



# Evolutions de la qualité des eaux souterraines dans un contexte d'agriculture changeante

## *Cas d'étude du territoire Seine-Normandie*

N. Gallois<sup>1</sup>, P. Viennot<sup>1</sup>, T. Puech<sup>2</sup>, N. Beaudoin<sup>2</sup>, P. Passy<sup>3</sup>, V. Thieu<sup>3</sup>, B. Mary<sup>2</sup>,  
C. Le Bas<sup>2</sup>, M. Silvestre<sup>4</sup>, C. Schott<sup>2</sup>, F. Chlébowski<sup>2</sup>, C. Mignolet<sup>2</sup>,  
J. Garnier<sup>3</sup>, G. Billen<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mines Paris/ARMINES, Université PSL (Centre de Géosciences)

<sup>2</sup> INRAE (Unités SAD-Aster, AgrolImpact et Infosol)

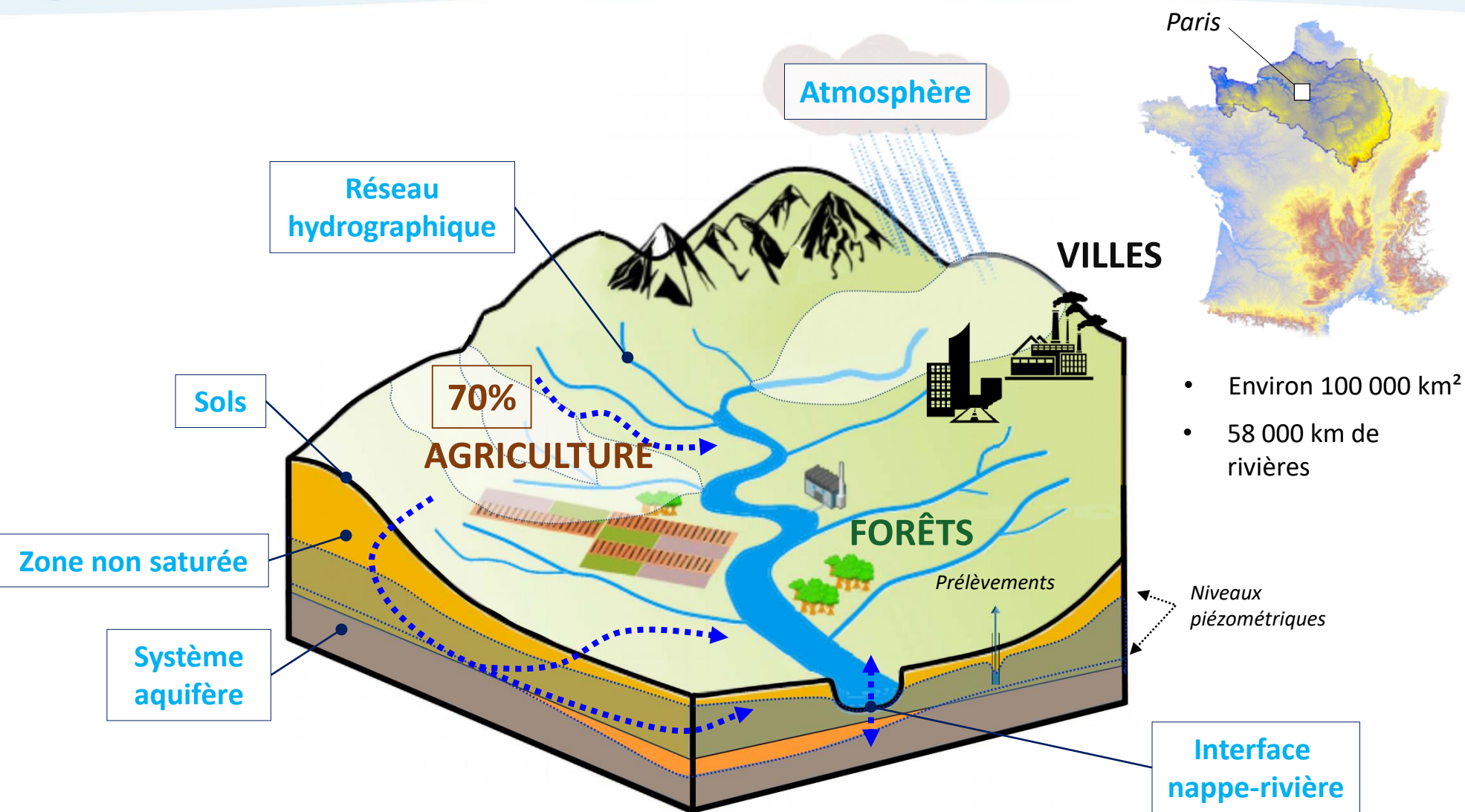
<sup>3</sup> Sorbonne-Université (UMR METIS)

<sup>4</sup> CNRS (FIRE)

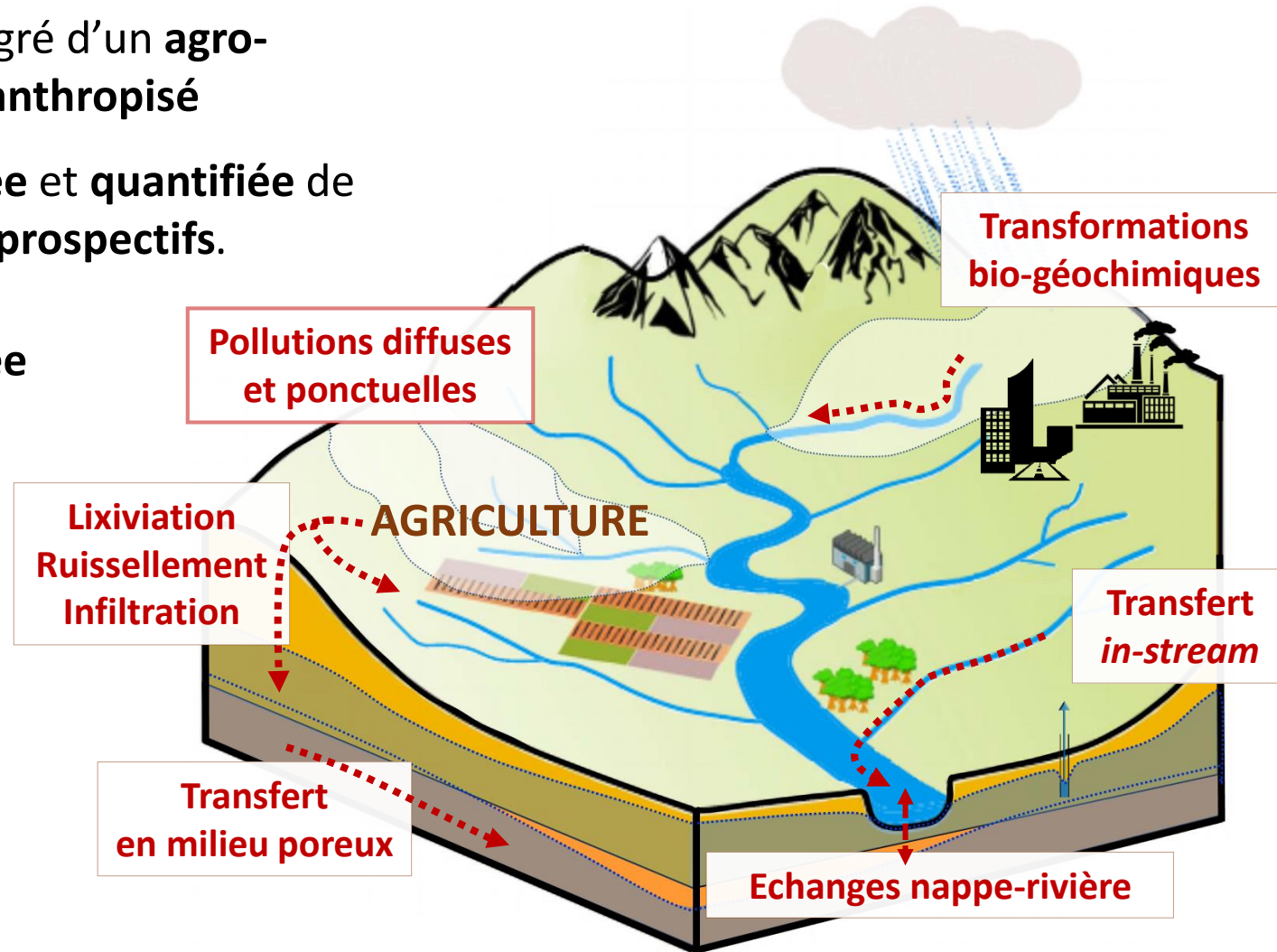
- Objectifs d'atteinte du **bon état** des eaux fixés par la **Directive Cadre sur l'Eau** :
  - Identification des **zones vulnérables**,
  - Promouvoir des **systèmes de culture vertueux** pour l'environnement.
- Nécessité croissante de disposer d'**éléments quantifiés** :
  - Caractérisation de la **pression azotée** sur la **ressource en eau**,
  - Evaluation de l'efficacité de trajectoires alternatives.

*Deux prérequis majeurs*

- **Comprendre, représenter et quantifier** les processus physiques régissant les **transferts d'eau et de nitrates** dans un **agro-hydrosystème régional**,
- Avoir une connaissance **précise** et de **long-terme** sur les contraintes du système.



- Comportement intégré d'un **agro-hydrosystème très anthropisé**
  - Evaluation **spatialisée** et **quantifiée** de **possibles scénarios prospectifs**.
- 
- Modélisation **couplée** **multidisciplinaire**



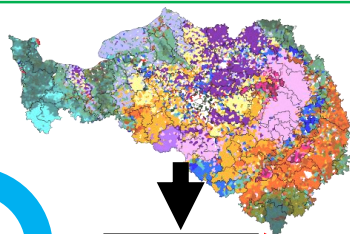


**STICS**



Climat  
Sols

*Modélisation long-terme  
de la dynamique d'azote  
sous-racinaire*



Base ARSeiNE

*Description fine de l'évolution spatio-temporelle des systèmes de culture.*

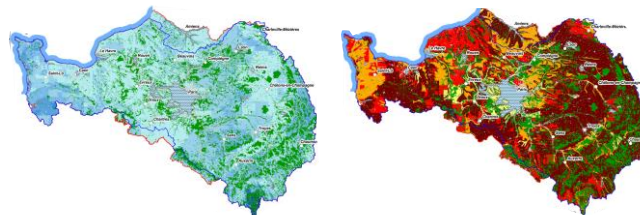
**STICS**

Production de  
biomasse

Surplus azoté

Stockage

Infiltration / Lixiviation (N)



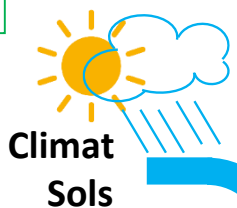
**Sorties spatio-temporelles**

Flux d'eau

Flux d'azote

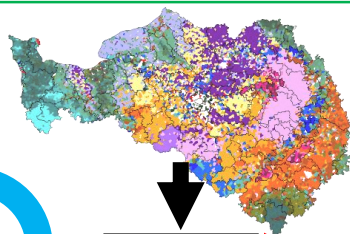
INRAE

**STICS**



Climat  
Sols

*Modélisation long-terme  
de la dynamique d'azote  
sous-racinaire*



Base ARSeiNE

*Description fine de l'évolution spatio-temporelle des systèmes de culture.*

**STICS**

Production de  
biomasse

Surplus azoté

Stockage

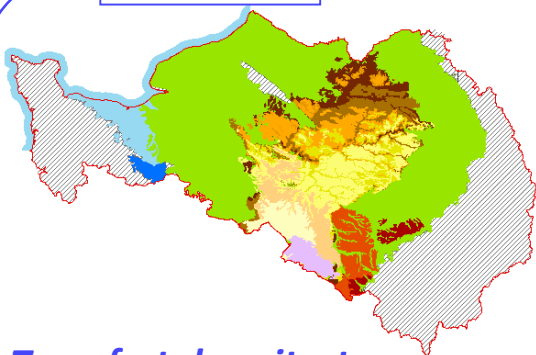
**INRAE**

Flux d'eau

Flux d'azote

Infiltration / Lixiviation (N)

**CaWaQS**



*Transfert des nitrates  
dans le compartiment  
souterrain*

**MINES PARIS**

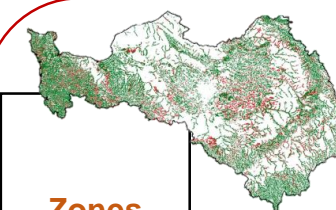
**PSL**

Centre de  
Géosciences

Contributions  
rapides

Système  
aquifère

Contributions  
lentes



Zones  
ripariennes

Rétention  
riparienne

**RIVERSTRAHLER**

Pollutions  
ponctuelles

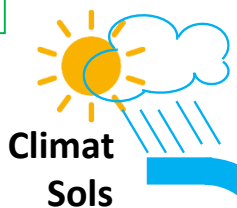
*Transferts et  
transformations de  
l'azote dans le réseau  
hydrographique*

Flux diffus  
vers le réseau

Rétention  
in-stream

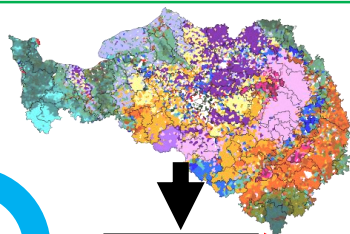
**SORBONNE  
UNIVERSITÉ**

**STICS**



Climat  
Sols

*Modélisation long-terme  
de la dynamique d'azote  
sous-racinaire*



Base ARSeiNE

*Description fine de l'évolution spatio-temporelle des systèmes de culture.*

**STICS**

Production de  
biomasse

Surplus azoté

Stockage

**INRAE**

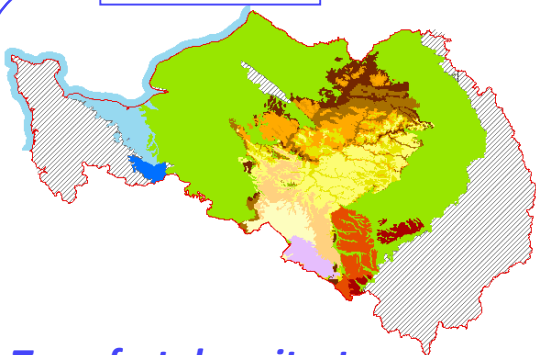
➡ Flux d'eau

➡ Flux d'azote

● Validation

Infiltration / Lixiviation (N)

**CaWaQS**



*Transfert des nitrates  
dans le compartiment  
souterrain*

**MINES PARIS**

**PSL**

Centre de  
Géosciences

Contributions  
rapides

Système  
aquifère

Contributions  
lentes



Zones  
ripariennes

Rétention  
riparienne

**RIVERSTRAHLER**

Pollutions  
ponctuelles

*Transferts et  
transformations de  
l'azote dans le réseau  
hydrographique*

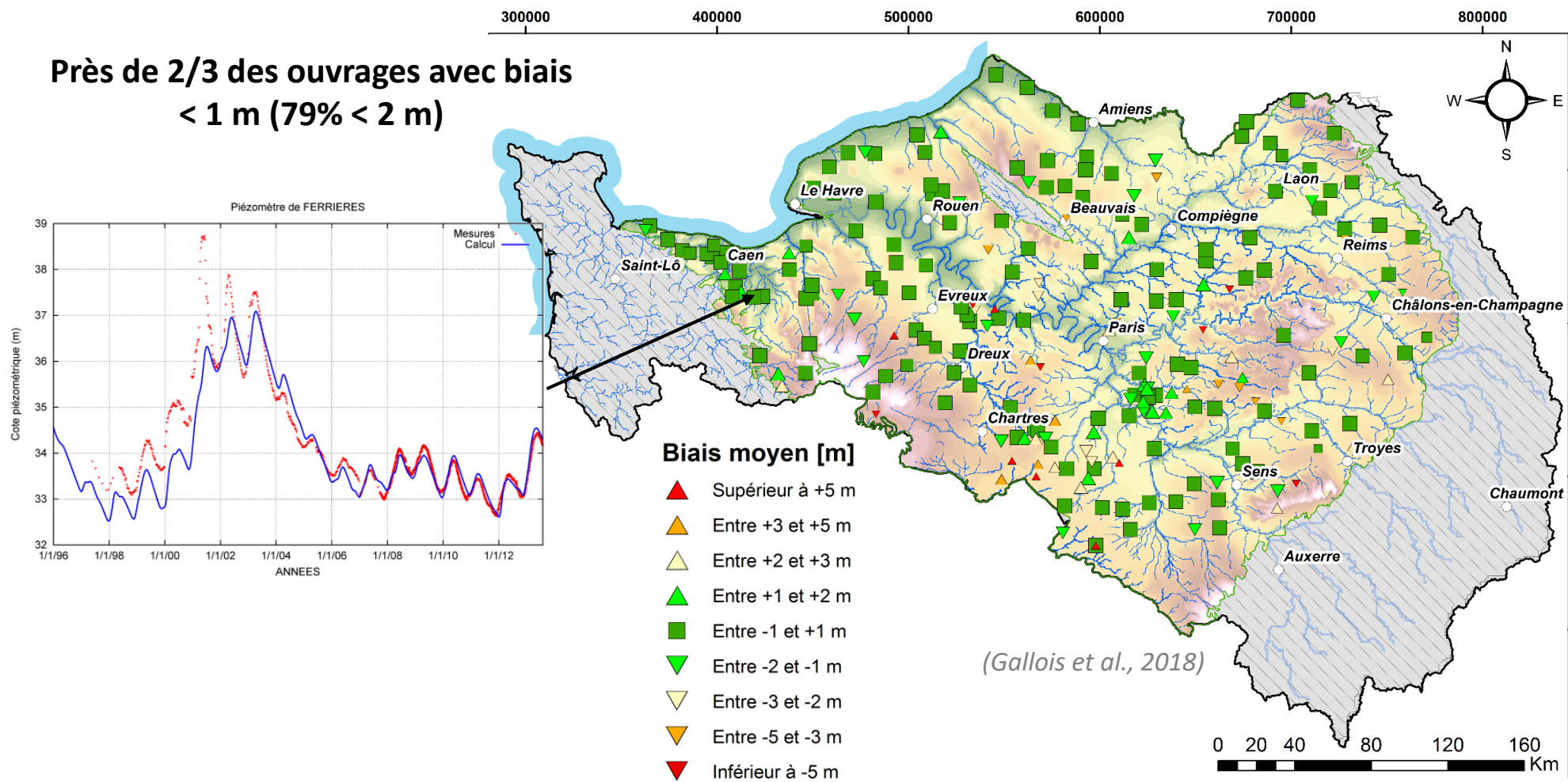
Flux diffus  
vers le réseau

Rétention  
in-stream

**SORBONNE  
UNIVERSITÉ**

- Hydrodynamisme aquifère : Validation sur la **piézométrie mesurée** (~ 250 ouvrages).

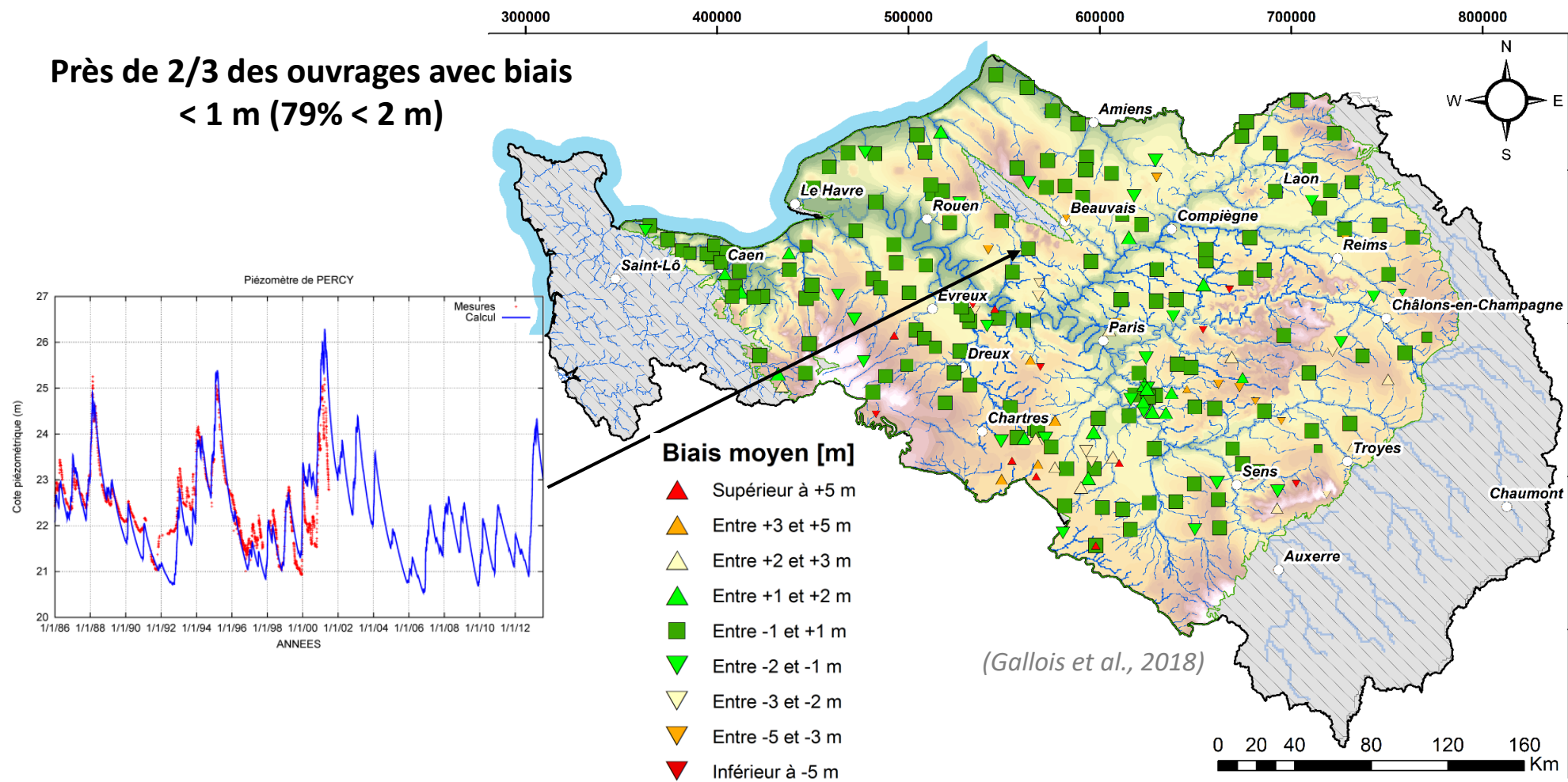
Près de 2/3 des ouvrages avec biais  
< 1 m (79% < 2 m)





- Hydrodynamisme aquifère : Validation sur la **piézométrie mesurée** (~ 250 ouvrages).

Près de 2/3 des ouvrages avec biais  
< 1 m (79% < 2 m)

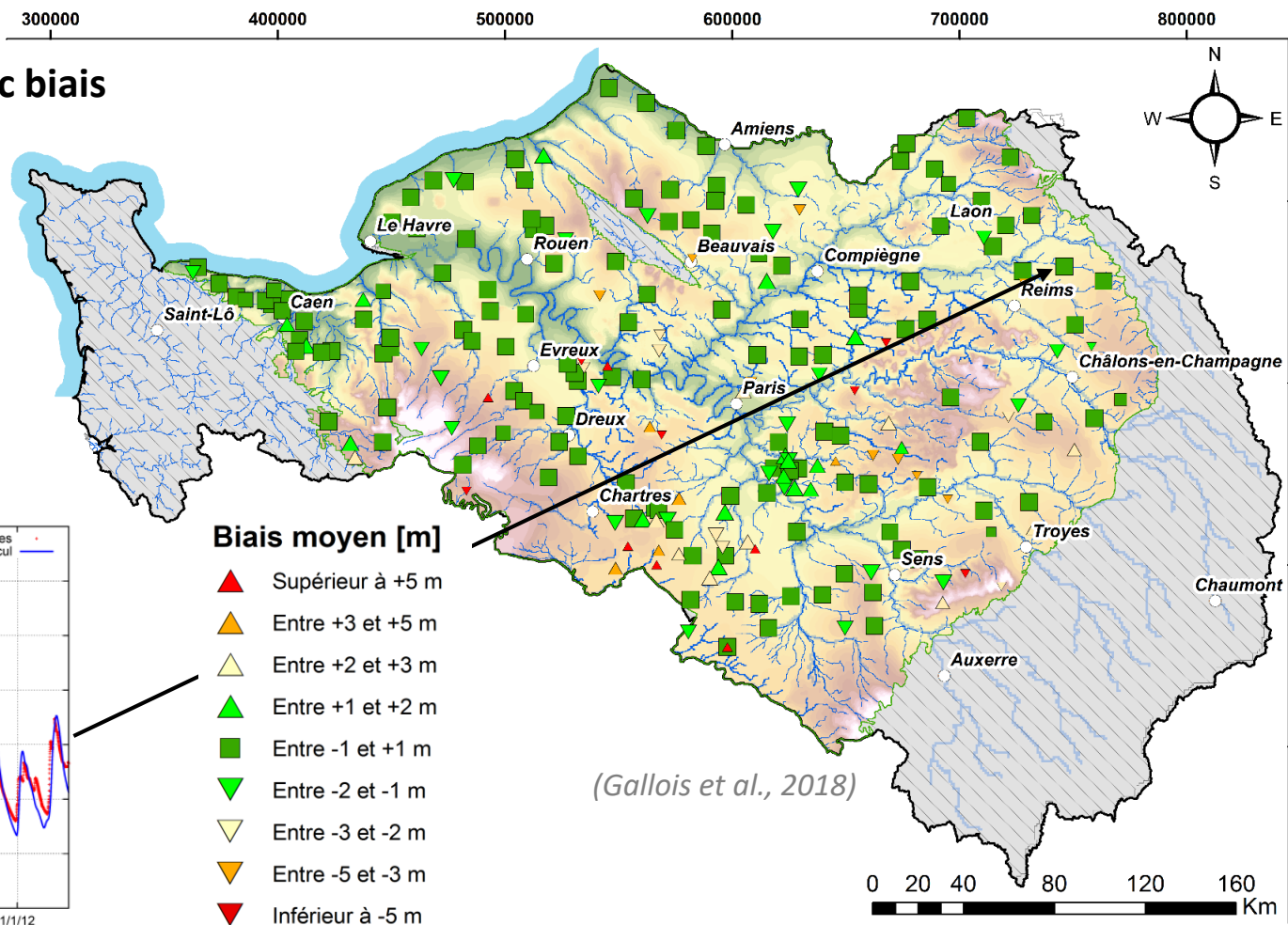
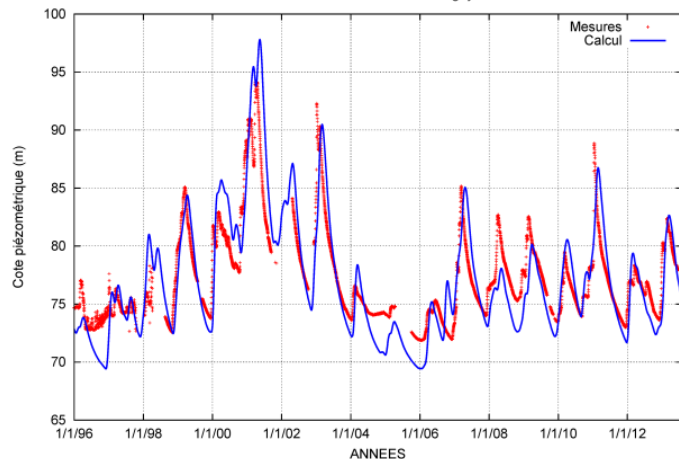




- Hydrodynamisme aquifère : Validation sur la **piézométrie mesurée** (~ 250 ouvrages).

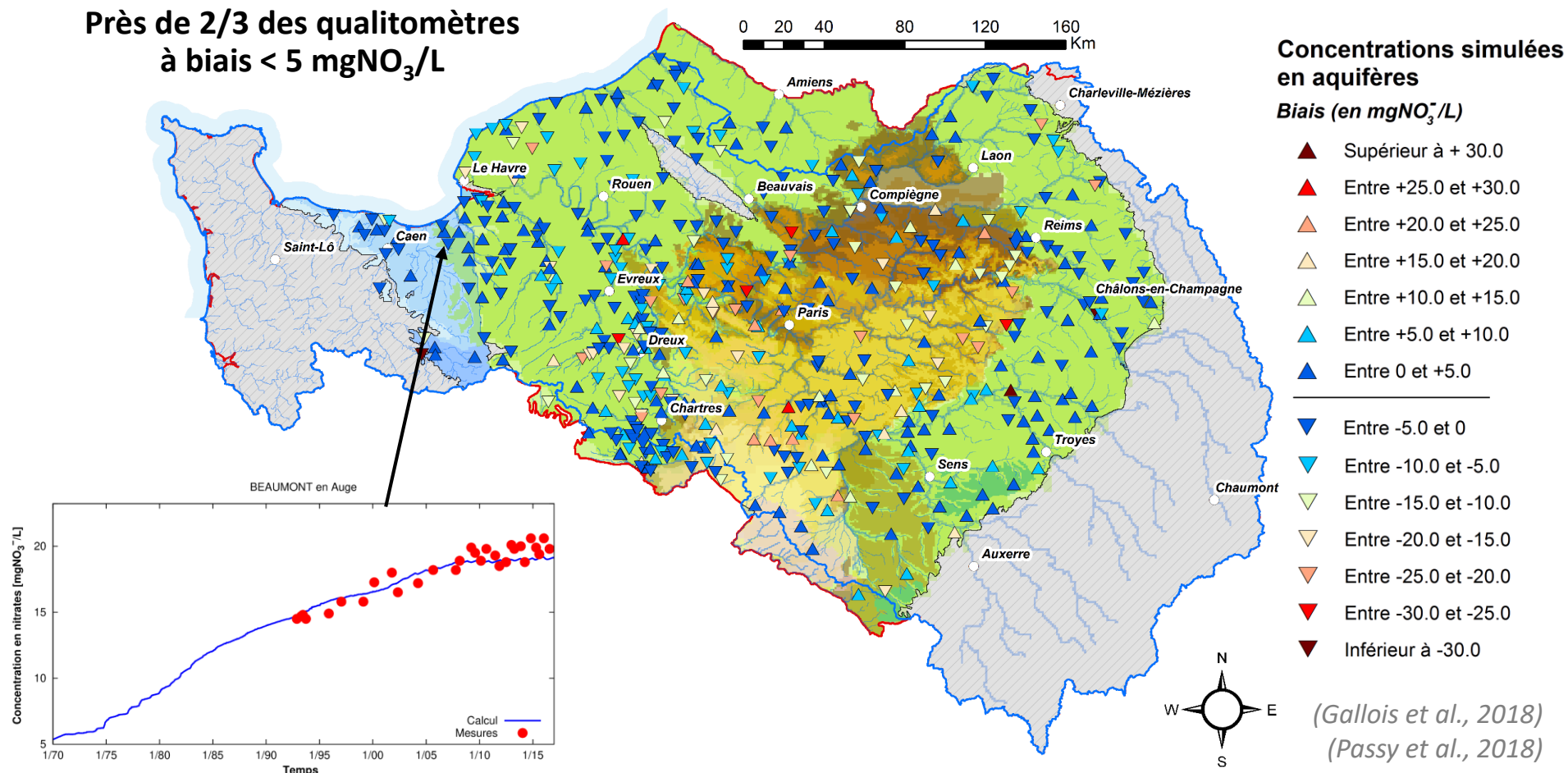
Près de 2/3 des ouvrages avec biais  
< 1 m (79% < 2 m)

Piézomètre de BOIS les Pargny



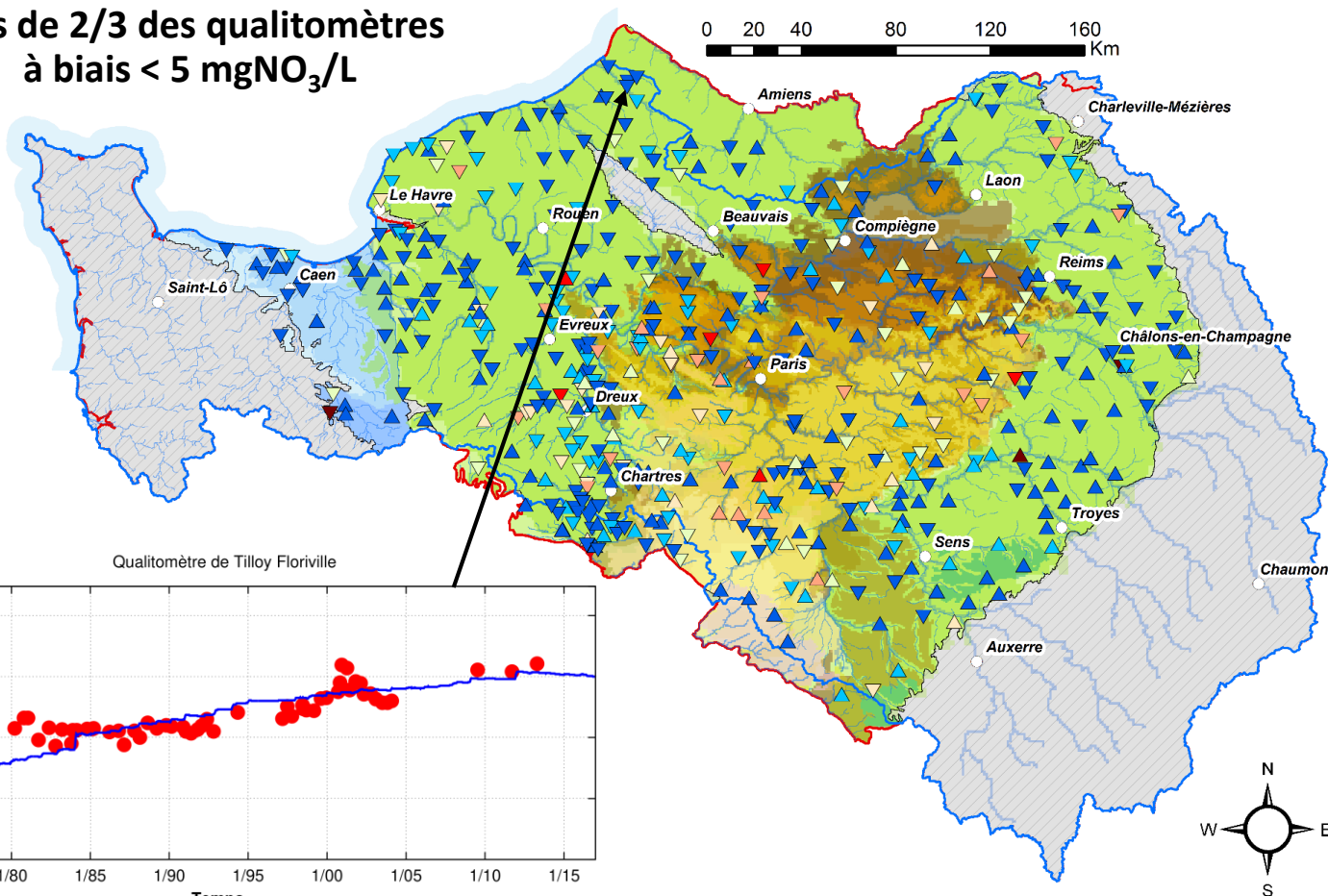
- Dynamique **aquifère des nitrates** : Validation sur les concentrations mesurées (~ 530 ouvrages).

Près de 2/3 des qualitomètres  
à biais < 5 mgNO<sub>3</sub>/L



- Dynamique **aquifère des nitrates** : Validation sur les concentrations mesurées (~ 530 ouvrages).

Près de 2/3 des qualimètres  
à biais < 5 mgNO<sub>3</sub>/L



Concentrations simulées  
en aquifères

Biais (en mgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L)

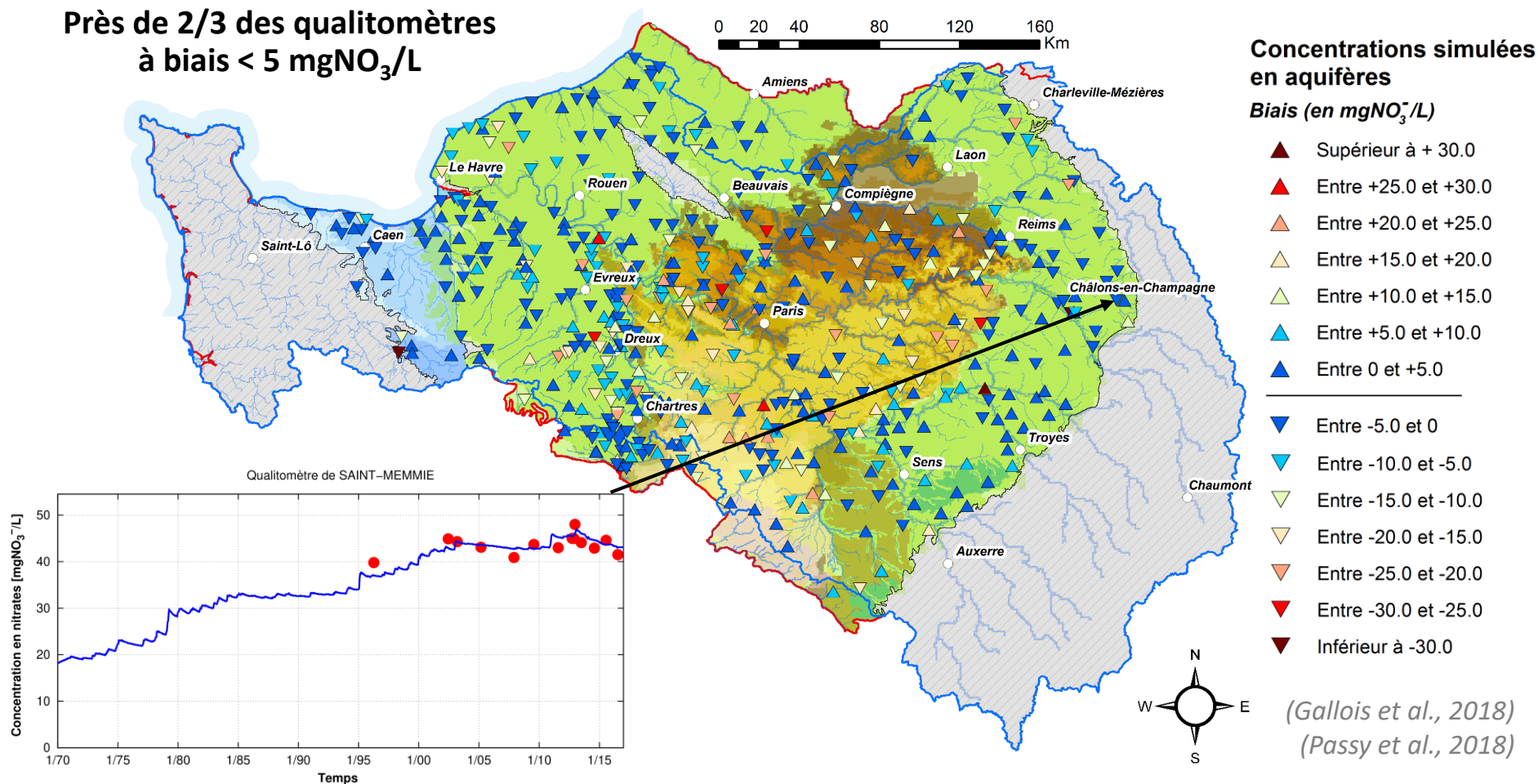
- ▲ Supérieur à + 30.0
- ▲ Entre +25.0 et +30.0
- ▲ Entre +20.0 et +25.0
- ▲ Entre +15.0 et +20.0
- ▲ Entre +10.0 et +15.0
- ▲ Entre +5.0 et +10.0
- ▲ Entre 0 et +5.0
- ▼ Entre -5.0 et 0
- ▼ Entre -10.0 et -5.0
- ▼ Entre -15.0 et -10.0
- ▼ Entre -20.0 et -15.0
- ▼ Entre -25.0 et -20.0
- ▼ Entre -30.0 et -25.0
- ▼ Inférieur à -30.0

(Gallois et al., 2018)  
(Passy et al., 2018)



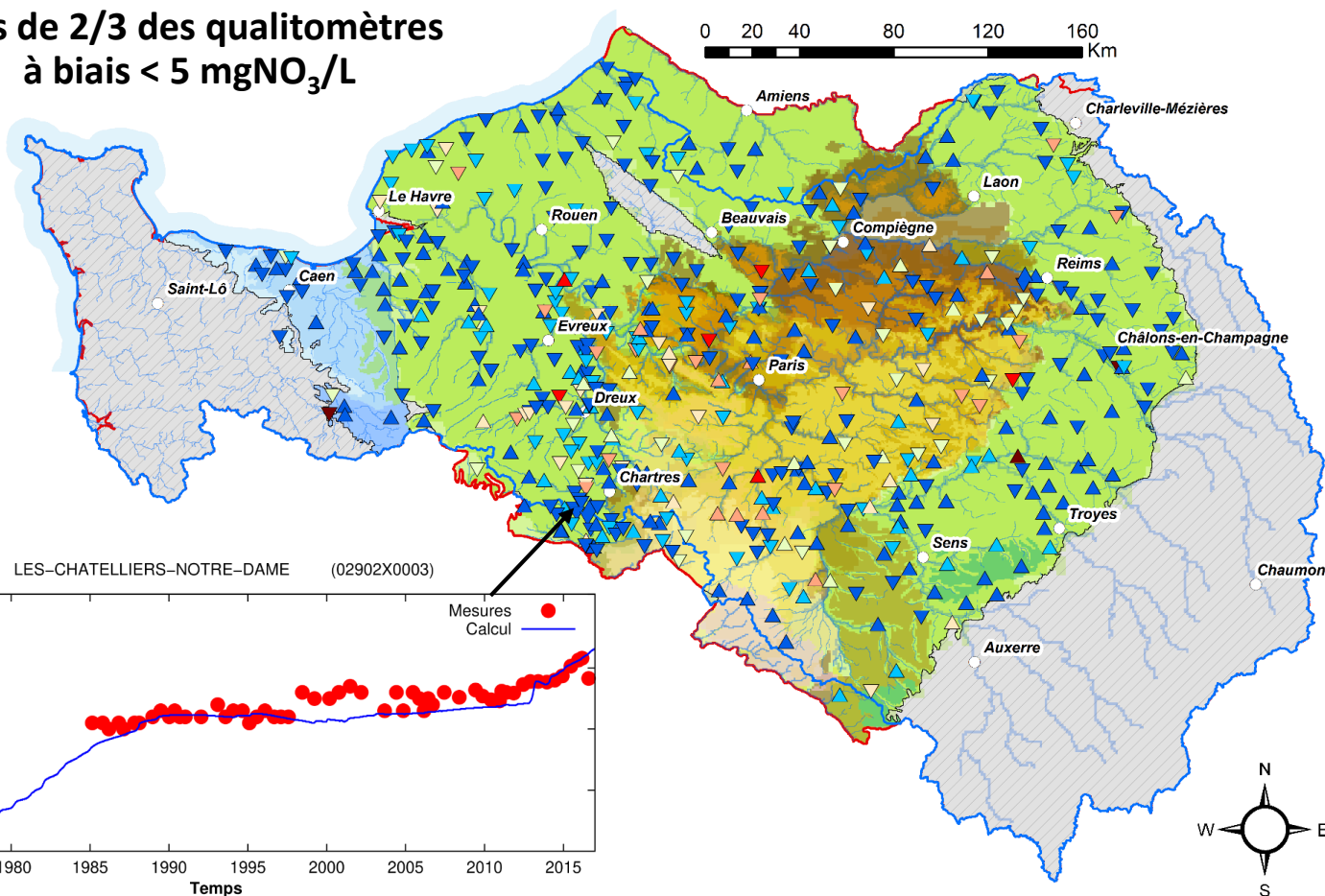
- Dynamique **aquifère des nitrates** : Validation sur les concentrations mesurées (~ 530 ouvrages).

Près de 2/3 des qualimètres  
à biais < 5 mgNO<sub>3</sub>/L



- Dynamique **aquifère des nitrates** : Validation sur les concentrations mesurées (~ 530 ouvrages).

Près de 2/3 des qualimètres  
à biais < 5 mgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L



Concentrations simulées  
en aquifères

Biais (en mgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L)

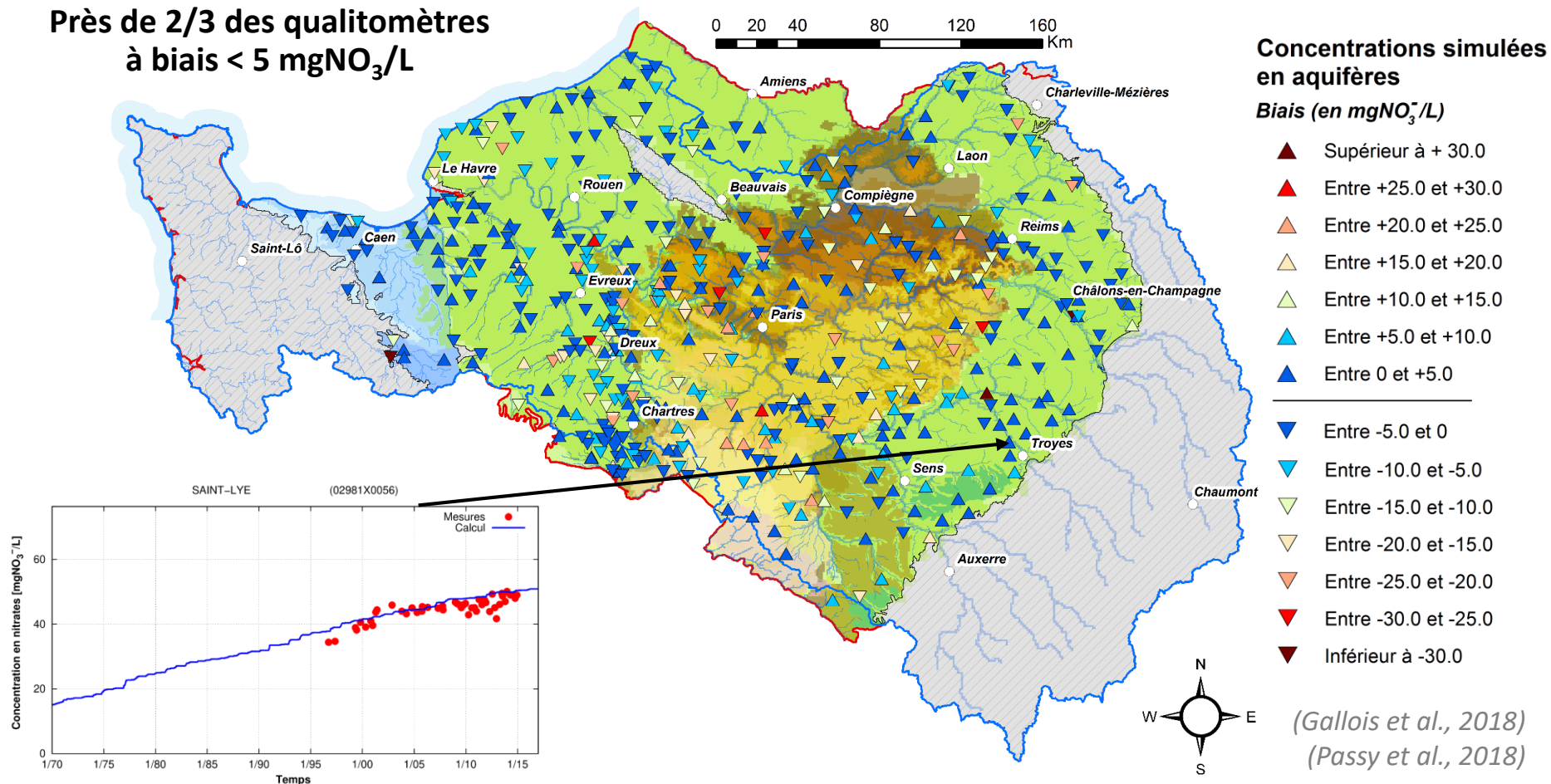
- ▲ Supérieur à + 30.0
- ▲ Entre +25.0 et +30.0
- ▲ Entre +20.0 et +25.0
- ▲ Entre +15.0 et +20.0
- ▲ Entre +10.0 et +15.0
- ▲ Entre +5.0 et +10.0
- ▲ Entre 0 et +5.0
- ▼ Entre -5.0 et 0
- ▼ Entre -10.0 et -5.0
- ▼ Entre -15.0 et -10.0
- ▼ Entre -20.0 et -15.0
- ▼ Entre -25.0 et -20.0
- ▼ Entre -30.0 et -25.0
- ▼ Inférieur à -30.0

(Gallois et al., 2018)  
(Passy et al., 2018)



- Dynamique **aquifère des nitrates** : Validation sur les concentrations mesurées (~ 530 ouvrages).

Près de 2/3 des qualitomètres  
à biais < 5 mgNO<sub>3</sub>/L



## ■ Dynamiques **en rivière** : Validation sur les concentrations mesurées



### Concentrations simulées en aquifères

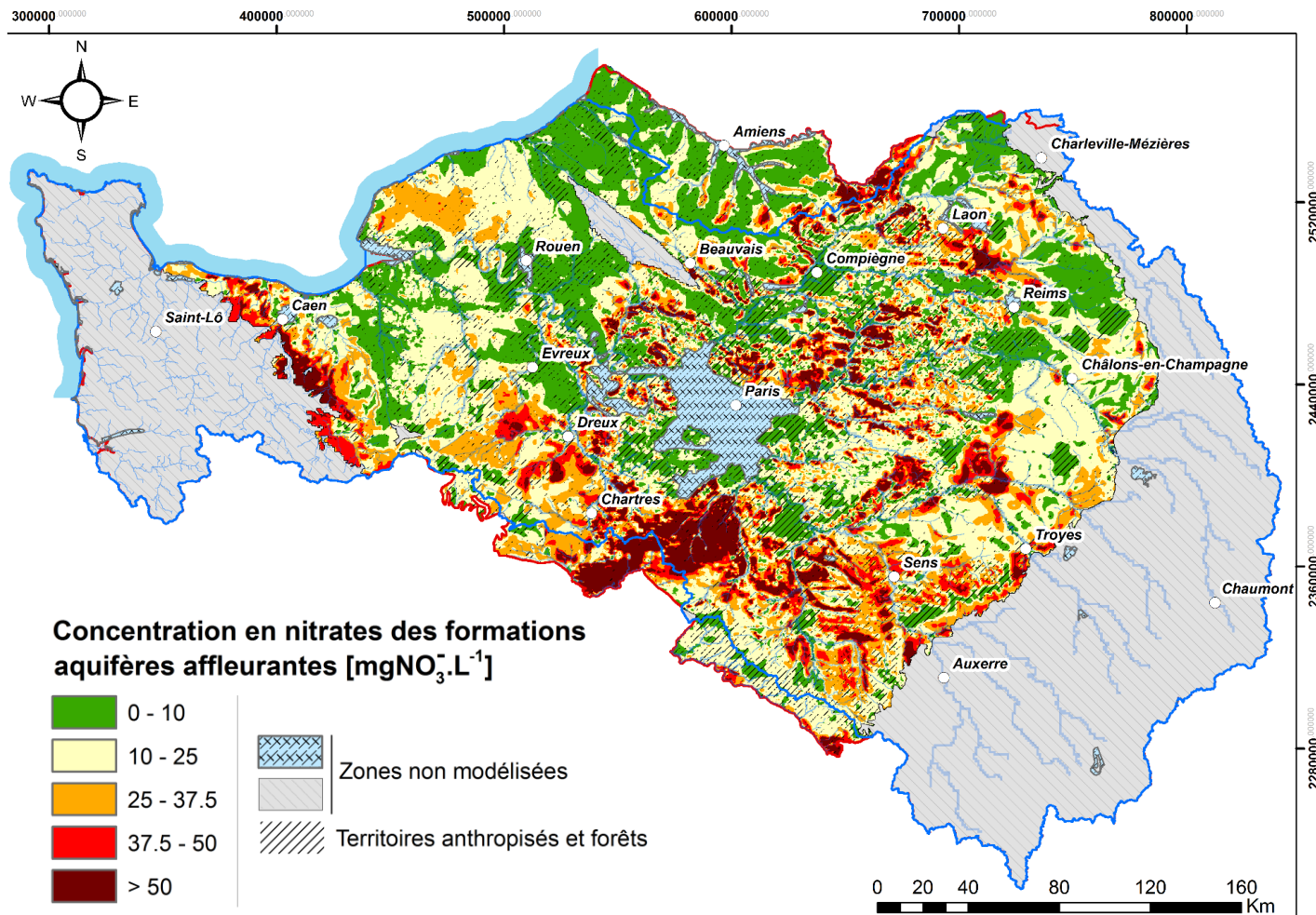
#### Biais (en $\text{mgNO}_3^-/\text{L}$ )

- ▲ Supérieur à + 30.0
- ▲ Entre +25.0 et +30.0
- ▲ Entre +20.0 et +25.0
- ▲ Entre +15.0 et +20.0
- ▲ Entre +10.0 et +15.0
- ▲ Entre +5.0 et +10.0
- ▲ Entre 0 et +5.0
- ▼ Entre -5.0 et 0
- ▼ Entre -10.0 et -5.0
- ▼ Entre -15.0 et -10.0
- ▼ Entre -20.0 et -15.0
- ▼ Entre -25.0 et -20.0
- ▼ Entre -30.0 et -25.0
- ▼ Inférieur à -30.0

(Gallois et al., 2018)  
(Passy et al., 2018)

- **Evaluation spatialisée et continue des niveaux de pollution nitrique passés et actuels.**

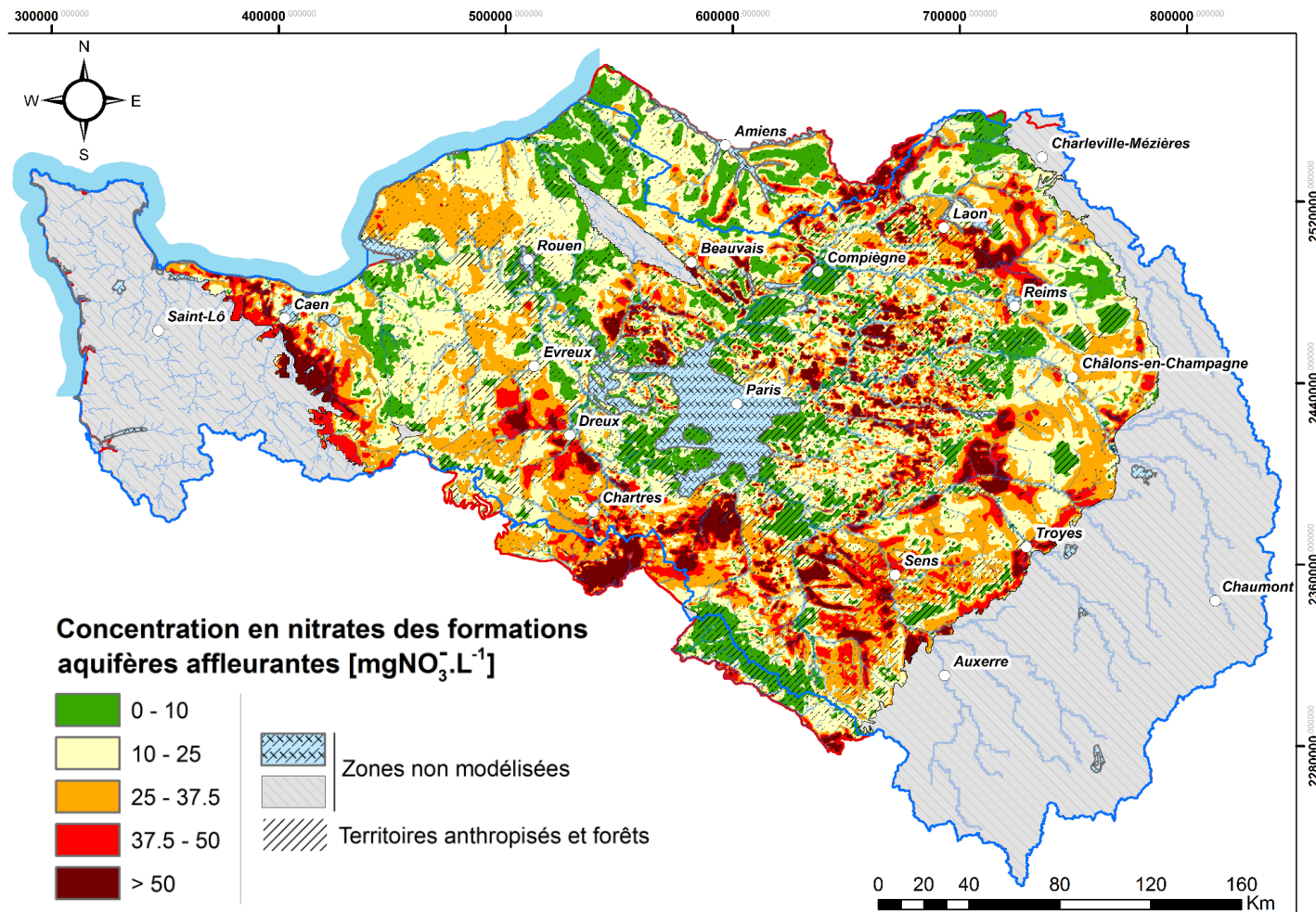
1980





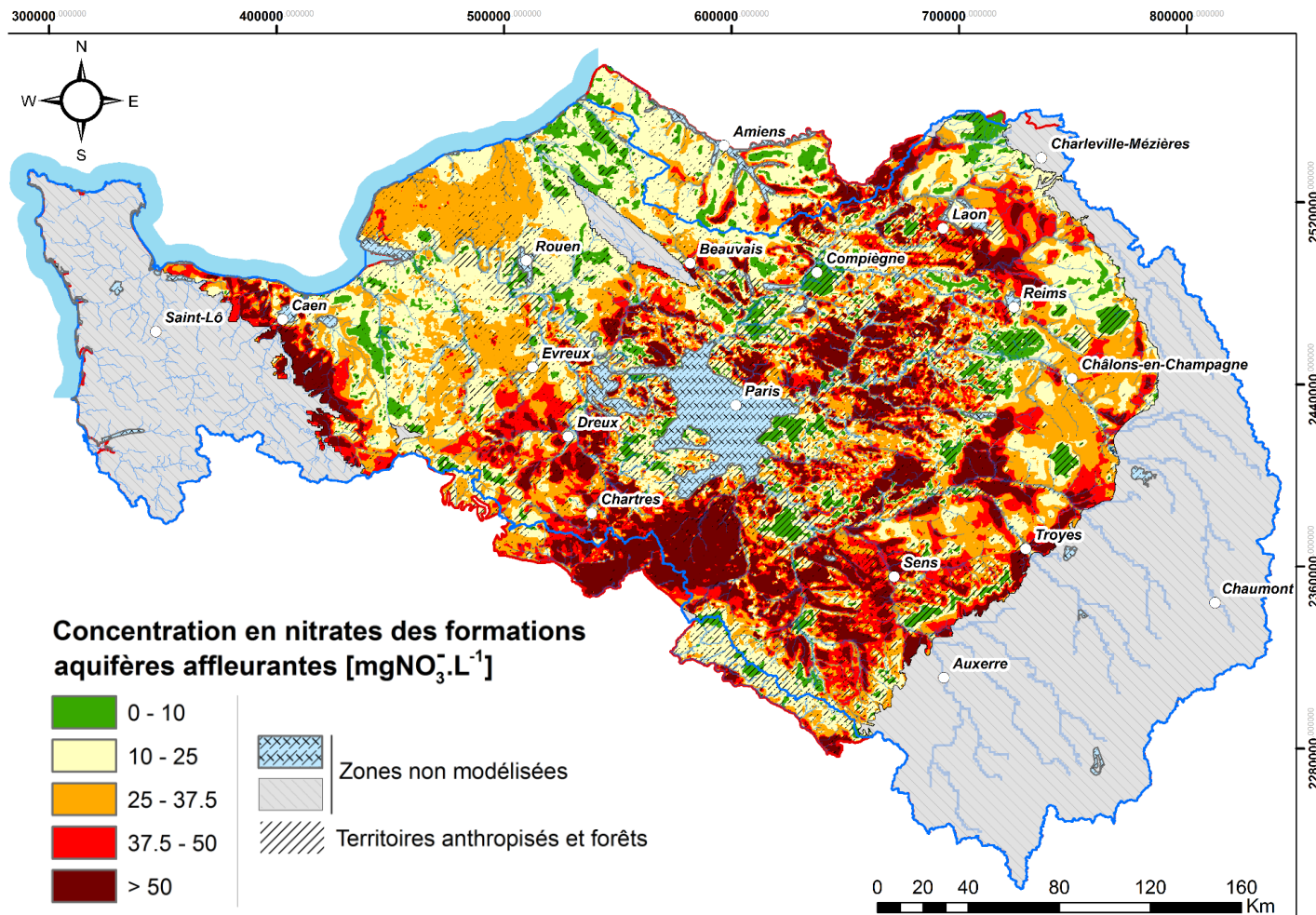
- **Evaluation spatialisée et continue des niveaux de pollution nitrique passés et actuels.**

1990



- **Evaluation spatialisée et continue des niveaux de pollution nitrique passés et actuels.**

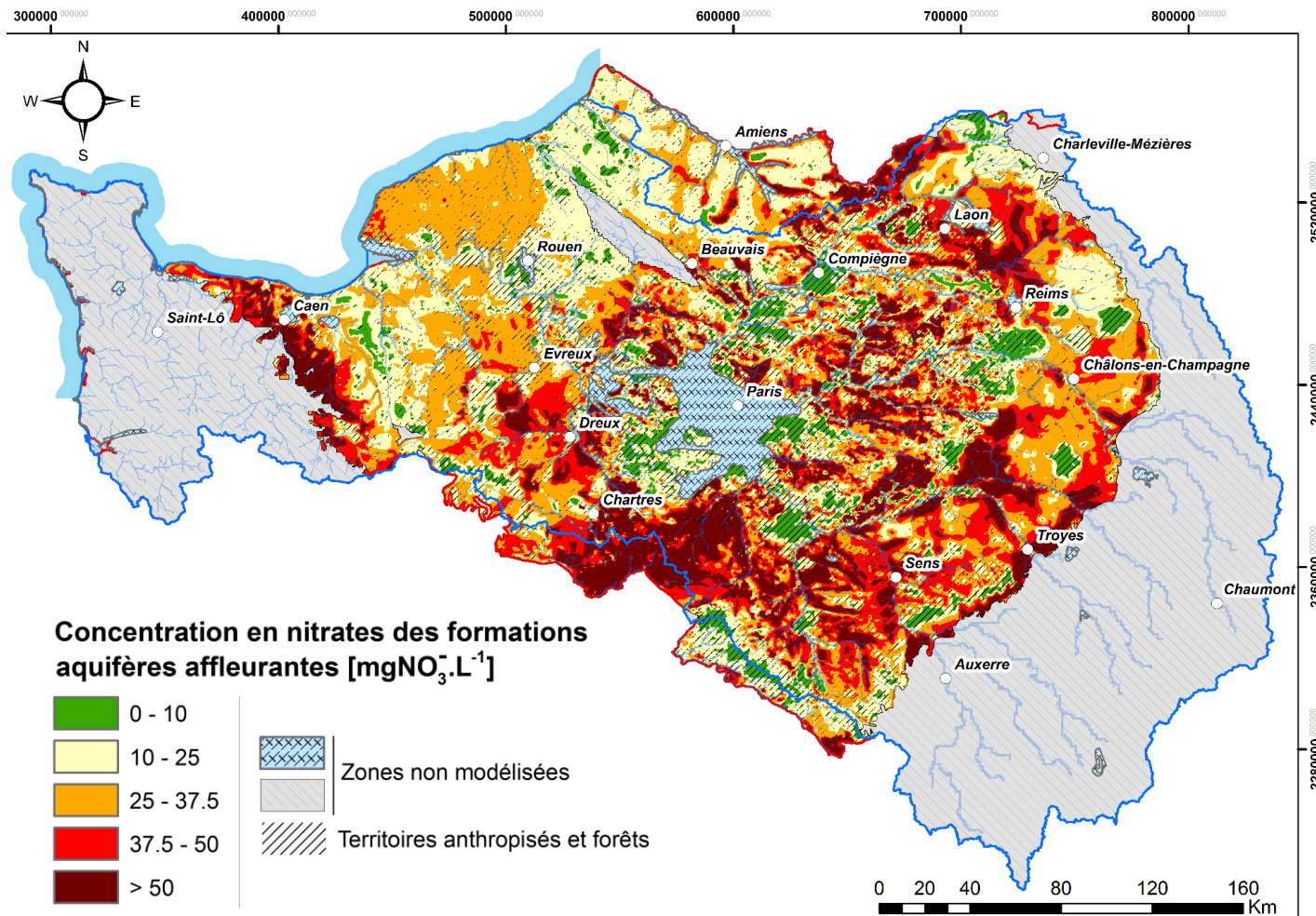
**2000**





- **Evaluation spatialisée et continue des niveaux de pollution nitrique passés et actuels.**

**2010**



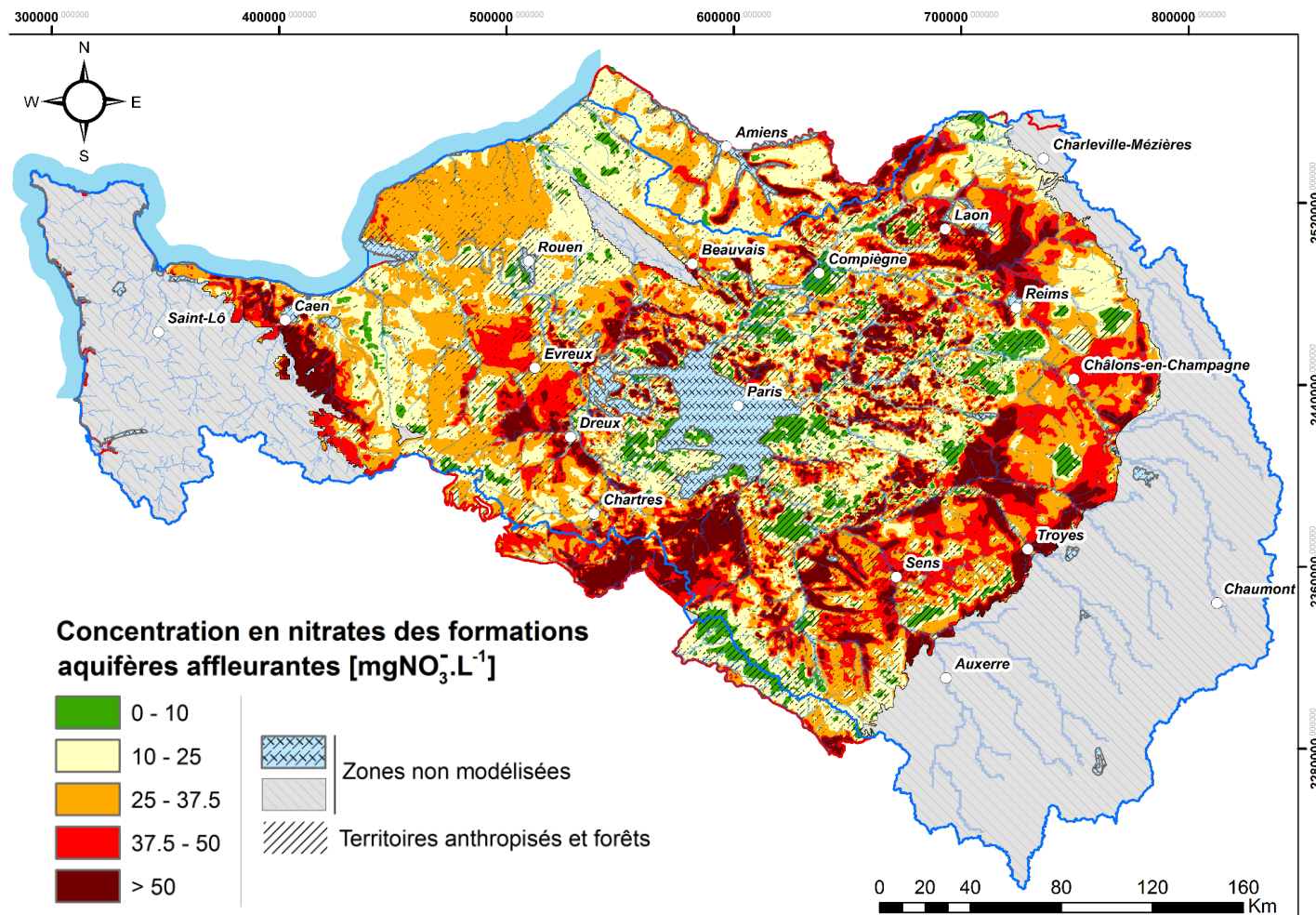
- **Evaluation spatialisée et continue des niveaux de pollution nitrique passés et actuels.**

**2018**

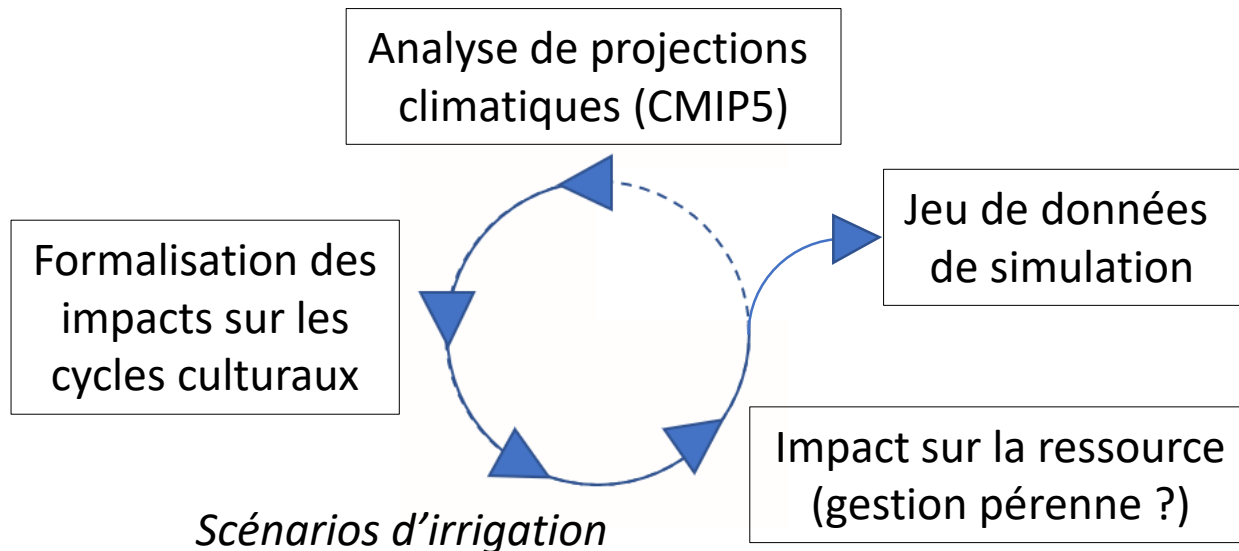
Proportions surfaciques

> 37,5 mg L<sup>-1</sup> ➔ **26 %**

> 50 mg L<sup>-1</sup> ➔ **11 %**



- Challenges :
  - **Approche régionalisée,**
  - **Scénarios continus** en temps et en espace,
  - Scénarios raisonnés en termes d'**évolutions d'ensemble** des systèmes de culture,
  - **Déclinaisons concrètes de ces trajectoires** → Création de jeux de données.
- Intégration des **effets du changement climatique** sur les cultures et leurs conduites.



## ■ Deux scenarios (2018-2050) :

### • **Scenario A : Poursuite d'une agriculture intensive et spécialisée**

- **Hyperspécialisation** des productions du bassin (agriculture de précision, mécanisation, forts niveaux d'intrants azotés),
- **Adaptations techniques aux nouvelles contraintes du milieu** (irrigation, modification des calendriers de culture, etc.),
- Maintien de quelques petites exploitations spécialisées (AB, AOC). 5% de la SAU en 2050,
- **Filière laitière en déclin / disparition de l'élevage** dans certaines régions, etc.



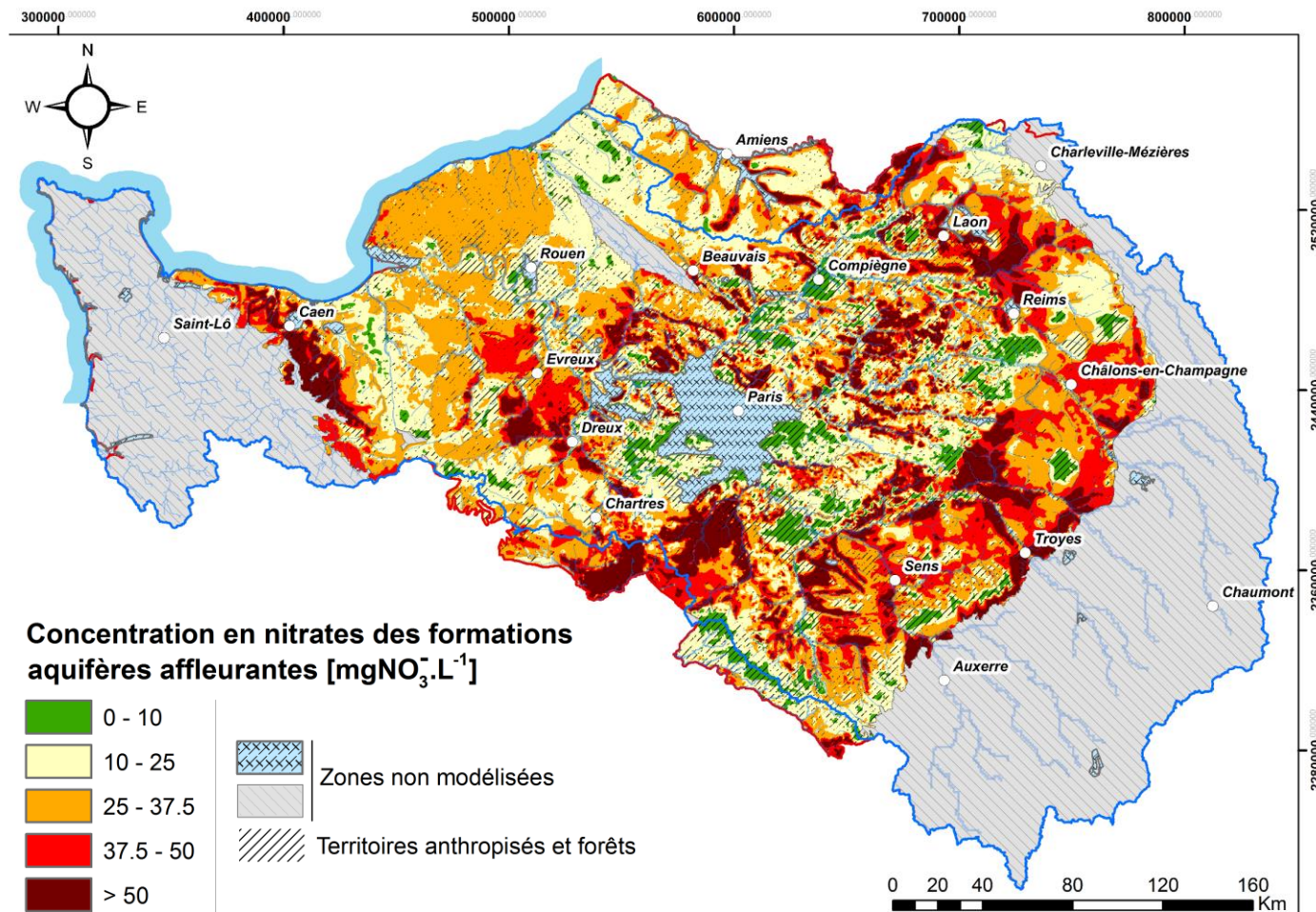
## Scenario A (2018-2050) : Poursuite d'une agriculture intensive et spécialisée

2021

Proportions surfaciques

> 37,5 mg L<sup>-1</sup> → 28 %

> 50 mg L<sup>-1</sup> → 12 %





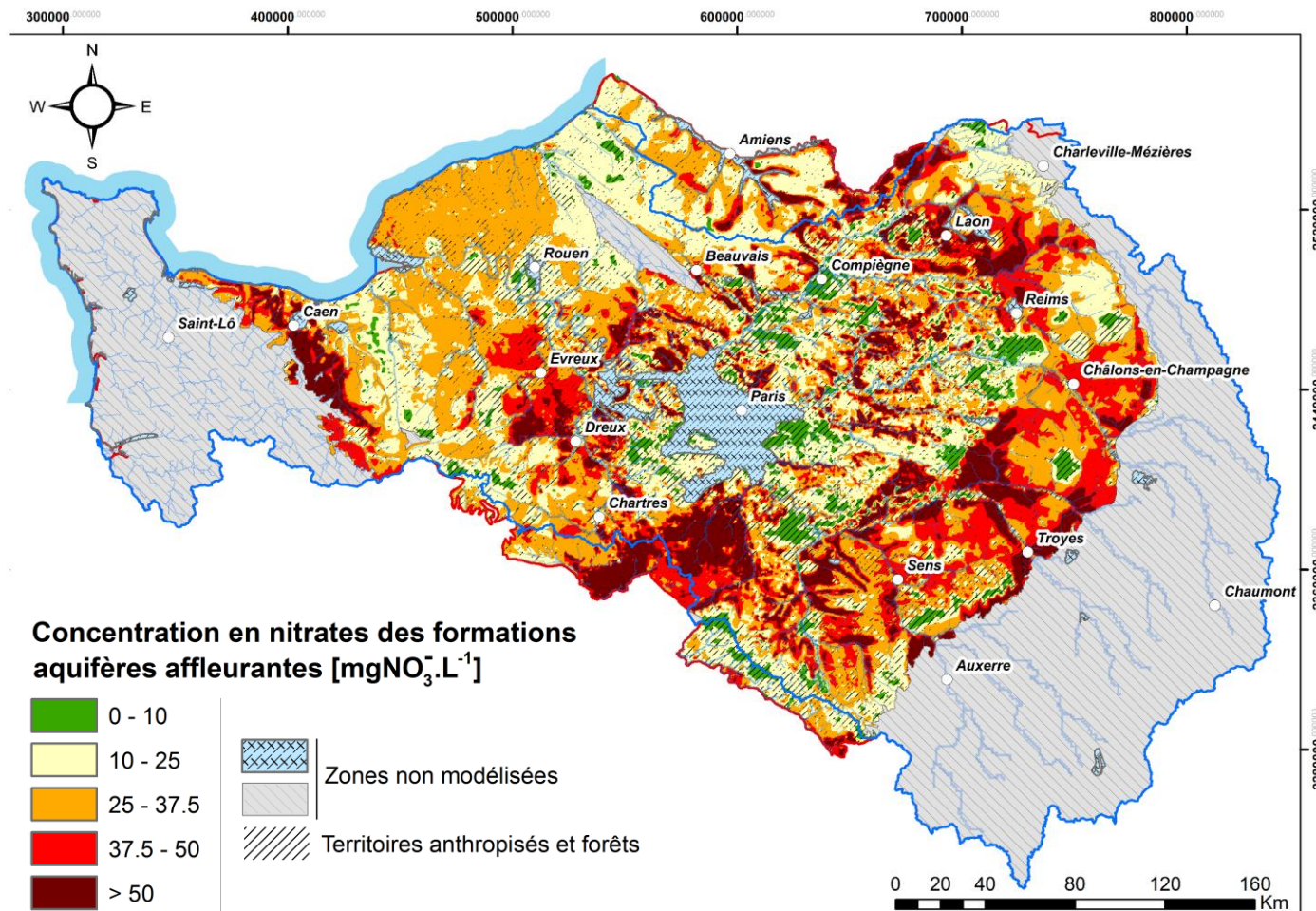
## Scenario A (2018-2050) : Poursuite d'une agriculture intensive et spécialisée

2027

Proportions surfaciques

> 37,5 mg L<sup>-1</sup> → 28 %

> 50 mg L<sup>-1</sup> → 13 %



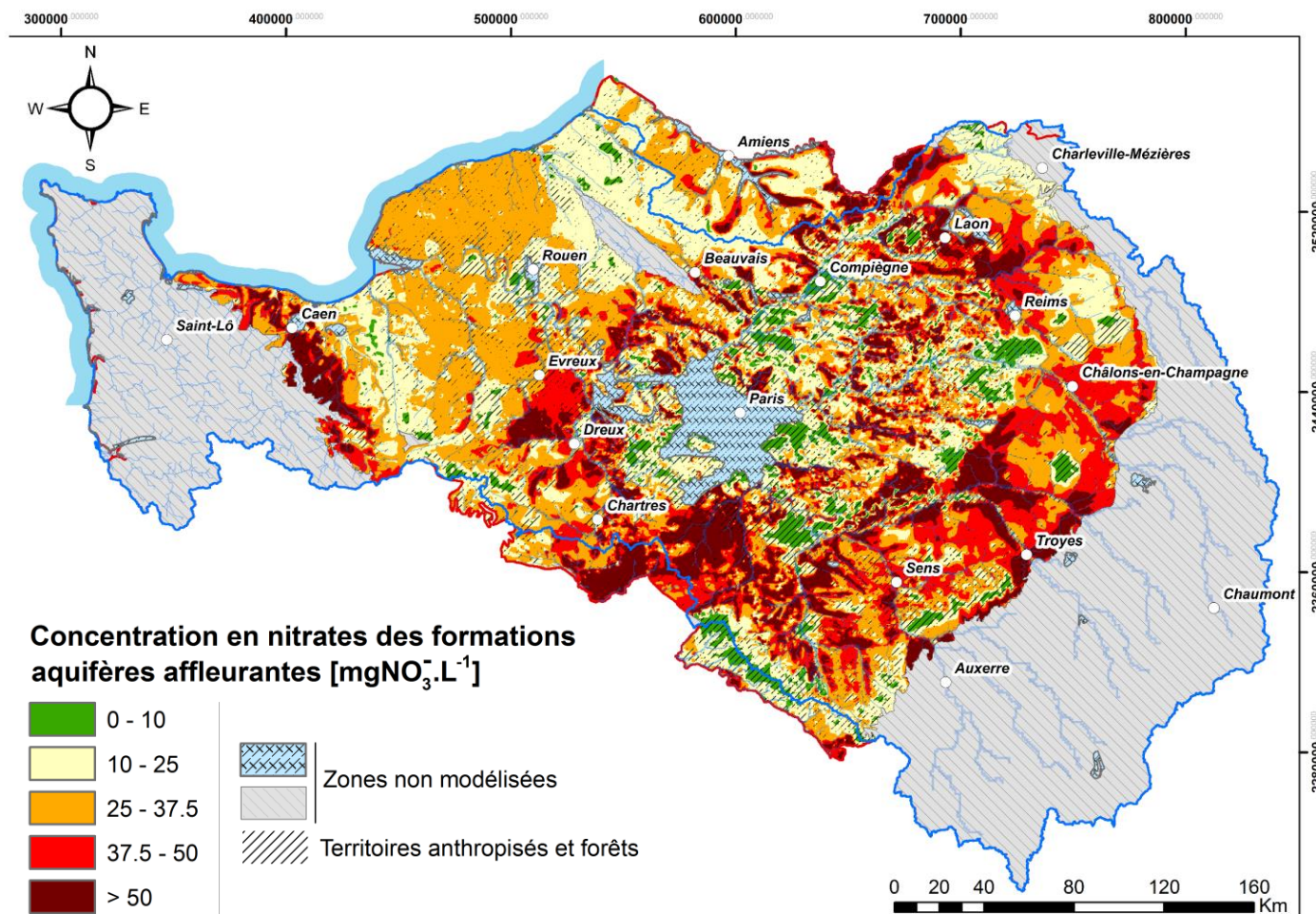
## Scenario A (2018-2050) : Poursuite d'une agriculture intensive et spécialisée

2035

Proportions surfaciques

> 37,5 mg L<sup>-1</sup> → 30 %

> 50 mg L<sup>-1</sup> → 14 %





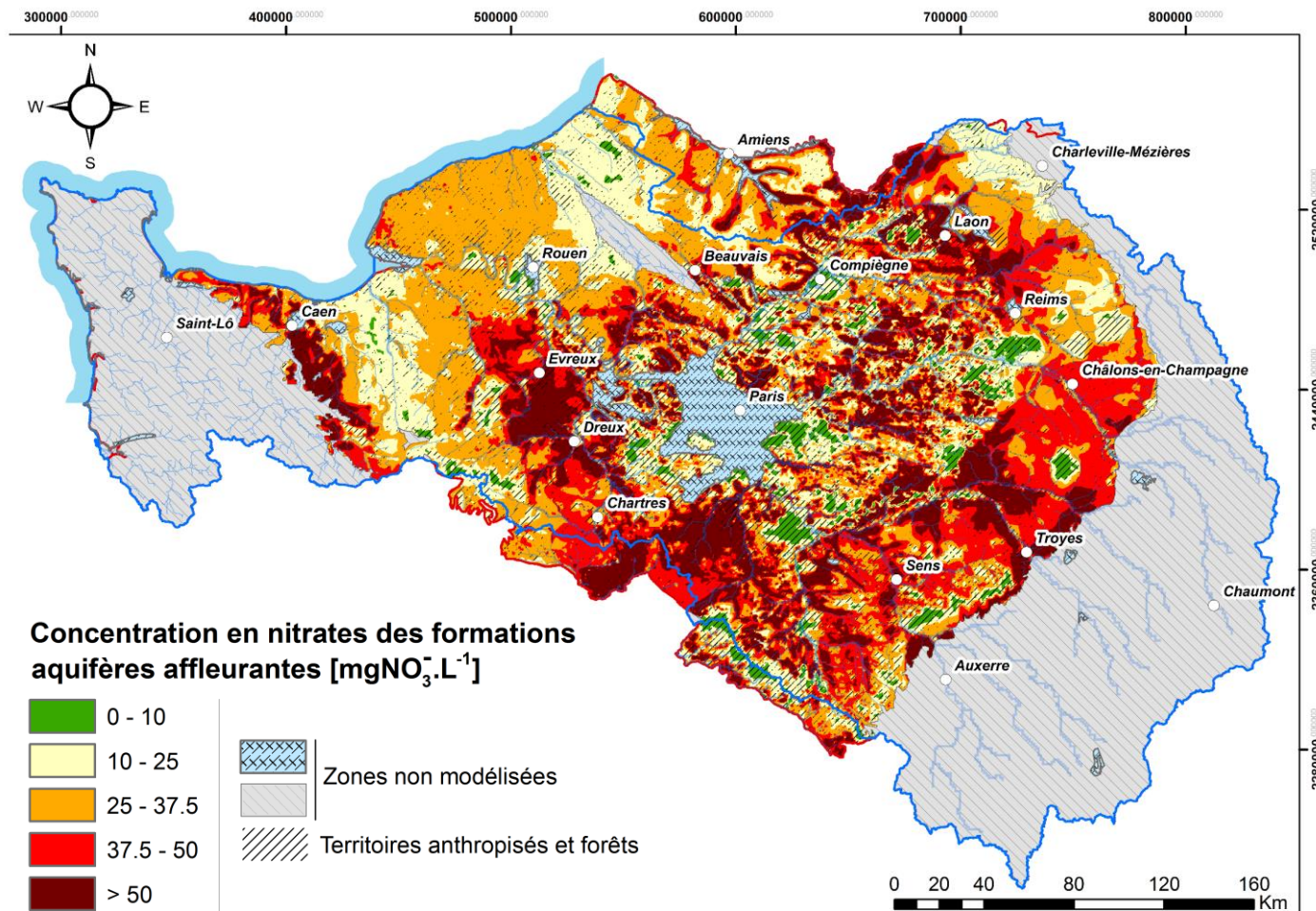
## Scenario A (2018-2050) : Poursuite d'une agriculture intensive et spécialisée

2050

Proportions surfaciques

> 37,5 mg L<sup>-1</sup> → 39 %

> 50 mg L<sup>-1</sup> → 19 %



## ■ Deux scénarios (2018-2050) :



- **Scenario A** : Poursuite d'une agriculture intensive et spécialisée

- **Hyperspécialisation** des productions du bassin (agriculture de précision, mécanisation, forts niveaux d'intrants azotés),
- **Adaptations techniques aux nouvelles contraintes du milieu** (irrigation, modification des calendriers de culture, etc.),
- Maintien de quelques petites exploitations spécialisées (AB, AOC). 5% de la SAU en 2050,
- **Filière laitière en déclin / disparition de l'élevage** dans certaines régions, etc.

- **Scenario B** : Vers une transition agro-écologique

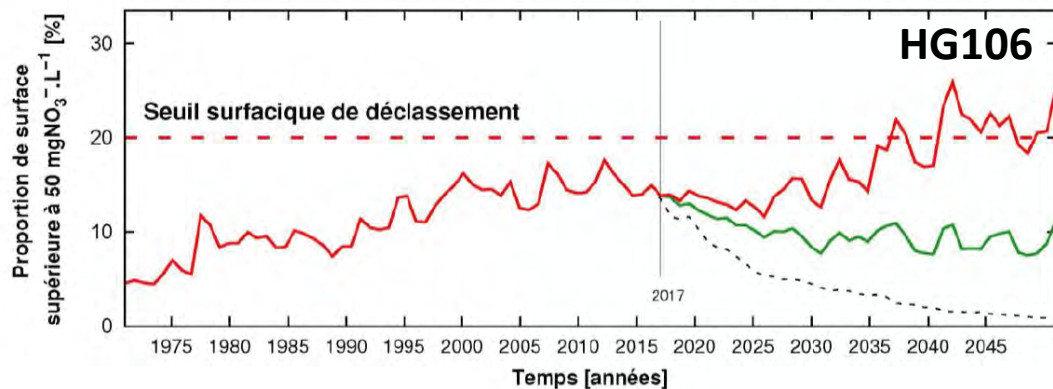
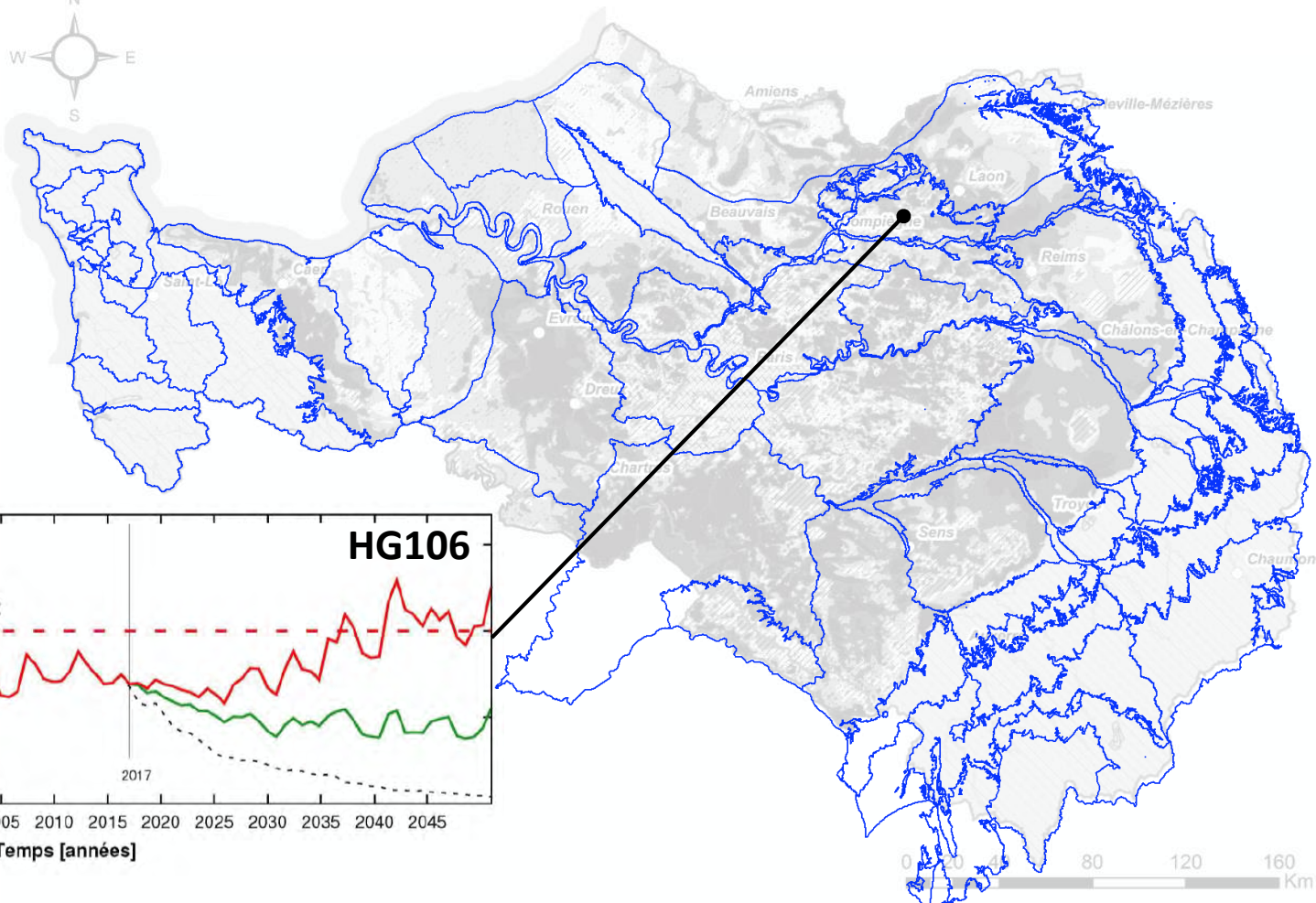
- **Maintien réduit** de systèmes de production de masse à très hauts niveaux d'intrants,
- Augmentation progressive de la SAU en **cultures tolérantes à la sécheresse**,
- **Utilisation croissante de légumineuses annuelles et pluriannuelles** (luzerne, féveroles, mélanges céréales-oléagineux),
- Développement progressif de surfaces en **agriculture biologique** (40% de la SAU en 2050),
- Développement des surfaces en **biomasse énergie** (< 5 % en 2050).

## Scénario B (2018-2050) : Vers une transition agro-écologique

~ 60 masses d'eau  
souterraine (MESO)



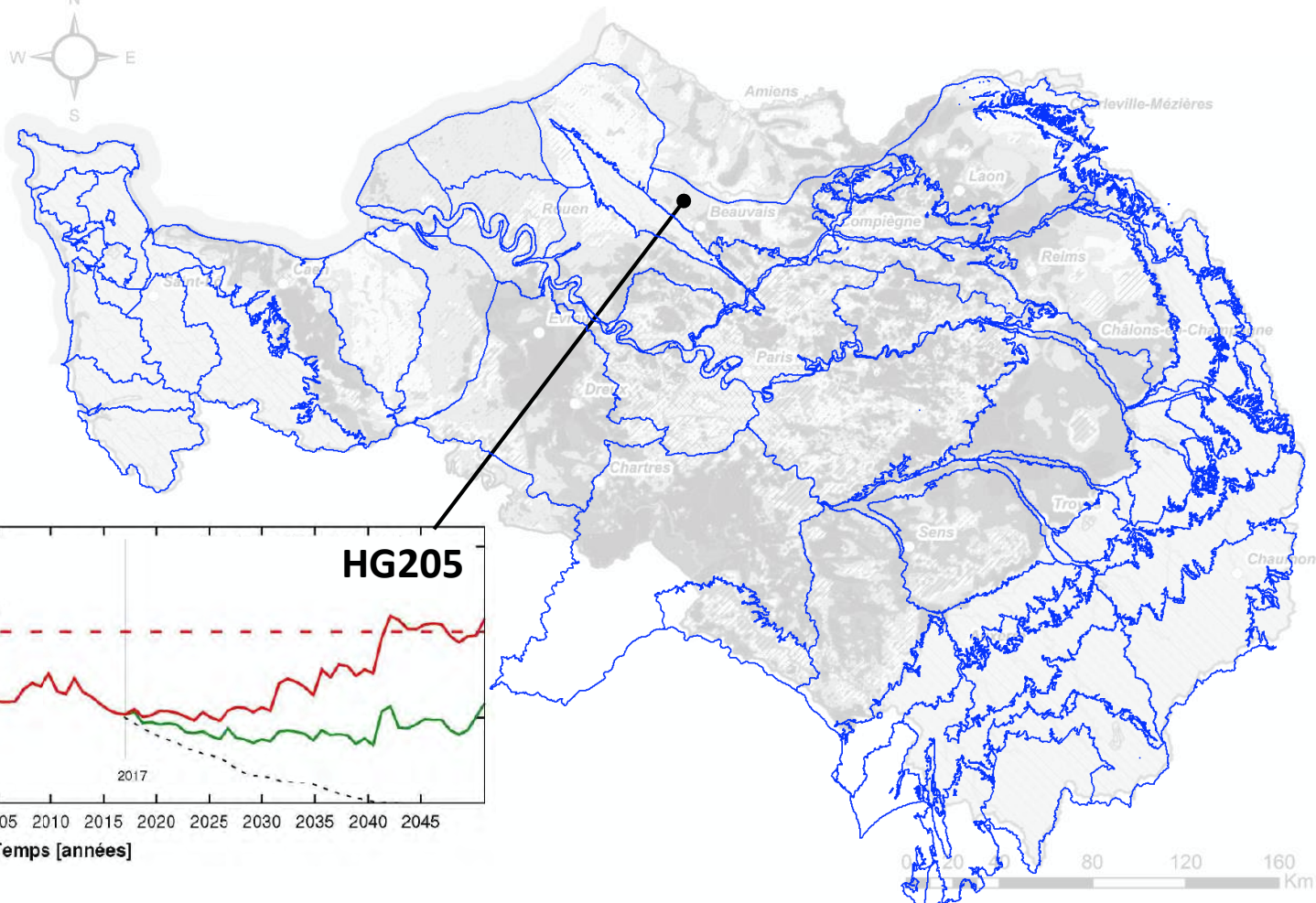
**Scénario A** ——— (red line)  
**Scénario B** ——— (green line)  
**Inertie de l'hydrosystème** - - - (dashed line)



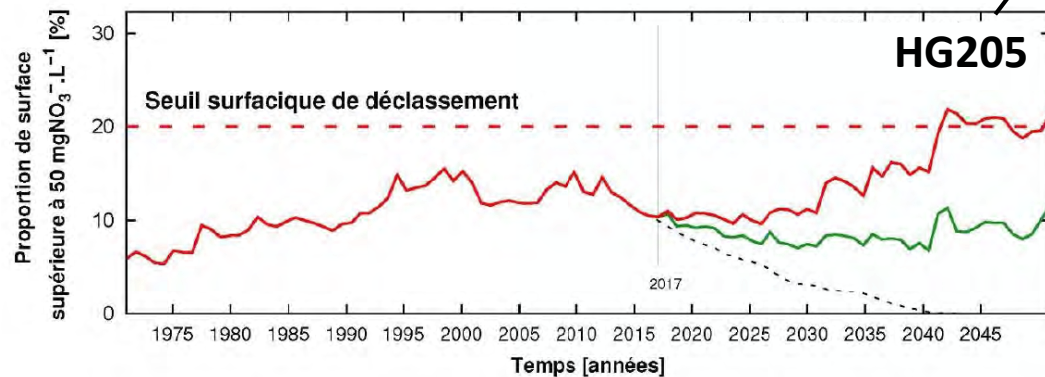


## Scenario B (2018-2050) : Vers une transition agro-écologique

~ 60 masses d'eau  
souterraine (MESO)

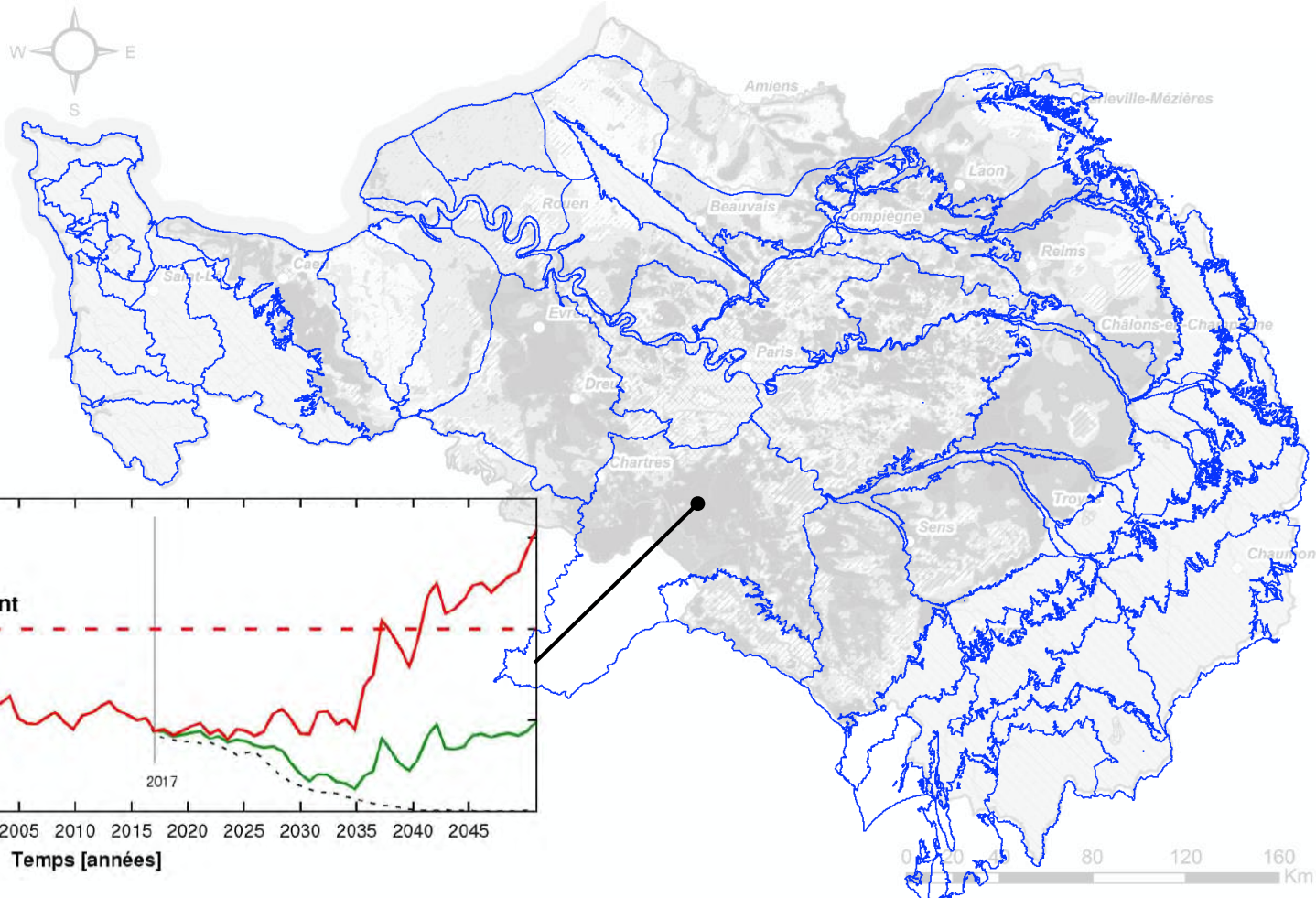


**Scénario A** ——— (red line)  
**Scénario B** ——— (green line)  
 Inertie de l'hydrosystème - - - - - (dashed line)

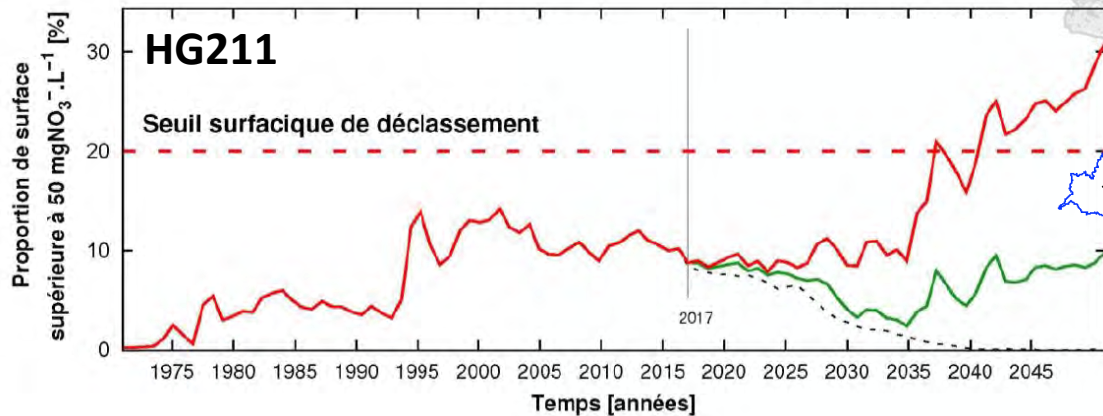


## Scenario B (2018-2050) : Vers une transition agro-écologique

~ 60 masses d'eau  
souterraine (MESO)



**Scénario A** ——— (red line)  
**Scénario B** ——— (green line)  
 Inertie de l'hydrosystème - - - (dashed line)



1. Mise en œuvre d'un **outil multi-disciplinaire** intégrant une large gamme d'entrées :
  - **Simulation fine** de l'état actuel de la ressource en eau du bassin,
  - **Quantification continue et** distribuée de scénarios.
2. **Fort intérêt cognitif** pour :
  - **Gestionnaires** = Eléments de connaissance pour aider à concevoir et/ou réorienter les politiques de protection des eaux en vigueur,
  - **Communauté scientifique** = Evaluation de la réactivité de l'hydrosystème à des modifications de contraintes d'origine humaine,
3. **Outil évolutif et générique** :
  - Extension récente des champs d'applications de l'outil à des **problèmes de température**.
4. **Actualisation en cours** :
  - Mise à jour de l'état actuel des MESO en **2023** dans le cadre du prochain « Etat des Lieux » de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie.

# Merci de votre attention !

---

## Références :

---

- **Gallois N., Viennot P.** (2018). *Modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole des grands aquifères du bassin Seine-Normandie - Actualisation des modélisations couplées agronomie/hydrogéologie : modélisation de scénarios agricoles sous changement climatique*, ARMINES / MINES ParisTech, rapport technique d'étude, 268 p.
- **Passy P., Viennot P., Gallois N., Billen G., Garnier J., Silvestre M., Thieu V.** (2018). *Modélisation des apports diffus d'azote et de phosphore aux masses d'eau de surface du bassin Seine-Normandie*. FIRE/ARMINES, rapport technique d'étude, 58 p.