



La maîtrise des cycles biogéochimiques des  
éléments minéraux en agriculture  
quels enjeux et quels besoins en outils de diagnostic  
et de conseil?

Sylvain Pellerin, INRA Bordeaux

Sylvie Recous, INRA Reims

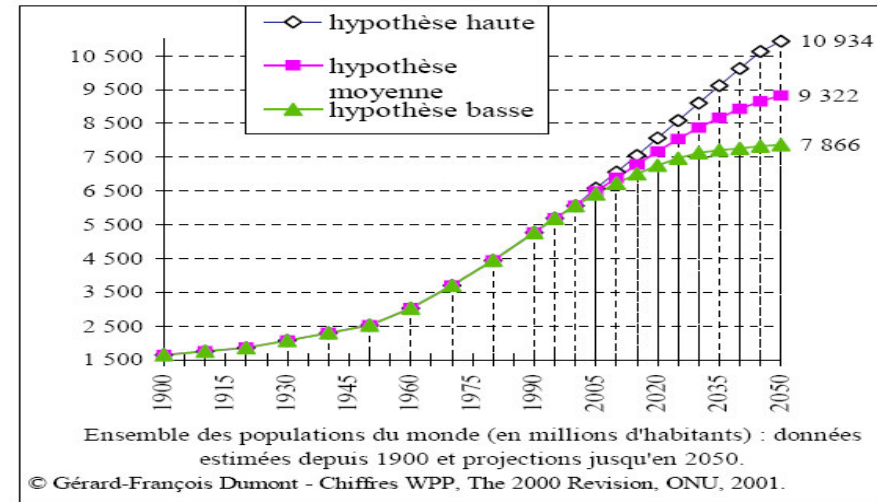
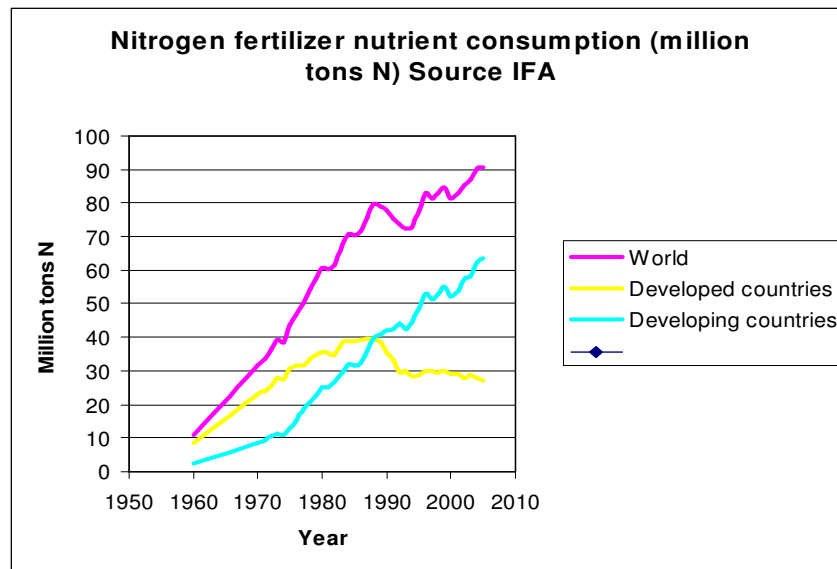
Jean Boiffin, INRA Angers



## Enjeux : Demande alimentaire mondiale et fertilisation



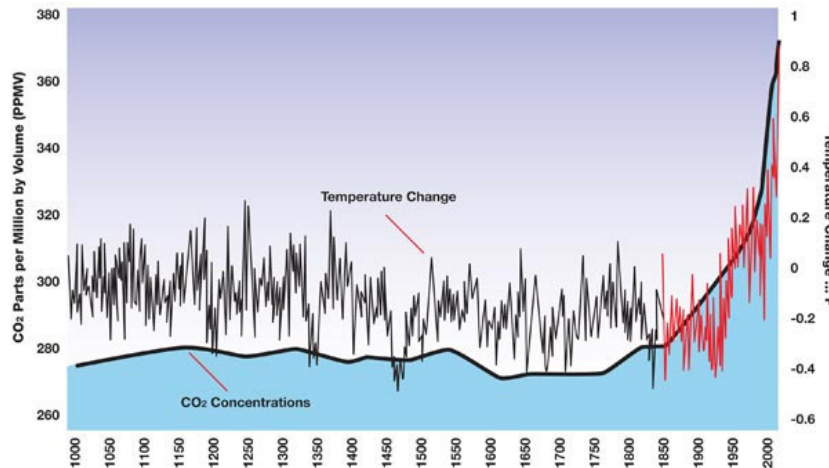
- Une augmentation forte de la population mondiale
- Une accroissement de la demande alimentaire
- Un changement de l'alimentation => élevage ↗



Ces augmentations vont s'accompagner de besoins élevés en nutriments/fertilisants.

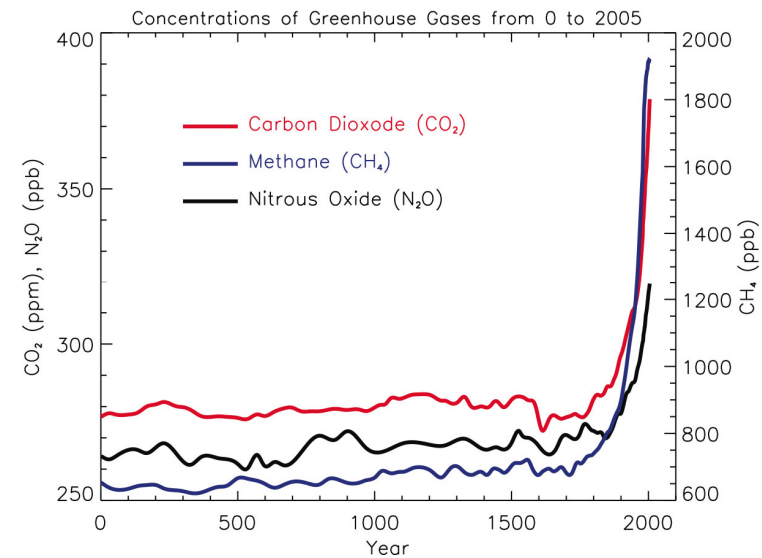


# Enjeux : Changements climatiques et émissions de Gaz à effet de serre (GES)



- Les émissions d'oxydes d'azote (N<sub>2</sub>O) et le méthane (CH<sub>4</sub>), participent à l'effet de serre .

- L'augmentation de la température est associée à une augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique et autres gaz à effet de serre



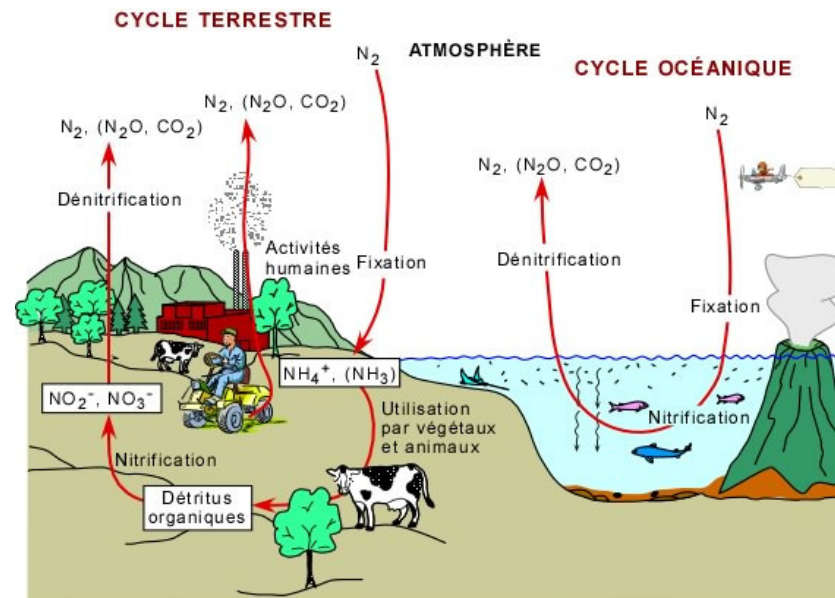


# Echelles d'espace et de temps - niveau d'organisation considéré



## I. Echelle planétaire, temps longs (décennies, siècles,...)

ex: cycle planétaire de l'azote



### Niveau d'organisation pertinent pour

- ⇒ l'analyse des stocks et des flux entre les principaux compartiments du globe et nature des processus
- ⇒ l'étude des changements globaux dus aux activités humaines (ex: évolution de la teneur en  $N_2O$  de l'atmosphère)
- ⇒ l'examen de la durabilité de la ressource (ex des gisements de P)

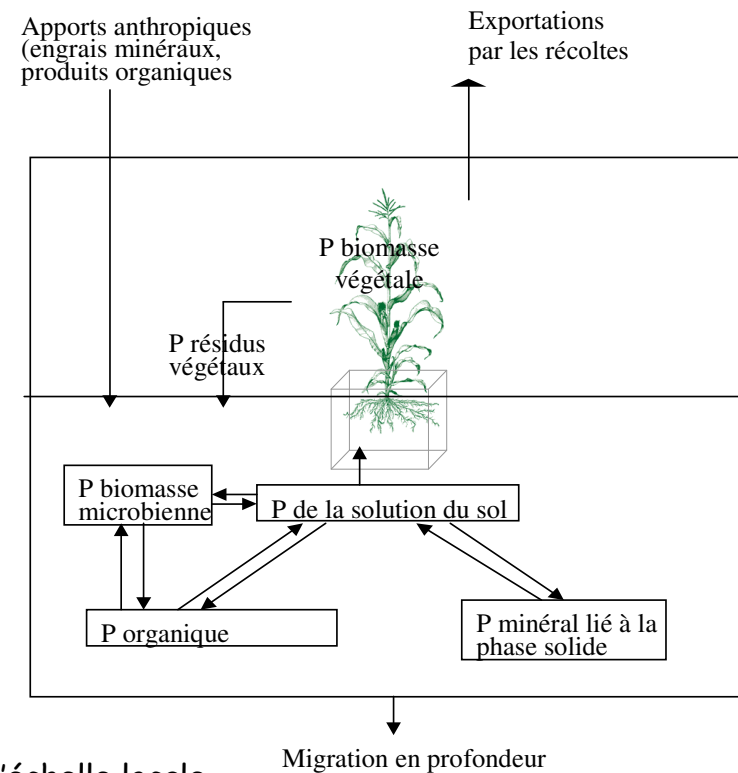


# Echelles d'espace et de temps - niveau d'organisation considéré



## II. Echelle locale, temps de l'ordre du mois, de l'année

Ex: le cycle local du P



### Niveau d'organisation pertinent pour

- ⇒ L'étude des compartiments et des flux à l'échelle locale,
- ⇒ L'identification de la nature et la quantification des processus à l'origine des transformations et des flux, l'identification des variables influant sur ces processus, etc...



# Echelles d'espace et de temps - niveau d'organisation considéré



## III. Niveaux d'organisation intermédiaires, temps de l'ordre de l'année, la décennie

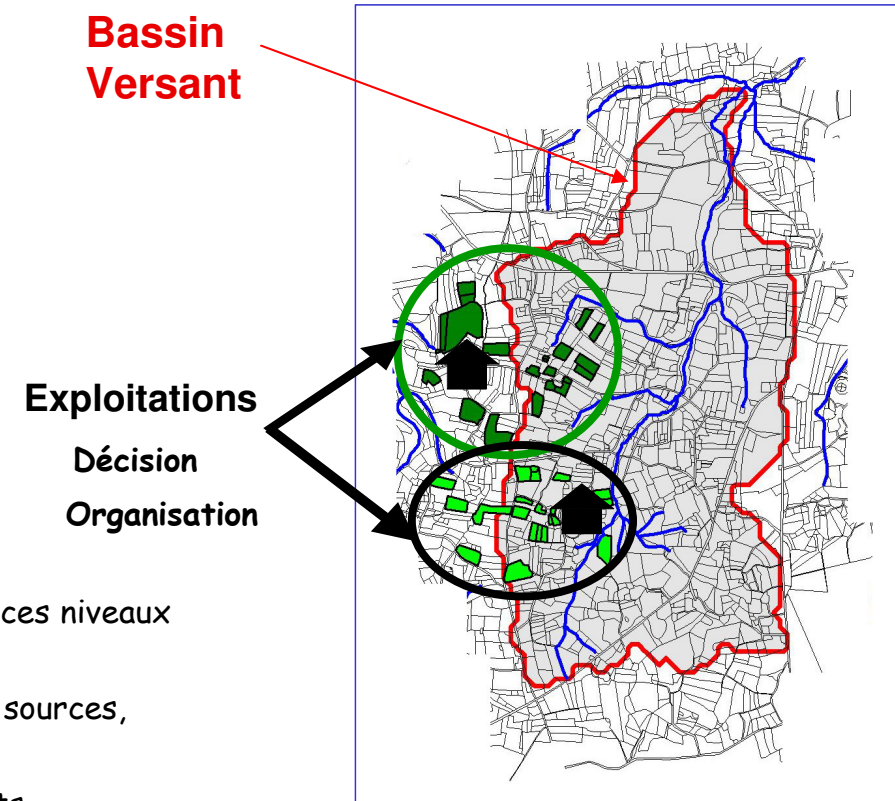
Exemples:

⇒ **le bassin hydrologique**: unité de fonctionnement hydrologique

⇒ **l'exploitation agricole**: ensemble de parcelles et d'ateliers de production, et unité de décision

### Niveaux d'organisation pertinents pour

- ⇒ l'évaluation des flux d'entrée/sortie, calculs de bilans à ces niveaux d'organisation
- ⇒ la spatialisation des stocks et des flux (localisation des sources, identification des voies de transfert,...)
- ⇒ l'étude des relations entre pratiques agricoles et impacts



D'après Merot P.



# Objectifs



## Objectifs de l'exposé :

Introduire une réflexion sur les démarches à mettre en œuvre permettant une gestion des cycles biogéochimiques des éléments minéraux en agriculture conciliant production agricole et protection de l'environnement

## Etapas de l'exposé

- ⇒ Partir d'une analyse du cycle à différentes échelles (en s'appuyant sur l'exemple du N et du P)
- ⇒ Identifier les "segments critiques" du cycle, limitant de la production agricole et/ou générateurs de "fuites" vers l'environnement; identifier comment l'agriculture intervient et à quelles échelles se produisent les processus sous-jacents à ces « segments critiques »
- ⇒ Se poser la question de savoir si l'on dispose à ces échelles des outils d'alerte, de diagnostic et de maîtrise appropriés pour gérer ces segments critiques



---

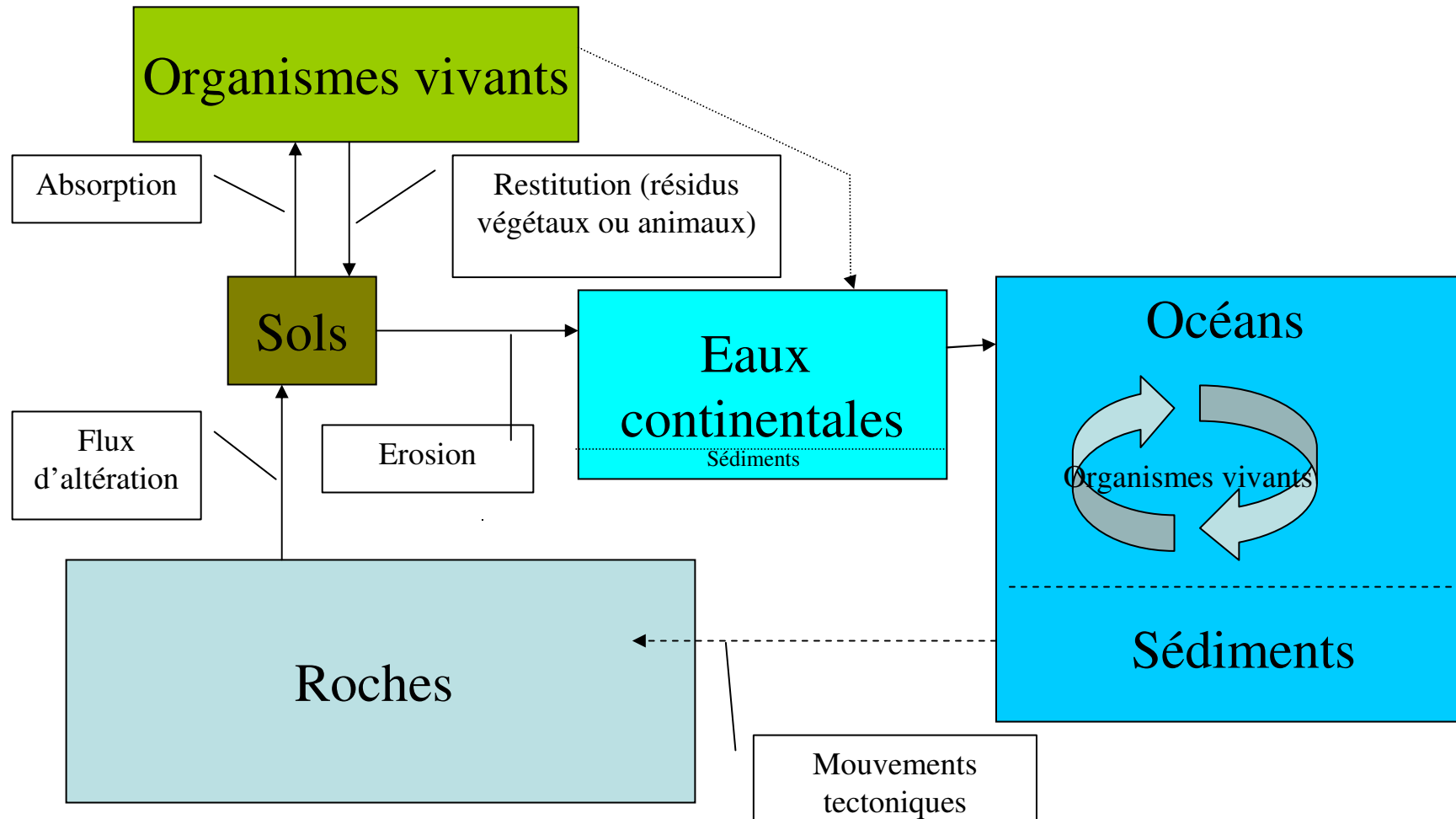
## Le cas du Phosphore

---



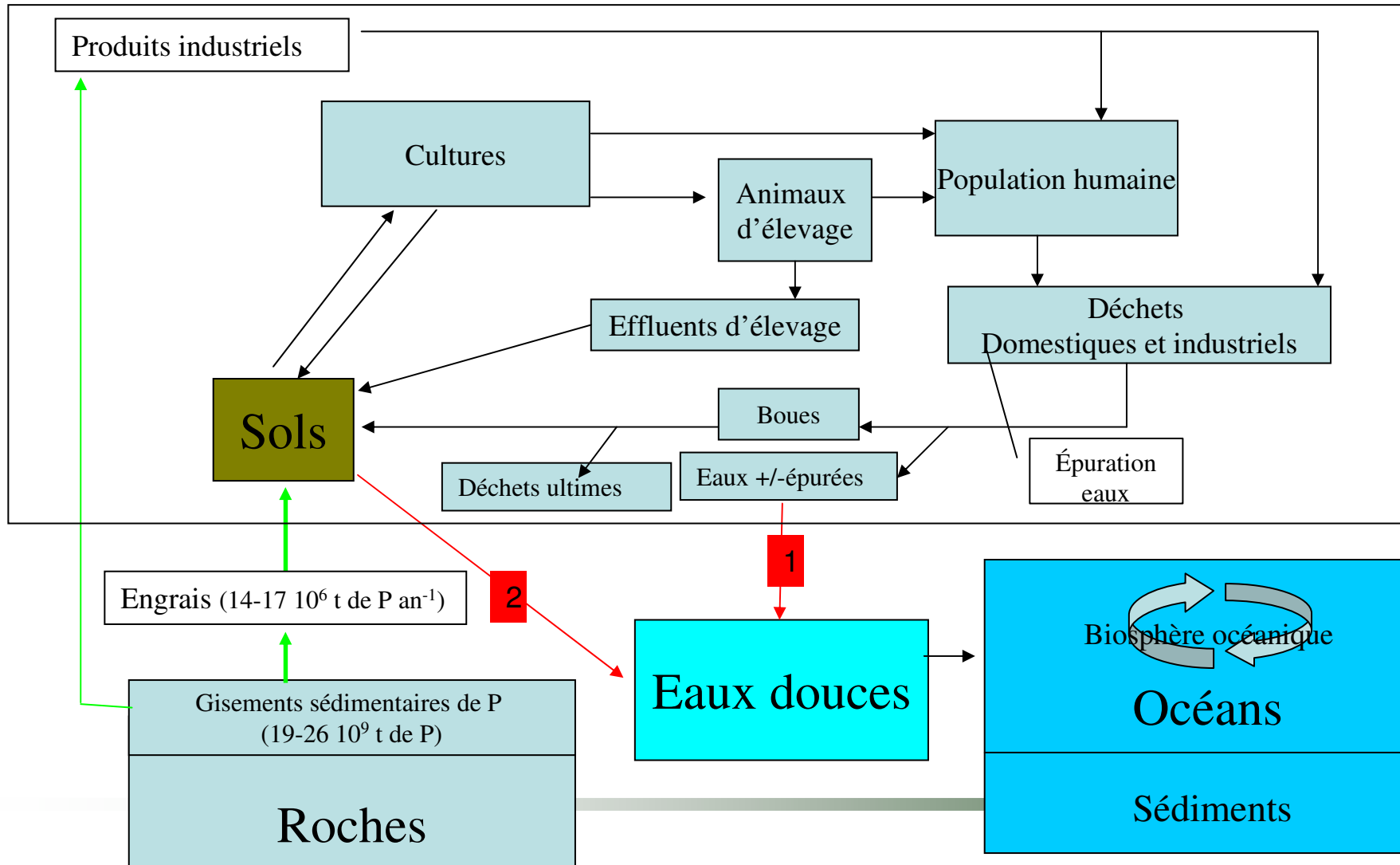


# Cycle planétaire du phosphore avant l'intervention de l'homme



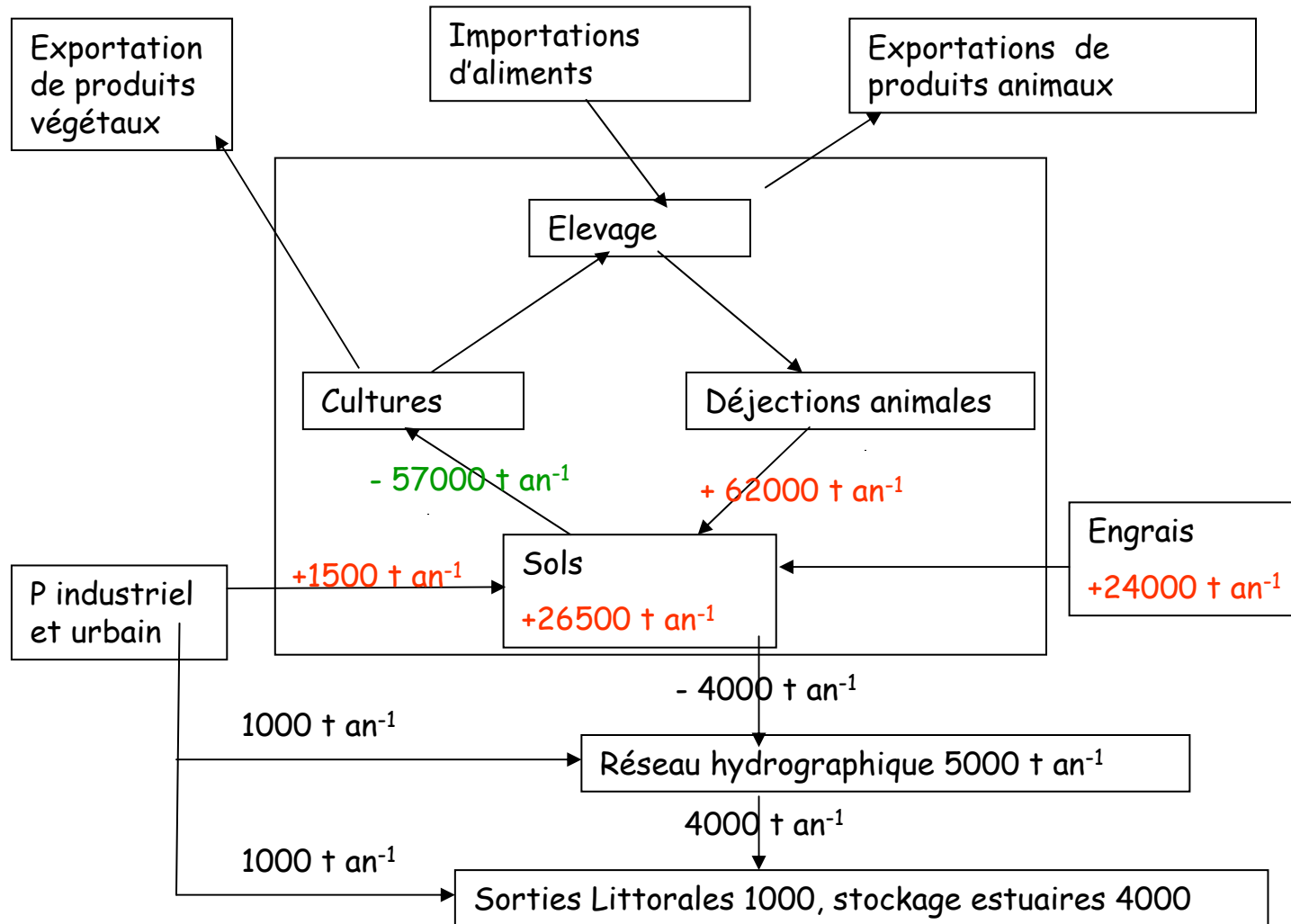


# Cycle planétaire du phosphore résultant de l'intervention de l'homme





# Exemple d'une région en situation d'excédent: Bilan P de « l'écosystème » agricole breton (en t de P an<sup>-1</sup>; chiffres 2000)



D'après Arousseau, 2001



## Modes et voies de transfert de P des parcelles agricoles vers le réseau hydrographique

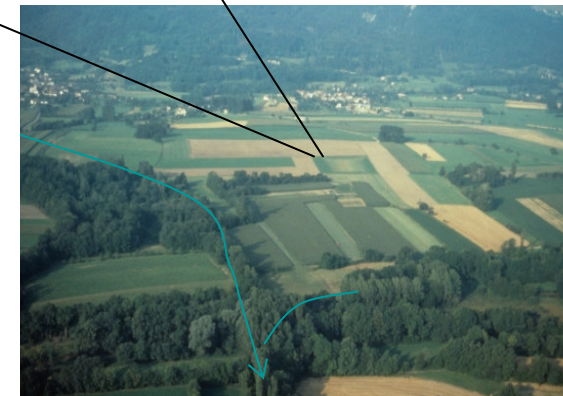


⇒ Du fait de la faible solubilité de l'ion orthophosphate le transfert de P des parcelles agricoles vers les eaux se fait surtout par **entraînement particulaire** lors d'épisodes de ruissellement et d'érosion

⇒ Les étapes de mobilisation et de transfert mettent en jeu un **emboîtement de processus** intervenant à des niveaux d'organisation spatiale allant du niveau local au bassin versant

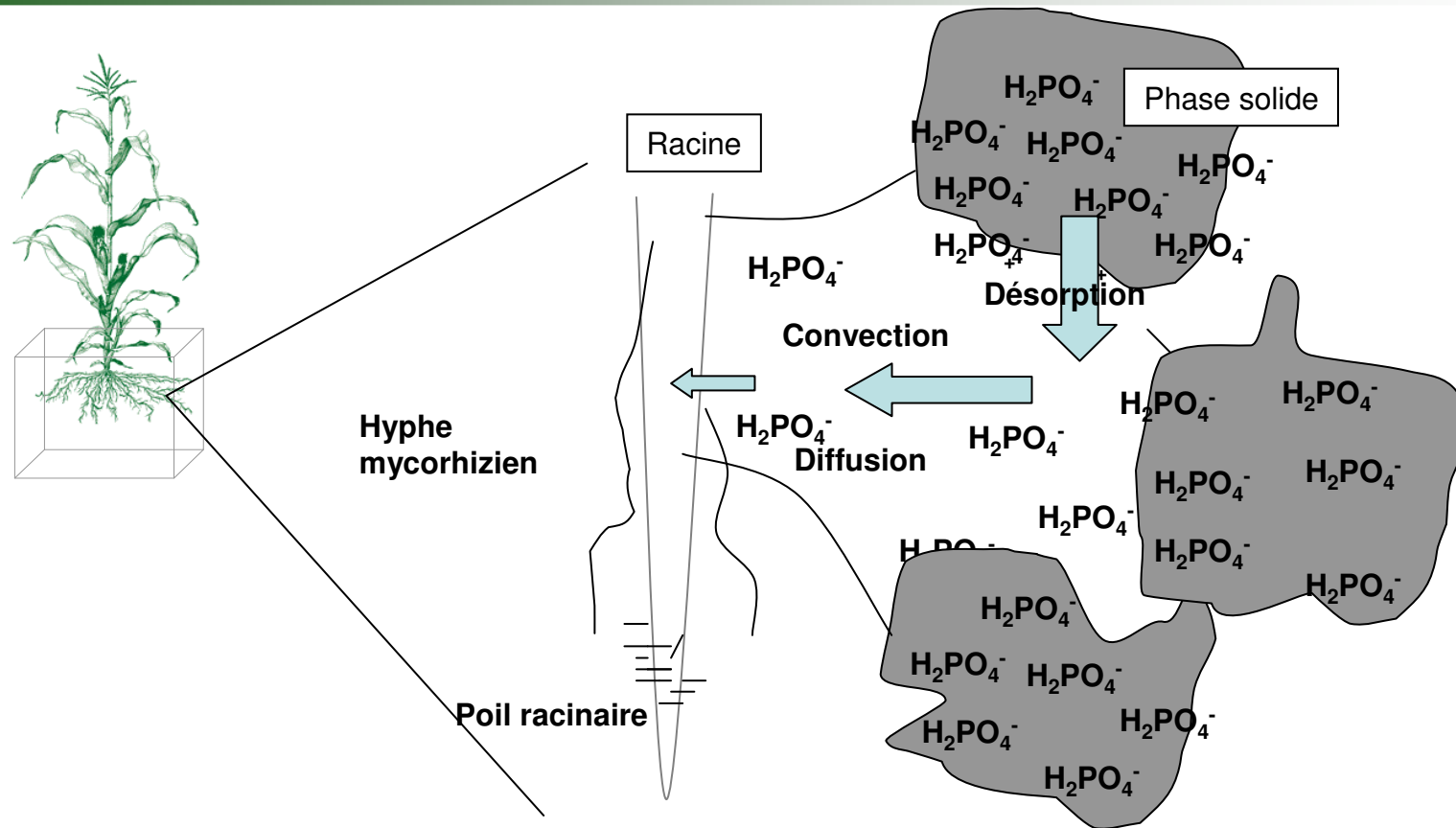
⇒ L'apparition et l'intensité du phénomène dépendent donc

- du fonctionnement des "**sources**", au niveau parcellaire
- mais aussi de la **structure et du fonctionnement du bassin versant hydrologique**





## Modalités d'acquisition du P par les racines des végétaux



⇒ Compte tenu de la faible solubilité et de la faible diffusivité de l'ion orthophosphate dans la solution de sol, l'étape limitante du processus de mobilisation-transport-absorption est généralement **le réapprovisionnement de la surface de la racine par diffusion** sous l'effet du gradient de concentration



## Modalités d'acquisition du P par les racines des végétaux et attendus des apports d'engrais



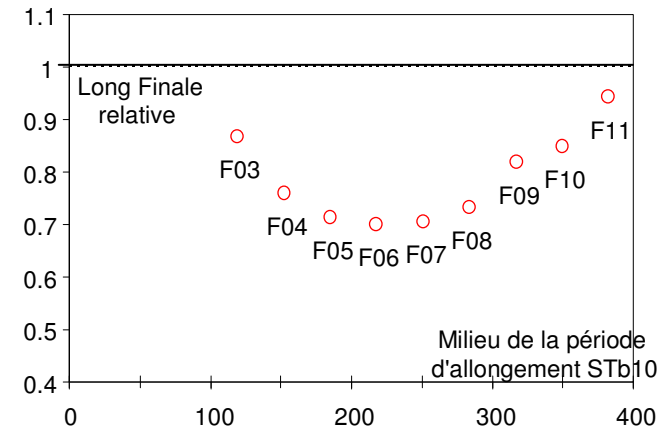
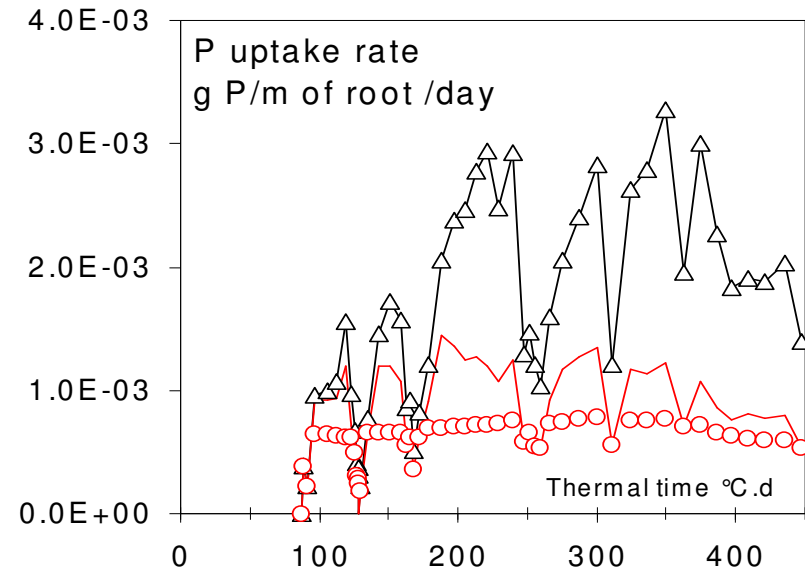
### ➤ Le rapport

"flux diffusif arrivant potentiellement à la surface de la racine / flux demandé"

varie au cours du cycle de la culture

➤ Existence de "périodes critiques" (exemple du début de cycle sur maïs)

➤ Un des attendus (pas toujours explicitement formulé) des apports d'engrais minéraux est d'accroître localement et temporairement la concentration en P dans la solution de sol, pour **accroître le flux diffusif vers les racines**, en particulier pendant ces périodes critiques (cas des engrais dits "starter")



D'après Mollier, Pellerin, non publié



## Conclusions pour l'élément Phosphore



- Le phosphore minéral d'origine sédimentaire est une ressource **non renouvelable**
  - ⇒ A terme il n'y a pas d'alternative au recyclage
- Les flux de P liés aux échanges agro-alimentaires entre continents aboutissent à une **répartition très inégale de la ressource**
- Au niveaux d'organisation intermédiaires (exploitation, territoire), la nature et l'intensité des flux d'entrée / sortie de P sont largement dépendant des **systèmes de production agricole pratiqués**. Les modes et voies de transfert du P des parcelles agricoles vers les eaux mettent en jeu un emboîtement de processus parmi lesquels ceux intervenant à l'échelle du **bassin versant** jouent un rôle déterminant
  - ⇒ Besoin d'outils de diagnostic, à des échelles territoriales pertinentes, concernant
    - ⇒ Les flux d'entrée / sortie et leurs déterminants
    - ⇒ L'identification des zones émettrices ("hot spot") et voies de transfert vers les eaux

Pour imaginer, concevoir, des **voies d'action à cette échelle** (gestion territoriale des effluents, aménagements paysagers, etc...)

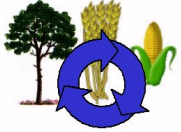


## Conclusions pour l'élément Phosphore



- Au niveau du système sol-plante, le prélèvement est limité par la **faible solubilité et la faible diffusivité** de l'ion orthophosphate.
- Un des attendus des apports d'engrais minéraux est non seulement de compenser les exportations, mais aussi d'accroître localement et temporairement la concentration en P dans la solution de sol, pour **accroître le flux diffusif vers les racines**, en particulier pendant ces périodes critiques (cas des engrais dits "starter")
- Malgré des progrès récents (prise en compte de "l'exigence" des cultures par ex), les outils d'aide à la décision actuels privilégient la gestion à moyen terme du bilan (apports calculés en référence aux exportations), ce qui est nécessaire mais non suffisant. Des marges de progrès existent dans le domaine
  - de l'évaluation de la biodisponibilité (indicateurs plus mécanistes que l'analyse de terre par extraction chimique), de la constitution des référentiels, du mode de calcul des fumures
  - de la recherche de stratégies de fertilisation innovantes, conciliant la nature des ressources disponibles (effluents, etc...) et les exigences des cultures
- Un défi à relever sera de concilier **recyclage** du P des produits organiques et **production végétale intensive**, en minimisant le recours aux engrais minéraux





---

## Le cas de l'Azote

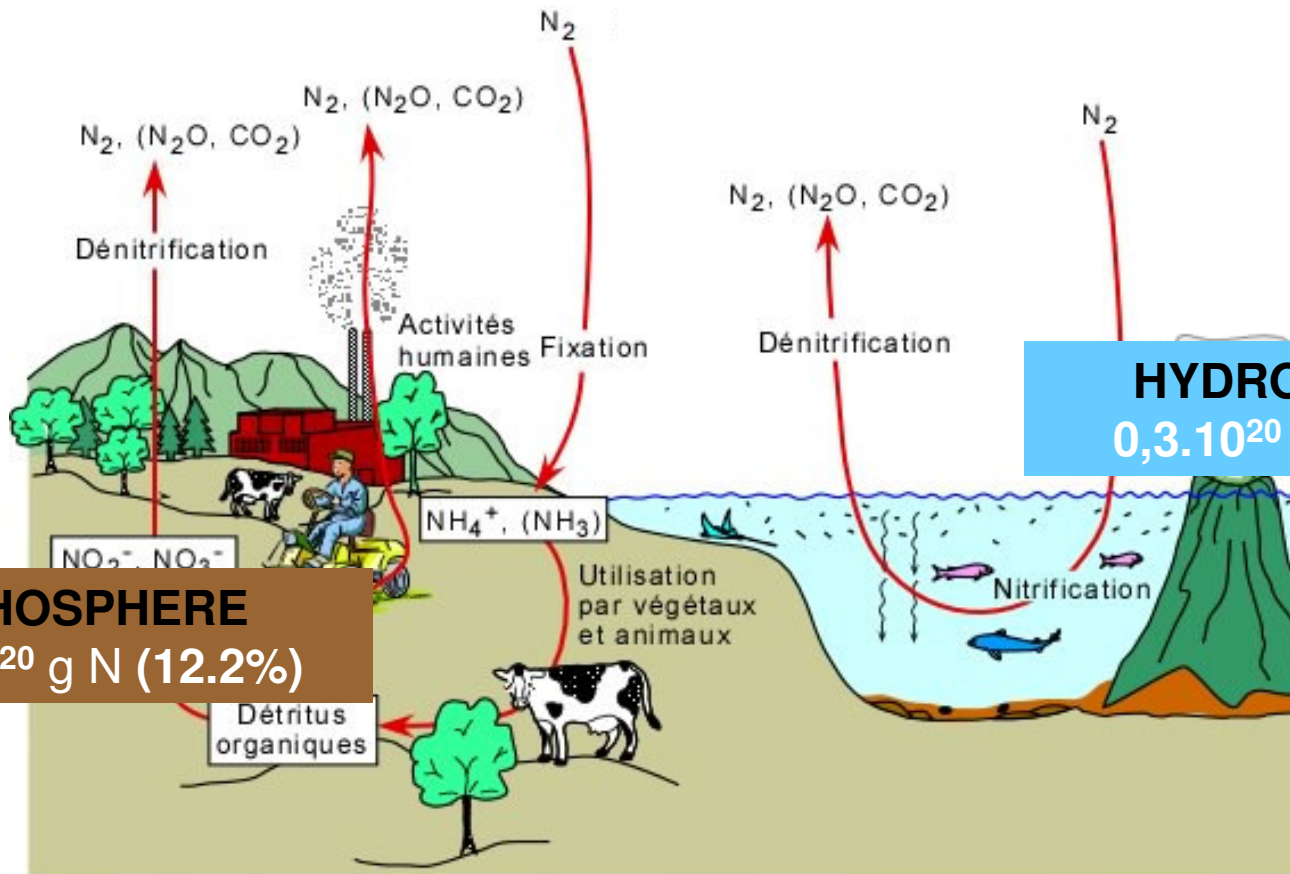
---



# Le cycle global de l'azote



**ATMOSPHERE**  
 $38,6 \cdot 10^{20}$  g N (87 %)

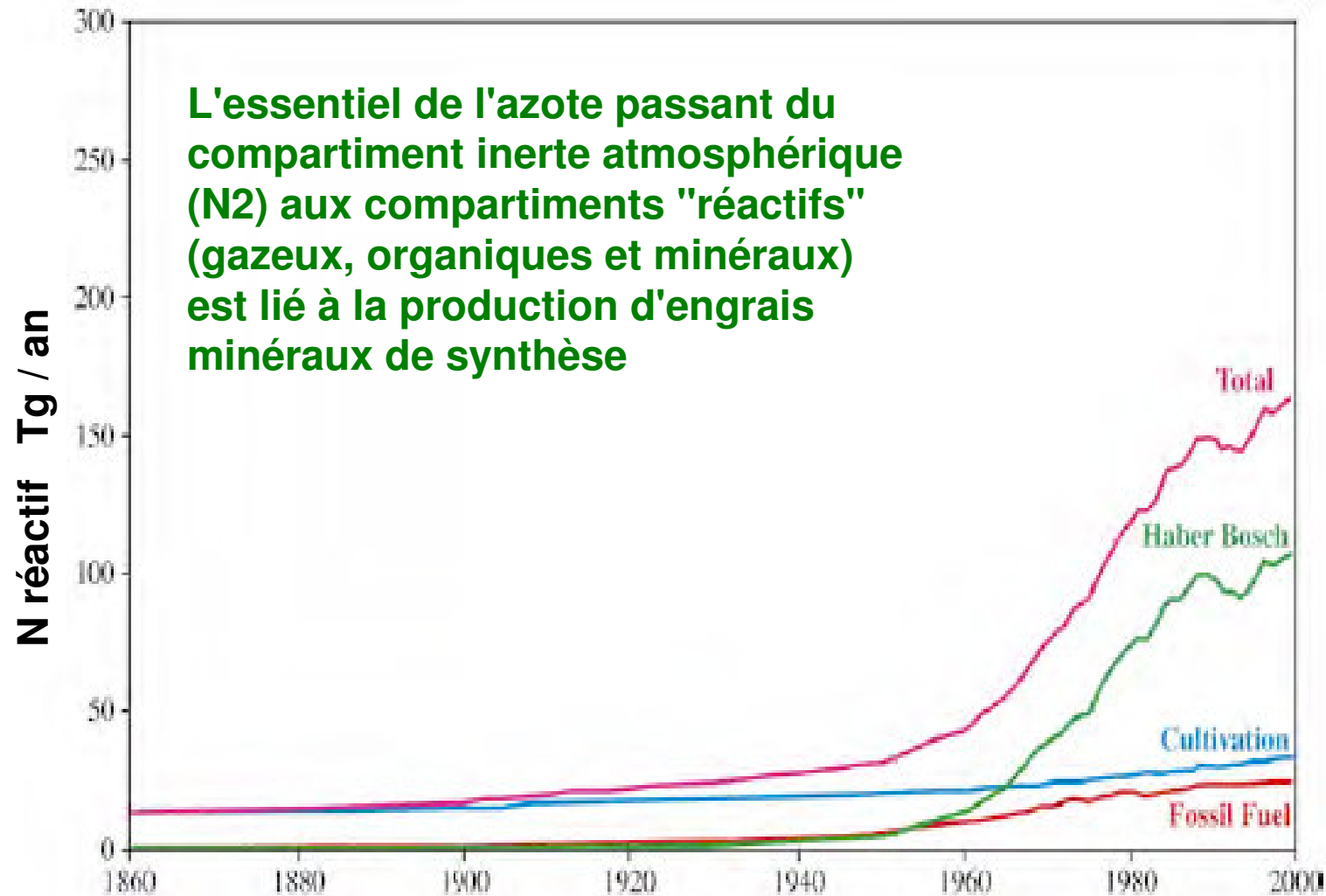


**LITHOSPHERE**  
 $5,4 \cdot 10^{20}$  g N (12.2%)

**HYDROSHERE**  
 $0,3 \cdot 10^{20}$  g N (0.7%)



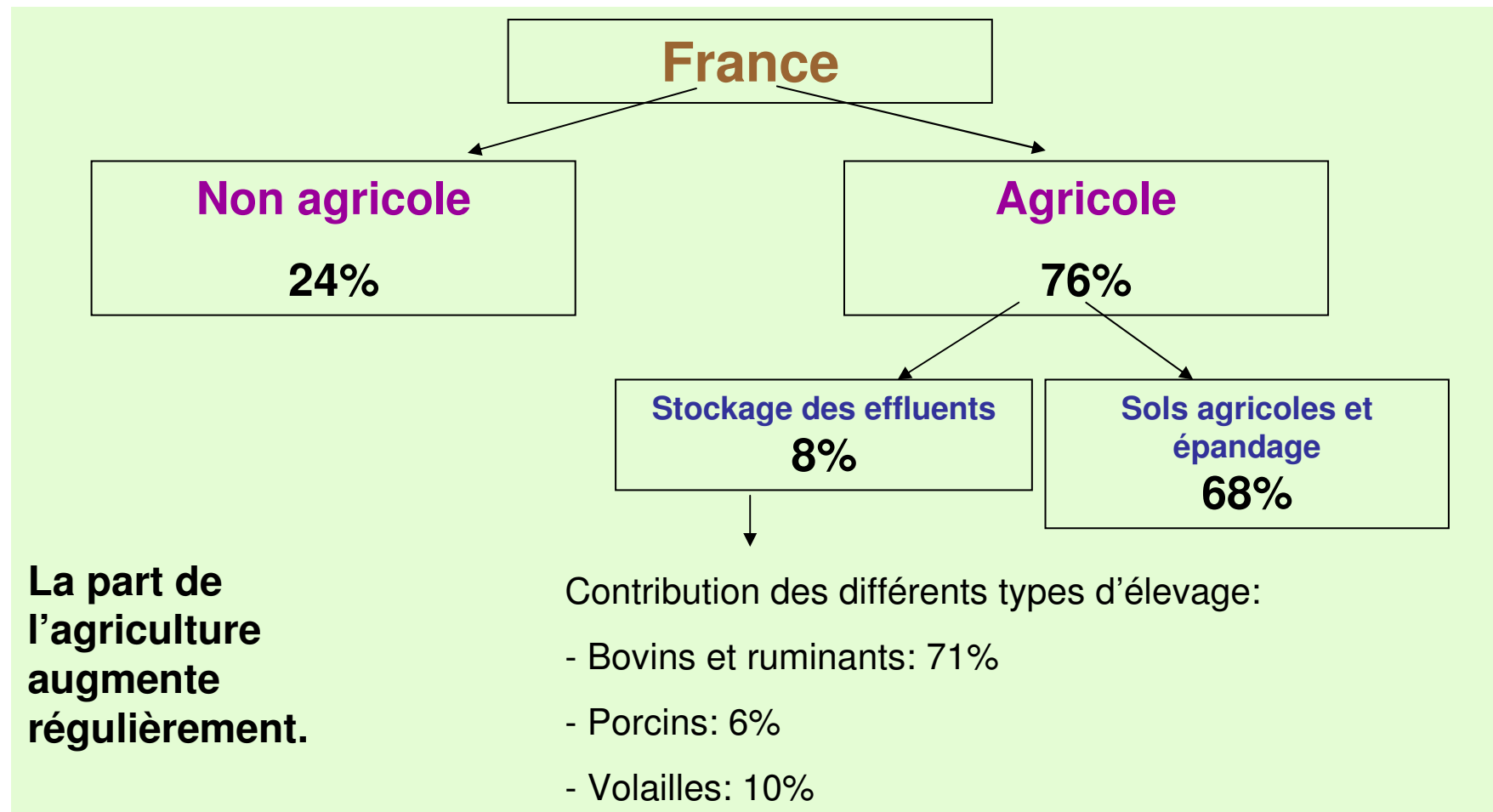
## Flux d'azote à l'échelle planétaire



Source : International Nitrogen Initiative ; <http://www.initrogen.org/>



# Flux d'azote à l'échelle planétaire : Contribution de l'agriculture aux flux de N<sub>2</sub>O





## Flux d'azote à l'échelle planétaire : Contribution de l'agriculture aux flux de N<sub>2</sub>O

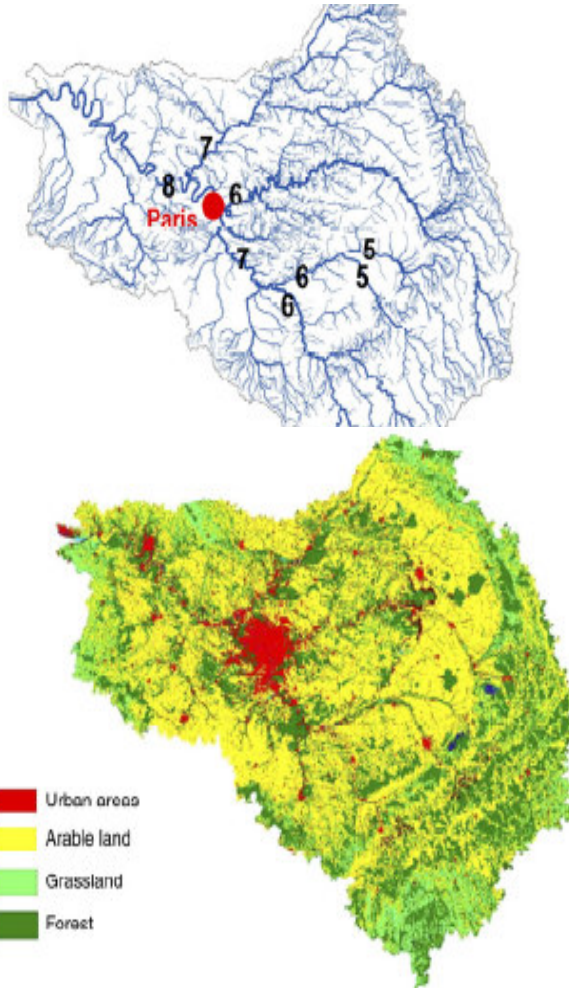


- Les émissions d'oxydes d'azote (N<sub>2</sub>O) associés à la nitrification et dénitrification, et le méthane (CH<sub>4</sub>), participent à l'effet de serre . Le pouvoir de réchauffement global du N<sub>2</sub>O est 300 fois plus élevé que celui du CO<sub>2</sub>

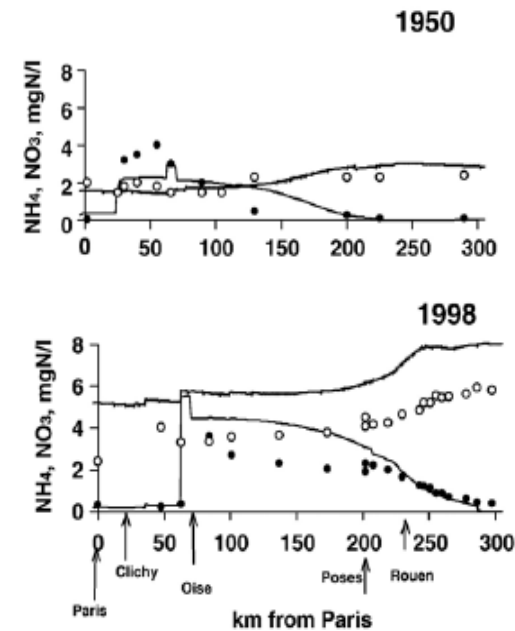
	kg équ C par kg	kg équ CO <sub>2</sub> par kg
CO <sub>2</sub>	0.273	1
Methane	5.727	21
NO <sub>x</sub>	10.909	40
N <sub>2</sub> O	84.545	310



## Impacts à l'échelle régionale : exemple du bassin hydrologique (1)



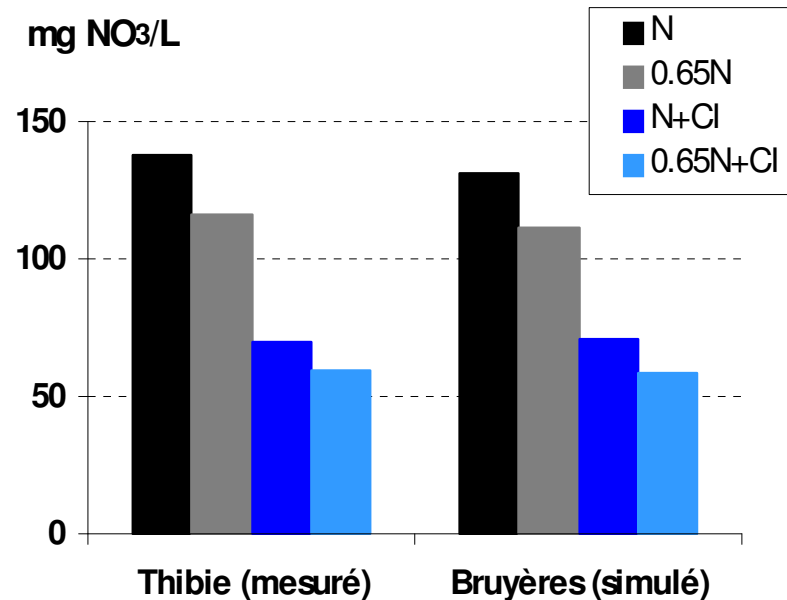
Exemple de la modélisation des teneurs en azote ammoniacal et nitrique de la rivière Seine, en 1950 et 1998, en aval de la ville de Paris (*Billen, Garnier et al. 2007*).



Exemples de modélisations du bassin hydrographique de la Seine et des modes d'occupation des sols, pour prédire la qualité de l'eau de la rivière Seine (*Billen, Garnier et al., 2007*).



## Impacts à l'échelle régionale : exemple du bassin hydrologique (2)



### Lessivage en fonction de la gestion N

(N: dose bilan, CI: cultures intermédiaires) . Simulation avec STICS  
de la concentration en nitrate de l'eau drainée (Mary et al, 2002)

Exemple de simulation à l'échelle d'un bassin hydrologique de la teneur en nitrate de l'eau qui percole, sous la zone racinaire (comparaison avec les valeurs mesurées sur un ensemble de parcelles, Site de Thiebie, Arvalis-Institut du Végétal)



## Impacts à l'échelle régionale : exemple du bassin hydrologique (3)



### Bilan de l'azote dans le Bassin de la Seine et du Grand Morin & Emissions potentielles indirectes de N<sub>2</sub>O

*Billen et al (2005), Flipo et al (2005)*

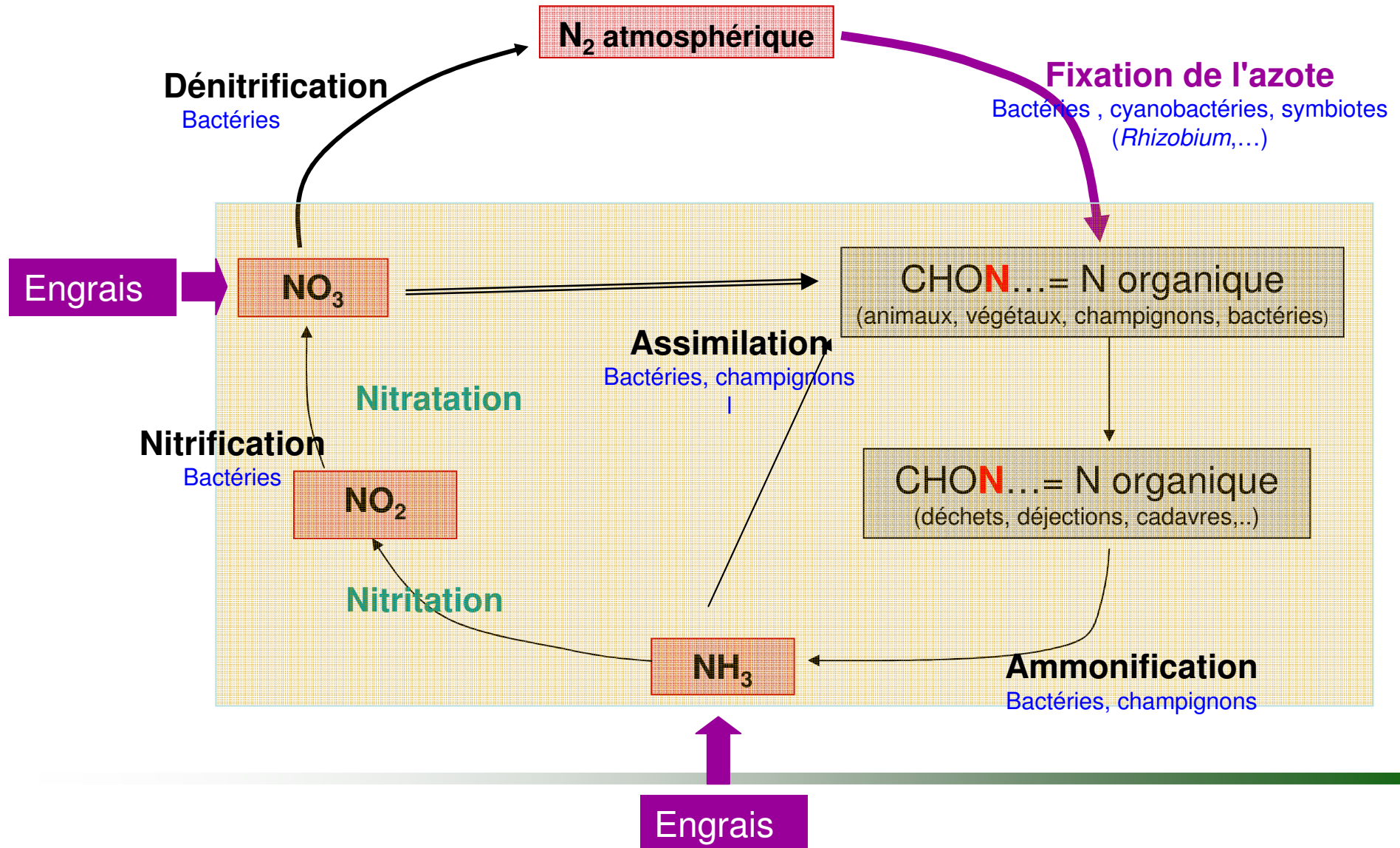
	Bassin de la Seine			Bassin du Grand Morin		
	kt N/an	% flux nitrate	% apport N	kt N/an	% flux nitrate	% apport N
<b>Flux sous racinaire</b>	<b>180</b>			<b>4.33</b>		
<b>Flux vers aquifères</b>	69	38%		3.64	84%	
<b>Flux vers eau surface</b>	112	62%		0.68	16%	
Stockage aquifères	33	18%	3.0%	1.70	39%	12.9%
Flux net surface	57	31%	5.1%	1.68	39%	12.7%
<b>Dénitrification riparienne</b>	91	51%	8.3%	0.94	22%	7.1%

*Adapté par Mary, 2007*



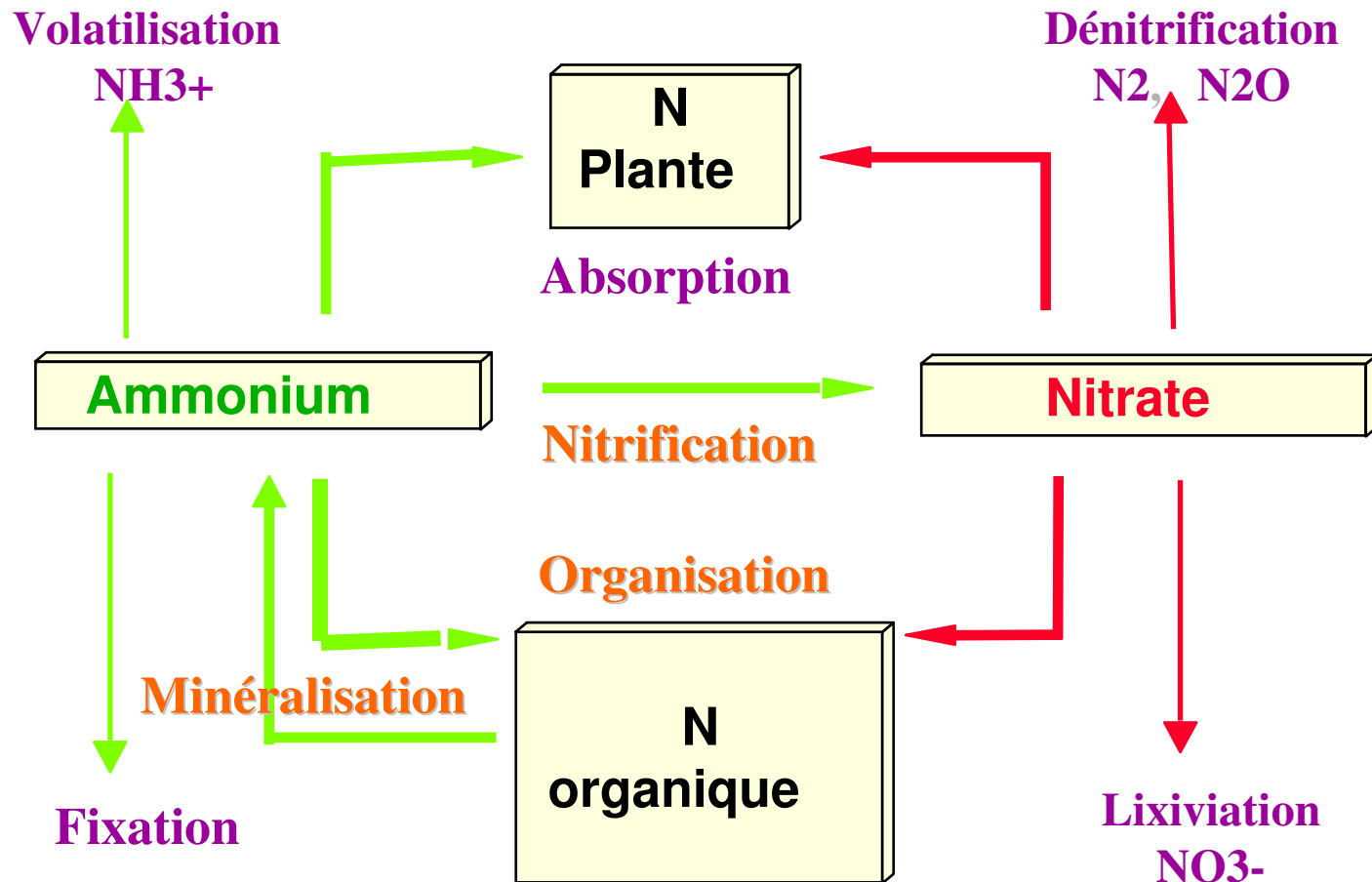


# Le cycle de l'azote à l'échelle de la parcelle et de la couche de sol.





## Compartiments et flux d'azote du système sol-plante-atmosphère à l'échelle locale

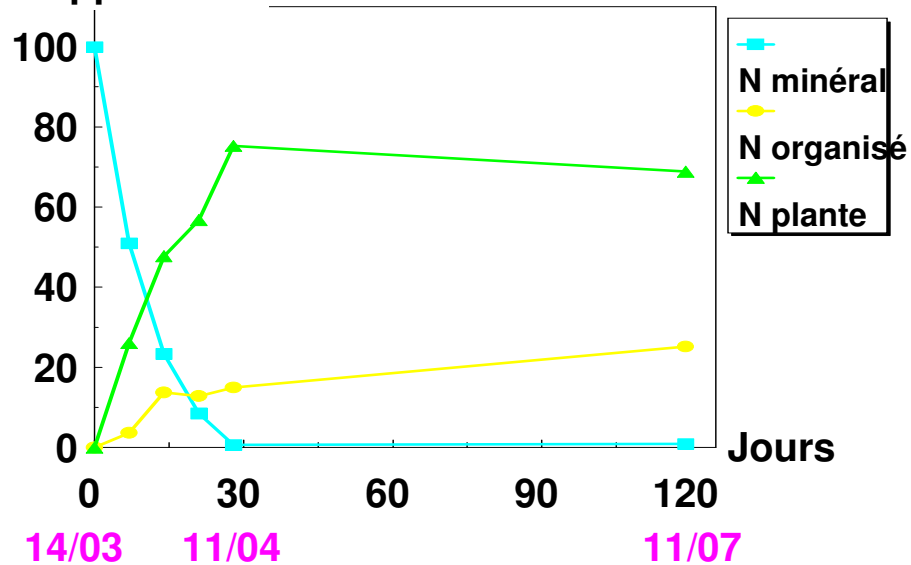




# Devenir de l'azote des engrais apportés aux cultures (estimation par traçage $^{15}\text{N}$ )



% N apporté

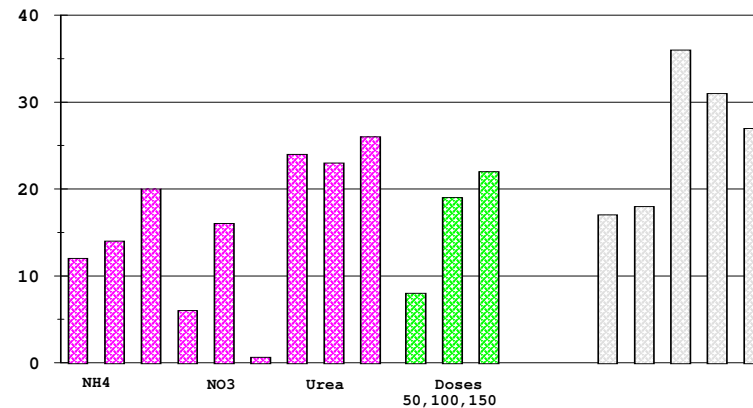


Devenir du  $^{15}\text{N}$  apporté sous forme de solution azotée, Culture de Colza

*Gabrielle, Recous et al. 2001*

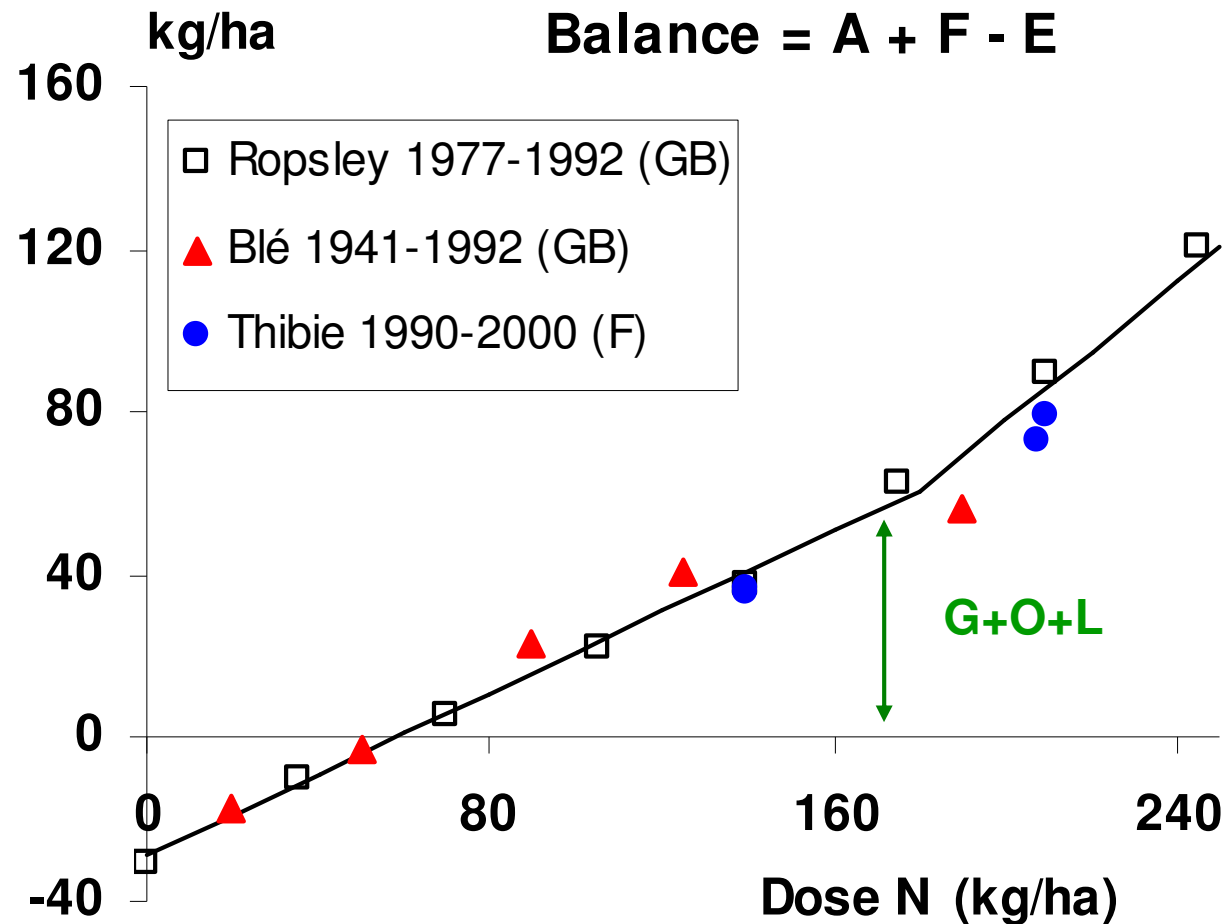
Estimation des pertes d'azote de l'engrais, par défaut de bilan  $^{15}\text{N}$

*Recous et al., 1988, 1992*





## Balance azotée à l'échelle de la parcelle



A = apport atmosph.  
F = fertilisation  
E = exportation

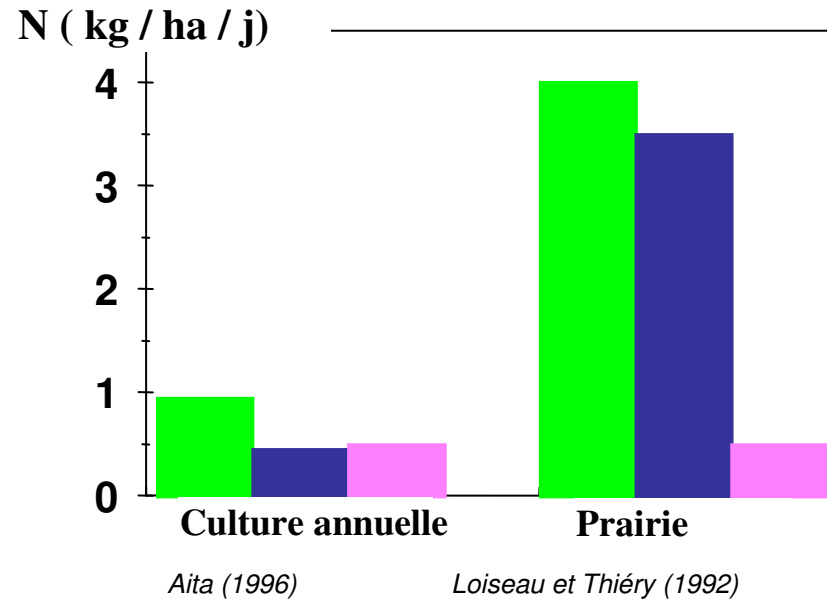
**G: pertes gazeuses**  
**O: organisation**  
**L: lessivage**



# Mode d'occupation des sols et couplage C-N: conséquences des changements de gestion sur l'intensité des flux.



Min brute — Org. brute = Min. Nette



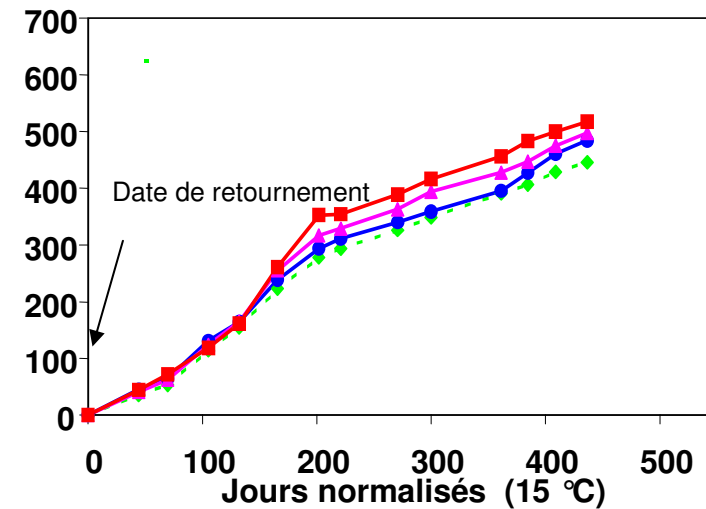
Intensités des flux de minéralisation et  
organisation brutes et nette en prairies et  
grande cultures

*Recous et al., 1997*

Conséquences du retournement de prairie  
sur la minéralisation nette de l'azote

*Vertes et al 2002*

Azote minéralisé kg/ha





## Conclusions pour l'élément AZOTE (1)



- ✓ Les plus grandes incertitudes sur les flux d'azote sont la fixation symbiotique et la dénitrification totale (échanges avec l'atmosphère)
- ✓ Les bilans  $^{15}\text{N}$  et les mesures directes indiquent que les pertes directes N peuvent représenter une fraction importante de l'engrais, mais aussi de l'azote minéralisé en périodes d'inter-culture, ou associé aux changements de gestion des sols (retournement de prairies, de labour, ...).
- ✓ Les facteurs d'émissions des flux directs de  $\text{N}_2\text{O}$  et  $\text{NO}_x$  sont encore mal identifiés, et les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  par voie indirecte (issues de la dénitrification de  $\text{NO}_3$  préalablement lixivié, semblent très conséquentes (majoritaires), et sont mal connues.
- ✓ La maîtrise des processus à l'échelle locale est restée impérative (bilan d'azote, gestion des matières organiques) pour minimiser les flux directs et indirects.



## Conclusions pour l'élément AZOTE (2)



- ✓ D'un point de vue technique les bases scientifiques et les outils de gestion des engrais minéraux à l'échelle annuelle (choix des doses, dates et formes d'azote) sont disponibles, et la maîtrise de l'azote possible.
- ✓ La gestion des sources organiques d'azote est plus complexe: diversité de la composition initiale, processus de minéralisation, synchronisation avec la demande en azote des cultures. Les bases de données (caractérisation et décomposition) sont disponibles et progressivement mises à jour.
- ✓ Il n'y a pas d'outil d'aide à la décision pour la gestion de la période d'interculture et à l'échelle de la succession de cultures (seulement des modèles de simulation).



## CONCLUSIONS (1)



- ✓ La planète a de grands problèmes environnementaux et de grands problèmes agricoles, et elle ne peut abandonner la production pour s'occuper d'environnement
  - Il est nécessaire de maîtriser les deux conjointement, et cela rend difficile les deux
- ✓ Les éléments minéraux sont une ressource indispensable à la production agricole.
  - Un fonctionnement durable de leurs cycles est nécessaire pour que l'agriculture soit durable
- ✓ La prise en compte des enjeux environnementaux rend nécessaire
  - L'étude de l'ensemble du cycle biogéochimique, à différentes échelles, du fait de l'importance des pertes indirectes (ex N<sub>2</sub>O).
  - L'évaluation de postes de pertes représentant des quantités faibles (quelques g à quelques kg annuels).

•





## CONCLUSIONS (2)



- ✓ Dans le futur, il y a des enjeux mondiaux autour de la maîtrise de la répartition spatiale des flux,
  - Aux différentes échelles: disponibilité et demandes en nutriments, croissance de la population, productions agricoles et changement climatique, ...
- ✓ Toutes les échelles sont indispensables, pour détecter, et maîtriser les relations entre pratiques agricoles et problèmes environnementaux,
  - ✓ En raison des transferts (émissions et dépôts, pertes directes et indirectes, eutrophisation)
- ✓ Ceci ne disqualifie en aucun cas les raisonnements à la parcelle qui reste l'échelle de maîtrise de la gestion des intrants.