

# **La maîtrise de la fertilité phosphatée: du raisonnement de la fertilisation à la gestion durable d'une ressource qui se raréfie**

**Sylvain PELLERIN et Thomas NESME**

**UMR 1220 « Transfert sol-plante et cycle des éléments minéraux  
dans les écosystèmes cultivés »  
Centre INRA de Bordeaux-Aquitaine  
Bordeaux Sciences Agro**

# Plan

- Le phosphore en agriculture: 3 points de vue
- Résultats acquis par la recherche, applications opérationnelles et questions qui demeurent
- Synthèse et perspectives

## Le Phosphore: un élément nutritif indispensable, non substituable,...

- rôle physiologique et structural (ADN/ARN, phospholipides, ATP/ADP, etc.)
- déficience modérée  $\Rightarrow$  réduction de la croissance foliaire
- concentrations dans les plantes de l'ordre du  $\text{mg g}^{-1}$  de MS.
- les quantités exportées par les organes récoltés représentent quelques dizaines de kg de P par ha et par an

High P (P4)



Low P (P0)

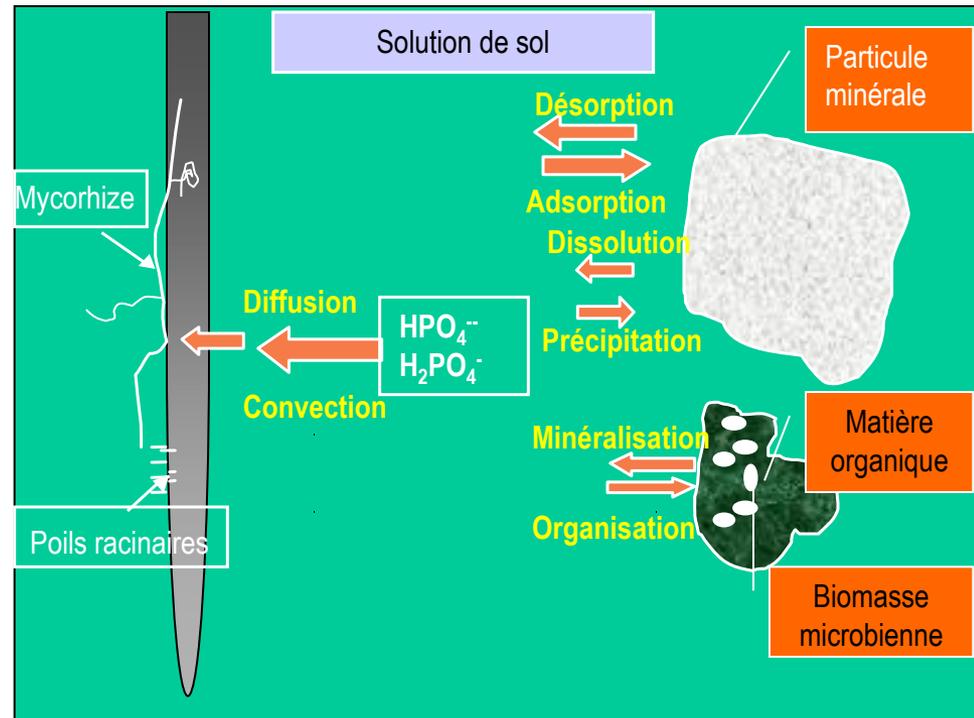


... dont la biodisponibilité est fortement contrôlée par des interactions physico-chimiques avec la phase solide du sol

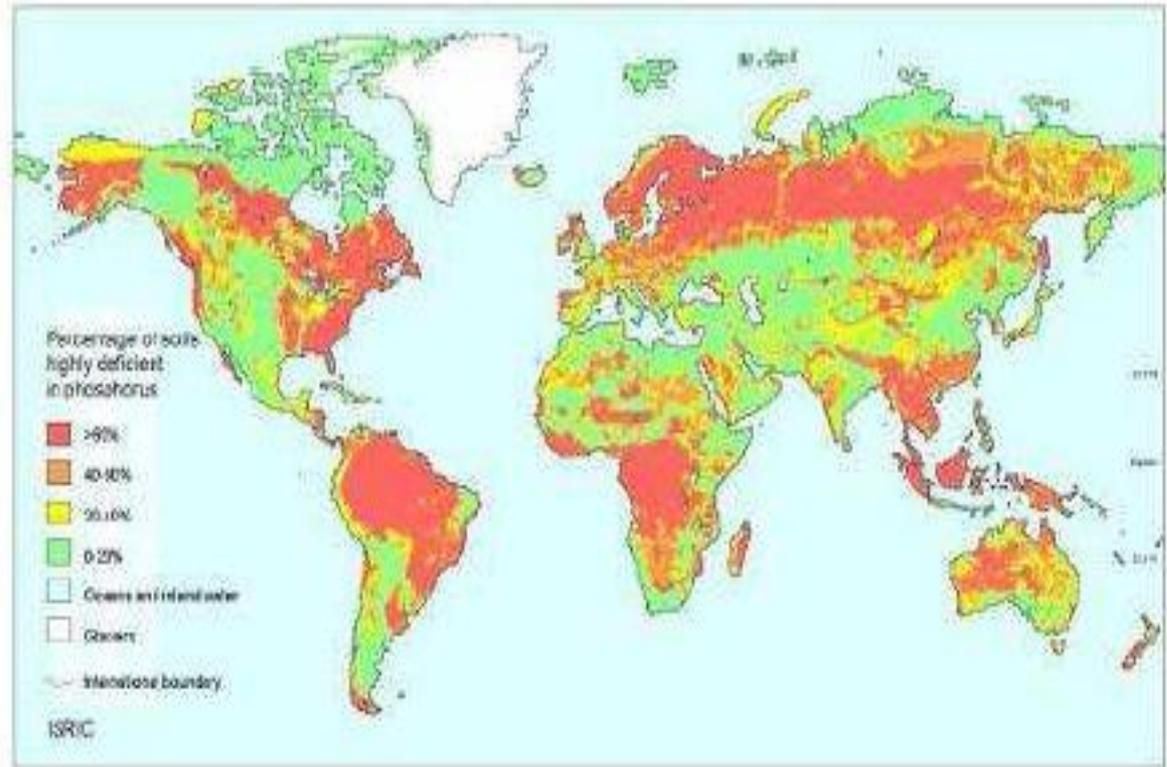
- rôle central de la solution de sol (la racine absorbe uniquement des ions  $\text{HPO}_4^{2-}$  ou  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  en solution)

- importance des processus de réapprovisionnement de la solution par la phase solide

- le transport sol-racine par diffusion est l'étape limitante du prélèvement  $\Rightarrow$  importance du développement racinaire, des symbioses



... qui reste, dans beaucoup de régions du monde, un facteur limitant majeur de la production agricole et alimentaire

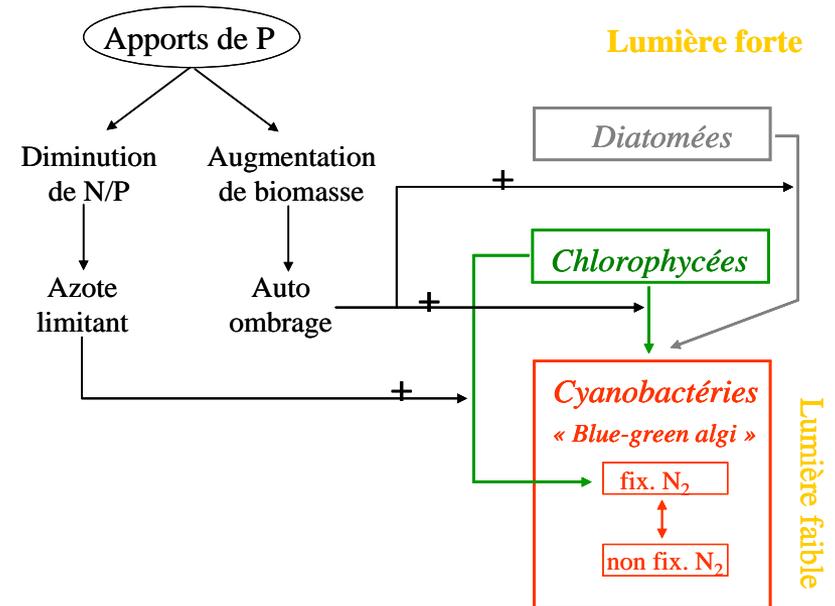


Répartition mondiale des sols fortement déficients en P (d'après Fairhurst et al., 1999, source ISRIC)

## Le Phosphore: un élément déclencheur de l'eutrophisation des eaux continentales



- ▶ augmentation de la production primaire. Bloom algaux
- ▶ auto-accélération du processus du fait de cyanobactéries fixatrices de N
- ▶ accumulation de déchets organiques insuffisamment recyclés
- ▶ déficit d'oxygénation des eaux profondes
- ▶ baisse de la qualité des eaux, réduction de la valeur d'usage, perte de biodiversité

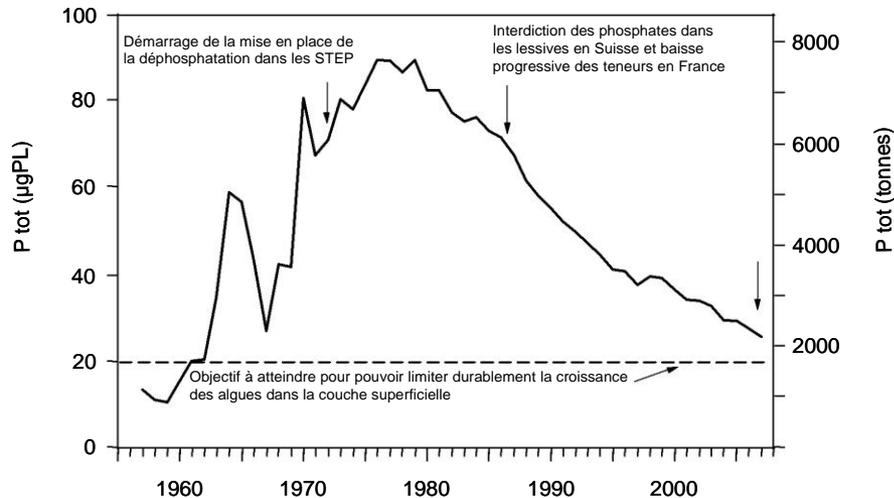


Dont l'origine  
n'est pas  
exclusivement  
agricole

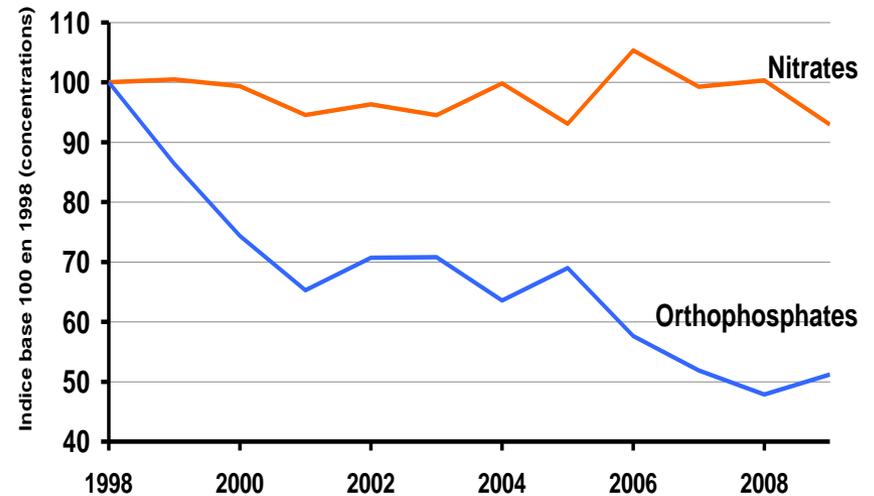
Source	Nature	Flux rejeté (en P)		
		t an <sup>-1</sup>	% du total	
Ponctuel	Urbain et industrie à l'Aval de Paris	3930	43	77
Ponctuel	Urbain et industrie à l'amont de Paris	2922	32	
Diffus	Rejets urbains avec les pluies	206	2	
Diffus « naturel »	Forêt	59	1	23
Diffus agricole	Drainage	51	1	
Diffus agricole	Ruissellement	1900	21	
Total des sources ponctuelles et diffuses		9068	100	100
Flux mesuré à l'exutoire de la Seine		8009		

Origine des flux annuels de phosphore entrant dans le réseau hydrographique de la Seine et flux sortant à l'exutoire (période de juillet 1999 à juillet 2000, d'après NEMERY et GARNIER, 2007).

# Une situation qui globalement s'améliore...



Evolution de la concentration en P dans les eaux du lac Léman (source CIPEL)

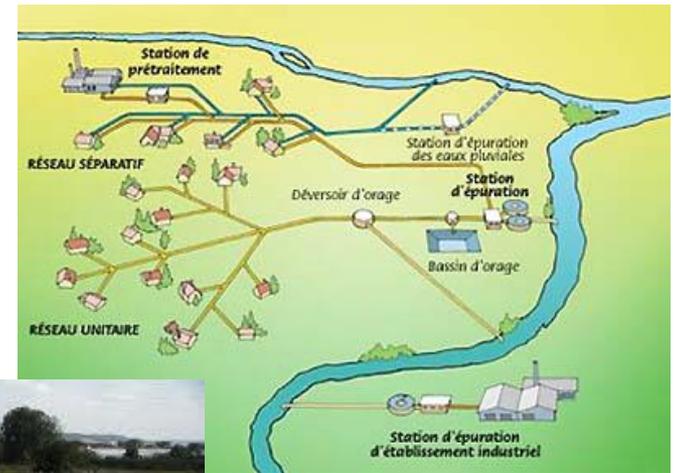


Evolution des indices de qualité des cours d'eau en France pour N (nitrates) et P (orthophosphates) (Source: agences de l'eau - traitements SOeS, 2011)

Mais qui s'explique en grande partie par les progrès faits dans le domaine de la collecte, de l'épuration et de la déphosphatation des eaux usées.

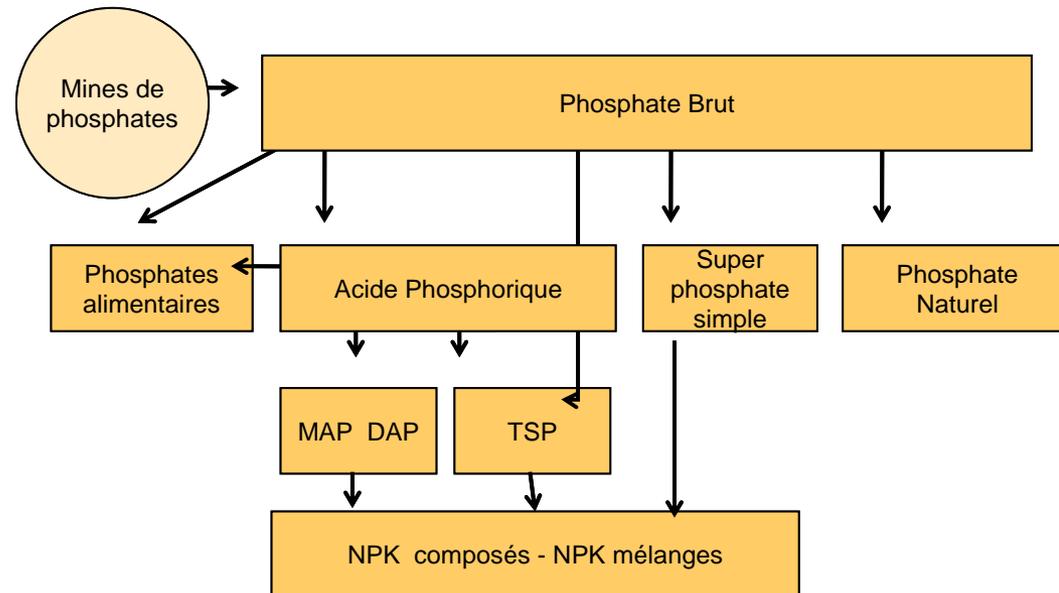
A l'échelle de la France, 51% du P transféré vers les eaux provient des sols agricoles

Une partie des progrès qui restent à faire se situent dans la maîtrise des flux d'origine agricole



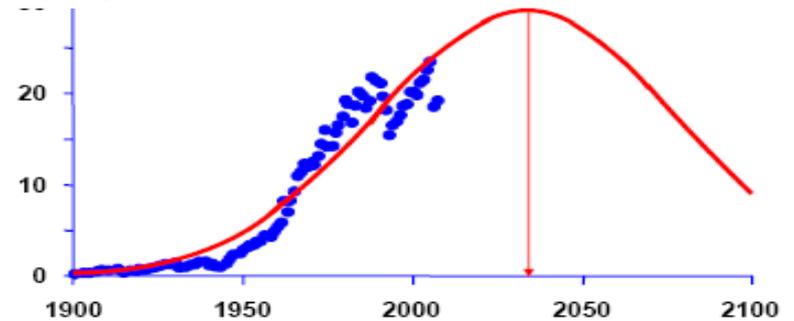
# Le Phosphore: une ressource non renouvelable,

- ▶ Roches phosphatées issues de gisements sédimentaires,
- ▶ 23 Mt P extraites par an
- ▶ 82% des quantités extraites utilisées pour la fabrication d'engrais phosphatés

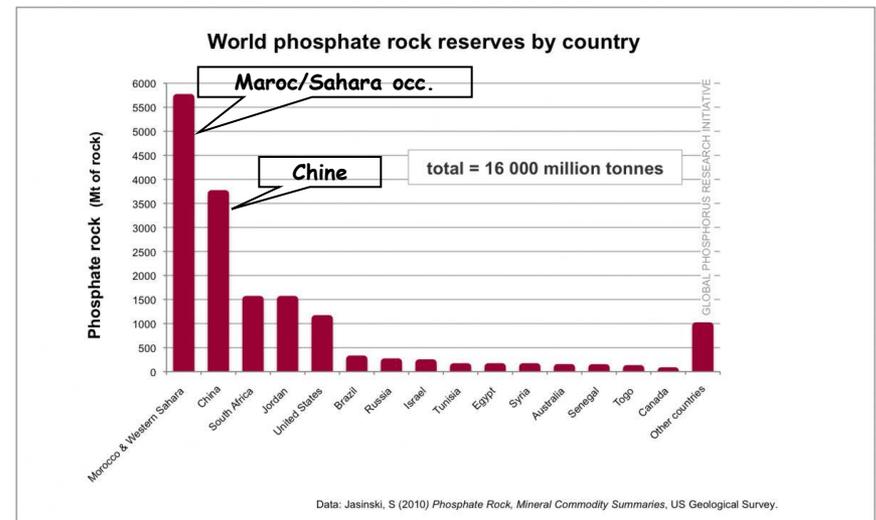


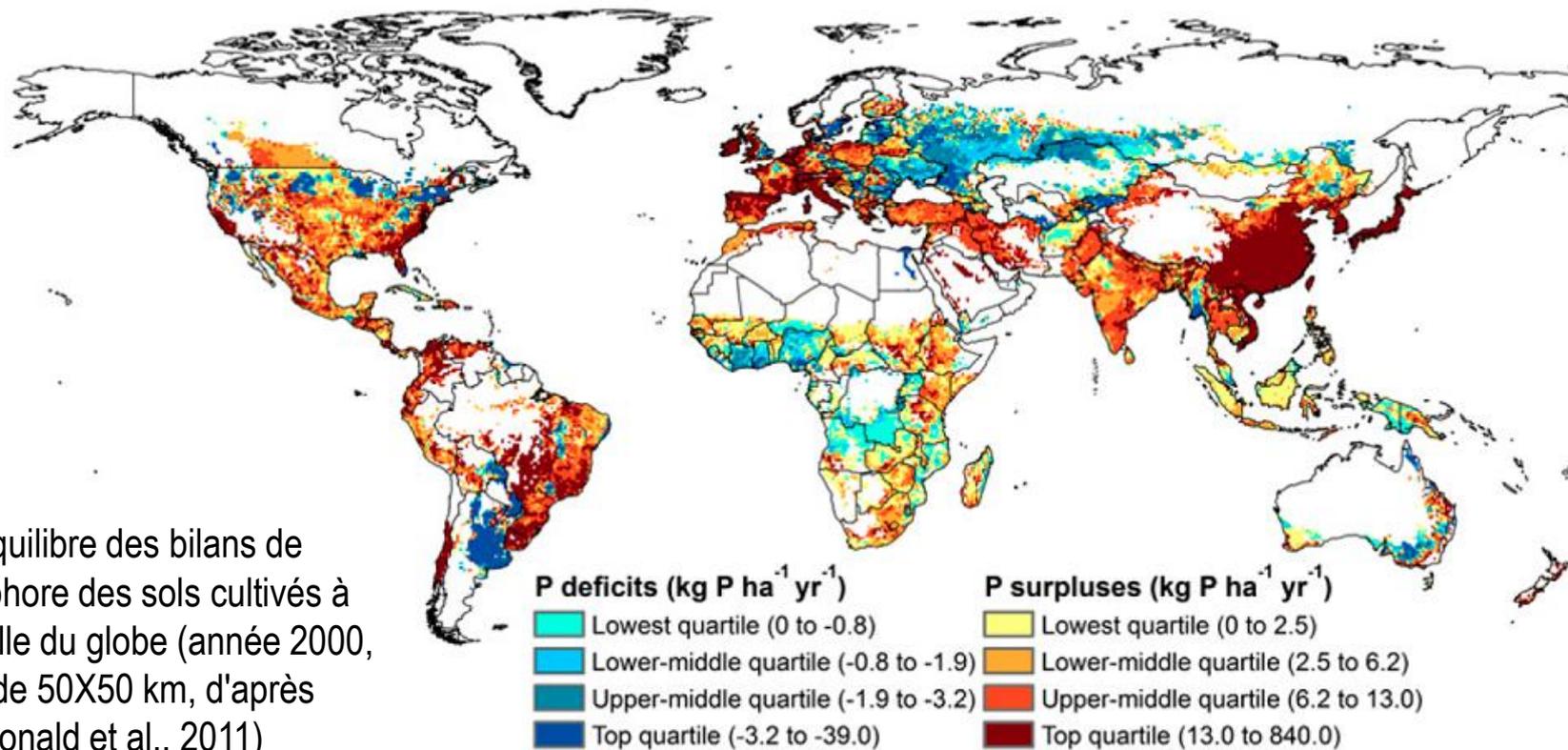
- ...dont la raréfaction constitue à terme une menace pour la sécurité alimentaire mondiale même s'il existe des controverses sur la durée de vie des réserves: 1 à 3 siècles selon les auteurs
- ...qui pourrait devenir un enjeu géo-politique
- réserves détenues par quelques pays
- ...dont le coût risque de s'accroître
- augmentation de la demande, faible capacité d'ajustement de l'offre, augmentation des coûts d'extraction

**Phosphorus production (10<sup>12</sup> g P per year)**

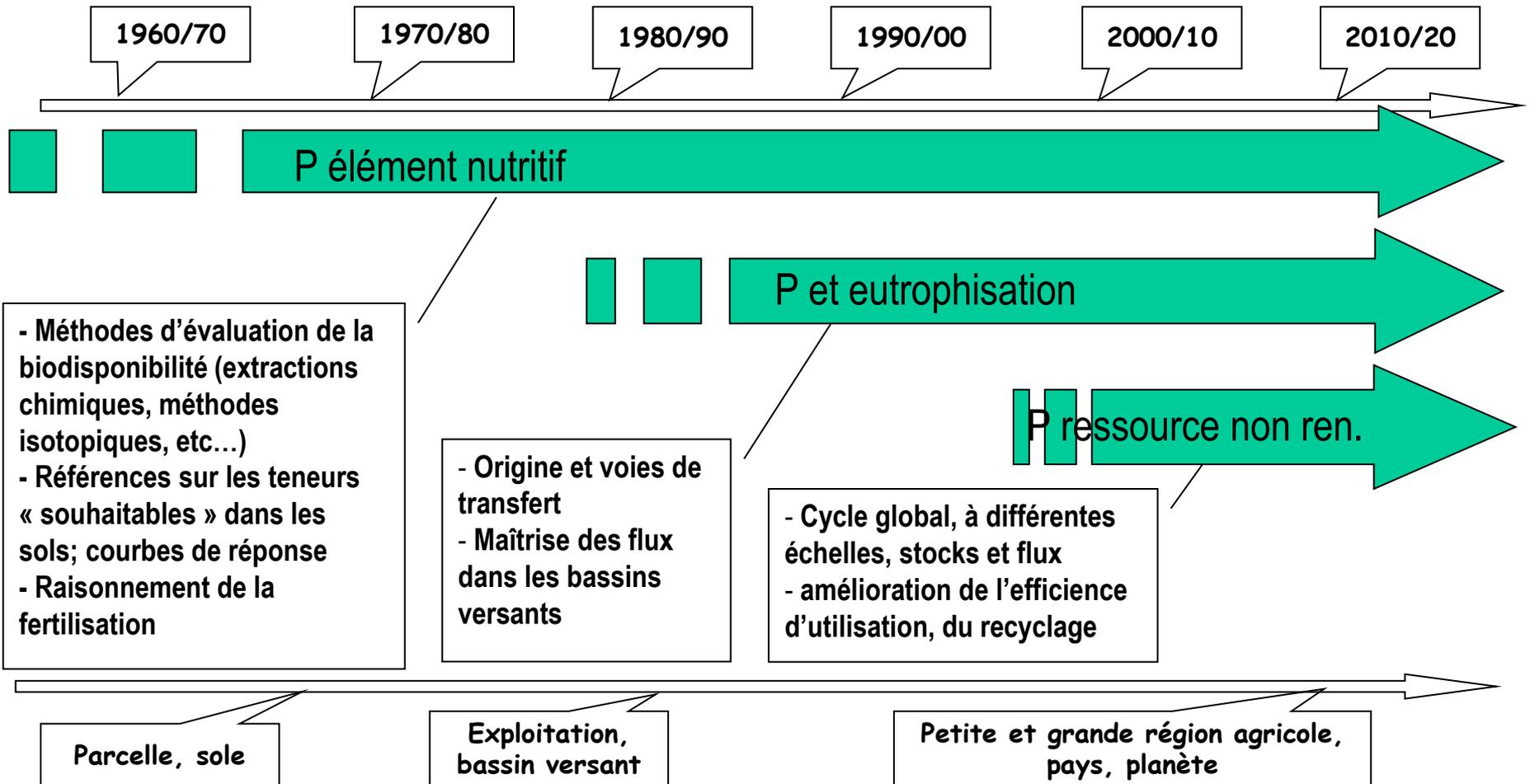


(Cordell D et al., 2009)





Déséquilibre des bilans de phosphore des sols cultivés à l'échelle du globe (année 2000, grille de 50X50 km, d'après MacDonald et al., 2011)



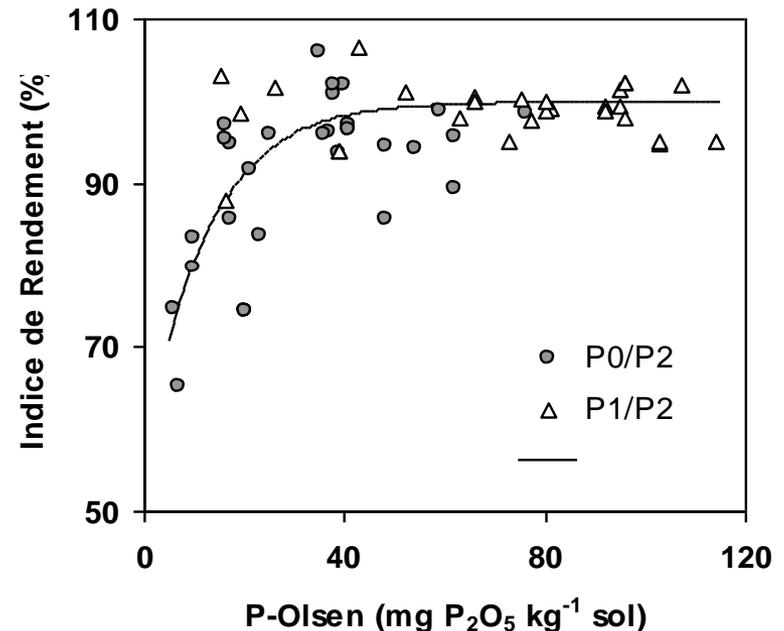
- Quelques résultats et applications opérationnelles

## Années 70

Un raisonnement de la fertilisation P basé sur

- l'analyse de terre par extraction chimique (Dyer, Joret-Hébert, Olsen)
- des valeurs seuils issues de relations empiriques « teneur du sol-indice de rendement »
- notions de fumure d'entretien et de redressement

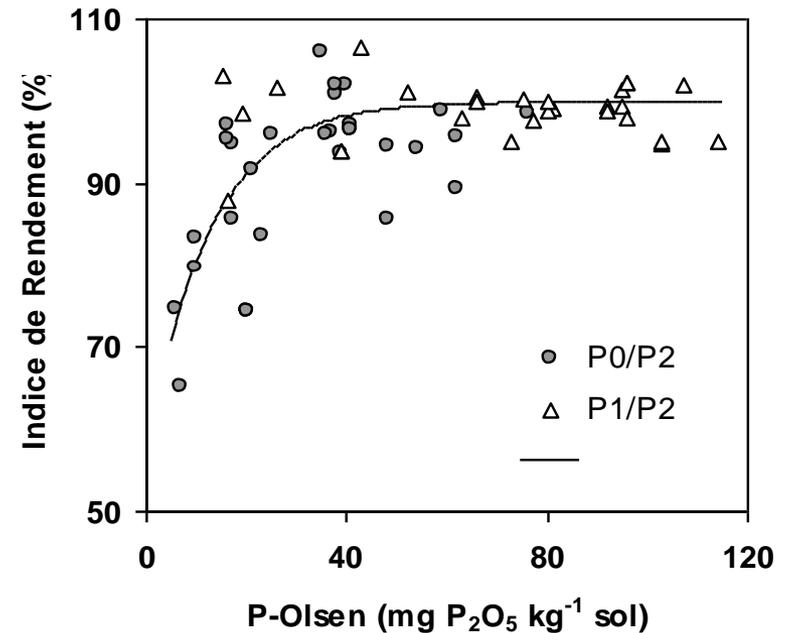
L'objectif était d'amener le sol à la teneur jugée souhaitable (pour les cultures les plus exigeantes) et de l'y maintenir



## Limites

Insuffisance de l'analyse de terre par extraction chimique pour évaluer la biodisponibilité du P

Instabilité constitutive des relations empiriques «teneur du sol x indice de rendement» > difficulté à fixer des seuils



⇒ Dans le contexte de l'époque, choix de seuils hauts  
« sécuritaires par excès »

## Années 90

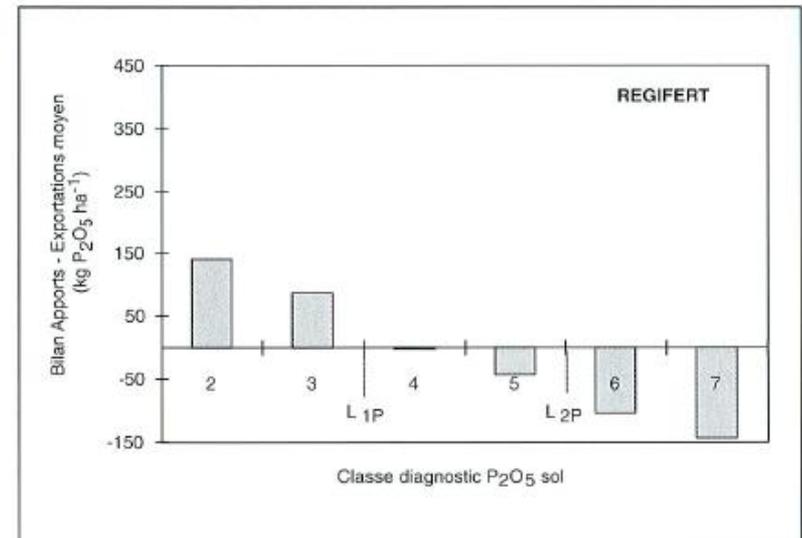
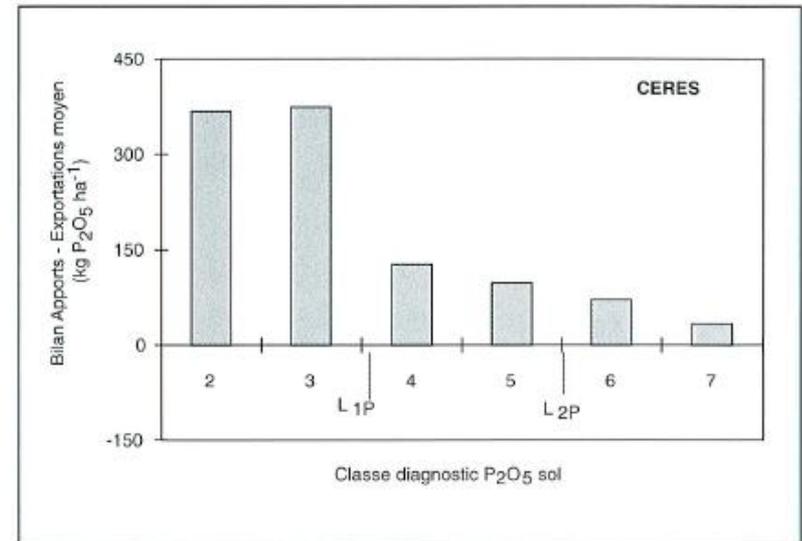
Une rénovation partielle des bases de raisonnement (COMIFER, Logiciel INRA-LDAR REGIFERT)

- l'analyse de terre par extraction chimique et les valeurs seuils issues des relations « teneur x indice de rendement) restent à la base du raisonnement
- modulation des seuils en fonction de « l'exigence » des espèces
- légitimation de l'impasse
- abandon de la notion de fumure de redressement

L'objectif de la fertilisation devient davantage de fertiliser la culture immédiatement à venir

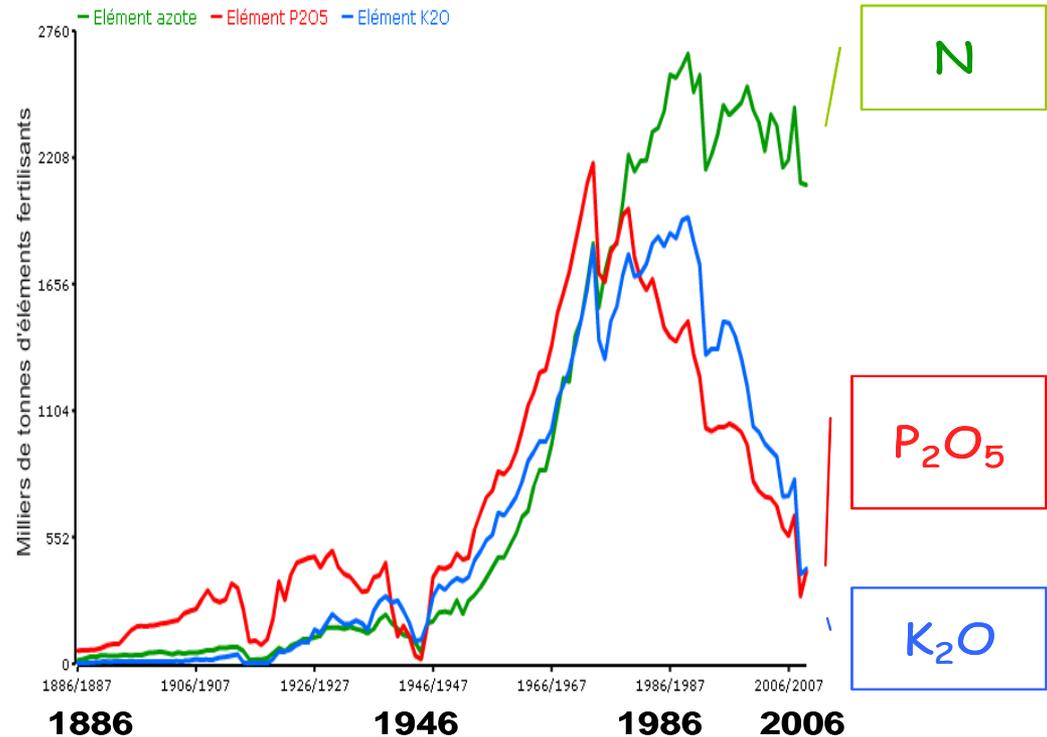
# Qui s'est traduit par une baisse notable des apports préconisés...

Bilans Apports – exportations de P à l'échelle de la succession, en fonction des classes diagnostics, en tenant compte des apports préconisés par les logiciels CERES (années 70) et REGIFERT (années 90-00).  
1152 simulations (d'après Pellerin et al., 2000)



Les progrès des outils de raisonnement de la fertilisation P ont accompagné (amplifié?) une réduction des apports, également motivée par une recherche de réduction des charges opérationnelles

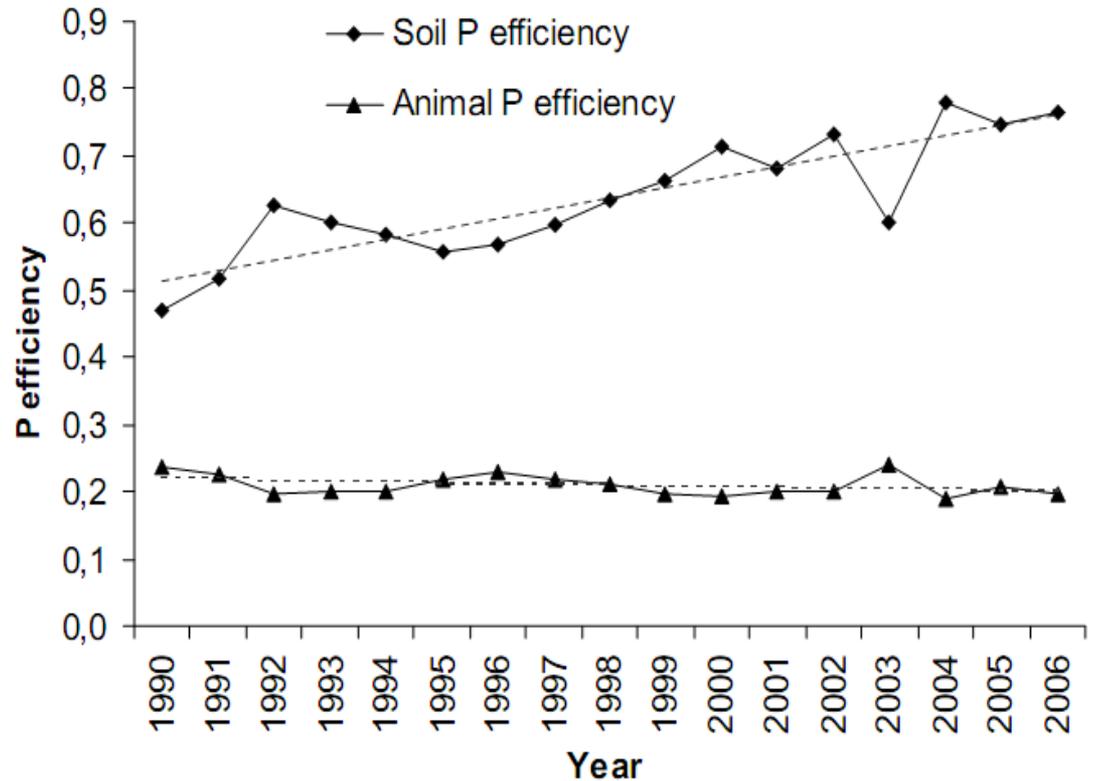
**10<sup>3</sup> t d'élément fertilisant**



D'après UNIFA

$$\text{Soil } _P \_ \text{productivity} = \frac{\text{Crop } _\text{uptake}_P}{\text{Soil } _\text{input}_P}$$

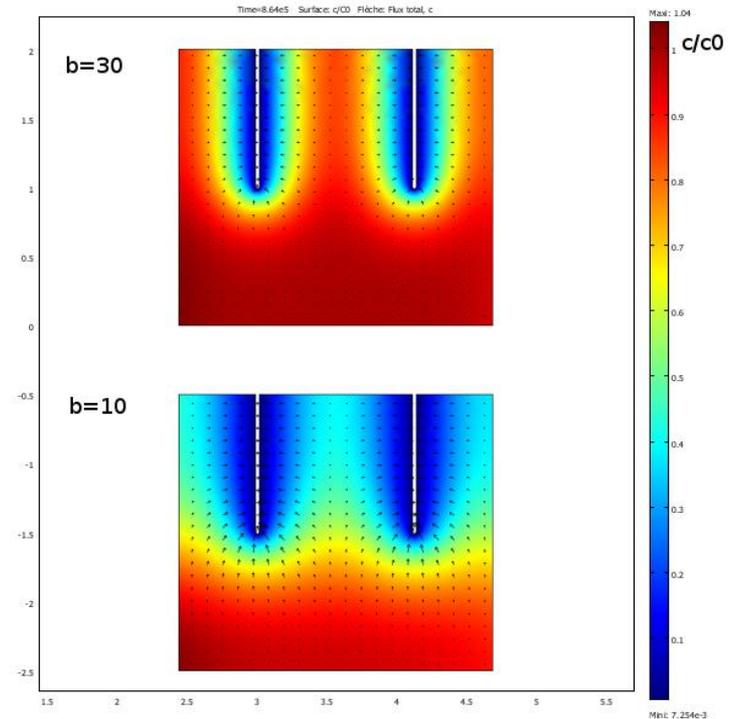
Une « réduction d'intrants » réussie...



D'après Kalimuthu et al., 2012

## Des questions qui demeurent, et des recherches qui se poursuivent

- Quels **indicateurs** pour caractériser la biodisponibilité du P, qui s'appuient sur une vision mécaniste et utilisables en routine?
- Comment constituer des **référentiels** (valeurs seuils,...) adaptés à la diversité des manières de produire (non labour, ...)? Peut-on réduire les teneurs, en compensant par d'autres **leviers** (localisation,...)
- Peut-on améliorer l'efficacité de prélèvement en valorisant mieux/pilotant certains **processus biologiques**? (protons, phosphatases, mycorhizes,...)



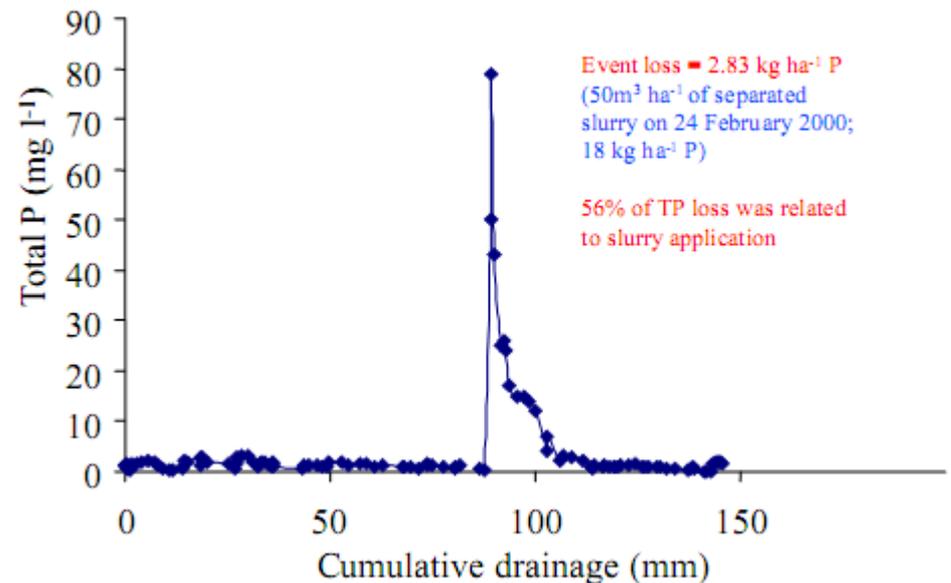
## Place croissante

- de la modélisation
- de l'ingénierie agro-écologique

## Un transfert de P des sols agricoles vers les eaux

- Majoritairement « diffus »
- Qui se fait surtout par entrainement particulaire (très lié à l'érosion)
- A l'occasion d'épisodes (rares) de ruissellement

Sauf cas particulier (sols drainés, sableux) le transfert vertical de P est faible ( $<0.1 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ )



- Les étapes de mobilisation et de transfert mettent en jeu un **emboitement de processus** intervenant à des niveaux d'organisation spatiale allant du niveau infra-parcellaire au bassin versant hydrologique
- L'apparition et l'intensité du phénomène dépendent
  - du fonctionnement des "**sources**", au niveau parcellaire (battance, ruissellement, acquisition de la charge en P,...)
  - de la structure et du fonctionnement du **bassin versant** (topographie, voies de transfert, zones « tampons »,...)



## Stratégies de limitation des transferts de P agricole diffus vers les hydrosystèmes

- A la **source**,
  - limiter les teneurs en P des sols aux stricts besoins des cultures (analyse de terre, raisonnement des apports)
  - éviter les apports en période à risque de ruissellement
- En limitant la fréquence et l'intensité du **ruissellement**,
  - éviter les périodes de sol nu, etc...
- En maintenant (voire en restaurant) des **zones tampons** réduisant la charge en P des eaux
  - bandes enherbées
  - structure du parcellaire adaptée



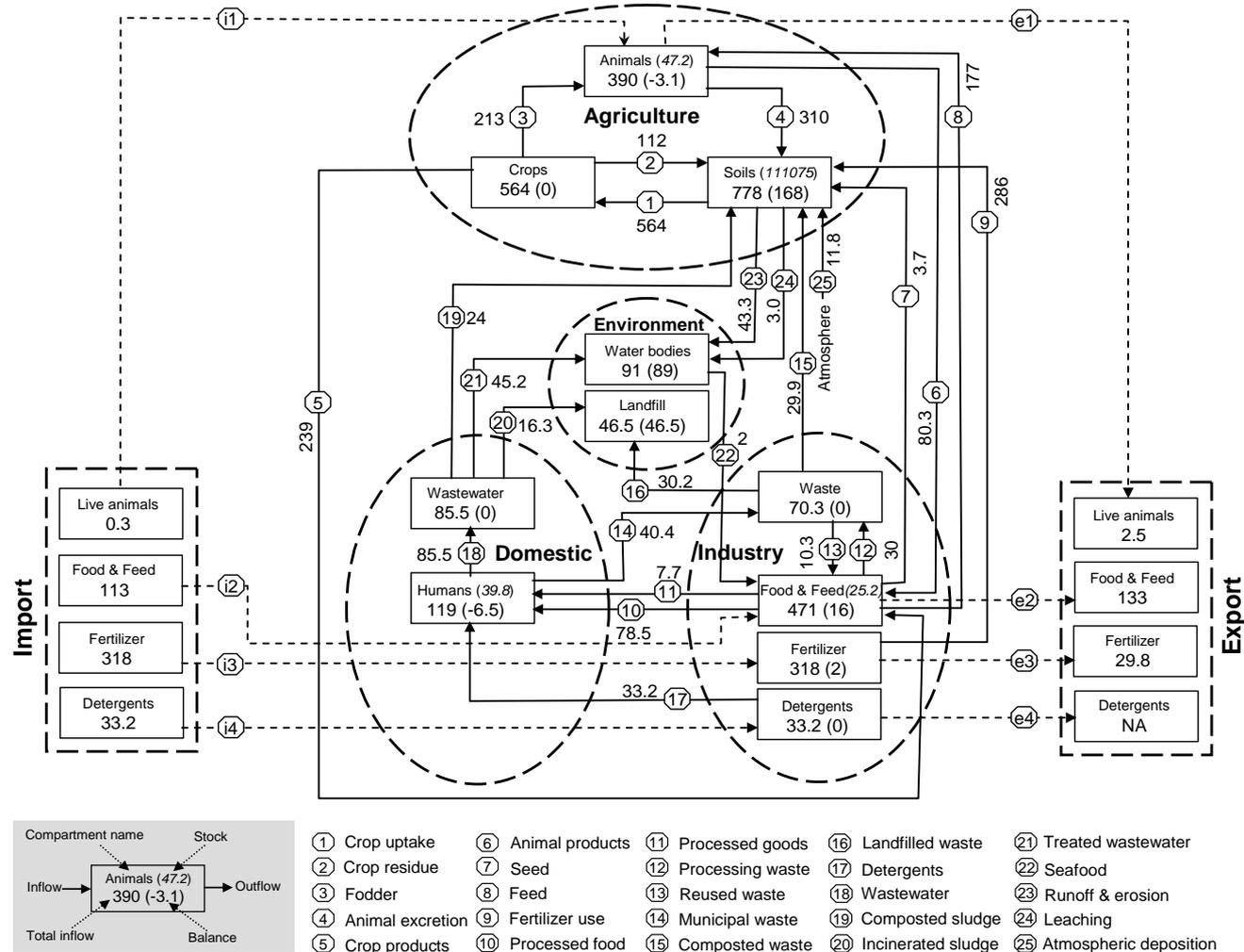
**Convergence avec d'autres objectifs agri-environnementaux (érosion, pesticides,...)**

## Les questions qui demeurent

- quels leviers mobiliser pour atteindre les objectifs de qualité des eaux de plus en plus exigeants?
- quelle est l'efficacité à long terme des motifs paysagers dédiés à l'abattement de la charge en P (puits > source?)
- quelles références, outils produire pour l'aide à la gestion des bassins versants agricoles satisfaisant simultanément plusieurs critères ( $\text{NO}_3^-$ , P, pesticides, GES,...)?

# Le cycle du P à l'échelle de la France (flux en kt P an<sup>-1</sup>)

- Un cycle ouvert (importations, exportations)
- dans lequel l'agriculture joue un rôle central (engrais, effluents, produits)
- en interaction avec d'autres secteurs (agro-alimentaire, domestique, eaux usées, déchets,...)



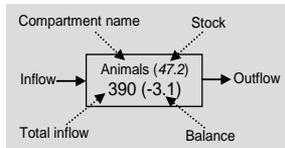
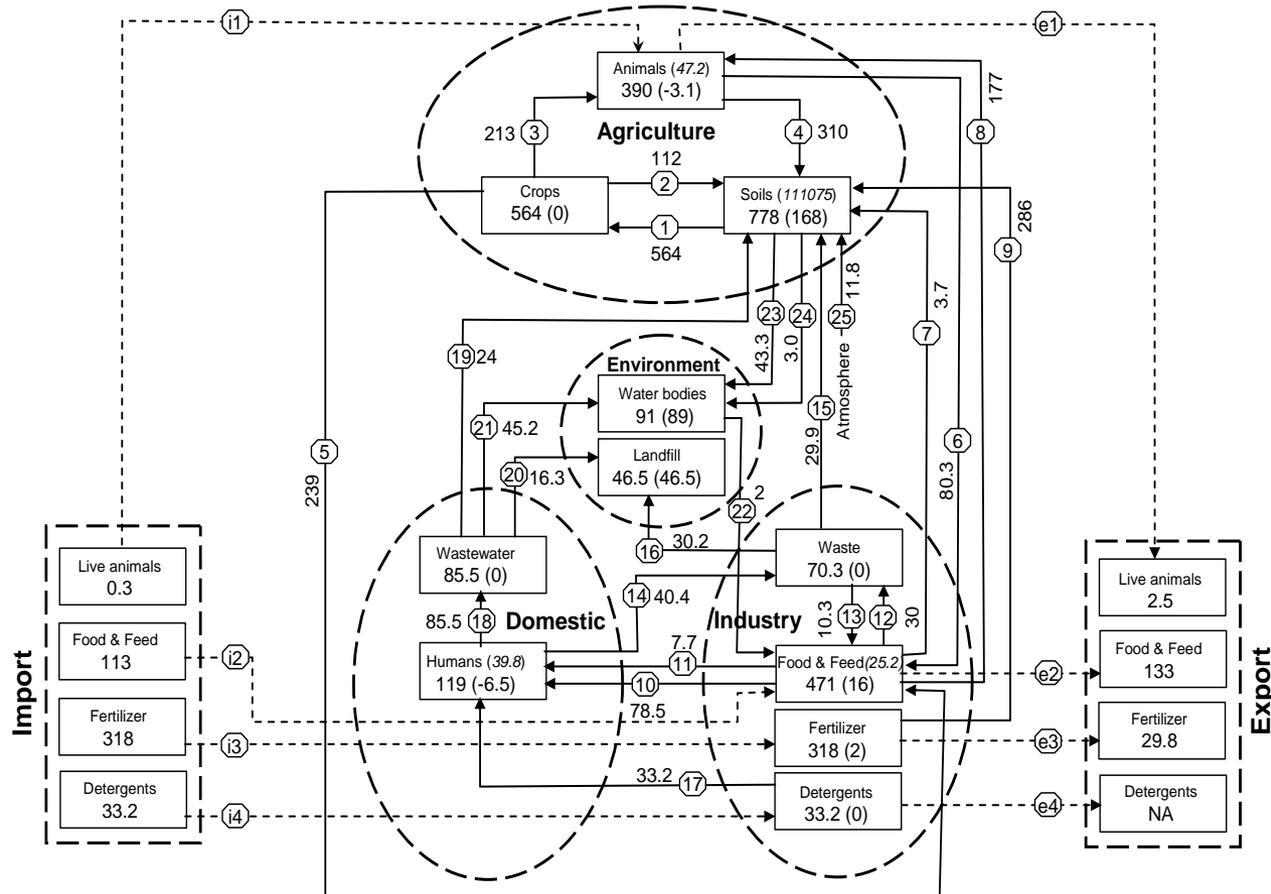
Globalement peu « efficient »

- les « pertes » (transferts vers les eaux, mise en décharge)

représentent 137.5 kt P an<sup>-1</sup>, soit 48% des importations nettes de fertilisants

- 28% seulement du P contenu dans les eaux usées est recyclé en agriculture via les boues

- 50% du P contenu dans les produits alimentaires se retrouvent dans les déchets ménagers, dont 40% seulement sont recyclés

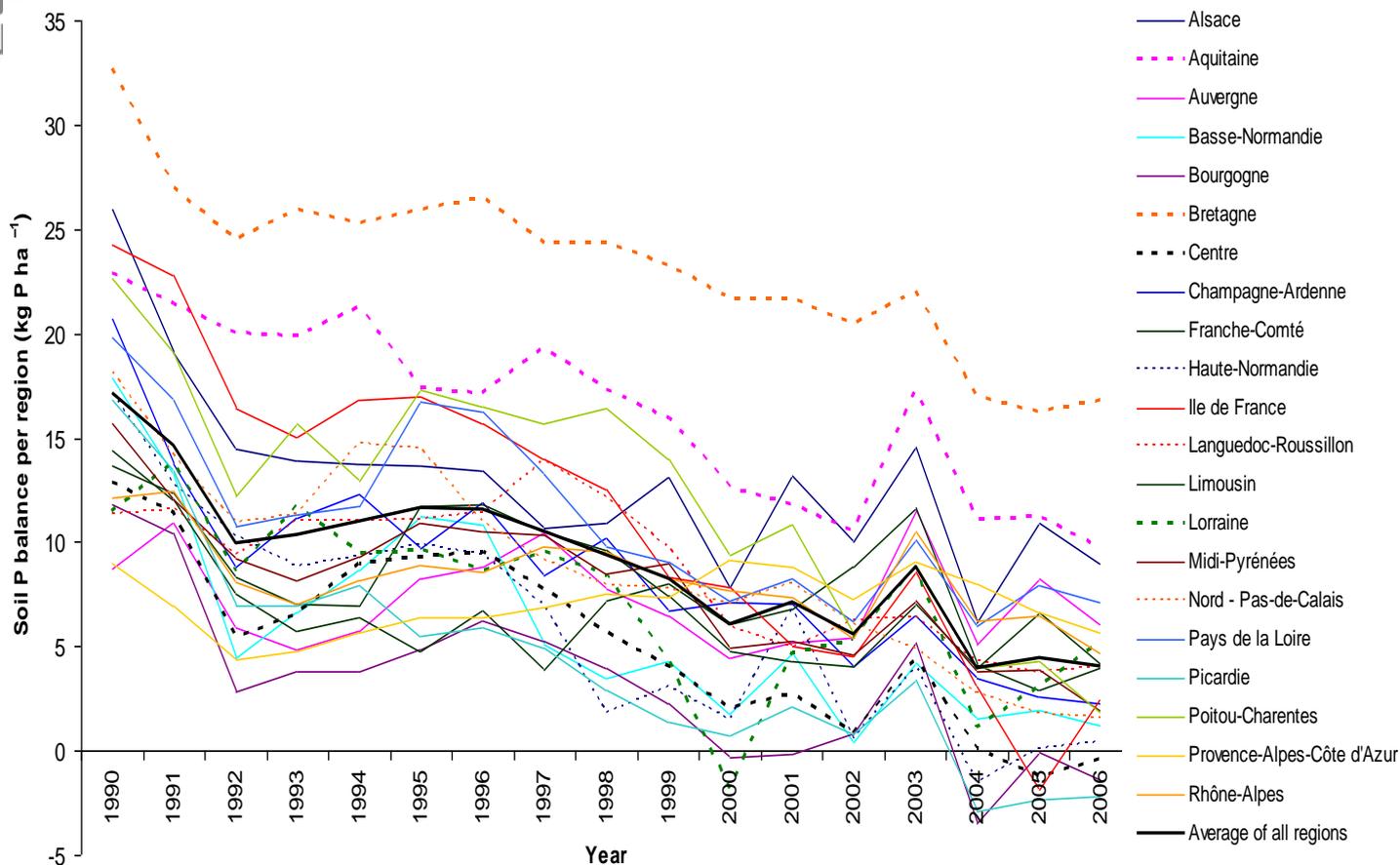


- |                    |                   |                    |                      |                          |
|--------------------|-------------------|--------------------|----------------------|--------------------------|
| ① Crop uptake      | ⑥ Animal products | ⑪ Processed goods  | ⑯ Landfilled waste   | ⑳ Treated wastewater     |
| ② Crop residue     | ⑦ Seed            | ⑫ Processing waste | ⑰ Detergents         | ㉑ Seafood                |
| ③ Fodder           | ⑧ Feed            | ⑬ Reused waste     | ⑱ Wastewater         | ㉒ Runoff & erosion       |
| ④ Animal excretion | ⑨ Fertilizer use  | ⑭ Municipal waste  | ㉓ Composted sludge   | ㉔ Leaching               |
| ⑤ Crop products    | ⑩ Processed food  | ⑮ Composted waste  | ㉔ Incinerated sludge | ㉕ Atmospheric deposition |

## Un excédent de bilan qui s'est réduit

Le bilan P global du territoire français est passé de + 18 kg P ha<sup>-1</sup> en 1990 à + 4 kg P ha<sup>-1</sup> en 2006

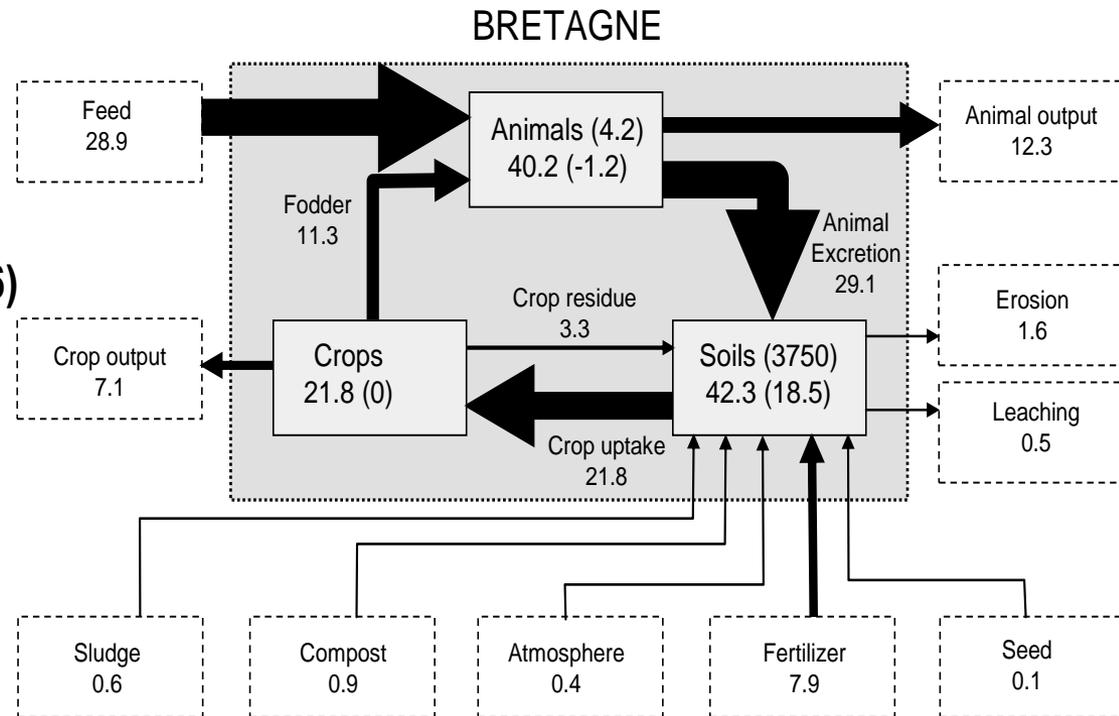
Avec des hétérogénéités inter-régionales fortes



Bilan P des sols des 21 régions françaises entre 1990 et 2006 en kg P ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> (in Kalimuthu, 2012)

**Bilan P des sols agricoles de la région Bretagne (Moyenne 2002-2006) (exprimé en kg P ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)**

- **Importations (38.8)**
  - 28.9 aliments du bétail
  - 7.9 engrais minéraux P
  - 2 autres (boues,...)
- **Exportations (21.5)**
  - 12.3 produits animaux
  - 7.1 produits végétaux
  - 2.1 érosion, lessivage
- **Solde de +17.3 kg P ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>**



⇒ Le bilan P serait moins excédentaire en l'absence d'entrées sous forme d'engrais minéraux P, mais il le resterait quand même du fait des aliments du bétail importés

## Bilan P des sols agricoles de la région Centre (Moyenne 2002-2006) (exprimé en kg P ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)

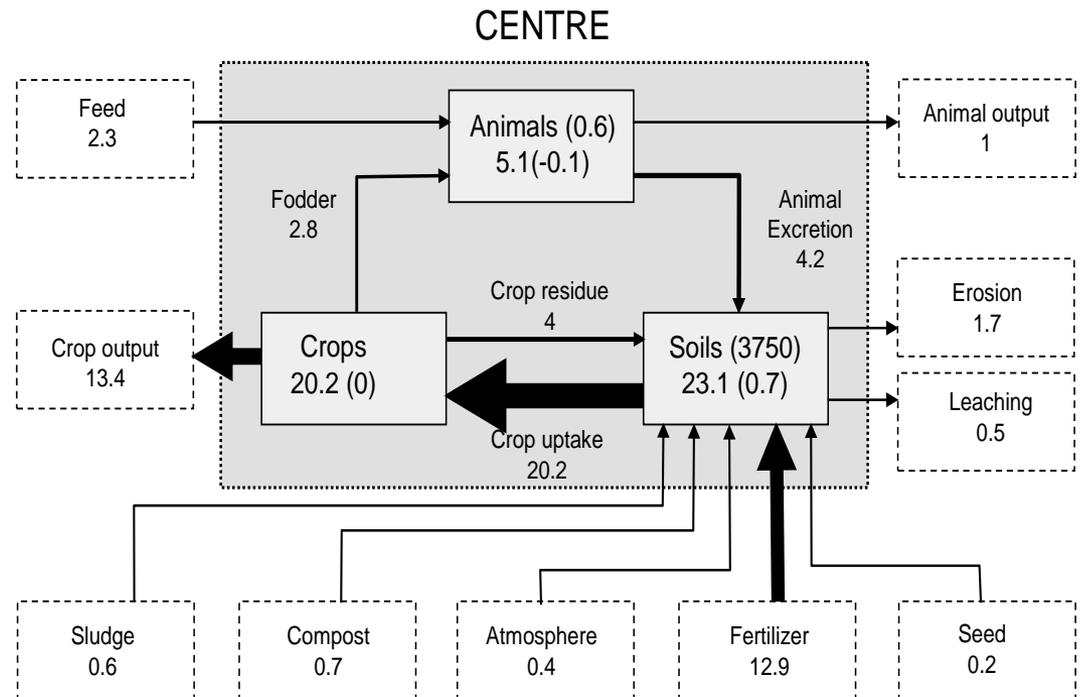
### - Importations (17.1)

- 2.3 aliments du bétail
- 12.9 engrais minéraux P
- 1.9 autres (boues,...)

### - Exportations (16.6)

- 1 produits animaux
- 13.4 produits végétaux
- 2.2 érosion, lessivage

- Solde de +0.5 kg P ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>



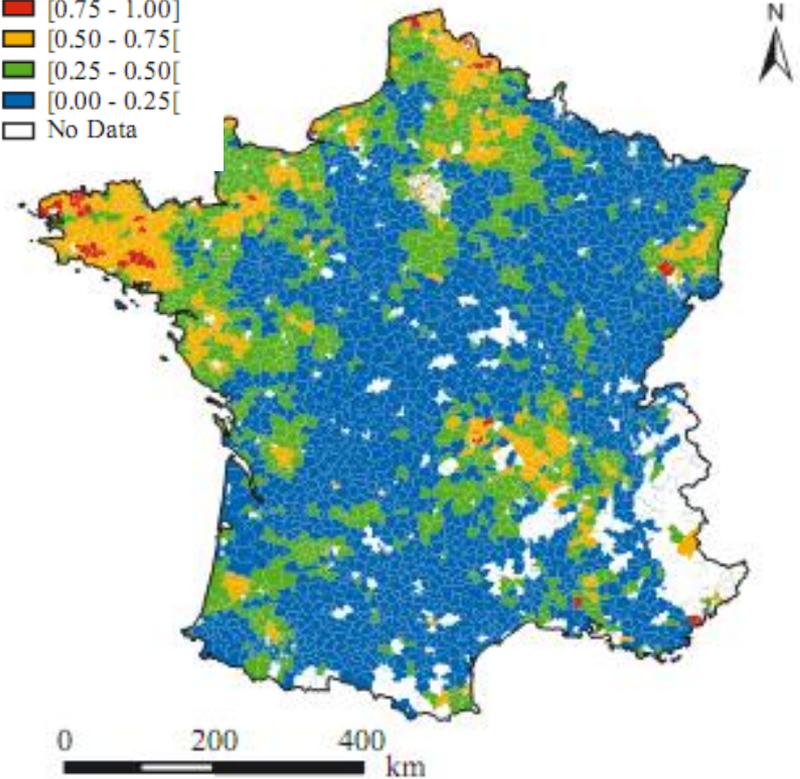
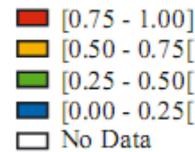
⇒ le bilan P des sols est équilibré mais au prix d'une importation d'engrais minéraux P de synthèse

Les teneurs en P dans les sols français, et leur évolution récente, reflètent l'hétérogénéité spatiale des bilans

- valeurs très supérieures aux besoins des cultures et tendance à la hausse dans les zones d'élevage intensif de l'Ouest

- valeurs plus proches de l'optimum ailleurs

Frequencies:



**Fréquence des analyses de terre pour lesquelles la teneur en P extractible est supérieure au seuil d'impassé pour les cultures les plus exigeantes en P.** Carte réalisée à l'échelle cantonale, d'après la base de donnée d'analyses de terre (BDAT, 850806 résultats d'analyse sur la période 1990-2004) et le logiciel d'interprétation INRA Regifert (d'après Follain et al., 2009)

## Questions qui demeurent

- Comment rendre l'agriculture française moins dépendante des importations d'engrais minéraux P?
- Sur quel segment du cycle intervenir? Où sont les marges de manoeuvre?
  - recyclage du P d'origine urbaine (épandage des boues? Struvite?)
  - Transport des effluents d'élevage?
  - Ré-associer agriculture et élevage?
- Quelle évaluation économique, sociale, environnementale?

## Synthèse

- les progrès des connaissances et l'élaboration d'outils d'aide à la décision largement diffusés ont permis une bonne maîtrise de la fertilisation phosphatée (même si des progrès sont encore possibles et nécessaires). Ces outils ont accompagné une réduction raisonnée des apports
- les difficultés qui subsistent sont de nature plus structurelle (découplage agriculture/élevage)
- l'évolution des enjeux appelle un changement de paradigme: raisonnement de la fertilisation  $\Rightarrow$  gestion d'une ressource; ce changement s'accompagne d'un nécessaire élargissement des échelles
- les 3 « points de vue » (nutrition des plantes, qualité des hydrosystèmes, gestion durable de la ressource) sont indissociables