



Modélisation des transferts de contaminants nitriques vers les aquifères du bassin Seine-Normandie : Agricultures, Modèles, Flux

Session « Agriculture et qualité de l'eau »

Nicolas Gallois¹, Thomas Puech², Nicolas Beaudoin³, Christine Le Bas⁴,
Bruno Mary³, Céline Schott², Catherine Mignolet², Pascal Viennot¹

¹ MINES ParisTech/ARMINES, Centre de Géosciences, Fontainebleau

² INRA-SAD ASTER, Mirecourt

³ INRA AgrolImpact, Laon

⁴ INRA Infosol, Orléans

Contexte, objectifs et acteurs

Description et spatialisation des systèmes de culture sur le bassin

Sources d'information mobilisées

Spatialisation des systèmes de culture

- Identification d'un maillage spatial d'étude des systèmes
- Caractérisation des successions de cultures
- Typologie des itinéraires techniques

Modélisation de la pollution nitrique agricole du bassin

Utilisation de STICS à l'échelle macro-régionale

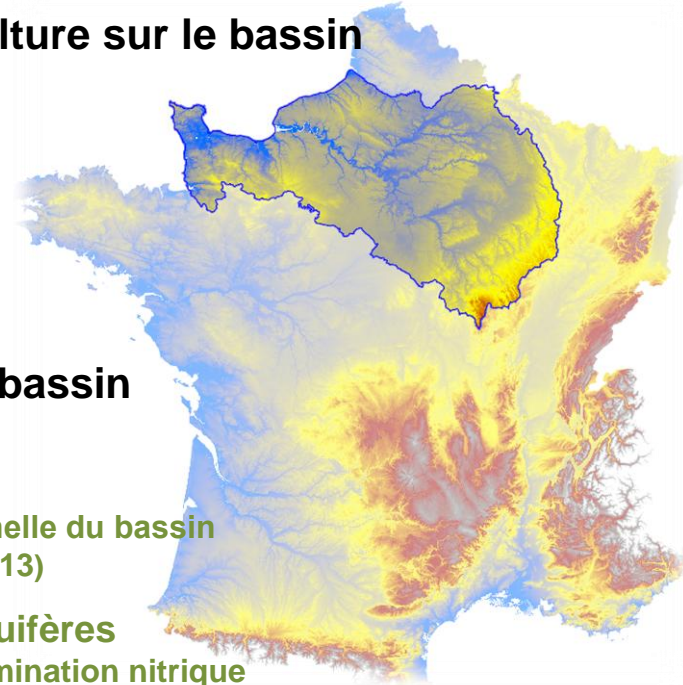
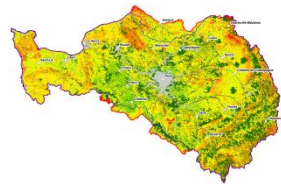
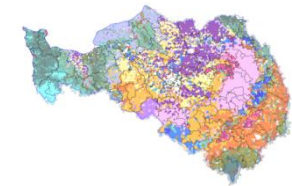
- Spatialisation du modèle agronomique
- Méthodologie d'évaluation de la fiabilité du modèle à l'échelle du bassin
- Modélisation agronomique de la pollution azotée (1971-2013)

Evaluation de la pollution nitrique des formations aquifères

- Calibration de la dynamique de mise en place de la contamination nitrique
- Reconstitution de la pollution nitrique des systèmes aquifères (1971-2013)

Mise en place et modélisation de scénarios tendanciels (2014-2030)

Conclusions et perspectives



Préparation du SDAGE 2016 - 2021 :

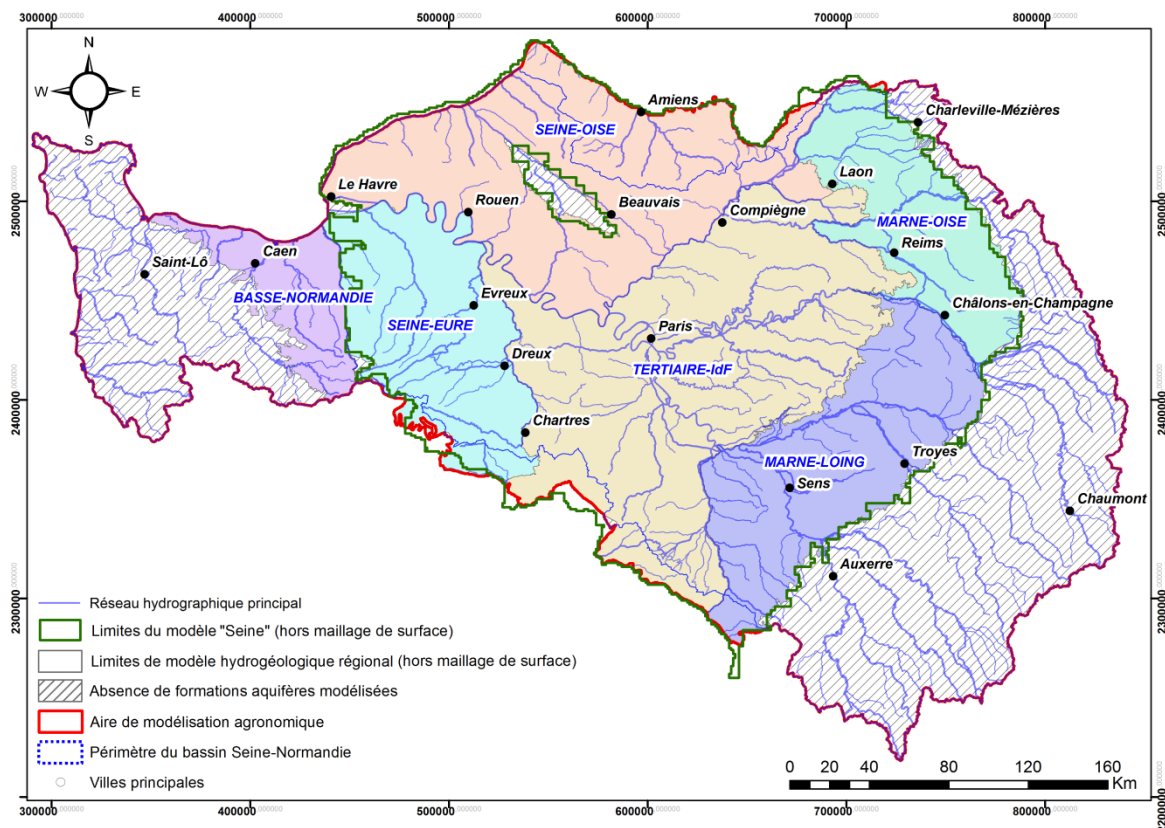
- Réactualisation de l'état des aquifères du bassin Seine-Normandie en 2015 prévue par la DCE servant de base à la préparation du SDAGE et au programme de mesures 2016-2021 de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie.

→ Mise à jour de la chaîne de modélisation STICS-MODCOU :

- Actualisation des données d'entrée du modèle agronomique
- Développement d'une nouvelle procédure de spatialisation de STICS
- Elaboration d'un protocole d'expertise des sorties du modèle
- Recalibration des modèles hydrogéologiques (eau et nitrates)
- Valorisation des résultats obtenus à l'échelle des masses d'eau souterraines
- Simulation d'une série de scénarios tendanciels

Modélisation de la pollution azotée des aquifères du bassin Seine-Normandie : l'association d'un modèle agronomique et d'un modèle hydrogéologique

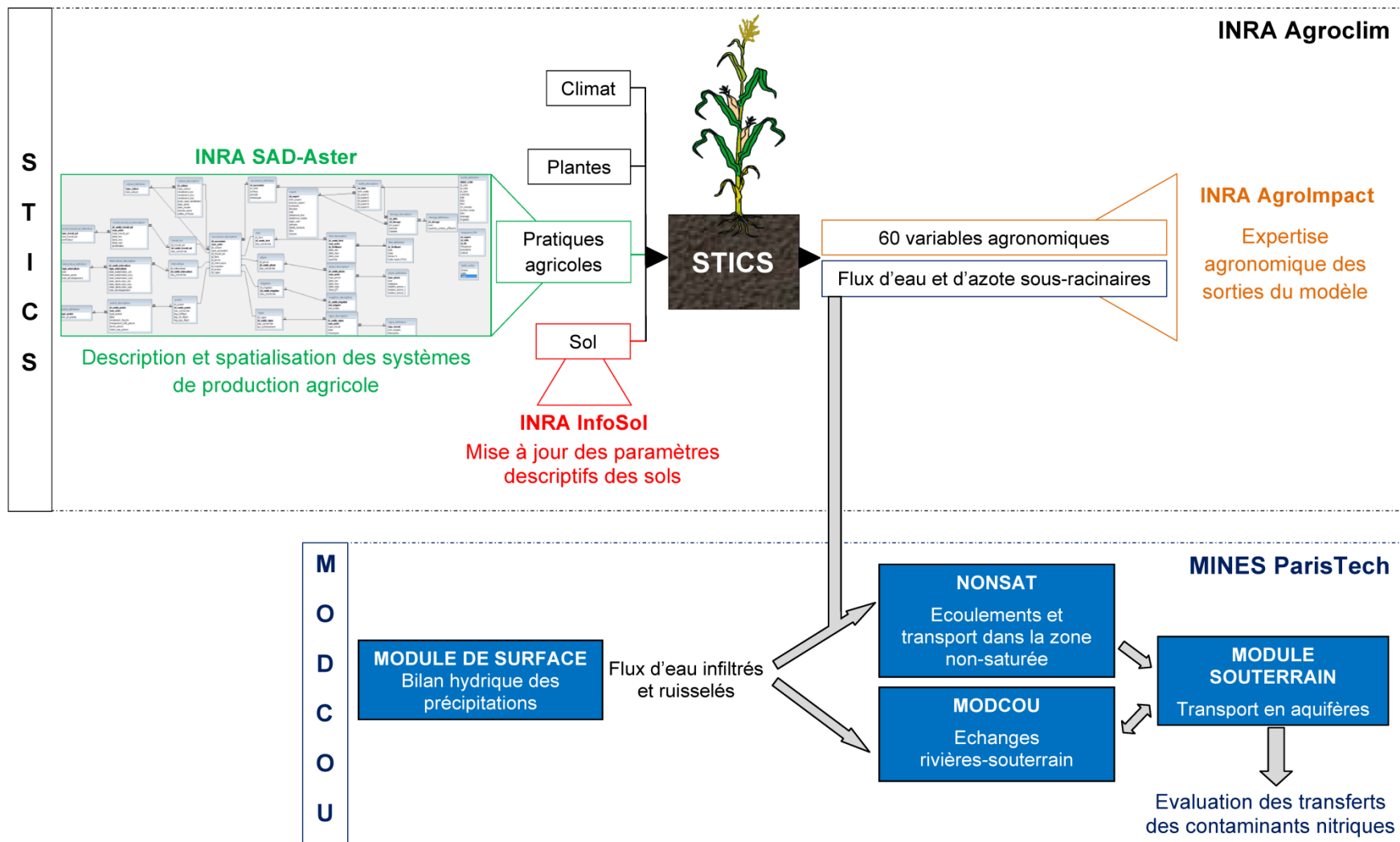
- **Modèle agronomique STICS** : simulation du comportement du système « sol - plante cultivée » (simulation du cycle agronomique des cultures et de leurs bilans hydriques et azotés).



- **Modèle hydrogéologique MODCOU** : simulation du comportement hydrodynamique du bassin et du transfert de matière dans tous les compartiments du sol (bilan hydrique de surface, zone non saturée, formations aquifères).

■ ■ Contexte de l'étude

- Mise à jour des données (BD 2006-2015) et outils d'évaluation des transferts de contaminants nitriques agricoles vers le domaine souterrain.



Contexte, objectifs et acteurs

Description et spatialisation des systèmes de culture sur le bassin

Sources d'information mobilisées

Spatialisation des systèmes de culture

- Identification d'un maillage spatial d'étude des systèmes
- Caractérisation des successions de cultures
- Typologie des itinéraires techniques

Modélisation de la pollution nitrique agricole du bassin

Utilisation de STICS à l'échelle macro-régionale

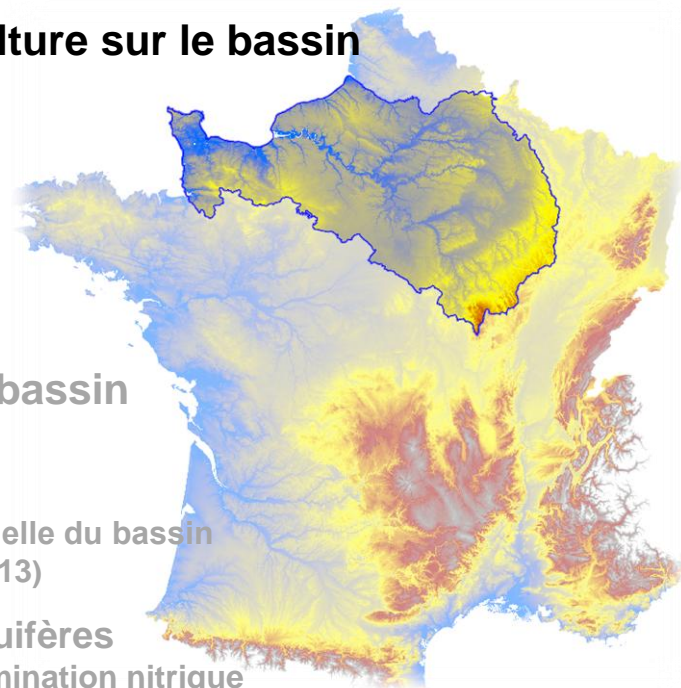
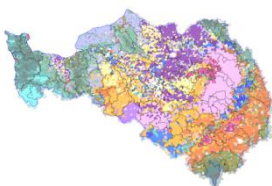
- Spatialisation du modèle agronomique
- Méthodologie d'évaluation de la fiabilité du modèle à l'échelle du bassin
- Modélisation agronomique de la pollution azotée (1971-2013)

Evaluation de la pollution nitrique des formations aquifères

- Calibration de la dynamique de mise en place de la contamination nitrique
- Reconstitution de la pollution nitrique des systèmes aquifères (1971-2013)

Mise en place et modélisation de scénarios tendanciels (2014-2030)

Conclusions et perspectives



Régionalisation des occupations de sol

Où sont situées les productions agricoles ?



Régionalisation des occupations de sol



Systemes de culture

Succession de cultures

Itinéraires techniques

Comment sont conduits les différents systèmes de culture (qualitatif / quantitatif) ?



Régionalisation des occupations de sol



Systemes de culture

Succession de cultures

Itinéraires techniques

Quelles sont les données mobilisables et à quelles échelles spatiales pertinentes /sources ?

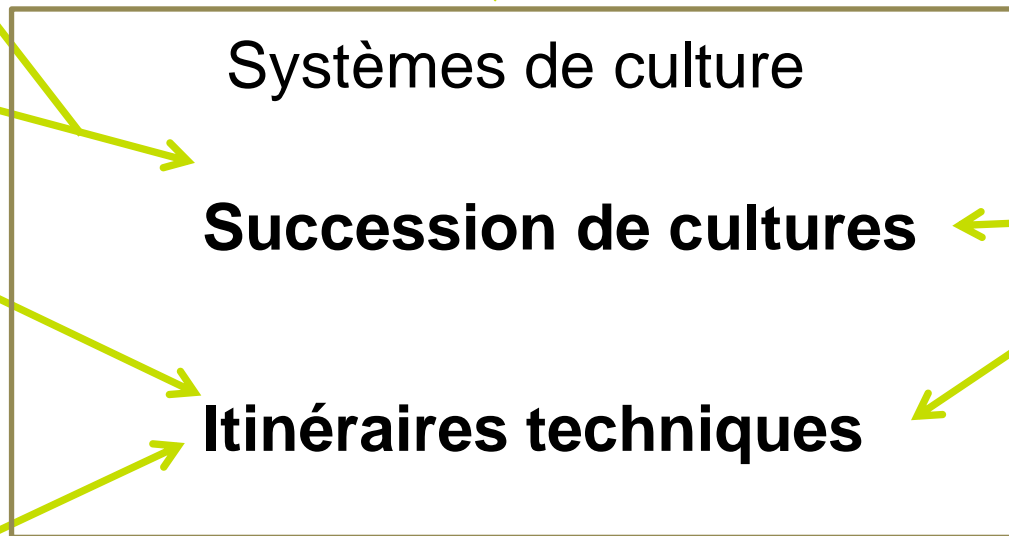


■ ■ Description et spatialisation des systèmes de culture sur le bassin

Sources d'information mobilisées

Maillage : « Petites Régions Agricoles »

Régionalisation des occupations de sol



Recensement agricole

2010 *

105.000 exploitations sur le bassin « exhaustivité des surfaces »

Enquête TerUti Lucas

37.000 points agricoles sur le bassin

Enquête pratiques Culturelles (PK) *

Grandes cultures (2011 - 5876 enq.)
Prairies (2006 - 813 enq.)
Viticulture (2006 - 707 enq.)

Statistiques agricoles annuelles

Systèmes de culture

Succession de cultures

Itinéraires techniques

Enquêtes à dire d'acteurs

48 spécialistes rencontrés

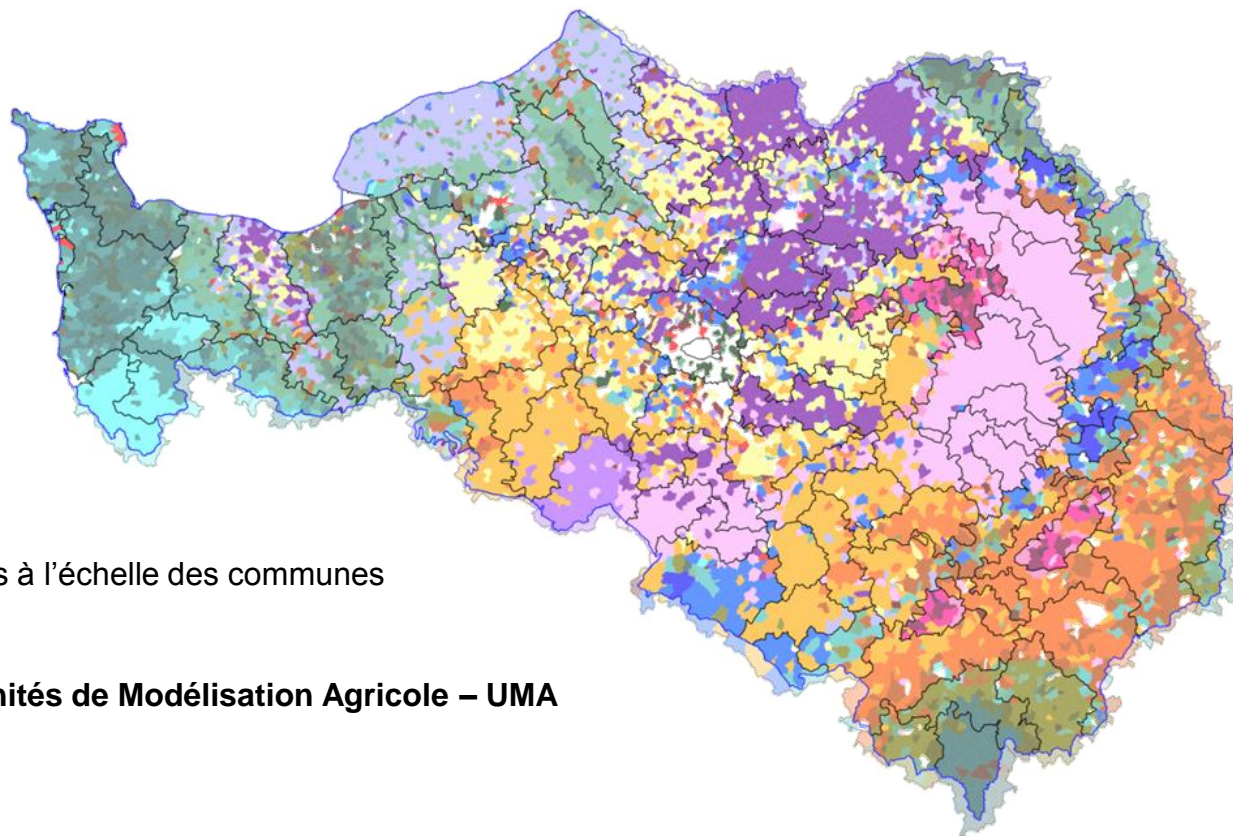
Quelles sont les données mobilisables et à quelles échelles spatiales pertinentes /sources ?

* Accès aux données individuelles : consultation via le CASD (Centre d'Accès Sécurisé à Distance) après accord du Comité du Secret + extractions après validation par le SSP.



Spatialisation des systèmes de culture

Identification d'un maillage spatial d'étude des systèmes



Étude des assolements de cultures à l'échelle des communes

Découpage du territoire en 95 Unités de Modélisation Agricole – UMA



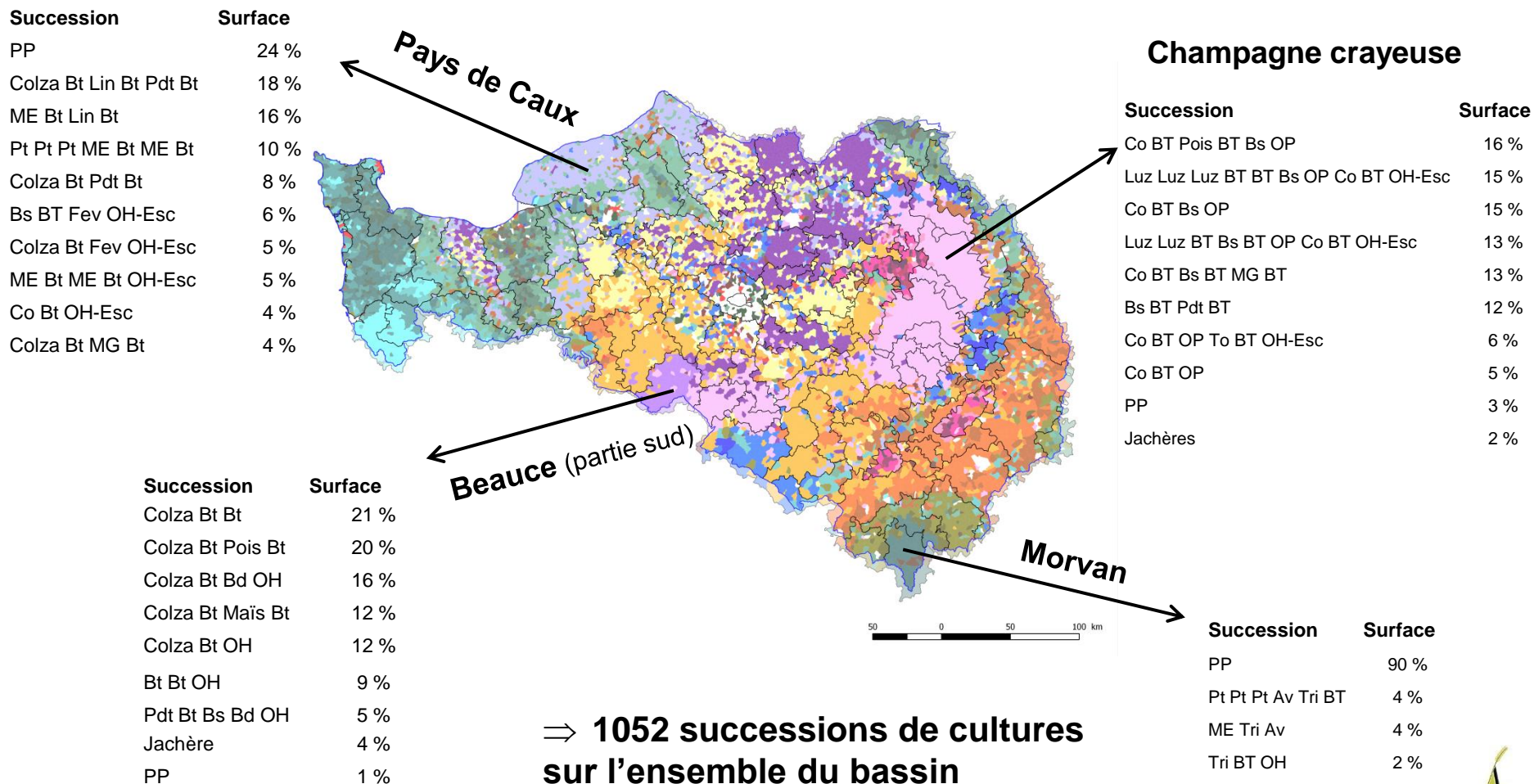
Source : Recensement agricole 2010



Description et spatialisation des systèmes de culture sur le bassin

Spatialisation des systèmes de culture

Caractérisation des successions de cultures



■ ■ Description et spatialisation des systèmes de culture sur le bassin

Spatialisation des systèmes de culture

Typologie des itinéraires techniques

À l'échelle du bassin :

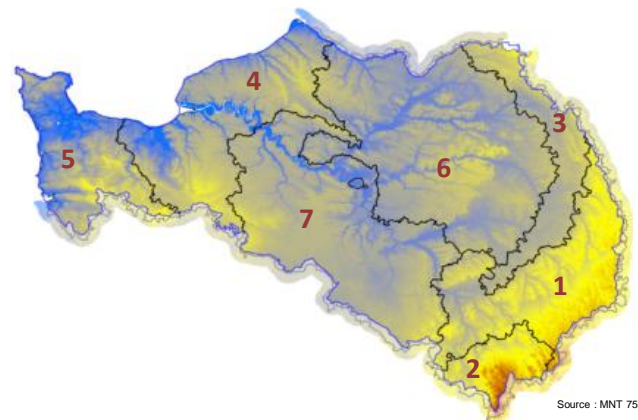
691 itinéraires techniques (163 issus de l'enquête PK, 528 issus des enquêtes)

21 espèces mobilisées (cultures & prairies)

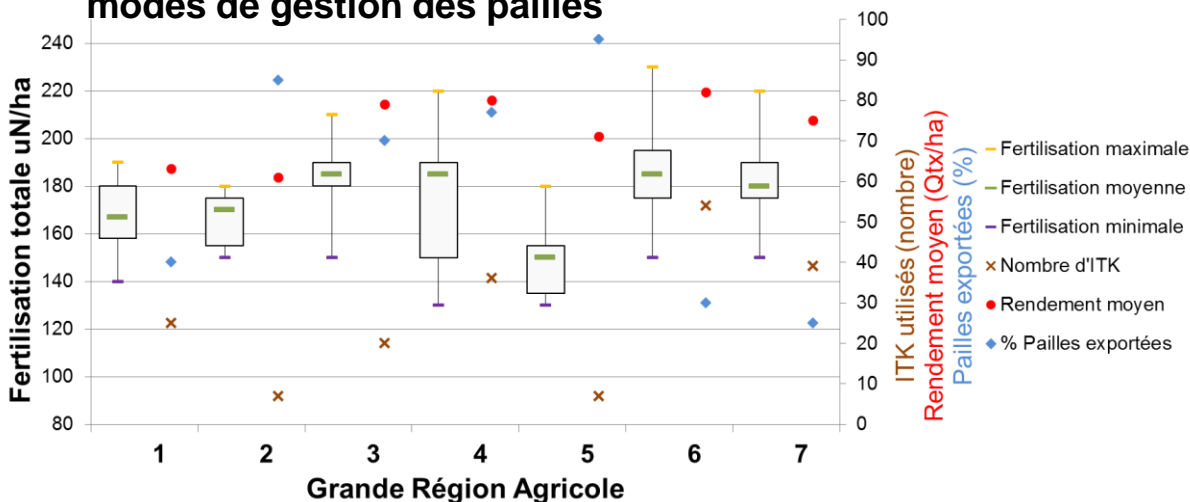
Diversité des modes de conduite du Blé tendre :

154 itinéraires techniques (ITK)

Les 7 Grandes Régions Agricoles



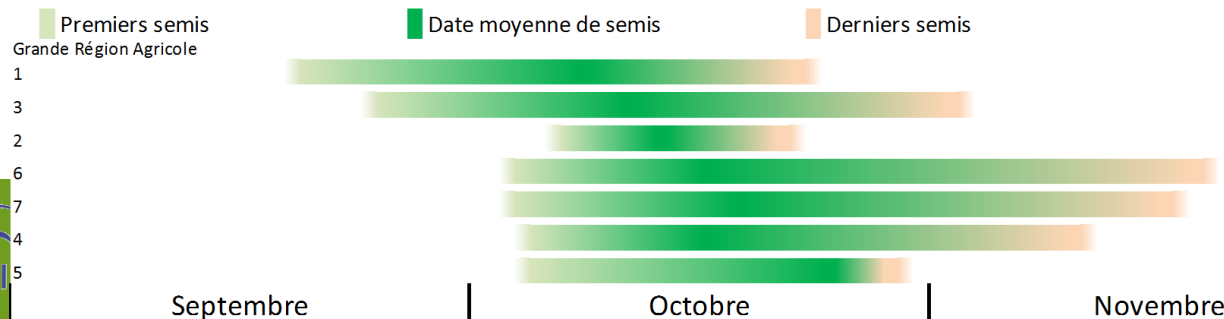
Variabilité de la fertilisation, des rendements et des modes de gestion des pailles



Résultats acquis à partir de :

- Statistiques agricoles
- Enquêtes

Variabilité des dates de semis



Contexte, objectifs et acteurs

Description et spatialisation des systèmes de culture sur le bassin

Sources d'information mobilisées

Spatialisation des systèmes de culture

- Identification d'un maillage spatial d'étude des systèmes
- Caractérisation des successions de cultures
- Typologie des itinéraires techniques

Modélisation de la pollution nitrique agricole du bassin

Utilisation de STICS à l'échelle macro-régionale

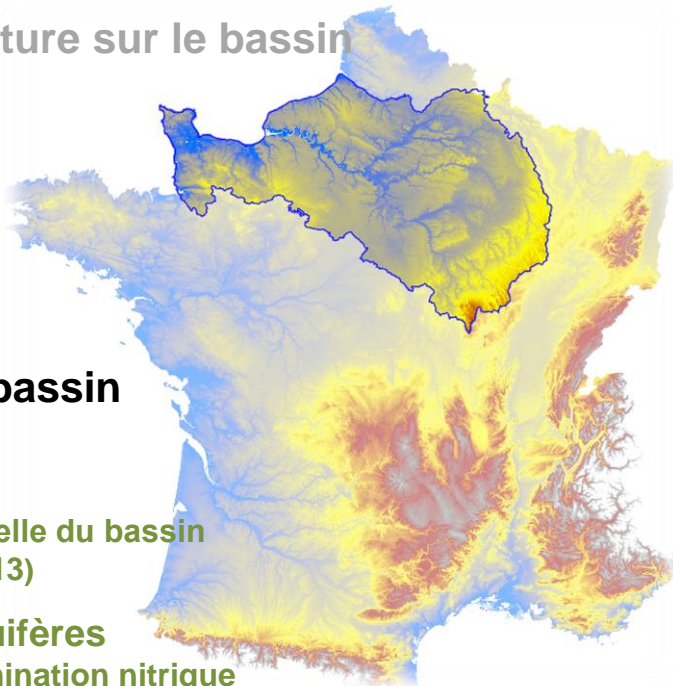
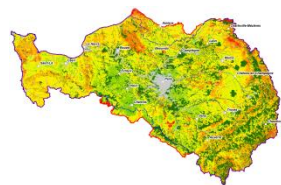
- Spatialisation du modèle agronomique
- Méthodologie d'évaluation de la fiabilité du modèle à l'échelle du bassin
- Modélisation agronomique de la pollution azotée (1971-2013)

Evaluation de la pollution nitrique des formations aquifères

- Calibration de la dynamique de mise en place de la contamination nitrique
- Reconstitution de la pollution nitrique des systèmes aquifères (1971-2013)

Mise en place et modélisation de scénarios tendanciels (2014-2030)

Conclusions et perspectives



■ ■ Modélisation de la pollution nitrique agricole du bassin

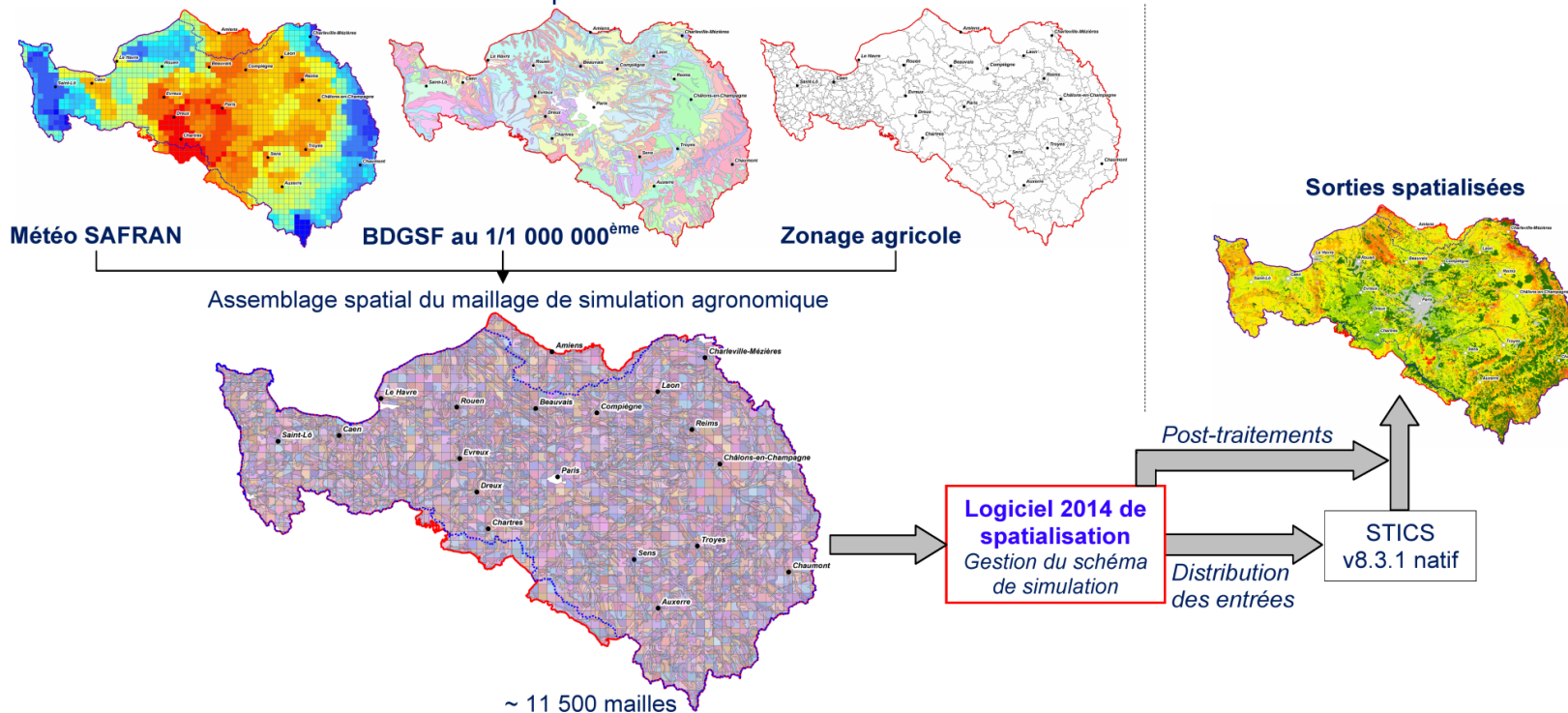
Utilisation de STICS à l'échelle macro-régionale

Spatialisation du modèle agronomique

Implémentation au modèle d'une structure informatique capable de le déployer à l'échelle du bassin, en intégrant la variabilité spatio-temporelle :

- des systèmes de cultures (gérer les forçages issus de la grande variabilité des assolements et des pratiques culturales),
- des évolutions météorologiques,
- des différents types de sol.

Bases de données spatialisées 1971-2013



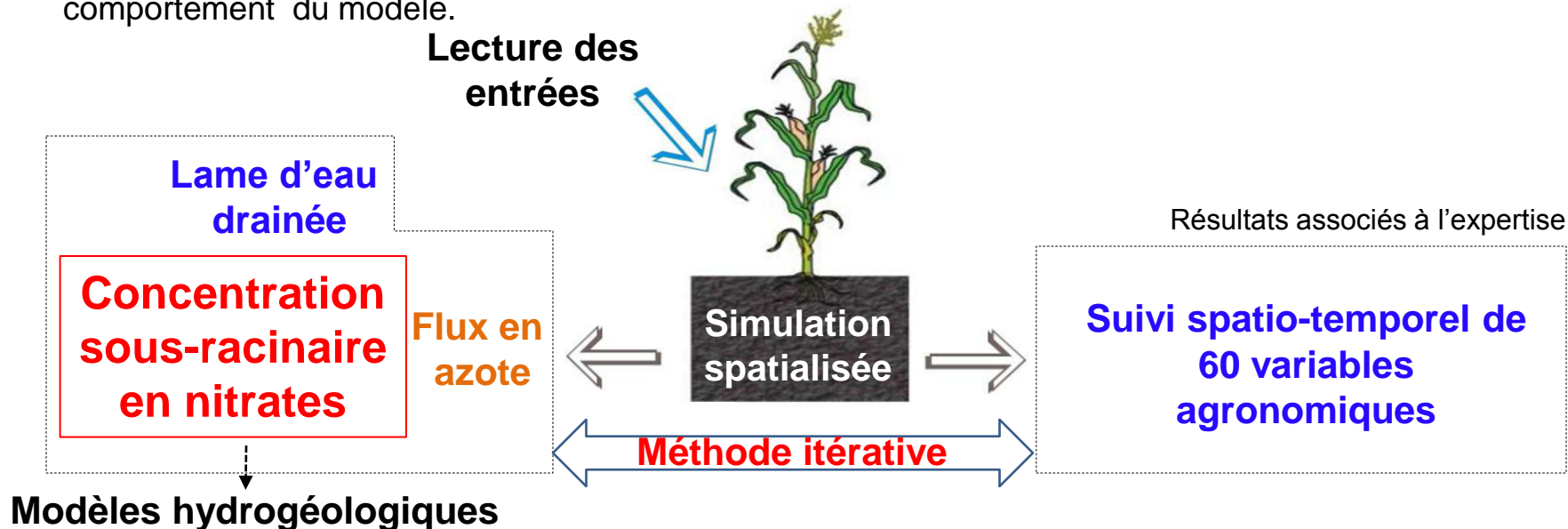
■ ■ Modélisation de la pollution nitrique agricole du bassin

Utilisation de STICS à l'échelle macro-régionale

Méthodologie d'évaluation de la fiabilité du modèle à l'échelle du bassin

Travail en étroite collaboration avec l'INRA AgrolImpact à l'élaboration et l'application d'une procédure itérative d'expertise visant à :

- Décrire la variabilité d'indicateurs et de variables agronomiques à différentes échelles de temps et d'espace,
- Vérifier l'existence de relations agronomiques robustes connues entre variables afin d'évaluer le comportement du modèle.



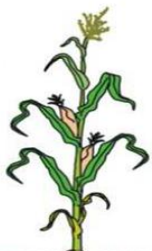
Apports de l'expertise :

- Amélioration spatiale de la production végétale, du bilan d'azote d'entrée-sortie,
- Révision de la base de données sol et des fonctions de pédo-transfert associées.

■ ■ Modélisation de la pollution nitrique agricole du bassin

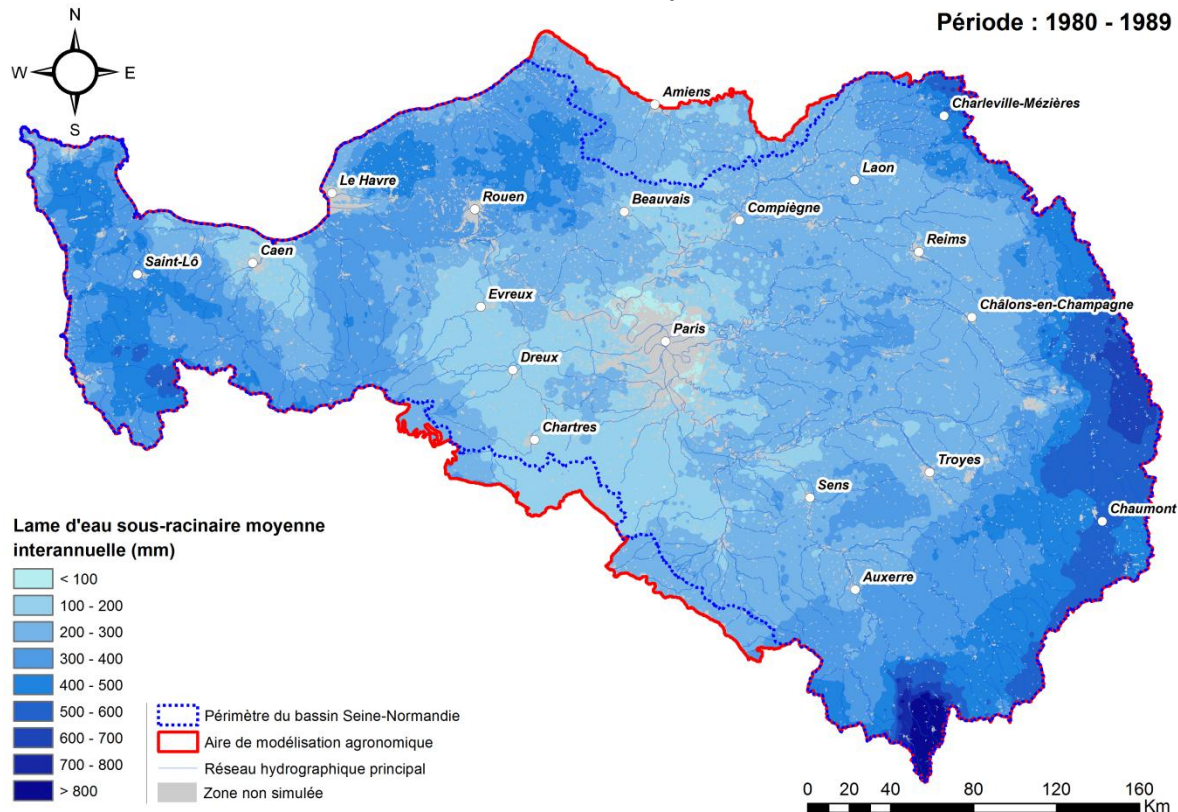
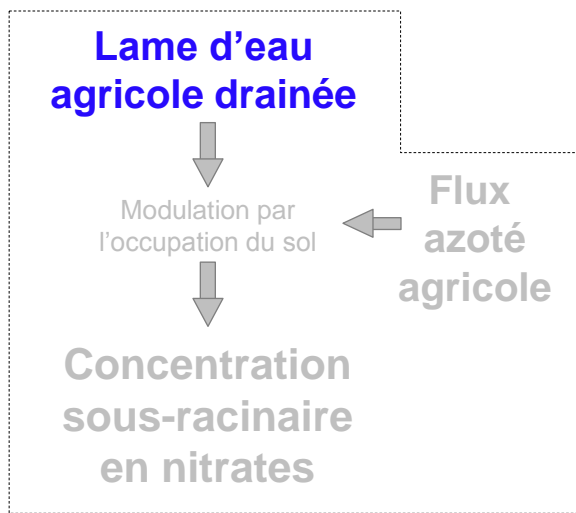
Utilisation de STICS à l'échelle macro-régionale

Modélisation agronomique de la pollution azotée (1971-2013)



Simulation
spatialisée

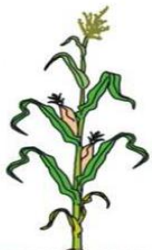
- Travail inter-équipes ayant permis l'intégration de fonctionnalités supplémentaires au logiciel de spatialisation, dans l'optique d'une amélioration des simulations :
 - Optimisation de l'utilisation des données à disposition,
 - Recalibration de certains paramètres STICS suite à l'expertise,
 - Gestion affine de certaines données d'entrée sensibles pour la lixiviation de l'azote.



Modèles hydrogéologiques

Utilisation de STICS à l'échelle macro-régionale

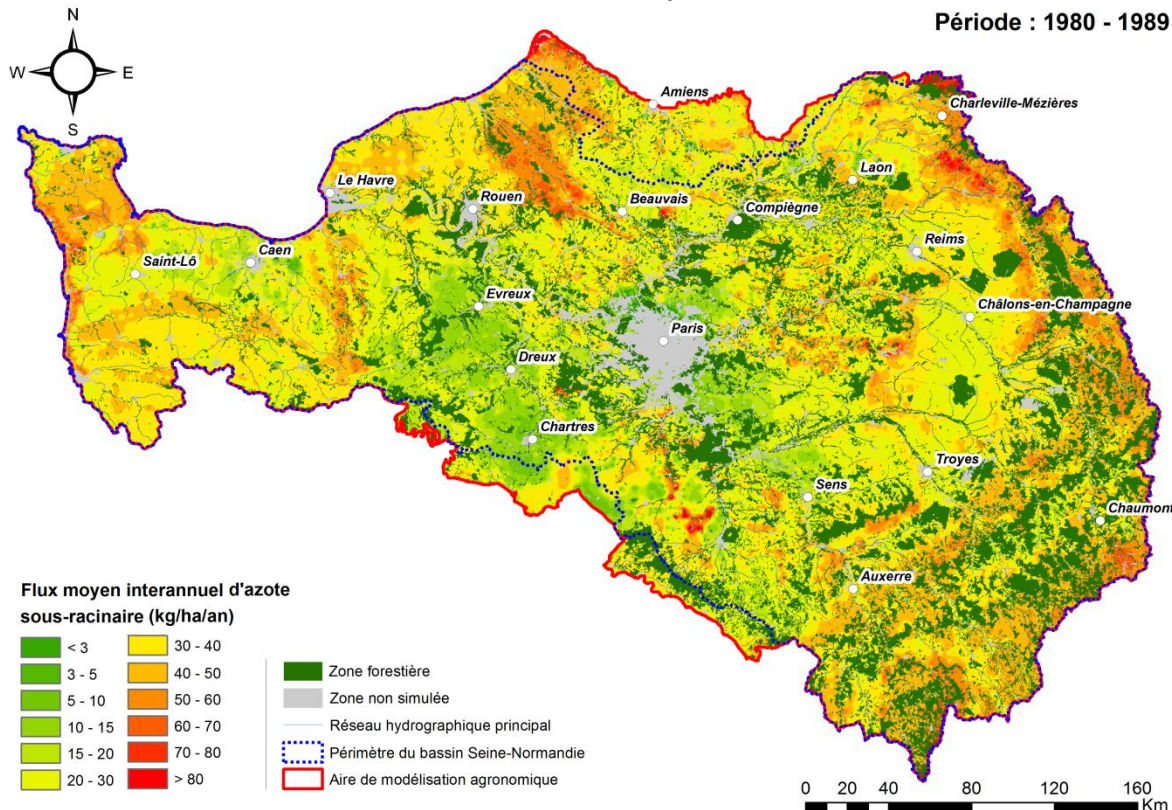
Modélisation agronomique de la pollution azotée (1971-2013)



Simulation spatialisée

- Travail inter-équipes ayant permis l'intégration de fonctionnalités supplémentaires au logiciel de spatialisation, dans l'optique d'une amélioration des simulations :
 - Optimisation de l'utilisation des données à disposition,
 - Recalibration de certains paramètres STICS suite à l'expertise,
 - Gestion affine de certaines données d'entrée sensibles pour la lixiviation de l'azote.

Période : 1980 - 1989



Lame d'eau agricole drainée

Modulation par l'occupation du sol

Flux azoté agricole

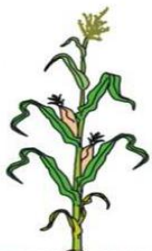
Concentration sous-racinaire en nitrates

Modèles hydrogéologiques

■ ■ Modélisation de la pollution nitrique agricole du bassin

Utilisation de STICS à l'échelle macro-régionale

Modélisation agronomique de la pollution azotée (1971-2013)



Simulation
spatialisée

Lame d'eau
agricole drainée

Modulation par
l'occupation du sol

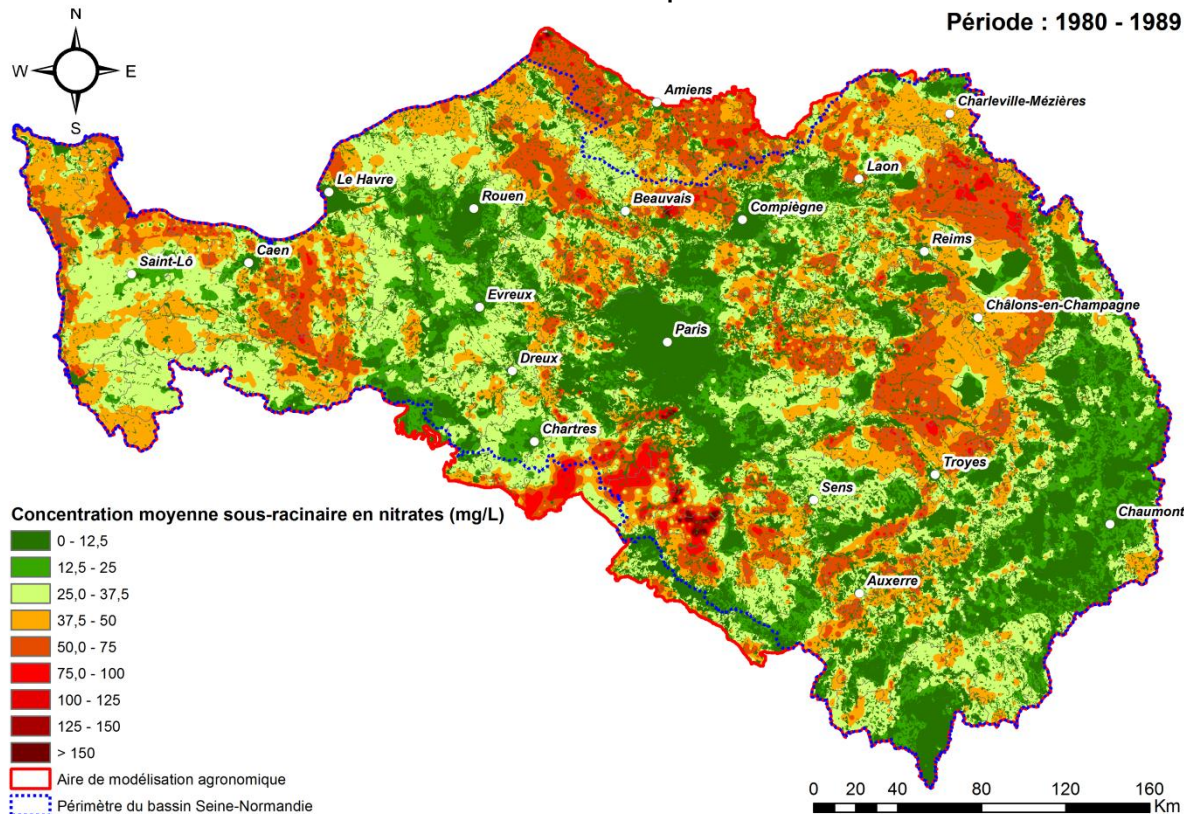
Flux
azoté
agricole

Concentration
sous-racinaire
en nitrates

Modèles hydrogéologiques

- Travail inter-équipes ayant permis l'intégration de fonctionnalités supplémentaires au logiciel de spatialisation, dans l'optique d'une amélioration des simulations :
 - Optimisation de l'utilisation des données à disposition,
 - Recalibration de certains paramètres STICS suite à l'expertise,
 - Gestion affine de certaines données d'entrée sensibles pour la lixiviation de l'azote.

Période : 1980 - 1989

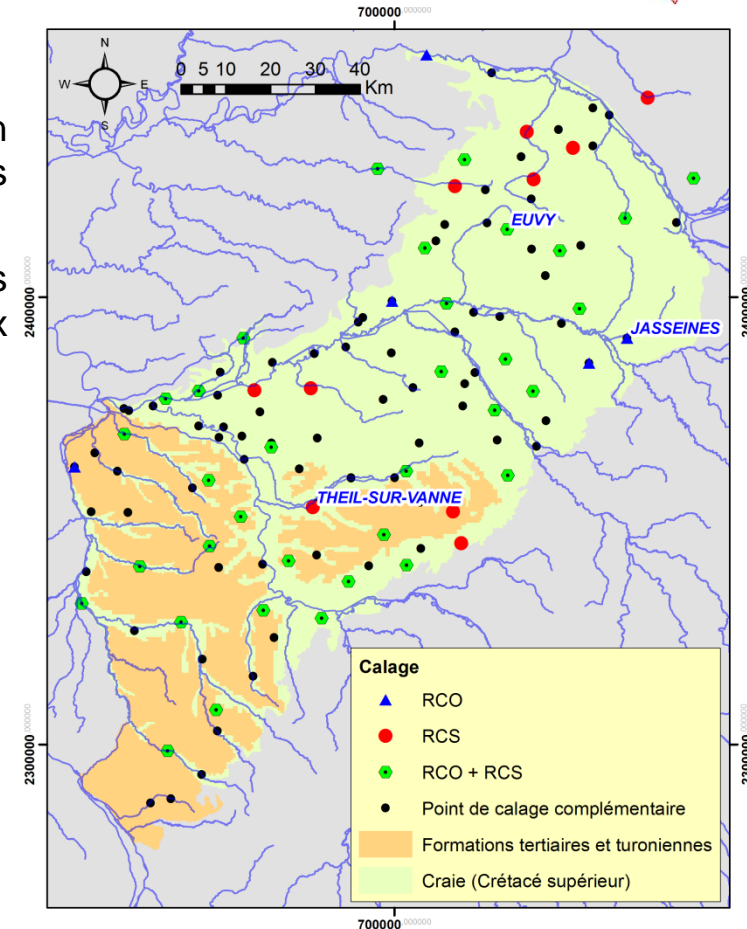


■ ■ Modélisation de la pollution nitrique agricole du bassin

Evaluation de la pollution nitrique des formations aquifères

Calibration de la dynamique de mise en place de la contamination nitrique

- Calibration aux piézomètres et qualitomètres (plus de 1000 points sur l'ensemble du bassin).
- Reproduction de la dynamique de mise en place de la pollution nitrique des grands aquifères par reconstitution de l'évolution des concentrations en nitrates aux ouvrages.
- Evaluation de l'état actuel de la contamination nitrique des masses d'eau en complément des suivis ponctuels des réseaux RCS et RCO.



Modèle régional « Marne-Loire »

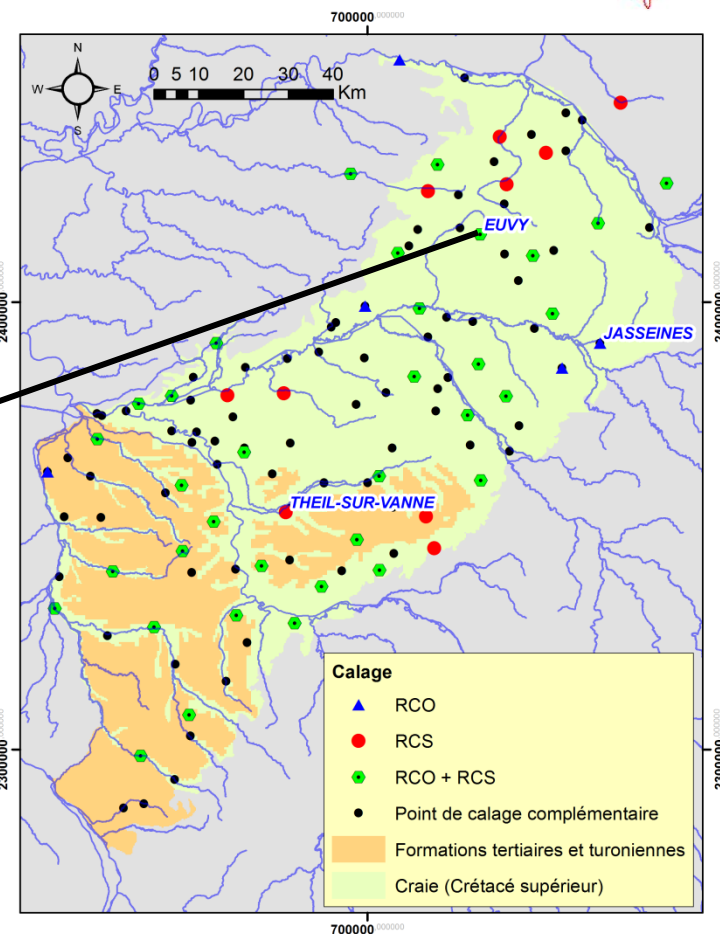
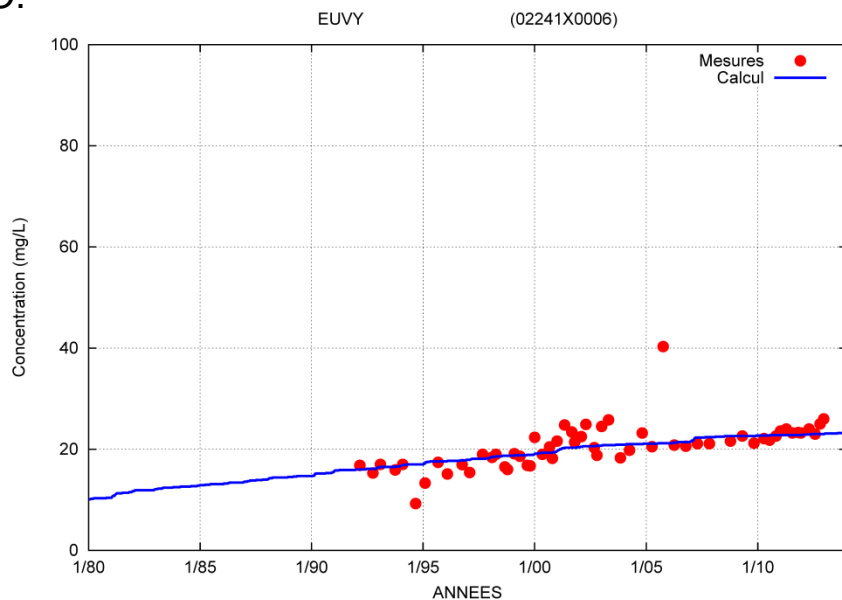
■ ■ Modélisation de la pollution nitrique agricole du bassin

Evaluation de la pollution nitrique des formations aquifères

Calibration de la dynamique de mise en place de la contamination nitrique



- Calibration aux piézomètres et qualitomètres (plus de 1000 points sur l'ensemble du bassin).
- Reproduction de la dynamique de mise en place de la pollution nitrique des grands aquifères par reconstitution de l'évolution des concentrations en nitrates aux ouvrages.
- Evaluation de l'état actuel de la contamination nitrique des masses d'eau en complément des suivis ponctuels des réseaux RCS et RCO.



Modèle régional « Marne-Loire »

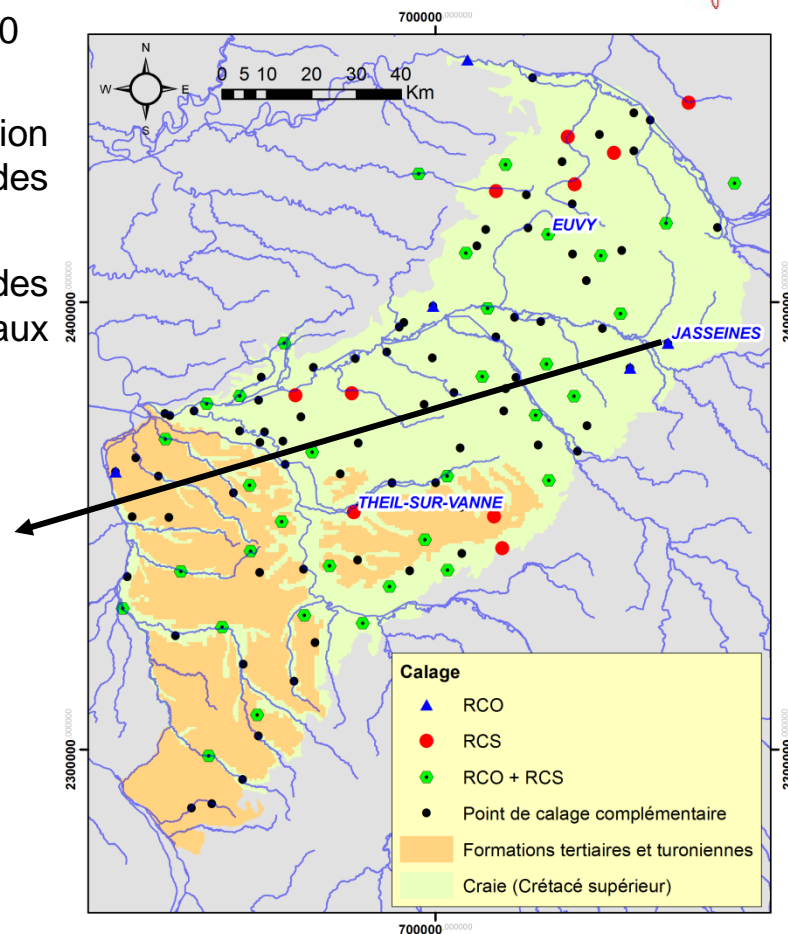
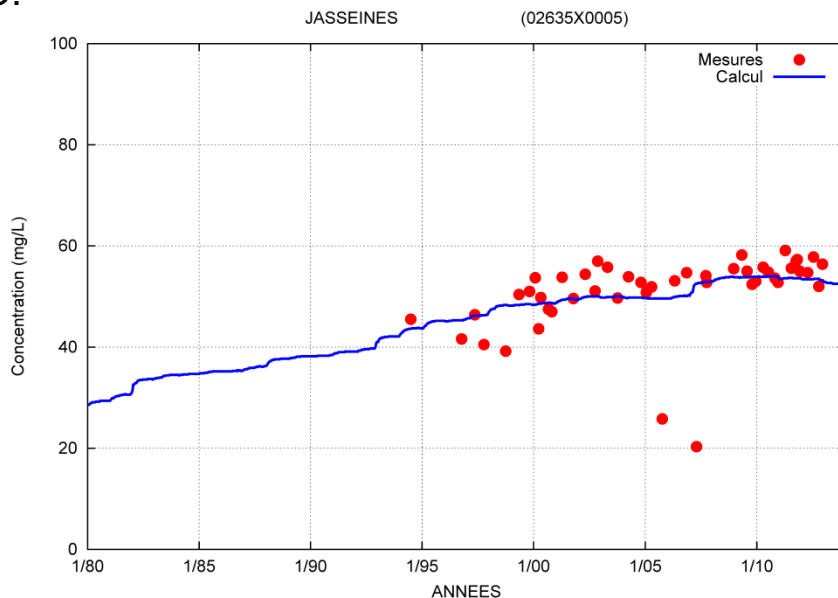
■ ■ Modélisation de la pollution nitrique agricole du bassin

Evaluation de la pollution nitrique des formations aquifères

Calibration de la dynamique de mise en place de la contamination nitrique



- Calibration aux piézomètres et qualitomètres (plus de 1000 points sur l'ensemble du bassin).
- Reproduction de la dynamique de mise en place de la pollution nitrique des grands aquifères par reconstitution de l'évolution des concentrations en nitrates aux ouvrages.
- Evaluation de l'état actuel de la contamination nitrique des masses d'eau en complément des suivis ponctuels des réseaux RCS et RCO.



Modèle régional « Marne-Loire »

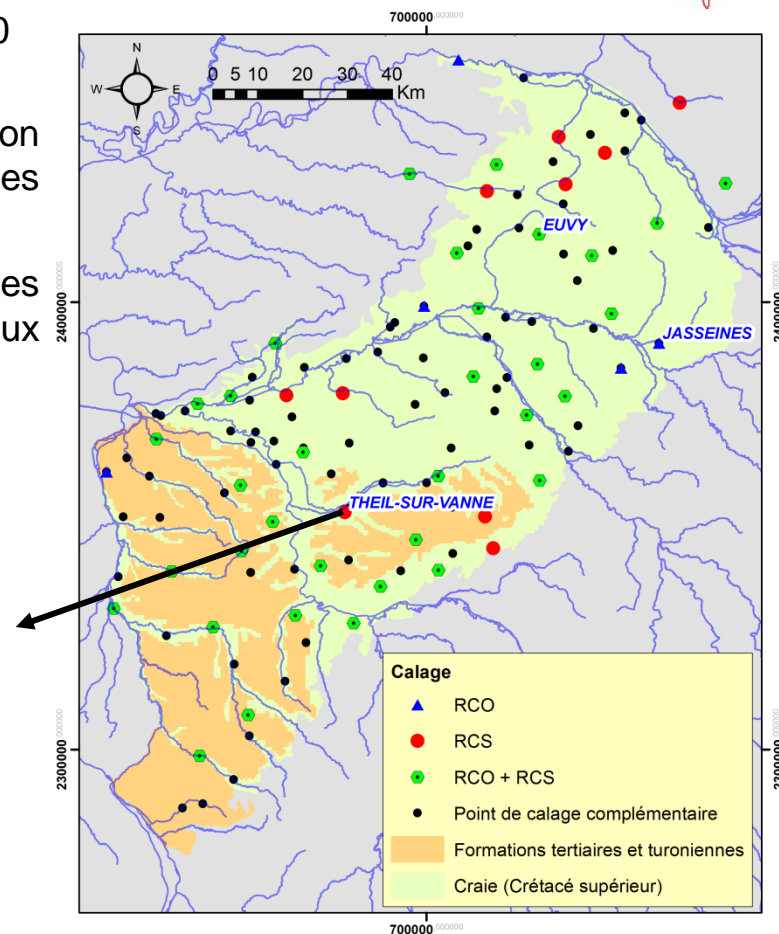
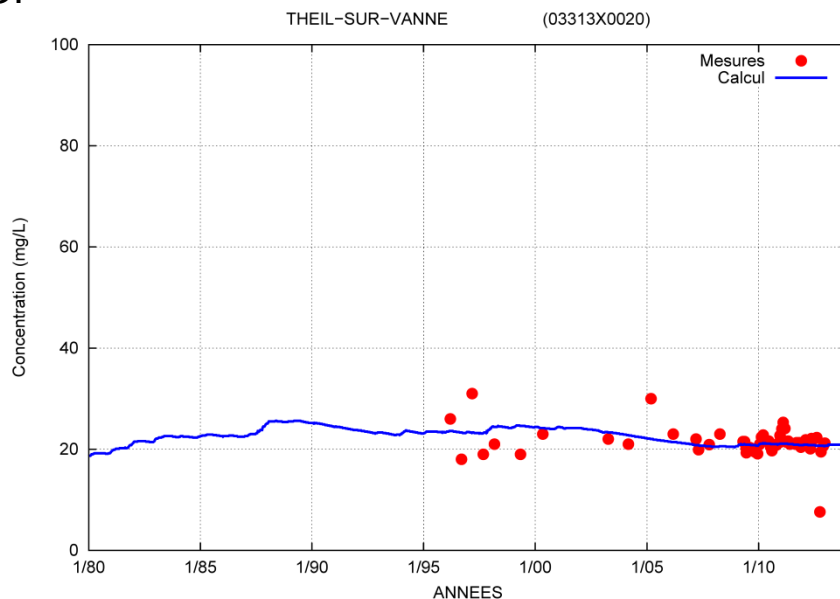
■ ■ Modélisation de la pollution nitrique agricole du bassin

Evaluation de la pollution nitrique des formations aquifères

Calibration de la dynamique de mise en place de la contamination nitrique



- Calibration aux piézomètres et qualitomètres (plus de 1000 points sur l'ensemble du bassin).
- Reproduction de la dynamique de mise en place de la pollution nitrique des grands aquifères par reconstitution de l'évolution des concentrations en nitrates aux ouvrages.
- Evaluation de l'état actuel de la contamination nitrique des masses d'eau en complément des suivis ponctuels des réseaux RCS et RCO.

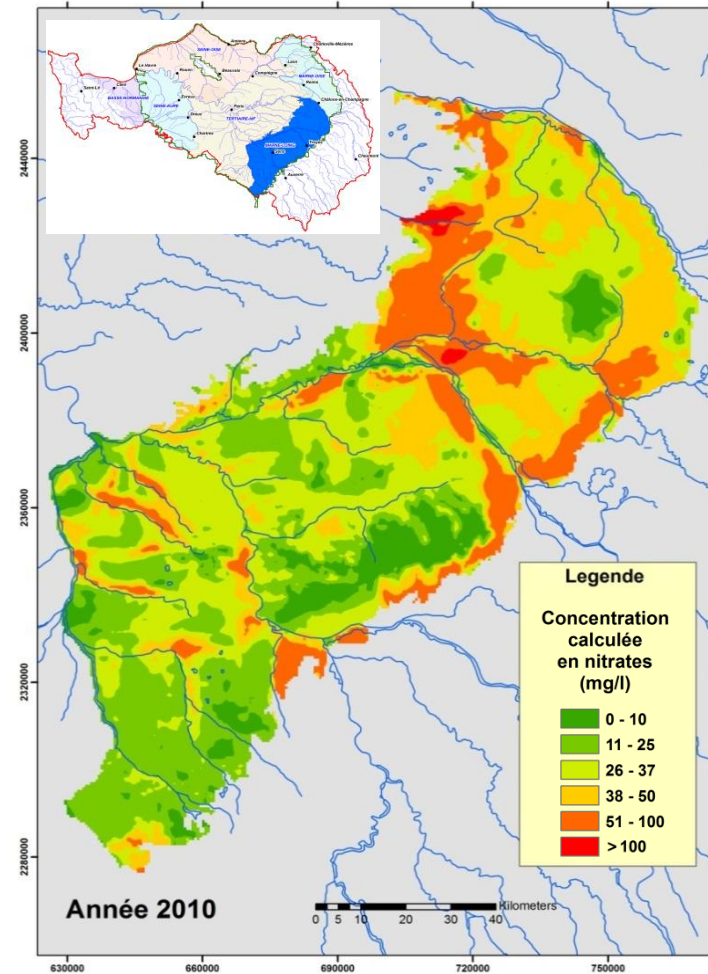
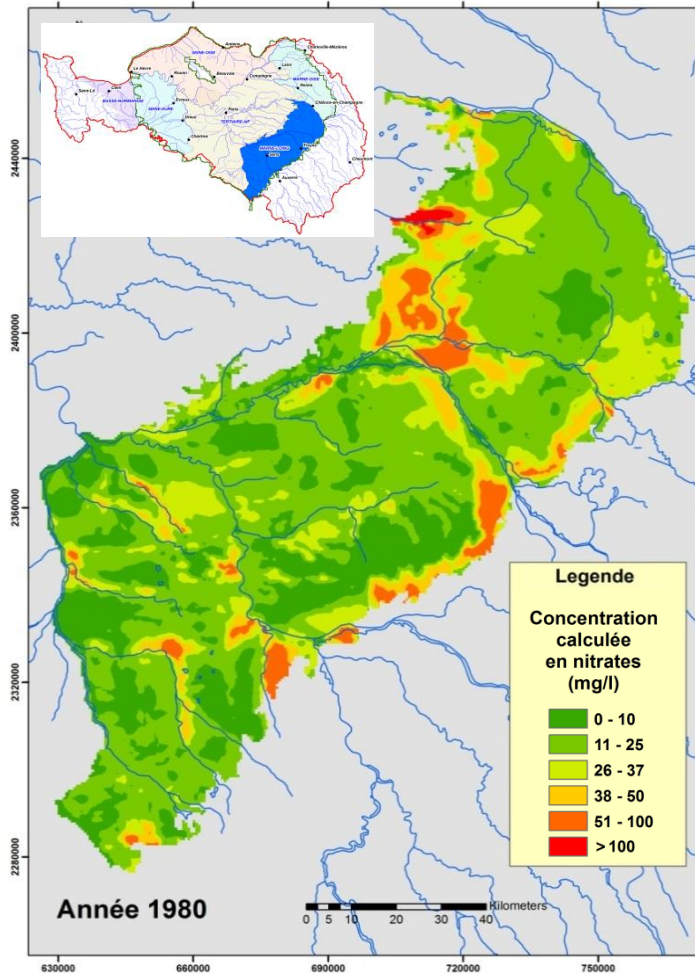


Modèle régional « Marne-Loing »

Evaluation de la pollution nitrique des formations aquifères

Reconstitution de la pollution nitrique des systèmes aquifères (1971-2013)

Nappe de la Craie



■ ■ Mise en place et modélisation de scénarios tendanciels (2014-2030)

- Point fort de la modélisation : prolongation des simulations à moyen terme, à pressions constantes ou sous scénario prédéfini afin d'estimer l'évolution de la pollution nitrique des différentes masses d'eau et de valider la pertinence des objectifs de gestion fixés.

- Données climatiques : application du modèle régional Aladin-Climat (CNRM / Météo-France), sous scénario médian RCP 4.5.

❖ « Pas de modifications de pratiques » :

- Reproduction des pratiques et des assolements 2006/2013 (simulation à horizon 2060)

❖ Réduction globale de -20% des intrants azotés

❖ « Arrêt de la fertilisation »

❖ « Application du programme de mesures AESN » :

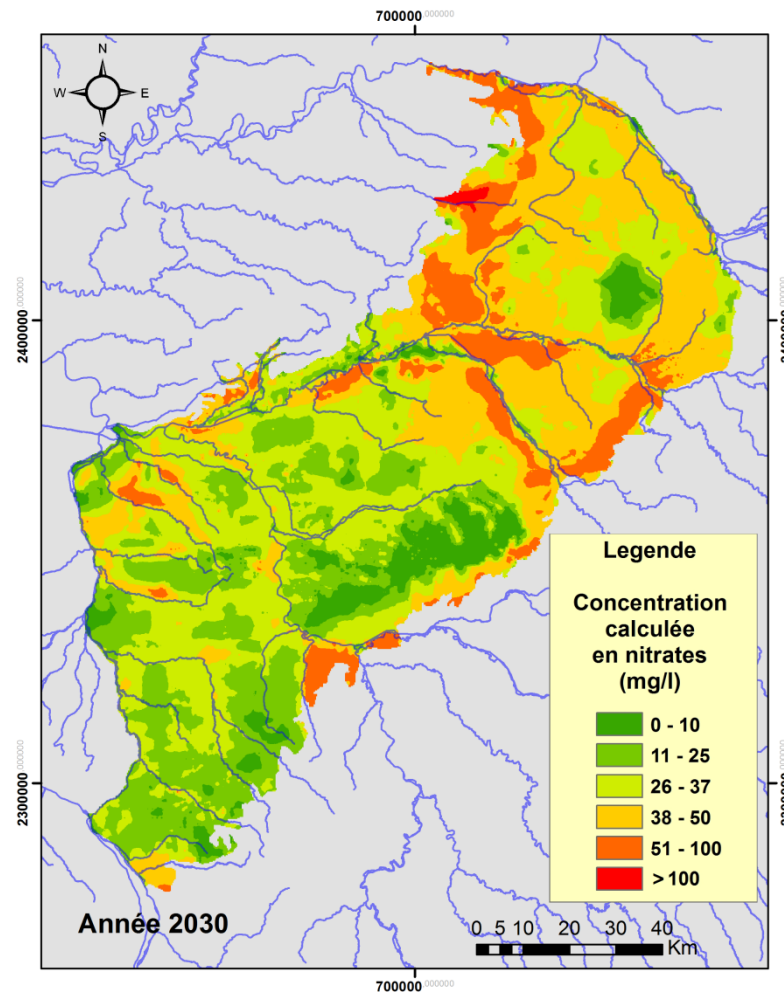
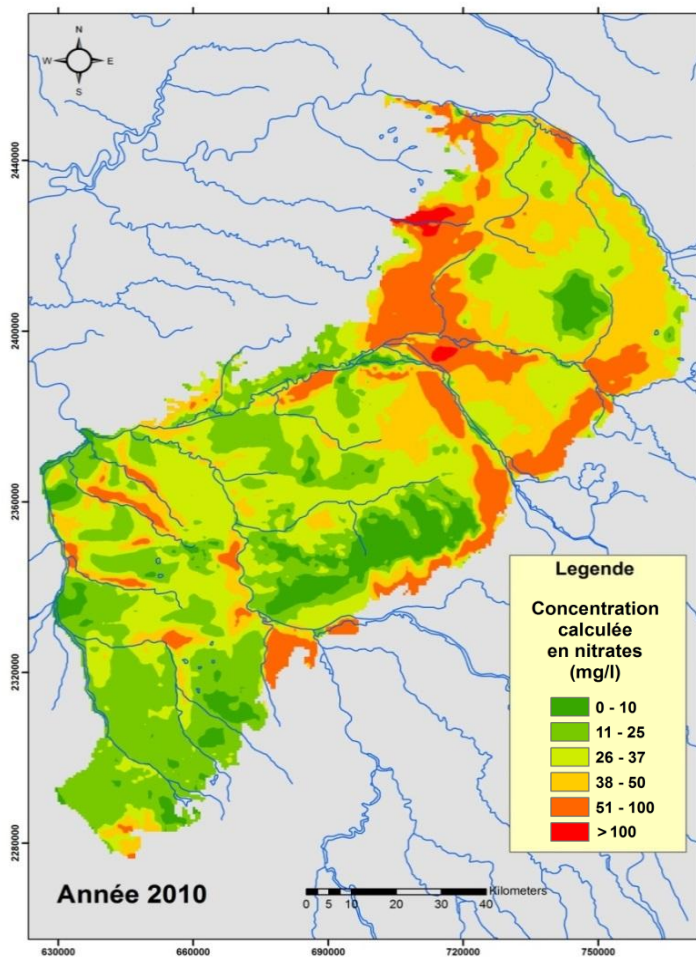
- Sur les Zones Vulnérables Nitrates (mesures proposées dans les décrets d'application de la directive Nitrates) :
 - ⇒ Mise en place systématique de CIPAN + repousses de colza sur 100% de la SAU éligible
- Sur les Aires d'Alimentation de Captages* :
 - ⇒ Réduction de 20% de la fertilisation sur 20% de la SAU uniquement,
 - ⇒ Remise en herbe de 1% de la SAU.

* Pour des questions de représentativité au niveau des changements d'échelle, on estime qu'il faut au minimum 10% de la SAU des UMA classées en AAC pour pouvoir appliquer les mesures proposées sur les AAC.

■ ■ Simulation de scénarios tendanciels (2014-2030)

- Caractérisation spatiale des niveaux de pollutions sous scénario de « référence », sans modification des pratiques actuelles (2006-2013) :

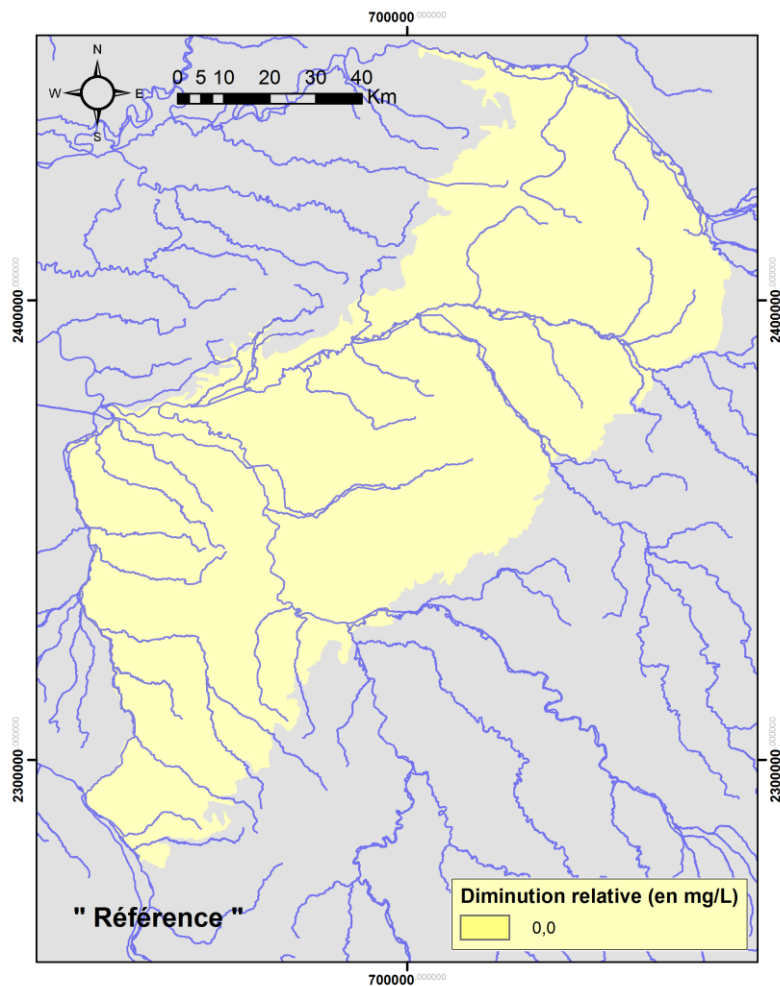
Nappe de la Craie



■ ■ Simulation de scénarios tendanciels (2014-2030)

- Quantification de la diminution des niveaux de pollution nitrique sous les 3 forçages prédéfinis par rapport au scénario « sans modification de pratiques »:

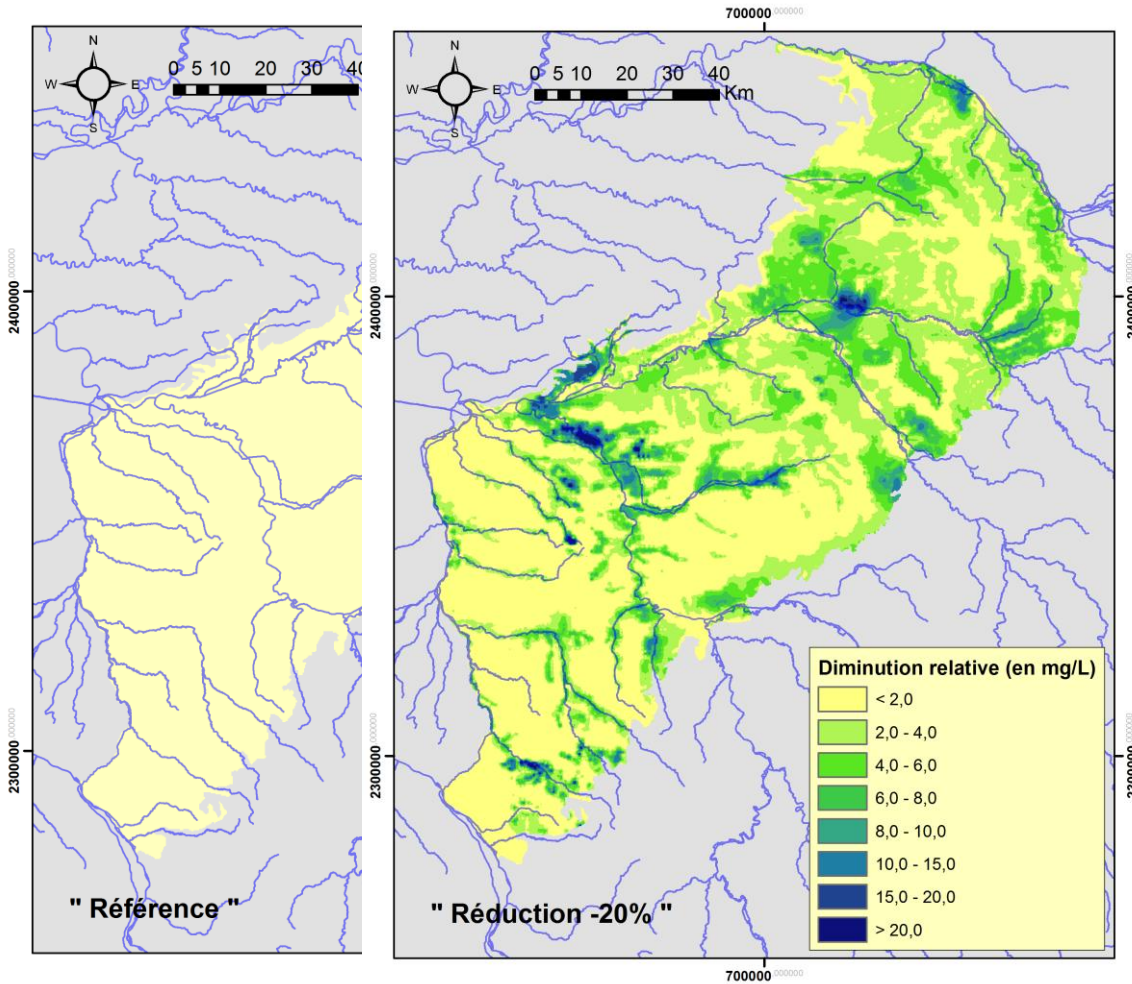
Année 2030 – Nappe de la Craie



■ ■ Simulation de scénarios tendanciels (2014-2030)

- Quantification de la diminution des niveaux de pollution nitrique sous les 3 forçages prédéfinis par rapport au scénario « sans modification de pratiques »:

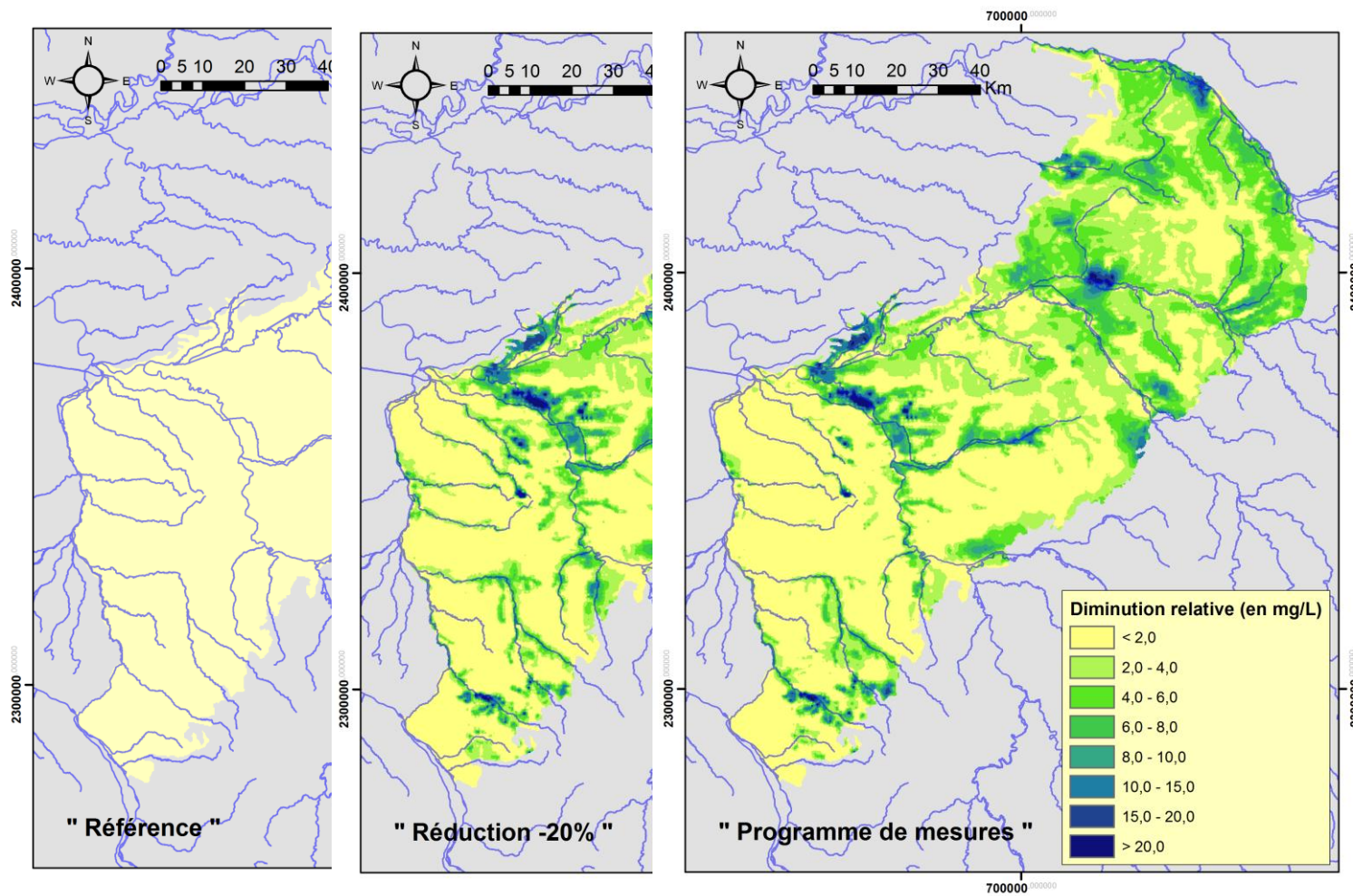
Année 2030 – Nappe de la Craie



■ ■ Simulation de scénarios tendanciels (2014-2030)

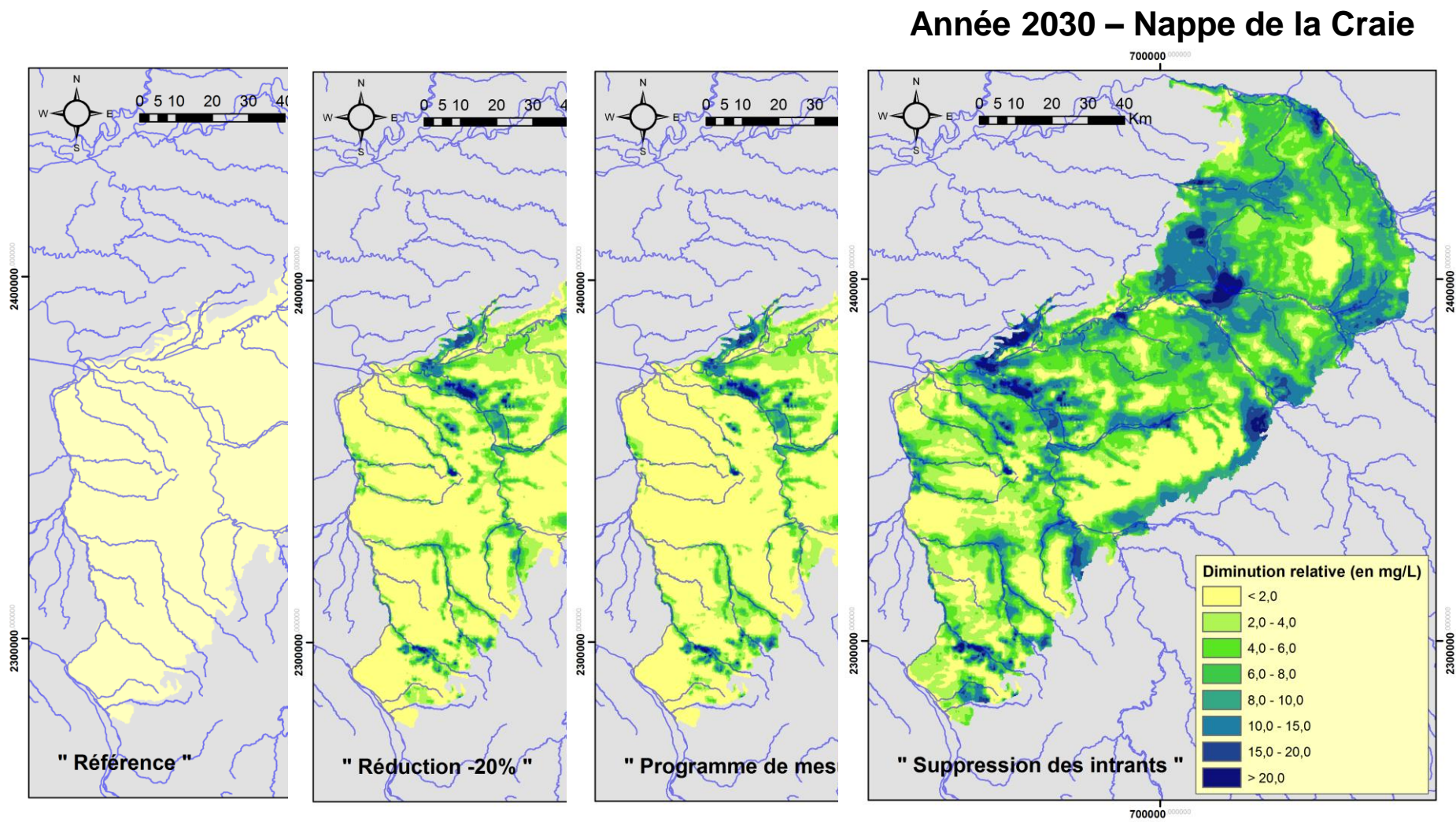
- Quantification de la diminution des niveaux de pollution nitrique sous les 3 forçages prédéfinis par rapport au scénario « sans modification de pratiques » :

Année 2030 – Nappe de la Craie



■ ■ Simulation de scénarios tendanciels (2014-2030)

- Quantification de la diminution des niveaux de pollution nitrique sous les 3 forçages prédéfinis par rapport au scénario « sans modification de pratiques » :



Contexte, objectifs et acteurs

Description et spatialisation des systèmes de culture sur le bassin

Sources d'information mobilisées

Spatialisation des systèmes de culture

- Identification d'un maillage spatial d'étude des systèmes
- Caractérisation des successions de cultures
- Typologie des itinéraires techniques

Modélisation de la pollution nitrique agricole du bassin

Utilisation de STICS à l'échelle macro-régionale

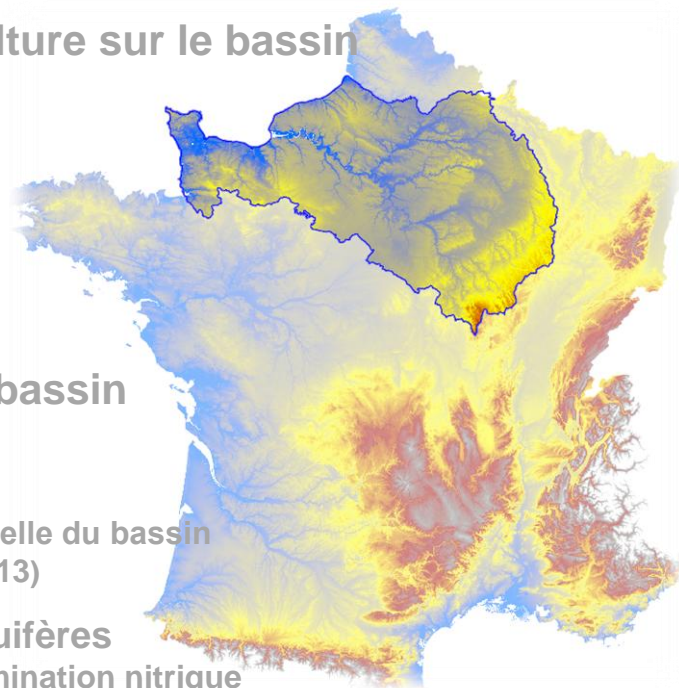
- Spatialisation du modèle agronomique
- Méthodologie d'évaluation de la fiabilité du modèle à l'échelle du bassin
- Modélisation agronomique de la pollution azotée (1971-2013)

Evaluation de la pollution nitrique des formations aquifères

- Calibration de la dynamique de mise en place de la contamination nitrique
- Reconstitution de la pollution nitrique des systèmes aquifères (1971-2013)

Mise en place et modélisation de scénarios tendanciels (2014-2030)

Conclusions et perspectives



- **Synergie** des différentes équipes intervenantes ayant abouti à un travail très collaboratif :
 - Complétion, mise à jour et amélioration des données d'entrée (INRA Infosol & INRA Aster) et du paramétrage du modèle (INRA AgroImpact),
- **Valorisation** et **diffusion** des résultats par compilation à l'échelle de la masse d'eau (fiches AESN) :
 - STICS : surplus et flux azotés sous racinaires annuels, etc.
 - MODCOU : lames d'eau infiltrées, temps de transfert, concentrations en aquifères, etc.

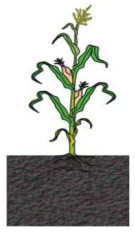
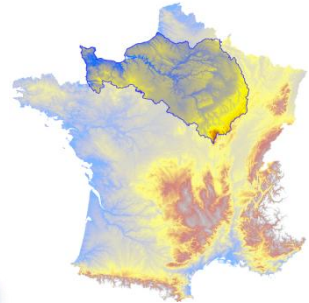
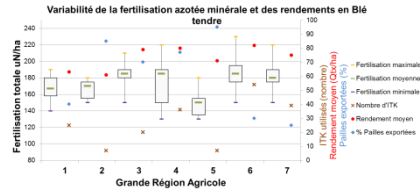
Travaux toujours en cours :

- Perspectives d'améliorations du schéma de simulation spatialisée :
 - **Amélioration de l'interfaçage entre les bases de données et la plateforme de modélisation** (élaboration de règles d'affectation des productions aux types de sol) : meilleure localisation de certaines cultures et meilleure intégration des scénarios misant sur l'agro-écologie.
- Modèle STICS en cours de validation (thèses INRA AgroImpact) sur les techniques et cultures utilisées en **agriculture biologique** → application de STICS spatialisé envisagée à terme pour la simulation d'un scénario AB.
- **Modélisation des transferts de produits phytosanitaires** sur la partie affleurante de la nappe des calcaires de Champigny.

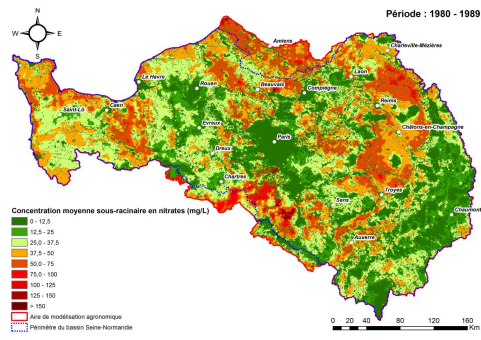
- **Prospective spécialisée – phase 7 PIREN** (AScA, INRA ASTER Mirecourt, Metis, Géographie-Cités, AgrolImpact, Armines) :

Résultats attendus :

- Améliorer les **connaissances** et la **compréhension** des **déterminants de l'évolution des systèmes** agro-alimentaires ainsi que la gamme **d'options agronomiques** permettant **d'atteindre des objectifs de qualité** de l'eau et des milieux aquatiques.
- Produire des **scénarios de transition** (tendanciels / radicaux) du système agro-alimentaire du bassin Seine-Normandie à différentes échelles (bassin – territoires locaux).
- Évaluer leurs **effets** sur l'eau et les milieux aquatiques.



Merci de votre attention !



Photos : Installation expérimentale ASTER Mirecourt