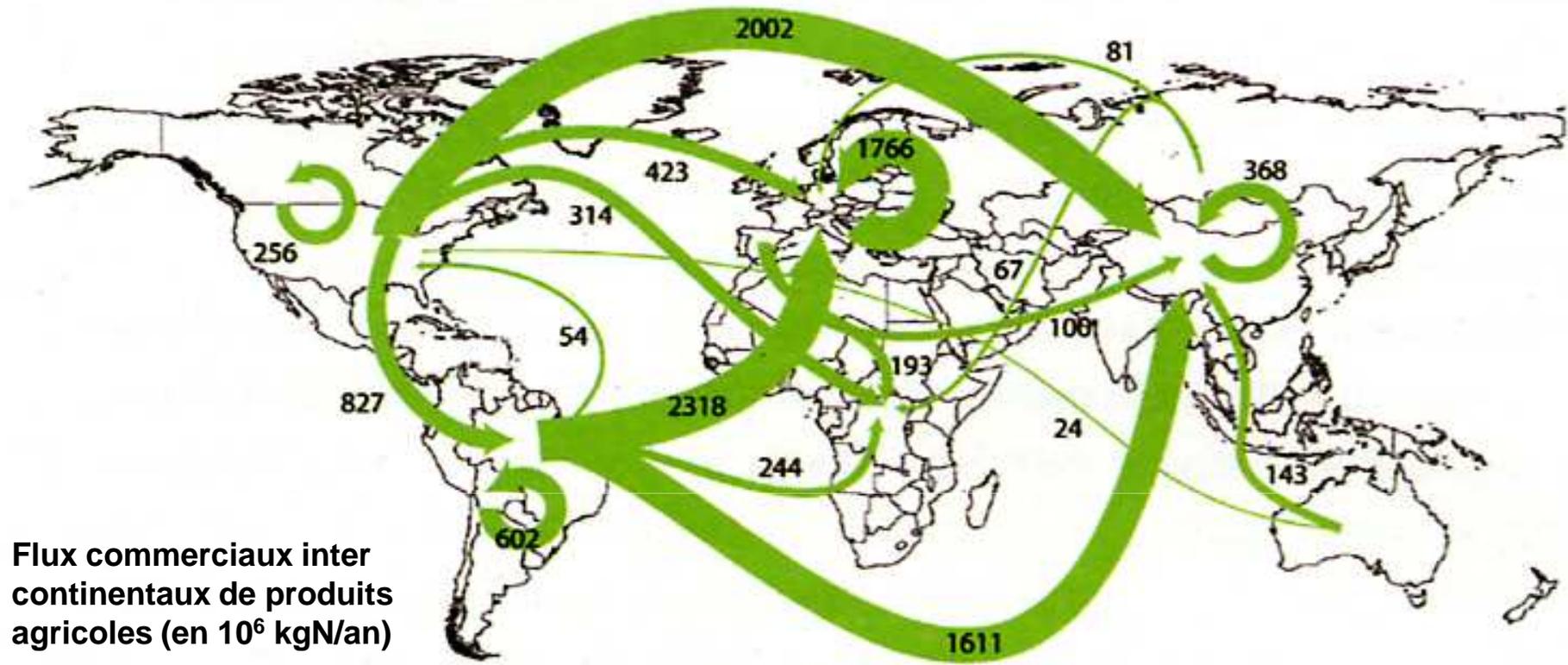
1970



2000



L'importance des échanges commerciaux à l'échelle mondiale:



Flux commerciaux inter continentaux de produits agricoles (en 10⁶ kgN/an)

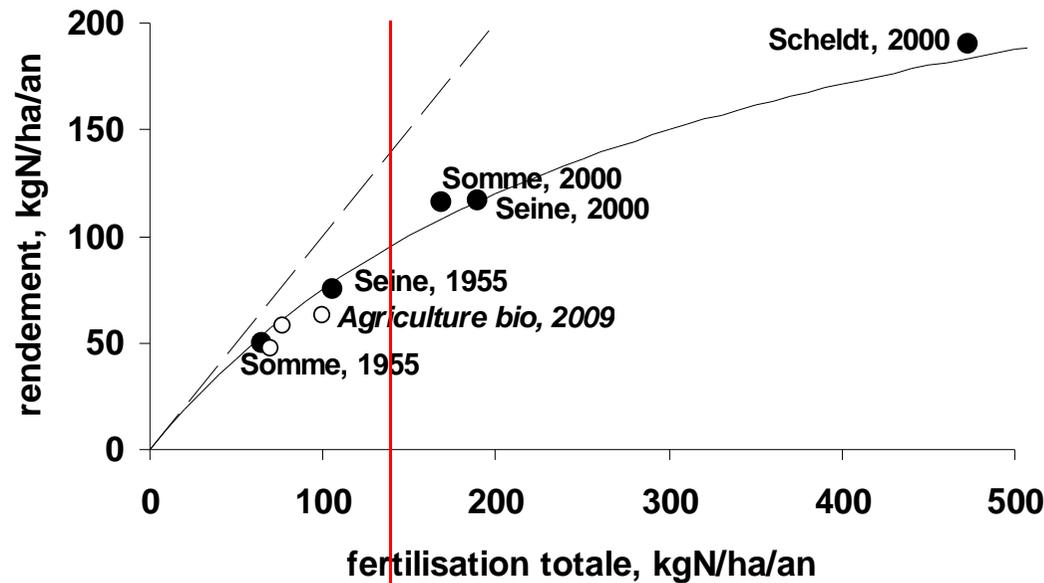
Consommation alimentaire humaine:	20 TgN/an
Production agricole mondiale (y compris fourrage):	120 TgN/an
Flux commerciaux internationaux de produits agricoles:	12 TgN/an

2. Mobilité hydrique de l'azote

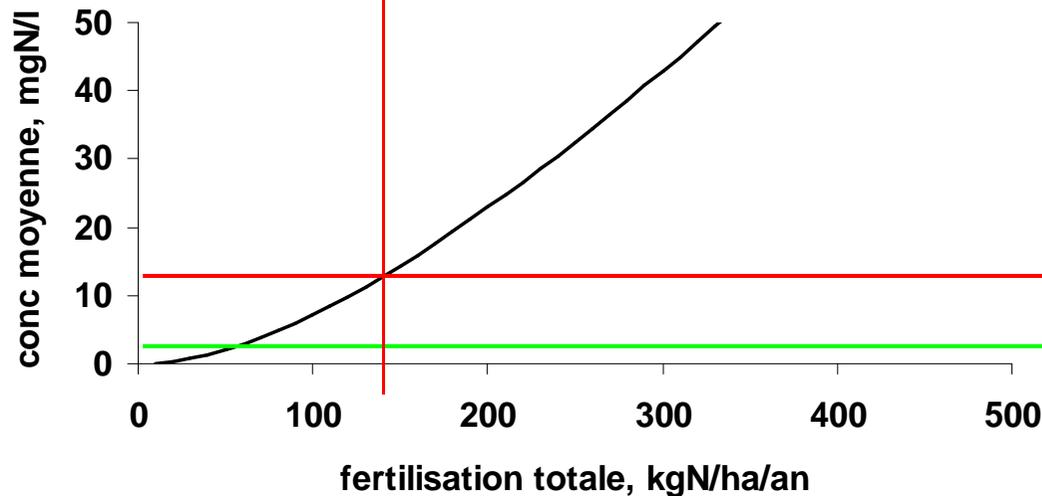


La mobilité hydrique de l'azote

Relation rendement vs fertilisation des terres arables non fixatrices



NUE et surplus

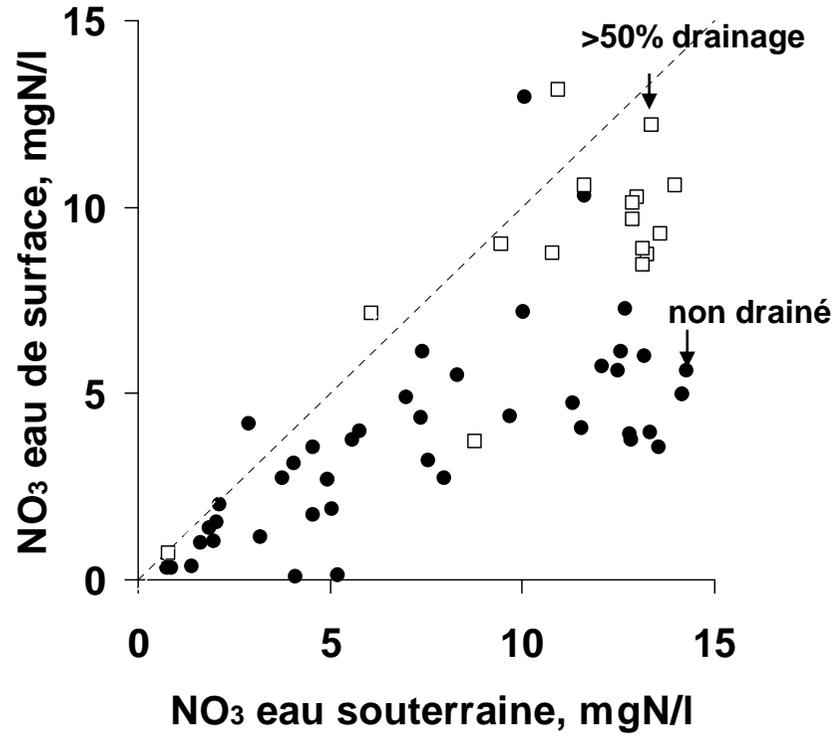


Concentration sous-racinaire moyenne après dilution dans une lame d'eau de 350 mm

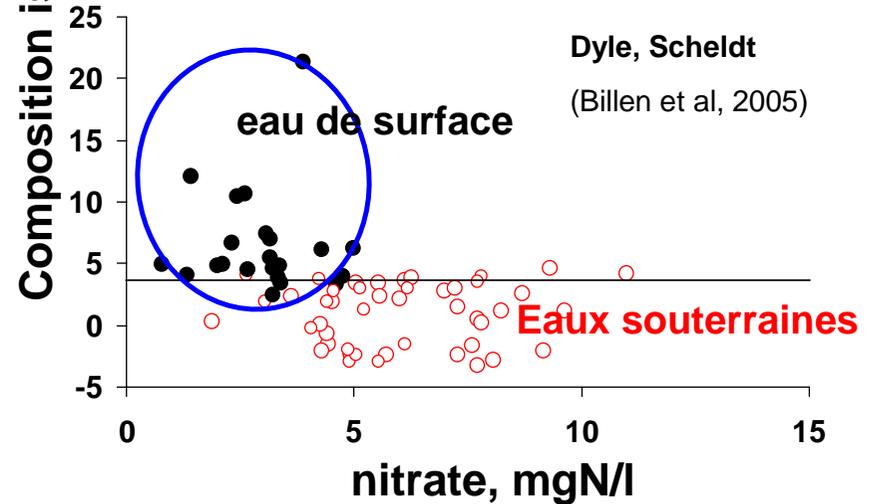
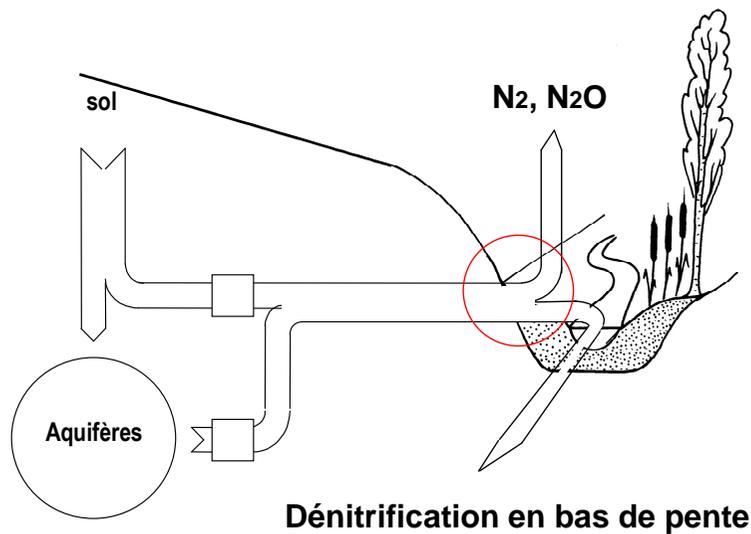
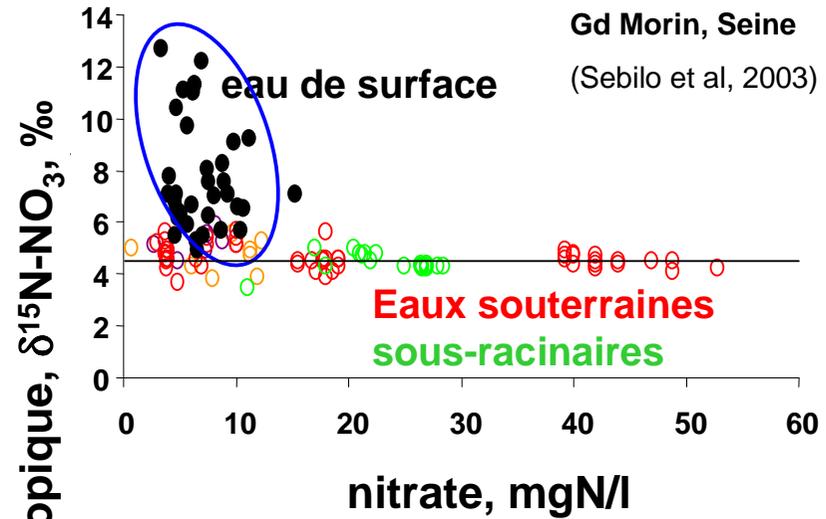
→
Limite de potabilité OMS
(50 mgNO₃/l)

Limite de qualité écologique
(Camargo & Alonso, 2006)

Contamination des eaux de surface et des eaux souterraines

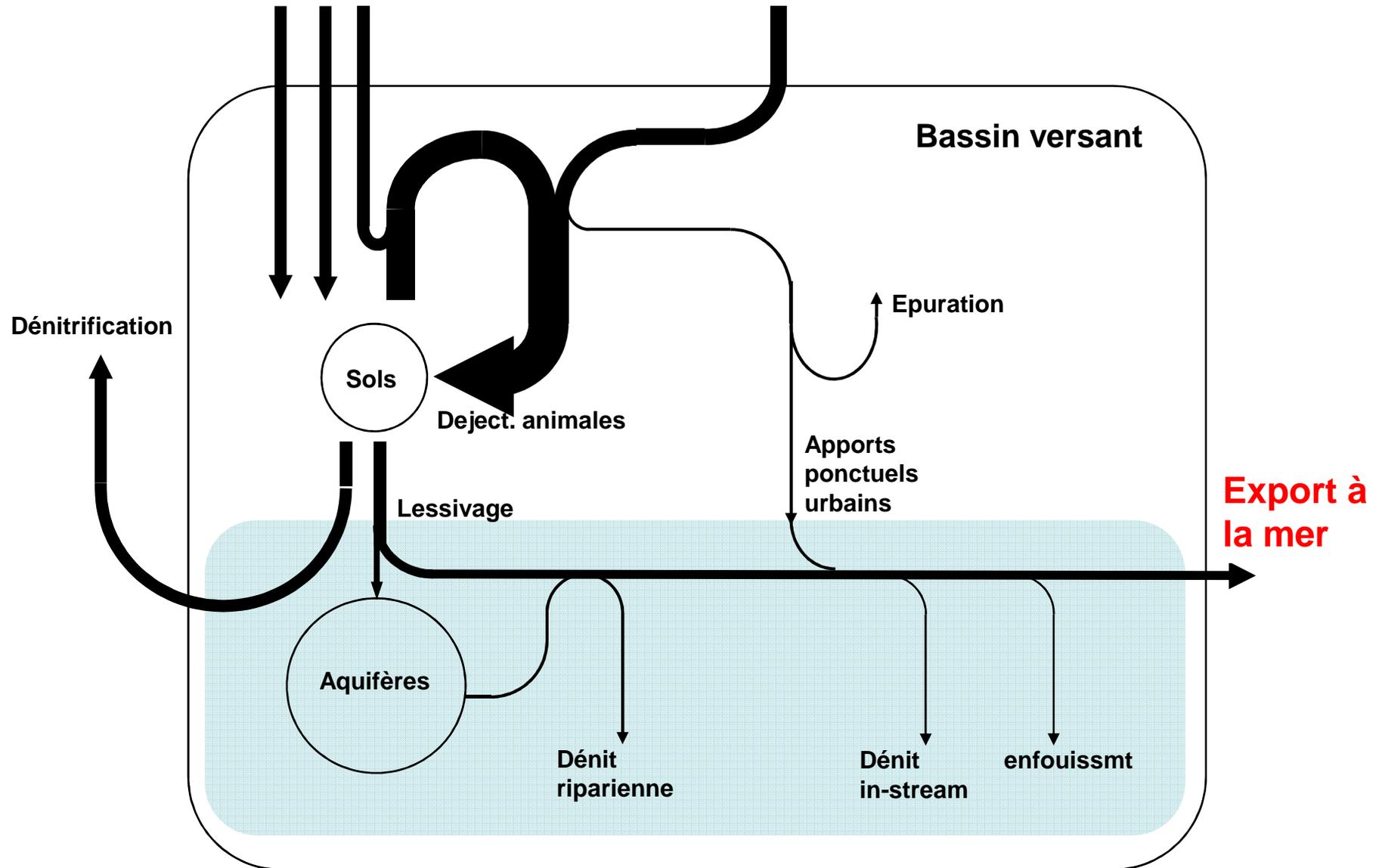


Signature isotopique ($\delta^{15}\text{N-NO}_3$) de la dénitrification



Echelle du bassin versant régional: les flux d'azote vers le réseau hydrographique

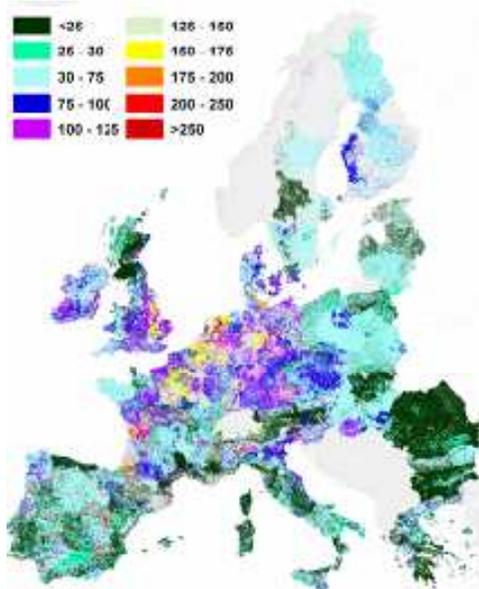
NANI (Net Anthropogenic Nitrogen Input)



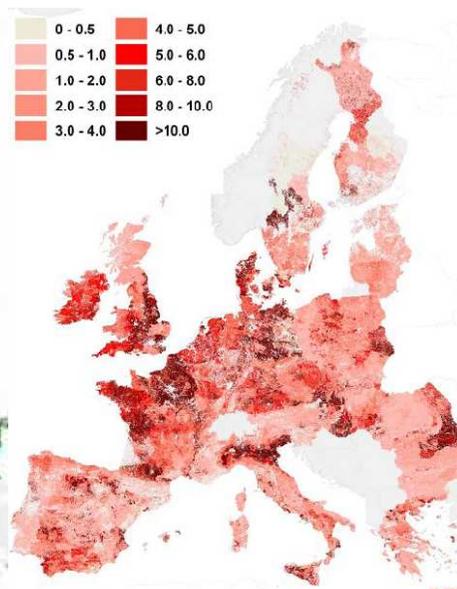
Les apports anthropogéniques net d'azote au bassin versant (Net Anthropogenic Nitrogen Input: NANI)

NANI = Nengrais synth + N2fix + dépôt atm + import net d'N alimentaire (Howarth et al, 1996)

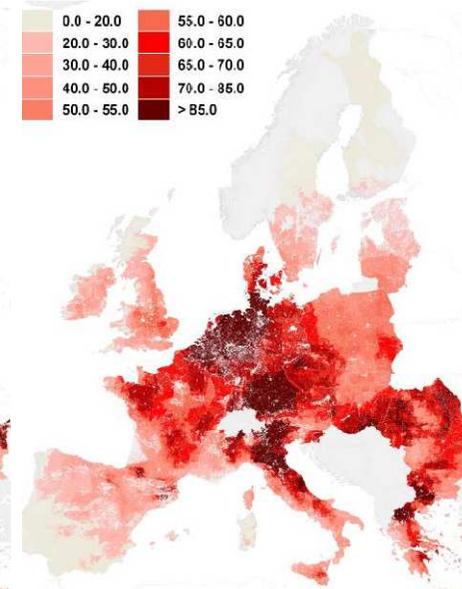
Mineral fertilizers



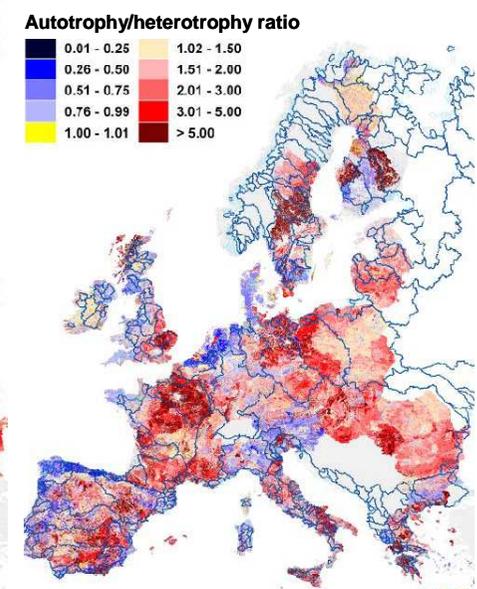
Crop N fixation



Atmosph. deposition



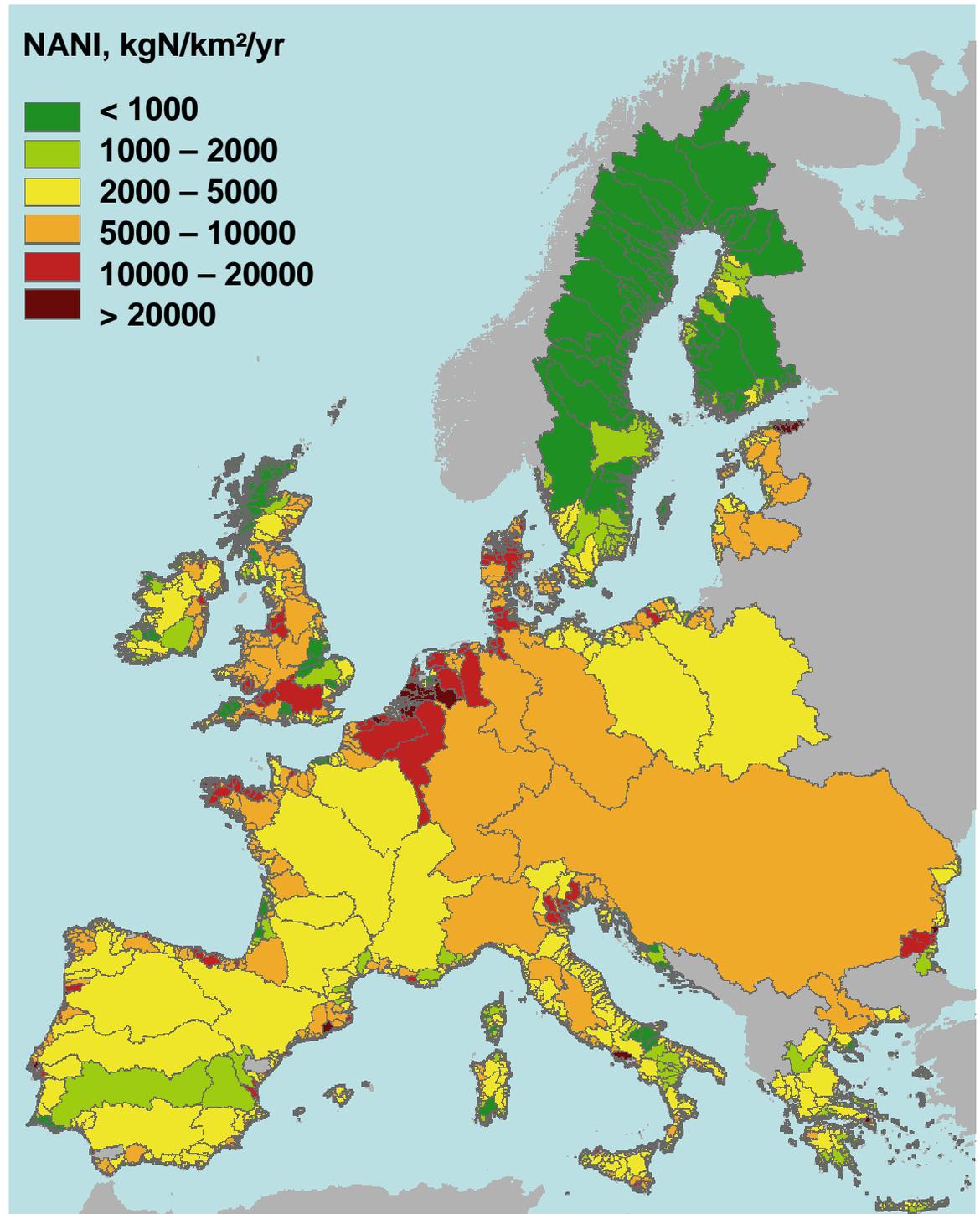
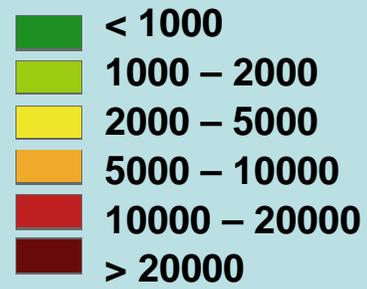
Net input of food & feed



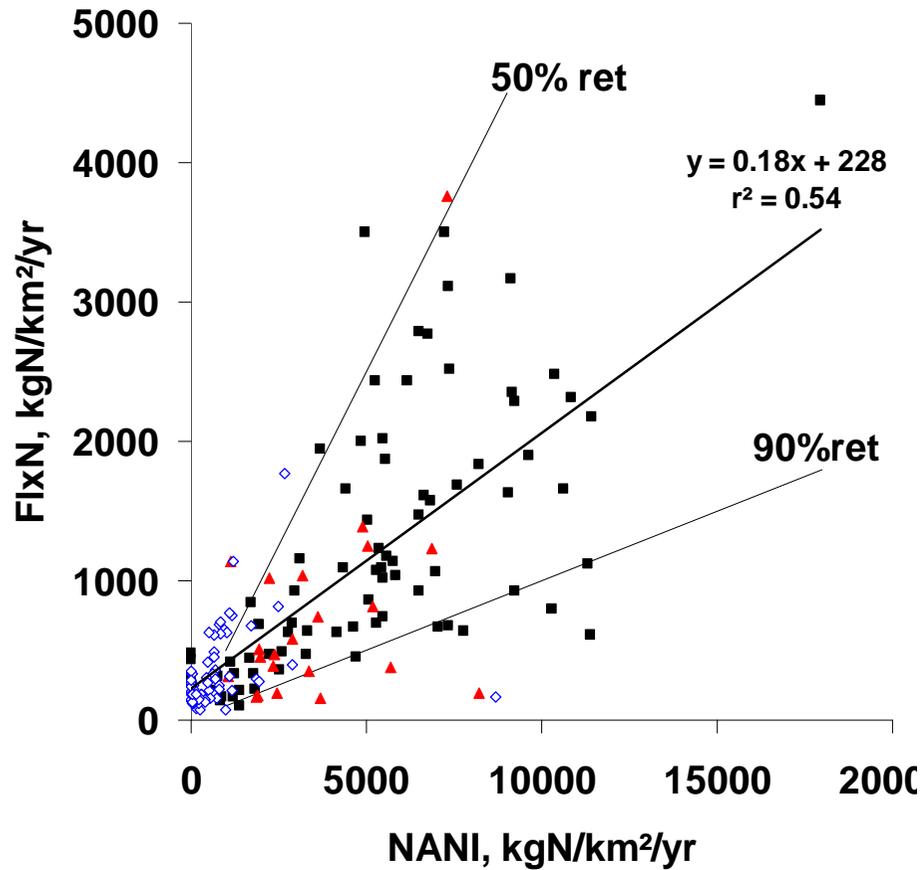
À l'échelle européenne

Apports anthropogéniques net d'Nr
par surface de bassin versant

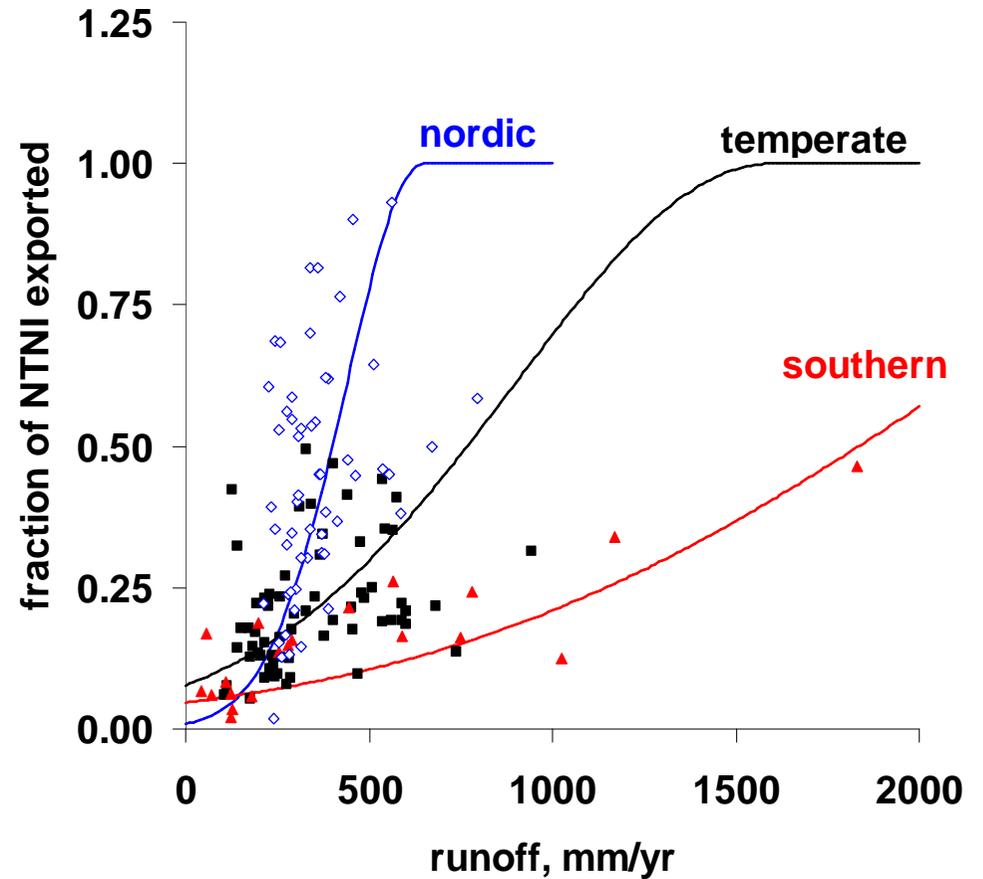
NANI, kgN/km²/yr



'Rétention' d'azote dans le bassin versant



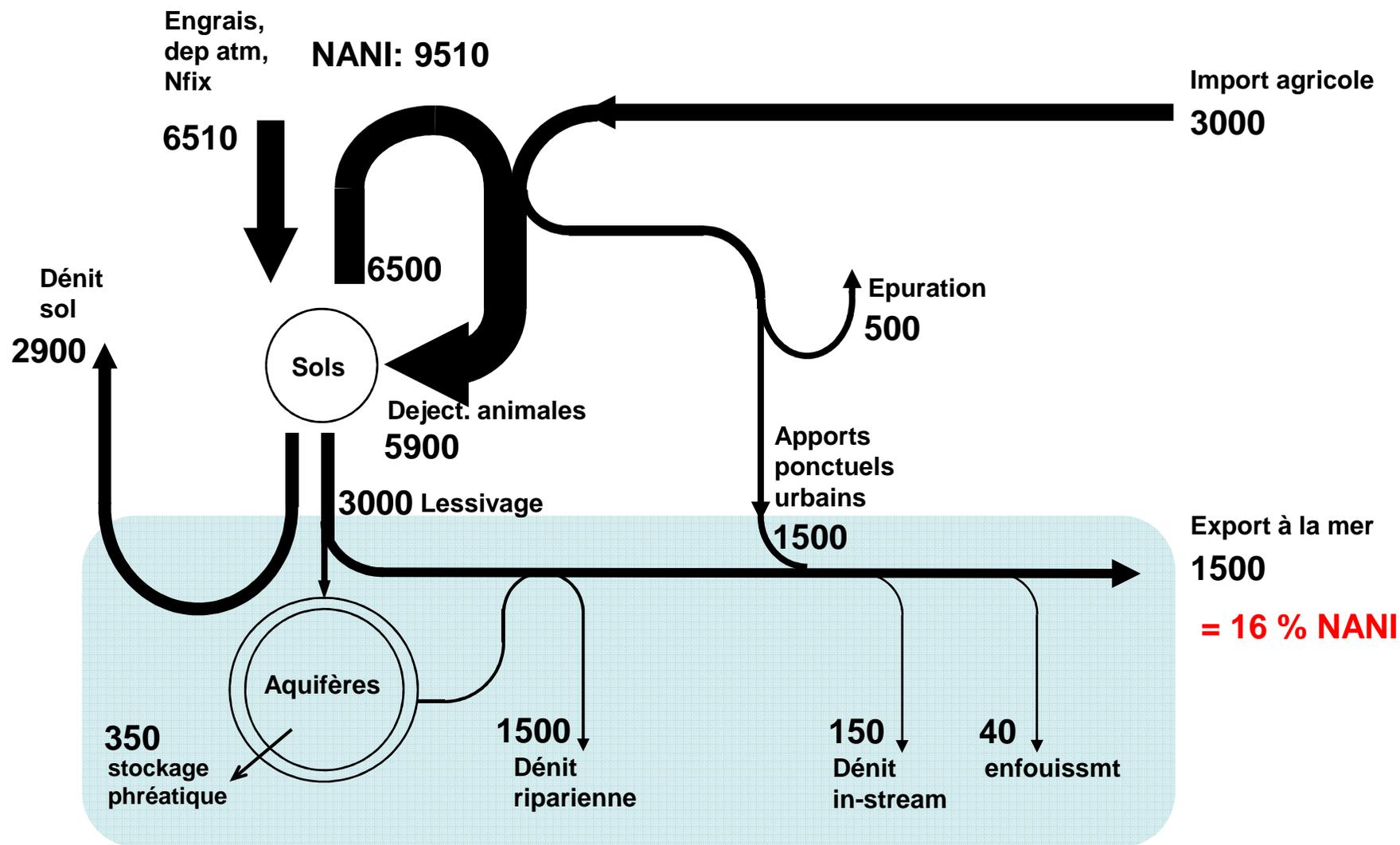
De 50 à 90% de l'Nr introduit dans les BV n'atteignent jamais la mer!



Cette 'rétention' est d'autant plus forte que le climat est sec et chaud

Un bilan plus détaillé pour l'Escaut

Situation hydrologique moyenne
en kgN/km²/an



Approche par modélisation mécanistique à l'échelle du réseau hydrographique
SENEQUE (Ruelland et al., 2007; Thieu et al., 2009)

Les apports d'azote à l'exutoire des grands fleuves

Eutrophisation côtière



Marées vertes



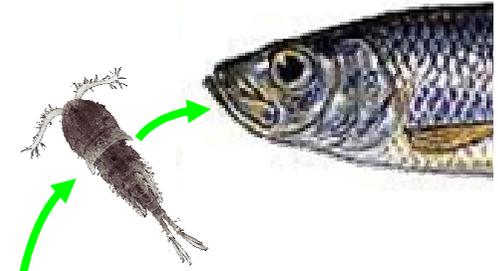
Mortalité piscicole



Accumulation de mousses

Mécanismes de l'eutrophisation côtière:

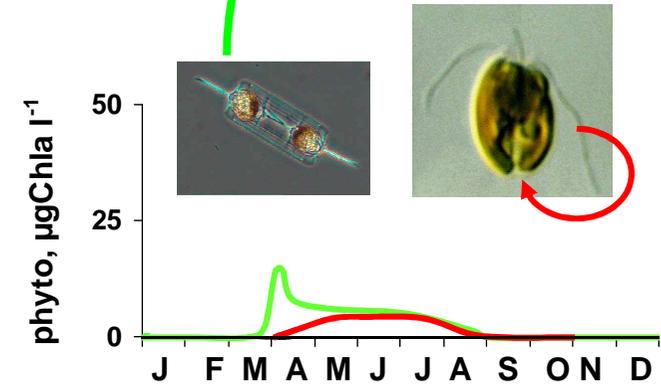
l'azote et la silice contrôlent le fonctionnement de l'écosystème marin côtier



Zones côtières isolées:

Les diatomées poussent d'abord, utilisent tout N et Si présent

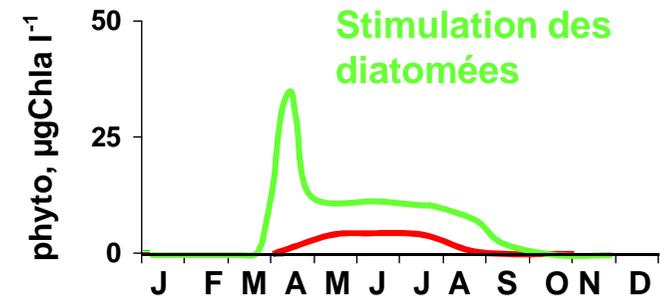
Les flagellés poussent ensuite en utilisant l'azote recyclé (production de régénération) (la Si n'est recyclée que bcp plus lentement)



Rivière pristine:

Plus d'apport de silice que d'azote

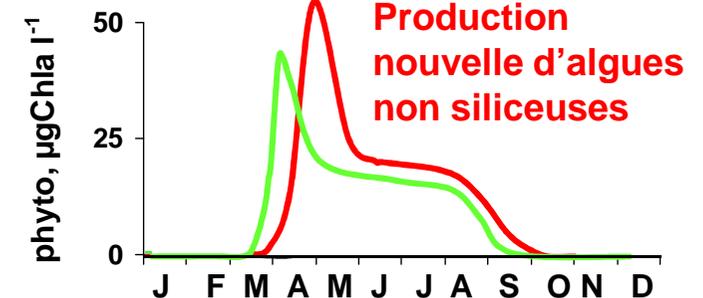
Les diatomées sont stimulées, au bénéfice de la richesse halieutique



Rivières anthropisées:

Plus d'apports d'azote que de silice

Les micro-et macro-algues non siliceuses sont favorisées, avec des effets indésirables

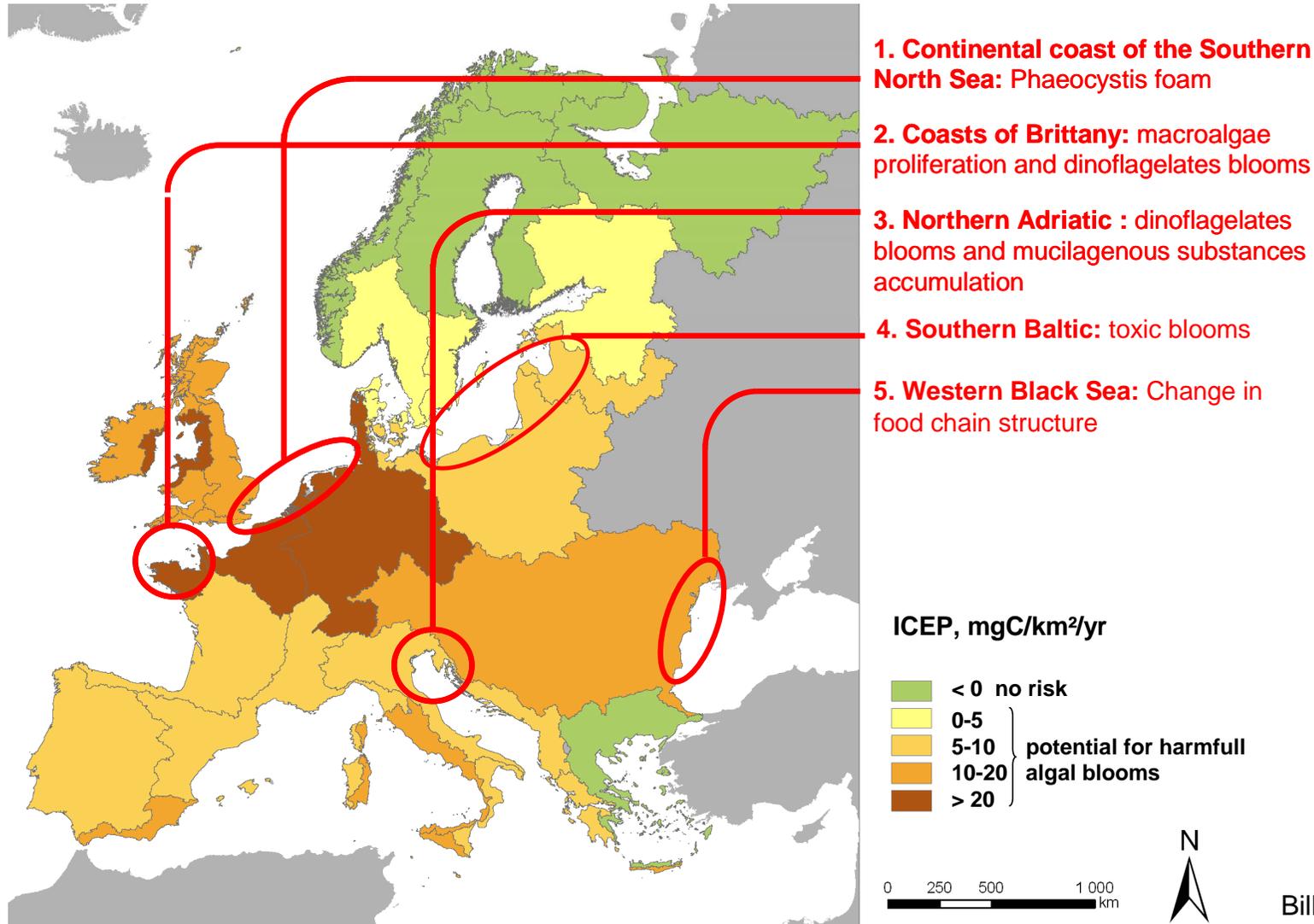


ICEP: Indicateur du potentiel d'eutrophisation côtière

Flux d'azote délivré en excès du flux de silice par rapport aux besoins de la croissance des diatomées (rapports de Redfield 106:16:1:20)

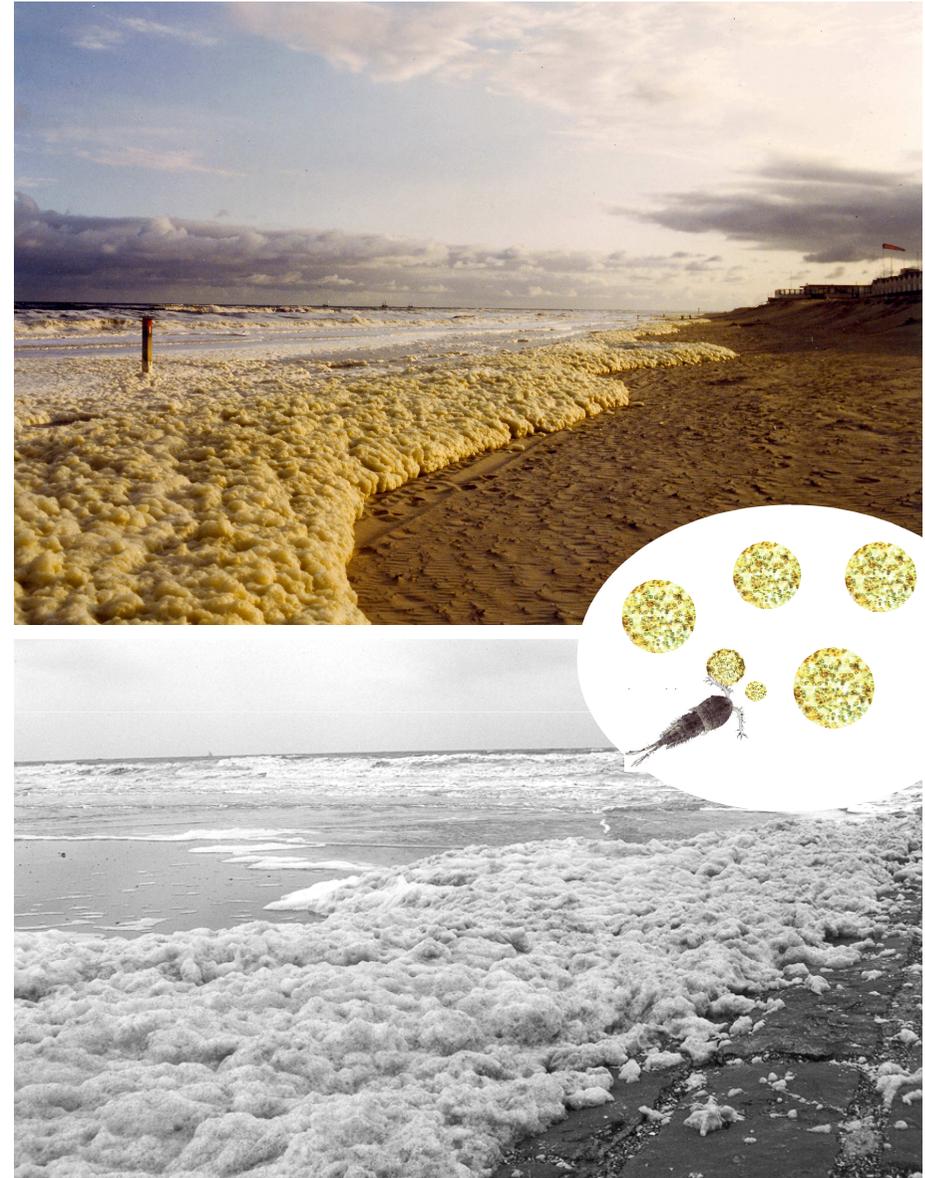
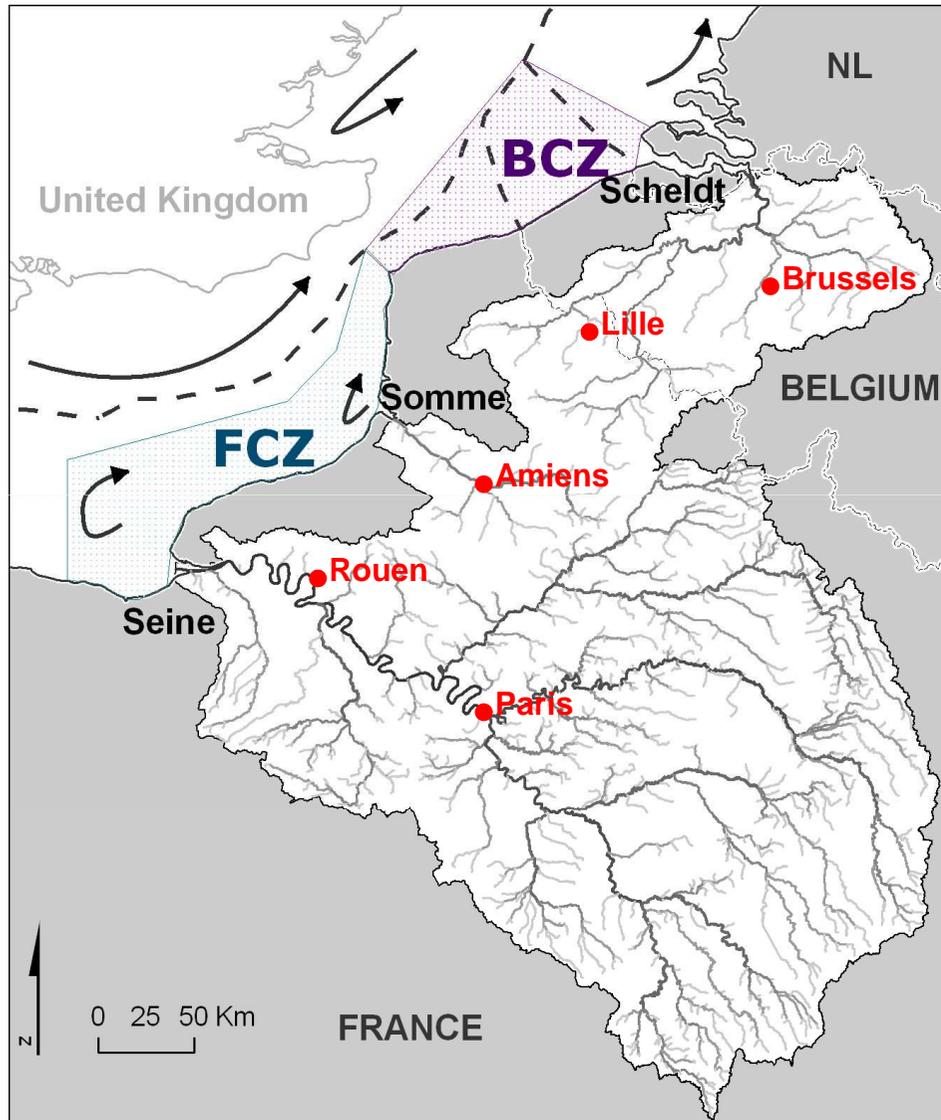
$$\text{ICEP} = [12 \cdot 10^6 \cdot (\text{Nflx}/16 - \text{Siflx}/20)] / \text{SBV} \quad (\text{en kgC}/\text{km}^2/\text{jour})$$

Billen & Garnier, Mar Chem (2007).



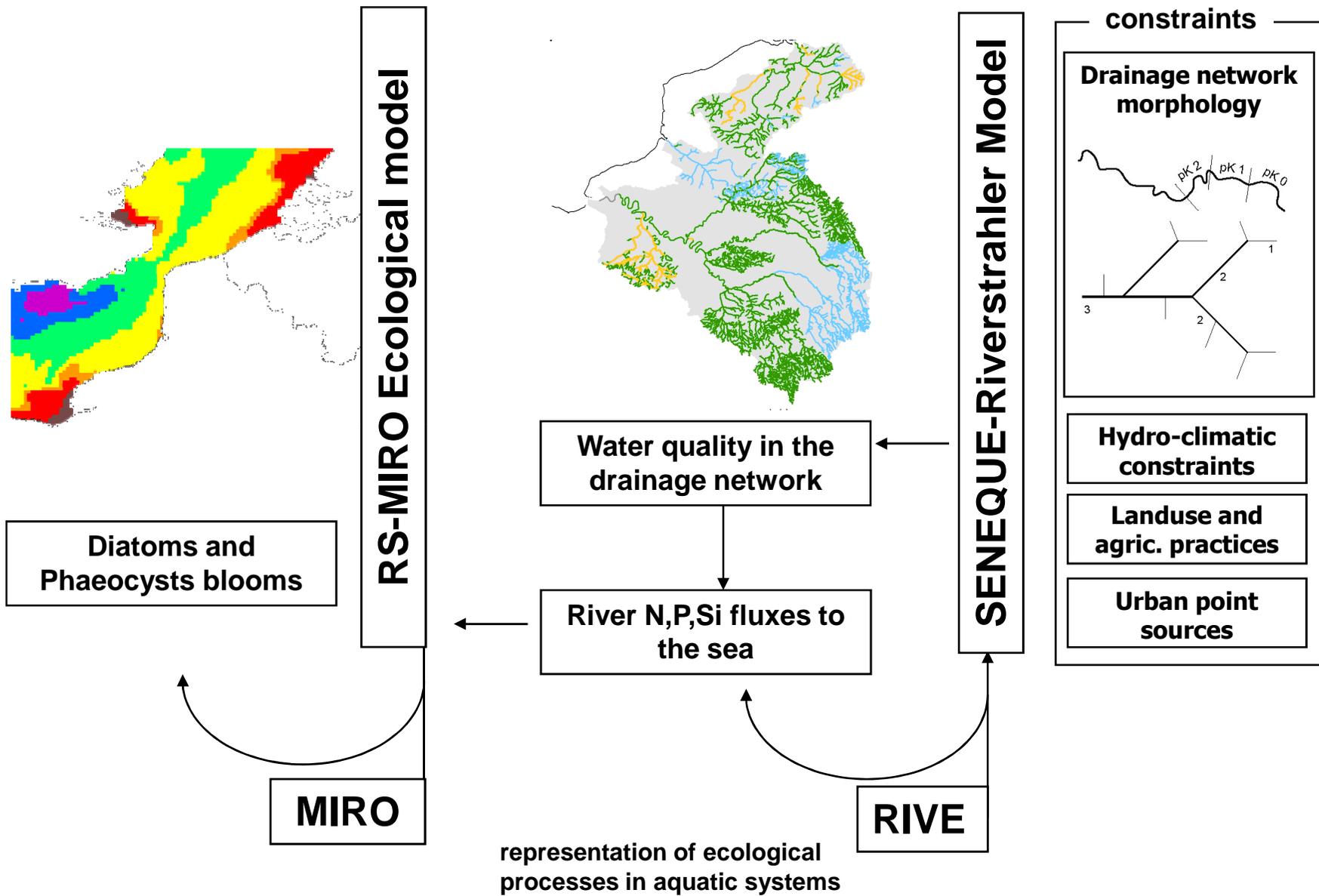
Billen et al (2011), ENA)

L'exemple du sud de la Mer du Nord

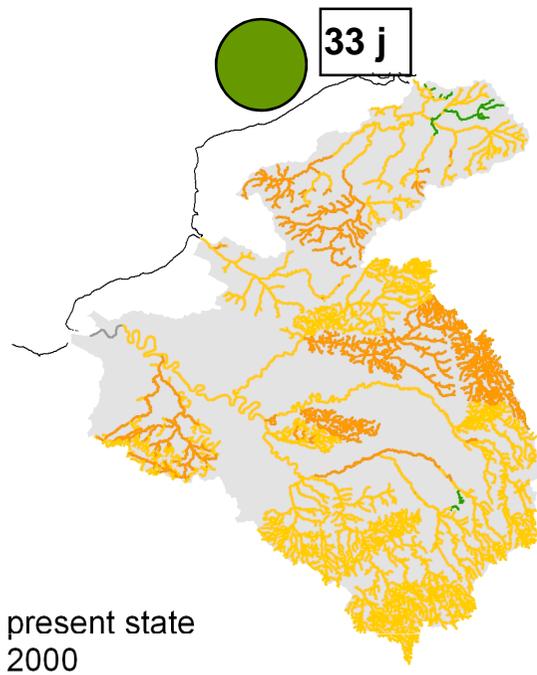


Prolifération d'un flagellé colonial (*Phaeocystis*) non consommable par le zooplancton et conduisant à l'accumulation de mousses.

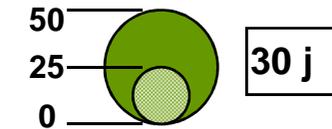
Chaîne de modélisation:



Les 'bonnes pratiques agricoles' ne suffiront pas à résoudre le problème

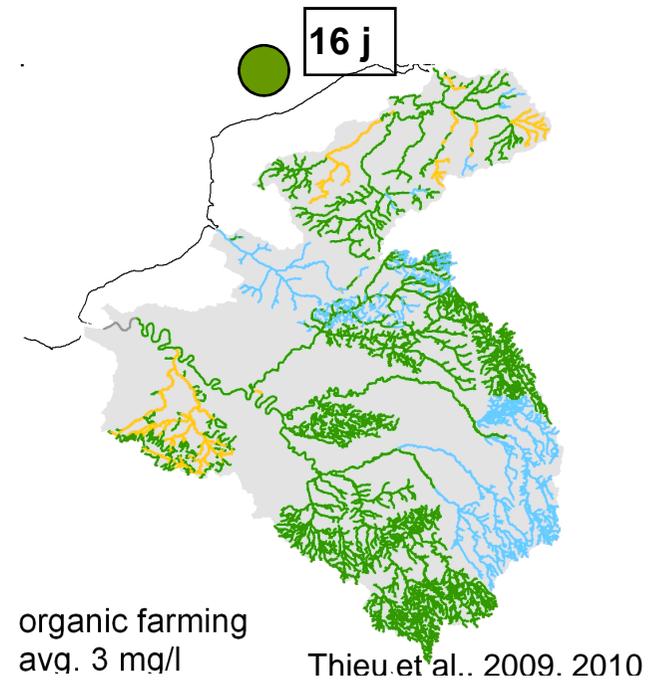
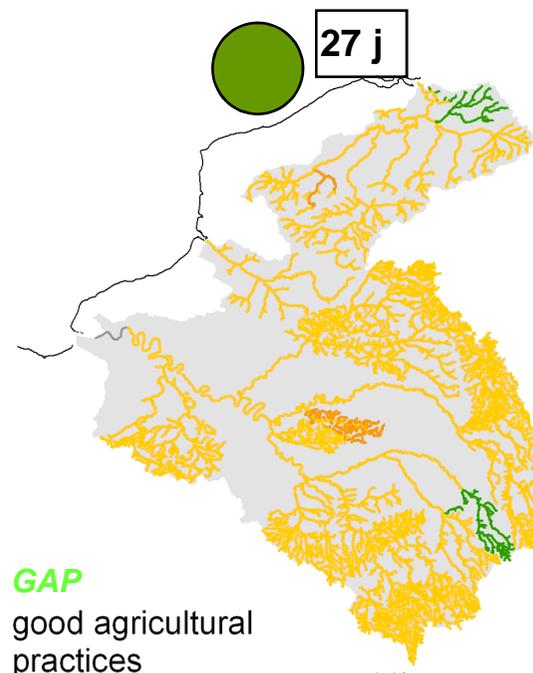
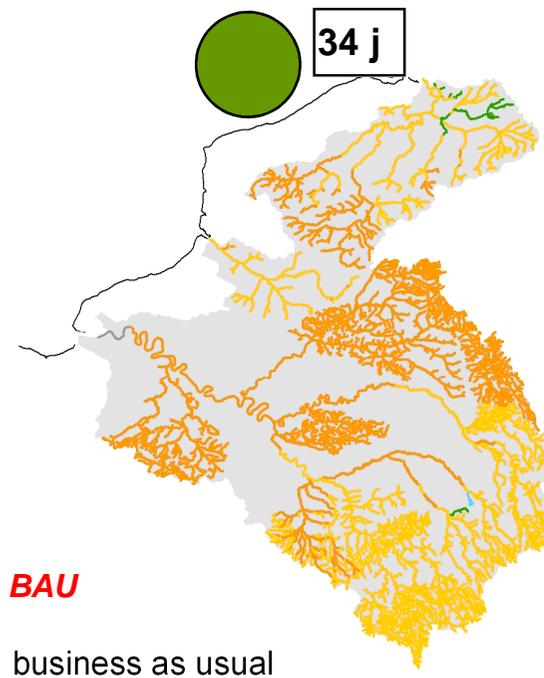
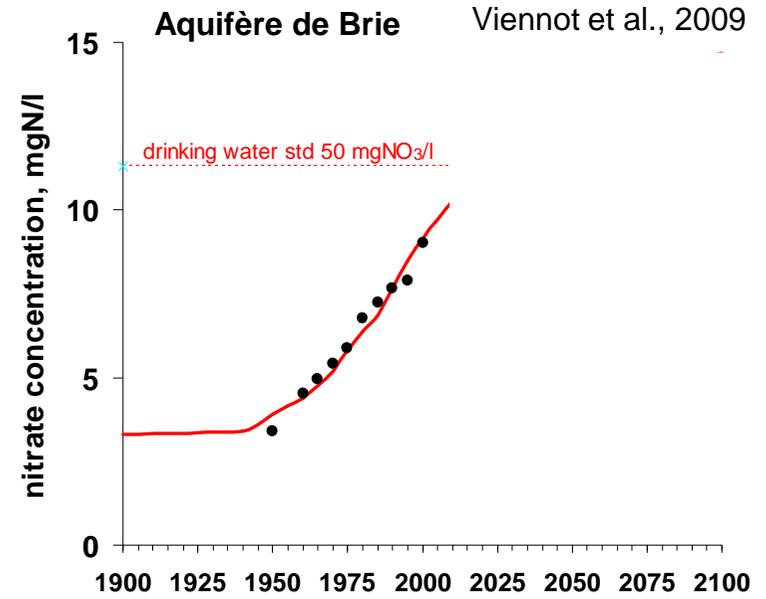


maximum
Phaeocystis
cells, $10^6/L$ durée du
bloom

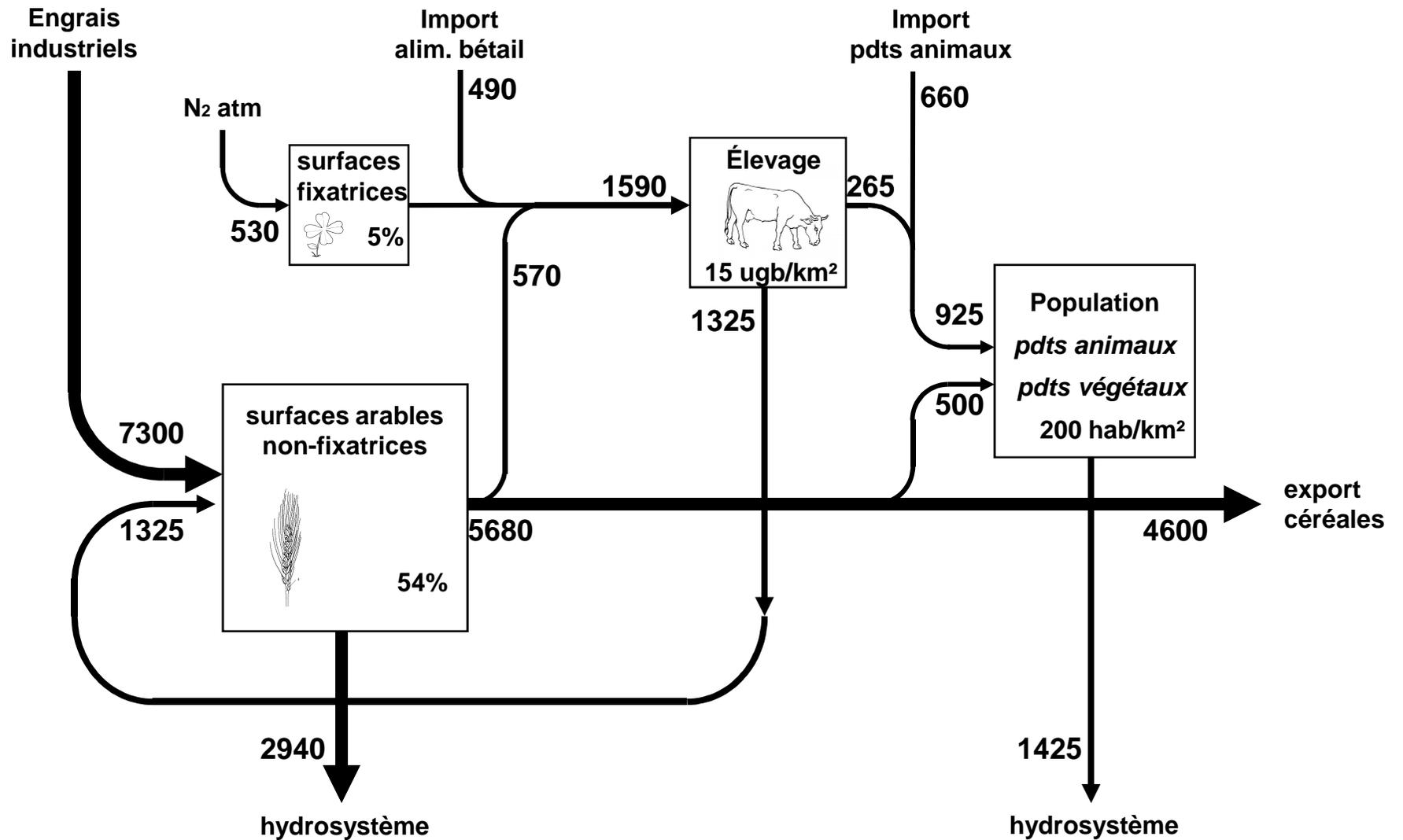


Nitrates, mgN/l

- < 0.5
- 0.5 - 2.5
- 2.5 - 6
- > 6

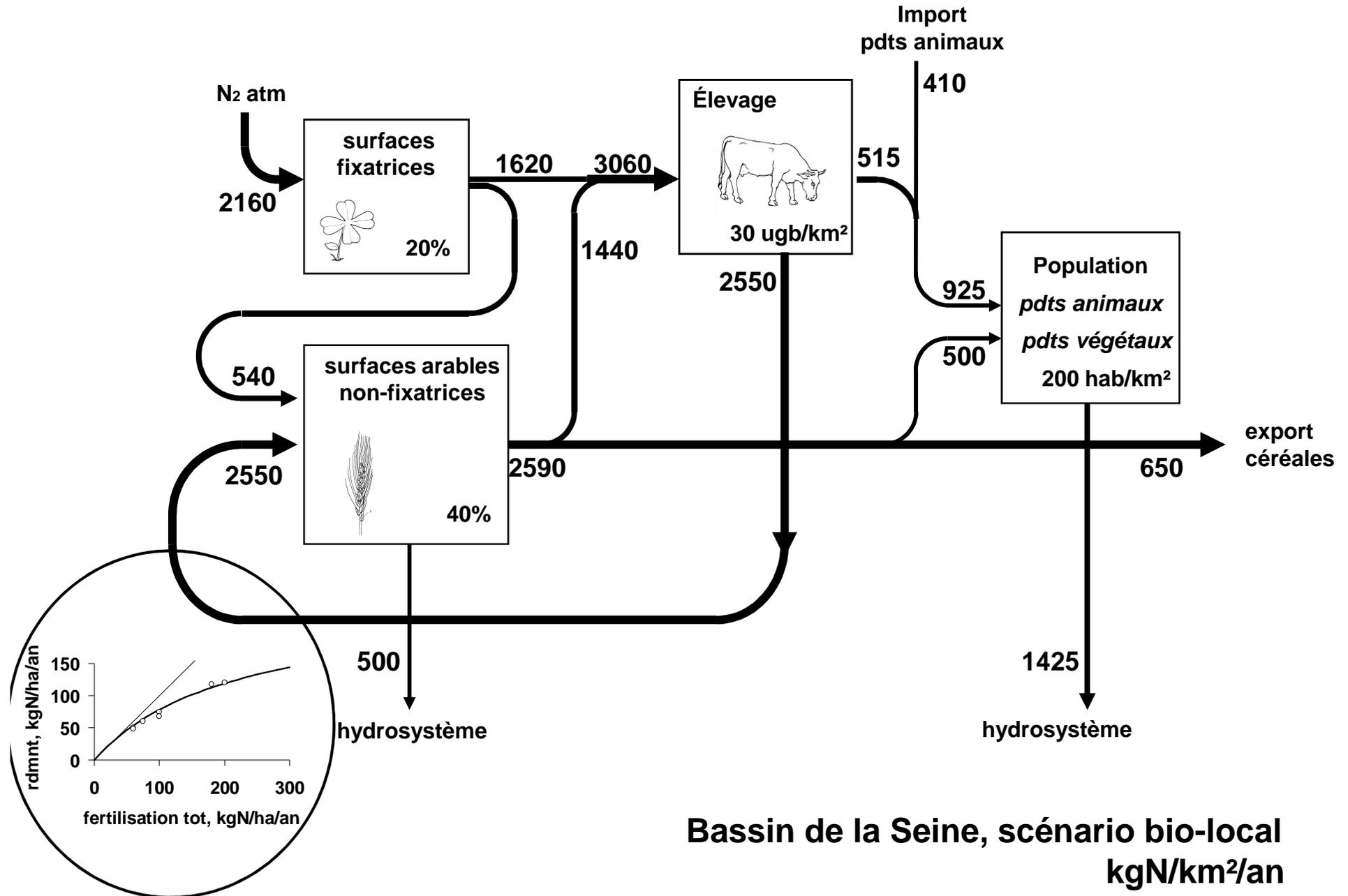


Construction d'un scénario 'tout bio': Le cycle de l'azote dans la situation actuelle



Bassin de la Seine, 2005
kgN/km²/an

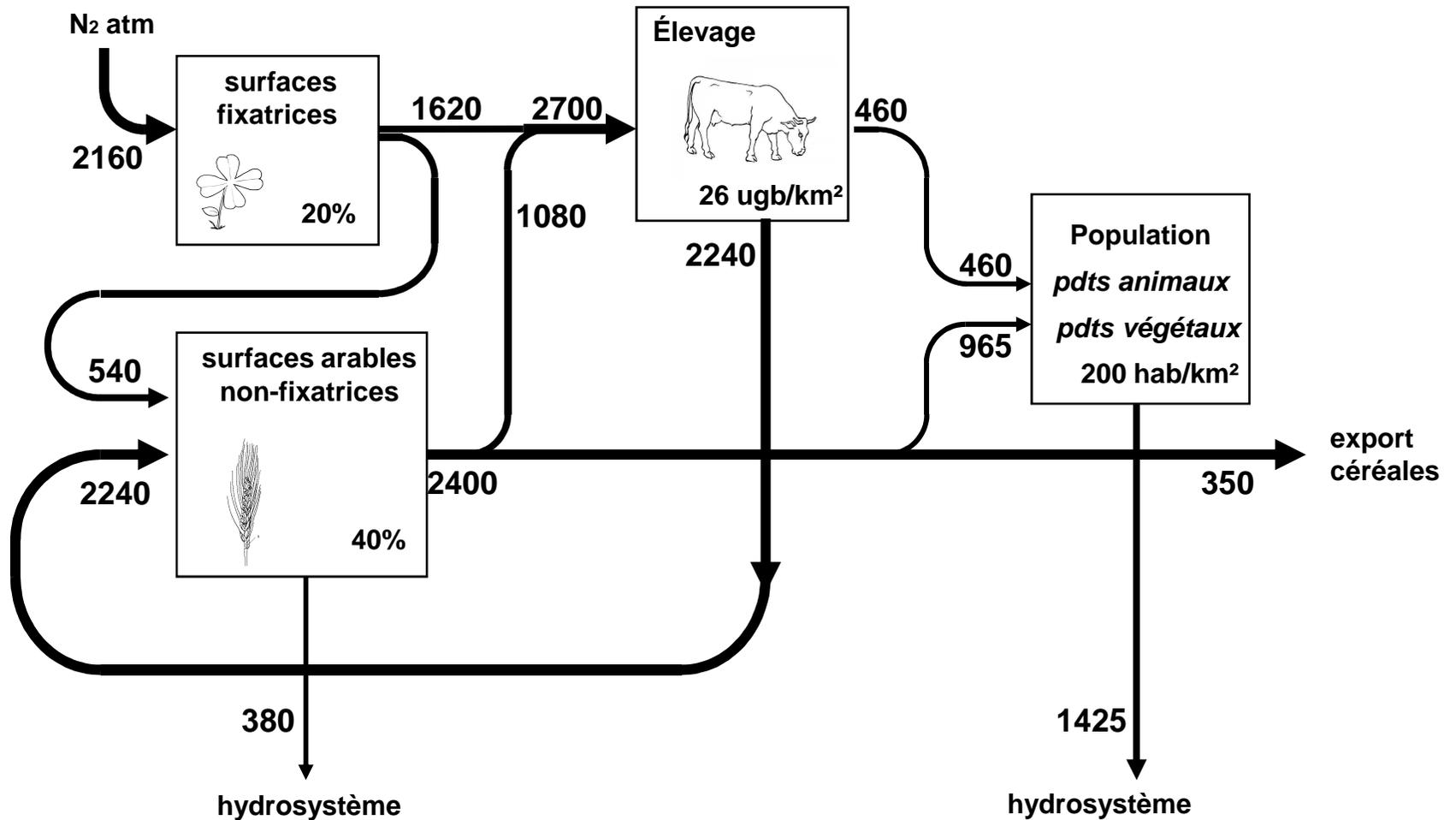
Le cycle de l'azote dans un scénario bio



Bassin de la Seine, scénario bio-local
kgN/km²/an

Le cycle de l'azote dans un scénario bio et «demitarien» (Déclaration de Barsac)

<http://www.nine-esf.org/barsac-declaration>



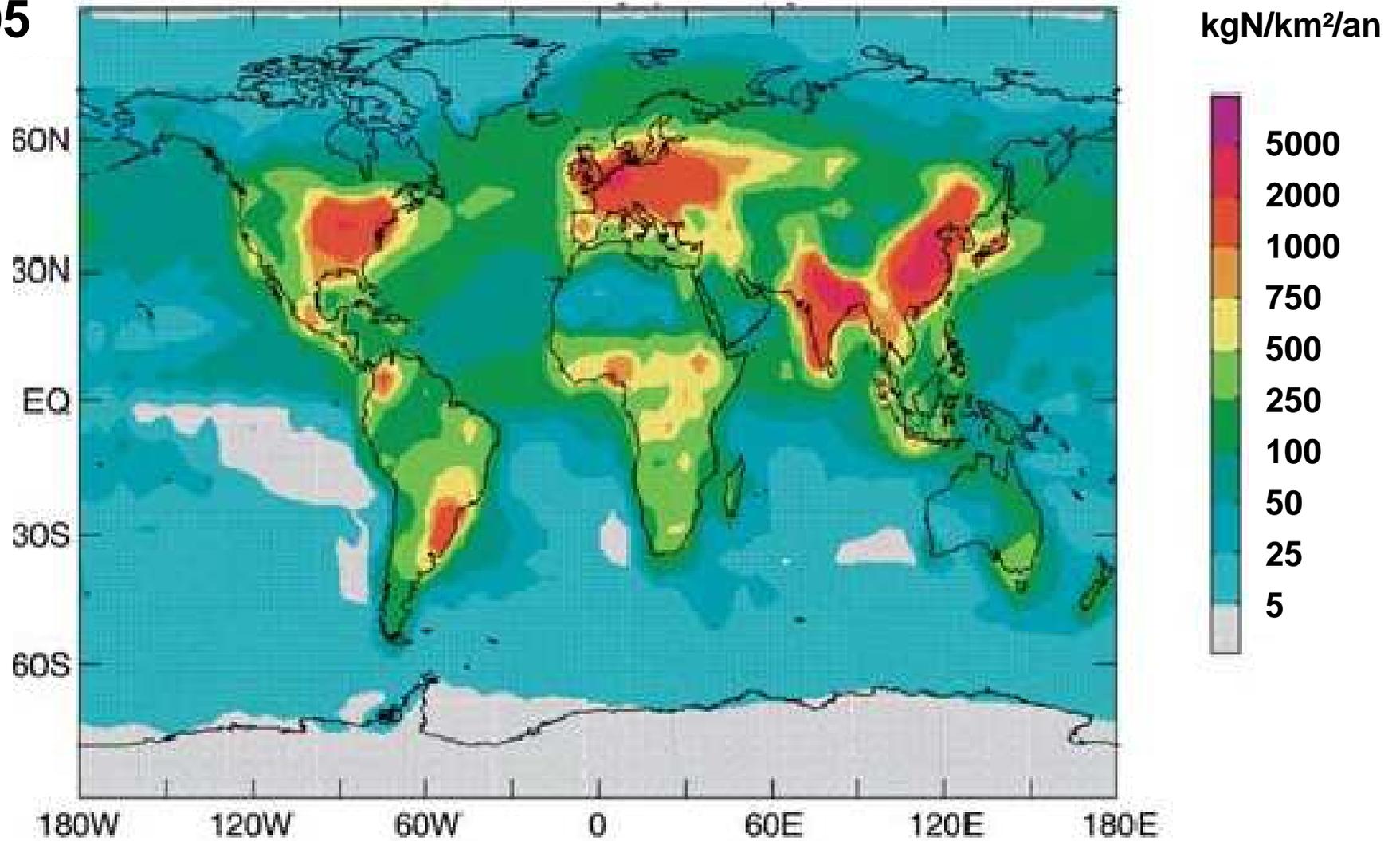
Bassin de la Seine, scénario bio-local-demitarien
kgN/km²/an

3. Mobilité atmosphérique de l'azote réactif



Redéposition atmosphérique d'azote réactif

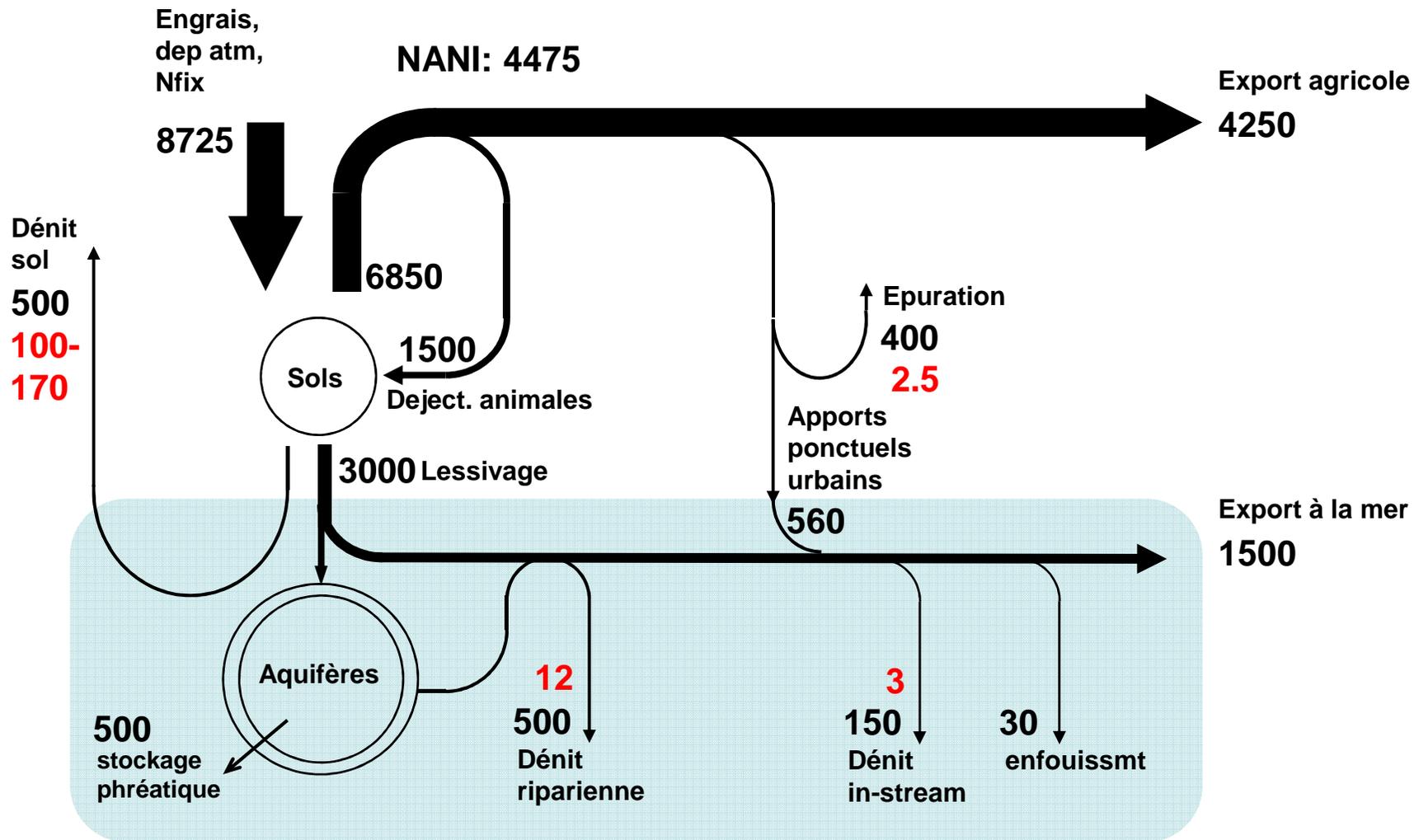
1995



Bilan des émissions de N₂O du bassin de la Seine

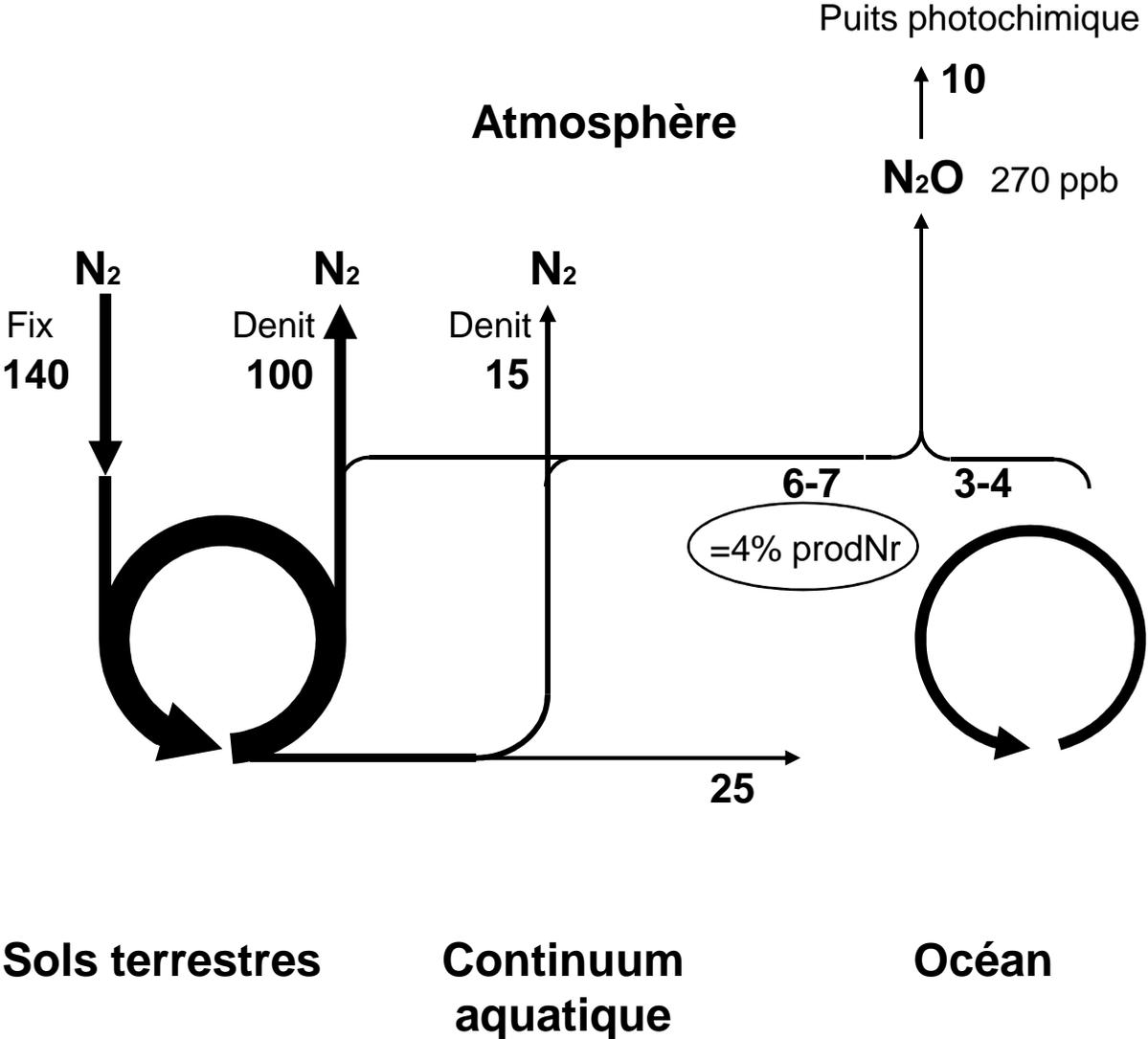
Situation hydrologique moyenne
en kgN/km²/an

Émissions de N₂O, = 2.5 - 4% NANI
en kgN/km²/an
(Garnier et al, 2009)



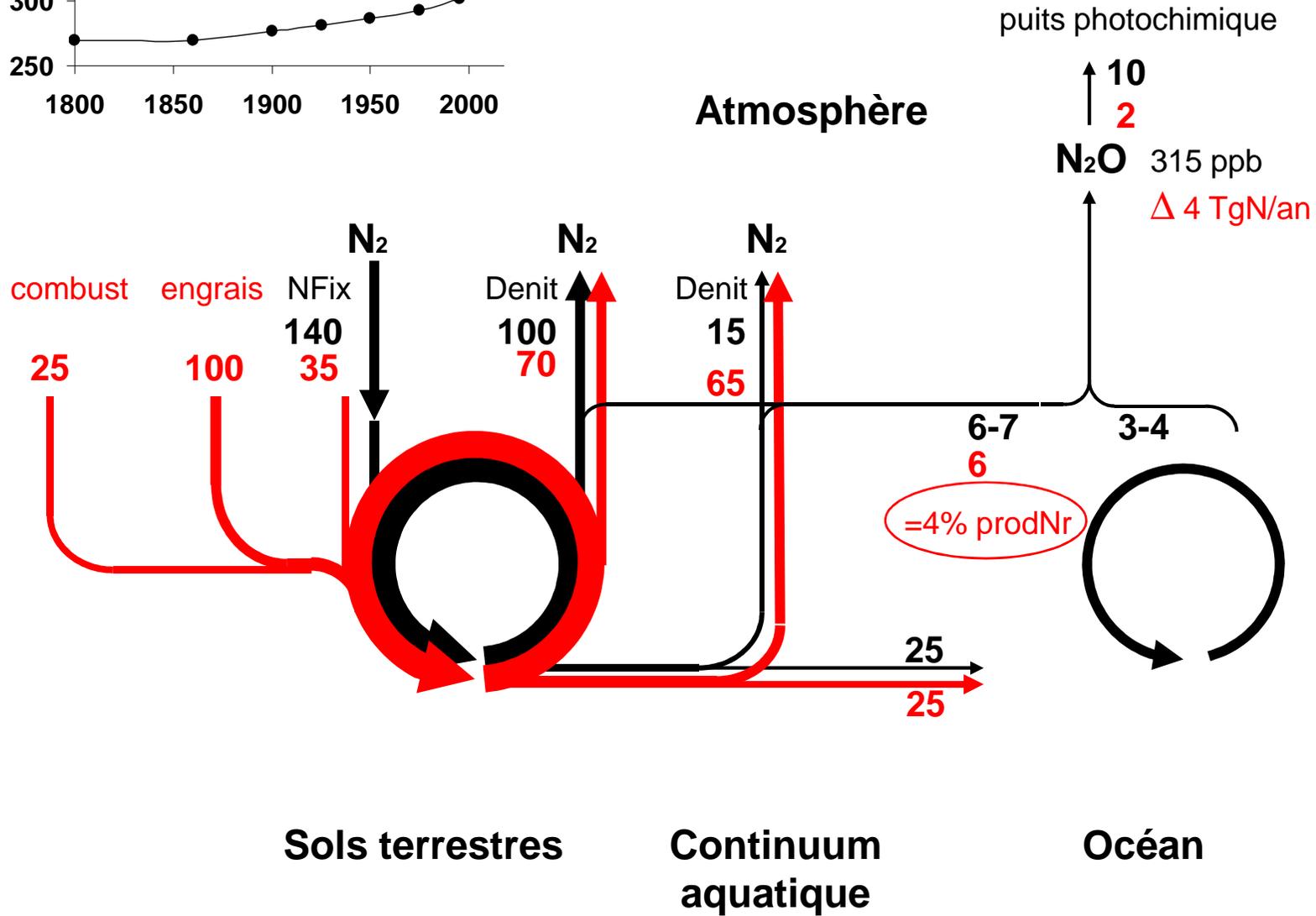
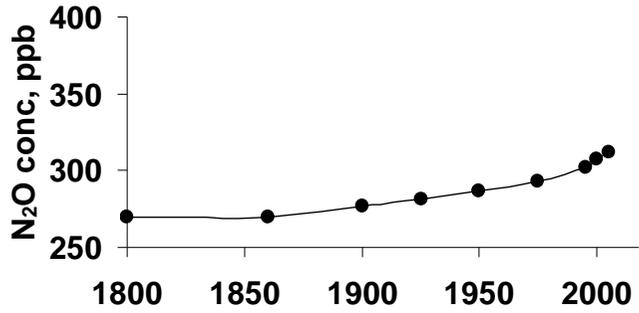
Situation mondiale pré-industrielle, en TgN/an

Adapté de Crutzen et al, 2008



Situation mondiale 2000 , en TgN/an

Adapté de Gruber & Galloway, 2008;
Crutzen et al, 2008;
Seitzinger et al, 2006



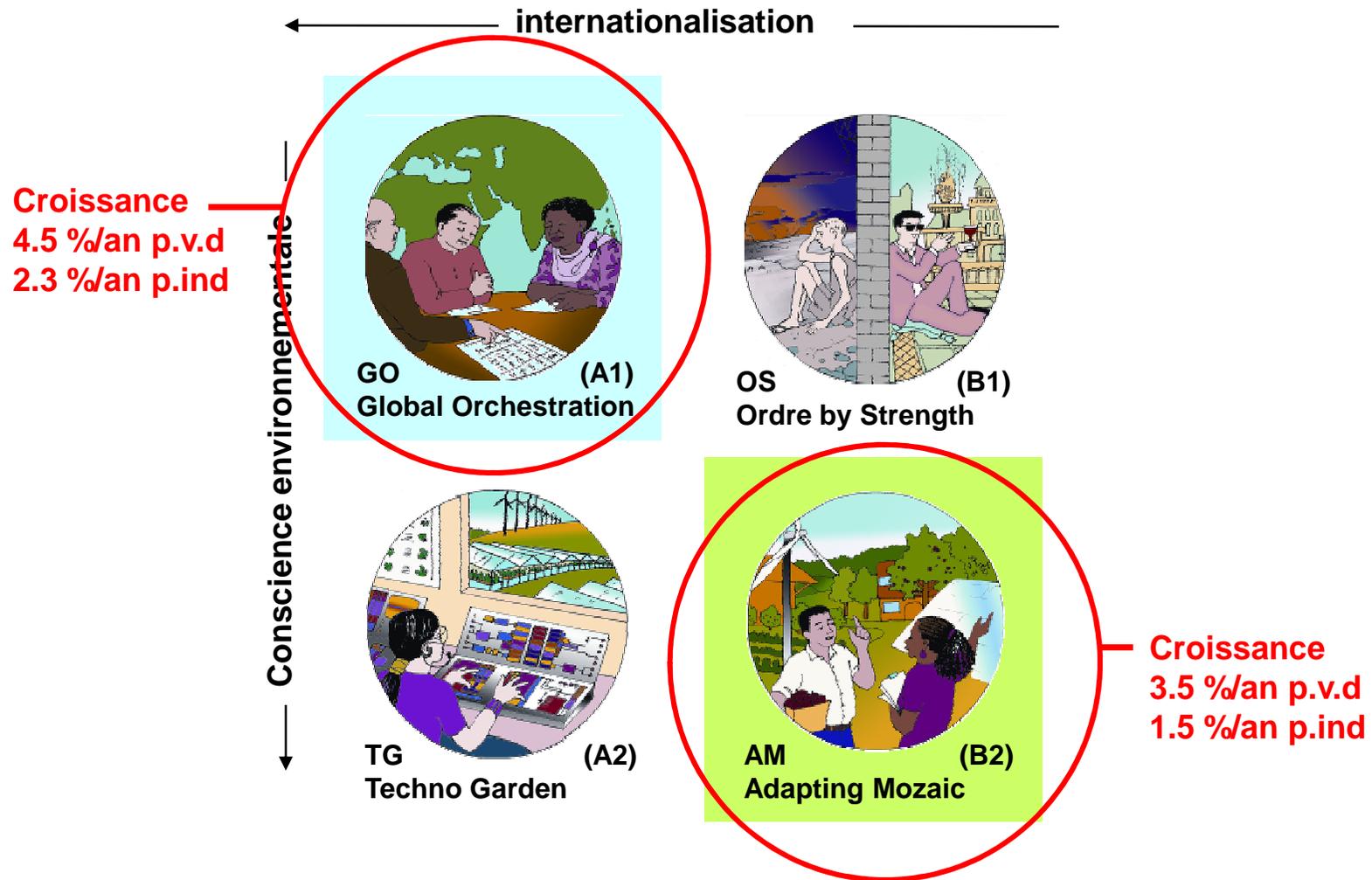
4. Des scénarios prospectifs à l'échelle mondiale



4. Des scénarios prospectifs à l'échelle mondiale

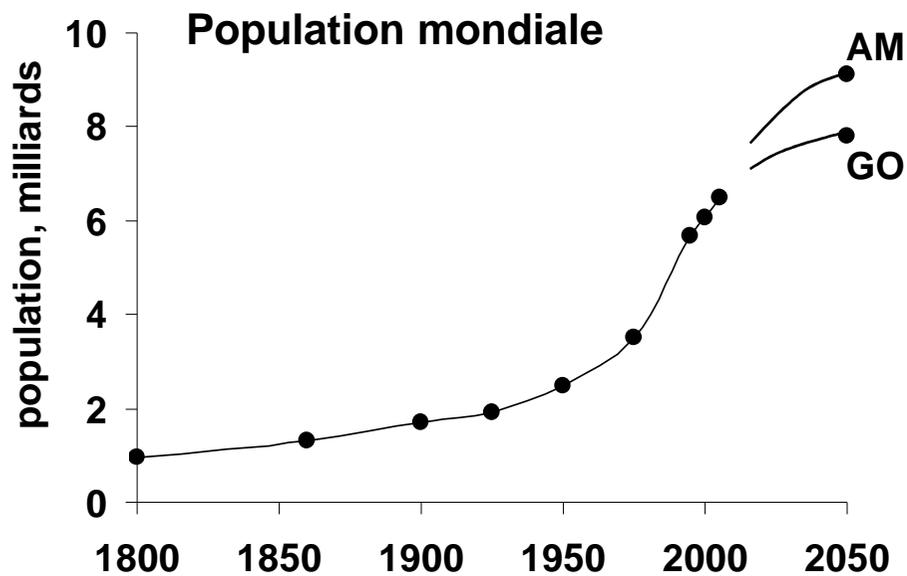
Millenium Ecosystem Assessment:

2 tendances opposées:

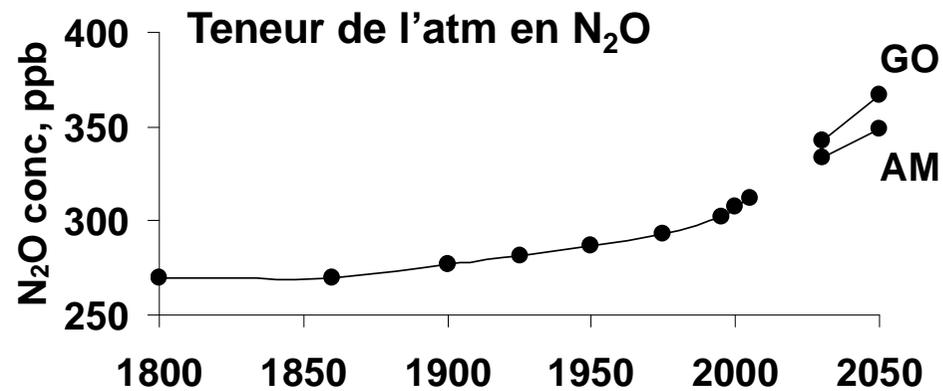
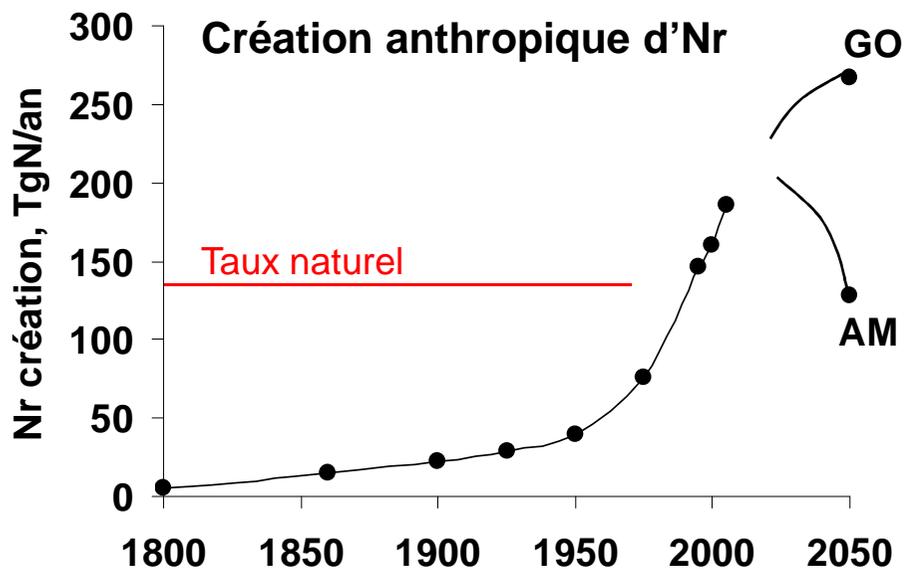
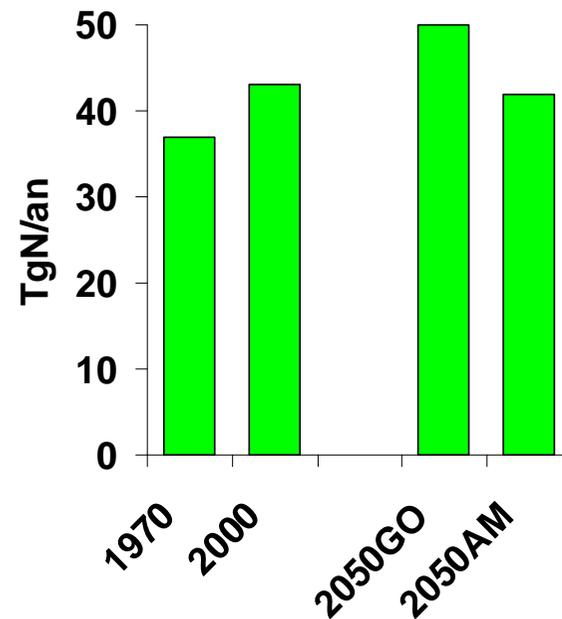


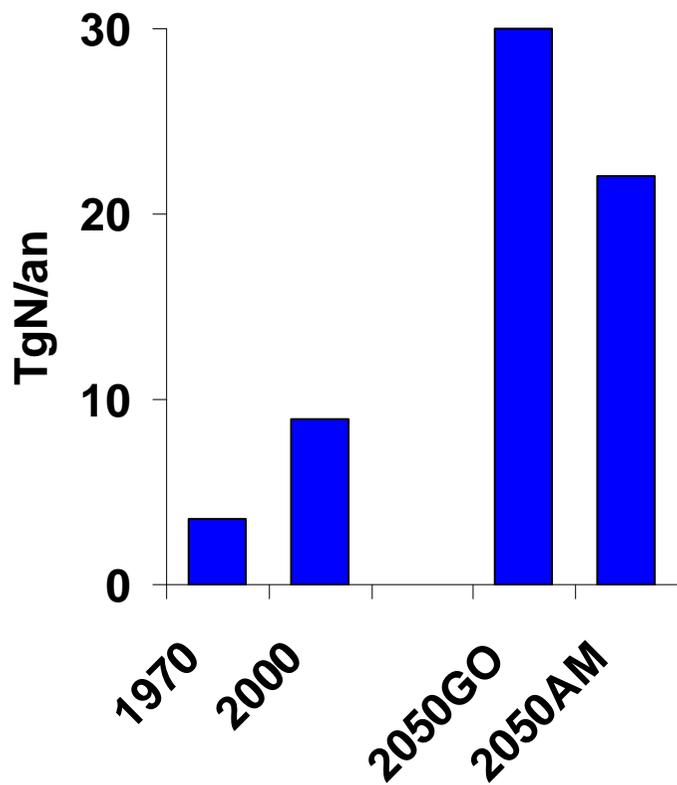
Traduits en termes de flux d'azote par GlobalNEWS (UNESCO, IOC)

(Seitzinger et al, 2009 ; Bouwman et al., 2009 ; Billen et al. 2010)

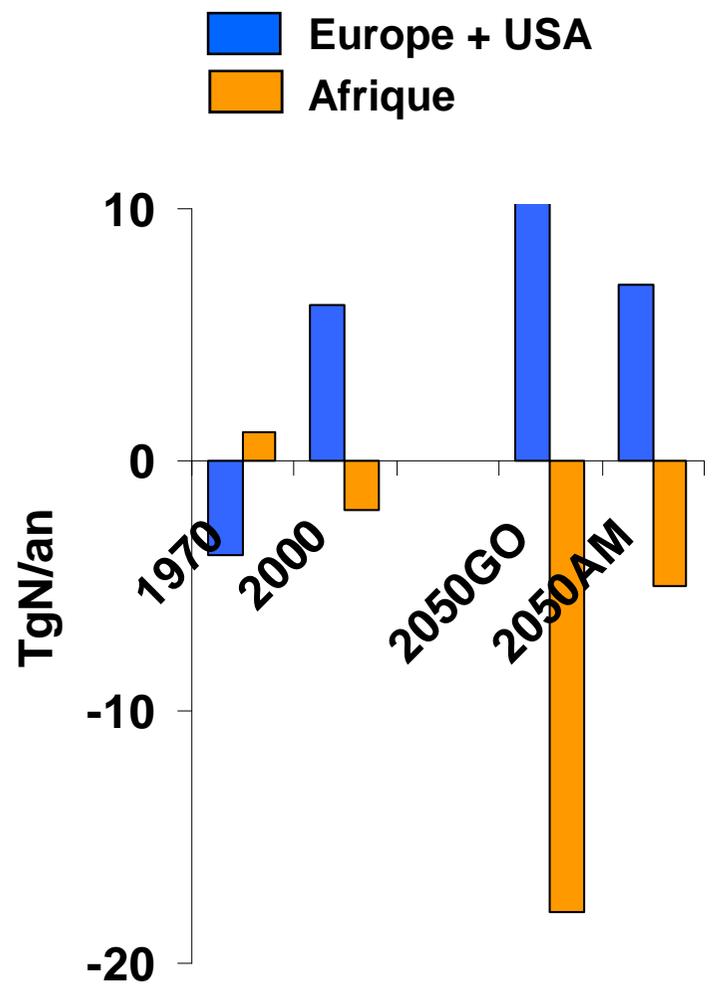


Apport fluvial d'azote à la mer





Commerce international de produits agricoles



Surplus ou déficit agricole

Conclusion

L'ouverture du cycle de l'azote est inscrite dans l'industrialisation de l'agriculture, la spécialisation des territoires et la mondialisation des échanges

Un monde plus recentré localement est possible,... et nécessaire