

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

Cas d'étude du territoire Seine-Normandie

N. Gallois¹, P. Viennot¹, T. Puech², N. Beaudoin², P. Passy³, V. Thieu³, B. Mary²,
C. Le Bas², M. Silvestre⁴, C. Schott², F. Chlébowski², C. Mignolet²,
J. Garnier³, G. Billen³

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

² INRAE (Unités SAD-Aster, AgroImpact et Infosol)

³ Sorbonne-Université (UMR METIS)

⁴ CNRS (FIRE)



| PSL  | Centre de Géosciences

INRAe

S SORBONNE
UNIVERSITÉ

FÉDÉRATION ILE-DE-FRANCE
DE RECHERCHE EN ENVIRONNEMENT

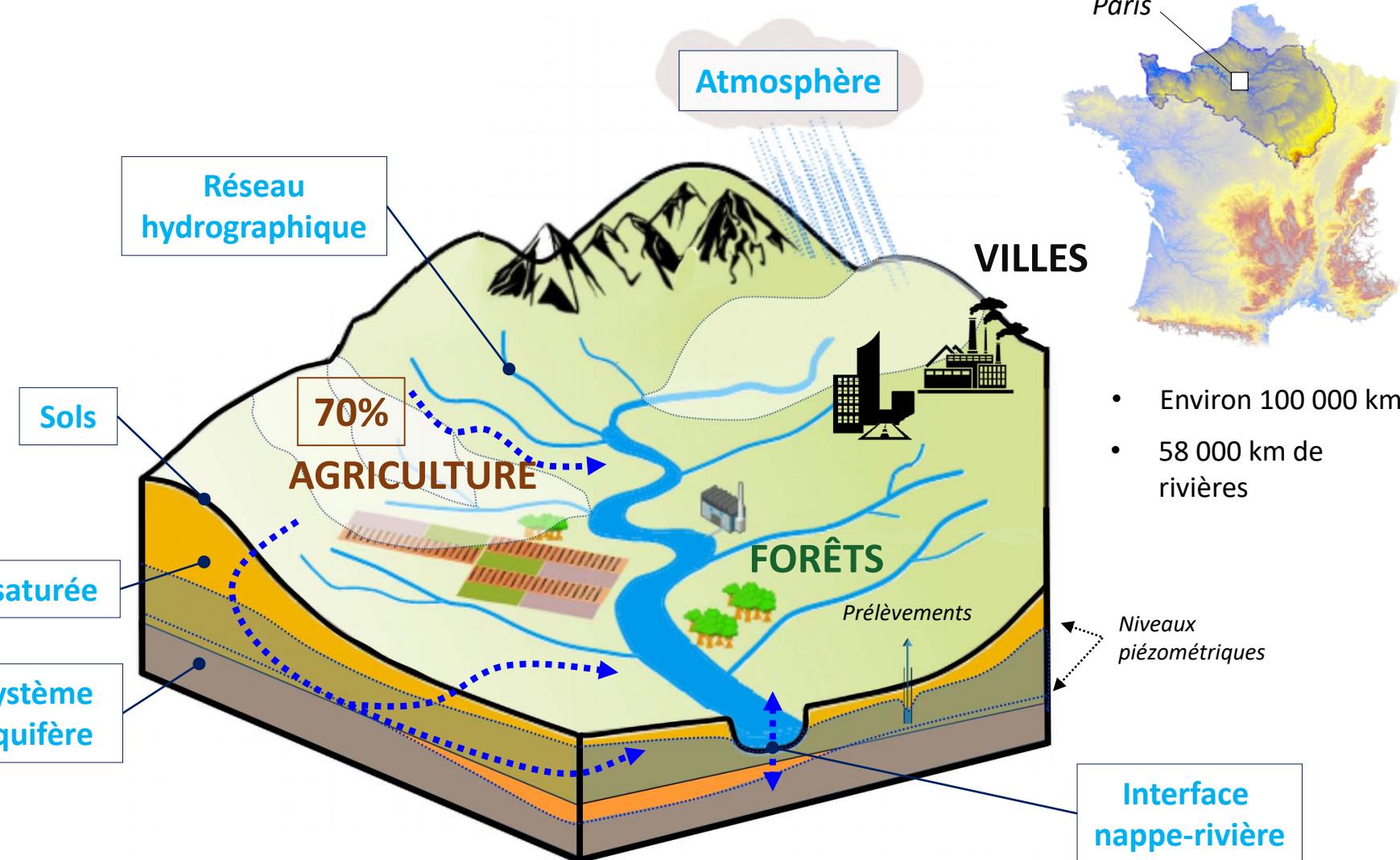

eau
SEINE
NORMANDIE
Agence de l'eau
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT

- 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'efficience de trajectoires alternatives.

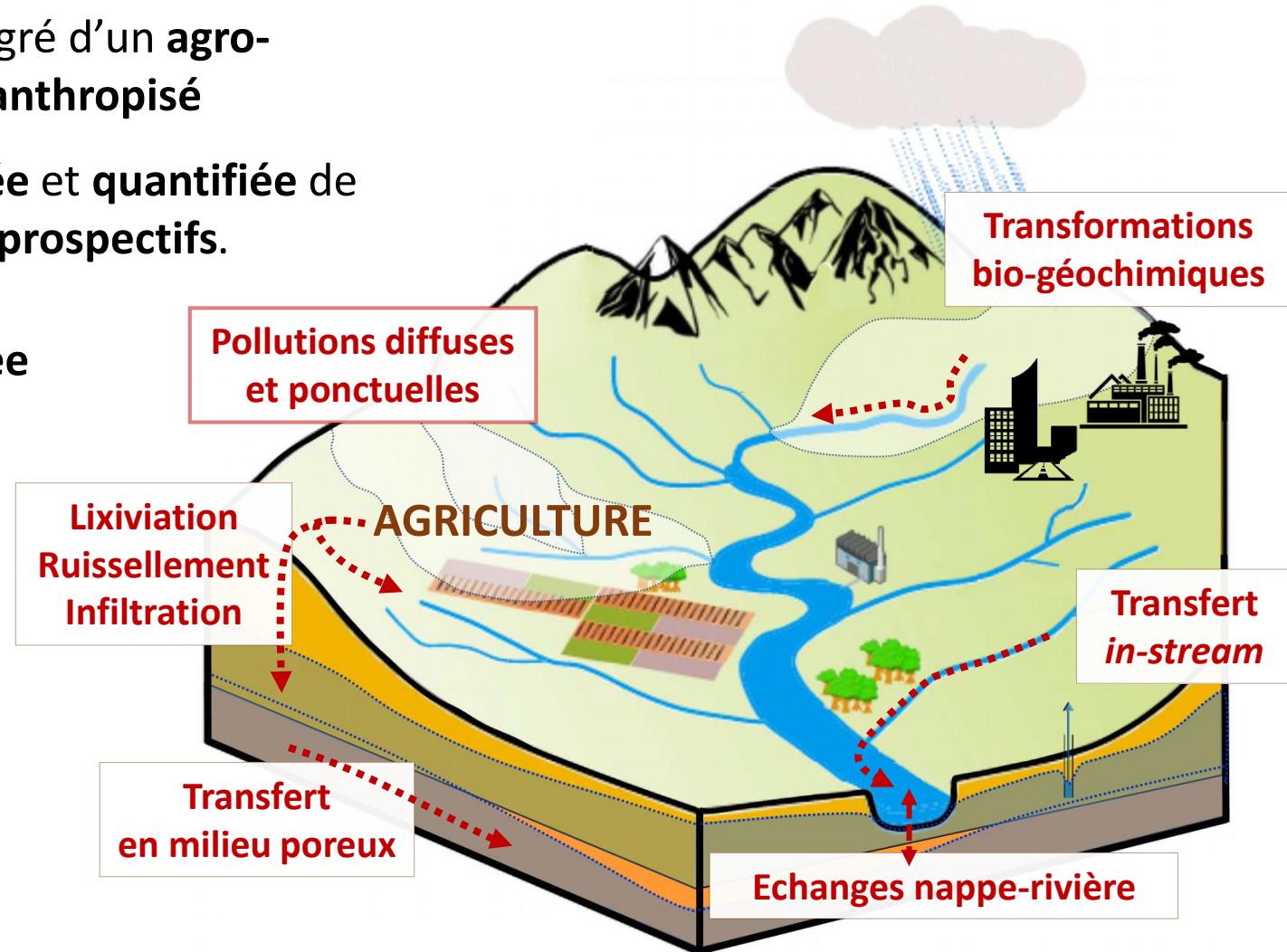
Deux prérequis majeurs

- **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.

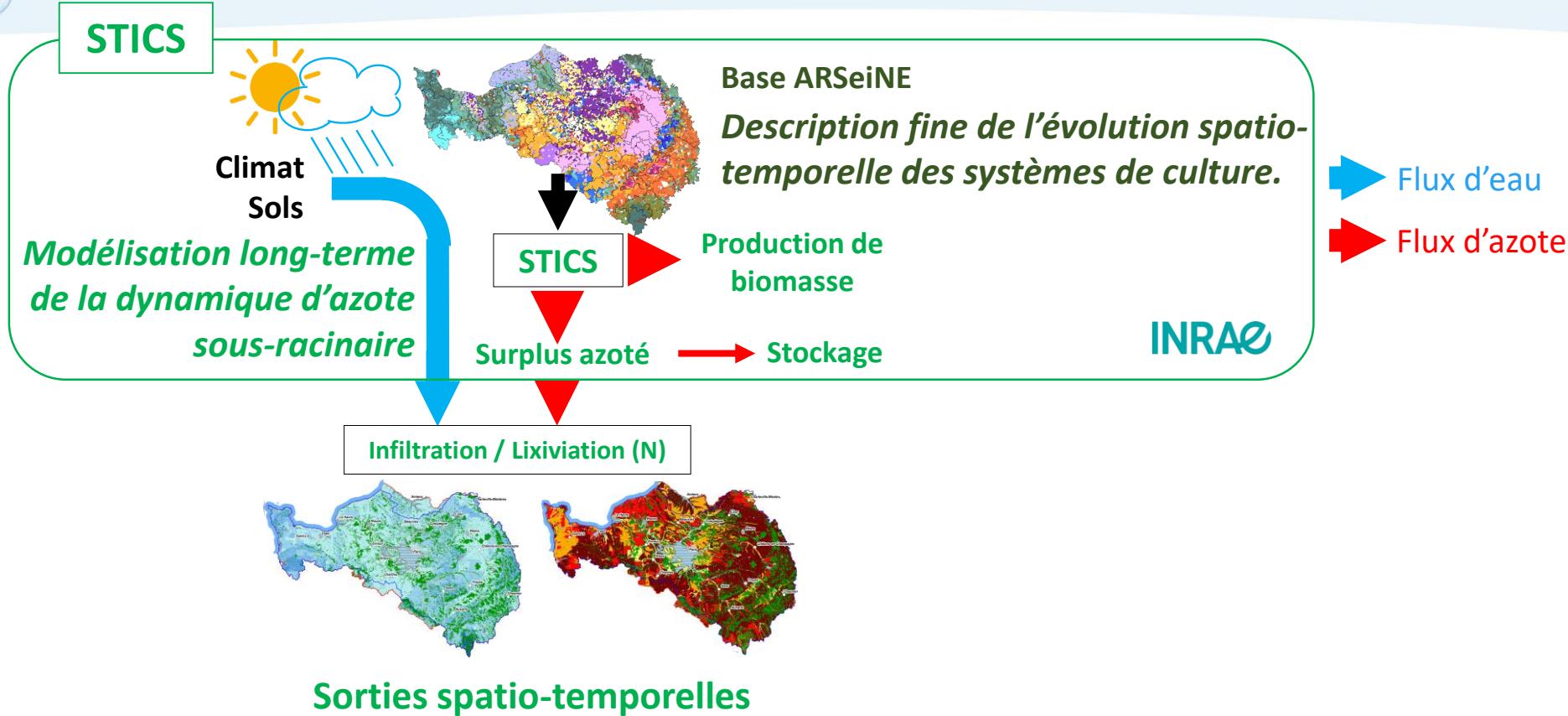
Un continuum régional anthropisé



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

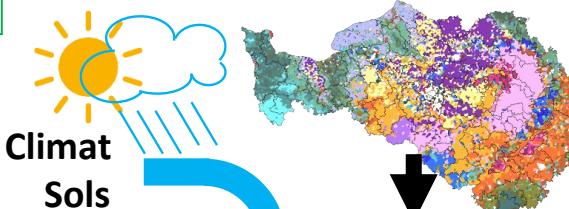


Une plate-forme multi-modèles



Une plate-forme multi-modèles

STICS



**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

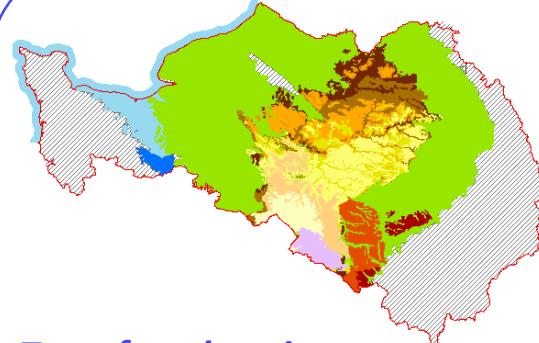
Surplus azoté

Stockage

INRAE

Flux d'eau
Flux d'azote

CaWaQS



*Transfert des nitrates
dans le compartiment
souterrain*

Infiltration / Lixiviation (N)

Système
aquifère

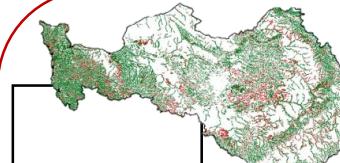
Contributions
rapides

Contributions
lentes

RIVERSTRÄHLER

Pollutions
ponctuelles

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



Zones
ripariennes

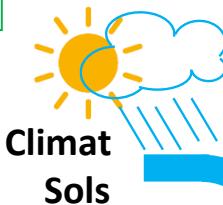
Rétention
riparienne

Flux diffus
vers le réseau

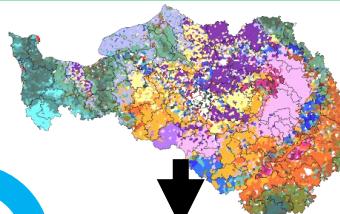
Rétention
in-stream

Une plate-forme multi-modèles

STICS



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



STICS

Base ARSeiNE

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

Production de
biomasse

Surplus azoté

Stockage

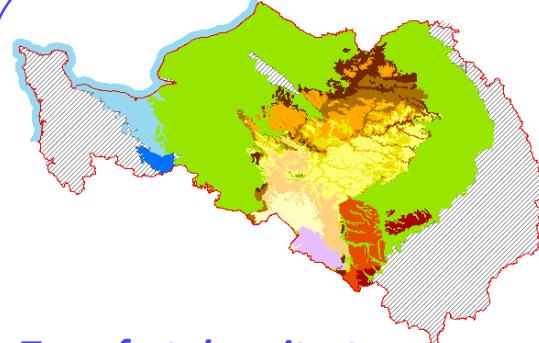
INRAE

Flux d'eau

Flux d'azote

Validation

CaWaQS



*Transfert des nitrates
dans le compartiment
souterrain*

Infiltration / Lixiviation (N)

Contributions
rapides

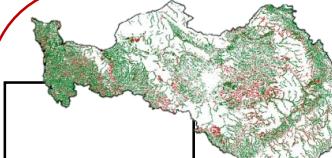
Système
aquifère

Contributions
lentes

RIVERSTRAHLER

Pollutions
ponctuelles

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



Zones
ripariennes

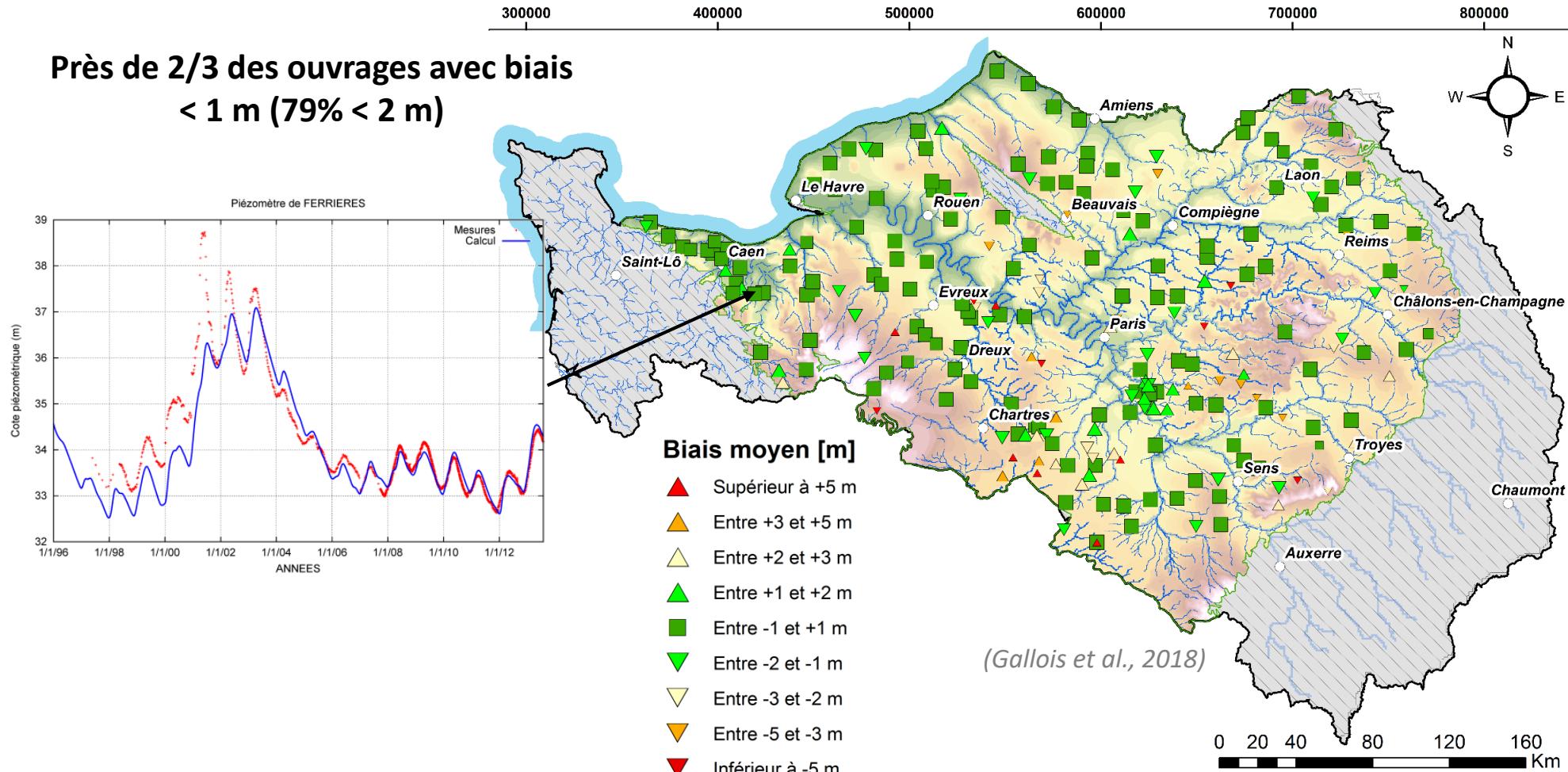
Rétention
riparienne

Flux diffus
vers le réseau

Rétention
in-stream

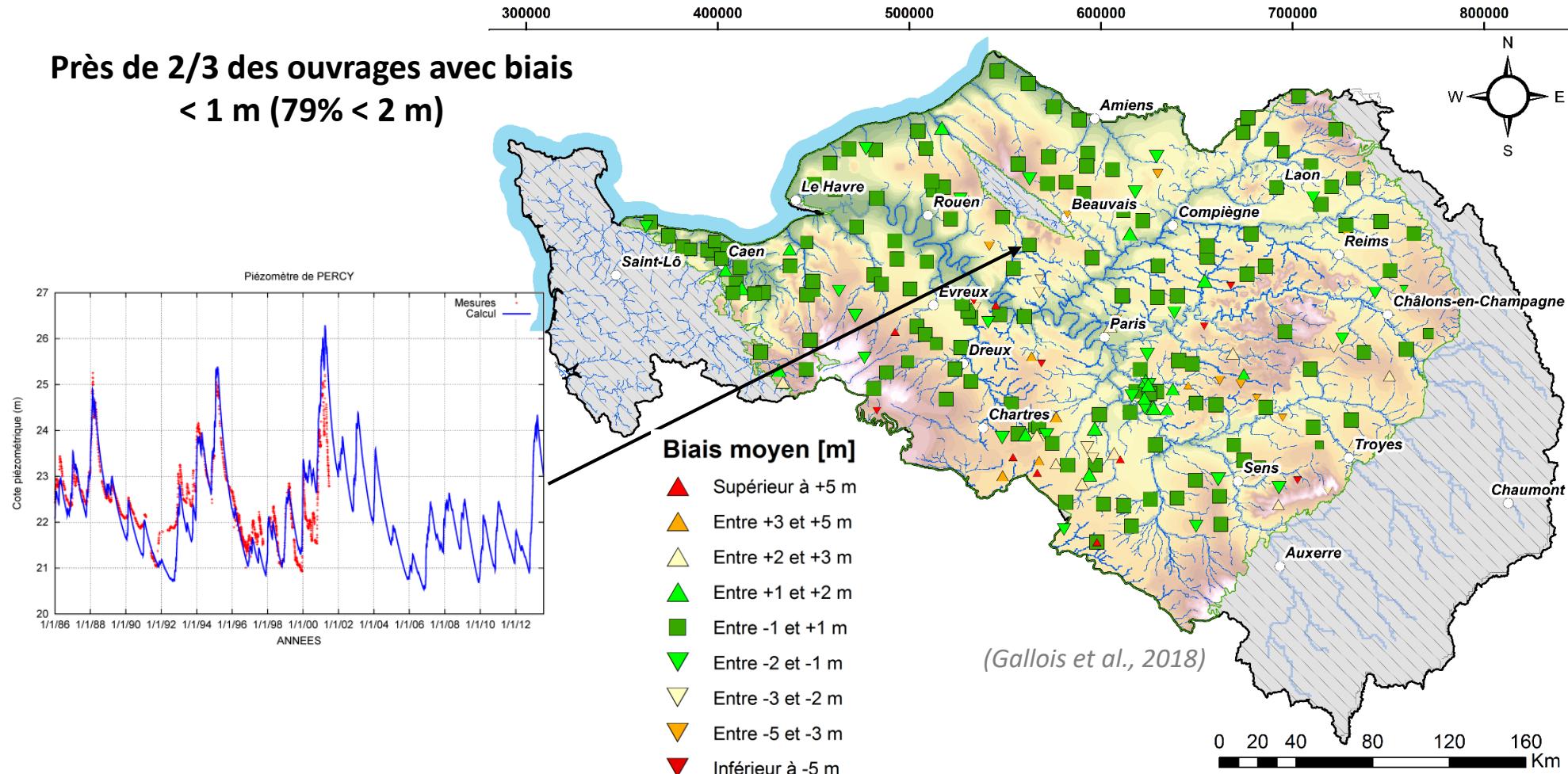
- Hydrodynamisme aquifère : Validation sur la piézométrie mesurée (~ 250 ouvrages).

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



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

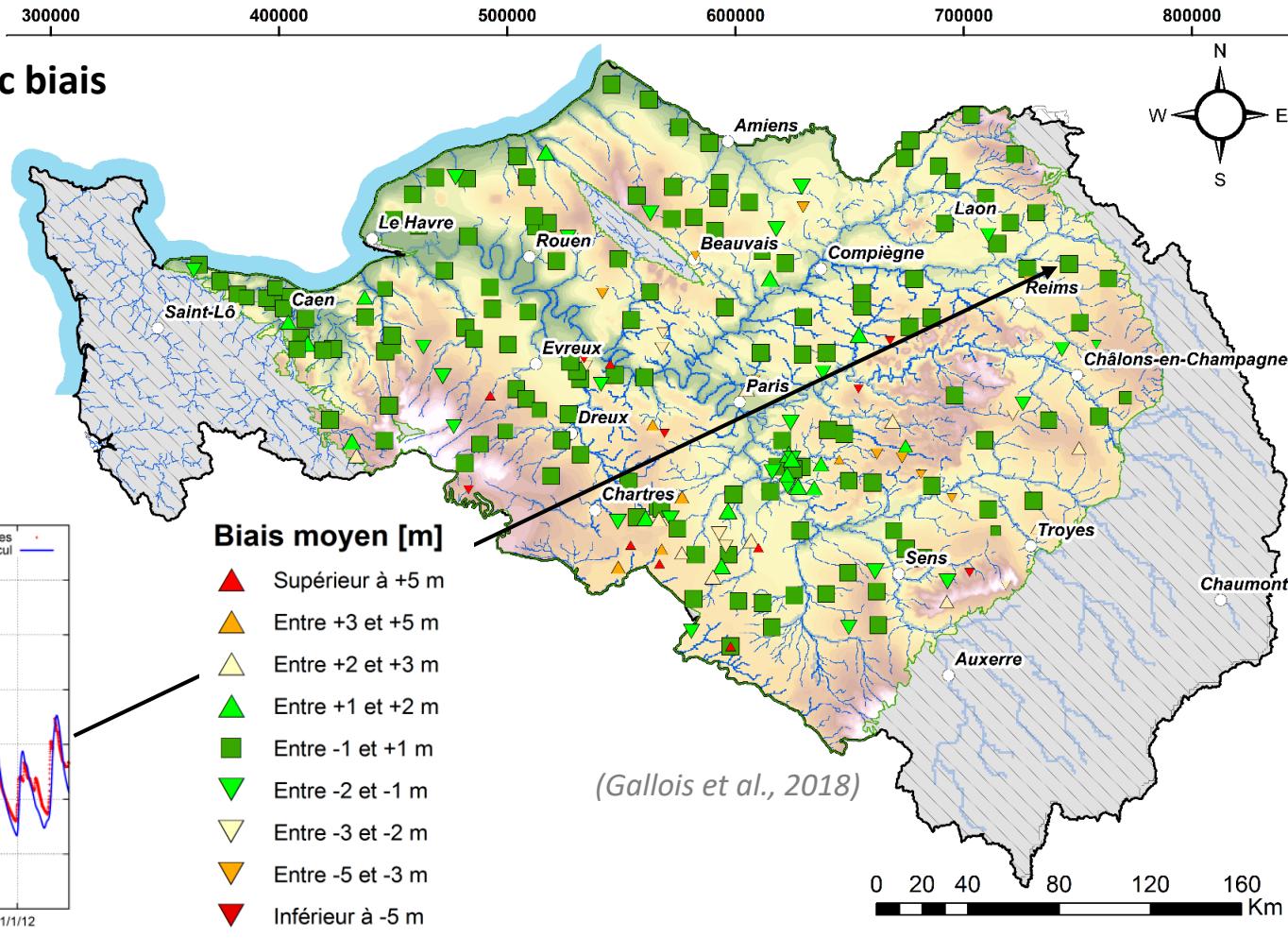
Près de 2/3 des ouvrages avec biais
 < 1 m (79% < 2 m)



Validation rétrospective (1970-2018)

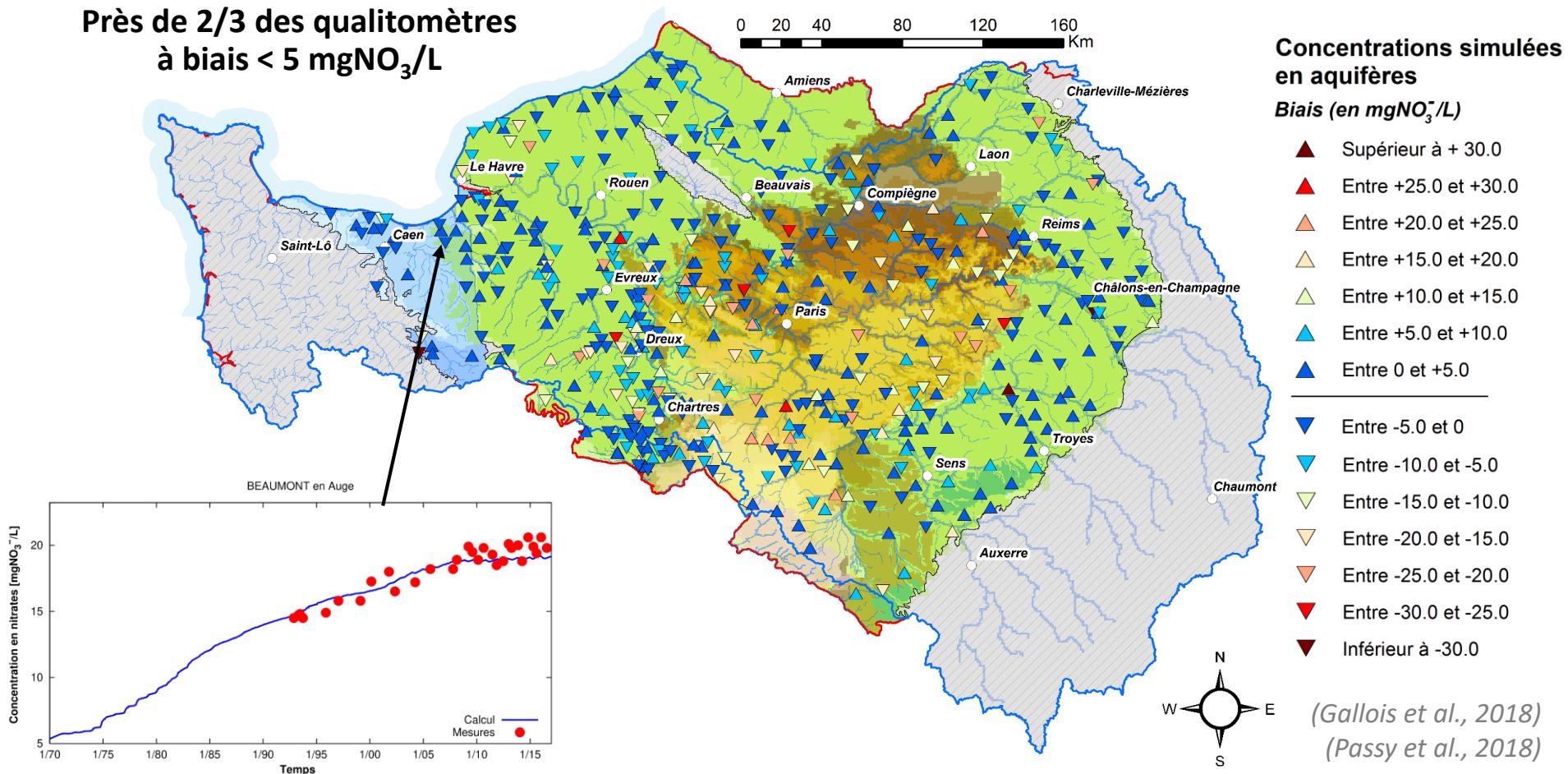
- Hydrodynamisme aquifère : Validation sur la piézométrie mesurée (~ 250 ouvrages).

Près de 2/3 des ouvrages avec biais
 $< 1 \text{ m}$ (79% $< 2 \text{ m}$)



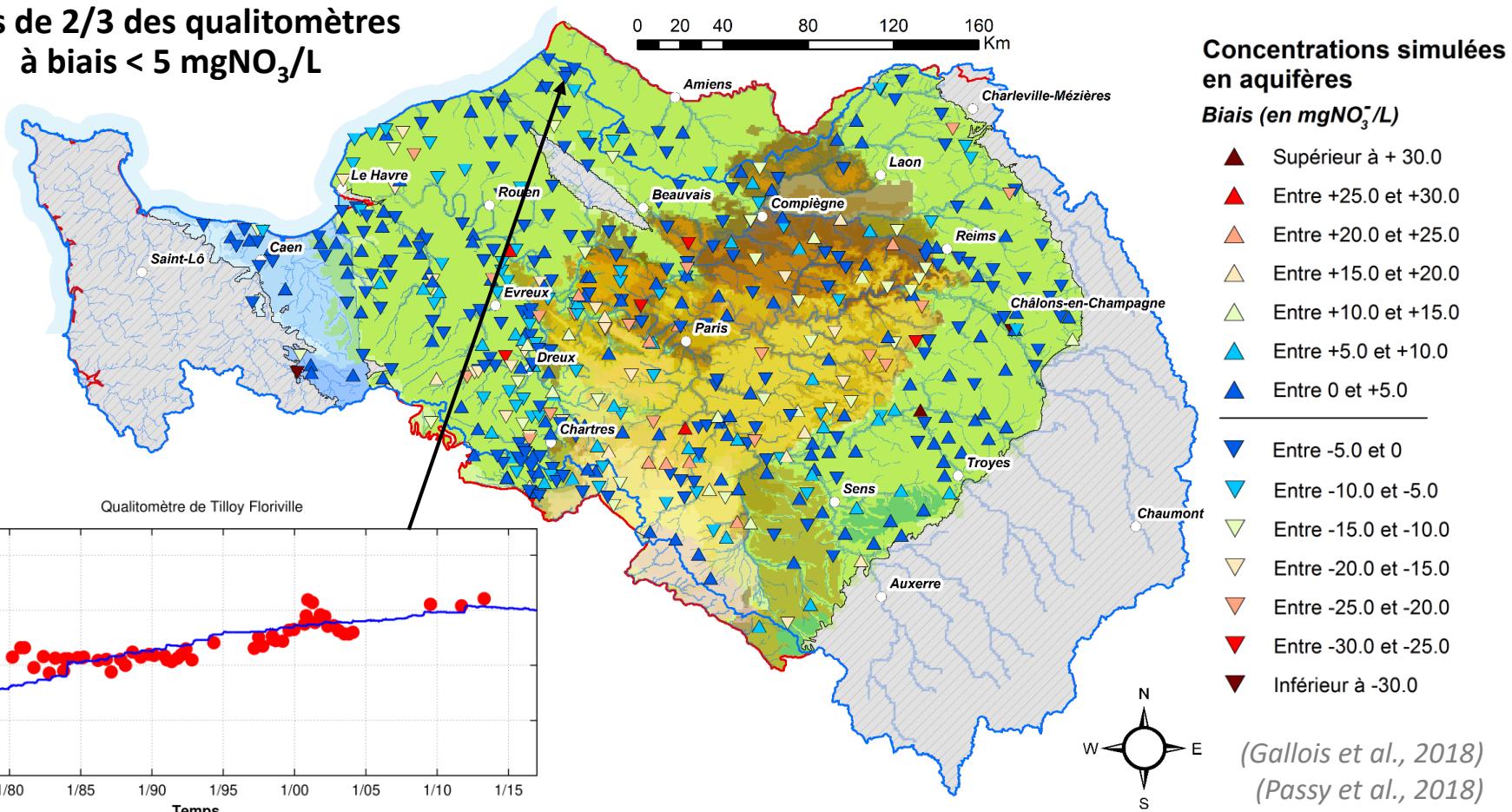
- Dynamique aquifère des nitrates : Validation sur les concentrations mesurées (~ 530 ouvrages).

Près de 2/3 des qualitomètres
à biais < 5 mgNO₃/L



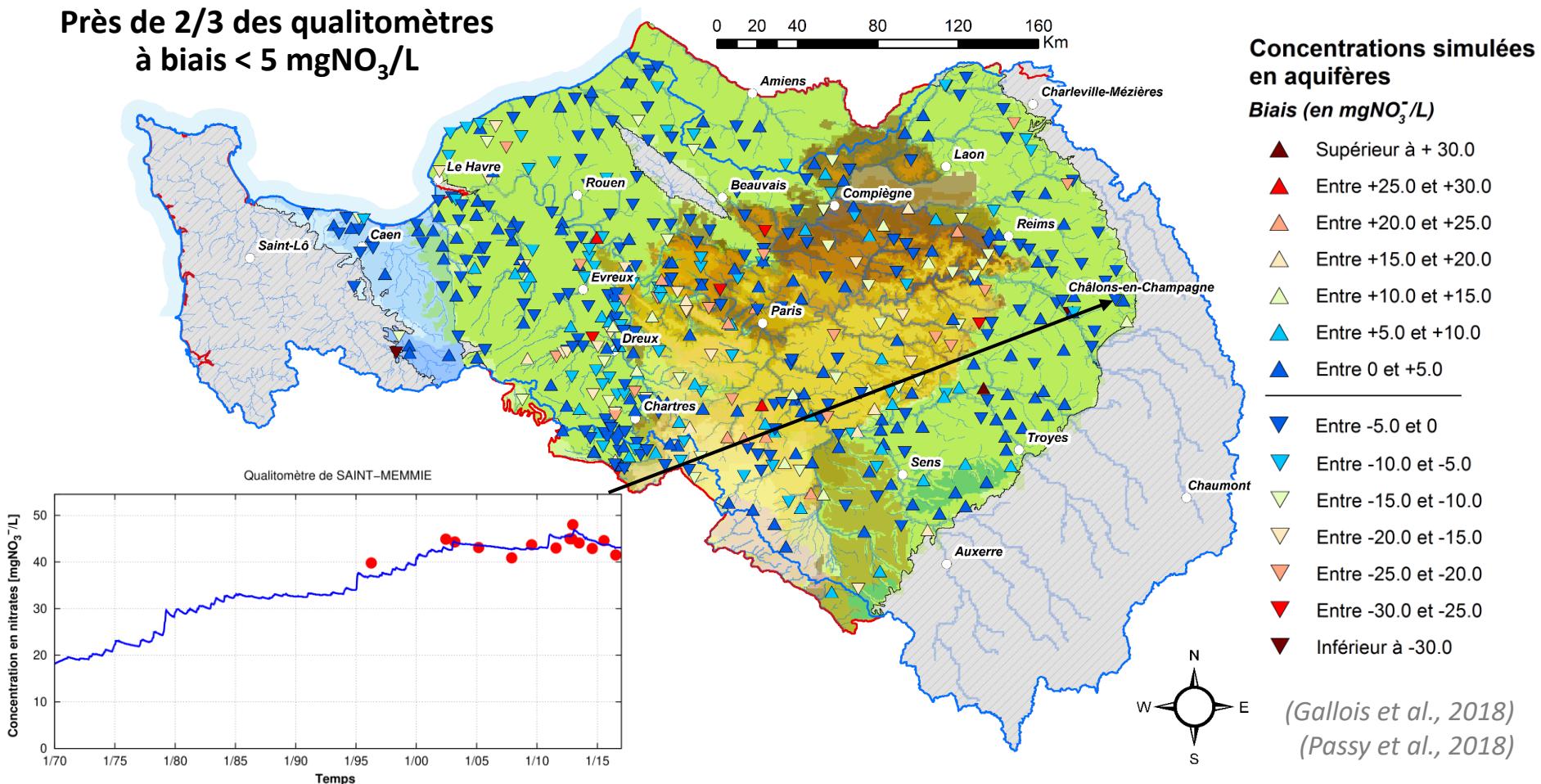
- Dynamique aquifère des nitrates : Validation sur les concentrations mesurées (~ 530 ouvrages).

Près de 2/3 des qualimètres
à biais < 5 mgNO₃/L



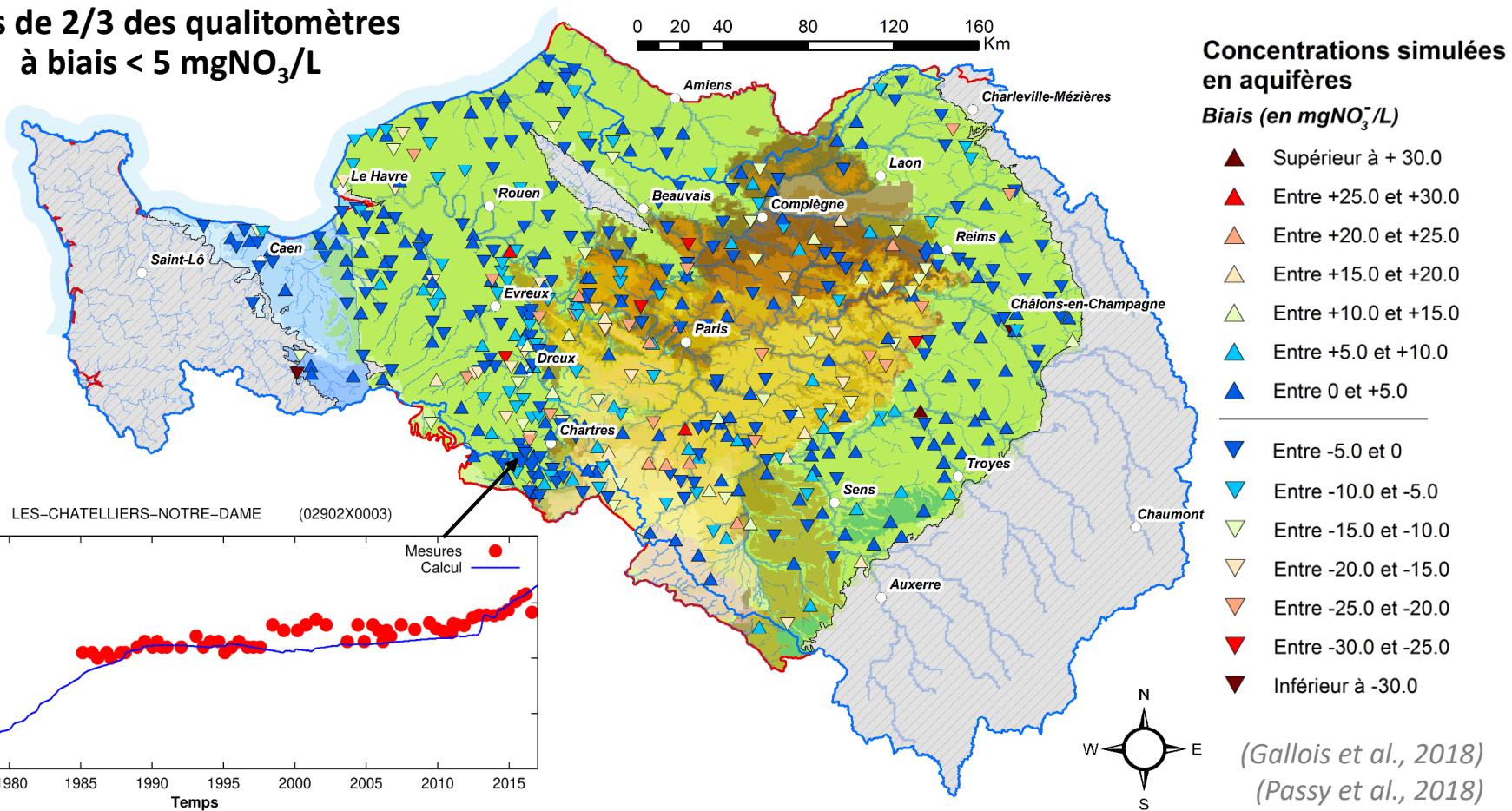
- Dynamique aquifère des nitrates : Validation sur les concentrations mesurées (~ 530 ouvrages).

Près de 2/3 des qualitomètres
à biais < 5 mgNO₃/L



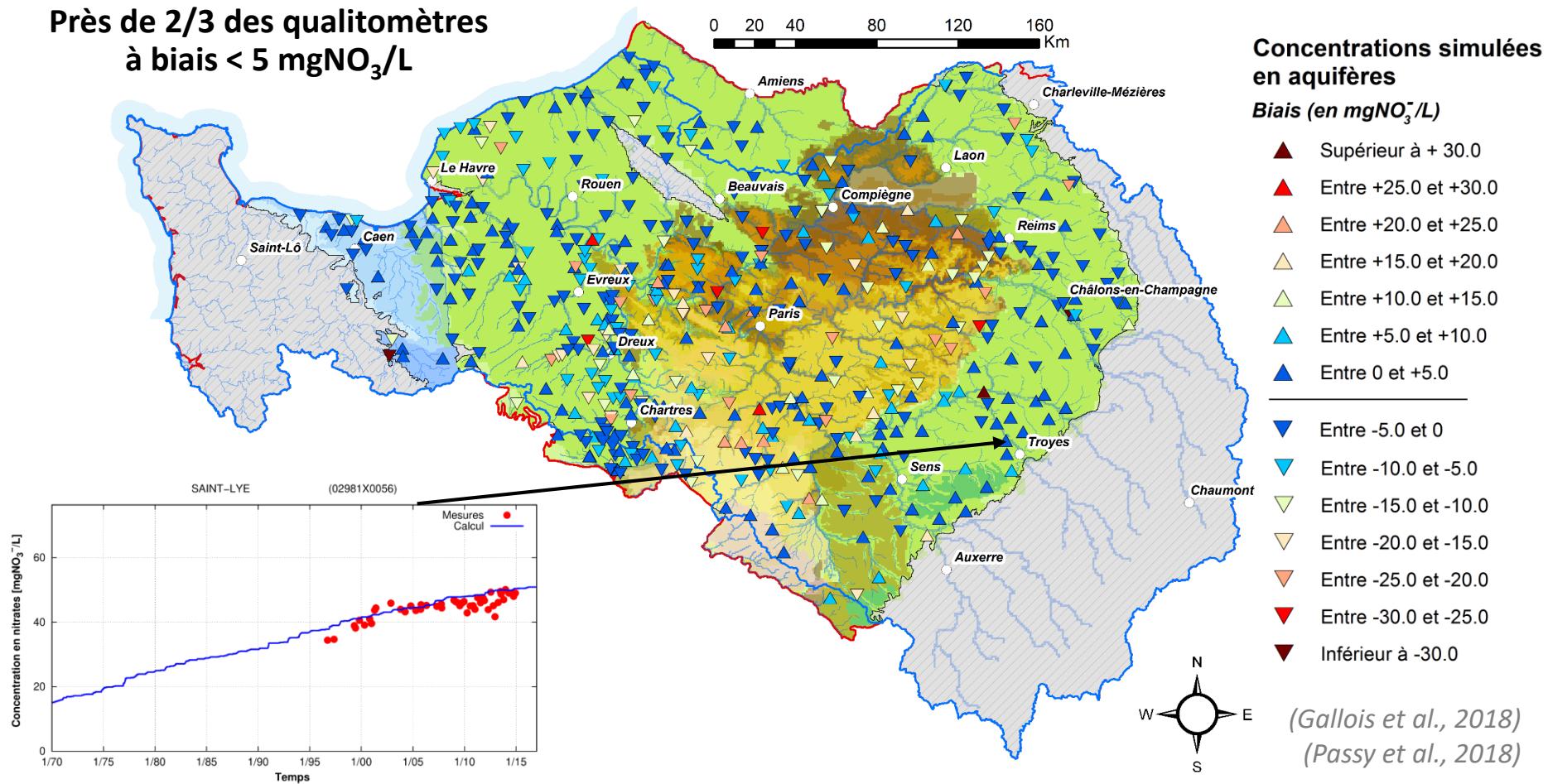
- Dynamique aquifère des nitrates : Validation sur les concentrations mesurées (~ 530 ouvrages).

Près de 2/3 des qualitomètres
à biais < 5 mgNO₃/L



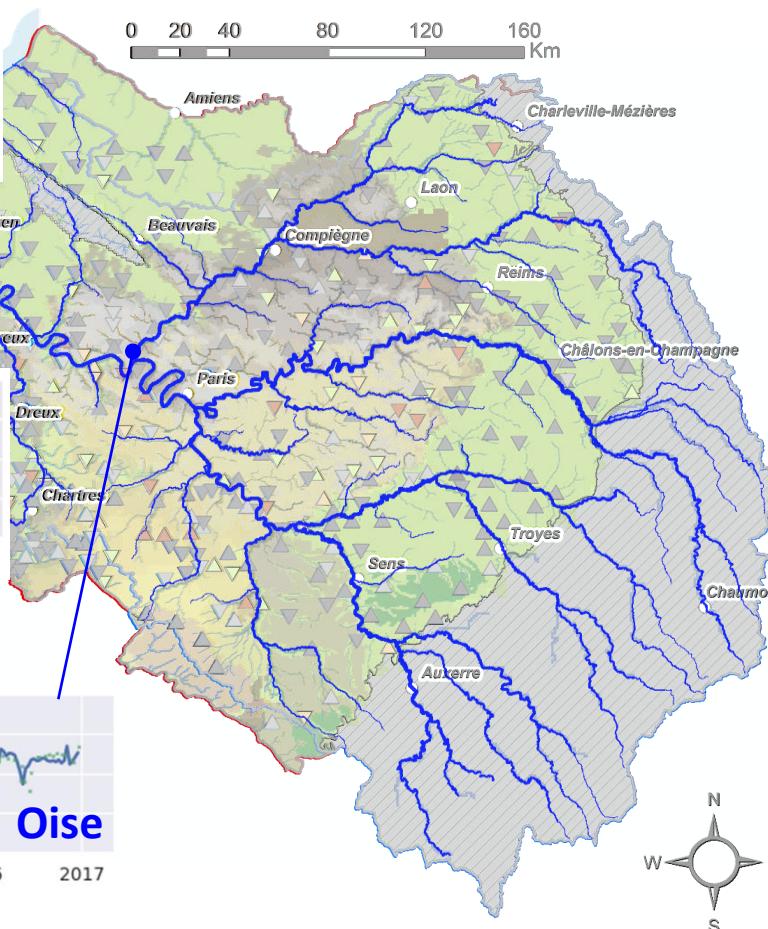
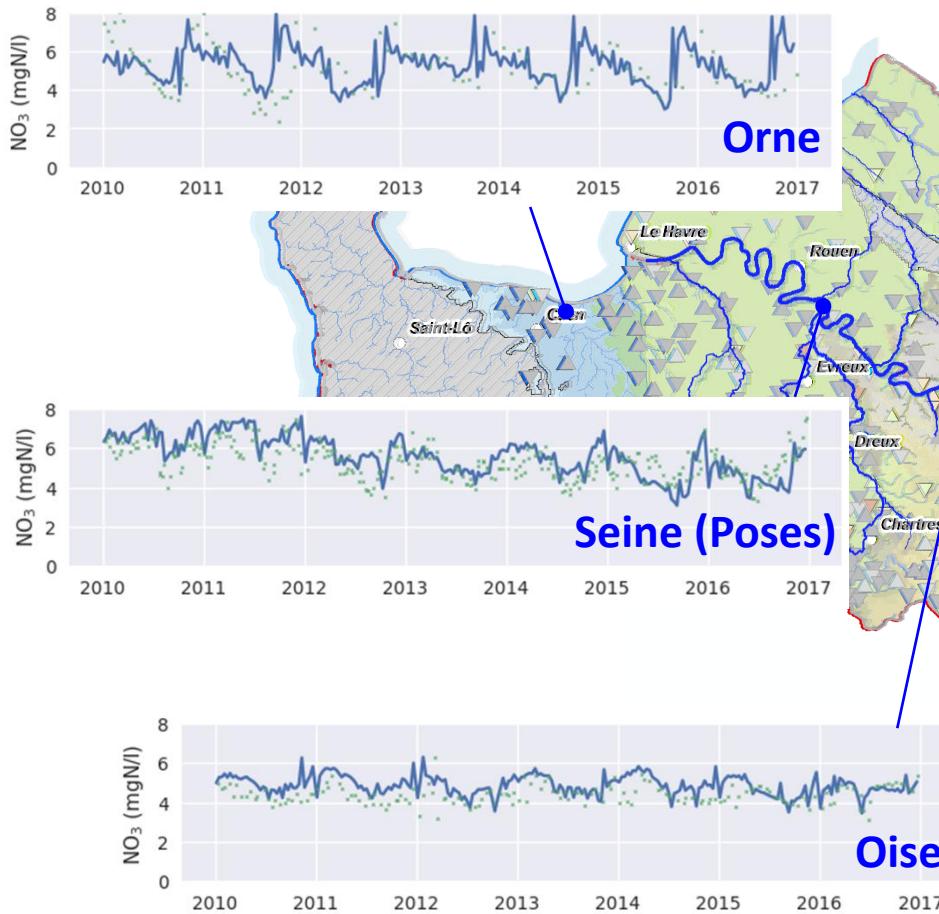
- Dynamique aquifère des nitrates : Validation sur les concentrations mesurées (~ 530 ouvrages).

Près de 2/3 des qualitomètres
à biais < 5 mgNO₃/L



Validation rétrospective (1970-2018)

- Dynamiques **en rivière** : Validation sur les concentrations mesurées



Concentrations simulées en aquifères

Biais (en mgNO_3/L)

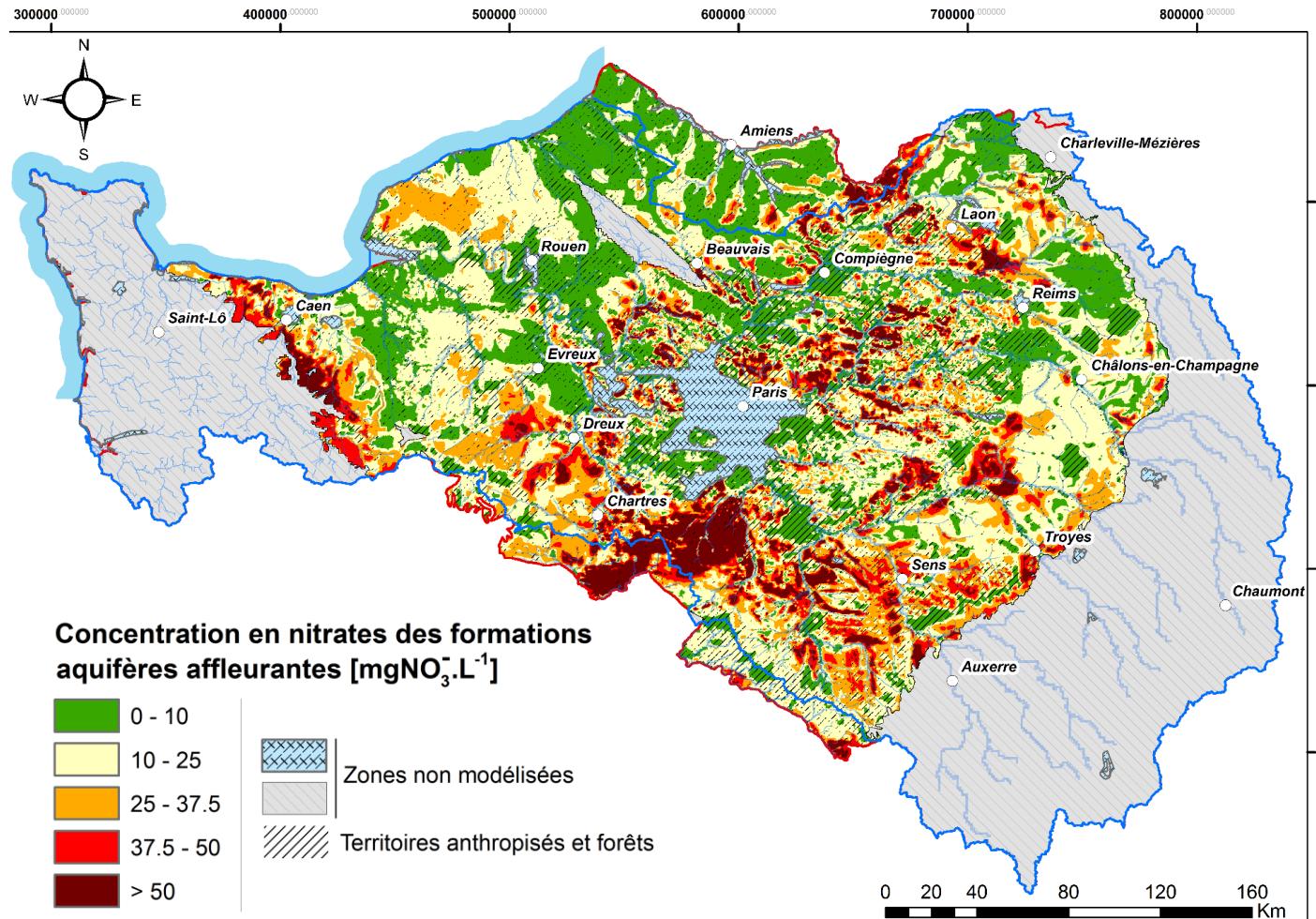
▲ Supérieur à + 30.0
▲ Entre +25.0 et +30.0
▲ Entre +20.0 et +25.0
▲ Entre +15.0 et +20.0
▲ Entre +10.0 et +15.0
▲ Entre +5.0 et +10.0
▲ Entre 0 et +5.0
—
▼ Entre -5.0 et 0
▼ Entre -10.0 et -5.0
▼ Entre -15.0 et -10.0
▼ Entre -20.0 et -15.0
▼ Entre -25.0 et -20.0
▼ Entre -30.0 et -25.0
▼ Inférieur à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

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

Reconstitution continue

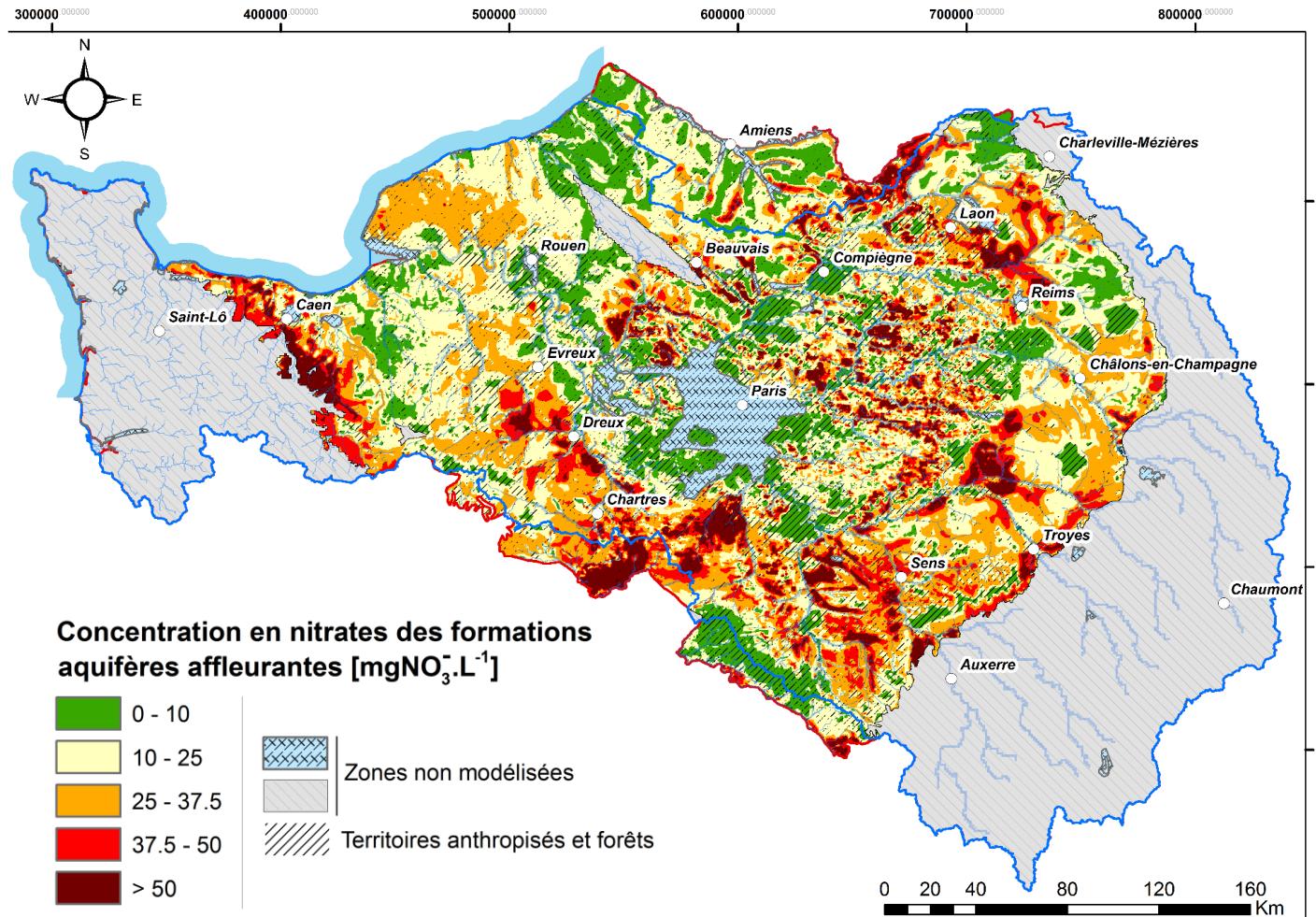
- Evaluation spatialisée et continue des niveaux de pollution nitrique passés et actuels.

1980



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

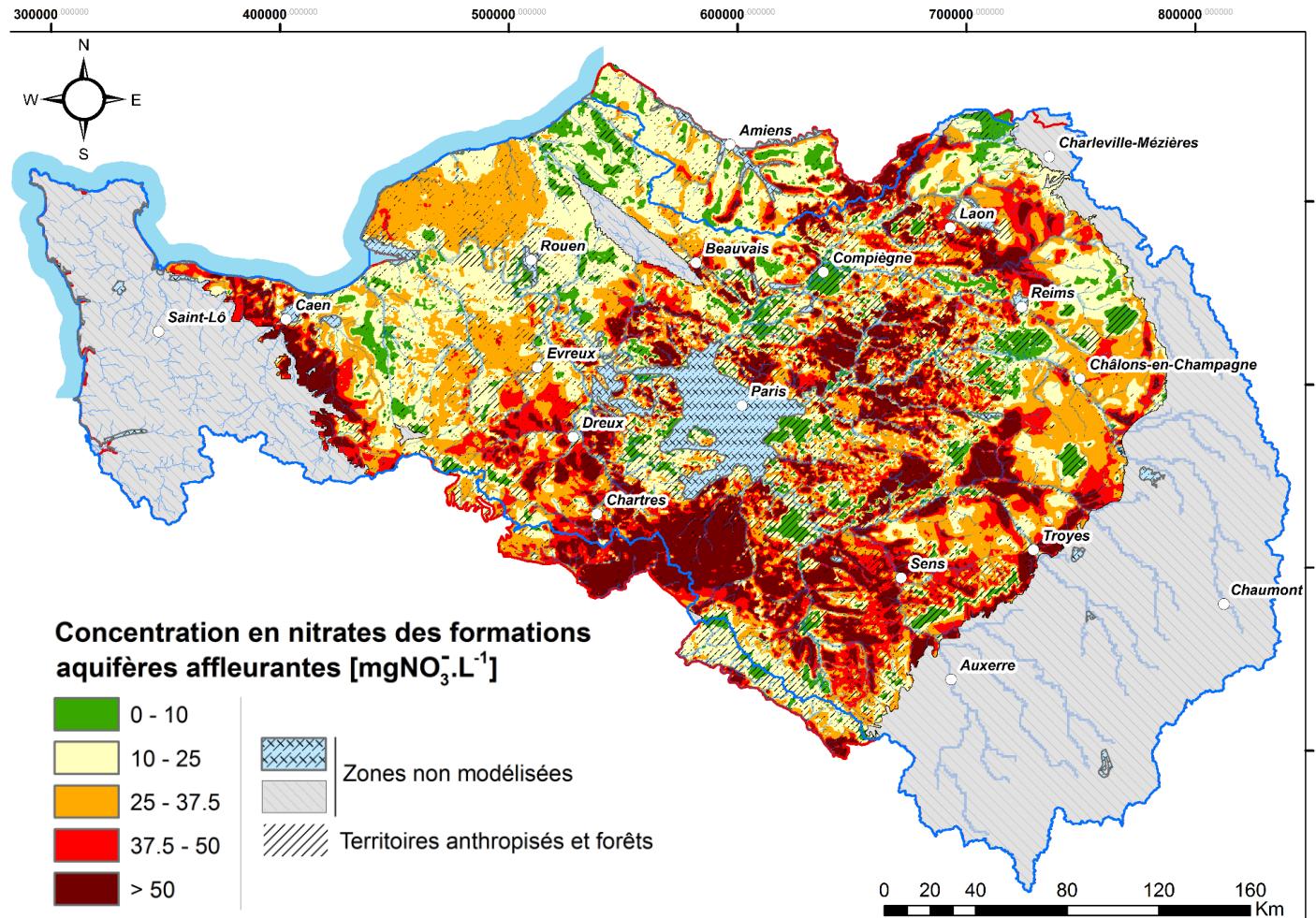
1990



Reconstitution continue

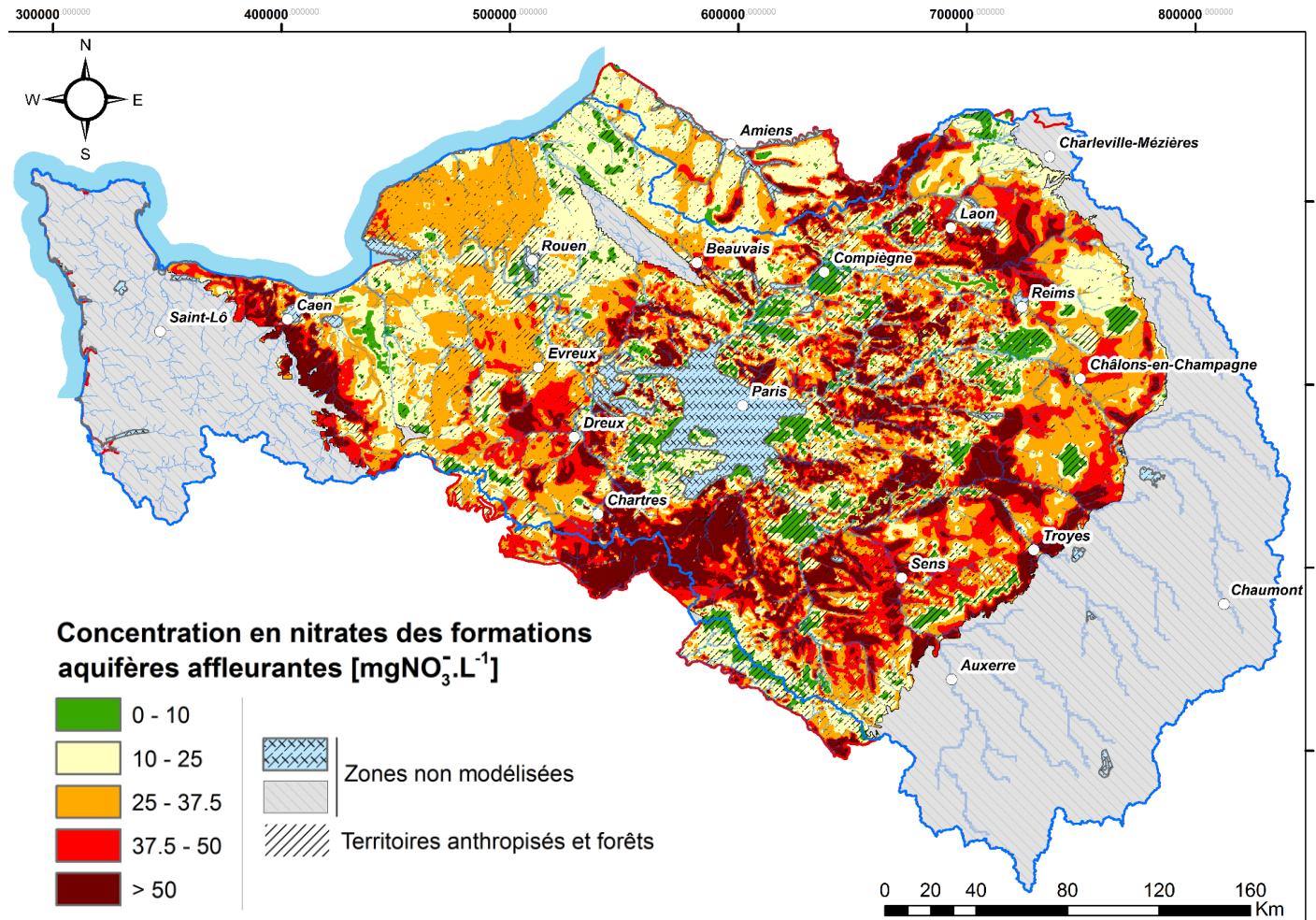
- Evaluation spatialisée et continue des niveaux de pollution nitrique passés et actuels.

2000



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

2010



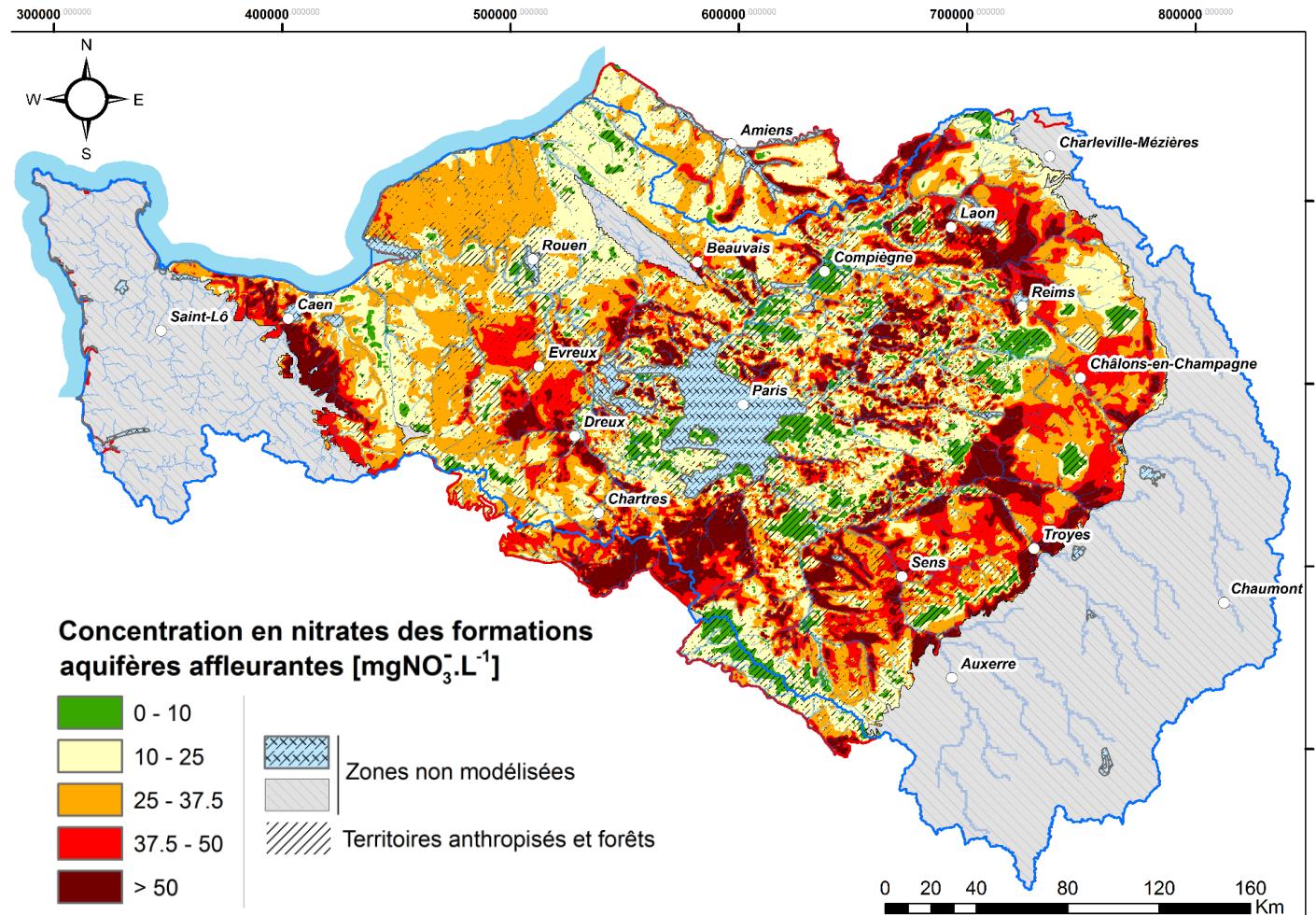
- Evaluation spatialisée et continue des niveaux de pollution nitrique passés et actuels.

2018

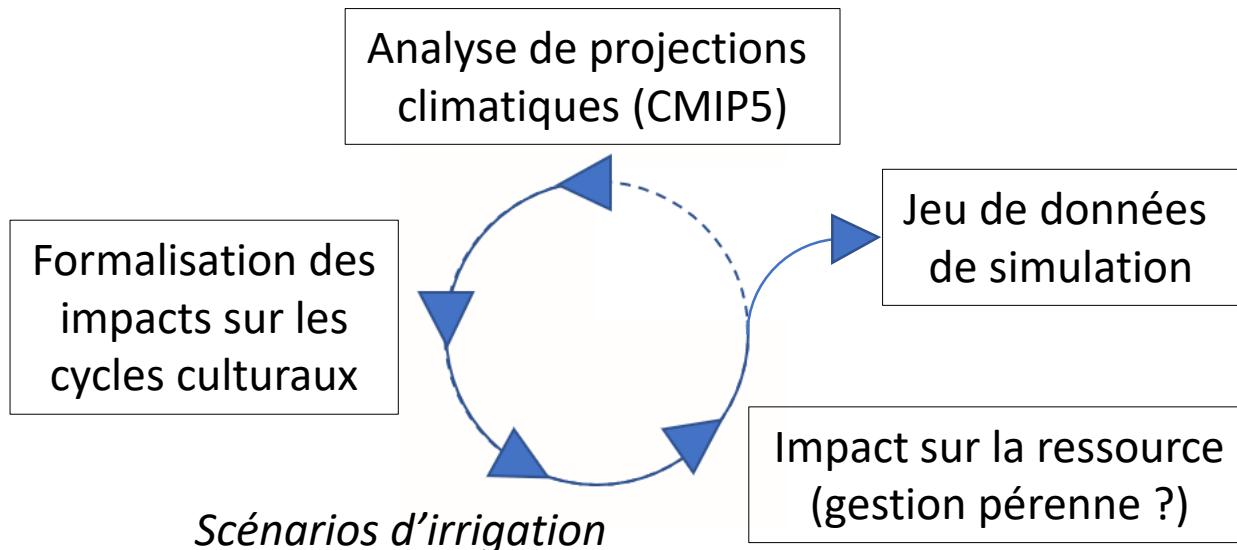
Proportions surfaciques

> 37,5 mg L⁻¹ → 26 %

> 50 mg L⁻¹ → 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**

- **Hyperspecialisation** 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.

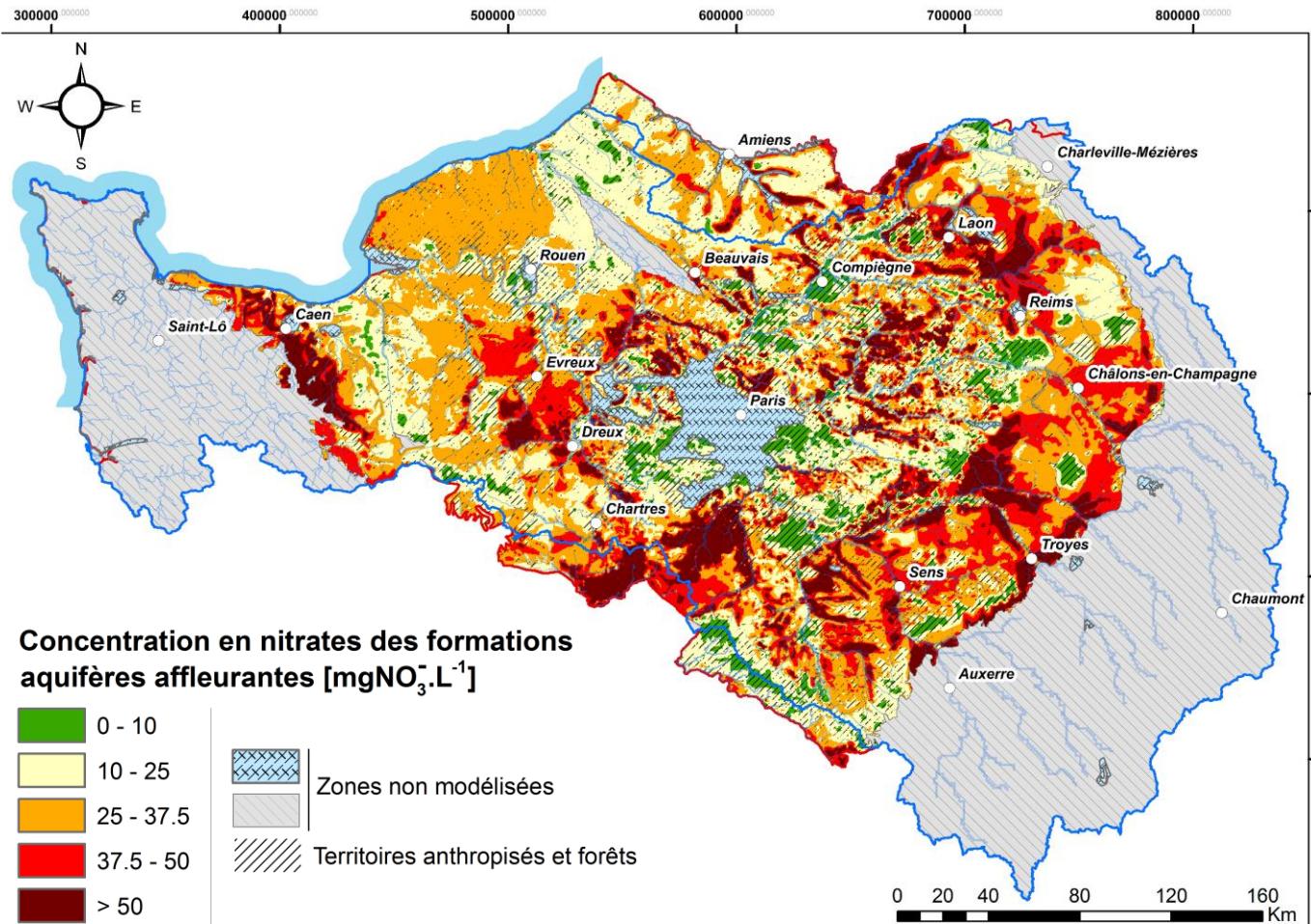
Scenario A (2018-2050) : Poursuite d'une agriculture intensive et spécialisée

2021

Proportions surfaciques

$> 37,5 \text{ mg L}^{-1}$ → 28 %

$> 50 \text{ mg L}^{-1}$ → 12 %



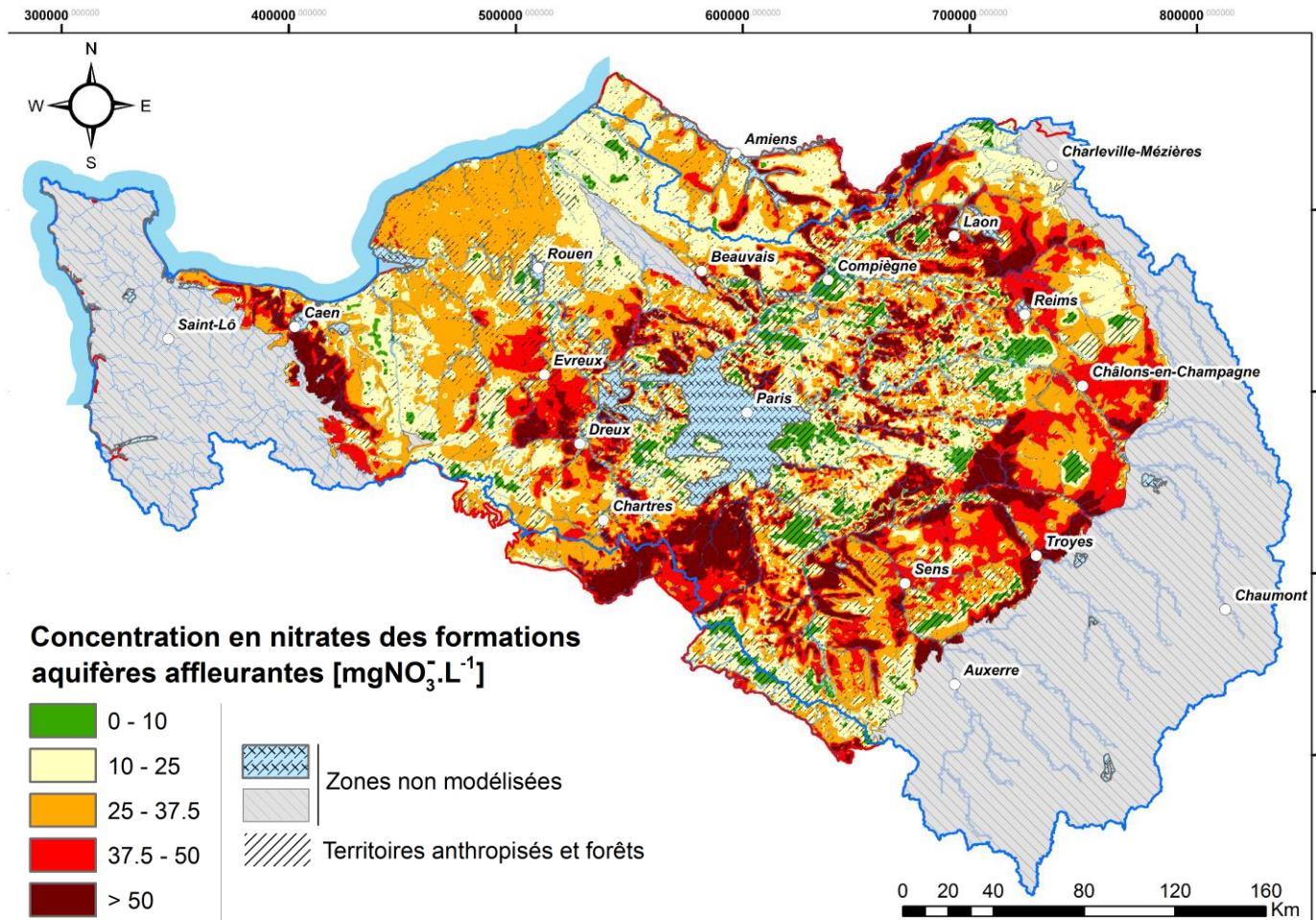
Scenario A (2018-2050) : Poursuite d'une agriculture intensive et spécialisée

2027

Proportions surfaciques

$> 37,5 \text{ mg L}^{-1}$ → 28 %

$> 50 \text{ mg L}^{-1}$ → 13 %



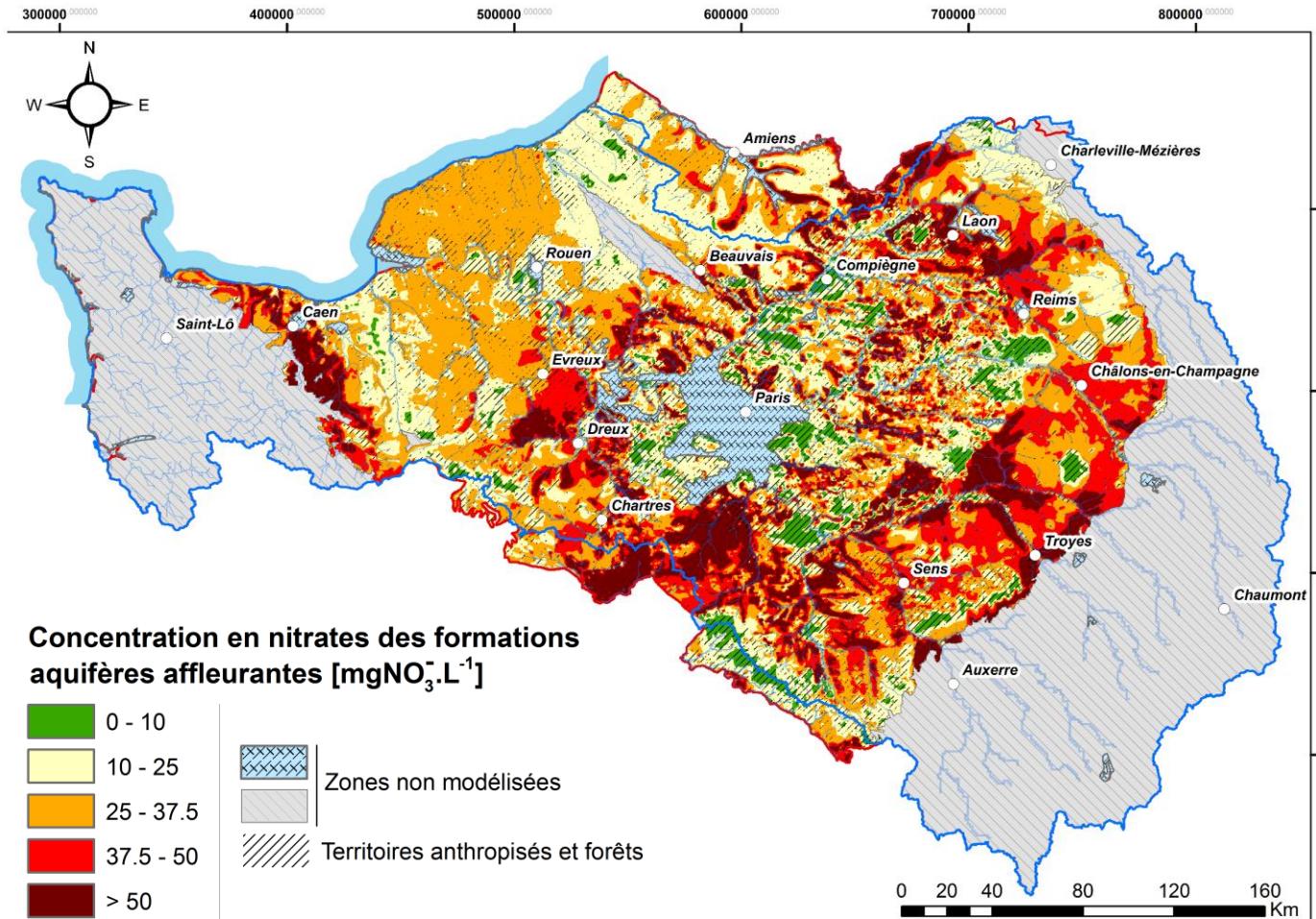
Scenario A (2018-2050) : Poursuite d'une agriculture intensive et spécialisée

2035

Proportions surfaciques

$> 37,5 \text{ mg L}^{-1}$ → 30 %

$> 50 \text{ mg L}^{-1}$ → 14 %



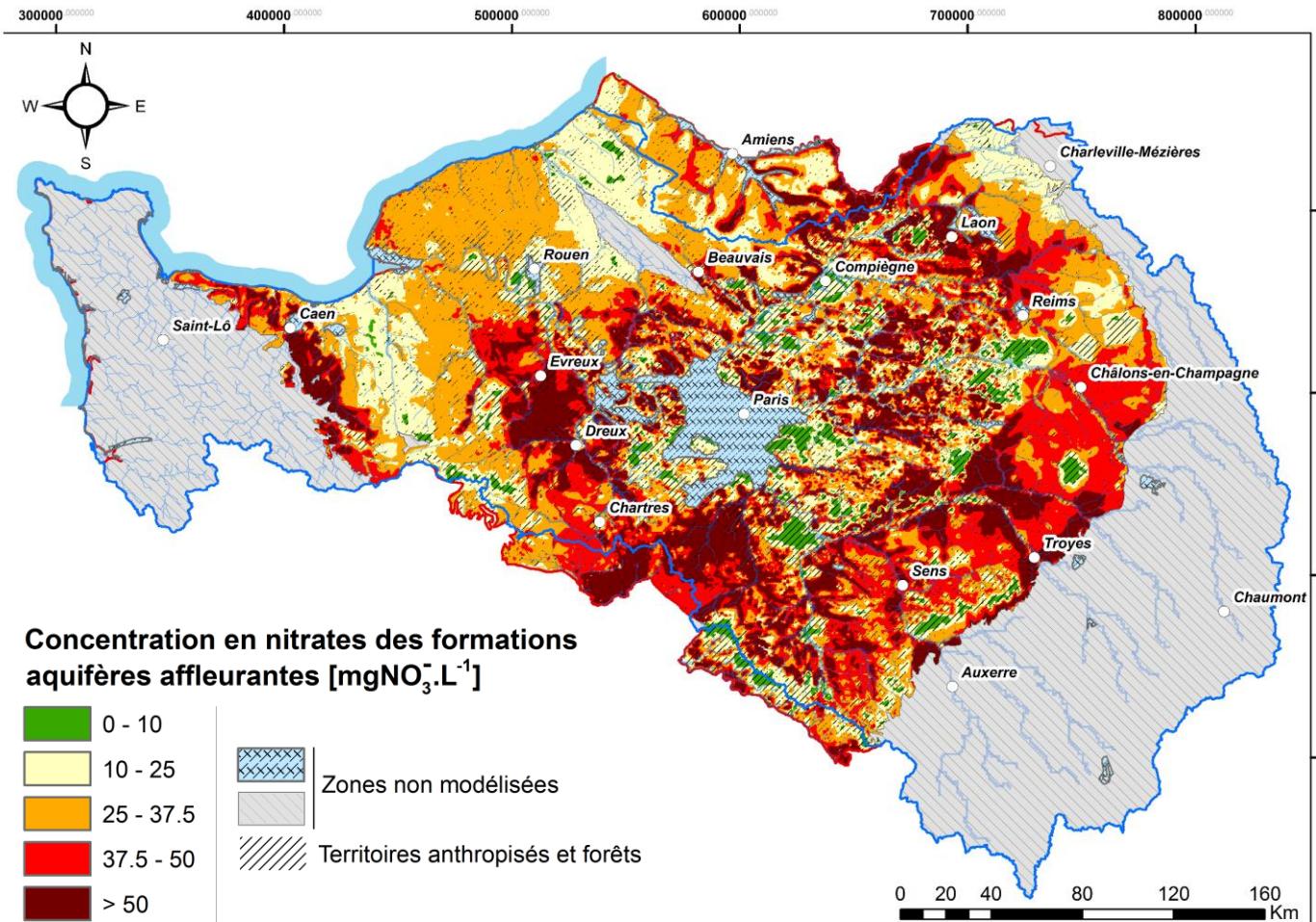
Scenario A (2018-2050) : Poursuite d'une agriculture intensive et spécialisée

2050

Proportions surfaciques

$> 37,5 \text{ mg L}^{-1}$ → 39 %

$> 50 \text{ mg L}^{-1}$ → 19 %



■ Deux scenarios (2018-2050) :

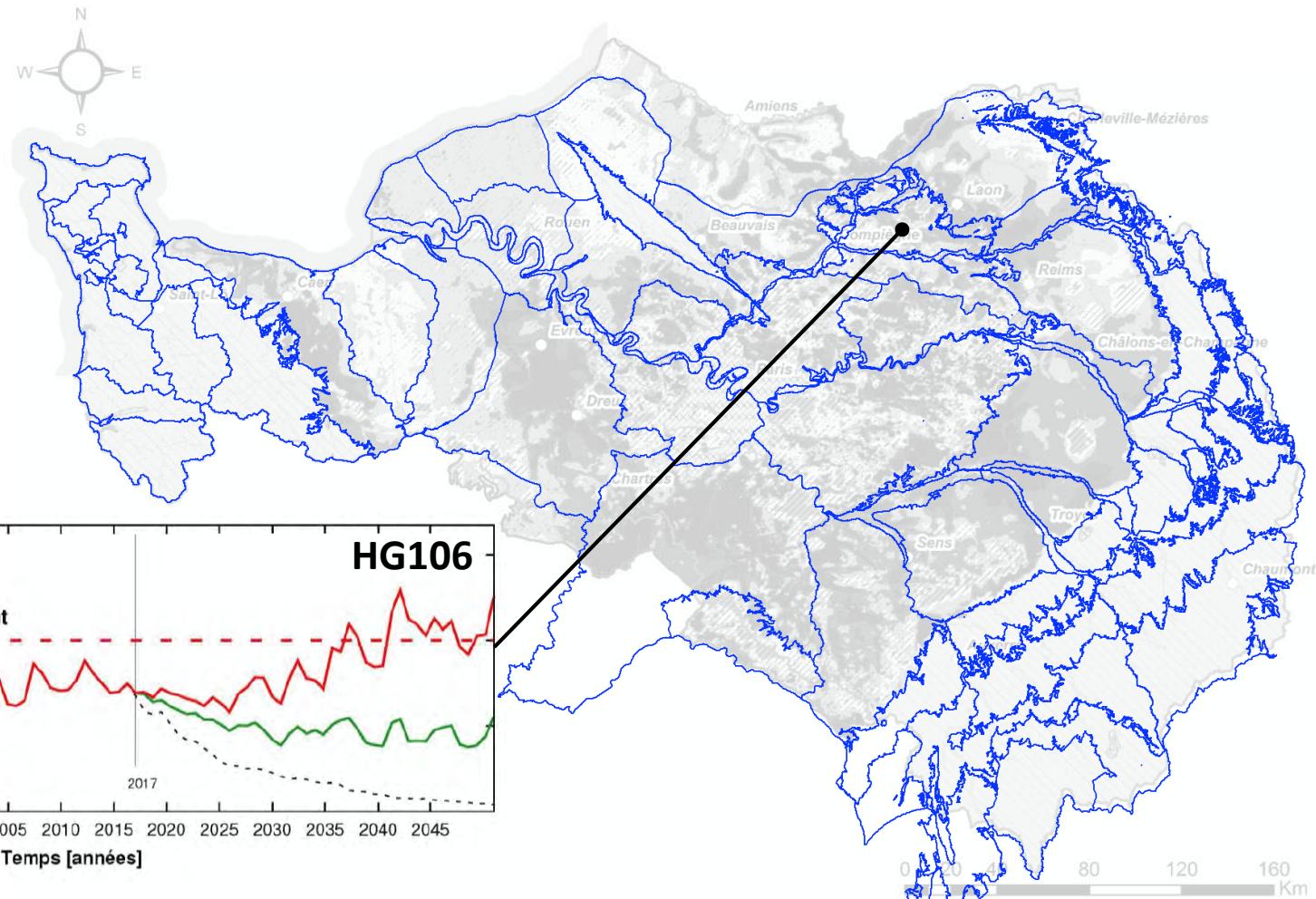
- Scenario A : Poursuite d'une agriculture intensive et spécialisée
 - Hyperspecialisation des productions du bassin (agriculture de précision, mécanisation, forts niveaux d'intrants azotés),
 - Adaptations techniques aux nouvelles contraintes du milieu (irrigation, modification des calendriers de culture, 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).

Deux scénarios prospectifs contrastés

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

~ 60 masses d'eau souterraine (MESO)

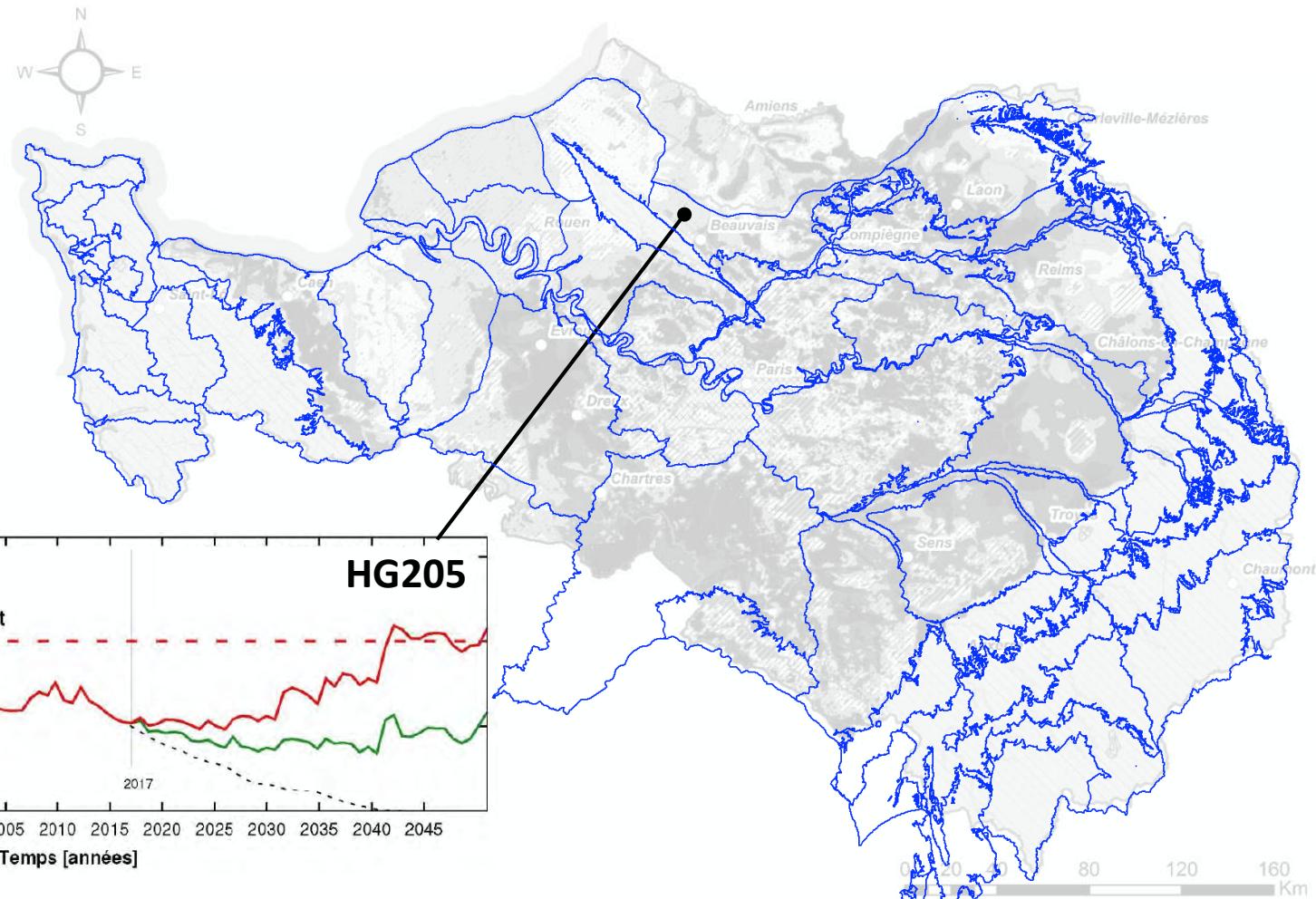
- Scénario A ———
- Scénario B ———
- Inertie de l'hydrosystème - - -



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

~ 60 masses d'eau souterraine (MESO)

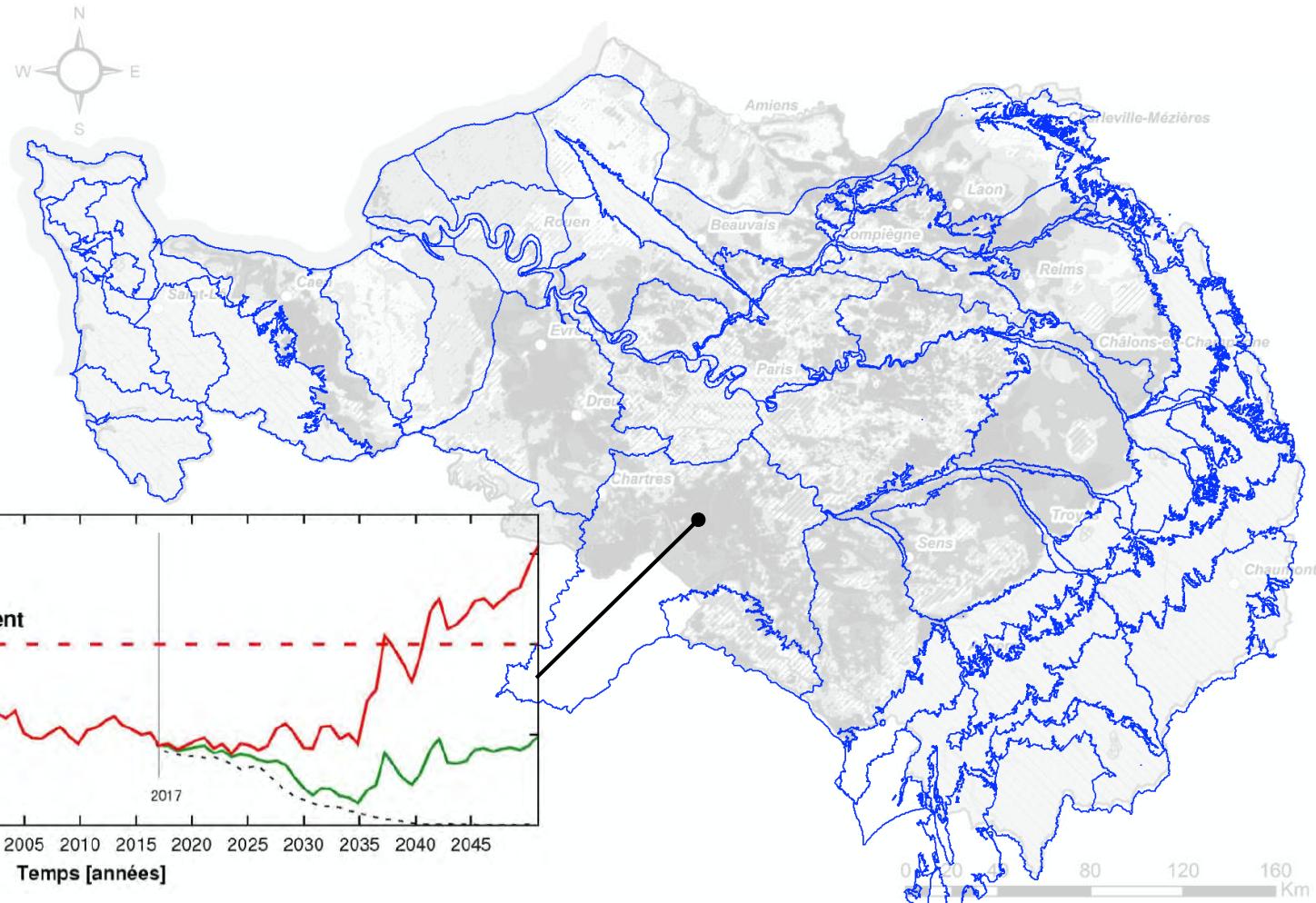
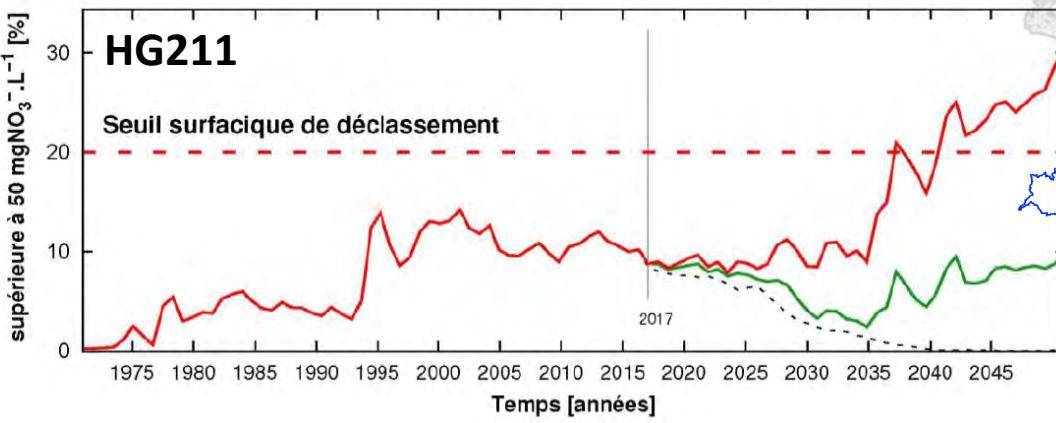
- Scénario A ———
- Scénario B ———
- Inertie de l'hydrosystème - - -



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

~ 60 masses d'eau souterraine (MESO)

Scénario A —————
Scénario B ————
Inertie de l'hydrosystème - - -



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.