Document public

Pollution diffuse des aquifères du bassin Seine-Normandie par les nitrates et les produits phytosanitaires : temps de transfert et tendances

Note de synthèse

BRGM/RP-61006-FR
Mars 2012

eau seine NORMANDIE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Pollution diffuse des aquifères du bassin Seine-Normandie par les nitrates et les produits phytosanitaires : temps de transfert et tendances

Note de synthèse

BRGM/RP-61006-FR
Mars 2012

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM PSP09EAU22

N. Baran, B. Lopez

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : A. Blum	Nom : N. Dörfliger
Date : 1/03/2012	Date : 25/03/2012
Signature :	Signature **:**

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

eau seine NORMANDIE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : pollution diffuse, datation, nitrate, phytosanitaires, transfert, eaux souterraines, tendance, Seine-Normandie, directive cadre sur l'eau

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Baran N., Lopez B. (2012) - Pollution diffuse des aquifères du bassin Seine-Normandie par les nitrates et les produits phytosanitaires : temps de transfert et tendances. Note de synthèse BRGM/RP-61006FR ; 60p.

© BRGM, 2010, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

1. Contexte et objectifs de l'étude 11

1.1. ASPECTS REGLEMENTAIRES 11

1.2. LES OBJECTIFS 12

2. Temps de transfert de l'eau 15

2.1. LES CONNAISSANCES ANTERIEURES A L'ETUDE 15

2.2. DATATION DES EAUX SOUTERRAINES 16

2.2.1. Concept de datation et les différentes méthodes utilisées 16

2.2.2. Résultats obtenus sur le bassin dans le cadre de l'étude 17

2.3. LES POINTS CLES 20

3. Contamination des eaux souterraines du bassin Seine-Normandie par les nitrates 23

3.1. SECTORISATION DU BASSIN 23

3.2. EVALUATION DES DATES DE RUPTURE DE TENDANCES 26

3.3. DETERMINATION DES TENDANCES 27

3.3.1. Approche par point d'eau 28

3.3.2. Approche spatialisée 30

3.3.3. Comparaison des résultats obtenus par point d'eau et par l'approche spatialisée 31

3.4. REPRESENTATIVITE DES POINTS DES RESEAUX DCE 32

3.5. RECHERCHE DE FACTEURS EXPLICATIFS A LA CONTAMINATION ACTUELLE ET AUX TENDANCES 35

3.5.1. Pluie efficace 36

3.5.2. Evolution de l'occupation des sols et des pressions azotées induites 39

3.6. LES POINTS CLES 39

4. Contamination des eaux souterraines du bassin Seine-Normandie par les produits phytosanitaires 43

4.1. EVALUATION DES TENDANCES 44

4.1.1. Approche spatialisée 44
4.1.2. Approche par point d'eau 46

4.2. RECHERCHE DE FACTEURS EXPLICATIFS 47
4.2.1. Pluie efficace 47
4.2.2. Occupation du sol et usage 48

4.3. LES POINTS CLES 57

5. Conclusions et perspectives 59

Liste des illustrations

Illustration 1 : Facteurs dégradant la qualité des masses d'eau souterraines sur le bassin Seine-Normandie 12

Illustration 2 : Synthèse de la fréquence des prélèvements par points d'eau et du nombre de points d'eau concernés ainsi que du nombre de points ayant pu être datés 17

Illustration 3 :Constitution des groupes d'âge apparent. 18

Illustration 4 : Synthèse des âges apparents estimés sur le bassin regroupés en 6 classes et localisation des points où l'âge varie d'une période à l'autre (n=239) 19

Illustration 5 : Sectorisation du bassin préalable à l'étude des tendances 25

Illustration 6 : Répartition des dates de rupture de pente des 1987 chroniques du bassin Seine-Normandie dont l'évolution des concentrations en nitrate n'est pas homogène. 27

Illustration 7 : Répartition par point des tendances « actuelles » d'évolution des concentrations en nitrate sur le bassin Seine-Normandie (estimées postérieurement à la dernière date de changement significatif de tendance si elle existe, dans le cas contraire à partir de février 1993) 28

Illustration 8 : Répartition des tendances par secteurs du bassin Seine-Normandie calculées par la méthode Kendall Régional à partir de la date moyenne de rupture de pente du secteur. 31

Illustration 9 : Zones issues de la sectorisation du bassin Seine-Normandie sans point du RCS et sans point du RCO. 33

Illustration 10 : Comparaison des nombres de points totaux sur le bassin Seine-Normandie, appartenant au RCS et au RCO à ruptures de pentes et tendances Mann-Kendall (MK) d'évolution des concentrations en nitrate identifiées et des nombres de points datés par les CFC/SF6. Les valeurs en italique correspondent aux pourcentages par rapport au nombre total de points du bassin ou des réseaux, les autres pourcentages donnant la contribution des points des réseaux RCS et RCO à l'interprétation globale des tendances et des âges apparents des eaux. 34

Illustration 11 : Représentation par boîtes à moustache de l'évolution des pluies efficaces annuelles de 1985 à 2007 sur le bassin de la Seine. Données issues des travaux de modélisation STICS-MODCOU dans le cadre du projet PIREN-SEINE. Les lettres majuscules représentent le résultat du test de Kruskal-Wallis. En bleu, évolution des médianes annuelles des concentrations en nitrate de tous les points du bassin Seine-Normandie 36

Illustration 12 : Types de corrélations entre les fluctuations piézométriques et les évolutions des concentrations en nitrate mis en évidence par le traitement par covariance croisée des couples piézomètre/qualitomètre du bassin Seine-Normandie. 38

Illustration 13 : Evolution des concentrations, des fréquences de quantification, des fréquences de dépassement de la valeur 0,1 µg/L et évolution de la limite de quantification (LQ) moyenne de l'atrazine et de la DEA pour 10 périodes de 1995 à 2009 et pour tous les points d'eau ayant au moins une analyse en atrazine et en DEA. 45

Illustration 14 : Représentation par boîtes à moustache de l'évolution des pluies efficaces annuelles de 1995 à 2009 sur le bassin de la Seine. Données issues des travaux de modélisation STICS-MODCOU dans le cadre du projet PIREN-SEINE. Les lettres majuscules représentent le résultat du test de Kruskal-Wallis. Moyennes des conentrations en atrazine (rouge) et en DEA (vert). 48

Illustration 15 : Fréquence de quantification et nombre de prélèvements par point d'eau vis-à-vis de la déséthylterbuthylazine et croisement avec les données OTEX (Orientation Technico Economique des Exploitations agricoles).....51

Illustration 16 : Fréquence de quantification et nombre de prélèvements par point d'eau vis-à-vis de la déséthylatrazine et croisement avec les données OTEX (Orientation Technico Economique des Exploitations agricoles) 52

Illustration 17 : Quantités de phytosanitaires vendus en 2008-2009-2010 par région (pour les 22 molécules les plus vendues en 2008 – source Onema - Agence de l'Eau Seine-Normandie – Banque Nationale des Ventes de produits phytopharmaceutiques réalisées par les Distributeurs agréés (BNV-D)).....55

Synthèse

Le principal objectif fixé par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE 2000/60/CE) est que les masses d'eau présentent d'ici 2015 un bon état quantitatif et qualitatif. La Directive impose ainsi aux Etats Membres non seulement de caractériser le niveau de la contamination des eaux souterraines mais aussi d'étudier les tendances d'évolution des concentrations des polluants. En ce qui concerne le bassin Seine-Normandie, l'état des lieux de 2004 a montré que 46 masses d'eau souterraines sur les 53 rattachées au bassin ont un risque de non atteinte du bon état chimique, dont 15% pour le paramètre nitrate seul, 15 % pour le paramètre phytosanitaires seul et 70 % pour les deux paramètres associés.

L'objectif de la présente étude méthodologique menée conjointement par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et le BRGM, est de mieux caractériser les pollutions diffuses (nitrates et produits phytosanitaires) à l'échelle du bassin Seine-Normandie en travaillant à la fois sur l'état actuel de contamination mais aussi en valorisant et interprétant les données historiques de qualité.

Les approches proposées dans cette étude visent à

- caractériser les temps de transfert et de résidence de l'eau ;
- caractériser et décrire les tendances passées de l'évolution de la qualité des eaux souterraines ;
- expliquer la variabilité spatiale et temporelle de la contamination des eaux souterraines vis-à-vis des paramètres nitrate et phytosanitaires.

Plus largement, les informations obtenues dans le cadre de cette étude permettent

- de mieux connaître les comportements hydrodynamiques des aquifères du bassin Seine-Normandie ;
- d'expliquer l'évolution des concentrations en contaminants et principalement les nitrates dans le milieu souterrain ;
- d'apporter des arguments quant aux reports de délais, voire d'objectifs de qualité des masses d'eau souterraine vis-à-vis des obligations de bon état de la DCE ;
- d'aider à la prévision de l'état chimique, et de son évolution ;
- de porter un regard critique sur les points de surveillance RCS et RCO mis en place dans le cadre de la Directive Eau sur le bassin Seine-Normandie.

Le présent rapport correspond à une note synthétique reprenant les aspects les plus marquants de l'étude. Les aspects méthodologiques sont décrits précisément dans le rapport BRGM/RP-60402-FR dans lequel se trouvent également les résultats détaillés de l'étude. Dans cette note, certains éléments plus exploratoires ne sont pas repris comme l'évaluation de la pertinence d'utiliser des données eau de surface pour caractériser l'évolution des concentrations dans les eaux souterraines pour le seul paramètre nitrate.

1. Contexte et objectifs de l'étude

1.1. ASPECTS REGLEMENTAIRES

La surveillance accrue de la qualité des eaux souterraines depuis plusieurs années a mis en évidence une contamination plus ou moins importante des aquifères par les nitrates et/ou les produits phytosanitaires.

Le principal objectif fixé par la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE) est que les masses d'eau présentent d'ici 2015 un bon état quantitatif et qualitatif. La Directive impose ainsi aux Etats Membres non seulement de caractériser le niveau de la contamination des eaux souterraines mais aussi d'étudier les tendances d'évolution des concentrations des polluants. Les Etats Membres doivent également mettre en place un programme d'actions afin d'atteindre le bon état. A l'issue de la caractérisation des masses d'eau souterraine en France, il apparaît que pour 99 % des masses d'eau présentant un risque de non atteinte du bon état, les paramètres nitrate et phytosanitaires sont en cause. En cas de non atteinte du bon état, les Etats Membres devront être en mesure d'expliquer les raisons de ce constat et des demandes de dérogation de délai étayées devront être réalisées. En ce qui concerne le bassin Seine-Normandie, la caractérisation a montré que 46 masses d'eau sur les 53 rattachées au bassin ont un risque de non atteinte, dont 15% pour le paramètre nitrate seul, 15 % pour le paramètre phytosanitaires seul et 70 % pour les deux paramètres associés (Illustration 1).

Sur le bassin Seine-Normandie, les dispositions de suivi de la qualité des eaux souterraines pour l'application de la Directive Cadre sur l'Eau incluent :

- **464 points de prélèvements constituant le Réseau des Contrôles de surveillance (RCS)** destiné à évaluer les incidences de l'activité humaine et les évolutions à long terme de l'état des masses d'eau,

- **394 points de prélèvements constituant le Réseau des Contrôles Opérationnels (RCO)** destiné à évaluer l'état et l'évolution des masses d'eau présentant un risque de ne pas atteindre les objectifs environnementaux pour un paramètre spécifique.

Parallèlement à la Directive Cadre sur l'Eau, la Directive Nitrate (91/676/EEC) demande également aux états Membres d'identifier les eaux souterraines contenant plus de 50 mg NO_3/L ou susceptibles de dépasser cette limite si des mesures préventives ne sont pas engagées.

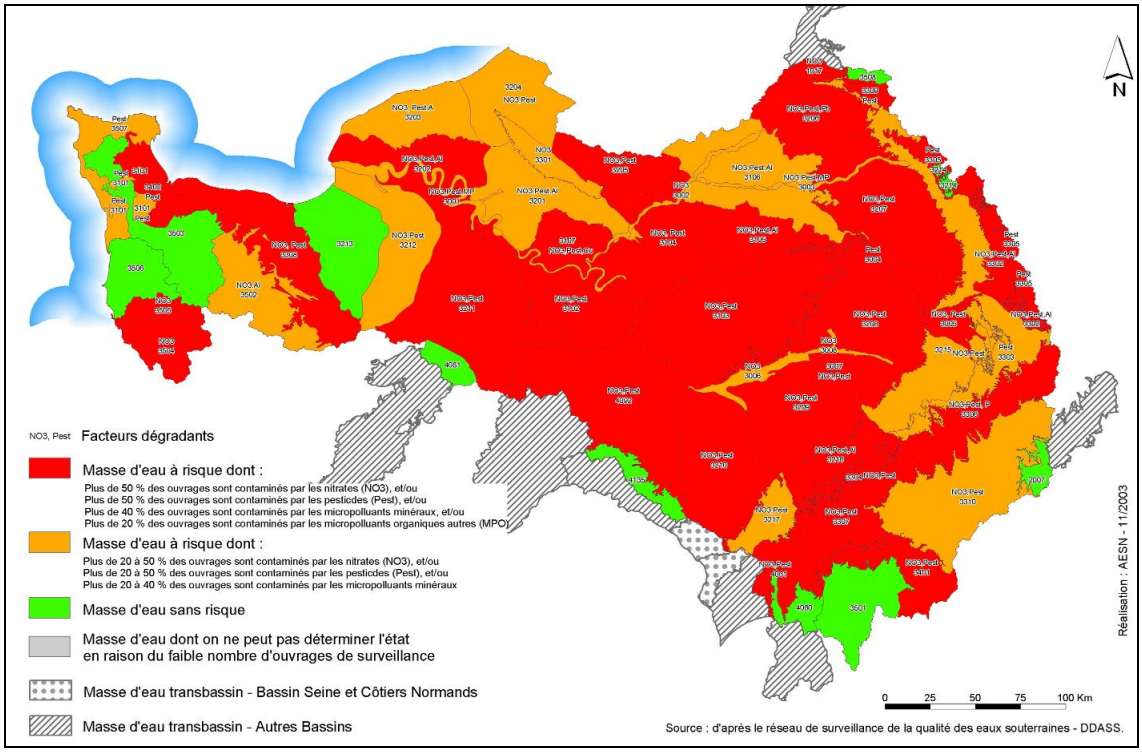

Illustration 1 : Facteurs dégradant la qualité des masses d'eau souterraines sur le bassin Seine-Normandie

1.2.LES OBJECTIFS

L'objectif de la présente étude est de mieux caractériser les pollutions diffuses (nitrates et produits phytosanitaires) à l'échelle du bassin Seine-Normandie en travaillant à la fois sur l'état actuel de contamination mais aussi en valorisant et interprétant les données historiques de qualité.

L'approche proposée permet de

- caractériser les temps de transfert et de résidence de l'eau.
- décrire les tendances passées de l'évolution de la qualité des eaux souterraines vis-à-vis du paramètre nitrate
- caractériser et d'expliquer la variabilité spatiale et temporelle de la contamination des eaux souterraines vis-à-vis des paramètres nitrate et phytosanitaires,

Plus largement, les informations obtenues permettent

- de mieux connaître les comportements hydrogéologiques des points de surveillance du réseau mis en place dans le cadre de la Directive Eau sur le bassin Seine-Normandie
- d'expliquer l'évolution des concentrations dans le milieu souterrain malgré les actions notamment agroenvironnementales,
- d'apporter des arguments quant aux reports de délais, voire d'objectifs de qualité de nos masses d'eau souterraine vis-à-vis des obligations de bon état de la DCE
- d'aider à la prévision de l'état chimique, et de son évolution.

Le travail effectué dans cette étude vient en complément des outils développés dans le cadre du SEEE soutenu par l'ONEMA. Il intègre notamment des aspects relatifs à l'article 5 de la Directive Eau Souterraine portant sur les tendances qui ne sont pas inclus dans le SEEE.

2. Temps de transfert de l'eau

2.1.LES CONNAISSANCES ANTERIEURES A L'ETUDE

Depuis de nombreuses années, les questions du temps de transfert des solutés de type nitrate ou phytosanitaires vers les eaux souterraines et de l'existence d'un stock au sein de la zone non saturée sont récurrentes pour l'ensemble de la communauté scientifique et des gestionnaires. Sur le bassin Seine-Normandie, différentes études et approches ont donc été mises en œuvre afin d'apporter des éléments de réponse à ces questions. A notre connaissance toutefois, il n'y a pas eu d'étude traitant du bassin dans son ensemble mais plusieurs études régionales ou relatives à des bassins hydrogéologiques ont été inventoriées.

En ce qui concerne la datation des eaux souterraines, différents outils ont été employés tels que le tritium ou les CFCs/SF6, ces outils étant pertinents pour des eaux récentes c'est-à-dire postérieures aux années 1950-60. Du fait de la décroissance radioactive du tritium, l'utilisation de cet outil devient plus délicate alors que l'utilisation des gaz et notamment des CFCs se développe même si elle est loin d'être généralisée et généralisable. En effet, certaines études ont montré la limite de ces outils (contamination locale en CFC, dégradation en conditions réductrices etc.).

En complément des datations de l'eau souterraine elle-même, la réalisation de profils d'activité tritium dans les eaux extraites des solides de la zone non saturée a permis dans certains cas d'estimer une vitesse moyenne d'infiltration de l'eau. Au sein de la zone non saturée crayeuse, les vitesses estimées sur les différents sites varient de 0,27 à 0,9 m/an pour un transfert au sein de la matrice suivant un processus de convection-dispersion (pouvant être appelé piston). Bien qu'elle n'ait pas été mise en évidence par les études réalisées sur la zone non saturée crayeuse du bassin Seine-Normandie, une infiltration plus rapide peut co-exister. Les profils tritium réalisés dans les calcaires lutétiens du site de Montreuil-sur-Epte illustrent l'hétérogénéité des transferts au sein de la zone non saturée même sur un bassin hydrogéologique de dimension réduite (environ 3 km^2).

La démonstration de l'existence des stocks de nitrate dans la zone non saturée a été faite dès les années 1980 par la réalisation de profils de plusieurs mètres d'épaisseur. Le principe est le suivant : des sondages, carottés ou non, sont réalisés et les solides récupérés lors de la foration sont analysés. La présence de nitrate en cours de transfert dans la zone non saturée a ainsi été clairement démontrée. La craie est le matériau géologique le plus étudié, presque exclusivement d'ailleurs. Dans certains cas, la bonne connaissance des pratiques agricoles permet de proposer, à dire d'expert au vu du profil des concentrations en nitrate, une estimation de leur vitesse de transfert au sein de la zone non saturée. Dans d'autres cas, la mesure de l'activité tritium de l'eau extraite des solides de la zone non saturée collectés lors de la foration, permet de croiser les informations et de proposer une vitesse moyenne de transfert de l'eau. Certains sites ont fait l'objet de plusieurs études à plusieurs années d'intervalle

(Pauvres et Alincourt dans la craie en Ardennes, craie de Goderville dans le pays de Caux). Or, la comparaison des profils obtenus à 2 dates est délicate, soit parce que les informations détaillées sur les résultats obtenus il y a plusieurs décennies ne se sont pas accessibles, soit parce que le transfert dans la zone non saturée est hétérogène par nature et qu'il est donc difficile de faire la part des choses pour expliquer les différences observées entre 2 dates. Dans les différentes études, le stock de nitrate présent dans la zone non saturée n'est pas toujours indiqué. En revanche, de manière classique et bien que cela repose sur 2 hypothèses discutables, la concentration en nitrates de l'eau interstitielle est calculée. Pour effectuer ce calcul, on considère que l'eau interstitielle représente l'eau qui s'infiltre vers la nappe et que tous les nitrates présents dans les solides de la zone non saturée sont mobilisés de la même façon par cette eau d'infiltration. Les concentrations ainsi estimées sont site-dépendantes et fortement variables suivant les historiques agricoles.

Parallèlement à l'établissement de ces profils, des suivis de la qualité de l'eau s'infiltrant sous la zone non racinaire sont réalisés. Ces travaux concernent le site expérimental de Thibie (Marne) depuis 1991. La mise en place de cases lysimétriques permet l'estimation de l'impact des pratiques culturales (rotation, mise en place de cultures intermédiaires etc.). Ces essais impliquant Arvalis servent de support à des préconisations agricoles.

Pour les phytosanitaires, l'établissement de profils de concentration dans la zone non saturée est plus difficile en raison notamment de contraintes analytiques (effet matrice lors de l'analyse). Aussi peu de tentatives ont été effectuées. Des essais ont été effectués sur le site de Mourmelon (Craie, Marne) ; néanmoins la limite de quantification de la méthode analytique utilisée dans cette étude apparaît trop haute pour mettre en évidence la présence des phytosanitaires. Depuis quelques années, les lysimètres du site de Thibie sont également utilisés pour caractériser la qualité de l'eau sous le sol au regard du paramètre phytosanitaire (nombre important de substances). A notre connaissance, les premiers résultats obtenus sur ce site n'ont pas encore fait l'objet de publications détaillées. La qualité de l'eau d'infiltration a également été mesurée à l'aide de plaques lysimétriques sur le site des Trois Fontaines (isoproturon et ses métabolites). Il a ainsi été montré que le flux transitant au-delà du sol ne représente qu'une fraction très réduite des quantités appliquées (de l'ordre du %).

Enfin, la modélisation du transfert des nitrates ou des produits phytosanitaires a été entreprise à différentes échelles allant du transfert 1D dans le sol au modèle 3D discrétisé afin de représenter un bassin hydrogéologique. Les applications à l'échelle de bassins hydrogéologiques restent toutefois rares et plus particulièrement pour les phytosanitaires ; cette approche 3D constituant le degré de complexité maximal.

2.2.DATATION DES EAUX SOUTERRAINES

2.2.1.Concept de datation et les différentes méthodes utilisées

Dater les eaux souterraines signifie déterminer l'âge de l'eau souterraine, i.e. le temps écoulé à partir du moment où l'eau devient souterraine, en d'autres termes, depuis son

infiltration dans le sol à partir des précipitations ou depuis tout autre type d'eau de surface (rivières, lacs). A un point donné (forage, source), l'eau collectée correspond à un mélange d'une multitude de gouttes d'eau accumulées ayant un âge plus ou moins grand. C'est pour cela que l'âge estimé par les traceurs chimiques est considéré comme un âge « apparent ». Ainsi pour parler de l'âge d'une eau on pourra indiquer un temps moyen de résidence des eaux au sein d'un aquifère, de l'âge moyen de la recharge ou d'un pourcentage moyen d'eau jeune.

Il existe plusieurs méthodes pour calculer ou estimer l'âge des eaux souterraines à l'aide de traceurs géochimiques, l'utilisation d'une méthode étant conditionnée par l'âge attendu des eaux. Pour les eaux récentes (tranche d'âge 0 à 60 ans), l'utilisation des gaz CFC 11, 12 et 113 et du SF6, est en plein essor. La détermination de l'âge apparent passe par la comparaison des concentrations des gaz dans les eaux souterraines avec les chroniques d'émission de ces gaz dans l'atmosphère, ces dernières étant connues au niveau mondial. En l'absence de données précises sur le site d'étude, 3 modèles conceptuels de fonctionnement d'un aquifère sont testés (modèle piston, modèle exponentiel ou mélange de 2 réservoirs) pour déterminer cet âge. Le modèle donnant le meilleur résultat (c'est-à-dire permettant de caler le plus grand nombre de traceurs) est alors conservé.

2.2.2.Résultats obtenus sur le bassin dans le cadre de l'étude

Une vaste campagne de datation a été réalisée en octobre 2009 (208 points prélevés) complétée en avril 2010. En complément, plusieurs points d'eau ont fait l'objet de plusieurs datations au cours du cycle hydrologique pour juger de la représentativité d'une mesure unique. Parmi les 258 points d'eau prélevés, 242 ont été datés au moins une fois (Illustration 2).

Nombre de prélèvements par point d'eau	Nombre de points d'eau ayant pu être datés
1	**184**
2	**10**
3	**24**
4	**24**
total	**242**

Illustration 2 : Synthèse de la fréquence des prélèvements par points d'eau et du nombre de points d'eau concernés ainsi que du nombre de points ayant pu être datés

Chacun des 3 modèles conceptuels conduit à déterminer des informations un peu différentes (date de recharge pour le modèle piston, temps de résidence pour le modèle exponentiel et ratio eau jeune/eau ancienne et âge de l'eau jeune pour le modèle binaire). Si une comparaison des âges obtenus par modèle piston et par modèle exponentiel est relativement aisée, la comparaison des âges obtenus par

mélange binaire est plus délicate. En effet les 2 informations obtenues par le modèle binaire sont à intégrer : par exemple un mélange de 80% d'eau jeune de 1980 n'a pas la même signification qu'un mélange de 80% d'une eau subactuelle (2008-2010).

Bien que les informations obtenues sont dépendantes du modèle retenu (c'est-à-dire celui qui permet de caler le plus de traceurs), il est apparu nécessaire de proposer une carte unique présentant l'ensemble des informations obtenues sur le bassin. Pour cela, 6 groupes d'âge ont été constitués + 1 groupe pour les points à âges apparents variables (Illustration 3).

Groupe d'âge	Nombre de points	Modèle piston Date de recharge	Modèle exponentiel Temps moyen de résidence (ans)	Mélange binaire % eaux jeunes
1	25	>2000	<5	>95
2	64	1991-2000	5-15	81-95
3	91	1981-1990	16-25	56-80
4	27	1971-1980	26-35	31-55
5	17	1961-1970	36-45	10-30
6	11	≤1960	>45	<10
Ages variables	7			

Illustration 3 :Constitution des groupes d'âge apparent.

La carte d'ensemble (Illustration 4) permet d'observer des secteurs avec majoritairement des eaux anciennes comme à l'est d'Etampes et plus généralement au centre du bassin autour de Paris. Sur les bordures du bassin à l'inverse, dans la zone de recharge des aquifères tertiaires et secondaires et sur le secteur de la Normandie les eaux sont à dominante plus jeune.

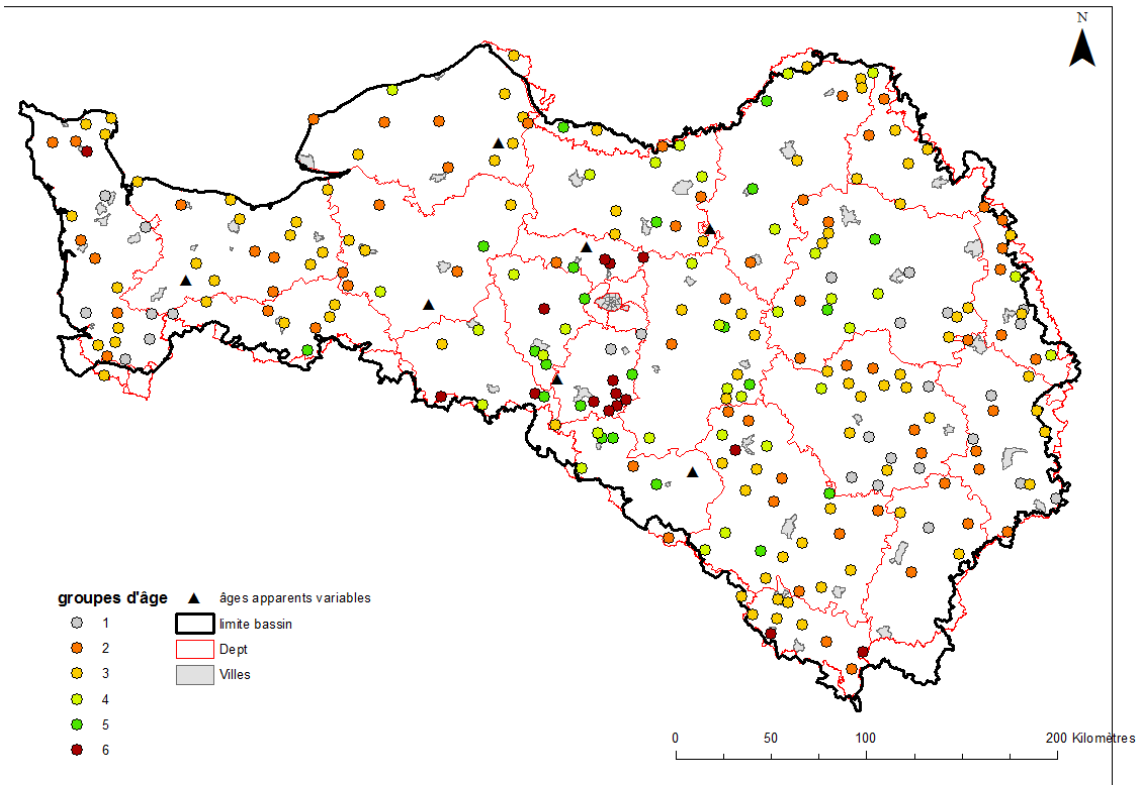

Illustration 4 : Synthèse des âges apparents estimés sur le bassin regroupés en 6 classes et localisation des points où l'âge varie d'une période à l'autre (n=239)

En ce qui concerne la datation des mêmes points d'eau à plusieurs reprises au cours d'une même année hydrologique (48 points datés 3 ou 4 fois), les résultats différent d'un point d'eau à un autre. Pour les 14 points d'eau pour lesquels le modèle piston est apparu le plus pertinent, près de 50% présentent une variation trimestrielle de l'âge apparent entre 0 et 2 ans. Pour l'ensemble des points (à l'exception de Corbeille 03288X0042/P), la différence d'âge d'une campagne de mesures aux autres va de 1 à 9 ans alors que les eaux sont relativement anciennes (une vingtaine d'années ou plus). Pour les 10 points d'eaux pour lesquels le modèle de type exponentiel est le plus pertinent, 2 présentent une variation temporelle relativement importante (Les Petites-Loges - 01584X0002/FAEP et Boursonne - 01296X0064/P) alors que pour les autres points, les fluctuations à un point donné sont moins importantes que la gamme de valeurs observée pour l'ensemble des points. Les eaux de ce groupe ont un temps moyen de résidence court (1 à 4 ans pour Nod-sur-Seine – 04057X0007/HY) à très long (plus de 50 ans pour les eaux de Collemiers (03304X0008/AEP). Enfin, pour les eaux correspondant à un mélange binaire, la variabilité temporelle parait plus importante, mais est aussi difficile à représenter puisque non seulement la fraction d'eau jeune peut varier mais aussi l'âge de cette eau jeune. Il convient de noter que pour certains points montrant des variations extrêmement fortes et qui paraissent inexpliquées, la question de peut se poser.

Autrement dit pour certains points d'eau, la datation effectuée à plusieurs reprises au cours d'un cycle hydrologique montre peu de fluctuations au regard des classes d'âge proposées permettant de considérer l'ensemble du bassin. La mesure effectuée en octobre 2009 / avril 2010 parait donc tout à fait représentative d'une situation assez durable, correspondant probablement à des sites un peu inertiels. En revanche pour d'autres points d'eau mais qui sont minoritaires dans le groupe de points testés, des fluctuations sont observées pouvant parfois alors être importantes. Ces situations sont probablement rencontrées dans des systèmes moins inertiels vraisemblablement marqués par des cycles intra-annuels. La mesure effectuée en octobre 2009 / avril 2010 a alors une signification relative à cette période et peut ne pas être transposable strictement au-delà de quelques mois.

2.3. LES POINTS CLES

- Préalablement à cette étude, différentes approches ont été mises en œuvre sur le bassin Seine Normandie pour caractériser l'âge de l'eau, estimer le stock de nitrates dans la zone non saturée et qualifier la qualité des eaux s'infiltrant sous la zone racinaire. Ces études sont rappelées dans la version complète du rapport.

- A notre connaissance, aucune étude de grande ampleur n'a été réalisée sur le bassin et les approches ont été déclinées à une échelle locale. De plus, les études relatives au transfert des produits phytosanitaires sont plus rares que celles relatives aux nitrates.

- Dans l'étude, l'utilisation des outils CFC /SF6 a permis d'estimer l'âge apparent de l'eau de 242 points sur les 258 prélevés. Dans quelques cas, l'ajout d'un traceur supplémentaire, le tritium, a permis d'affiner l'estimation de l'âge apparent de l'eau.

- Compte-tenu de l'imprécision de l'estimation et de la nécessité d'utiliser chacun des 3 modèles conceptuels de fonctionnement des aquifères donnant une information un peu différente (date de recharge, temps de résidence, et fraction d'eau jeune - âge de l'eau jeune), la représentation de l'ensemble des informations sur une seule carte nécessite la définition de 6 groupes d'âge.

- À l'échelle du bassin, la gamme des âges apparents est importante (antérieur aux années 1960 jusqu'à postérieur aux années 2000). La répartition des âges ne parait pas complétement aléatoire avec des secteurs se dessinant (secteur de Beauce avec les eaux les plus anciennes, eaux relativement anciennes pour l'Yprésien-Lutétien et eaux les plus récentes dans l'Ouest de la Normandie, Centre et Sud de la région Champagne-Ardennes).

- La relative stabilité des âges apparents pour la majorité des points choisis qui ont été soumis à 3 ou 4 datations sur un cycle hydrologique montre que le prélèvement unique (campagne spatiale de octobre 20009 / avril 2010) donne une information représentative (par groupe d'âge et pas valeur absolue) à l'échelle du bassin.

- Un pas de temps plus fin de datation (par exemple mensuel) pourrait s'avérer pertinent dans des systèmes réactifs afin notamment de caractériser l'évolution de la qualité des eaux alors que pour des systèmes inertiels (grandes cycles piézométriques), des datations à des périodes contrastées (très hautes eaux/très basses eaux) seraient à privilégier.

3. Contamination des eaux souterraines du bassin Seine-Normandie par les nitrates

3.1.SECTORISATION DU BASSIN

Préalablement à l'étude des tendances d'évolution des concentrations en nitrate un travail initial de sectorisation du bassin a été réalisé. Cette sectorisation est réalisée en fonction de critères hydrogéologiques, hydrodynamiques et d'évolution temporelle des concentrations en nitrate. Ainsi, les données piézométriques disponibles dans la base ADES ont été exploitées (1 750 431 mesures pour 558 piézomètres disponibles en juillet 2009). Les variogrammes expérimentaux ont été déterminés puis ajustés suivant 7 types de variogrammes théoriques se distinguant notamment par la présence ou non de cycles intra-annuels et/ou pluriannuels, de leurs amplitudes et leur dérive à long terme. Si cette approche est nécessairement biaisée par la longueur de la chronique disponible (les cycles pluriannuels ne sont visibles que sur des chroniques particulièrement longues) et par la classification à dire d'expert dans une des 7 classes de variogrammes théoriques, elle a toutefois permis de montrer une répartition non aléatoire des comportements hydrodynamiques à l'échelle du bassin. Cette classification couplée à des critères géologiques a permis de proposer un premier découpage du bassin en unités de travail. Outre l'éventuel biais généré par la longueur des chroniques piézométriques disponibles, il convient aussi de noter que certains secteurs comme l'aquifère du Jurassique à l'Est du bassin ou globalement le département de la Manche sont nettement moins renseignés que le reste du bassin. L'acquisition de données piézométriques complémentaires dans ces secteurs et/ou à terme la réinterprétation des chroniques piézométriques qui auront par définition une longueur plus importante permettra d'affiner cette première sectorisation.

Les résultats obtenus montrent la disparité des comportements piézométriques à l'échelle du bassin. Bien que moins bien renseigné, l'aquifère du Jurassique de l'Est du bassin semble caractérisé par des cycles annuels de forte amplitude et l'absence de cycles pluriannuels. Les aquifères crayeux montrent clairement des différences de comportement entre-eux avec du côté Ouest du bassin des chroniques piézométriques ayant des cycles annuels de faibles amplitudes et des cycles pluriannuels marqués et du côté Est du bassin des cycles annuels marqués et l'absence de cycles pluriannuels. La nappe de Beauce quant à elle présente les cycles interannuels (pluriannuels) les plus longs (plus de 20 ans).

Ce premier travail de sectorisation qui a conduit à l'identification de 54 zones s'appuie donc sur le croisement des données piézométriques et de la lithologie. Afin d'affiner ce découpage, les chroniques de concentrations en nitrates ont également été prises en compte. A l'instar du travail fait sur la piézométrie, des variogrammes expérimentaux ont été calculés à partir des chroniques d'évolution des nitrates ajustés sur des variogrammes théoriques (441 variogrammes théoriques déterminés). La principale limite de l'exercice réside dans le fait que les fréquences de mesure sont souvent

faibles (quelques mesures par an contre généralement une donnée par jour pour la piézométrie) et ne permettent donc pas de mettre en lumière les éventuels cycles intra-annuels. Seule une modification de la fréquence de mesures permettrait d'affiner la classification. Globalement du fait du nombre de données plus restreint et d'une fréquence de mesure moins importante, le degré de confiance à accorder aux résultats obtenus par cette approche pour les nitrates est moindre que celui accordé aux résultats obtenus pour la piézométrie. Enfin, comme pour la piézométrie, des secteurs sont apparus beaucoup moins bien caractérisés que d'autres. Néanmoins, l'examen des chroniques nitrates a conduit à redécouper certaines zones préalablement identifiées sur la base de la lithologie et du comportement piézométrique. De la même façon, l'expertise des hydrogéologues de l'Agence de l'Eau a permis d'affiner le découpage.

Au final, 64 zones ont été définies, au sein desquelles un comportement type du point de vue hydrodynamique et vis-à-vis des nitrates peut être schématisé ; ces 64 zones servent **d'unités spatiales de référence** pour le reste de l'étude des tendances vis-à-vis de ce paramètre (Illustration 5).

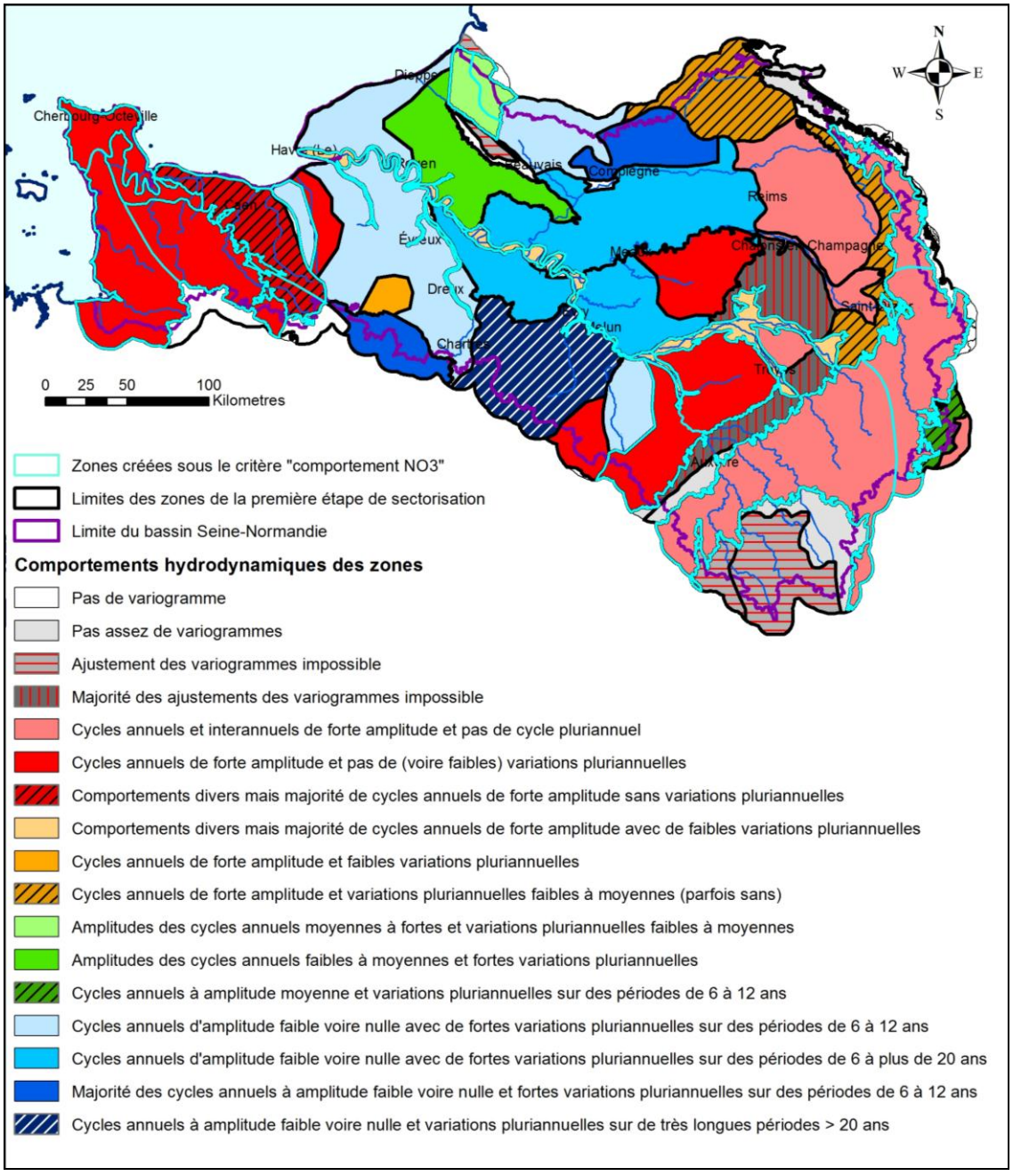

Illustration 5 : Sectorisation du bassin préalable à l'étude des tendances

3.2.EVALUATION DES DATES DE RUPTURE DE TENDANCES

En ce qui concerne les nitrates et l'étude point d'eau par point d'eau, préalablement à la mise en œuvre de la détermination des tendances, **le test du CUSUM modifié a été appliqué afin de déterminer, si elle existe, la date de changement de comportement au sein d'une chronique donnée.** Sur 5862 chroniques de concentrations en nitrate testées, 1987 ont une rupture de pente significative.

Par souci de représentation, les dates de ruptures de pente des 1987 chroniques montrant une évolution des concentrations en nitrate non homogène, ont été groupées en 10 classes correspondant chacune à un décile de la courbe de répartition des dates de rupture de pente (ramenées à des années hydrologiques). Ce choix de représentation, puisqu'il implique que le nombre de données est équivalent dans chaque classe, permet de ne pas privilégier visuellement un groupe. En contrepartie, cela implique que la durée des classes est variable. Pour 8 des 10 classes, la durée est équivalente à une ou deux années hydrologiques.

Les dates de ruptures extrêmes sont représentées en gris sur l'Illustration 6 (carré pour les dates de ruptures antérieures à 1993 et triangle pour celles plus récentes que 2004). Les triangles verts sont utilisés pour les classes de dates de rupture de pente d'une durée de deux ans alors que les classes qui ne représentent qu'une seule année hydrologique sont dessinées sous la forme de cercles allant du bleu au violet. Il convient de noter que pour plus de 50 % des chroniques à tendance non homogène, la date de rupture estimée est postérieure à l'année hydrologique 2000-01.

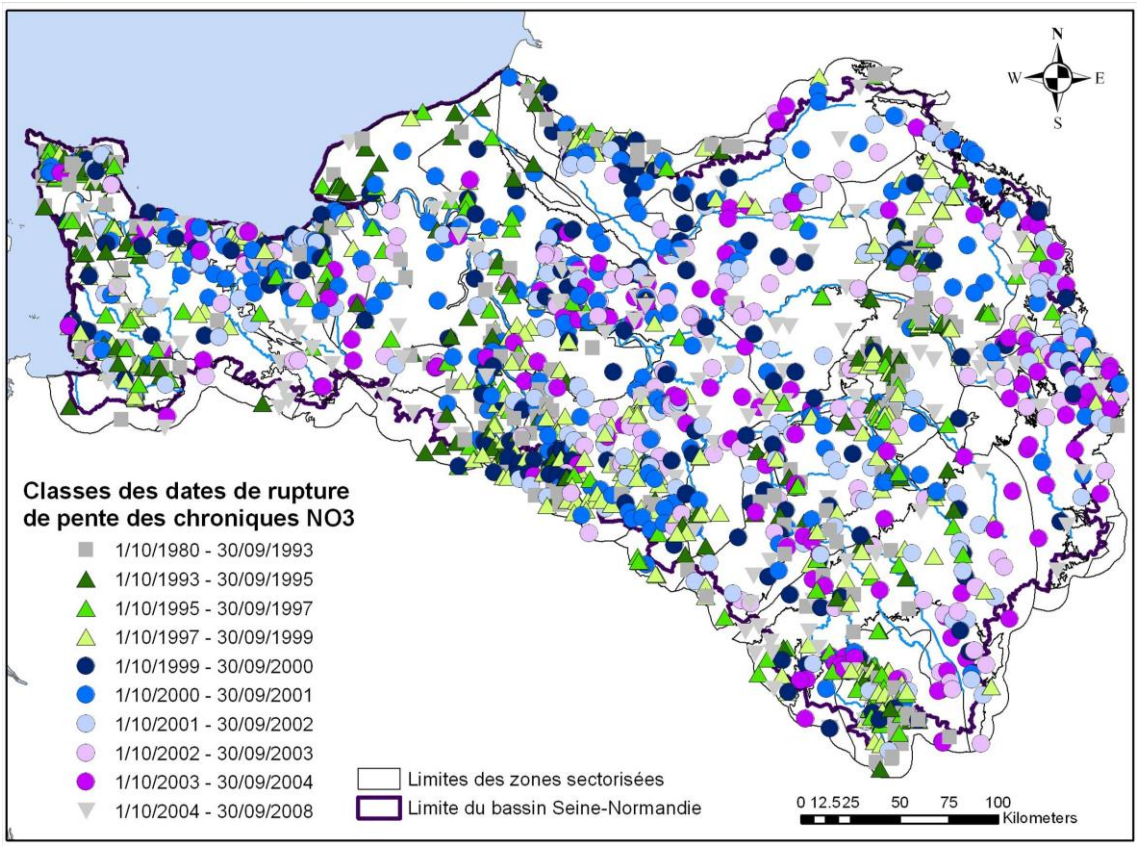

Illustration 6 : Répartition des dates de rupture de pente des 1987 chroniques du bassin Seine-Normandie dont l'évolution des concentrations en nitrate n'est pas homogène.

La répartition des dates de rupture de pente pourrait sembler à première vue aléatoire sur le bassin Seine-Normandie. Toutefois en considérant des classes de dates successives, une certaine structuration se dessine. Ainsi, la majorité des points de prélèvements en nappe de Beauce montre des changements significatifs dans l'évolution des concentrations en nitrate relativement ancienne (antérieurs au 30/09/2000). A l'inverse, les points localisés en bordure est du bassin, dans les affleurements des calcaires jurassiques, montrent plutôt des dates de rupture de pente récentes, entre 2001 et 2003.

3.3.DETERMINATION DES TENDANCES

L'étude des tendances d'évolution des concentrations en nitrate s'appuie sur la mise en œuvre de différents outils statistiques (boîtes à moustache, test de Mann-Kendall, Kendall régional, régressions linéaires) **soit point d'eau par point d'eau, soit de façon spatialisée**.

3.3.1.Approche par point d'eau

Pour l'approche point d'eau par point d'eau, le test de Mann-Kendall, non paramétrique et robuste vis-à-vis des conditions initiales d'application du test, a pu être appliqué sur 1247 chroniques (soit 21% des points du bassin disposant d'au moins 10 données de concentrations en nitrate) dont 1096 pour lesquels une date de rupture a été statistiquement déterminée. Couplé au test de Sen, il a permis de déterminer des tendances à la hausse ou à la baisse voire une stabilité des teneurs et de les quantifier.

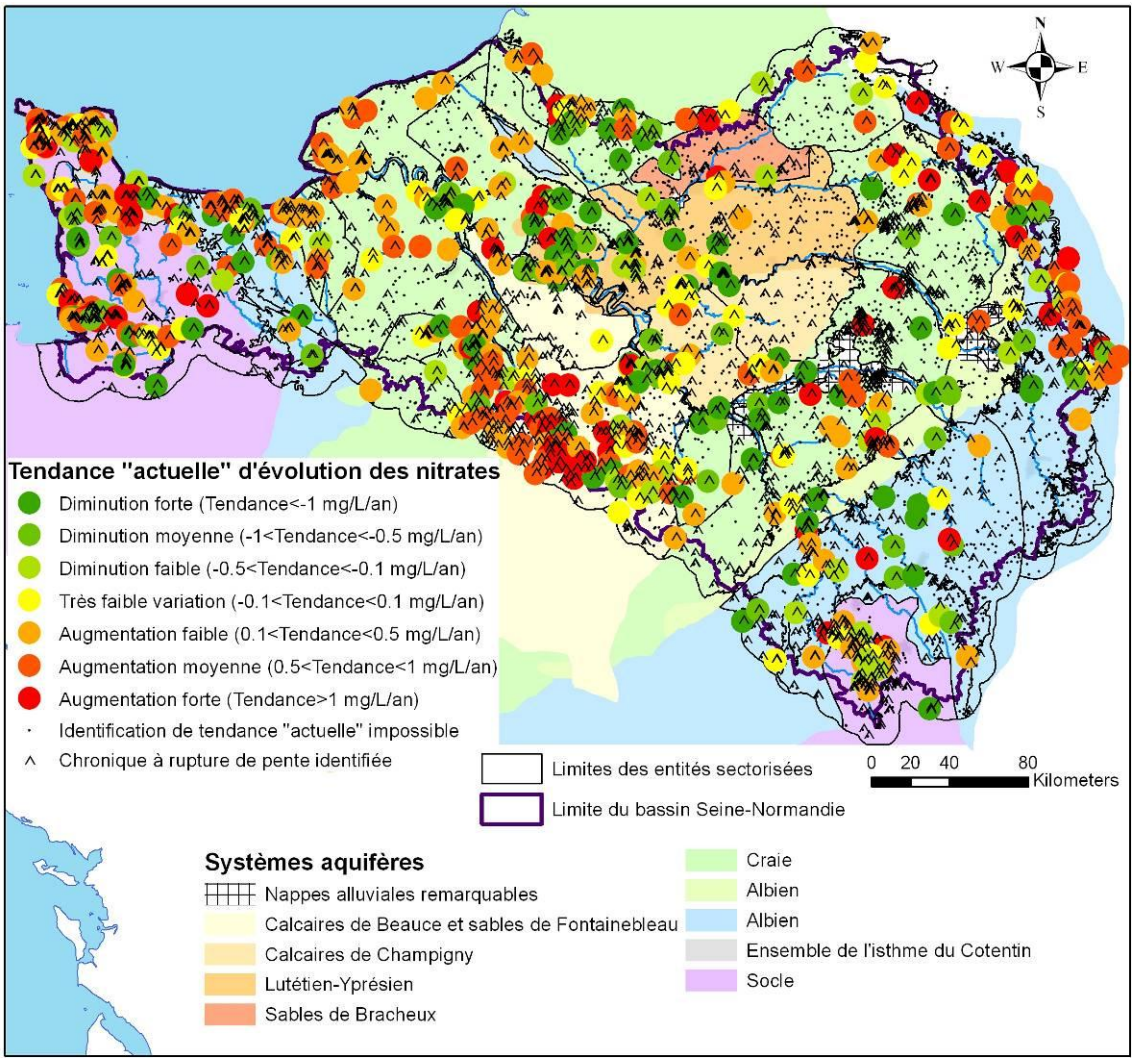

Illustration 7 : Répartition par point des tendances « actuelles » d'évolution des concentrations en nitrate sur le bassin Seine-Normandie (estimées postérieurement à la dernière date de changement significatif de tendance si elle existe, dans le cas contraire à partir de février 1993)

A nouveau, bien que la répartition spatiale des chroniques traitées soit hétérogène au niveau du bassin, les tendances identifiées ne semblent pas aléatoirement distribuées

à l'échelle des zones sectorisées (Illustration 7). Ainsi, au niveau de la Beauce, les tendances dites « récentes » (c'est-à-dire postérieures à la date de rupture) sont à l'augmentation alors que le jurassique Est présente plutôt une diminution des teneurs. Pour certains secteurs, l'estimation est impossible pour deux raisons principales : le nombre de données pour la chronique dans son ensemble (ou postérieurement à la date de rupture) est inférieur à 10 ou le test de Sen indique que la tendance identifiée n'est pas statistiquement significative.

Au niveau du bassin, les points où les tendances à la hausse les plus fortes ont été identifiées sont localisés principalement dans la nappe de Beauce et en bordure nord-est du bassin, avec néanmoins des valeurs de pentes moins élevées. Les points situés en nappe de craie normande montre aussi des tendances à la hausse des concentrations en nitrate, alors que les tendances dans les aquifères de socle du Cotentin sont plus hétérogènes. Les points qui montrent les tendances d'évolution des concentrations en nitrate les plus à la baisse sont localisés au centre et au sud-est du bassin Seine-Normandie, dans les formations tertiaires à l'ouest de Paris et au sein de quelques zones particulières de craie. Si une certaine structuration apparaît à l'échelle de quelques zones du bassin, plus localement peuvent se côtoyer des points indiquant des tendances différentes. Seul un changement d'échelle avec une intégration de données plus locales, agronomiques notamment, mais aussi un examen détaillé des coupes géologiques afin de déterminer avec précision quels aquifères sont captés, permettrait d'expliquer ces différences, tout ou partie.

Les informations obtenues grâce au test de Mann-Kendall ont été comparées aux tendances déterminées par régression linéaire par moindre carrés (appliquée sur la même période que le test Mann Kendall). Pour les 641 chroniques ayant pu être traitées suivant des 2 approches, la différence moyenne de pente est de 0,5 mg de nitrate/L/an avec pour 341 chroniques (53 % des cas), une pente plus forte déterminée par la régression linéaire (en valeurs absolues). Des pentes inverses ont été décrites sur 59 chroniques (9% des cas). Un examen détaillé de quelques chroniques permet de comprendre dans quelles situations l'un des tests est préférable à l'autre ou dans quels cas les informations sont tout à fait similaires.

Ainsi, pour des séries de données distribuées suivant une loi normale et sans valeur « aberrante », la régression linéaire est à privilégier alors que pour des séries à données non normalement distribuées et/ou avec des valeurs « aberrantes », le test de Mann-Kendall sera le plus approprié. Mais, **dans des situations telles que celles de l'étude** c'est-à-dire avec de nombreuses chroniques de données ne pouvant pas être examinées au cas par cas (pour vérifier la distribution normale ou non des données, valeurs extrêmes à filtrer qui pourraient correspondre à des erreurs de saisie, influence d'un pompage ou autre), **le test de Mann-Kendall est à privilégier pour déterminer les tendances car il est robuste quelles que soient les conditions initiales d'application** du test. Si l'application du test de Mann-Kendall ne nécessite pas en théorie un nombre minimal de données, il est toutefois suggéré de travailler avec des chroniques ayant 10 données ou plus.

3.3.2.Approche spatialisée

Toujours pour l'examen des tendances d'évolution des concentrations en nitrate mais cette fois suivant une approche spatialisée, 2 approches sont proposées : la détermination des boîtes à moustache pour différentes périodes couplée à l'application du test statistique Kruskal-Wallis pour les comparer et le test statistique Kendall régional. La boite à moustache est un moyen rapide de figurer le profil essentiel d'une série statistique quantitative (médiane, quartiles, minimum, maximum et valeurs extrêmes). Au préalable, il a été nécessaire de définir les périodes pour lesquelles ces statistiques sont déterminées. La compilation des données sur les dates de rupture déterminées grâce à l'application du test du CUSUM modifié, a permis de proposer un découpage en périodes. Pour chaque période ainsi fixée, les statistiques ont été calculées soit en prenant toutes les données disponibles, soit en ne considérant que les points d'eau ayant au moins une donnée dans chacune des périodes considérées. Si cette deuxième approche est a priori plus rigoureuse, elle entraîne une diminution importante du nombre de données traitées. Enfin, si l'approche a d'abord été appliquée à l'échelle du bassin, une déclinaison par grands types lithologiques a été réalisée. Ce changement d'échelle permet d'identifier des secteurs avec des évolutions temporelles de la contamination en nitrate variables et donc de mieux représenter l'impact des spécificités régionales (contexte hydrogéologique, évolution des pratiques agricoles, pluie efficace etc.) sur l'évolution de la qualité des eaux souterraines vis-à-vis des nitrates.

Le principe du test Kendall régional est identique à celui du Mann-Kendall mais il s'applique sur un qualitomètre virtuel, pour lequel l'ensemble des mesures existantes dans le secteur choisi pour la spatialisation sont considérées. Les pentes entre chaque couple de données appartenant à une même chronique sont calculées, la tendance spatialisée correspondant à la médiane de l'ensemble de ces pentes. Les 64 unités spatiales préalablement définies sont considérées pour l'application de ce test. A l'instar du travail fait par point d'eau, une éventuelle date de rupture de tendance de la chronique ainsi reconstituée est recherchée avant la mise en œuvre du test de tendance. A défaut de préconisation dans la littérature, la date de rupture de tendance considérée a été la moyenne des dates de rupture obtenues pour chacune des chroniques prises indépendamment pour chaque unité spatiale. Sur l'ensemble du bassin à l'exception de surfaces très restreintes (Cotentin, boutonnière du pays de Bray), il a ainsi été possible de mettre en évidence des augmentations, des diminutions ou des variations très limitées des concentrations en nitrate.

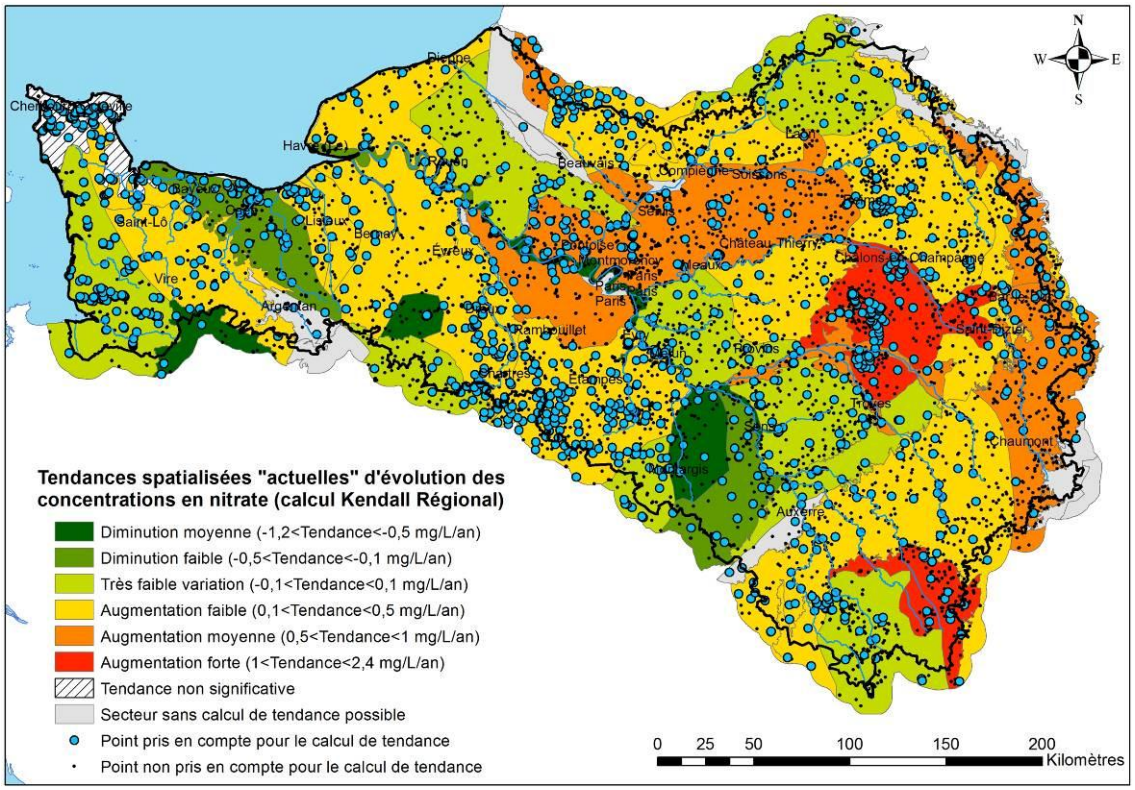

Illustration 8 : Répartition des tendances par secteurs du bassin Seine-Normandie calculées par la méthode Kendall Régional à partir de la date moyenne de rupture de pente du secteur.

3.3.3. Comparaison des résultats obtenus par point d'eau et par l'approche spatialisée

La confrontation des résultats obtenus par secteur (Kendall régional) et point d'eau par point d'eau (Mann-Kendall) révèle des similarités mais aussi quelques disparités qui s'expliquent aisément. La différence fondamentale entre le test du Kendall régional et le test de Mann-Kendall est de compiler l'ensemble des données disponibles sans critère de nombre de données, de longueur de chronique ou de fréquence de mesures. Dans notre étude, le choix a été fait d'estimer les tendances par le test Mann-Kendall pour les points d'eau ayant au moins 10 mesures. Ainsi, il est clair que le jeu de données pris en compte diffère d'un test à l'autre pouvant donc générer des interprétations différentes surtout si au final, les chroniques non considérées par le test Mann-Kendall ont un poids important dans le test de Kendall régional. De plus, si la répartition spatiale des tendances ne semble pas complétement aléatoire, elle n'est pas non plus parfaitement structurée : localement des points indiquant des tendances différentes (résultant par exemple de pratiques agricoles différentes) peuvent être voisins ou, au sein d'une zone, des secteurs différents peuvent apparaitre de manière plus ou moins évidente. Le test du Kendall régional agrège ces informations sans distinction. En conséquence, si le test de Kendall régional parait approprié pour spatialiser l'examen des tendances, il convient d'une part de sélectionner le secteur de manière très attentive (par exemple suivant le mode

de sectorisation appliqué ici voire suivant un sous-ensemble qui parait plus pertinent) et d'autre part, d'avoir un regard critique sur les données qui sont compilées notamment si on cherche à établir une relation entre les résultats des 2 tests (garder des périodes communes par exemple). En revanche, le test du Kendall régional offre la possibilité de valoriser des données pour des chroniques ayant peu de données, une tendance significative a ainsi été déterminée pour la presque totalité du bassin.

3.4.REPRESENTATIVITE DES POINTS DES RESEAUX DCE

Sur le bassin Seine-Normandie, les dispositions de suivi de la qualité des eaux souterraines pour l'application de la DCE incluent : 464 points de prélèvements constituant le Réseau des Contrôles de surveillance (RCS) et 394 points de prélèvements constituant le Réseau des Contrôles Opérationnels (RCO).

L'étude ayant été réalisée avec l'ensemble des données disponibles sur le bassin, il paraissait intéressant de voir comment les points du réseau s'inscrivent dans cet ensemble et quelles informations ils auraient apportées s'ils avaient été les seuls points considérés dans l'étude. Cette analyse ne vise pas à créer des indicateurs de la représentativité des points des réseaux de contrôle de la qualité des eaux souterraines, elle permet néanmoins d'apporter des éléments de réponses sur la question de la pertinence du choix des points de suivi.

Deux masses d'eau ne disposent d'aucun point du RCS : la masse d'eau 1017 « Bordure du Hainaut » située à l'extrême nord du bassin Seine-Normandie et la masse d'eau 2007 « Plateau Lorrain » en bordure est. Ces deux masses d'eau ne disposent pas non plus de point du RCO. A l'échelle des zones créées lors de la sectorisation du bassin, quelques zones de petite taille (bordures du bassin et localement les alluvions de la Seine et de l'Oise) ne disposent pas de point du RCS et/ou du RCO (Illustration 9).

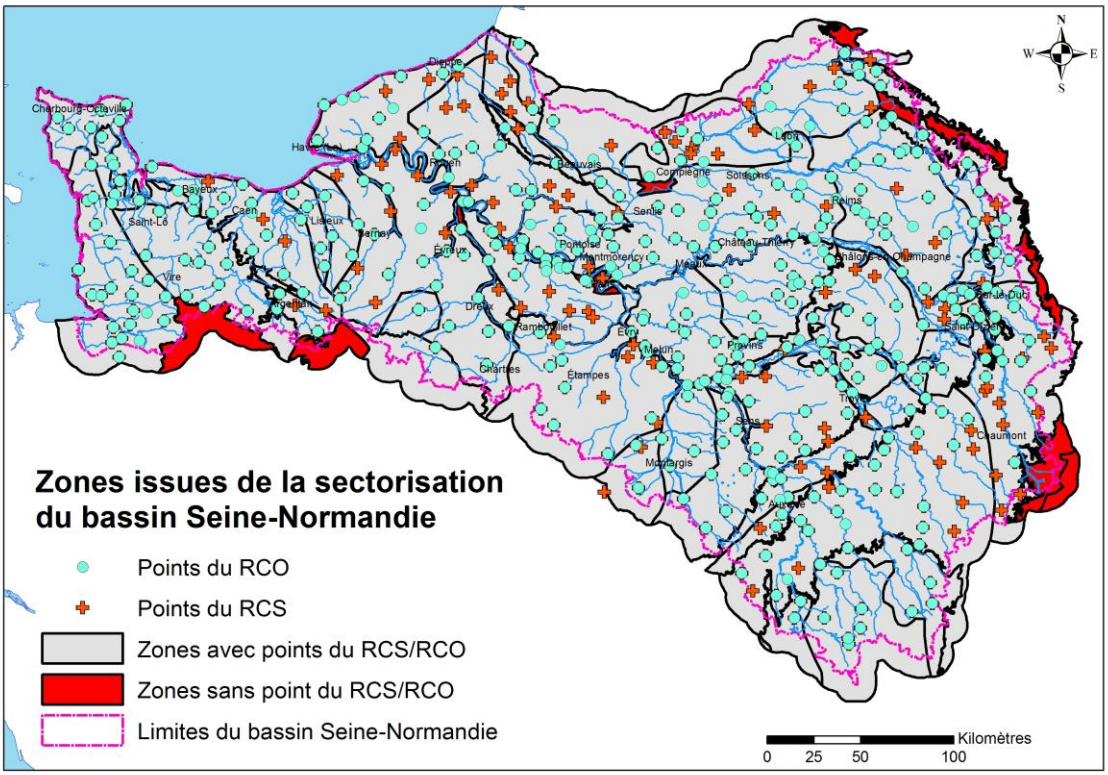

Illustration 9 : Zones issues de la sectorisation du bassin Seine-Normandie sans point du RCS et sans point du RCO.

L'Illustration 10 permet de comparer le nombre de points des réseaux RCS et RCO à ruptures de pente et tendances d'évolutions des concentrations en nitrate significatives par rapport au nombre total de points qui les constituent. Il est aussi possible de comparer ces valeurs aux nombres totaux de points qui ont donné des résultats significatifs à partir du jeu de données constitué par l'ensemble des points disponibles sur le bassin (extraction ADES du 27 juillet 2009). Les contributions des points des réseaux RCS et RCO à l'interprétation globale des ruptures de pente et des tendances d'évolution des concentrations en nitrate peut ainsi être extraite de l'Illustration 10. Il en est de même pour le nombre de point qui ont été datés par l'analyse des concentrations en CFC et SF6.

	Total sur le bassin	RCS	RCS/Bassin	RCO	RCO/Bassin
Nombre de points	5862	464	7,8%	394	6,7%
Points à ruptures de pente significative	1987 *(33,9%)*	300 *(64,7%)*	15,1%	269 *(68,3%)*	13,5%
Points à tendances MK identifiées	728 *(12,4%)*	103 *(22,2%)*	12,2%	90 *(22,8%)*	12,2%
Nombre de points datés (CFC/SF6)	259 *(4,4%)*	203 *(43,8%)*	78,4%	182 *(46,2%)*	70%

Illustration 10 : Comparaison des nombres de points totaux sur le bassin Seine-Normandie, appartenant au RCS et au RCO à ruptures de pentes et tendances Mann-Kendall (MK) d'évolution des concentrations en nitrate identifiées et des nombres de points datés par les CFC/SF6. Les valeurs en italique correspondent aux pourcentages par rapport au nombre total de points du bassin ou des réseaux, les autres pourcentages donnant la contribution des points des réseaux RCS et RCO à l'interprétation globale des tendances et des âges apparents des eaux.

Il est intéressant de constater qu'à l'échelle du bassin Seine-Normandie, si les points des réseaux RCS et RCO ne représentent en nombre qu'une faible partie de l'ensemble des points disponibles (7,8 et 6,7% respectivement), la proportion des points des réseaux à ruptures de pente significatives et beaucoup plus importante qu'en considérant l'ensemble des points du bassin Seine-Normandie. En effet, près de 65% des points du RCS et plus de 68% des points du RCO montrent un changement significatif dans l'évolution des concentrations en nitrates, cette proportion étant réduite à 34% environ pour l'ensemble des 5862 points de prélèvement disponibles sur le bassin. Ce constat traduit probablement la meilleure qualité des chroniques de données issues des réseaux de suivi de la qualité des eaux souterraines comparée à l'ensemble des chroniques disponibles. Il est vrai que le nombre de données, la longueur de la période d'acquisition ainsi que la régularité des fréquences de prélèvements influent grandement sur la capacité des tests statistiques à fournir des résultats significatifs.

La même observation est réalisée en ce qui concerne le calcul des tendances d'évolution des concentrations en nitrate par le test Mann-Kendall à l'échelle des points de prélèvements. La proportion des tendances significatives aux points des réseaux RCS et RCO (19,2 et 22,6% respectivement) est pratiquement le double que la proportion des tendances significatives sur l'ensemble des points du bassin (12,4%). Ici encore, la meilleure qualité (au sens des caractéristiques des données) des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate issues des réseaux RCS et RCO par rapport à l'ensemble des chroniques disponibles sur le bassin est mise en évidence.

Ainsi donc, à l'échelle du bassin Seine-Normandie, il est montré que les points des réseaux de suivis de la qualité des eaux souterraines RCS et RCO proposent des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate nettement plus favorables à l'application des tests statistiques qu'en moyenne sur l'ensemble des chroniques disponibles. En terme de gestion, ce constat signifie que l'analyse des données issues de ces réseaux permet de dégager plus d'informations sur les changements et les évolutions de la contamination des eaux souterraines par les nitrates comparé aux autres points de prélèvement où des analyses ont été réalisées. Ainsi, au-delà de la répartition spatiale de ces points, il semblerait que le choix des stations RCS et RCO et des programmes de suivis permet d'améliorer la connaissance des évolutions des contaminations des eaux souterraines par les nitrates aux points de prélèvements. Toutefois, les efforts de suivis doivent être poursuivis comme le suggère la proportion importante de points des réseaux RCS et RCO, proche de 80% dans les deux cas, sur lesquels aucune tendance post-rupture significative n'a pu être dégagée.

L'analyse de la proportion des points des réseaux RCS et RCO qui ont été datés est quant à elle biaisée par le fait que ces points ont été choisis en priorité pour cet exercice. Néanmoins, il ressort que près de la moitié des points du RCS et du RCO ont pu être datés au moins une fois grâce à l'analyse des concentrations en différents CFC et/ou en SF6. Cette connaissance nouvelle des âges apparents des eaux souterraines du bassin Seine-Normandie pourrait être complétée à l'avenir par de nouvelles campagnes de datations sur les points des réseaux RCS et RCO.

3.5. RECHERCHE DE FACTEURS EXPLICATIFS A LA CONTAMINATION ACTUELLE ET AUX TENDANCES

Trois facteurs principaux sont identifiés comme pouvant expliquer les teneurs actuelles en contaminants dans les eaux souterraines et leurs tendances d'évolution. Il s'agit :

- ✓ du contexte géologique qui va notamment impacter l'hydrodynamique ;
- ✓ du contexte climatique et plus particulièrement l'évolution temporelle de la recharge ;
- ✓ du contexte agronomique qui impacte la pression azotée.

A l'échelle du bassin Seine-Normandie, les formations sédimentaires, même si elles sont clairement dominantes, offrent une grande diversité (craie plus ou moins kartifiée, formations tertiaires plus ou moins hétérogènes etc.). Il est difficile de traiter de manière quantitative ce facteur. Aussi, sa prise en compte se fait indirectement et de manière qualitative lors du traitement des données non plus à l'échelle du bassin mais à une échelle plus locale. Dans le rapport complet de l'étude, les résultats sont ainsi représentés par grands contextes lithologiques (craie, formations tertiaires, calcaires jurassiques et parfois nappes alluviales).

3.5.1.Pluie efficace

Les données de pluie efficace sont issues des travaux réalisés par l'Ecole des Mines de Paris dans le cadre du programme PIREN-Seine (Programme Interdisciplinaire de Recherches sur l'Environnement de la Seine) dans le but de modéliser les transferts de nitrate dans les sols du bassin de la Seine. Elles constituent les données d'entrées de leur modèle couplé STICS-MODCOU. Les données de pluies efficaces ont été gracieusement fournies à l'échelle de mailles de 1 km² agrégées par la suite selon les zones homogènes définies lors de la sectorisation (mais ne couvrent que le bassin de la Seine sensu stricto). A l'échelle du bassin, il a été possible de comparer l'évolution temporelle des pluies et celles des teneurs en nitrate (Illustration 11).

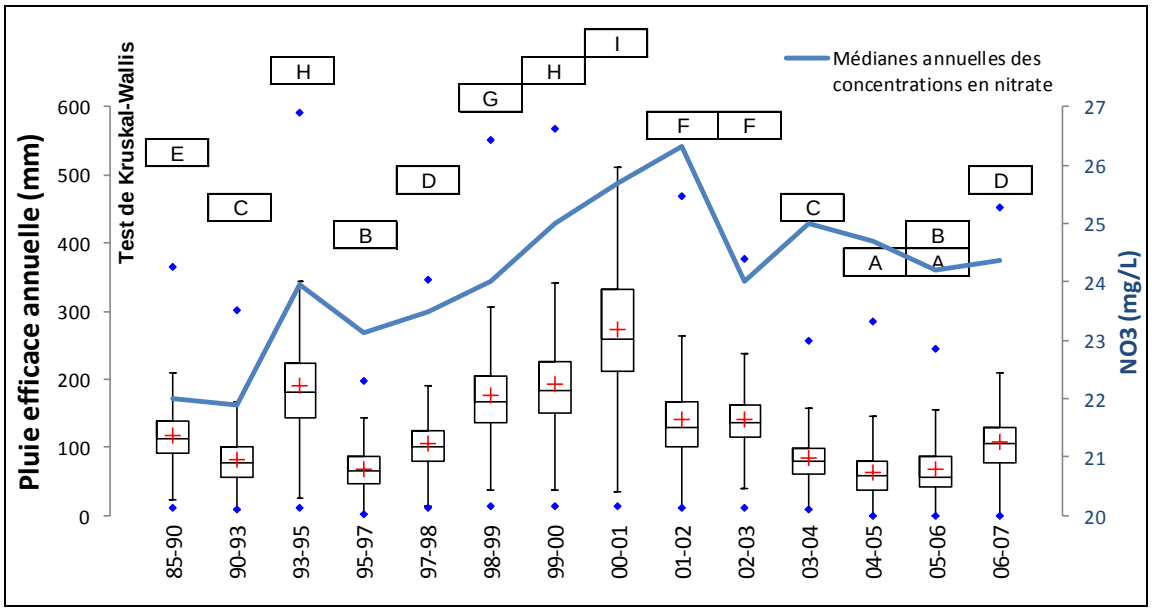

Illustration 11 : Représentation par boîtes à moustache de l'évolution des pluies efficaces annuelles de 1985 à 2007 sur le bassin de la Seine. Données issues des travaux de modélisation STICS-MODCOU dans le cadre du projet PIREN-SEINE. Les lettres majuscules représentent le résultat du test de Kruskal-Wallis. En bleu, évolution des médianes annuelles des concentrations en nitrate de tous les points du bassin Seine-Normandie

Sur la période 1985-2007, les pluies efficaces évoluent selon des cycles pluriannuels d'environ 7 à 9 ans. Un premier mode est observé pour la période 1993-1995, un second, qui correspond au maximum de la série, en 2000-2001 puis un dernier pour la période 2006-2007. Le test de Kruskal-Wallis confirme ces observations avec des différences significatives d'un point de vue statistique entre les périodes étudiées. Depuis 1995-1997, la tendance d'évolution des pluies efficaces est clairement à la hausse jusqu'à l'année hydrologique 2000-2001 où une inversion de tendance s'opère. Les pluies efficaces diminuent alors régulièrement pour atteindre un minimum en 2005-2006. Ces évolutions correspondent aux grandes tendances d'évolution des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines identifiées par l'analyse de l'ensemble des données du bassin. L'évolution des médianes annuelles des concentrations en nitrate suit celle des pluies efficaces avec un premier mode pour la

période 1993-1995. La tendance à la hausse des pluies efficaces de 1997 à 2001 est reprise par le signal d'évolution des concentrations en nitrate. La baisse des teneurs en nitrate intervient un an plus tardivement que celle des pluies. L'augmentation des pluies efficaces sur les 2 dernières années s'accompagne d'une augmentation des teneurs en nitrate modérée.

D'une manière générale donc, il est montré qu'à l'échelle du bassin Seine-Normandie, l'évolution des concentrations en nitrate est positivement corrélée avec l'évolution des pluies efficaces. Ainsi, la diminution des pluies efficaces depuis 2000-2001 pourrait être une des causes de la diminution des concentrations en nitrate observée dans les eaux souterraines depuis le début des années 2000. Toutefois, même si les évolutions conjointes des pluies efficaces et des concentrations en nitrate sont corrélées, la diminution des teneurs est bien moins importante en amplitude que la diminution des pluies de recharge. D'autres phénomènes impactent donc l'évolution de la qualité des eaux souterraines vis-à-vis des nitrates et notamment les changements de pratiques agricoles. Depuis 2002 par exemple, la modification de la politique agricole commune (PAC) a engendré une diminution de l'utilisation d'engrais azotés. Or, c'est aussi à cette période qu'il est observé une inversion de tendance d'évolution globale des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines du bassin. L'année 2002 apparait ainsi particulièrement favorable à la diminution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines, les deux facteurs explicatifs principaux que sont la recharge des aquifères et les pressions anthropiques en entrée des hydrosystèmes diminuant de concert. Néanmoins, il est important d'estimer dans quelles mesures les évolutions des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines sont majoritairement guidées par tel ou tel facteur, ce travail devant être réalisé à des échelles plus locales.

Les données de pluie efficace étant connues par maille de 1 km^2, il a été possible de faire ce même exercice par zones, présentées suivant le type lithologique. Ainsi des planches sont présentées dans le rapport regroupant les informations sur le traitement des données dans les 5 zones de craie, 5 zones des formations tertiaires et 2 zones de calcaires jurassiques. Par lithologie, les évolutions des concentrations en nitrates varient en fonction de la localisation. Par exemple, dans certains cas, un lien marqué entre l'évolution des teneurs en nitrate et de la piézométrie ressort bien (zone 15, craie du nord est du bassin par exemple) alors que dans d'autres secteurs les teneurs en nitrate semblent peu fluctuer avec les pluies efficaces ont des variations importantes (zone 66, craie du nord-ouest du bassin par exemple). Le changement d'échelle du bassin aux zones telles que définies par la sectorisation permet d'illustrer des comportements différents avec des corrélations plus ou moins marquées entre les évolutions temporelles de la qualité de l'eau et des pluies efficaces. Compte-tenu de la variabilité des situations rencontrées pour une lithologie donnée, la lithologie n'apparaît pas comme le facteur le plus discriminant. En revanche, sa prise en compte directe ou indirecte via l'étude des variogrammes piézométriques qui a conduit à la sectorisation permet de discriminer des comportements différents en lien ou non avec les pluies efficaces.

Enfin, puisque les évolutions temporelles des pluies efficaces et des teneurs en nitrate sont liées à l'échelle du bassin ou au sein de zones plus restreintes, et que les niveaux piézométriques des nappes représentant une bonne image des états de recharge et

donc des quantités de pluies efficaces, il est apparu intéressant de tester dans quelles mesures les évolutions des teneurs en nitrate peuvent être rapprochées de celles de la piézométrie en travaillant cette fois point d'eau par point d'eau. L'analyse des données proposée repose sur l'utilisation de la covariance croisée qui permet de faire cette interprétation par couple piézomètre/qualitomètre.

L'utilisation de la covariance croisée nécessite, en premier lieu, de former des couples piézomètre/qualitomètre. Les ouvrages qui forment le couple doivent être proches l'un de l'autre et capter le même niveau aquifère. Ces conditions doivent être satisfaites afin de s'assurer que les informations fournies par les deux ouvrages du couple résultent d'un fonctionnement hydrogéologique global commun. En première approche, les couples sont formés automatiquement en sélectionnant les piézomètres et les qualitomètres distants de moins de 10 km qui captent une même masse d'eau de niveau 1 (aquifère superficiel). Les couples retenus sont ceux pour lesquels le piézomètre et le qualitomètre sont spatialement localisés dans le même système aquifère et, dans la mesure du possible, non séparés par une rivière majeure. **Suivant cette méthode semi-automatique, 2157 couples ont été formés sur le bassin Seine-Normandie**. Un même piézomètre peut être rattaché à plusieurs qualitomètres différents et inversement. Cette approche permet de traiter un grand nombre de couples à la fois mais il est vraisemblable que certains soient formés d'ouvrages qui ne captent pas exactement le même aquifère ou bien qui soient séparés par une discontinuité hydrogéologique majeure. L'exercice idéal consisterait à valider l'ensemble des couples en recherchant pour chaque ouvrage la géologie des terrains à l'aplomb, la position de la crépine et donc le niveau exact réellement capté. De plus, il serait nécessaire d'étudier finement l'agencement des terrains géologiques afin de s'assurer de la continuité hydrodynamique entre les ouvrages.

Classes de Covariance	Types de corrélation	Nb couples piezo/NO_3	%
0	Pas de corrélation	679	31,5 %
1	Corrélation positive et variation synchrone	295	13,7 %
2	Corrélation positive et déphasage < 6 mois	257	11,9 %
3	Corrélation positive et déphasage > 6 mois	359	16,6 %
4	Corrélation négative et variation synchrone	31	1,4 %
5	Corrélation négative et déphasage < 6 mois	79	3,7 %
6	Corrélation négative et déphasage > 6 mois	92	4,3 %
7	Recouvrement des chroniques insuffisant	365	16,9 %
	Total	2157	100%

Illustration 12 : Types de corrélations entre les fluctuations piézométriques et les évolutions des concentrations en nitrate mis en évidence par le traitement par covariance croisée des couples piézomètre/qualitomètre du bassin Seine-Normandie.

3.5.2.Evolution de l'occupation des sols et des pressions azotées induites

Les données d'évolution de l'occupation des sols ont été fournies à l'échelle des Petites Régions Agricoles (PRA) du bassin de la Seine par l'INRA de Mirecourt. 4 dates sont renseignées : 1970, 1979, 1988 et 2000. Pour chaque année, 8 grands types d'assolements ont été définis par la réalisation d'une analyse en composante principale et la pression azotée induite par type d'assolement a été estimée à dire d'expert, selon une grille qualitative.

A l'échelle du bassin, il est difficile d'intégrer l'ensemble des informations. Les zones issues de la sectorisation et les PRA étant globalement de surfaces comparables, à l'exception de quelques secteurs, les données d'évolution de la pression azotée ont été compilées de manière à proposer une information par zones. Les informations étant qualitatives, il est délicat de proposer une méthodologie liant directement évolutions des teneurs et évolution de la pression d'autant que les chroniques de concentration en nitrate ont généralement une durée nettement moindre que les 3 décennies décrites en terme de pression.

Compte-tenu des temps de transfert de l'eau et des solutés associés dont les nitrates et de leur variabilité spatiale, il est difficile de développer une approche systématique et automatisée permettant de comparer l'impact constaté aujourd'hui et la pression azotée de l'année ayant généré la contamination actuelle. A ce stade, il est donc proposer par zone, de regarder simultanément les différentes informations recueillies et/ou générées dans l'étude (âge apparent de l'eau, évolution temporelle des pressions, date de rupture, tendances etc.). Dans le rapport complet, cette analyse visuelle multicritère est présentée par zones, regroupées par type lithologique.

3.6.LES POINTS CLES

- La caractérisation du comportement hydrodynamique (variogrammes piézométriques) couplée à la lithologie et à l'évolution de la qualité des eaux vis-à-vis des nitrates a permis de définir 64 zones servant d'unités spatiales de référence pour le reste de l'étude des tendances vis-à-vis de ce paramètre.

- Préalablement à l'estimation des tendances, l'application du test CUSUM modifié a permis de déterminer les dates de rupture dans les chroniques ne montrant pas une évolution temporelle homogène. Sur 5862 chroniques de concentrations en nitrate testées, 1987 ont une rupture de pente significative dont 50 % présentant une date de rupture postérieure à l'année hydrologique 2000-2001.

- Pour la caractérisation des tendances, dans le cas d'une approche par point d'eau, l'estimation de la tendance selon la régression linéaire est à privilégier pour des séries de données distribuées suivant une loi normale et sans valeur « aberrante », alors que le test de Mann-Kendall sera le plus approprié pour des séries à données non normalement distribuées et/ou avec des valeurs « aberrantes ».

- Dans des situations telles que celles de l'étude c'est-à-dire avec de nombreuses chroniques de données ne pouvant pas être examinées au cas par cas, le test de Mann-Kendall est à privilégier pour déterminer les tendances car il est robuste quelles que soient les conditions initiales d'application.

- Pour une approche spatialisée de caractérisation des tendances, il est crucial de définir de façon pertinente les zones au sein desquelles les données sont agrégées. Les zones telles que définies dans l'étude apparaissent pertinentes.

- La mise en œuvre de boîtes à moustache couplée à l'application du test statistique Kruskal-Wallis permet de comparer des périodes entre-elles qu'elles soient continues ou non, et le test Kendall régional offre la possibilité de valoriser des données pour des chroniques ayant peu de données.

- Concernant les réseaux DCE, à l'échelle du bassin Seine-Normandie, les points des réseaux de suivis de la qualité des eaux souterraines RCS et RCO proposent, en moyenne, des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate nettement plus favorables à l'application des tests statistiques que l'ensemble des chroniques disponibles. Toutefois, à ce jour, 80% des chroniques n'ont pas pu donner une indication de tendances comme 88% de tous les points du bassin Seine-Normandie.

- De ce fait, il est aujourd'hui difficile de dire si les tendances identifiées par les points des réseaux sont cohérentes avec les observations faites sur les points voisins. Seule une reprise de ce type d'approche avec des chroniques plus longues pourra fournir des indications sur ce point. En revanche, l'analyse qualitative des résultats de l'étude montre la bonne couverture spatiale des points des réseaux RCS et RCO sur l'ensemble du bassin, mais aussi par rapport aux masses d'eau ou aux zones déterminées lors de la sectorisation, zones dans lesquelles les points d'eau présentent, a priori selon les critères de sectorisation essentiellement hydrogéologiques et hydrodynamiques, des évolutions vis-à-vis de la contamination par les nitrates de même type. Dans le détail, des améliorations sur la répartition des points pourraient être envisagées.

- La recherche de facteurs explicatifs sur l'évolution de la qualité des eaux est abordée en considérant essentiellement la recharge (via les pluies efficaces) et l'évolution temporelle de la pression azotée.

- A l'échelle du bassin, depuis les années 1985-90, l'évolution des pluies efficaces et des concentrations en nitrate sont clairement corrélées. Ainsi l'augmentation importante des teneurs en nitrate entre 1995 et 2001-2002 correspond une période de croissance importante des pluies efficaces. Depuis 2001-2002, la corrélation est moins perceptible.

- Par secteurs, ce type de relation est plus ou moins marqué et dans le détail, point d'eau par point d'eau, la covariance croisée montre des situations

contrastées (corrélation, anti-corrélation, déphasage temporel plus ou moins important, pas de relation entre la concentration en nitrate et la piézométrie).

- Clairement au cours des 2 dernières décennies, les grandes tendances d'évolution en nitrate à l'échelle du bassin ont été fortement gouvernées par la pluie efficace. Plus localement, même si la pluie efficace apparaît comme un facteur important, d'autres facteurs peuvent également gouverner l'évolution de la qualité de l'eau souterraine comme l'évolution de la pression azotée.

4. Contamination des eaux souterraines du bassin Seine-Normandie par les produits phytosanitaires.

Compte-tenu du nombre important de substances recherchées à l'échelle du bassin et de façon à travailler sur des chroniques conséquentes, il a été décidé de ne s'intéresser qu'aux substances les plus quantifiées, sur au moins 2000 points d'eau. Les substances concernées sont : Atrazine, Déséthylatrazine (DEA), Simazine, Diuron, Terbuthylazine, Déséthyl terbuthylazine, Déséthyl terbumeton, Mécoprop, Glyphosate, AMPA, Isoproturon, Chlortoluron, Oxadixyl, 2,4 MCPA et Dinoterbe. La Bentazone et l'Aminotriazole présentant un intérêt particulier pour l'Agence Seine-Normandie, ces molécules ont été ajoutées.

Ces 17 substances phytosanitaires sont classées en quatre groupes en fonction de leur statut réglementaire (les dates limites d'utilisation ou de restriction d'usages en France sont mentionnées entre crochets) :

- ✓ Triazines et métabolites associés (Atrazine [2003], déséthylatrazine, Simazine [2003], terbuthylazine [2004] et déséthyl terbuthylazine).
- ✓ Herbicides autorisés (aminotriazole, bentazone, chlortoluron [restriction 2004], isoproturon [restriction 2004], Mécoprop, et 2,4-MCPA)
- ✓ Herbicides interdits et métabolites d'herbicides interdits (dinoterbe [1997], diuron [2008], oxadixyl [2003] et déséthyl terbumeton [molécule mère terbuméton 1999])
- ✓ Herbicides non sélectifs et métabolites associés (glyphosate [restriction 2004] et AMPA).

Les données de concentrations en substances phytosanitaires présentées sont issues d'une extraction de la base de données ADES, tous points confondus, réalisée le 1er décembre 2010.

4.1.EVALUATION DES TENDANCES

A l'instar de ce qui a été fait pour les nitrates, les tendances d'évolution des concentrations en produits phytosanitaires ont été estimées à deux échelles : point d'eau / approche spatialisée.

4.1.1.Approche spatialisée

Dans un premier temps, la caractérisation de la tendance d'évolution des concentrations en phytosanitaires a été effectuée par boite à moustache. Compte-tenu du jeu de données, seules l'atrazine et la déséthylatrazine sont considérées pour cet exercice car elles présentent des chroniques longues avec une fréquence de quantification importante.

Par analogie avec le traitement des données « nitrate » les dates de ruptures des chroniques d'évolution des concentrations en atrazine et en déséthylatrazine sont calculées par la méthode du CUSUM modifié. Seules les chroniques ayant un taux de quantification supérieur à 90% sont prises en compte (170 pour la DEA, 152 pour l'atrazine). Ces dates de rupture servent à déterminer les périodes pertinentes pour l'établissement des boites à moustache après ajustement des limites à celles des années hydrologiques (10 périodes définies de 1995 à 2009).

Les boîtes à moustaches représentant l'évolution des concentrations en atrazine et en déséthylatrazine ont tout d'abord été créées en prenant en compte l'ensemble des données disponibles sur le bassin. Cette analyse regroupe donc les informations issues de tous les points du bassin qui bénéficient d'au moins une analyse en atrazine ou DEA, le nombre de points de prélèvement par période pouvant être différent. L'Illustration 13 présente ainsi l'évolution des concentrations en atrazine et en DEA dans les eaux souterraines (<LQ = LQ/2) à l'échelle du bassin Seine-Normandie en considérant tous les points qui disposent d'au moins une analyse en ces substances entre 1995 et 2009. Les fréquences de quantification, de dépassement du seuil de 0,1 µg/L et l'évolution de la limite de quantification pour l'atrazine et la DEA sont figurées sur la même illustration.

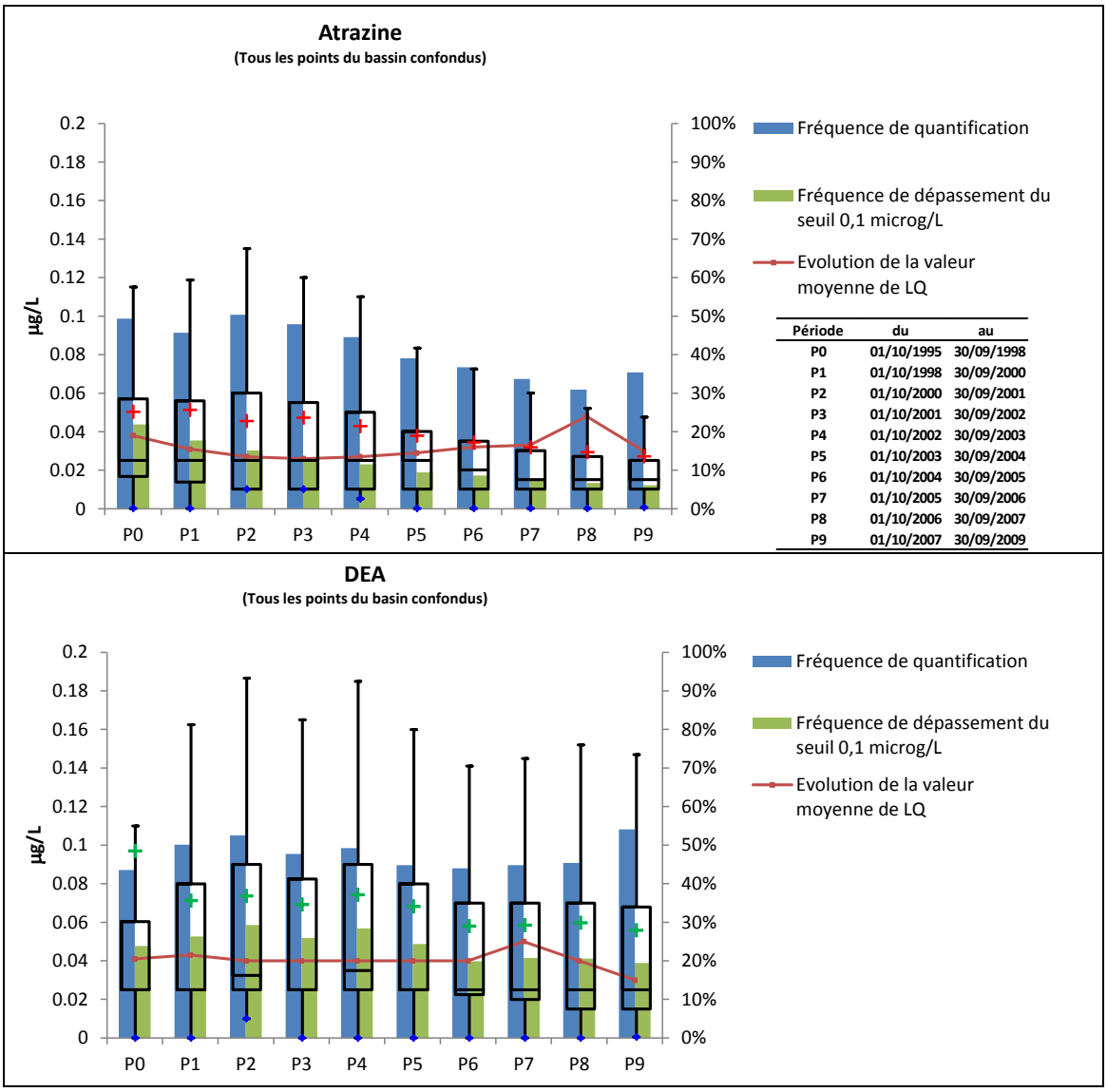

Illustration 13 : Evolution des concentrations, des fréquences de quantification, des fréquences de dépassement de la valeur 0,1 µg/L et évolution de la limite de quantification (LQ) moyenne de l'atrazine et de la DEA pour 10 périodes de 1995 à 2009 et pour tous les points d'eau ayant au moins une analyse en atrazine et en DEA.

Les concentrations en atrazine les plus importantes sont mesurées pour la période P2 (2000-2001). Elles diminuent ensuite régulièrement jusqu'en P8 (2006-2007), période à partir de laquelle les concentrations semblent se stabiliser. Les limites de quantification moyennes par période étant relativement stables, les fréquences de quantification suivent globalement la même évolution. Elles augmentent néanmoins entre les périodes P8 et P9 (2006-2007 et 2007-2009) alors que les concentrations ne semblent pas suivre cette tendance. L'évolution de la fréquence de dépassement du seuil

0,1 µg/L représente quant à elle une bonne image de l'évolution des concentrations moyennes en atrazine sur la période totale 1995-2009.

Toujours à l'échelle du bassin, le même exercice a été effectué en ne considérant cette fois que les points d'eau ayant au moins une mesure dans chacune des périodes. Cela conduit à réduire drastiquement le nombre d'échantillons (254 points de prélèvement en atrazine vs. 2314 en prenant en compte toutes les données et 233 points de prélèvement en DEA vs 2303 dans le cas précédent). Malgré cela les observations sont similaires dans les cas avec notamment une évolution des teneurs en atrazine différente de celles des teneurs en DEA.

Cette approche boites à moustache a également été déclinée par zones (définies sur la base du travail préalable de sectorisation) et regroupées pour la représentation cartographique suivant 3 lithologies prédominantes du bassin (5 zones dans les formations tertiaires, 5 zones de craie et 2 zones dans les formations jurassiques).

Par cette déclinaison plus locale, plusieurs types d'évolution sont mis en évidence dans les différentes formations du bassin Seine-Normandie, en fonction des zones considérées. Le comportement global défini lors du travail à l'échelle du bassin Seine-Normandie ne qualifie donc pas systématiquement toutes les zones du bassin. La réduction d'échelle permet par conséquent de nuancer les conclusions établies par l'analyse des concentrations prises dans leur globalité.

Néanmoins, d'une manière générale, ce travail permet de montrer que les évolutions des teneurs en atrazine et désethylatrazine ne sont pas comparables entre elles, notamment pour les années plus récentes. De plus, il apparait que pour chacune de ces 2 substances, l'évolution des teneurs est variable suivant les différents secteurs du bassin préalablement identifiés.

4.1.2.Approche par point d'eau

En complément de l'approche spatialisée, l'examen de l'évolution des tendances au point d'eau est réalisé en essayant de voir dans quelles mesures les approches proposées pour l'examen des chroniques nitrate sont transposables ou non. Le test non paramétrique de Mann-Kendall a donc été appliqué. Les données reportées inférieures à une limite de quantification posant problème pour leur prise en compte, seules les chroniques des points d'eau ayant plus de 90 % de quantification sont sélectionnées. L'atrazine et la DEA ayant des chroniques a priori les plus longues et correspondant aux molécules les plus fréquemment quantifiées dans les eaux souterraines du bassin Seine-Normandie sont retenues. Sur l'ensemble du bassin, 152 chroniques d'évolution des concentrations en atrazine et 170 chroniques d'évolution des concentrations en DEA montrent des fréquences de quantification supérieures à 90 %.

Le test est appliqué une première fois sur ces chroniques prises dans leur totalité. Ensuite, et en cohérence avec les travaux réalisés sur les données « nitrate », les dates de ruptures sont calculées grâce à la méthode du CUSUM modifié. Les critères de significativité statistique des tendances réduit encore les informations exploitables :

- 68 et 67 tendances significatives pour l'atrazine et la DEA respectivement lorsque la totalité des chroniques est prise en compte

- 21 et 24 tendances significatives pour l'atrazine et la DEA respectivement lorsque le calcul est réalisé sur les tronçons post-ruptures.

Ainsi, si le test de Mann-Kendall est théoriquement applicable sur ce type de chroniques, la mise en œuvre ne peut être réalisée à ce jour que sur un nombre très restreint de points d'eau.

De façon à pousser plus avant les essais d'application des tests de Mann-Kendall et Kendall régional, des données complémentaires à celles existantes dans la base ADES ont été transmises par Eau de Paris. Le test de Mann-Kendall a ainsi été appliqué sur les chroniques d'Atrazine et DEA au point Breuil mélange (aqueduc de l'Avre) alors que le Kendall Régional a été appliqué sur les données regroupées DDASS75. Compte-tenu de la localisation assez restreinte des données par rapport à la taille du bassin, les informations ainsi recueillies et traitées ne permettent pas d'améliorer de façon significative la connaissance à l'échelle du bassin. En revanche, plus localement, ces traitements statistiques permettent de décrire des tendances. Enfin, l'examen de ces chroniques longues et à fréquence de mesures élevées permet surtout d'apporter de nouveaux éléments méthodologiques. En effet, si l'augmentation de la fréquence de mesures constitue un atout pour l'application des tests statistiques, la mise en lumière sur les chroniques de concentrations de cycles irréguliers pose de nouvelles questions méthodologiques. Aujourd'hui ce cas est plutôt observé pour la DEA dont l'évolution n'est pas régulière alors que l'atrazine semble montrer une décroissance régulière des concentrations.

4.2.RECHERCHE DE FACTEURS EXPLICATIFS

4.2.1.Pluie efficace

L'évolution globale sur la période 1995-2009 des concentrations en DEA dans les eaux souterraines du bassin Seine-Normandie peut être rapprochée de l'évolution globale des pluies efficaces agrégées à l'échelle du bassin de la Seine (Illustration 14). Les deux paramètres augmentent de manière concomitante de 1995 à 2000-2001, diminuent ensuite jusqu'en 2004-2005 où une nouvelle inversion de tendance engendre l'augmentation de la recharge et des concentrations en DEA dans les eaux souterraines.

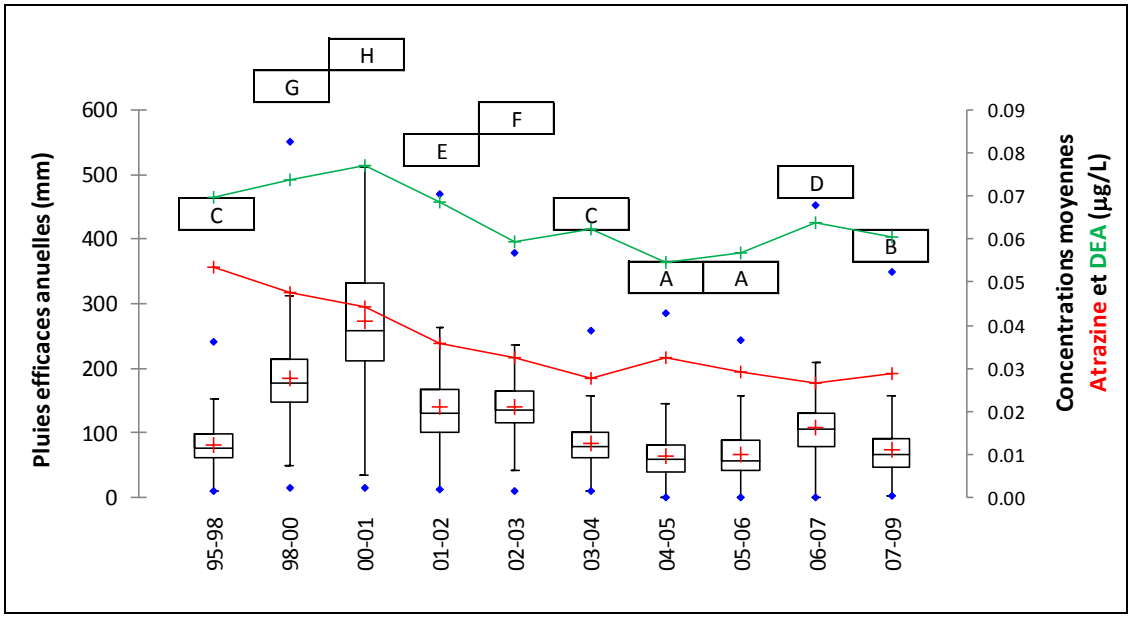

Illustration 14 : Représentation par boîtes à moustache de l'évolution des pluies efficaces annuelles de 1995 à 2009 sur le bassin de la Seine. Données issues des travaux de modélisation STICS-MODCOU dans le cadre du projet PIREN-SEINE. Les lettres majuscules représentent le résultat du test de Kruskal-Wallis. Moyennes des conentrations en atrazine (rouge) et en DEA (vert).

Néanmoins, d'une manière générale, ce travail permet de montrer que les évolutions des teneurs en atrazine et désethylatrazine ne sont pas comparables entre elles, notamment pour les années plus récentes. De plus, il apparait que pour chacune de ces 2 substances, l'évolution des teneurs est variable suivant les différents secteurs du bassin préalablement identifiés. La comparaison avec les pluies efficaces montre que si depuis 2004-2005, les teneurs en atrazine semblent toujours décroitre, les années plus humides ont pu conduire à une remontée des teneurs en DEA. De la même façon pour les périodes plus récentes, les teneurs en DEA apparaissent encore très dispersées (large gamme de valeurs) alors que les teneurs en atrazine semblent moins fluctuantes.

4.2.2.Occupation du sol et usage

En première approche, pour chaque substance, une cartographie par point des taux de quantification (couleur) et du nombre d'analyses (taille du symbole) est réalisée à partir de l'ensemble des données contenues dans ADES c'est-à-dire tous les points de prélèvements confondus et sans distinction des périodes et/ou fréquences de mesures. Bien que le jeu de données soit perfectible, les cartes ainsi réalisées permettent de rendre compte, de manière qualitative à travers l'analyse des fréquences de quantification, de l'état de contamination des eaux souterraines par substance aux

points de prélèvements. Le fond cartographique choisi en support de ces cartes correspond aux Orientations Technico Economiques des Exploitations agricoles (OTEX) agrégées en 5 classes de type de culture.

Ainsi, pour chaque molécule de la liste retenue, l'examen d'un lien potentiel entre l'impact (qualité de l'eau) et la pression (appréhendée de manière qualitative via le type de cultures) est possible. A titre d'exemple, il apparait clairement que la terbuthylazine historiquement utilisée sur vignes et son métabolite la déséthylterbuthylazine (Illustration 15) sont quantifiées de manière assez récurrente dans les zones de vignobles ; la contamination est donc assez bien sectorisée. En revanche, pour l'atrazine et la DEA (Illustration 16), ce mode de représentation permet de souligner le caractère plus généralisé tant du point de vue spatial que temporel de la contamination (Illustration 16)

.

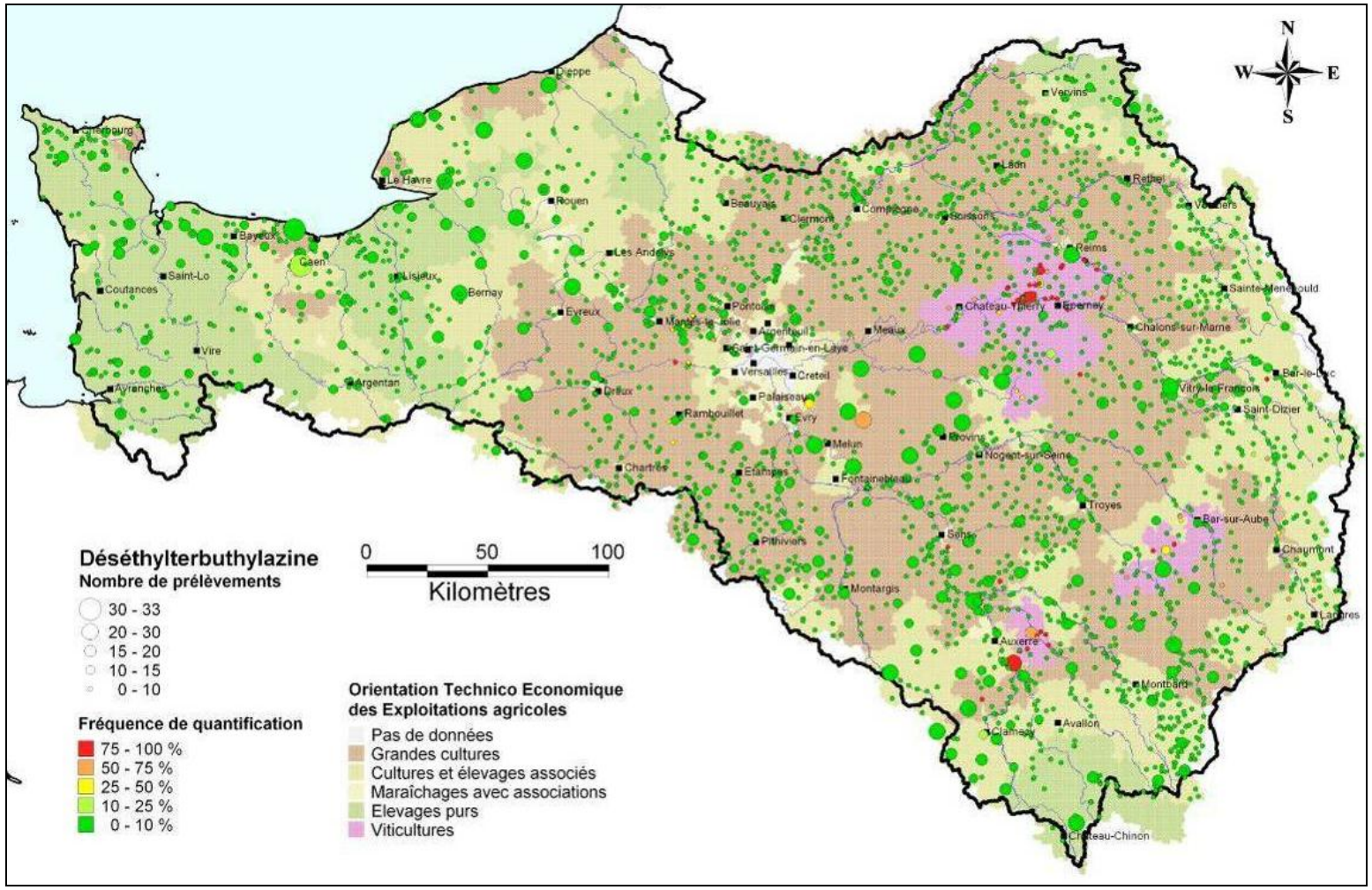

Illustration 15 : Fréquence de quantification et nombre de prélèvements par point d'eau vis-à-vis de la déséthylterbuthylazine et croisement avec les données OTEX (Orientation Technico Economique des Exploitations agricoles)

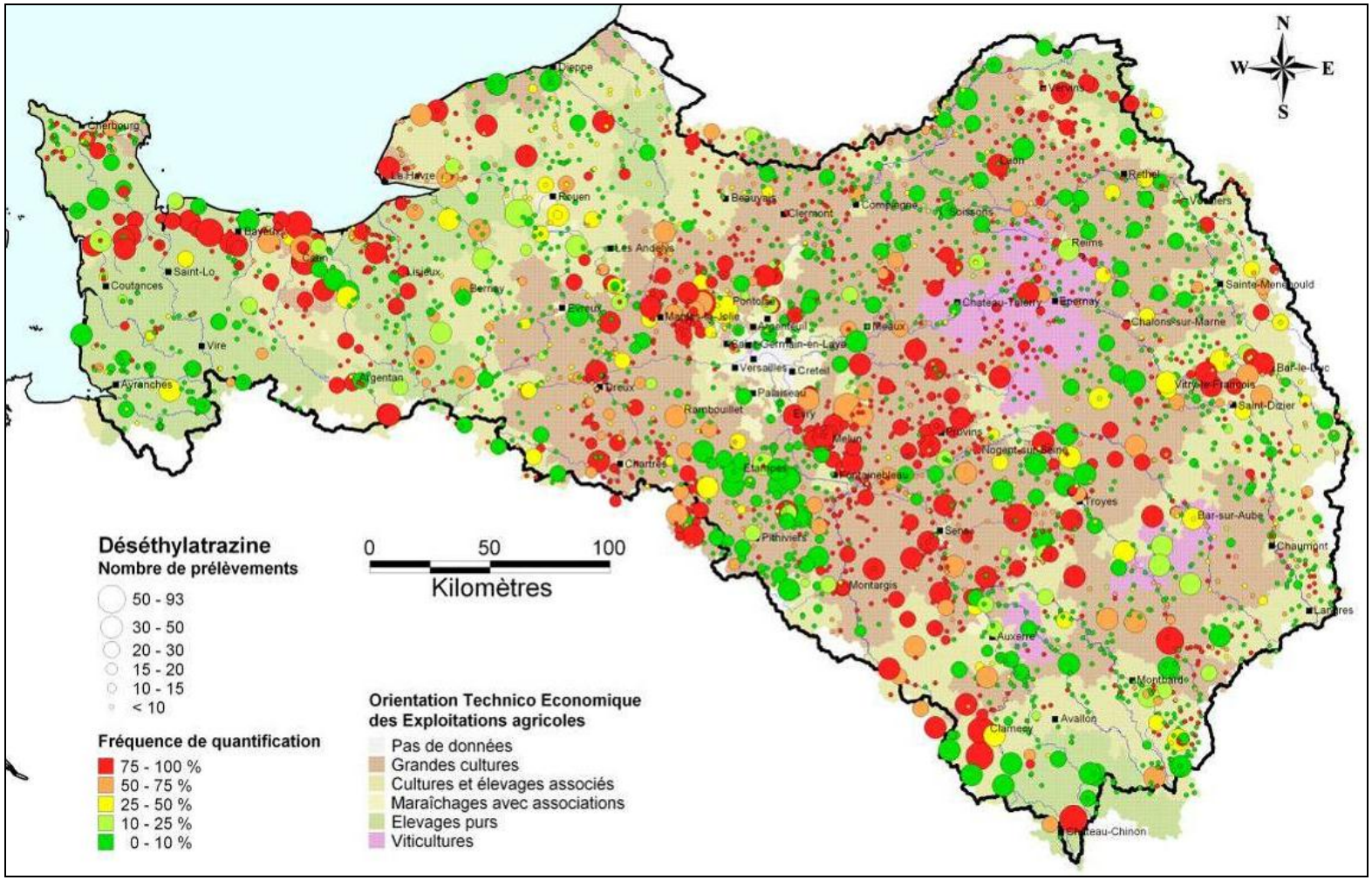

Illustration 16 : Fréquence de quantification et nombre de prélèvements par point d'eau vis-à-vis de la déséthylatrazine et croisement avec les données OTEX (Orientation Technico Economique des Exploitations agricoles)

La liste des molécules retenues pour l'étude correspondant essentiellement à des molécules interdites d'usage et à leurs métabolites et en l'absence de données détaillées sur les usages de produits phytosanitaires passés à l'échelle du bassin, il n'est pas possible de pousser plus avant les investigations sur les relations usage/impact.

En revanche, à terme, l'exploitation des données de la BNV-D (Banque nationale des Ventes de produits phytopharmaceutiques réalisées par les Distributeurs agréés) permettra d'avoir une vision plus précise des quantités potentiellement appliquées et de leur répartition spatiale même si à une échelle très locale les informations seront discutables (les substances achetées une année ne sont pas nécessairement appliquées cette même année, la commune d'achat ne correspond pas nécessairement à la commune où elles sont appliquées etc.). Ainsi à titre d'exemple, la représentation par région des ventes 2008, 2009 et 2010 permet d'apprécier la variabilité temporelle des ventes mais aussi et surtout spatiale (Illustration 17).

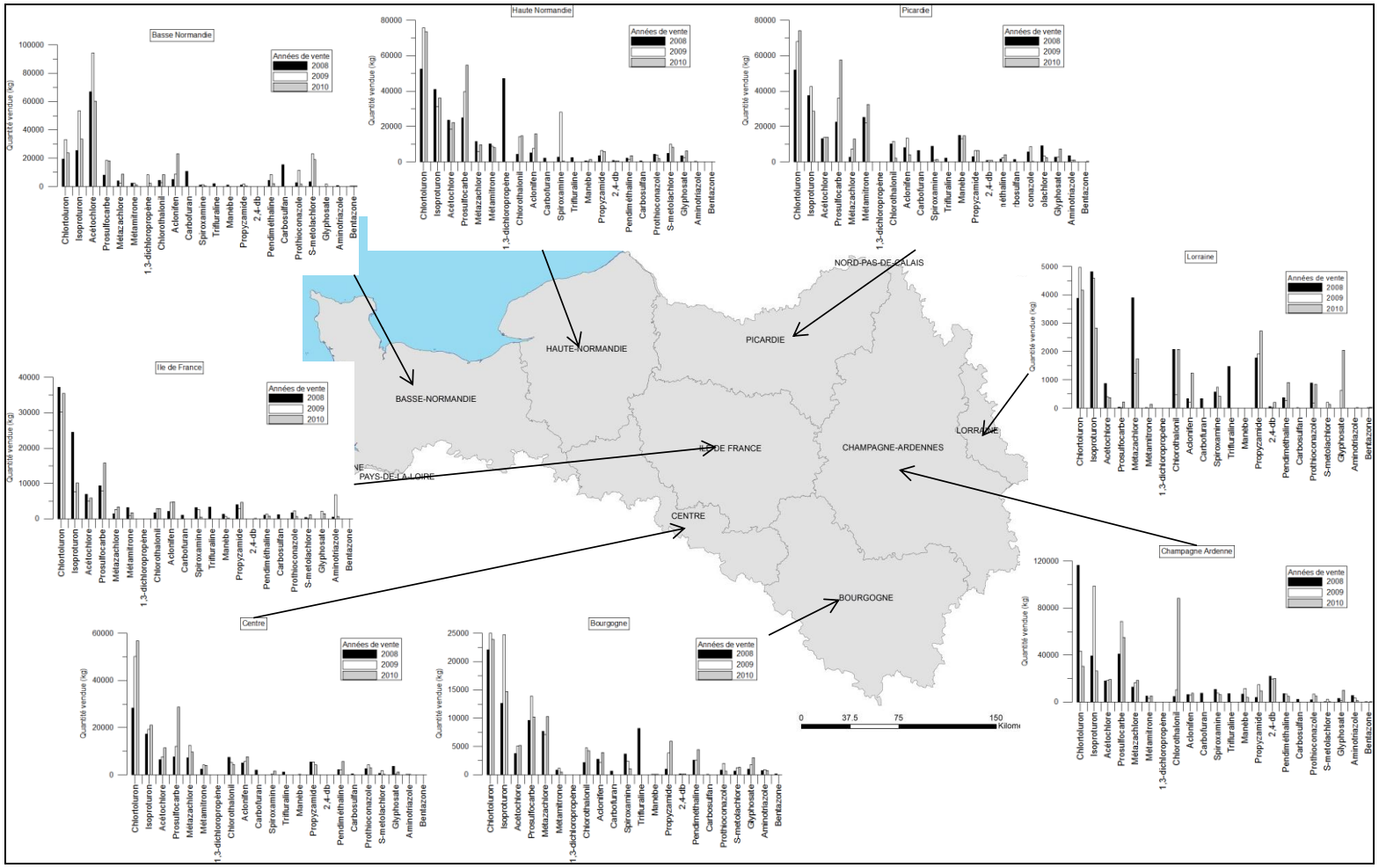

Illustration 17 : Quantités de phytosanitaires vendus en 2008-2009-2010 par région (pour les 22 molécules les plus vendues en 2008 – source Onema - Agence de l'Eau Seine-Normandie – Banque Nationale des Ventes de produits phytopharmaceutiques réalisées par les Distributeurs agréés (BNV-D))

4.3.LES POINTS CLES

- Sur la base des données extraites d'ADES tous points confondus, en considérant les molécules quantifiées sur au moins 2000 points d'eau et ayant les fréquences de quantification les plus élevées, 15 molécules ont été pré-sélectionnées pour l'étude. Compte-tenu de la problématique de l'Agence de l'Eau identifiée lors du traitement des données spécifiques aux réseaux Agence, 2 molécules ont ajoutées.

- Les molécules les plus quantifiées correspondent en grande partie à des molécules d'usage interdit ou présentant des restrictions d'usage, et à leurs métabolites.

- En théorie, les outils déclinés pour la caractérisation des tendances nitrate sont utilisables pour décrire l'évolution de la contamination par les phytosanitaires.

- Toutefois, les caractéristiques des jeux de données actuels, limitent les applications possibles. Ainsi, pour une approche spatialisée, l'approche boîtes à moustache/test de Kruskal-Wallis permet de décrire la situation à l'échelle du bassin. Sur des zones plus restreintes, il apparait nécessaire de travailler sur l'ensemble des points d'eau et pas uniquement ceux qui ont une mesure à chaque période afin de garder un nombre de données suffisant. L'application des tests Mann-Kendall et Kendall régional ne peut se faire que sur un nombre de points extrêmement faible, ne permettant pas ainsi d'avoir une vision complète à l'échelle du bassin.

- Les pluies efficaces et l'occupation des sols/pression « phytosanitaire » sont deux facteurs explicatifs majeurs qui permettent de comprendre les situations ou les évolutions constatées.

- La comparaison de l'évolution des concentrations avec les pluies efficaces montre que si depuis 2004-2005, les teneurs en atrazine semblent toujours décroitre, les années plus humides ont pu conduire à une remontée des teneurs en DEA. Les évolutions des teneurs en Atrazine et DEA ne sont pas comparables entre elles, notamment pour les années plus récentes à l'échelle du bassin ou selon différentes zones du bassin.

- Aujourd'hui, en l'absence de données précises sur les usages anciens de phytosanitaires, il est difficile de faire une étude fine des relations pressions/impact sur la qualité de l'eau. Toutefois, une représentation cartographique des fréquences de quantification et du nombre de recherches couplée à l'OTEX permet de discriminer les problèmes spécifiques à des cultures (usages spécifiques) de contamination plus généralisée (tant spatialement que temporellement). A terme, les données de la BNV-D permettront vraisemblablement la mise en œuvre d'autres approches pour caractériser les relations pression/impact à l'échelle du bassin ou à une échelle plus régionale.

5. Conclusions et perspectives

La présente étude permet de proposer différentes approches méthodologiques afin de

- caractériser les temps de transfert et de résidence de l'eau.
- décrire les tendances passées de l'évolution de la qualité des eaux souterraines vis-à-vis du paramètre nitrate
- caractériser et d'expliquer la variabilité spatiale et temporelle de la contamination des eaux souterraines vis-à-vis des paramètres nitrate et phytosanitaires

L'échelle de travail initiale est celle du bassin Seine-Normandie mais les différents traitements statistiques proposés ont montré qu'il est parfois pertinent de changer d'échelle (zones telles que définies dans l'étude et/ou grands types lithologiques) pour illustrer les disparités à l'échelle du bassin. L'application des méthodes proposées est envisageable à une échelle régionale voire locale mais pourrait nécessiter une sélection en amont encore plus poussée des jeux de données. En effet, si au niveau du bassin le grand nombre de données permet de masquer le cas particulier et donc de s'affranchir d'un tri très strict des données, à une échelle plus fine le regard critique des experts locaux sur le choix des données et de l'interprétation des résultats obtenus sera primordial.

Toutefois, d'ores et déjà un changement d'échelle a été abordé dans l'étude avec la déclinaison des différents outils par zones représentées en fonctions des 3 grandes lithologies du bassin (formations tertiaires, craie et formations jurassiques). Ainsi différentes planches de présentation des informations recueillies (datation, date de rupture des tendances, évolution temporelle de la pression azotée, tendance, niveau de contamination actuel, ….) sont proposées dans le rapport avec des clés de lecture sur les différentes situations.

Outre les aspects méthodologiques, la présente étude visait à tester la pertinence de l'application de tests statistiques pour la détermination des tendances d'évolution des concentrations dans les eaux souterraines des contaminants nitrate et phytosanitaires à l'échelle du bassin Seine-Normandie et de donner une vision de la situation à cette même échelle. L'intérêt et les limites de chacun des outils ont été discutés. Il apparait clairement qu'aujourd'hui la transposition aux phytosanitaires de l'ensemble des outils utilisés pour décrire l'évolution des concentrations en nitrate est délicate.

Les résultats obtenus pour l'estimation des tendances sont par définition à actualiser régulièrement puisque l'acquisition des données se poursuit. C'est pourquoi, de façon à permettre l'exploitation des données postérieurement à l'étude après d'éventuelles mises à jour de la base de données, des **utilitaires pour le traitement d'outils statistiques ont été développés.** Ils ont été couplés à un **SIG/BDD** de façon à proposer une visualisation et représentation cartographique aisées.

Centre scientifique et technique
Service MMA
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34