

# Limitation du rendement potentiel actuel par le phosphore à l'échelle mondiale

Bruno Ringeval  
ISPA



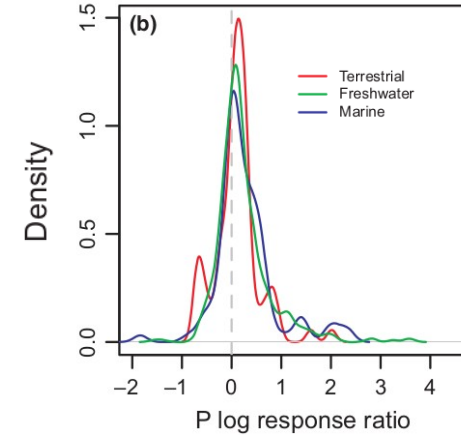
INRAE



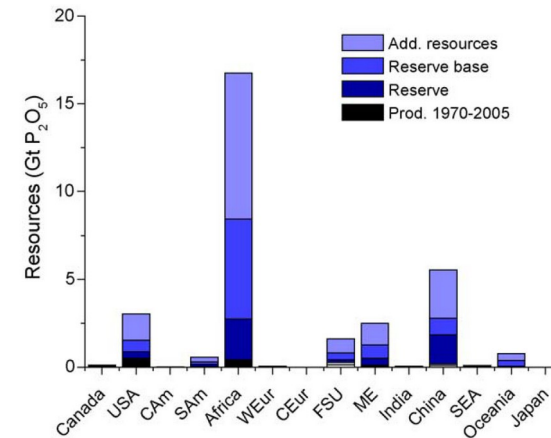
BORDEAUX  
SCIENCES  
AGRO

# Contexte

- P : élément fondamental des organismes vivants
- Ecosystème terrestre « naturels » : P peut être limitant
- Agroecosystèmes : limitation peut être exacerbée par exports de P contenu dans les récoltes  
=> fertilisants
- Fertilisants chimiques en P: accès à la ressource limité et/ou incertain (tensions géopolitiques)



Harpole et al., 2011

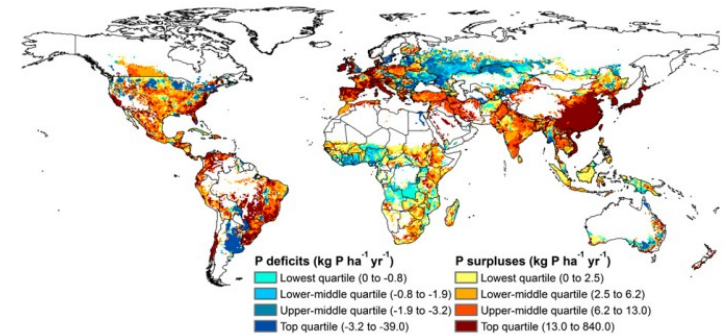


Van Vuuren et al., 2010

# Contexte

- Gestion de la ressource en P : non-optimale à l'échelle globale
- Mais bilan ponctuel de P au niveau du sol : mauvais indicateur
- Nécessité de prendre en compte le fond biogéochimique, les bilans cumulés dans le temps et la dynamique du P du sol

Fertilisants chimiques (14.2 TgP/yr) +  
fertilisants organiques (9.6 TgP/yr) > P  
dans les récoltes (12.3 Tg/yr)



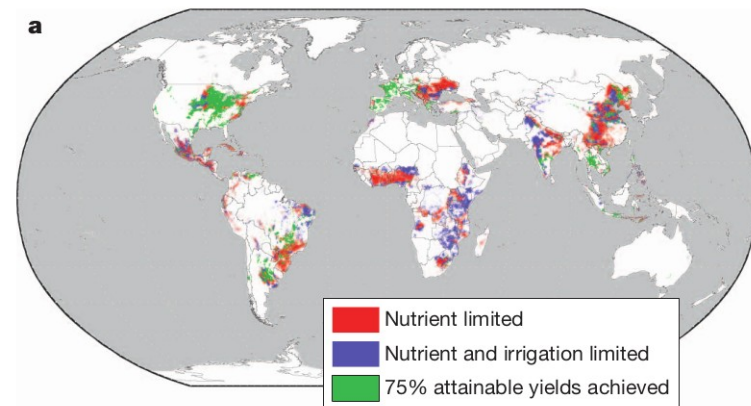
MacDonald et al., 2011

# Contexte

- Ions ortophosphates : adsorbés sur les particules de sol, concentration faible, importance de la diffusion et du réapprovisionnement de la solution
- Représentation mécaniste à l'échelle globale pas simple

# Contexte

- Limitation en nutriment : rôle dans 70 % des surfaces où le rendement est limité
- Relation entre P du sol et rendement loin d'être comprise à l'échelle globale :
  - Difficultés de modéliser le cycle du P à l'échelle globale
  - Difficultés de disposer de cartes de P du sol à l'échelle mondiale
  - Interaction entre P et autres facteurs limitants

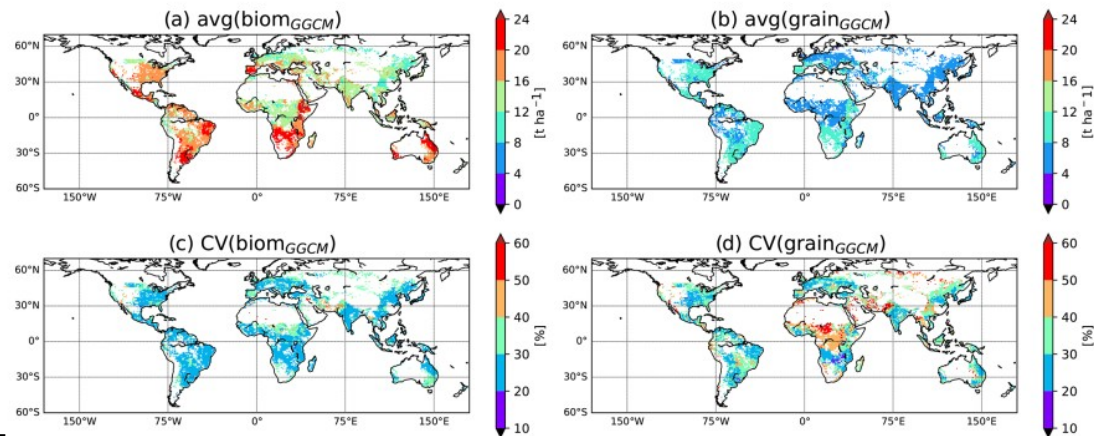


Mueller et al. 2012

# Contexte méthodo

- Approches statistiques ou bases de données
- Global Gridded Crop Models (GGCMs) :
  - Modèles de biosphère terrestre
  - Modèles de culture spatialisés

Mais : peu de GGCMs représentent le P, modèles complexes, hétérogénéité pour des variables clés, mécanismes manquant (par ex, mécanismes d'ajustement de la plante)



# Approche

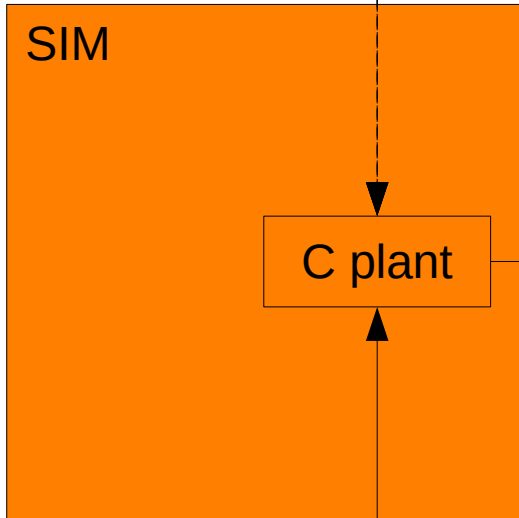
- Approche de modélisation mécaniste, simple, indépendante des GGCMs, pour simuler les interactions entre plante et P du sol à l'échelle journalière pendant une saison de croissance, à l'échelle globale
- Focus sur P : pas d'autres facteurs limitant considérés
- **Comment P limite le rendement potentiel actuel ?**

# Methode

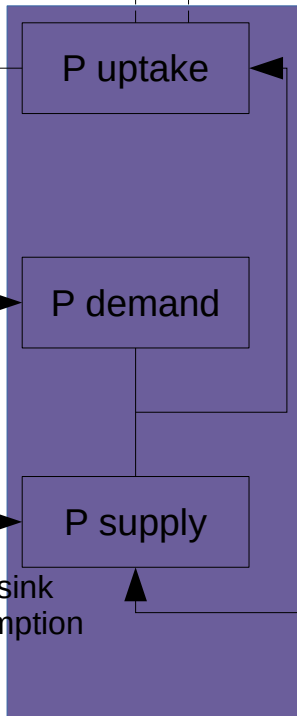
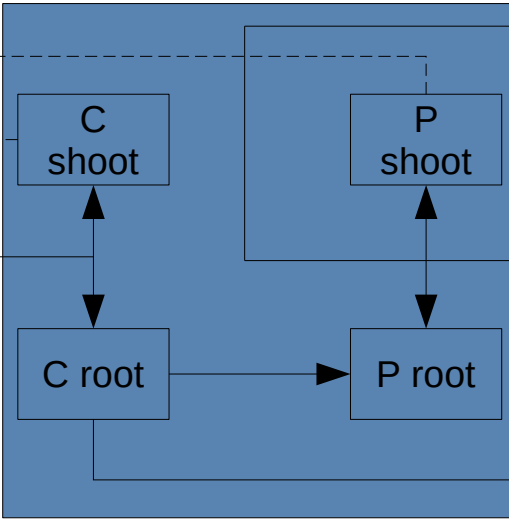
- GPCROP
- Mais, demi-degré lat x lon de résolution spatiale, pas de temps journalier
- Couplage de ~4 modèles existants



Potential growth model



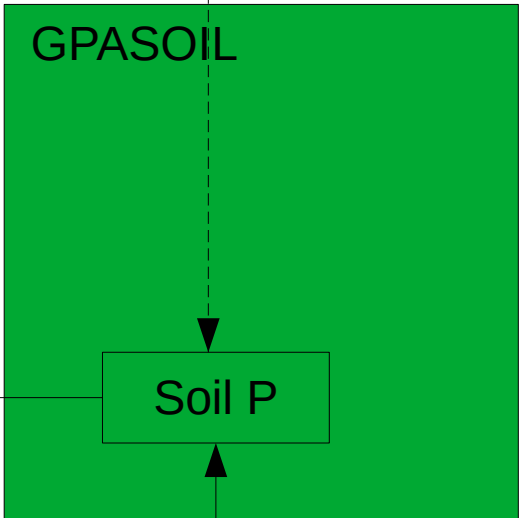
**C and P allocation model**



Zero-sink assumption

**P supply/demand model**

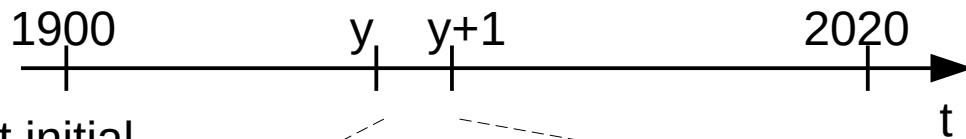
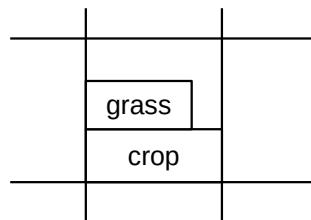
**Soil P dynamic model**



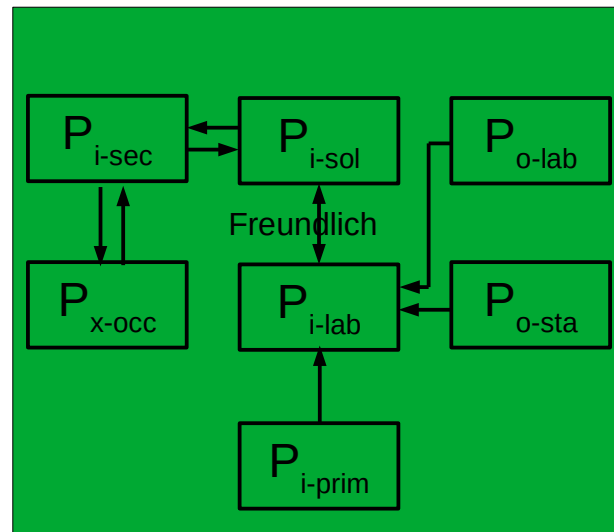
soil P input/output, soil properties, initial soil P pools, current value of unmanaged soil P pools

# Evolution de la biodisponibilité en P dans les sols agricoles

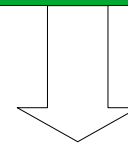
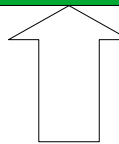
Pour chaque maille :



État initial  
~ P des sols  
« naturels »



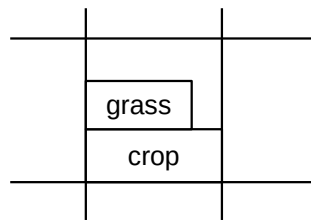
Fertilisants chimiques, organiques, résidus  
Dépôts atmosphériques  
Boues  
Land-use



Prélèvement par  
les plantes  
Erosion  
Land-use

# Evolution de la biodisponibilité en P dans les sols agricoles

Pour chaque maille :



1900

y

y+1

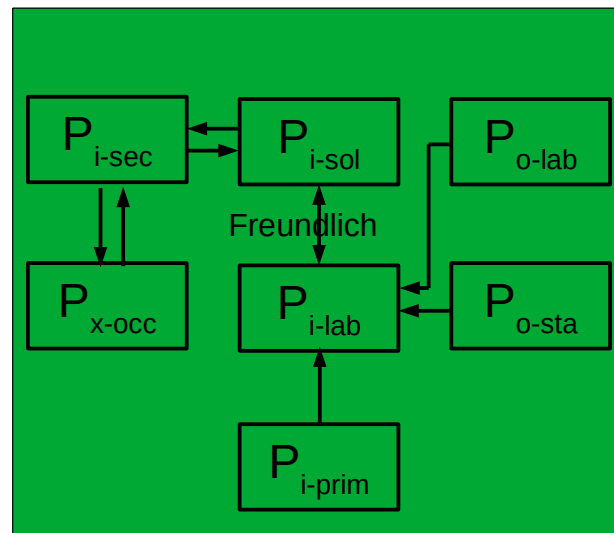
2020

t

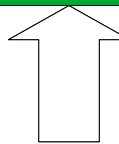
État initial  
~ P des sols  
« naturels »

He et al. 2021, 2023

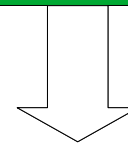
- Meta-analyses de mesures Hedley
- Random Forest



Fertilisants chimiques, organiques, résidus  
Dépôts atmosphériques  
Boues  
Land-use

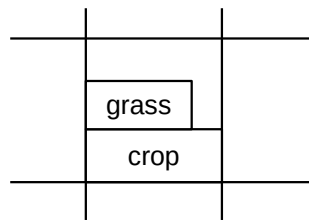


Prélèvement par  
les plantes  
Erosion  
Land-use



# Evolution de la biodisponibilité en P dans les sols agricoles

Pour chaque maille :



- Input/output de P du sol et état initial: BDD globales

- Modèle de dynamique du P du sol

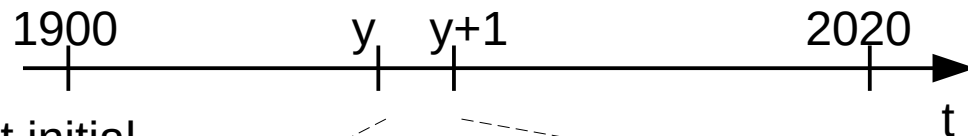
- Hedley

- Flux : Wang et al. 2022

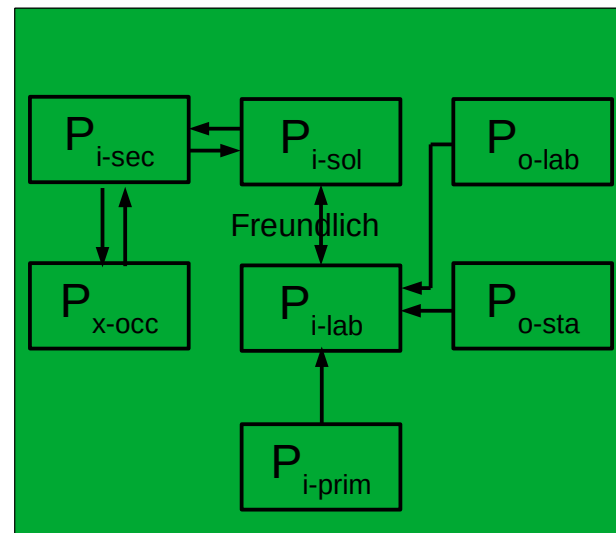
- optimization of flux parameters vs IEK experiments on 150 sites

- optimized parameters vs pedo-climatic variables

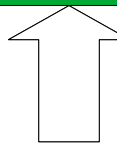
- organique...



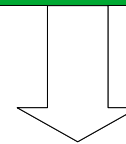
État initial  
~ P des sols  
« naturels »



Fertilisants chimiques, organiques, résidus  
Dépôts atmosphériques  
Boues  
Land-use



Prélèvement par les plantes  
Erosion  
Land-use

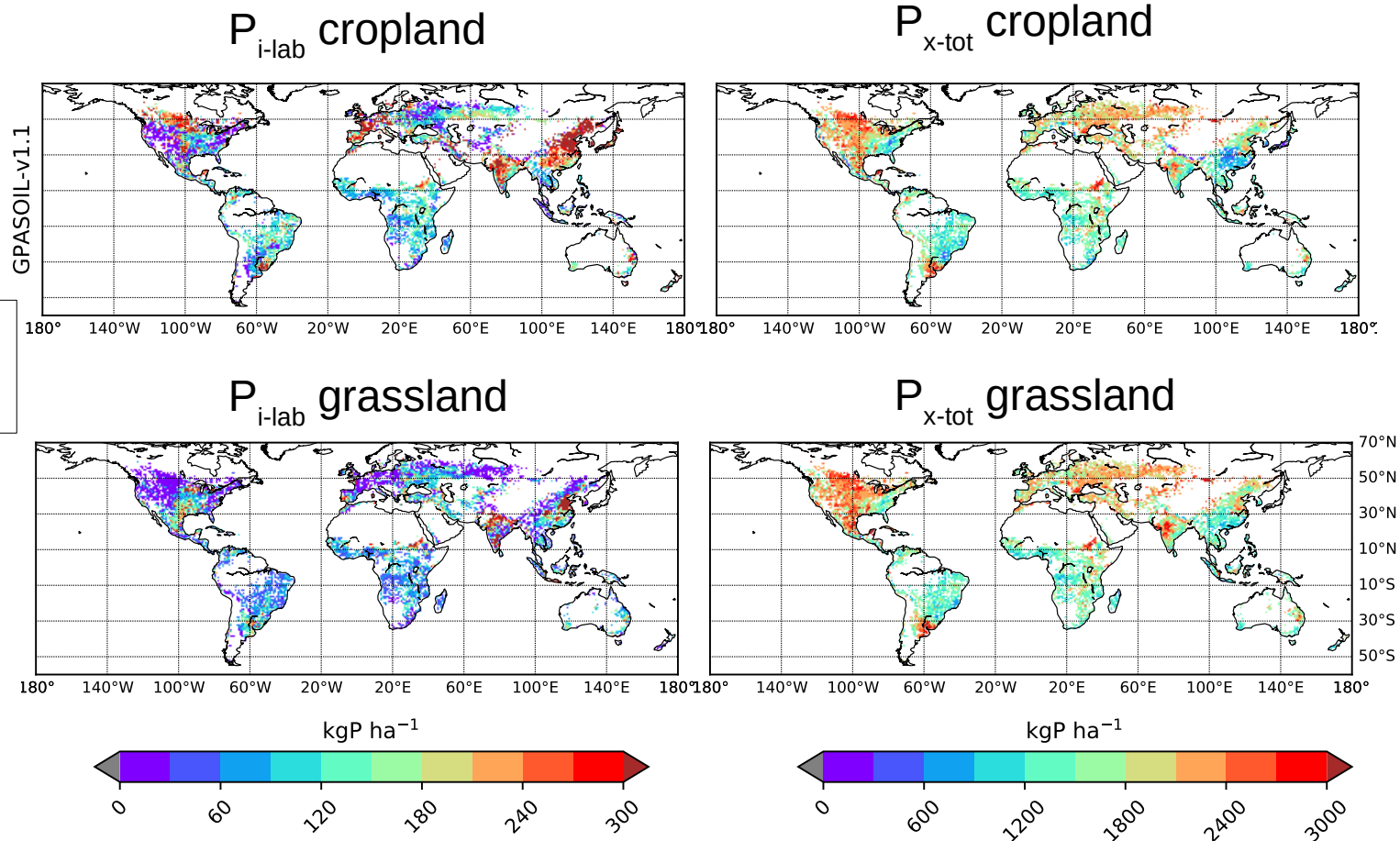


# Evolution de la biodisponibilité en P dans les sols agricoles

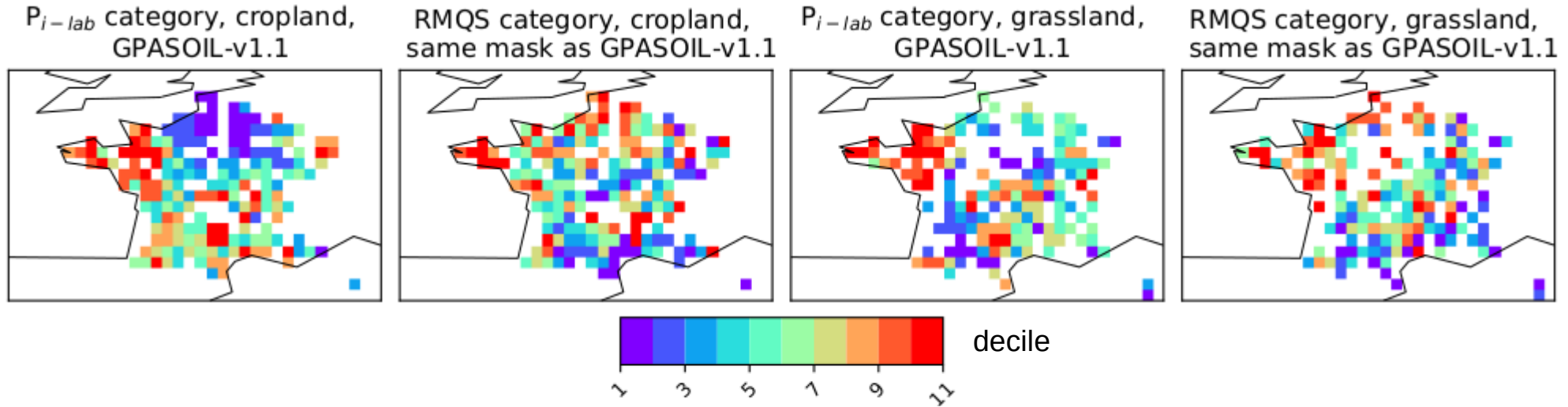
- 187 kgP/ha for top 0.3m
- CV=0.22

Incertitude liées aux BDD pour les différents drivers

- 91 kgP/ha for top 0-0.3m
- CV=0.54

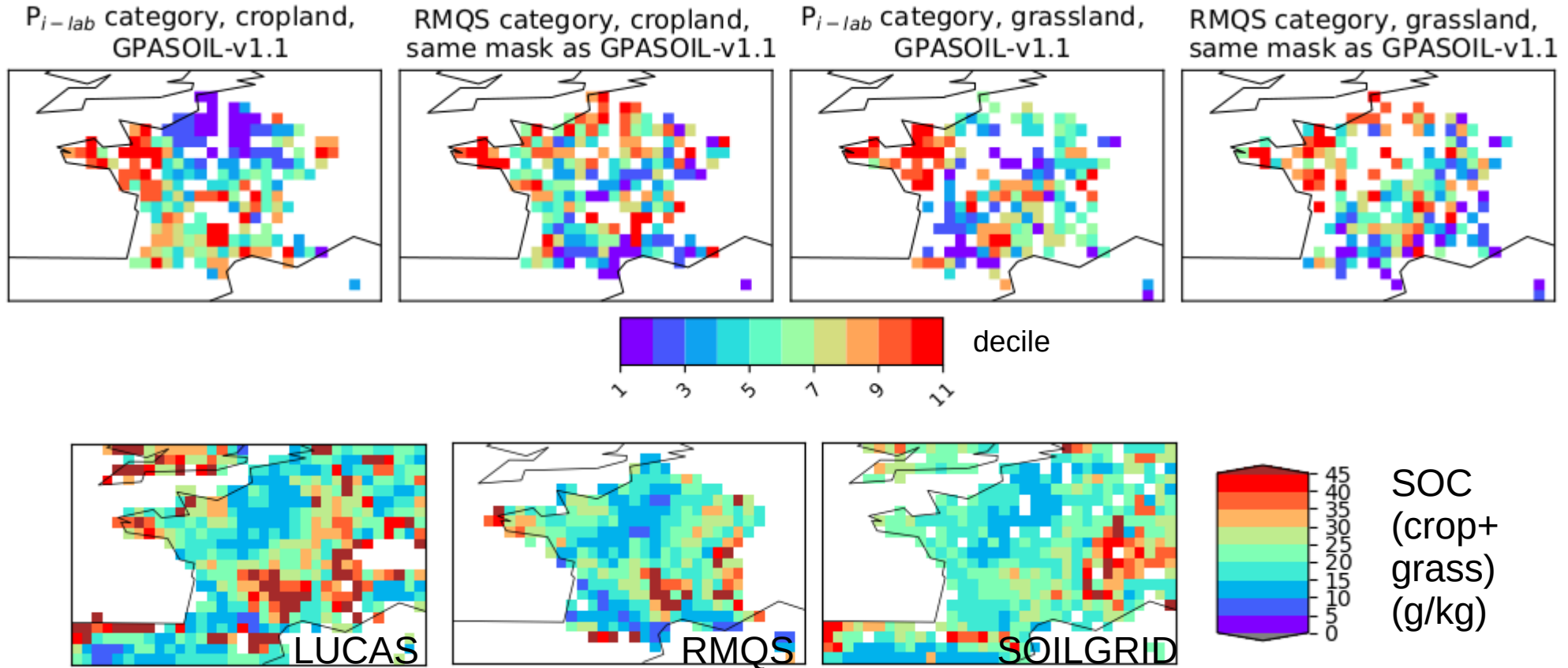


# Evolution de la biodisponibilité en P dans les sols agricoles, évaluation



- Difficulté à reproduire la variabilité à plus fine échelle (seule disponible)

# Evolution de la biodisponibilité en P dans les sols agricoles, évaluation

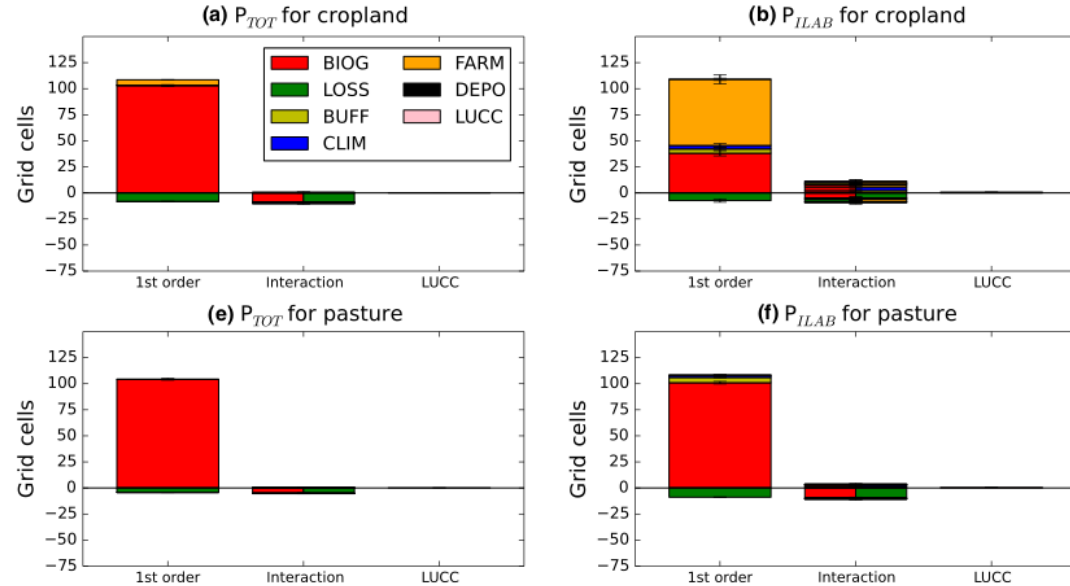


- Difficulté à reproduire la variabilité à plus fine échelle (seule disponible)
- Input : BDD globale vs BDD régionale

# Evolution de la biodisponibilité en P dans les sols agricoles, contribution des différents drivers

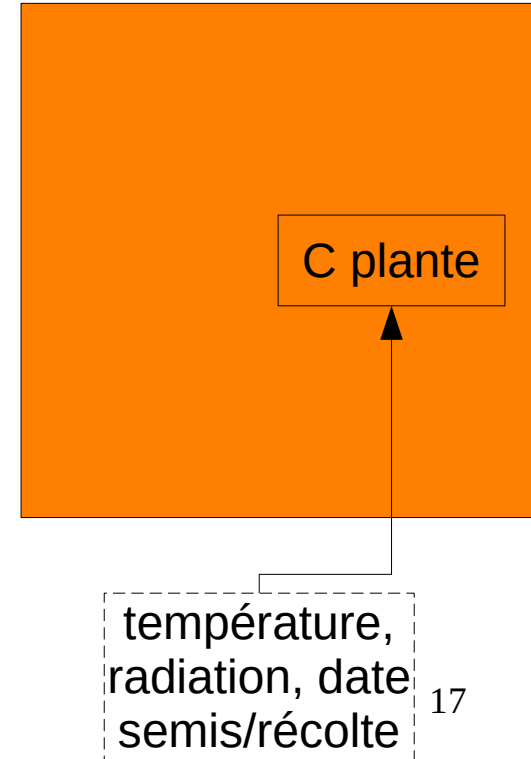
- Spatial variability at the global scale:  $P_{TOT} < P_{ILAB}$
- $P_{TOT}$ : BIOG (~100%);  $P_{ILAB}$ : BIOG (~40) and FARM (~60%)
- Cropland vs pasture
- (Grid-cell vs. continents)

## Contribution à la variabilité spatiale (%)



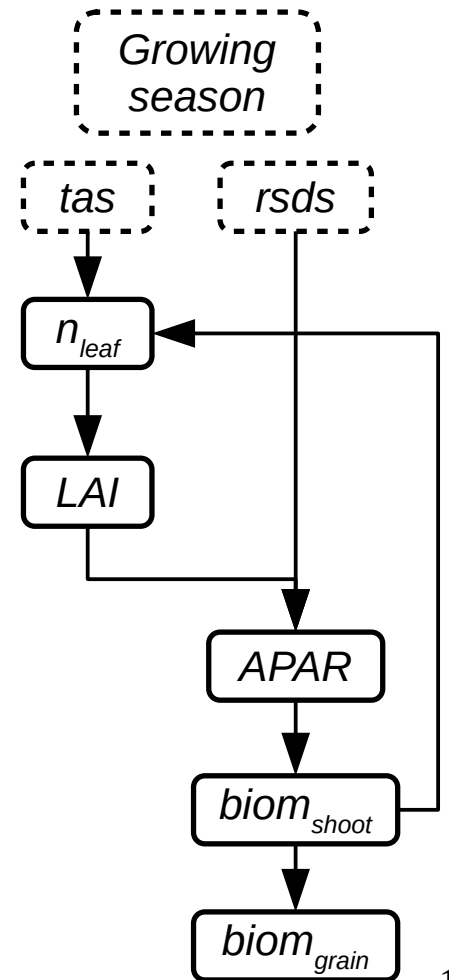


# Mise en place du rendement potentiel



# Mise en place du rendement potentiel

- Modèle hyper simple pour maïs (peu de paramètres !) :
  - crop phenology by a sum of growing degree days + limited by carbohydrates
  - canopy radiation absorption by the Beer–Lambert law
  - conversion into aboveground biomass by a radiation use efficiency (RUE)
  - grain filling

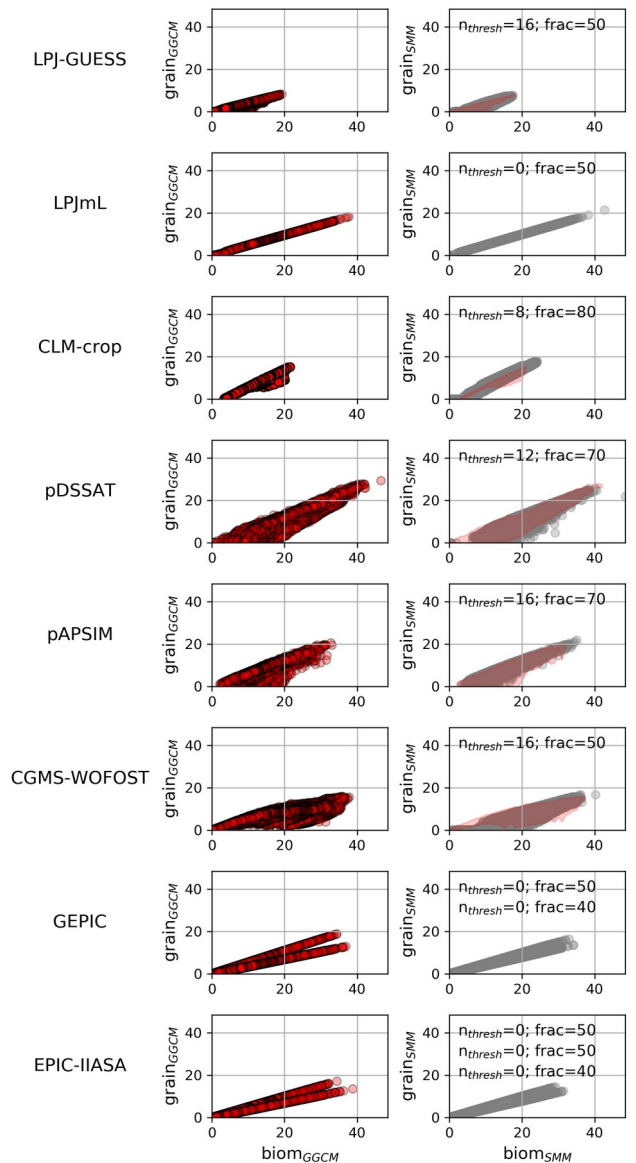


# Mise en place du rendement potentiel

- Modèle hyper simple pour maïs (peu de paramètres !)
- Utilisé comme émulateur de GGCMs (intercomparaison) (Ringeval et al. 2021)

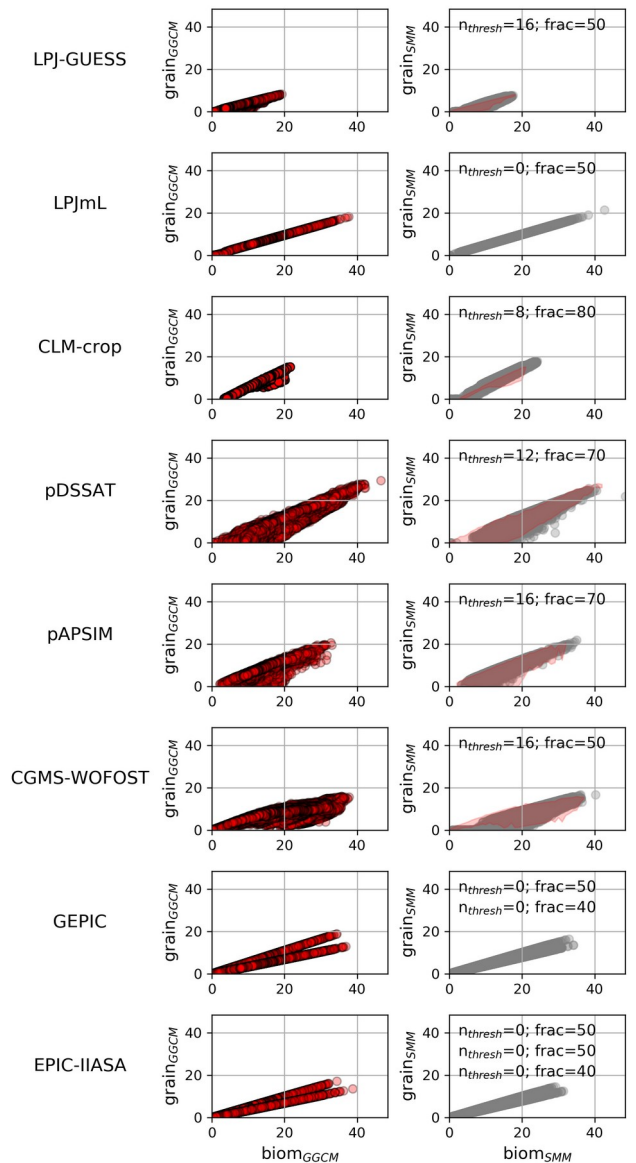
# Mise en place du rendement potentiel

- Modèle hyper simple pour maïs (peu de paramètres !)
- Utilisé comme émulateur de GGCMs (intercomparison) (Ringeval et al. 2021)
  - Même formalisme mais paramètres variables entre-modèles expliquent la diversité des simulations entre-modèles



# Mise en place du rendement potentiel

- Modèle hyper simple pour maïs (peu de paramètres !)
- Utilisé comme émulateur de GGCMs (intercomparison) (Ringeval et al. 2021)
  - Même formalisme mais paramètres variables entre-modèles expliquent la diversité des simulations entre-modèles
  - Stratégie de choisir un seul GGCM pour simuler le rendement potentiel : pas bonne stratégie



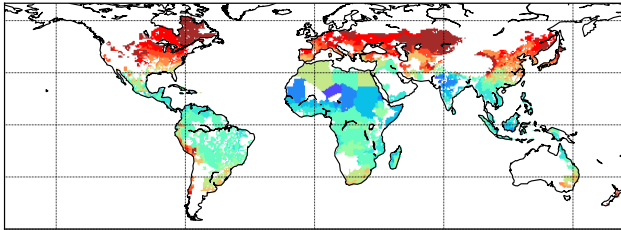
# Mise en place du rendement potentiel

- Modèle hyper simple pour maïs (peu de paramètres !)
- Utilisé comme émulateur de GGCMs (intercomparaison) (Ringeval et al. 2021)
- Calibré vs. données statistiques de rendement potentiel (Mueller et al. 2012) et sélection de combinaisons de paramètres clés

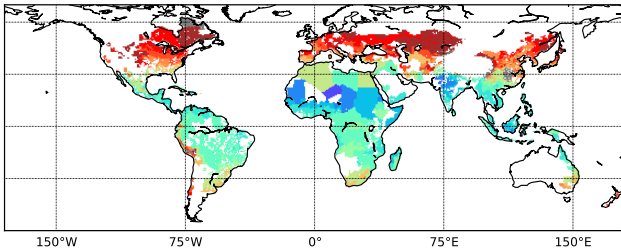
# Mise en place du rendement potentiel

- 11 paramètres
- 3 param avec peu d'effet (Sobol)
- 3 valeurs pour chacun des 8 param restant ( $3^8$  combinaisons) (littérature)
- Sélection pour chaque maille des combinaisons qui conduisent à  $|biom_{grain}^{target}(g, t_m) - biom_{grain}(g, t_m)| < 0.5t \text{ DM ha}^{-1}$

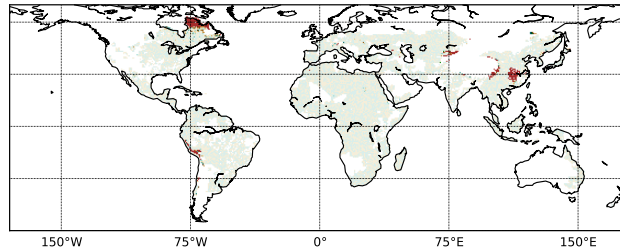
a)  $biom_{grain}^{target}$



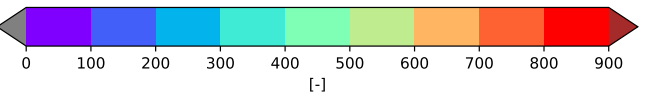
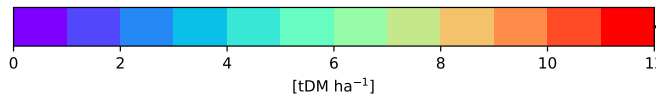
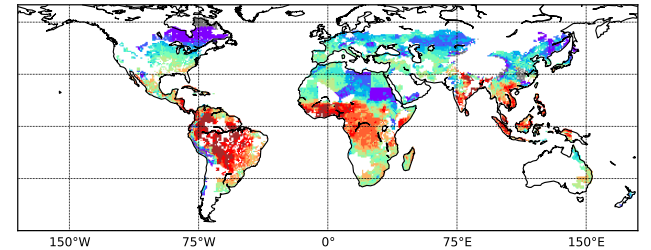
b)  $biom_{grain}$



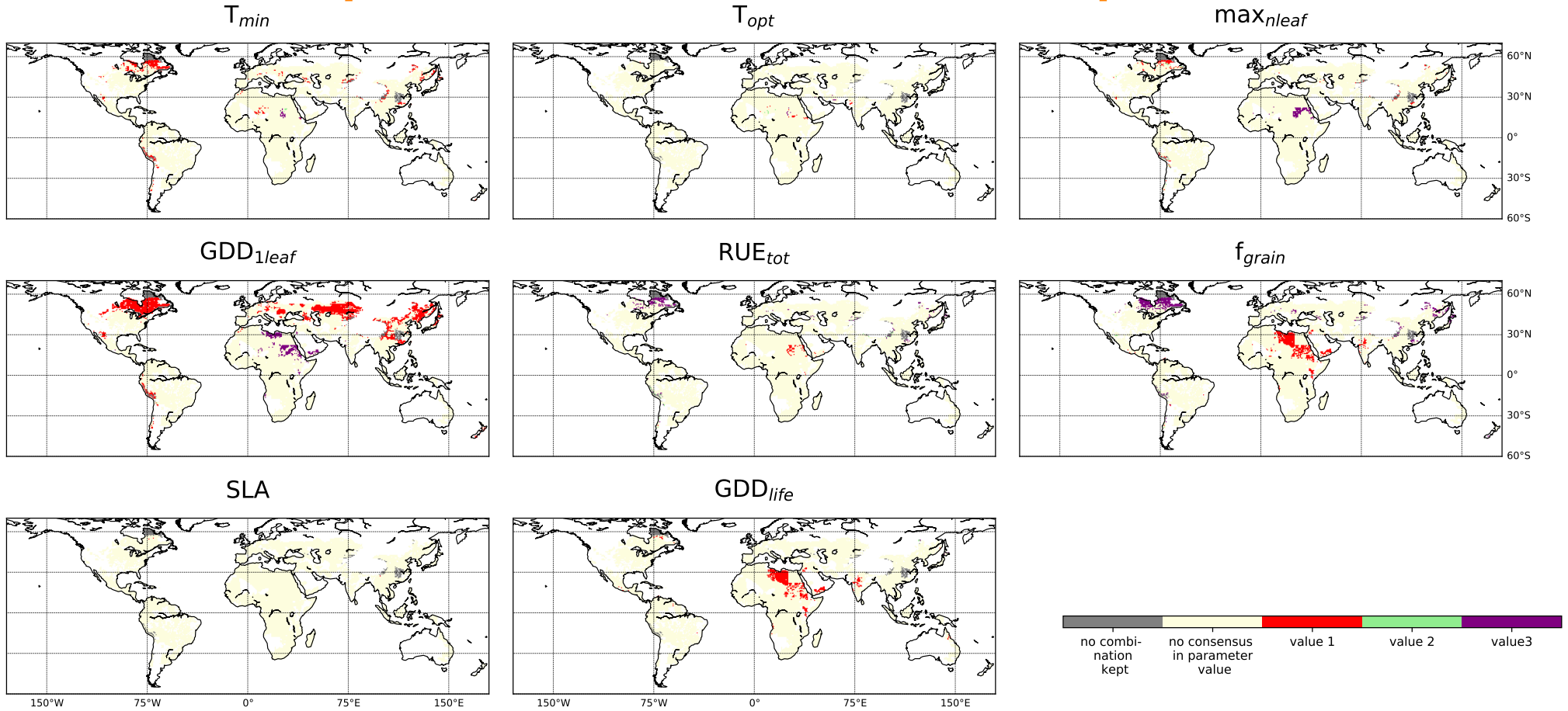
c)  $biom_{grain}^{target} - biom_{grain}$



d) nb of combinations kept



# Mise en place du rendement potentiel



Opportunité de contraindre les combinaisons qui satisfont la contrainte de calibration ?



# Mise en place du rendement potentiel

- Modèle hyper simple (mais) (peu de paramètres !)
- Utilisé comme émulateur de GGCMs (intercomparaison) (Ringeval et al. 2021)
- Calibré vs. données statistiques de rendement potentiel (Mueller et al. 2012) et sélection de combinaisons de paramètres clés
- Ou calibré à l'échelle du site

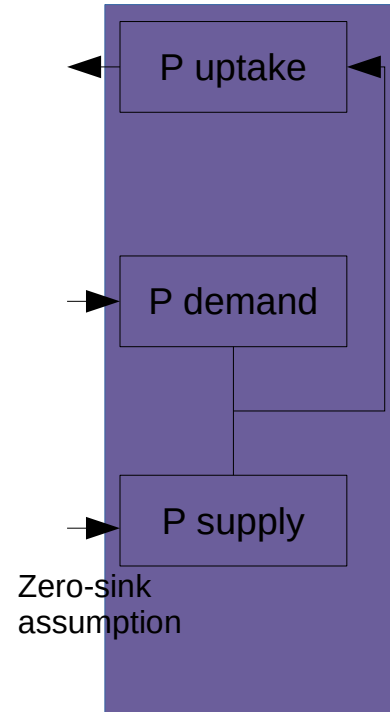
# P demand, P supply, P uptake

Hypothèse « zero-sink assumption »

$$P_{supply} = f(biom_{root}, C_P)$$

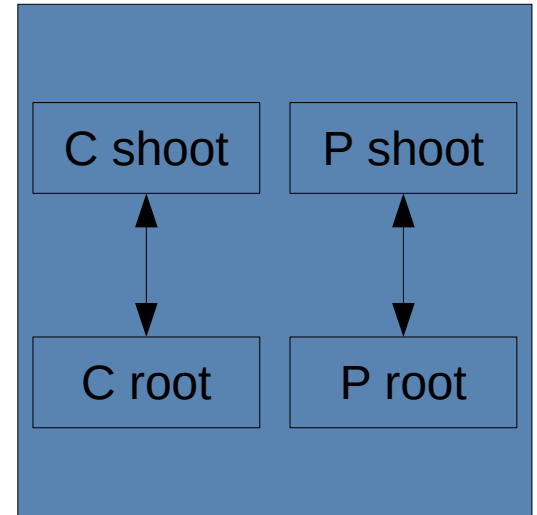
$$P_{demand} = f\left(\sum_{organ} (\Delta biom_{organ} \cdot conc_{organ})\right)$$

$$P_{demand}(d) \leq P_{supply}(d)$$

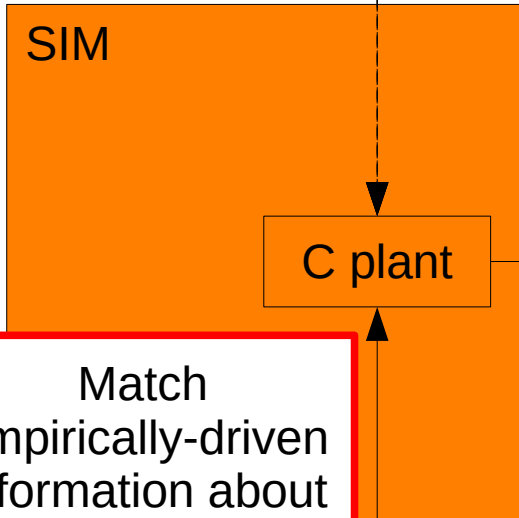


# Ajustements de la plante à une limitation en P

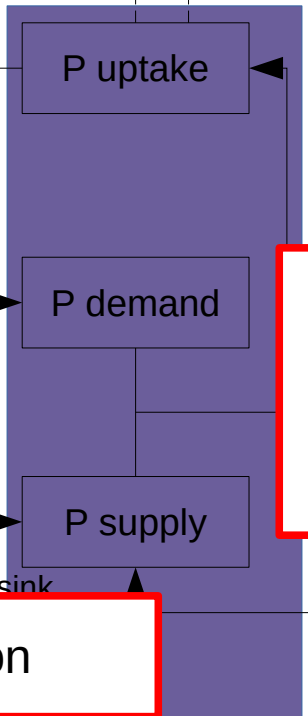
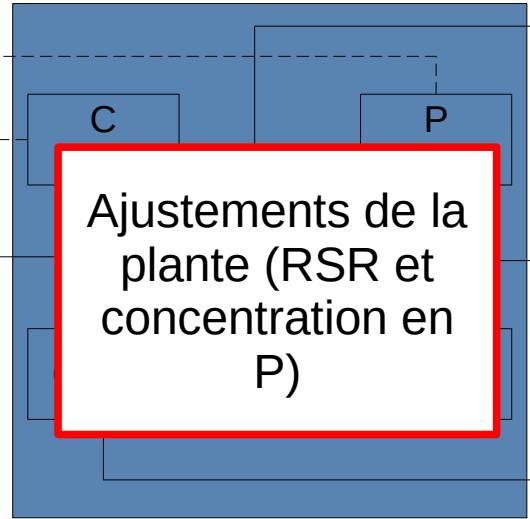
- Allocation optimisée de C et P (Kvackic et al. 2020)
- Given a limited supply of C and P, how can they be distributed to maximize plant growth?
- Objective : maximize ( $\text{biom}_{\text{shoot}}$ )
- Linear programming
- $\text{RSR}_{\min} < \text{RSR} < \text{RSR}_{\max}$  ;  $\text{conc}_{\min} < \text{conc}_{\text{shoot}} < \text{conc}_{\max}$
- Trade-off at plant level :
  - Biomass  $\rightarrow$  shoot  $\Rightarrow$  photosynthesis + but P uptake -
  - High P concentration of shoot  $\Rightarrow$  photosynthesis + but P demand +
- Evaluated against hydroponic dataset + Tartas



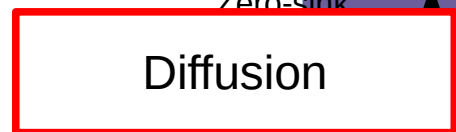
Plant growth model



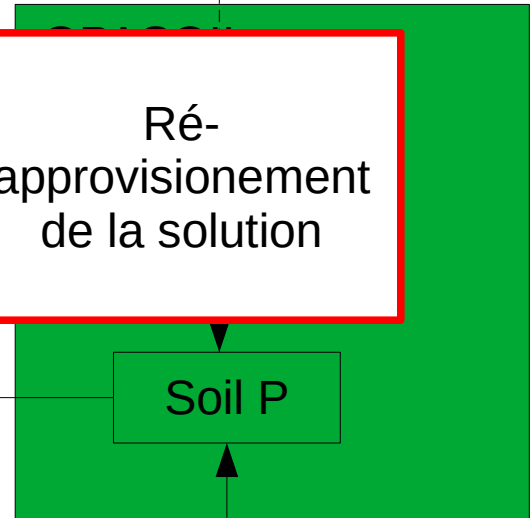
### C and P allocation model



### P supply/demand model



### Soil P dynamic model



soil P input/output, soil properties, initial soil P pools, current value of unmanaged soil P pools

# 3 configurations et 2 échelles

- **Configurations :**

- **GPCROP<sub>no-intera</sub>** : pas d'interaction entre croissance de la plante et P  ~~$P_{demand}(d) \leq P_{supply}(d)$~~

- **GPCROP<sub>non-optim</sub>** : interaction (pour  $n_{leaf} \geq 1$ ) mais pas d'ajustements de la plante ;

~~$RSR_{min} < RSR < RSR_{max}$  ;  $conc_{min} < conc_{shoot} < conc_{max}$~~

- **GPCROP<sub>optim</sub>** : interaction (pour  $n_{leaf} \geq 1$ ) et ajustements de la plante :  $RSR_{min} < RSR < RSR_{max}$  ;

$conc_{min} < conc_{shoot} < conc_{max}$

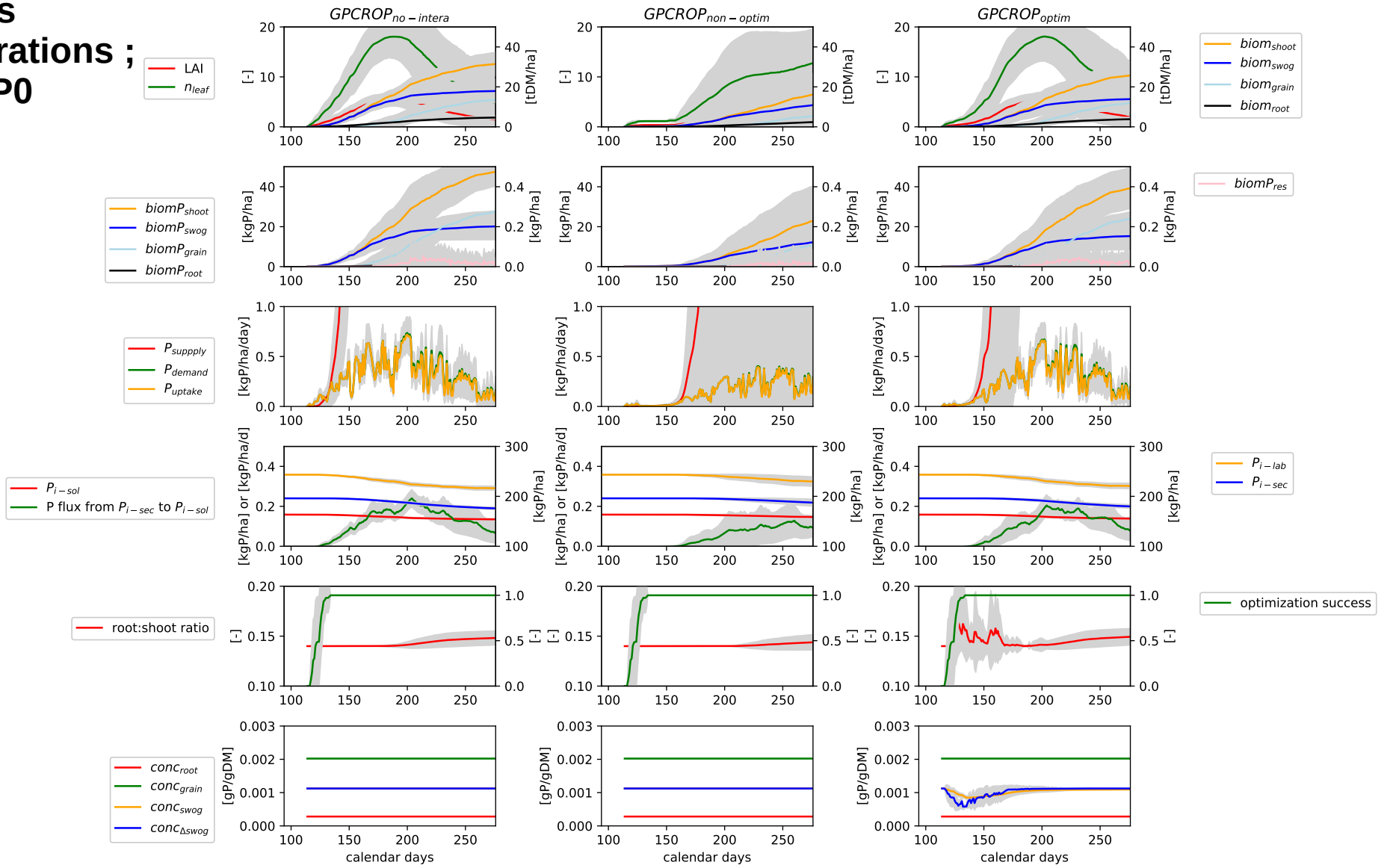
- **Echelles spatiales :**

- **Site** : Tartas (P0, P1.5, P3) ; conditions « sol » locales

- **Globale**

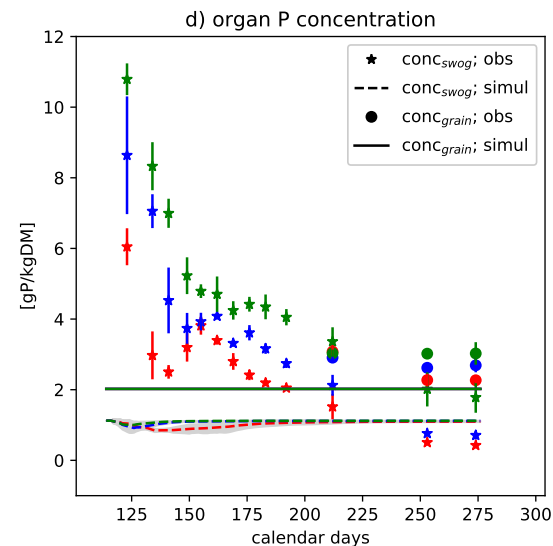
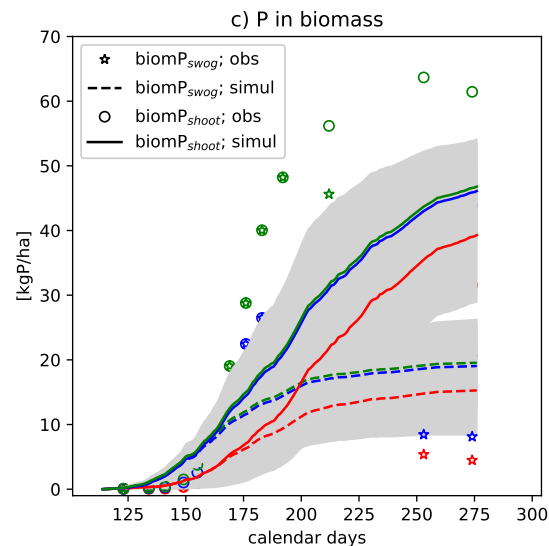
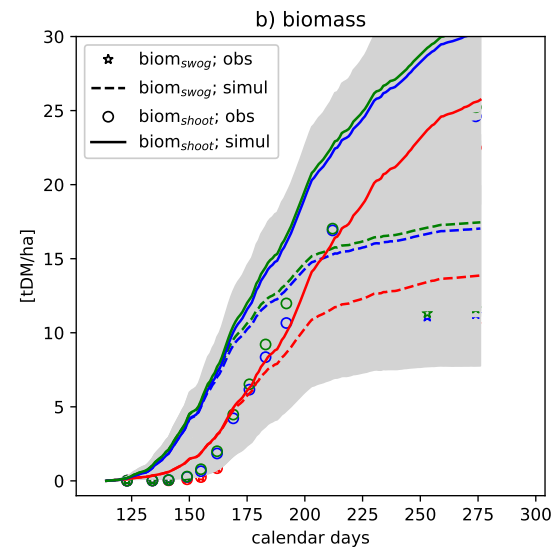
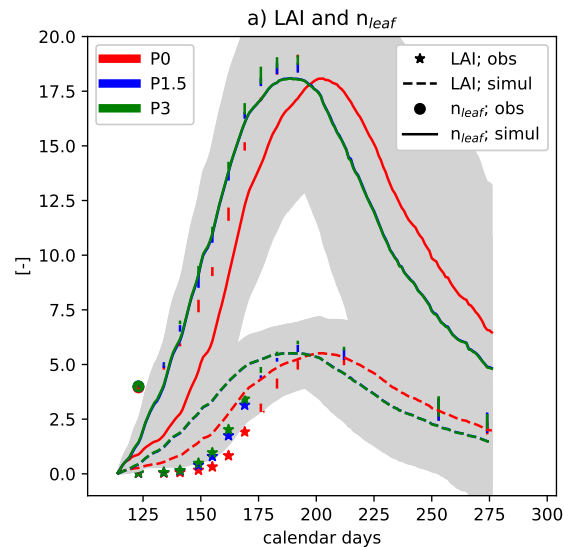
# Résultats

# Effet des configurations ; Tartas, P0



# Comparaison à Tartas ; focus sur le cycle saisonnier

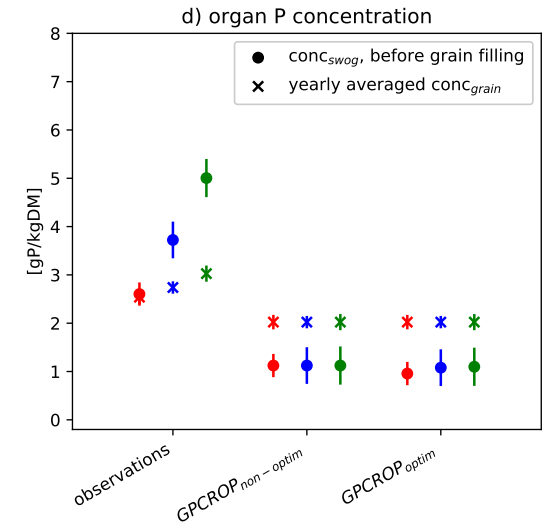
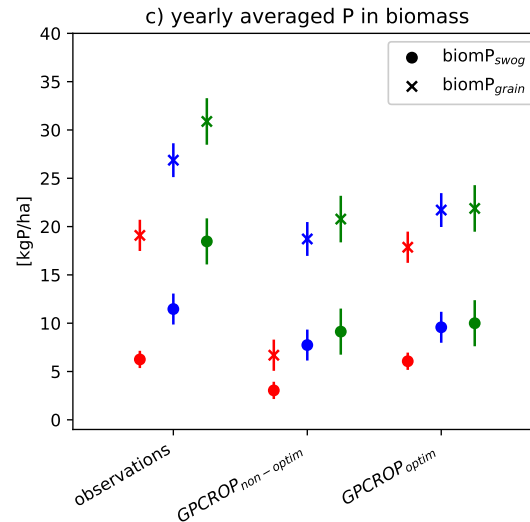
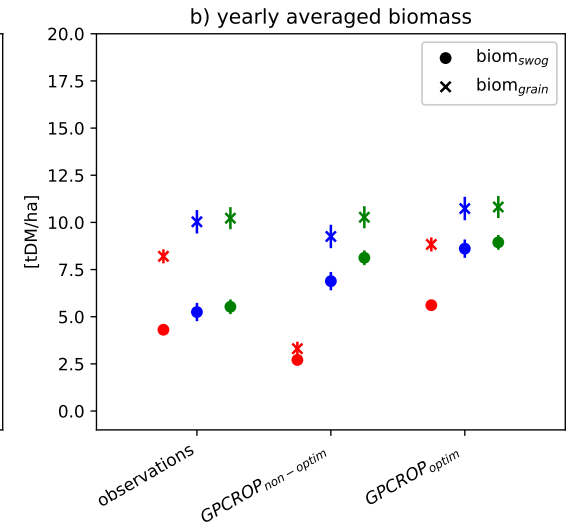
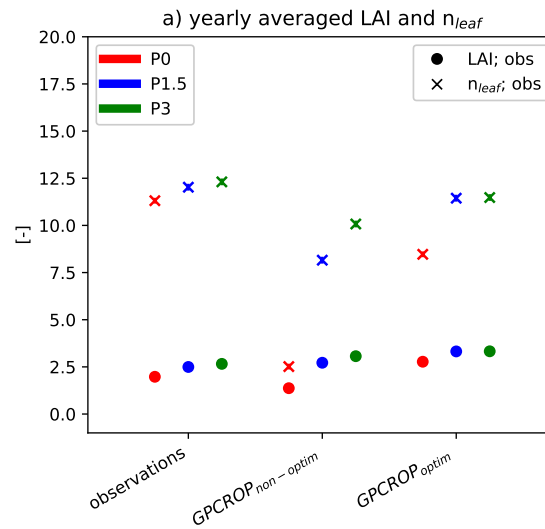
- Cycles saisonniers LAI/ $n_{leaf}$ , biomasse et P dans la biomasse plutôt bien capturés mais trop tôt (sauf pour  $n_{leaf}$ ) : surface des feuilles constantes dans GPCROP ?
- Surrestimation de la biomasse de {shoot-grain}
- GPCROP surrestime le retard de croissance dans P0
- P dans la biomasse : ok pour P1.5. Sous-estimé en P3 (consommation de luxe?)
- Sous-estime la décroissance de P dans la biomasse liée à la senescence
- Concentration en P du grain non autorisée à varier dans GPCROP
- Concentration en P du {shoot-grain}: GPCROP pas capable de reproduire la courbe de dilution. Mais léger effet traitement





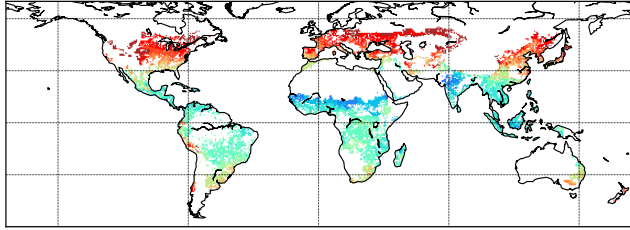
# Comparaison à Tartas ; focus sur l'effet traitement

- Meilleur fit pour GPCROP<sub>optim</sub> que GPCROP<sub>non-optim</sub>, en particulier  $n_{leaf}$  et biomasse
- Contenu en P de la biomasse: P3 sous-estimé
- Concentration en P : valeur P0 et différence relative entre traitement (GPCROP : +13 % vs obs : +43 %) sous-estimées

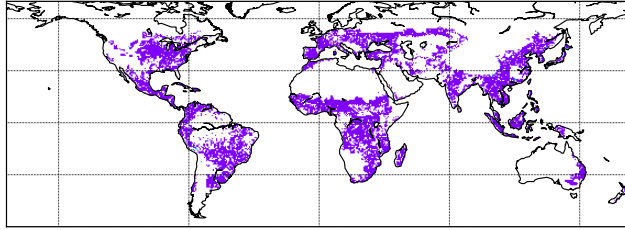


# Simulations globales

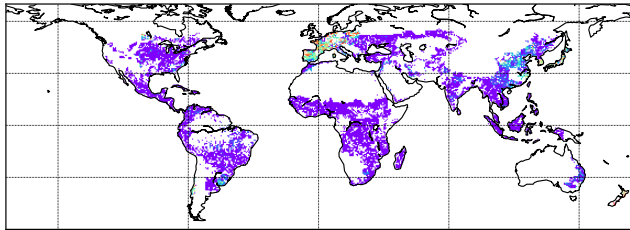
a) avg, GPCROP<sub>no-intera</sub>



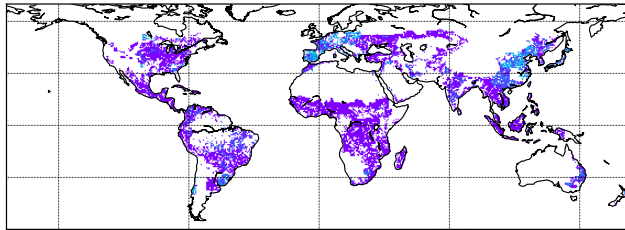
b) std, GPCROP<sub>no-intera</sub>



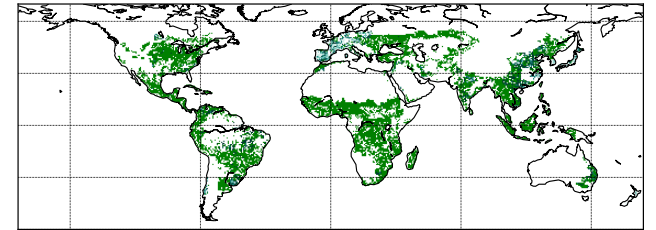
c) avg, GPCROP<sub>non-optim</sub>



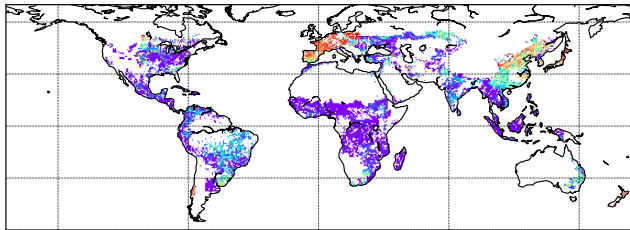
d) std, GPCROP<sub>non-optim</sub>



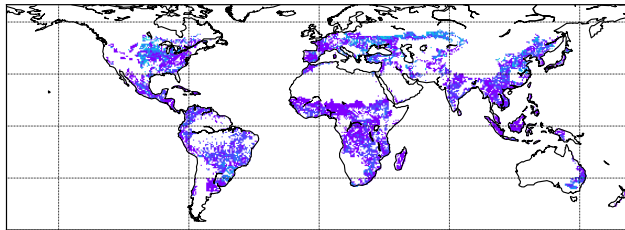
e) avg, GPCROP<sub>non-optim</sub> - GPCROP<sub>no-intera</sub>



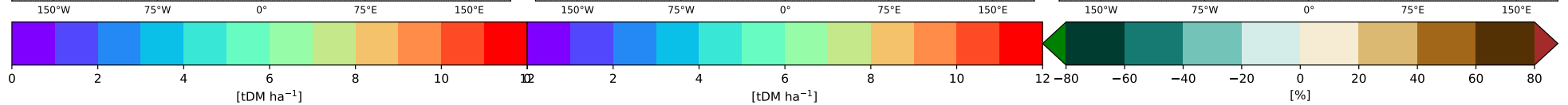
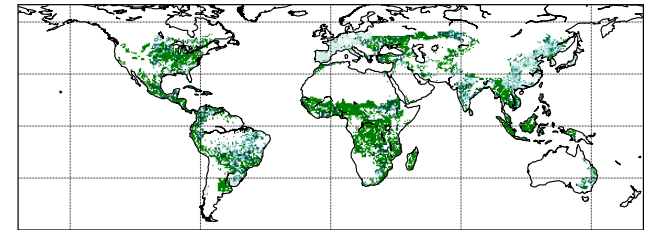
f) avg, GPCROP<sub>optim</sub>



g) std, GPCROP<sub>optim</sub>



h) avg, GPCROP<sub>optim</sub> - GPCROP<sub>no-intera</sub>



Résultats préliminaires !

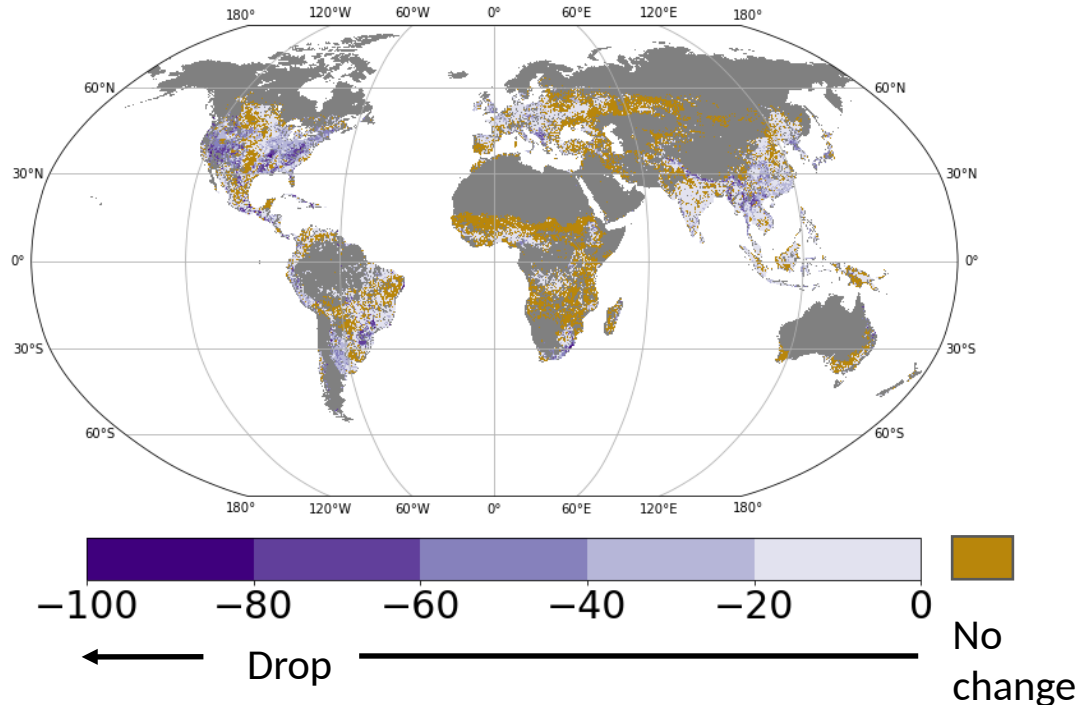
# Conclusion & perspectives

- Outil de recherche ; représente les interactions entre croissance de la plante, limitation en P et dynamique du P du sol ; pas de temps journalier ; échelle globale
- Calibration/évaluation : peu de contraintes sur le rendement potentiel et RSR
- Ne reproduit pas la courbe de dilution
- Incertitudes considérées : croissance de la plante. Incertitudes non prises en compte : contenu initial en P du sol, effet de la concentration sur la photosynthèse, seuil à partir duquel croissance de la plante et P interagissent ( $n_{\text{leaf}} \geq 1$ )
- Forte limitation du rendement potentiel par le P du sol actuel : P apporté dans une moindre mesure si rendement limité par N, eau, etc. ?
- Modèle peut être utilisé pour étudier l'effet sur le rendement potentiel de scénarios de la gestion de la ressource en P

## Scénario d'expansion de l'AB (travail de Josephine Demay) :

- Même modèle de dynamique du P du sol
- Interaction N et P
- Pas d'ajustement de la plante
- Représentation prairies-culture-élevage

### Changes (%) in cropland production due to P limitation after 100



- Même après 100 ans, 42% of des terres cultivées à l'échelle mondiale ne serait pas d'avantage limitée par la disponibilité en P des sols
- La limitation par P serait d'autant plus importante que
  - ❖ La disponibilité en P des sols est aujourd'hui faible
  - ❖ Les niveaux de production sont élevés
  - ❖ La part des légumineuses dans les rotations est importante

Merci !