

Modélisation exploratoire des transferts de produits phytosanitaires en domaine souterrain et reconstitution de leur origine en rivière par analyse tendancielle

Session « *Scénariser les futurs du bassin* »

H. Blanchoud¹, N. Gallois², A. Mattei^{1,4}, T. Puech³, N. Fauchon⁴, P. Viennot²,
C. Schott³, F. Baratelli², C. Mignolet³, N. Flipo², J.-M. Mouchel¹

¹ UMR METIS, UPMC-CNRS-EPHE, Paris

² MINES ParisTech/ARMINES, Centre de Géosciences, Fontainebleau

³ INRA-SAD Aster, Mirecourt

⁴ VEDIF, Nanterre



Pratiques
culturales

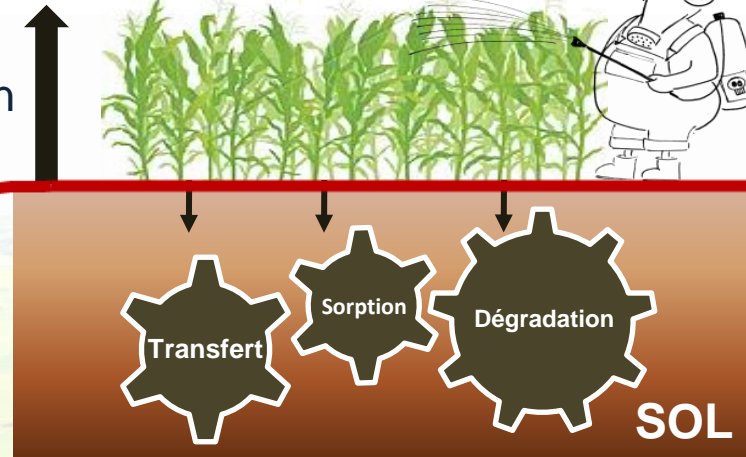
Climat



Apports en
pesticides

Volatilisation

Ruissellement



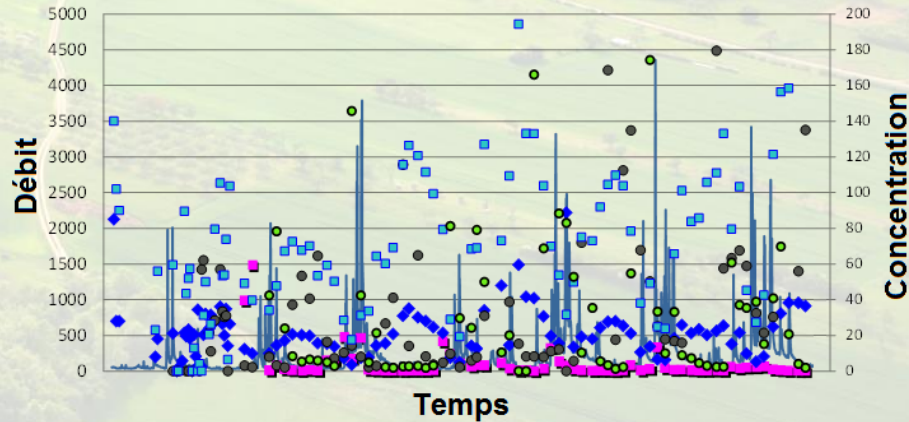
Transferts dans
les nappes

AQUIFERES

Interfaces
nappe-rivière



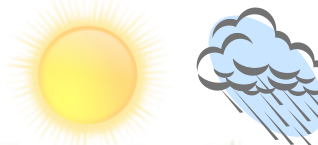
Restitution au
cours d'eau





Pratiques
culturales

Climat

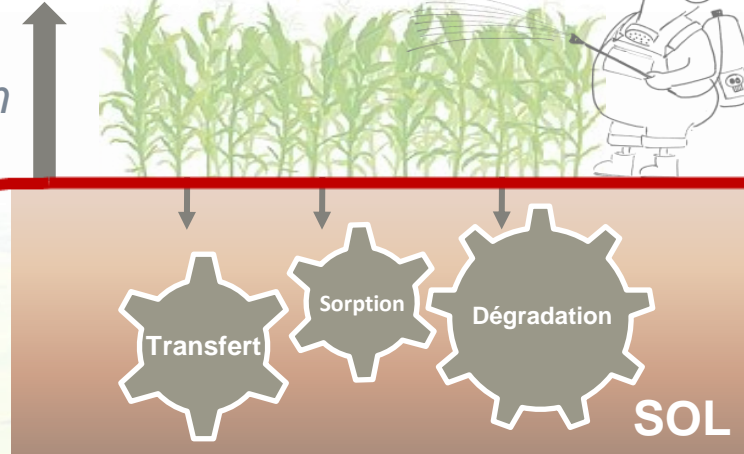


Apports en
pesticides



Volatilisation

Ruissellement



Modélisation



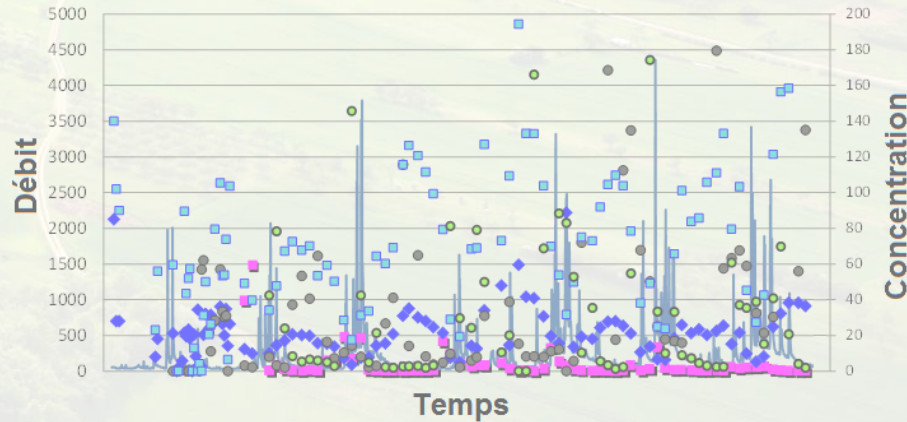
Interfaces
nappe-rivière

Analyse
tendancielle

Transferts dans
les nappes

AQUIFERES

Restitution au
cours d'eau





Pratiques
culturales

Climat

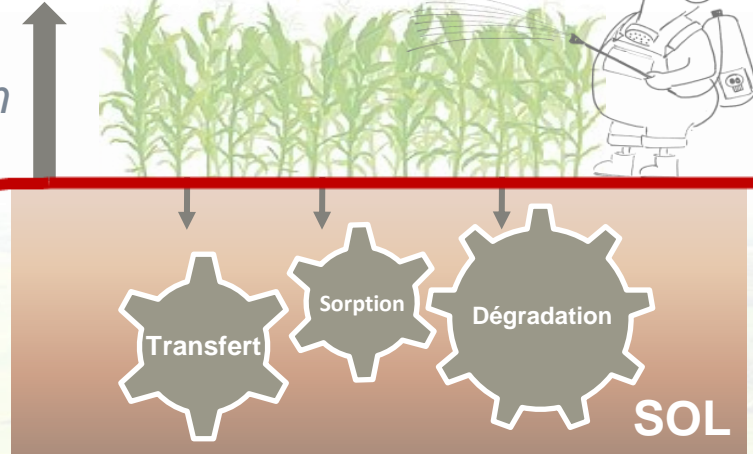


Apports en
pesticides



Volatilisation

Ruissellement



Transferts dans
les nappes

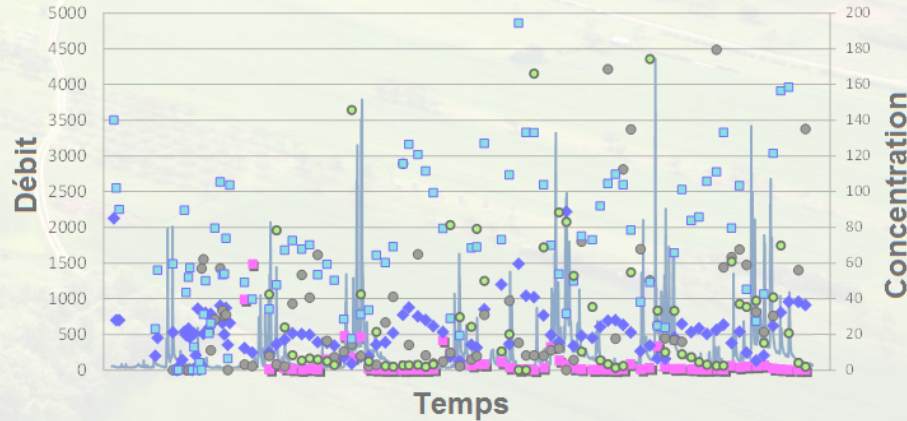
AQUIFERES

Modélisation

Interfaces
nappe-rivière

Analyse
tendancielle

Restitution au
cours d'eau



Contexte et objectifs

- ❖ Méthodologie de simulation spatialisée initiée dans le cadre de **travaux pour l'Agence de l'Eau Seine-Normandie** en 2014 (modélisations **STICS-MODCOU**).

Objectif

- ❖ Reconstituer les **évolutions mesurées des niveaux et dynamiques de pollution** en domaine aquifère.

Prérequis :

- Intégrer la **variabilité spatio-temporelle** rencontrée à large échelle du **climat**, des **sols** et des **systèmes de cultures** = **Première spatialisation du module PeSTICS** ^[1],
- Evaluer la **faisabilité** d'une **reconstruction de l'évolution des pratiques phytosanitaires (large échelle, temps long)** (INRA SAD Aster),
- **Identifier les spécificités et verrous** actuels de modélisation des transferts de pesticides = Mise en œuvre de **modélisations exploratoires** (ARMINES).

^[1][Queyrel, 2014] Thèse PIREN

I. Modélisation exploratoire des transferts souterrains de produits phytosanitaires

Zone d'étude

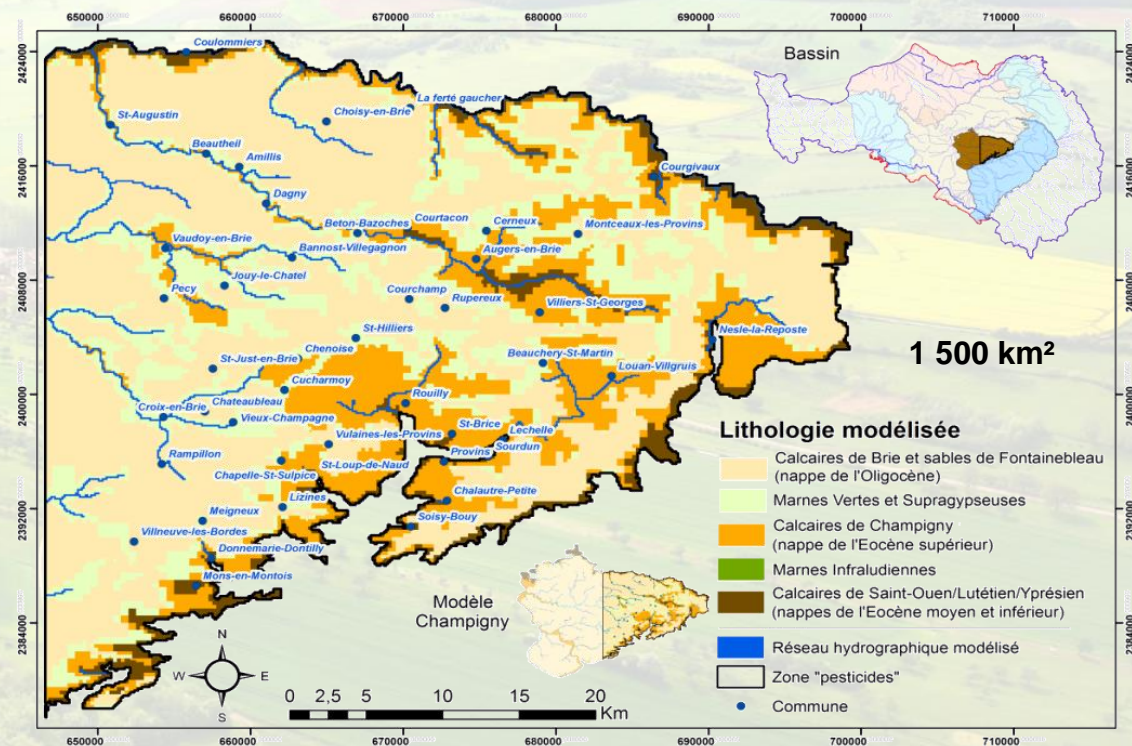
- ❖ Partie affleurante de la nappe des calcaires de Champigny (**Provinçois** - Seine-et-Marne/Marne)
 - Préexistence d'un **modèle hydrogéologique local** [2],
 - **Mesures de concentrations souterraines** en pesticides disponibles (Eau de Paris, Aqual'Yonne, AESN).

- ❖ Choix des molécules testées par modélisation, conditionné par :

- Disponibilité de données **d'observations** avec un **recul d'une vingtaine d'années**,
- Molécules ayant été testées dans le cadre de **l'élaboration du module PeSTICS**.

=

Isoproturon, Atrazine

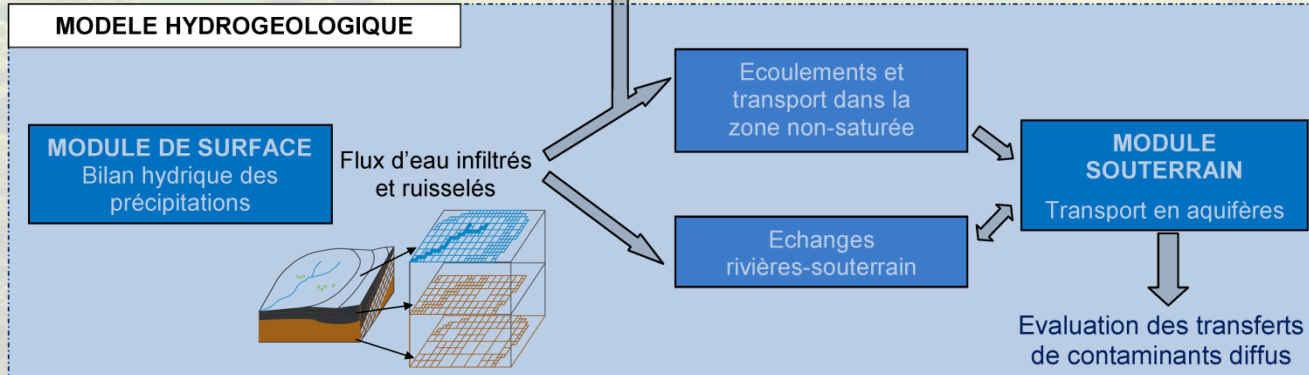
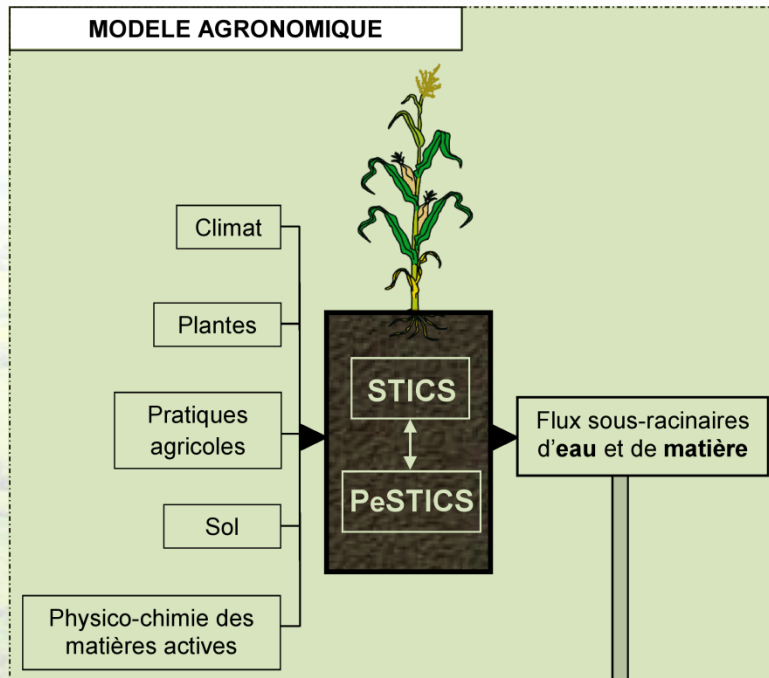


[2] [Bellier, 2013]

I. Modélisation exploratoire des transferts souterrains de produits phytosanitaires

La chaîne de modélisation PeSTICS/STICS-MODCOU

Modélisation des pollutions diffuses agricoles en domaine aquifère : l'association d'un **modèle agronomique** et d'un **modèle hydrogéologique**



Modèle agronomique **STICS** (parcelle agricole)

Évaluation du comportement du système d'échange « sol - plante cultivée » : simulation du **cycle agronomique** des cultures et de leurs **impacts environnementaux**

I. Modélisation exploratoire des transferts souterrains de produits phytosanitaires

La chaîne de modélisation PeSTICS/STICS-MODCOU

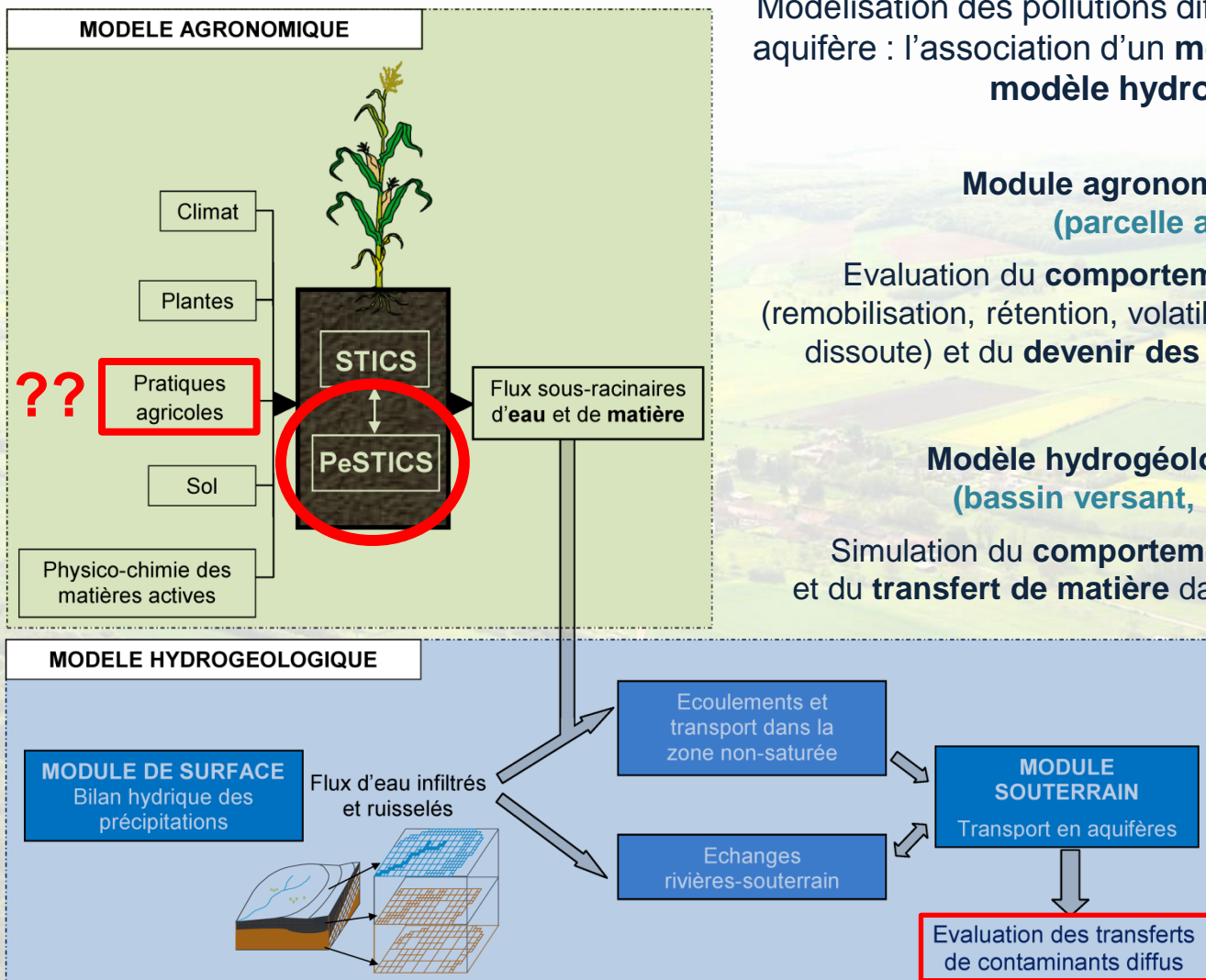
Modélisation des pollutions diffuses agricoles en domaine aquifère : l'association d'un **modèle agronomique** et d'un **modèle hydrogéologique**

Module agronomique PeSTICS
(parcelle agricole)

Evaluation du **comportement physico-chimique** (remobilisation, rétention, volatilisation, transferts sous forme dissoute) et du **devenir des pesticides dans les sols**

Modèle hydrogéologique MODCOU
(bassin versant, 1 ou plusieurs)

Simulation du **comportement d'un hydrosystème** et du **transfert de matière** dans tous ses compartiments



I. Modélisation exploratoire des transferts souterrains de produits phytosanitaires

*Caractérisation des pratiques phytosanitaires sur une vingtaine d'année à l'échelle régionale***

- ❖ **Description des systèmes de culture** (assolements et pratiques culturales) au sein d'une base de données orientée « traitements phytosanitaires » (ARSeiNe).

↳ Base de données OSITOP orientée **pesticides** (enquêtes sur l'Orgeval – PIREN Seine, SRPV, pratiques culturales 1994-2001-2006 et 2011).

Extension spatiale : +/- Île-de-France.

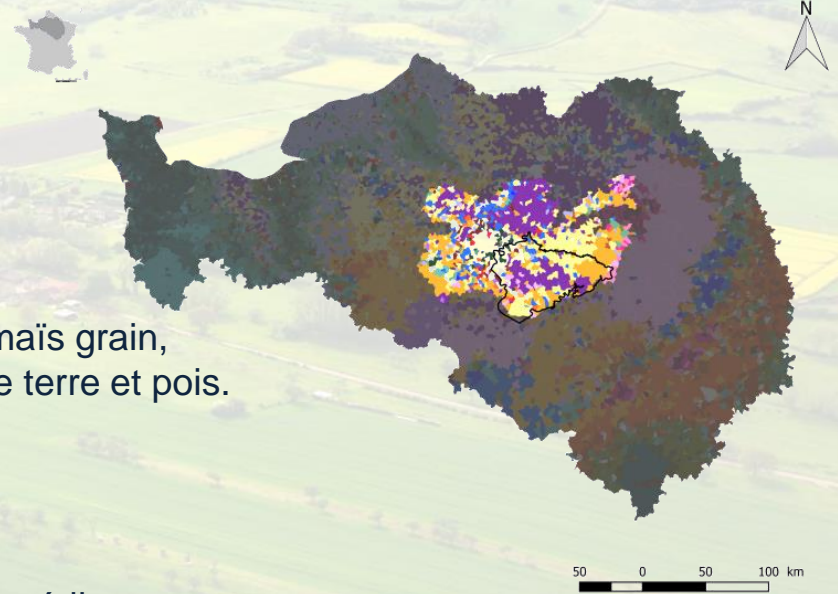
Période couverte par les données : 1989 - 2011

Cultures :

betterave, blé tendre, colza, féverole, lin, maïs grain,
orge d'hiver, orge de printemps, pomme de terre et pois.

Matières actives : Isoproturon et atrazine.

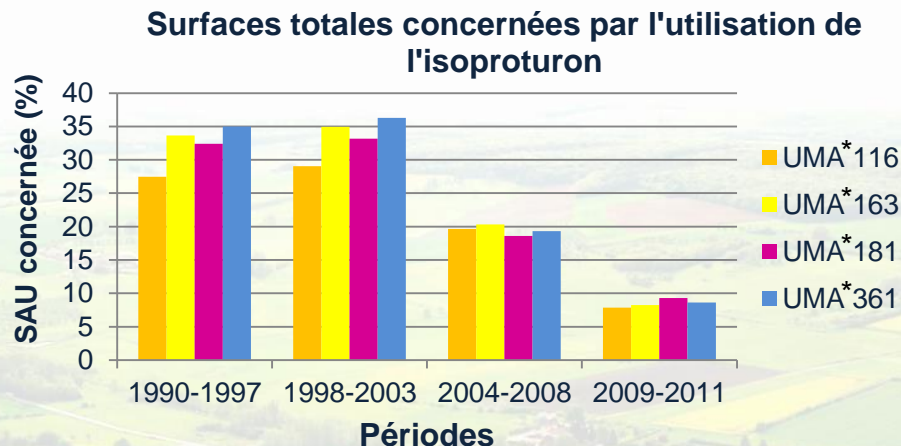
Indicateurs : Fréquences d'utilisation, dates et doses médianes.



** Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence ANR-10-EQPX-17 (Centre d'Accès Sécurisé aux Données – CASD).

Résultats et discussions**

❖ Céréales et isoproturon :



*(Zone agricole homogène sur la zone d'étude)

Dose médiane (g.ha⁻¹)

Périodes	Blé tendre	Orge de printemps
1990 – 1997	750	500
1998 – 2003	750	600
2004 – 2008	750	500
2009 – 2011	860	

Dates d'utilisation

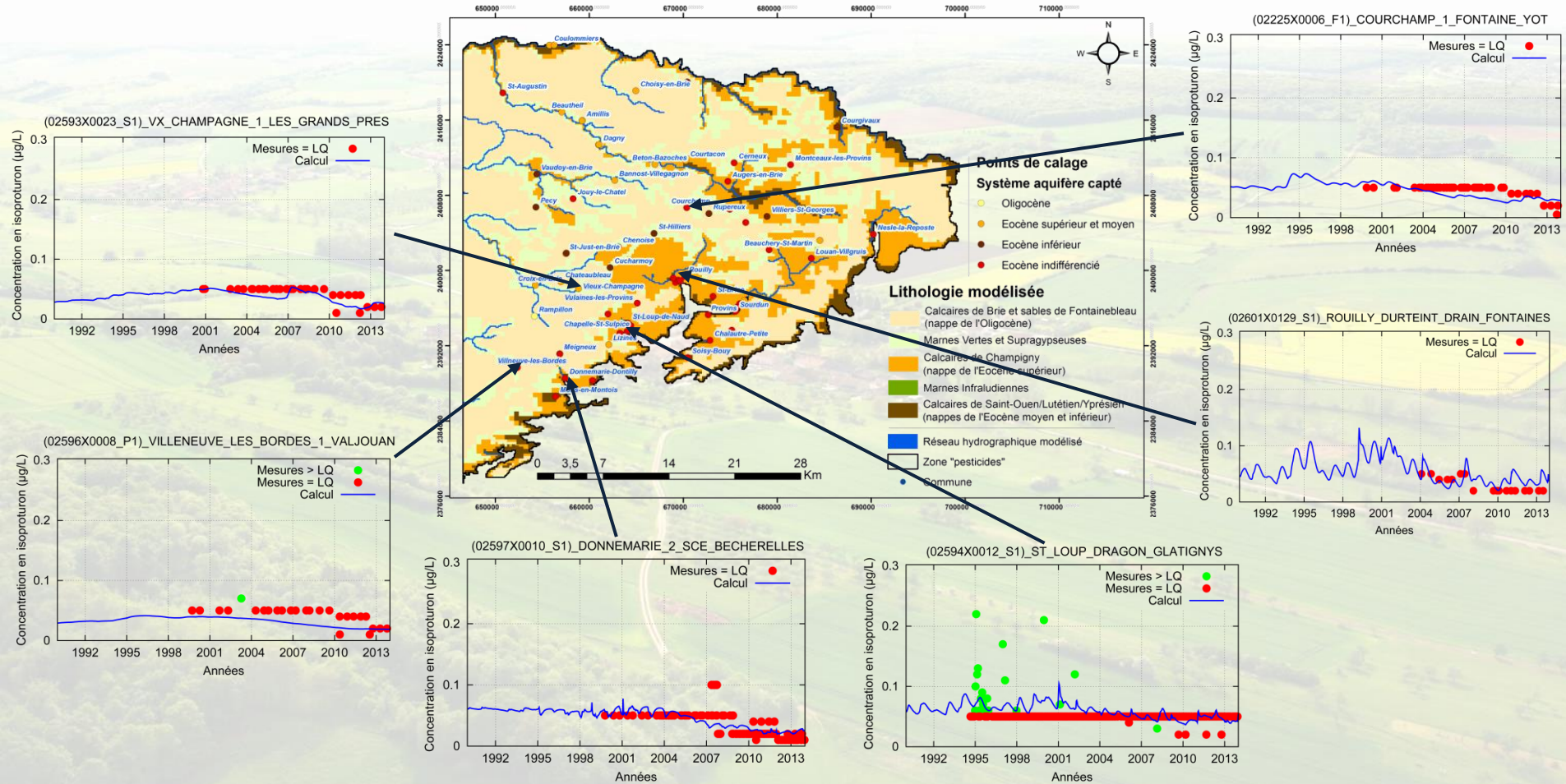
Périodes	Blé tendre			Orge de printemps		
	Q1	Med	Q3	Q1	Med	Q3
1990 - 1997	15/11	15/12	05/03	15/04	05/05	05/05
1998 - 2003	25/11	25/02	15/03	25/03	05/04	05/05
2004 - 2008	05/11	15/11	05/03	05/04	15/04	25/04
2009 - 2011	05/11	05/11	15/11			

** Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence ANR-10-EQPX-17 (Centre d'Accès Sécurisé aux Données – CASD).

I. Modélisation exploratoire des transferts souterrains de produits phytosanitaires

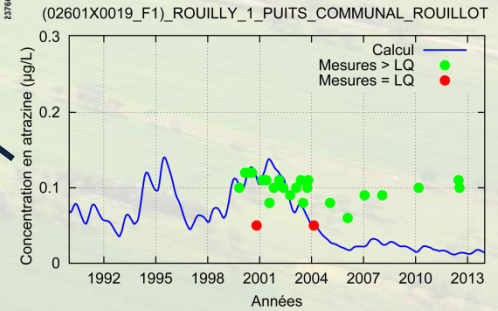
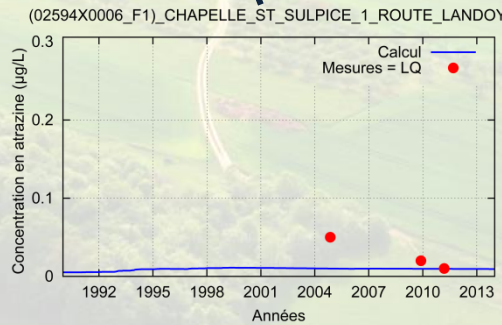
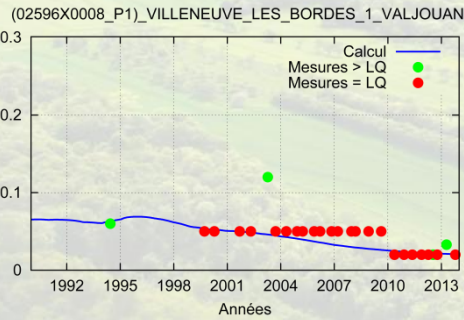
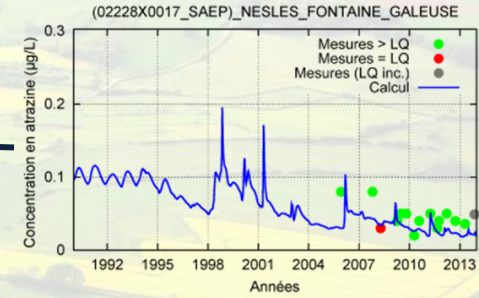
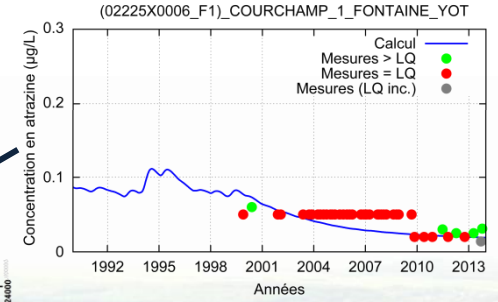
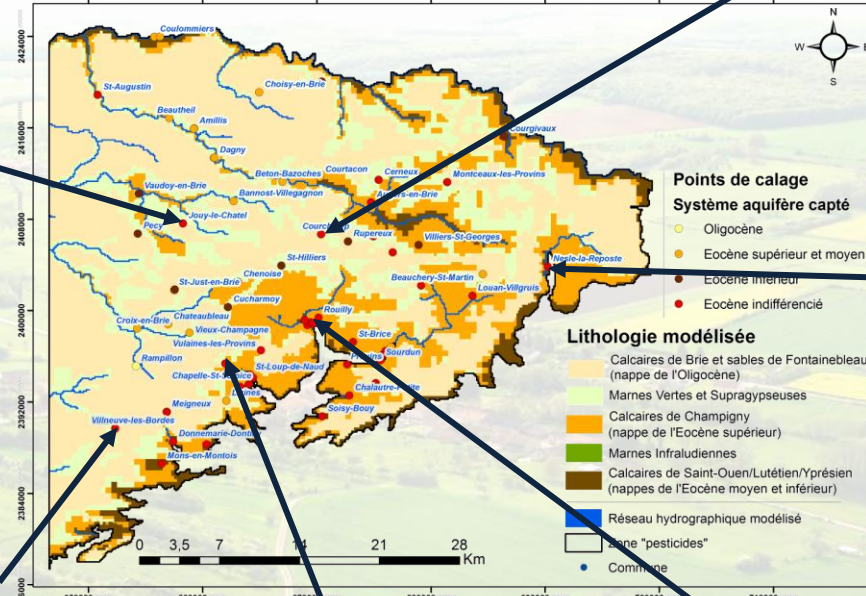
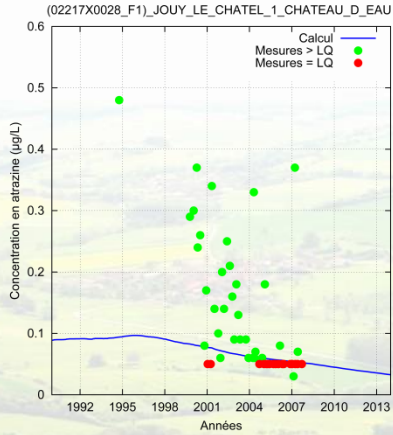
Résultats de modélisation du transfert de pesticides : Isoproturon

- ❖ Calcul PeSTICS spatialisé des flux sous-racinares en produits phytosanitaires,
- ❖ Injection des concentrations sous-racinares en entrée du modèle hydrogéologique.



I. Modélisation exploratoire des transferts souterrains de produits phytosanitaires

Résultats de modélisation du transfert de pesticides : Atrazine



Limites et verrous actuels liés à la modélisation

- ❖ **Recul temporel restreint** sur les données d'entrée disponibles : pratiques des décennies 1970 et 80 ?

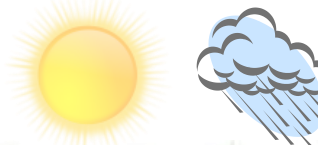
↳ ➤ **Difficultés d'initialisation des deux types de modèles :**

- **Contrainte forte imposée** sur les concentrations initiales en pesticides en nappe **impactant fortement les évolutions temporelles** simulées des concentrations (effets très marqués dans le cas de l'atrazine, moins significatif pour l'isoproturon),
 - Large imprécision des données pour **l'initialisation du stock en matière active dans les sols.**
- ❖ Différenciation entre **valeurs mesurées** et **limites de quantification.**
 - ❖ **Échantillons statistiques limités** : agrégation nécessaire des enquêtes agricoles dans le temps et l'espace.
 - ❖ Intégration de certaines données d'entrée (physico-chimie des **sols** par exemple) à une **échelle spatiale insuffisante.**



Pratiques
culturales

Climat

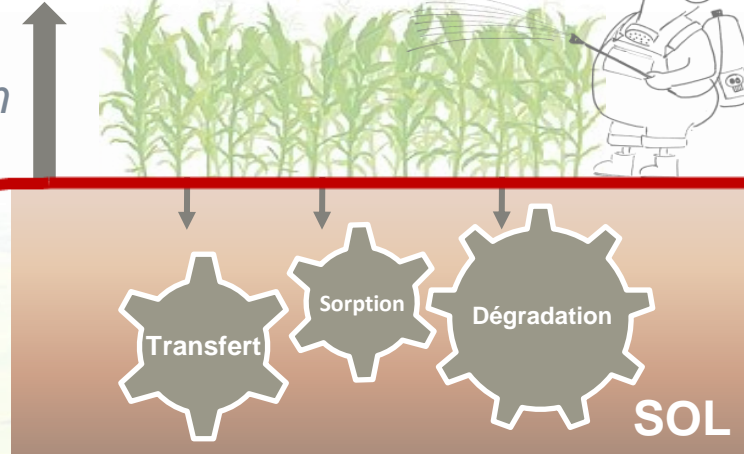


Apports en
pesticides



Volatilisation

Ruissellement



Transferts dans
les nappes

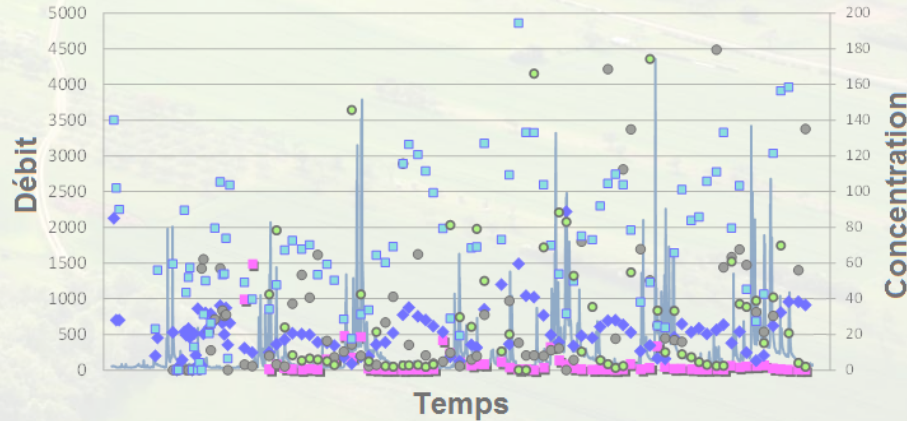
AQUIFERES

Modélisation

Interfaces
nappe-rivière

Analyse
tendancielle

Restitution au
cours d'eau



■ ■ II. Perspective tendancielle de la contamination par la deséthyl-atrazine (DEA)

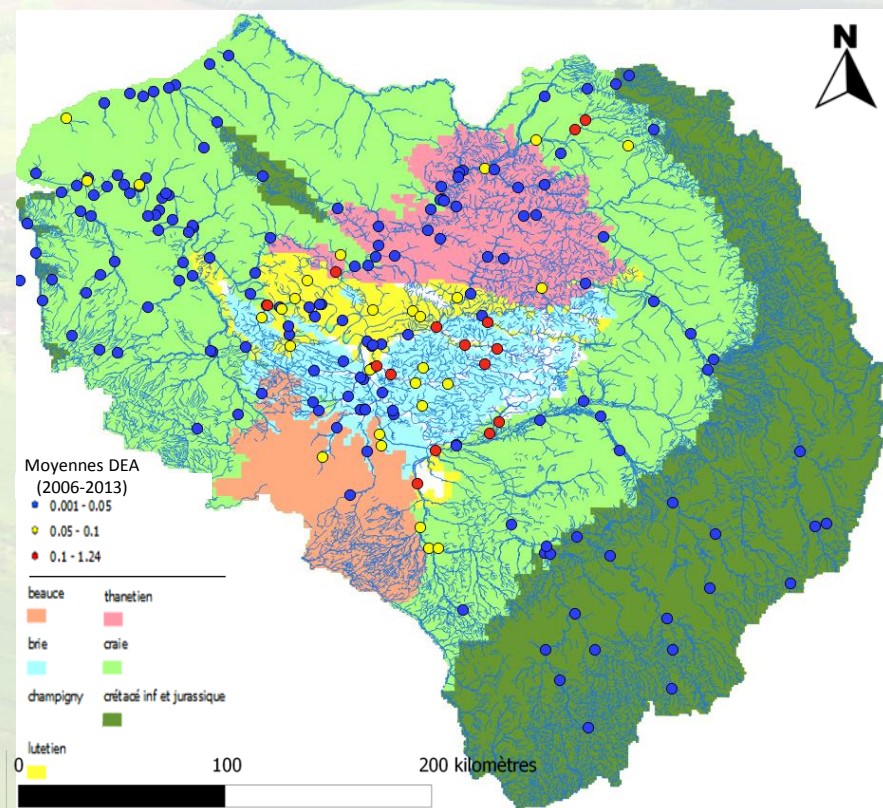
Objectif : Considérer l'ensemble du bassin de la Seine

❖ Pourquoi la DEA ?

- Métabolite de l'atrazine interdite en 2003 (donc plus de source actuelle),
- Contamination actuelle encore préoccupante,
- Détection dans les eaux souterraines (ESO) et de surface (ESU).

❖ Les données de contamination existantes :

- Les données ESU de l'AESN
1999-2013 sur 230 stations



■ ■ II. Perspective tendancielle de la contamination par la deséthyl-atrazine (DEA)

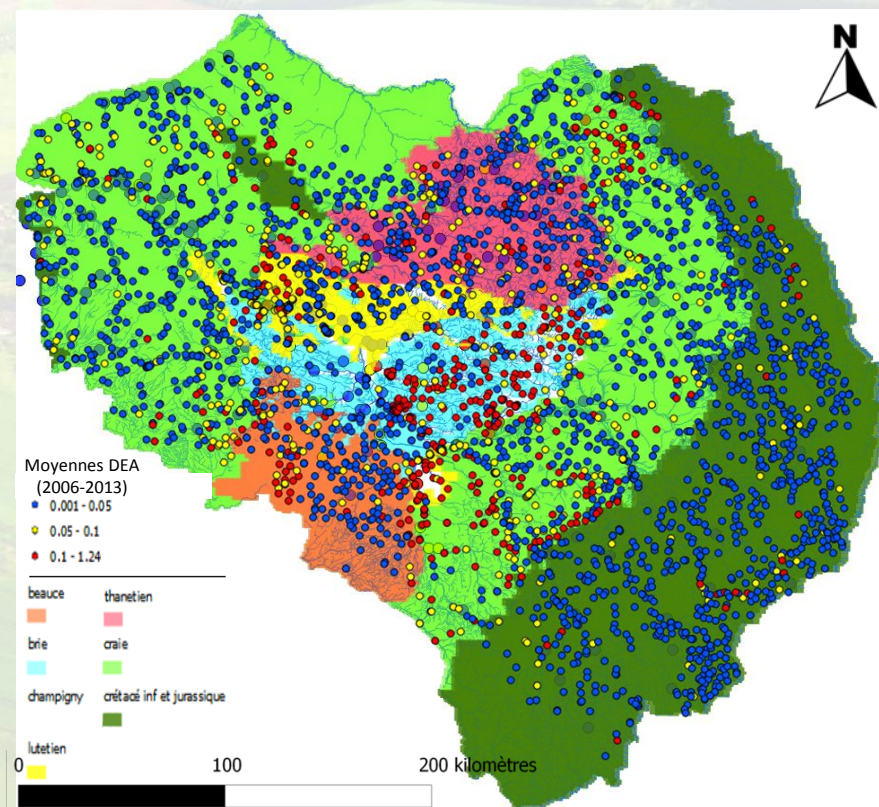
Objectif : Considérer l'ensemble du bassin de la Seine

❖ Pourquoi la DEA ?

- Métabolite de l'atrazine interdite en 2003 (donc plus de source actuelle),
- Contamination actuelle encore préoccupante,
- Détection dans les eaux souterraines (ESO) et de surface (ESU).

❖ Les données de contamination existantes :

- Les données ESU de l'AESN
1999-2013 sur 230 stations
- Les données ESO d'ADES
1997-2013 sur 3500 piézomètres



■ ■ II. Perspective tendancielle de la contamination par la deséthyl-atrazine (DEA)

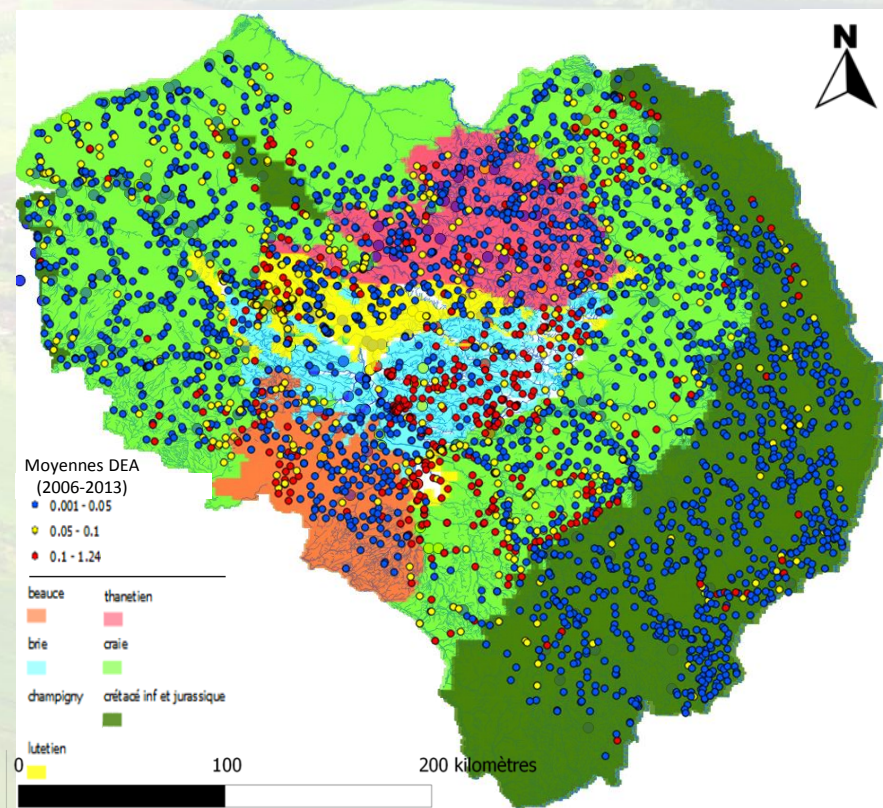
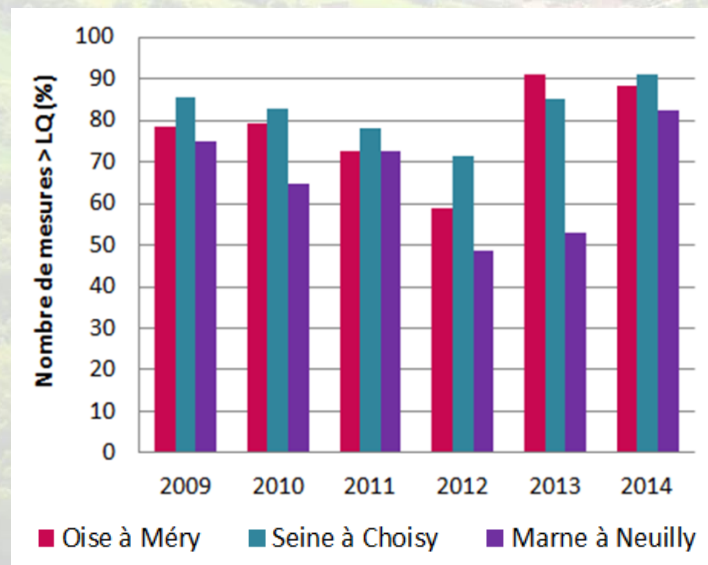
Objectif : Considérer l'ensemble du bassin de la Seine

❖ Pourquoi la DEA ?

- Métabolite de l'atrazine interdite en 2003 (donc plus de source actuelle),
- Contamination actuelle encore préoccupante,
- Détection dans les eaux souterraines (ESO) et de surface (ESU).

❖ Les données de contamination existantes :

- Les données ESU de l'AESN
1999-2013 sur 230 stations
- Les données ESO d'ADES
1997-2013 sur 3500 piézomètres
- Les données VEDIF aux prises d'eau
1997-2014 sur 3 stations



■ ■ II. Perspective tendancielle de la contamination par la deséthyl-atrazine (DEA)

Objectif : Considérer l'ensemble du bassin de la Seine

❖ Pourquoi la DEA ?

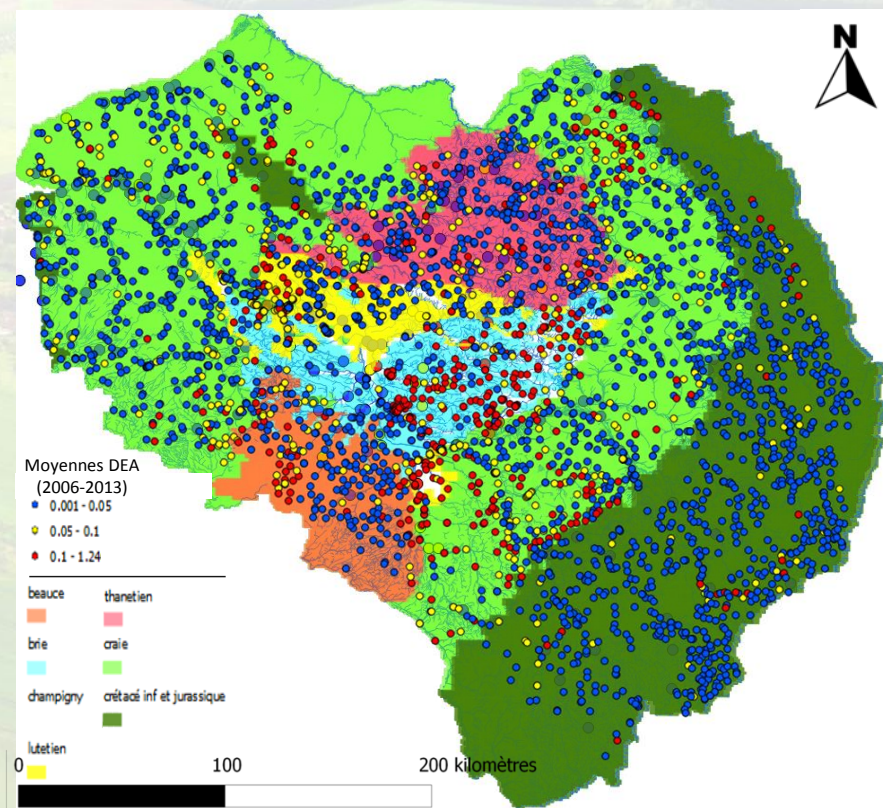
- Métabolite de l'atrazine interdite en 2003 (donc plus de source actuelle),
- Contamination actuelle encore préoccupante,
- Détection dans les eaux souterraines (ESO) et de surface (ESU).

❖ Les données de contamination existantes :

- Les données ESU de l'AESN
1999-2013 sur 230 stations
- Les données ESO d'ADES
1997-2013 sur 3500 piézomètres
- Les données VEDIF aux prises d'eau
1997-2014 sur 3 stations

❖ Traitement des données

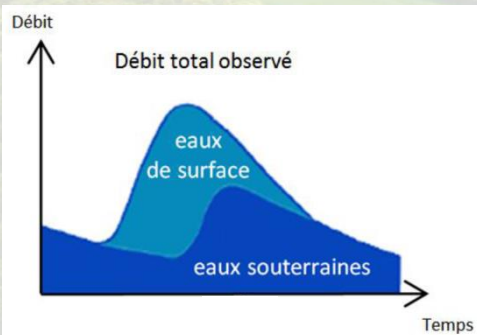
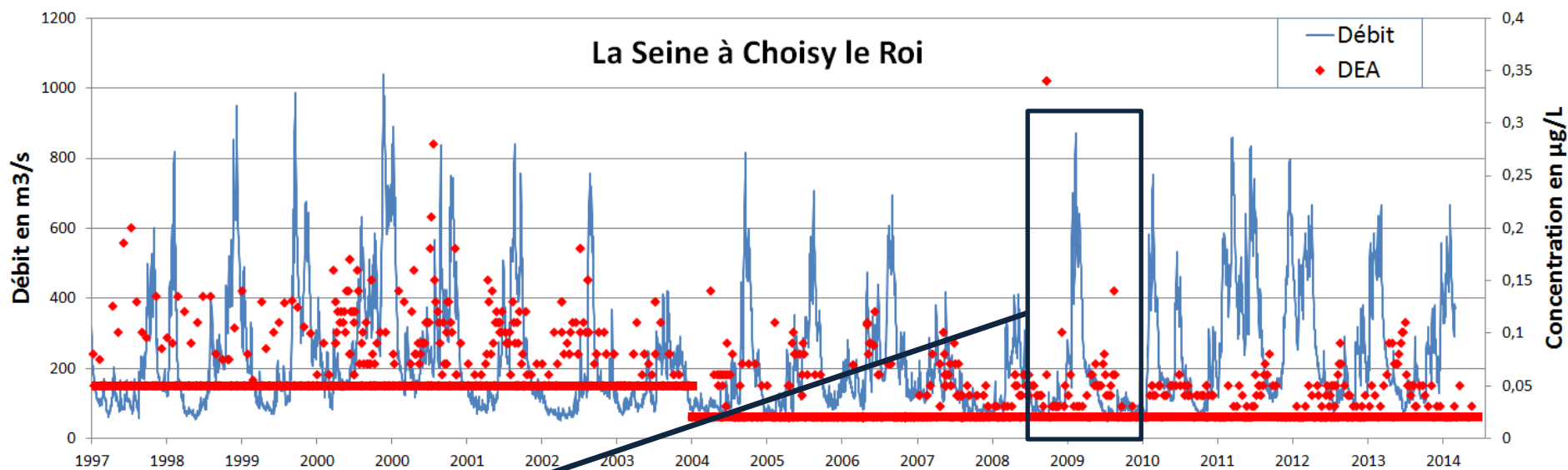
- 11 Go de données
- Extraction des données pour la DEA
Parmi 950 paramètres (ESU)
- Traitement cartographique
Répartition géographique et en profondeur
- Traitement des LQ



■ ■ II. Perspective tendancielle de la contamination par la deséthyl-atrazine (DEA)

Démarche

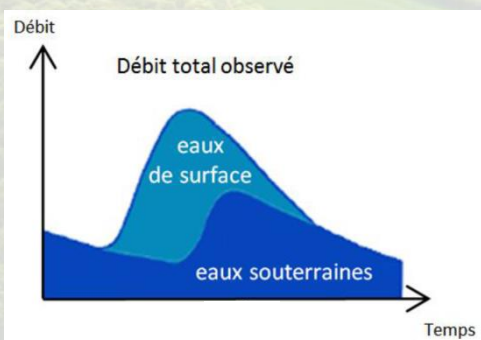
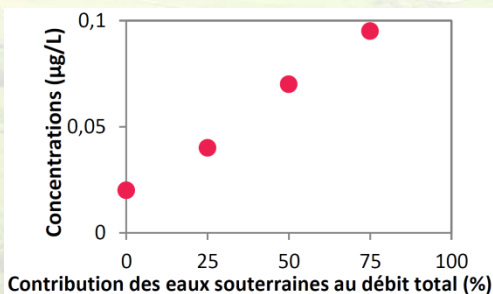
- ❖ Evolution temporelle aux trois prises d'eau : Neuilly-sur-Marne, Choisy-le-Roi et Méry-sur-Oise



■ ■ II. Perspective tendancielle de la contamination par la deséthyl-atrazine (DEA)

Démarche

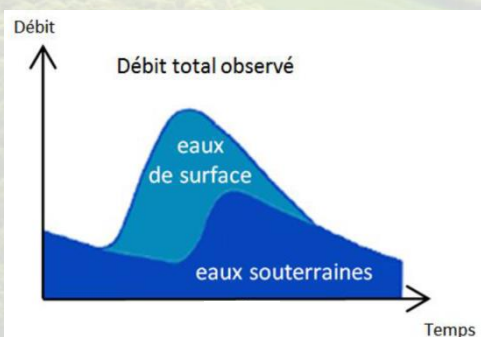
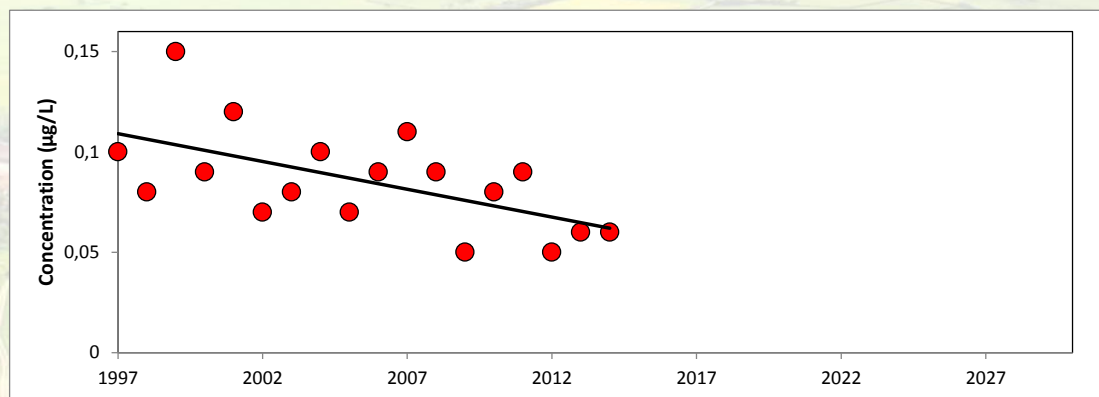
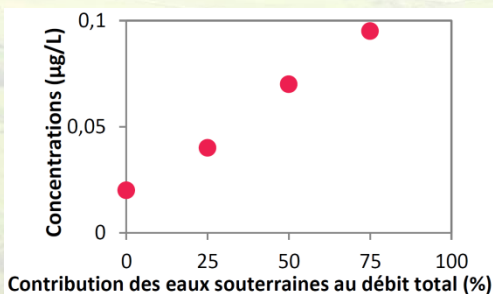
- ❖ Evolution temporelle aux trois prises d'eau : Neuilly-sur-Marne, Choisy-le-Roi et Méry-sur-Oise
- ❖ Déterminer la **contribution des masses d'eau** au débit des rivières



■ ■ II. Perspective tendancielle de la contamination par la deséthyl-atrazine (DEA)

Démarche

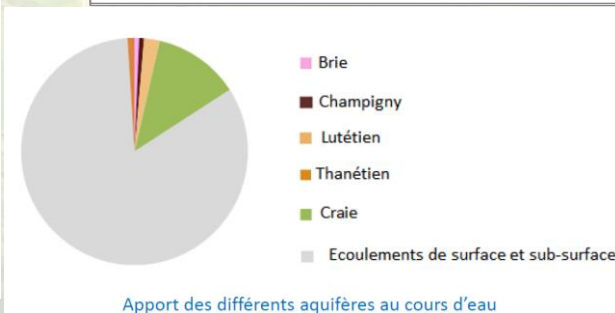
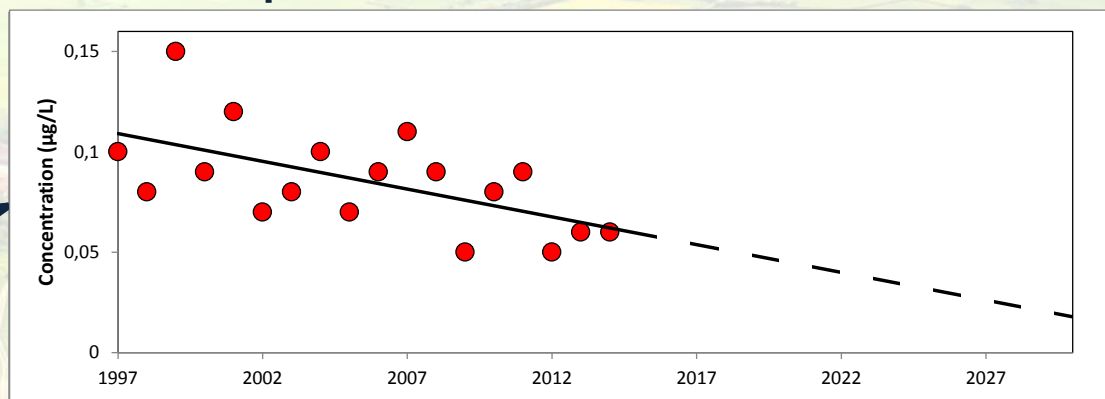
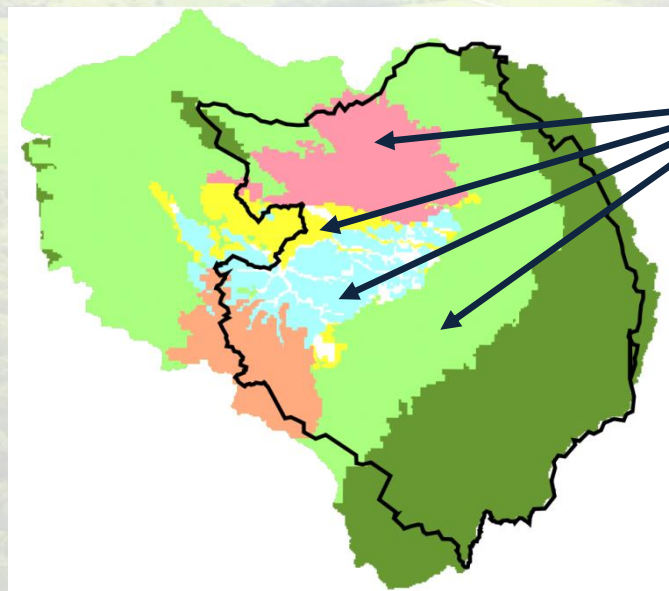
- ❖ Evolution temporelle aux trois prises d'eau : Neuilly-sur-Marne, Choisy-le-Roi et Méry-sur-Oise
- ❖ Déterminer la **contribution des masses d'eau** au débit des rivières
- ❖ Vérifier l'évolution temporelle de la contamination ESO



■ ■ II. Perspective tendancielle de la contamination par la deséthyl-atrazine (DEA)

Démarche

- ❖ Evolution temporelle aux trois prises d'eau : Neuilly-sur-Marne, Choisy-le-Roi et Méry-sur-Oise
- ❖ Déterminer la **contribution des masses d'eau** au débit des rivières
- ❖ Vérifier l'évolution temporelle de la contamination ESO
- ❖ Tendances prospectives des ESO et **estimation prévisionnelle** de fin de contamination

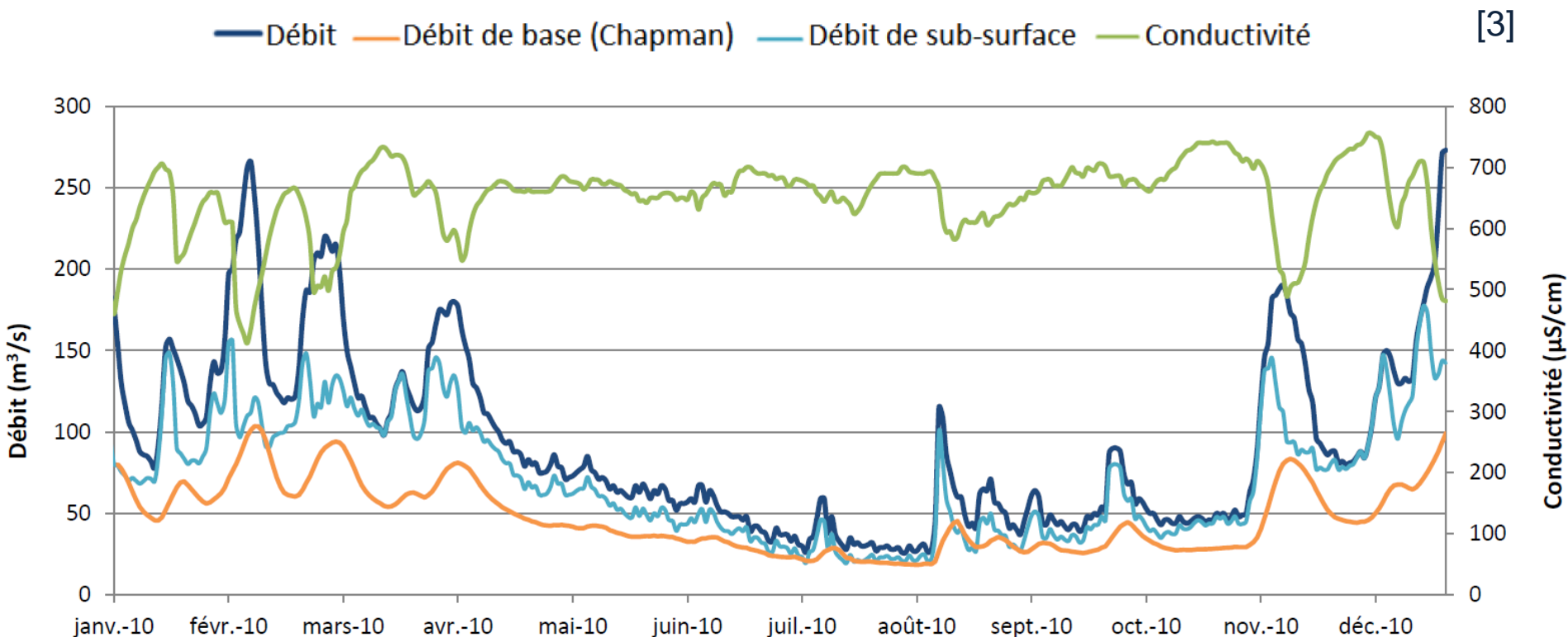


2030 ?

■ ■ II. Perspective tendancielle de la contamination par la deséthyl-atrazine (DEA)

Résultats : Contribution des ESO au débit des cours d'eau

- ❖ Calcul de la contribution du débit de base au débit total



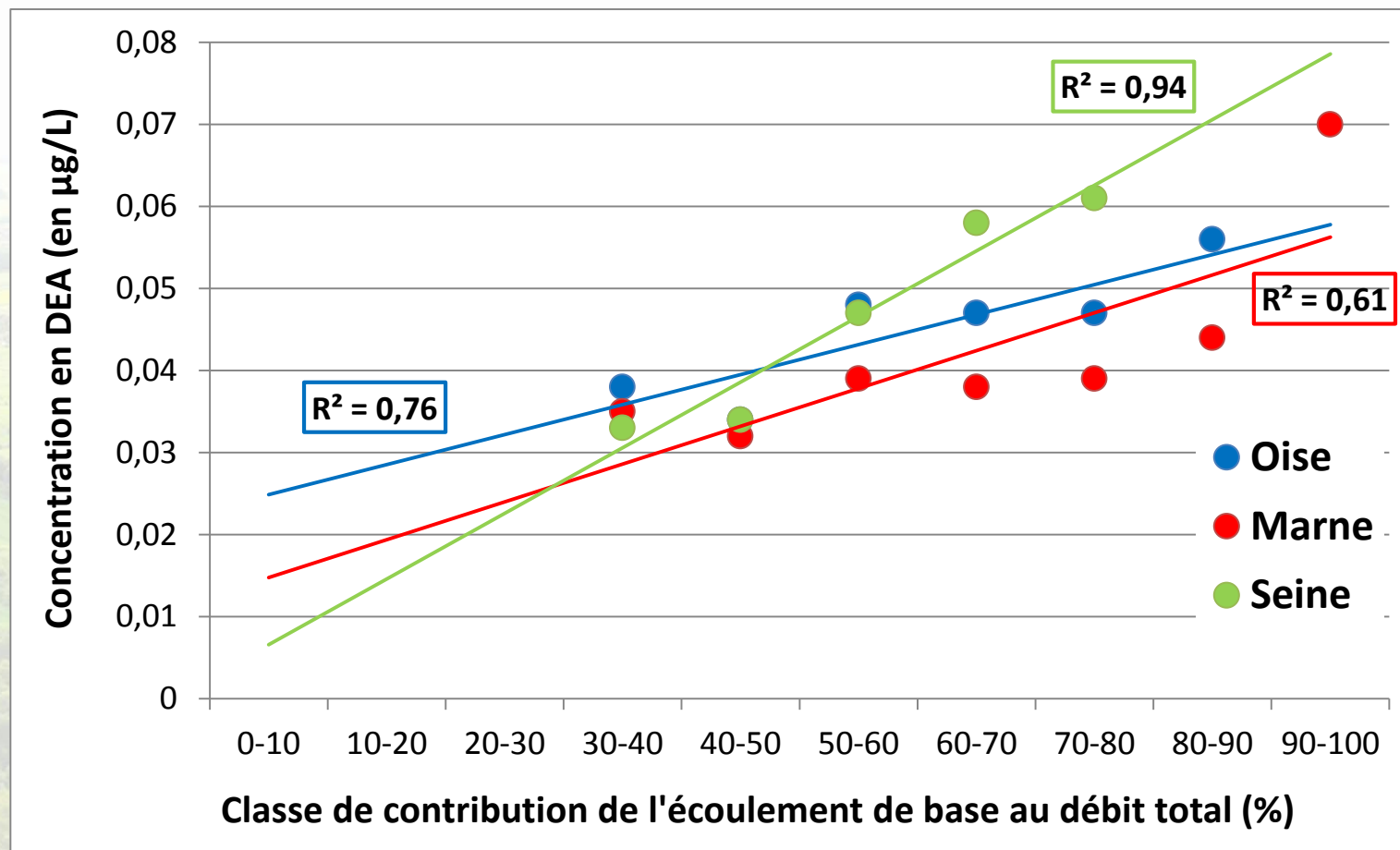
Part cumulée des différents écoulements dans la composition du débit de l'Oise (2010)

[3] [Mattei, 2016]

■ ■ II. Perspective tendancielle de la contamination par la deséthyl-atrazine (DEA)

Résultats : Contribution des ESO à la contamination en DEA

❖ Contribution de l'écoulement de base à la contamination des cours d'eau

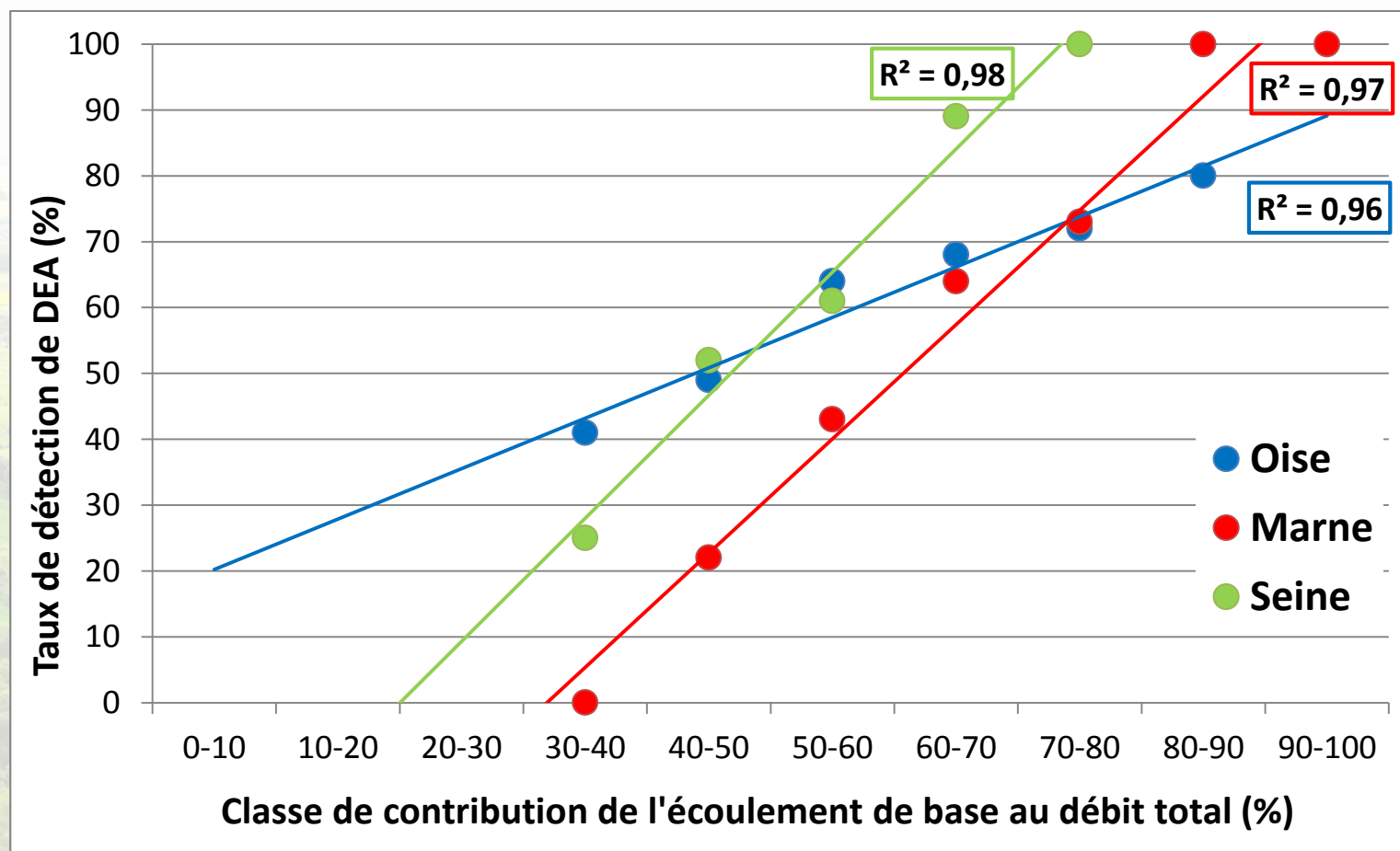


➤ Difficulté liée aux valeurs inférieures à la limite de quantification

■ ■ II. Perspective tendancielle de la contamination par la deséthyl-atrazine (DEA)

Résultats : Contribution des ESO à la contamination en DEA

❖ Contribution de l'écoulement de base à la contamination des cours d'eau

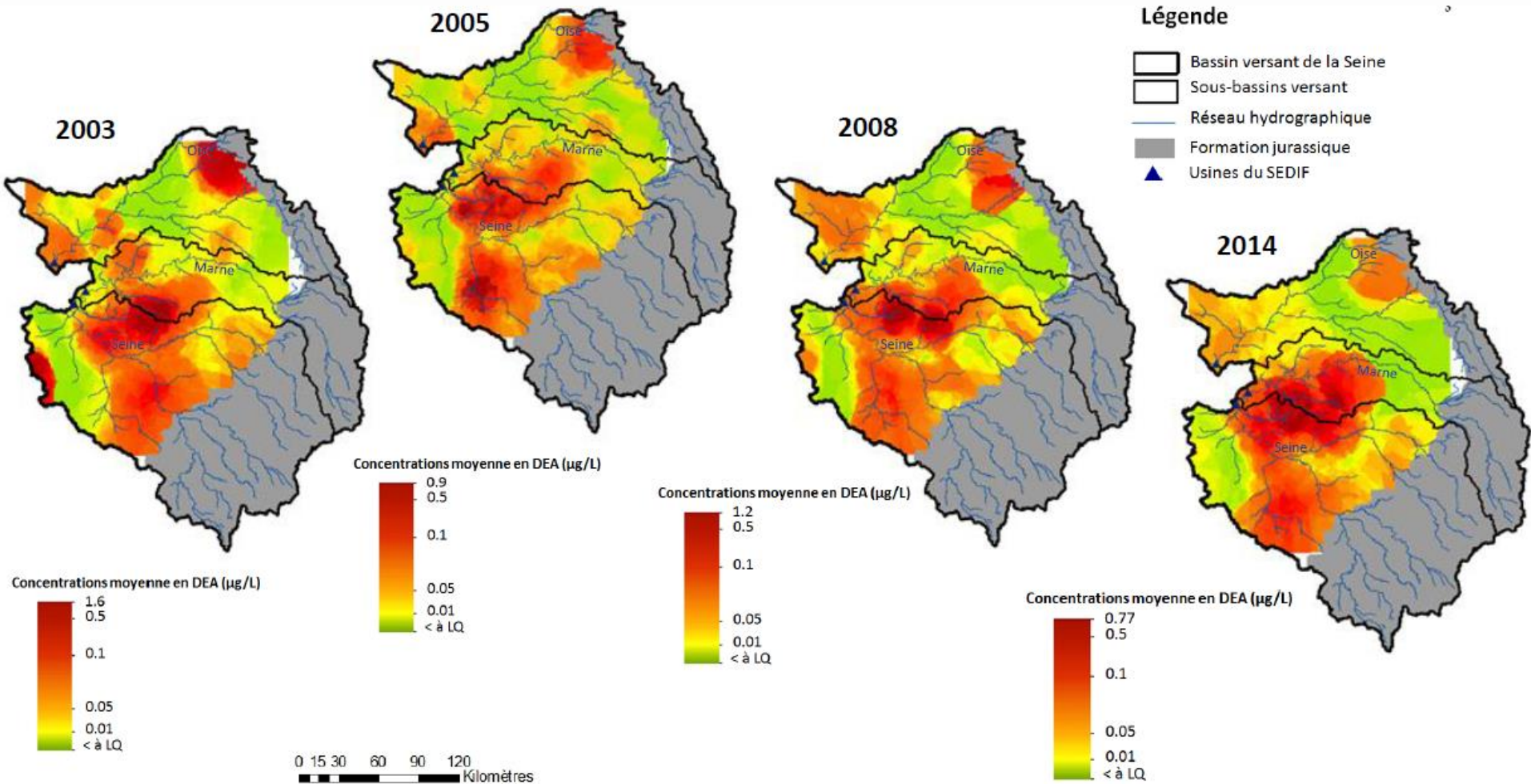


- Difficulté liée aux valeurs inférieures à la limite de quantification
- Nécessité de différencier les masses d'eau souterraines

■ ■ II. Perspective tendancielle de la contamination par la deséthyl-atrazine (DEA)

Résultats : Tendances d'évolution de la DEA dans les ESO

Tendances d'évolution de la contamination des masses d'eau souterraines

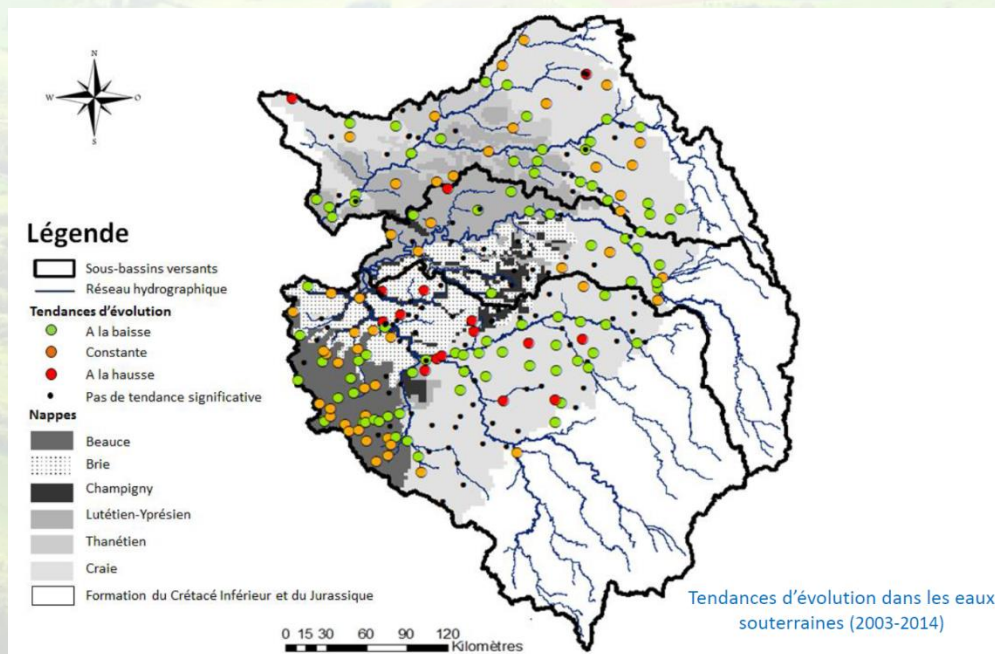


■ ■ II. Perspective tendancielle de la contamination par la deséthyl-atrazine (DEA)

Résultats : Tendances d'évolution de la DEA dans les ESO

Tendances d'évolution de la contamination des masses d'eau souterraines

- ❖ Sur 1436 piézomètres (hors Crétacé inférieur et Jurassique) :
 - 270 ont plus de 10 mesures,
 - 223 sont contaminés,
 - Test de Mann-Kendall pour vérification d'une tendance monotone.

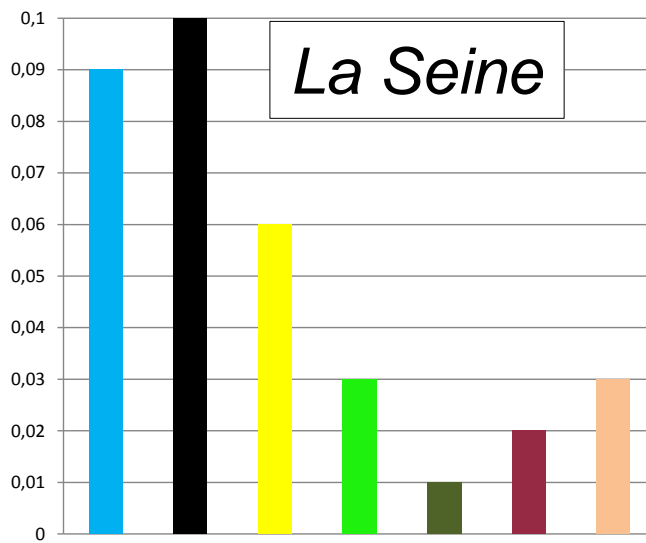
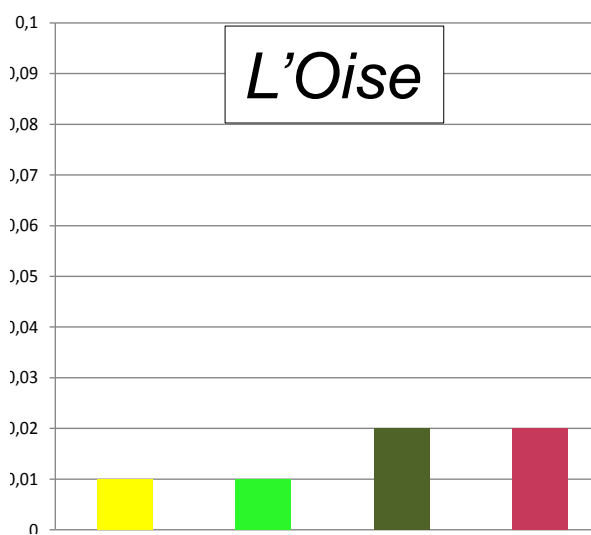
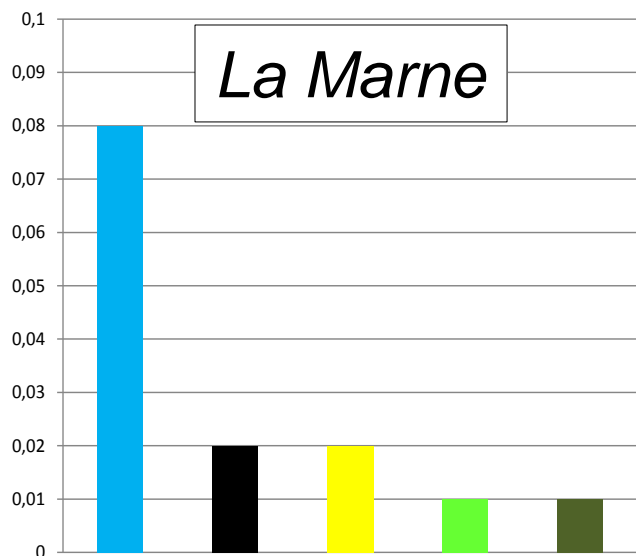
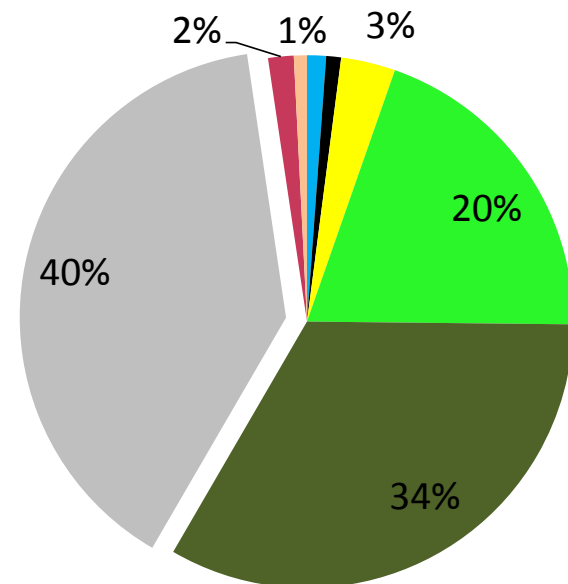
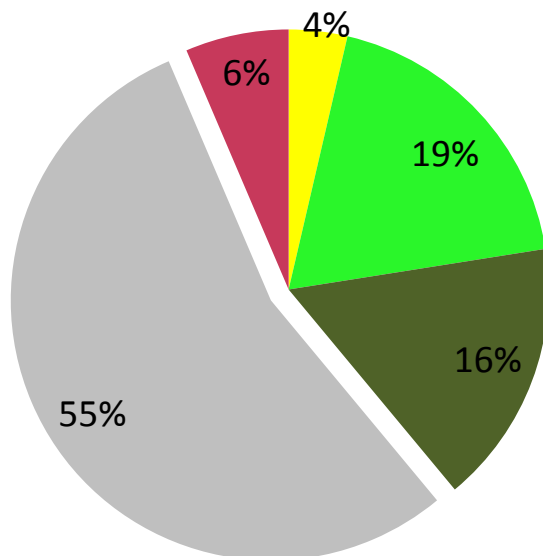
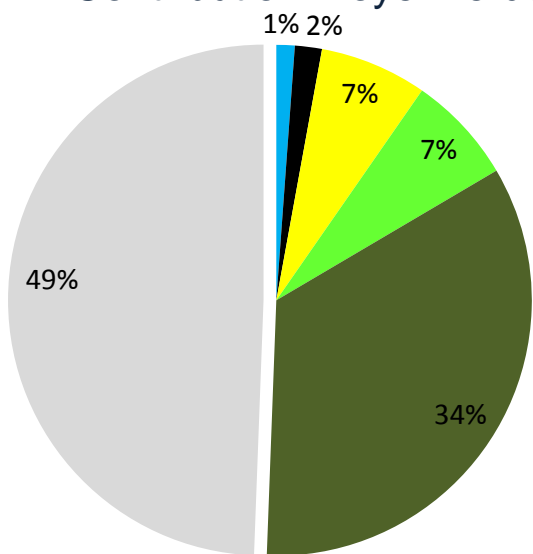


- ❖ Majoritairement, il n'y a pas d'évolution significative,
- ❖ Les évolutions à la hausse sont localisées au niveau des sites les plus contaminés.

II. Perspective tendancielle de la contamination par la deséthyl-atrazine (DEA)

Résultats : Contribution des ESO à chaque cours d'eau

❖ Contribution moyenne des aquifères 1993-2010



■ Brie ■ Champigny ■ Lutétien ■ Craie ■ Crétacé Inf et Jur. ■ écou. de surf et sub-surface ■ Thanétien

❖ Estimation en 2030 :

DEA < LQ pour la Marne et l'Oise et 0,020 µg/L pour la Seine

- **Forte régionalisation** de la contamination,
- En moyenne, **diminution de 2 à 6 ng.L⁻¹.an⁻¹** des concentrations en DEA en nappes,
- Des évolutions **à la hausse sont encore observées.**

❖ Modélisation délicate avec la définition des intrants phytosanitaires sur le long terme

- Incorporation de **sources complémentaires** d'informations afin de mieux décrire les usages des pesticides,
- Nécessité de **spatialiser plus finement** les caractéristiques physico-chimiques des sols en entrée du modèle agronomique,
- Travail sur d'**autres molécules** ? Mais lesquelles car DEA et atrazine sont les plus souvent détectées.

❖ Site d'étude complémentaire envisagé :

- Application de la démarche améliorée de modélisation sur le **bassin versant de la Vesle** (Marne), motivée par la disponibilité de la majeure partie des données nécessaires.
- *Suivi de la contamination en rivière (**Orgeval**) et en zone sous racinaire (carrière de **St Martin le Nœud**)*

Merci pour votre attention !

Références :

- (1) [Queyrel, 2014] W. Queyrel, *Modélisation du devenir des pesticides dans les sols à partir d'un modèle agronomique : Evaluation sur le long terme*, Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, 2014, 284p., Paris.
- (2) [Bellier, 2013] S. Bellier, *Modélisation de la contamination nitrique de la nappe des calcaires de Champigny. Application à la protection des captages prioritaires de la fosse de Melun et de la basse vallée de l'Yerres*, Thèse de doctorat MINES ParisTech, 312p., Paris.
- (3) [Mattei, 2016] A. Mattei, *Eléments de prospective de la contamination des cours d'eau d'Île-de-France par les pesticides*, Rapport de stage de Master II, Polytech Paris-Université Pierre et Marie Curie, 50p., Paris.