

**Document public**

**ANNEXE 10**

## **INTERREG III. Indicateurs transfrontaliers pour la protection de la nappe dans le Fossé rhénan supérieur :**

Représentativité des réseaux de référence en Alsace  
et Pays de Bade - Analyse statistique et  
géostatistique des teneurs en nitrates et en  
pesticides

**BRGM/ALSNT06N05**  
Décembre 2006

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Recherche du BRGM PDR03EAU07

**R. Blanchin**  
Avec la collaboration de  
**P. Elsass**



## Résumé – Zusammenfassung

Dans le cadre du projet Interreg III "Indicateurs transfrontaliers pour la protection de la nappe dans le Fossé rhénan supérieur", le BRGM a mené des analyses statistiques et géostatistiques visant à évaluer, pour les problématiques "Nitrates" et "Phytoprotecteurs", la représentativité des réseaux de référence patrimoniaux dans le Fossé rhénan supérieur.

En Alsace, le RBES (Réseau de Bassin des Eaux Souterraines) comprend 41 piézomètres, dont 36 répartis dans l'aquifère des alluvions de la plaine d'Alsace et 5 dans les alluvions pliocènes, et fait l'objet de prélèvements tous les 6 mois depuis mars 1999.

Les résultats d'analyse des nitrates du RBES à l'automne 2003 sont comparés avec ceux de l'inventaire 2003 : les valeurs des 32 points de mesure communs aux deux réseaux sont statistiquement équivalentes.

La moyenne des teneurs en nitrates des 41 ouvrages du réseau RBES s'établit à 25,8 mg/L et est ainsi très proche de la moyenne des 658 points de l'inventaire 2003 qui est de 26,4 mg/L.

L'étude du variogramme des 41 ouvrages du RBES montre que ce dernier reproduit bien le comportement du réseau de l'inventaire, avec une bonne corrélation dans la direction principale d'écoulement (N10°E) et une moins bonne corrélation en direction E-W.

Un modèle numérique des concentrations en nitrates, limité à l'aquifère principal, est construit par krigeage. Il permet d'estimer la concentration moyenne à  $24,8 \pm 3,6$  mg/L, soit une incertitude de 15%.

L'étude d'optimisation du réseau RBES

Im Rahmen des Interreg III-Projekts "Grenzüberschreitende Indikatoren zum Schutz des Grundwassers im Oberrheingraben" hat das BRGM statistische und geostatistische Analysen durchgeführt, die die Repräsentativität der regionalen Messnetze für Nitrat und Pflanzenschutzmittel im Oberrheingraben bewerten.

Das RBES umfasst im Elsass 41 GW-Messstellen, davon gehören 36 zum aus Sanden und Kiesen bestehenden Hauptaquifer im Oberrheingraben und 5 zu den pliozänen Sanden, die seit März 1999 alle 6 Monate beprobt werden.

Die Analyseergebnisse des RBES zu Nitraten von Herbst 2003 wurden mit den Werten der Bestandsaufnahme von 2003 verglichen: die Werte der 32 gemeinsamen Messstellen sind statistisch vergleichbar.

Der Nitratmittelwert der 41 Messstellen des RBES-Messnetzes beträgt 25.8 mg/L und stimmt somit nahezu mit dem Mittelwert der 658 Messstellen der Bestandsaufnahme von 2003 von 26.4 mg/L überein.

Die Untersuchung des Variogramms der 41 Messstellen des RBES zeigt, dass diese Punktgruppe die Eigenschaften des Gesamtmessnetzes insgesamt gut abbildet, mit einer guten Korrelation in Richtung des generellen GW-Abflusses (N10°E) und einer weniger guten Korrelation in E-W Richtung.

Ein numerisches Modell der Nitratkonzentrationen im Hauptaquifer wurde mittels Kriging ermittelt, mit dem der Mittelwert von  $24.8 \pm 3.6$  mg/L abgeschätzt werden kann, gemäß einer Unsicherheit von 15%.

Die Optimierungsuntersuchung des RBES-

<p>indique que le réseau est optimal, en ce sens qu'il faudrait ajouter beaucoup de points supplémentaires pour améliorer significativement la précision.</p> <p>L'étude temporelle des données en nitrates du RBES permet de constater de nettes fluctuations saisonnières de l'ordre de 5 mg/L, avec un minimum au printemps et un maximum en automne.</p> <p>Malgré un historique très erratique sur 3 ouvrages dont la représentativité peut être mise en doute, les chroniques du RBES montrent globalement une baisse des teneurs en nitrates depuis 1999, avec un minimum en 2002.</p> <p>L'analyse variographique temporelle de l'ensemble des données en nitrates du RBES indique une corrélation sur 24 mois, qui pourrait être améliorée s'il n'y avait pas de valeurs erratiques.</p> <p>En termes d'indicateurs, on conclut que la "Moyenne en nitrates du RBES" est une bonne estimation de l'état général de la nappe avec une précision de l'ordre de 15%, et que le réseau RBES est optimal pour cette utilisation.</p> <p>En termes d'évolution de cet indicateur, cela signifie qu'une variation de cette moyenne de moins de 15% ne peut être considérée comme significative, et l'examen variographique temporel montre que la visibilité de la tendance est de l'ordre de 2 ans.</p> <p>Le réseau de référence badois comparable au RBES, servant à une évaluation annuelle de la qualité des eaux souterraines pour les rapports à l'Agence européenne de l'Environnement (<i>Europäisches Umweltamt</i>, EUA), est identifié par le terme "réseau EUA".</p> <p>Le réseau EUA comprend 15 points analysés tous les ans en automne depuis 1999. On constate que 3 points de mesure sont situés en dehors du Fossé rhénan.</p> <p>La moyenne des teneurs en nitrates des</p>	<p>Messnetzes zeigt, dass das Messnetz optimal ist, d.h. dass es einer viel größeren Anzahl an Messstellen bedürfte, um die Präzision eindeutig zu verbessern.</p> <p>An den Zeitreihen der Nitratdaten des RBES können deutliche jahreszeitliche Schwankungen in der Größenordnung von 5 mg/L beobachtet werden, mit einem Minimum im Frühling und einem Maximum im Herbst.</p> <p>Obwohl erratische Schwankungen in den Zeitreihen von 3 Messstellen auftreten, zeigen die Zeitreihen des RBES seit 1999 im Mittel eine Abnahme der Nitratkonzentrationen, mit einem Minimum im Jahr 2002.</p> <p>Die Untersuchung des Zeitvariogramms des gesamten Nitrat-Datensatzes des RBES ergibt eine zeitliche Korrelation von 24 Monaten, die ohne die erratischen Zeitreihen optimaler wäre.</p> <p>In Hinsicht auf die Indikatoren wird daraus gefolgert, dass der "Nitrat-Mittelwert des RBES" mit einer Unsicherheit von ca. 15% eine gute Abschätzung der allgemeinen Qualität des Grundwassers ergibt und dass das RBES-Messnetz für diese Anwendung optimal ist.</p> <p>Was die zeitliche Entwicklung dieses Indikators betrifft, wird eine Schwankung von weniger 15% als nicht signifikant eingestuft; das Zeitvariogramm zeigt, dass die Tendenz nur für einen Zeitraum von 2 Jahren ersichtlich ist.</p> <p>Das badische Referenzmessnetz, welches vergleichbar mit dem RBES ist, dient einer jährlichen Bestandsaufnahme der Grundwasserbeschaffenheit für die Berichte an das Europäische Umweltamt (EUA) und wird weiterhin als "EUA-Messnetz" bezeichnet.</p> <p>Das EUA-Messnetz umfasst 15 Messstellen, die seit 1999 jährlich im Herbst beprobt werden. 3 Messstellen, liegen außerhalb des Rheingrabens.</p> <p>2003 beträgt der Mittelwert der</p>
---	--

<p>ouvrages du réseau EUA en 2003 s'établit entre 22,1 et 20,8 mg/L suivant les ouvrages retenus et est très éloignée de la moyenne des 535 points de l'inventaire 2003 qui est de 30,3 mg/L.</p>	<p>Nitratkonzentrationen des EUA-Messnetzes, je nach einbezogenen Messstellen, zwischen 22.1 und 20.8 mg/L, und weicht somit stark vom Mittelwert der Bestandsaufnahme 2003, der 30.3 mg/L beträgt, ab.</p>
<p>La variabilité géostatistique des données est tout à fait comparable entre le côté alsacien et le côté badois de la nappe de la vallée du Rhin supérieur.</p>	<p>Die geostatistische Variabilität der Daten in den elsässischen und badischen Teilen des Oberrheinaquifers ist weitgehend vergleichbar.</p>
<p>L'analyse variographique du réseau EUA montre que l'incertitude sur la moyenne est de 26%, et qu'avec 40 points de mesure cette incertitude se réduirait à 18%.</p>	<p>Die variographische Untersuchung des EUA-Messnetzes ergibt für den Mittelwert eine Unsicherheit von 26%, die mit 40 Messstellen auf 18% zurückgehen würde.</p>
<p>En termes d'indicateurs, on conclut que la "Moyenne en nitrates du réseau EUA" est en limite d'utilisation avec une précision de l'ordre de <math>\pm 25\%</math>, et que le réseau EUA actuel n'est pas optimal. Une refonte de ce réseau est recommandée.</p>	<p>Im Hinblick auf Indikatoren wird somit gefolgert, dass es dem "Nitrat-Mittelwert des EUA-Messnetzes" mit einer Unsicherheit von ca. 25% an Präzision fehlt, und dass das heutige Messnetz nicht optimal ist. Eine Überarbeitung dieses Messnetzes wird daher empfohlen.</p>
<p>L'analyse de la représentativité du RBES du point de vue des phytosanitaires se pose différemment de celle des nitrates, du fait du grand nombre d'analyses inférieures à une limite de quantification voire de détection. Le type d'indicateur correspondant sera le nombre ou le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de détection ou de quantification ou supérieures à la CMA.</p>	<p>Die Untersuchung der Repräsentativität des RBES für Pflanzenschutzmittel unterscheidet sich deutlich von der der Nitrate durch die Vielzahl von Werten unter der Bestimmungs- bzw. Nachweisgrenze. Der zutreffende Indikator wird der Zahl oder dem Prozentanteil der Werte entsprechen, die über der Bestimmungs- bzw. Nachweisgrenze oder über dem Trinkwassergrenzwert liegen.</p>
<p>La comparaison entre les résultats du RBES et de l'inventaire 2003 pour les phytosanitaires montre que le RBES n'est pas pertinent pour les substances rarement quantifiées. Il peut par contre être considéré comme représentatif pour l'atrazine et la déséthylatrazine (DEA), sauf en ce qui concerne les fortes valeurs (au-dessus de 0,1 <math>\mu\text{g/L}</math>).</p>	<p>Der Vergleich zwischen den PSM-Ergebnissen des RBES und der Bestandsaufnahme 2003 zeigt, dass das RBES für die selten bestimmten Substanzen nicht geeignet ist. Das RBES kann dagegen als repräsentativ für Atrazin und Desethylatrazin (DEA) angesehen werden, jedoch nicht für stark erhöhte Konzentrationen von über 0.1 <math>\mu\text{g/L}</math>.</p>
<p>L'évolution temporelle de l'indicateur "Pourcentage de quantifications" pour l'atrazine et la DEA montre de fortes fluctuations d'une année sur l'autre. Le lissage obtenu en faisant la moyenne sur les 2 années précédentes montre une évolution décroissante plus régulière avec un minimum en 2002, analogue à</p>	<p>Die zeitliche Entwicklung des Indikators "Prozentanteil der Befunde" von Atrazin oder DEA zeigt starke jährliche Schwankungen. Die Glättung durch ein gleitendes Mittel über 2 Jahre zeigt einen eindeutigeren Abnahmetrend hin zu einem Minimum im Jahr 2002, der vergleichbar mit der Entwicklung der</p>

<p>l'évolution des teneurs en nitrates.</p> <p>En termes d'indicateurs, on conclut tout d'abord que le RBES n'est pas pertinent pour le suivi des substances rarement quantifiées. En ce qui concerne l'atrazine et la DEA dont le pourcentage de quantifications avoisine les 50%, le RBES peut être considéré comme représentatif de l'état général de la nappe en ce qui concerne les classes de valeurs inférieures à 0,1 µg/L.</p> <p>Le pourcentage de valeurs en atrazine ou DEA supérieures à la limite de quantification peut ainsi être proposé comme indicateur, avec une incertitude de l'ordre de 15%, ainsi que le pourcentage de points pour lesquels au moins l'une des molécules (atrazine et ses métabolites) est supérieure au seuil de quantification, bien que la correspondance avec l'inventaire soit un peu moins bonne.</p> <p>On ne peut en revanche utiliser les résultats du RBES pour évaluer le pourcentage de valeurs en atrazine ou en DEA supérieures à la CMA de 0.1 µg/L.</p> <p>En termes d'évolution de l'indicateur "Pourcentage de quantifications", une moyenne glissante sur 2 ans pourrait constituer un indicateur de tendance à très court terme.</p>	<p>Nitratkonzentrationen ist.</p> <p>Im Hinblick auf Indikatoren wird zunächst gefolgert, dass das RBES für selten bestimmte Substanzen nicht geeignet ist. Die Atrazin- und DEA-Befunde dagegen erreichen um die 50% der Analysen, daher kann angenommen werden, dass das RBES repräsentativ für den allgemeinen Zustand des Grundwassers ist, was die niedrigeren Konzentrationsklassen unter 0.1 µg/L betrifft.</p> <p>Der Anteil an Atrazin- bzw. DEA-Werten, die über die Bestimmungsgrenze liegen, kann also als Indikator mit einer Unsicherheit von ca. 15% vorgeschlagen werden, sowie der Anteil an Messstellen, bei dem mindestens eine Substanz (Atrazin und seine Abbauprodukte) über der Bestimmungsgrenze liegt, selbst wenn die Übereinstimmung mit der Bestandsaufnahme weniger gut ist.</p> <p>Man kann jedoch nicht die Ergebnisse des RBES, die über den Trinkwassergrenzwert von 0.1 µg/L liegen, zur Abschätzung des Prozentanteils der Atrazin- oder DEA-Werte verwenden.</p> <p>In Hinblick auf eine zeitliche Entwicklung des Indikators "Prozentsatz der Befunde" könnte ein über 2 Jahre gleitendes Mittel als kurzzeitlicher Tendenz-Indikator dienen.</p>
---	--

## Sommaire

<b>RESUME – ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>3</b>
<b>1. CONTEXTE.....</b>	<b>3</b>
<b>2. METHODOLOGIE D'ETUDE POUR LES NITRATES .....</b>	<b>3</b>
<b>3. ETUDE DU RESEAU DE BASSIN DES EAUX SOUTERRAINES POUR LES NITRATES .....</b>	<b>4</b>
3.1 PRESENTATION DU RESEAU RBES .....	4
3.2 COMPARAISON DU RBES ET DE L'INVENTAIRE 2003 POUR LES NITRATES .....	6
3.3 ANALYSE DE LA VARIABILITE SPATIALE DES TENEURS EN NITRATES .....	7
<i>Cartographie des concentrations en nitrates.....</i>	<i>9</i>
<i>Optimisation du nombre de points de mesure du RBES .....</i>	<i>11</i>
3.4 ANALYSE TEMPORELLE DU RBES.....	11
<i>Examen des données disponibles.....</i>	<i>12</i>
<i>Evolution de la moyenne des teneurs en nitrates du RBES.....</i>	<i>15</i>
<i>Analyse variographique temporelle du RBES.....</i>	<i>16</i>
3.5 CONCLUSIONS EN TERMES D'INDICATEURS.....	17
<i>Indicateur "Moyenne des teneurs en nitrates du RBES".....</i>	<i>17</i>
<i>Variation de l'indicateur.....</i>	<i>18</i>
3.6 COMPARAISON AVEC D'AUTRES INDICATEURS .....	18
<b>4. ETUDE DU RESEAU ALLEMAND EUA POUR LES NITRATES.....</b>	<b>20</b>
4.1 LE RESEAU ALLEMAND EUA.....	20
4.2 COMPARAISON DU RESEAU EUA ET DE L'INVENTAIRE 2003 POUR LES NITRATES.....	20
4.3 COMPARAISON DE LA VARIABILITE SPATIALE DES DONNEES EN ALSACE ET AU PAYS DE BADE.....	21
4.4 ANALYSE GEOSTATISTIQUE DU RESEAU ALLEMAND EUA.....	23
4.5 ANALYSE TEMPORELLE DU RESEAU ALLEMAND EUA.....	24
4.6 CONCLUSIONS EN TERMES D'INDICATEURS.....	25
<i>Indicateur "Moyenne des teneurs en nitrates du réseau EUA".....</i>	<i>25</i>
<i>Variation de l'indicateur.....</i>	<i>25</i>
<b>5. EXAMEN DU RBES DU POINT DE VUE DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES .....</b>	<b>26</b>
5.1 METHODOLOGIE.....	26
5.2 COMPARAISON DU RBES ET DE L'INVENTAIRE GENERAL 2003 DU POINT DE VUE DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES .....	26
5.3 EVOLUTION TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS EN ATRAZINE ET DEA DU RBES.....	29
5.4 CONCLUSIONS EN TERMES D'INDICATEURS POUR LES PHYTOSANITAIRES .....	31
<i>Indicateur "Pourcentage de valeurs du RBES supérieures à la limite de quantification".....</i>	<i>31</i>
<i>Variation de l'indicateur.....</i>	<i>31</i>
<b>6. CONCLUSIONS GENERALES .....</b>	<b>32</b>

## 1. Contexte

Le projet « Indicateurs de suivi des actions de protection de la nappe rhénane » a été engagé par les partenaires allemands, suisses et français, sous maîtrise d'ouvrage de l'APRONA, dans le cadre de l'initiative communautaire INTERREG III.

L'objectif général du projet est de mettre à disposition des décideurs des cadrans de pilotage concernant les principales problématiques recensées en nappe à l'échelle du Rhin supérieur. Ces cadrans seront à double entrée : qualité de la nappe / actions de protection. Ils concerneront, sur la base des résultats de l'inventaire général de la qualité des eaux souterraines de 1996/1997 (Région Alsace, 2000a), les problématiques de la pollution par les nitrates, par les produits phytosanitaires, par les solvants chlorés et par les chlorures.

Les indicateurs d'état des eaux souterraines de la vallée du Rhin supérieur s'appuieront bien entendu sur les inventaires transfrontaliers de la qualité de la nappe réalisés sous maîtrise d'ouvrage de la Région Alsace, à un intervalle de 5 à 6 ans. Les résultats de ces inventaires, basés sur plus de 700 points de mesure côté alsacien et plus de 500 points côté badois, serviront de référence de la qualité générale de la nappe.

Il existe également des réseaux patrimoniaux analysés annuellement dans le Fossé rhénan supérieur, qui sont notamment le Réseau de Bassin des Eaux Souterraines (RBES) pour la France, et le réseau de l'Agence européenne de l'Environnement (EUA) pour l'Allemagne. Ces réseaux, basés sur un nombre réduit de points de mesure (41 pour l'Alsace et 15 pour le Pays de Bade), sont destinés à donner des tendances annuelles d'évolution de la qualité.

Le BRGM a été chargé dans le cadre du projet de réaliser des études statistiques et géostatistiques visant à évaluer, pour les problématiques "Nitrates" et "Phytosanitaires", la représentativité des réseaux de référence patrimoniaux par rapport aux inventaires généraux.

## 2. Méthodologie d'étude pour les nitrates

La géostatistique est une discipline de la statistique, fondée sur l'étude des variables régionalisées c'est à dire dont l'évolution dans l'espace (ou le temps) a un comportement localement aléatoire mais globalement structuré ; dans le cadre de l'étude, la concentration en nitrates constitue la variable régionalisée.

L'approche géostatistique permet de caractériser qualitativement et quantitativement, la variabilité spatiale d'un phénomène (dans le cas présent la qualité des eaux souterraines) par l'analyse des corrélations spatiales entre des données réparties dans l'espace. Pour quantifier le degré de corrélation spatiale ou plutôt la détérioration de cette corrélation en fonction de la distance, la géostatistique utilise la fonction appelée semi-variogramme. Elle est calculée à partir de mesures factuelles, puis modélisée pour répondre à différentes problématiques. Le variogramme est un outil statistique qui permet de quantifier l'incertitude qui entache toute valeur interpolée (*i.e.* l'erreur associée à toute estimation qui résulte d'une combinaison linéaire de données).

Cette analyse géostatistique est basée, pour la partie française, sur les résultats des inventaires de la qualité des eaux souterraines dans la vallée du Rhin supérieur réalisés en 1996/1997 et en 2003 sous maîtrise d'ouvrage de la Région Alsace (Région Alsace, 2000a, 2004, 2005). La comparaison des paramètres statistiques des deux inventaires (moyenne, médiane, variance) permet de déterminer si la différence entre les deux inventaires est statistiquement significative. L'analyse des données nitrates des inventaires généraux permet d'évaluer la variabilité statistique des données et leur corrélation spatiale, aboutissant à un semi-variogramme caractéristique. A partir de ce variogramme, il est possible de prédire l'erreur d'estimation que l'on fait en moyennant les données d'un sous-ensemble des points de mesure.

Dans le cas présent on s'interroge sur la représentativité du Réseau de Bassin des Eaux Souterraines (RBES), réseau patrimonial de mesure de la qualité des eaux souterraines dans le bassin Rhin-Meuse, géré par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse pour le compte de la DIREN, et qui comprend 41 points de mesure. On s'intéresse à l'erreur que l'on commet en utilisant les données du RBES pour représenter la situation des nitrates de l'ensemble de la nappe. On confirmera cette analyse en comparant les données 2003 du RBES avec les résultats de l'inventaire 2003. On pourra de plus comparer cette incertitude avec l'erreur d'échantillonnage obtenue par les analyses de contrôle faites au cours de l'inventaire général 2003.

Pour la partie allemande de la nappe de la vallée du Rhin supérieur, on pourra s'appuyer sur une étude géostatistique récente réalisée pour la Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU, aujourd'hui LUBW) dans le cadre d'un travail universitaire diplômant (Sonnentag, 2003). Cette étude nous apportera les éléments statistiques et géostatistiques nécessaires pour évaluer la représentativité du réseau de référence badois comparable au RBES et utilisé pour les rapports à l'Agence européenne de l'Environnement (EUA).

## **3. Etude du Réseau de Bassin des Eaux Souterraines pour les nitrates**

### **3.1 PRESENTATION DU RESEAU RBES**

Le réseau actuel compte 41 piézomètres répartis sur l'ensemble de la nappe d'Alsace comme le montre la figure 1, ce qui représente un peu plus de 5 % du nombre de points de mesure de l'inventaire général. On notera que 5 piézomètres sont situés dans les alluvions pliocènes de Haguenau. Les 36 autres points se répartissent dans l'aquifère principal, qui comprend des alluvions rhénanes d'origine majoritairement alpine et des alluvions d'origines vosgiennes apportées par les affluents vosgiens de l'Ill et du Rhin.

Ce réseau fait l'objet de prélèvements tous les 6 mois depuis mars 1999. Les campagnes sont réalisées en mars-avril (période de hautes eaux de la nappe en général) et en septembre-octobre-novembre (période de basses eaux). Nous disposons donc d'une campagne de mesures synchrone de l'inventaire général de 2003, réalisé courant octobre. Il nous manque malheureusement une campagne de mesures du RBES synchrone de l'inventaire général précédent de 1996-1997.

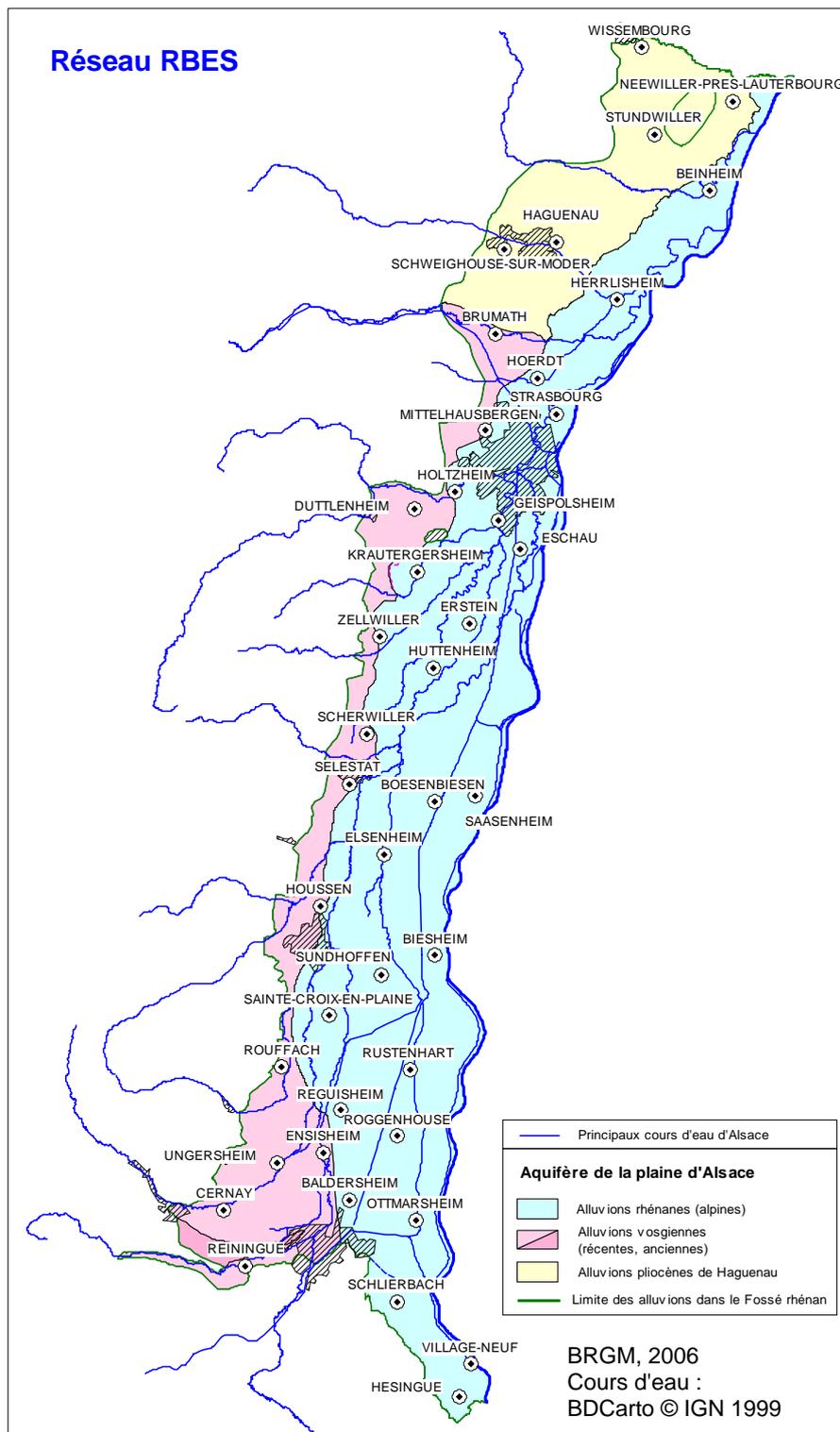


Fig. 1 : Carte de localisation des points de mesure du Réseau de Bassin des Eaux Souterraines

### 3.2 COMPARAISON DU RBES ET DE L'INVENTAIRE 2003 POUR LES NITRATES

La représentativité des données (ici les analyses des nitrates sur les points d'un réseau de mesure) est fondée sur une analyse statistique préliminaire des teneurs. Le tableau 1 fournit les statistiques élémentaires de 5 populations de données :

- 3 populations de données concernent les données du réseau RBES, à savoir :
  - ✓ l'ensemble des forages du réseau (41 données) localisés sur les alluvions et le Pliocène ;
  - ✓ les forages localisés au droit des faciès alluvionnaires de l'aquifère principal, au nombre de 36 ;
  - ✓ les forages communs au réseau et à l'inventaire 2003, au nombre de 32 ; 4 forages du réseau n'ont en effet pas leur équivalent dans l'inventaire 2003 (Mussig, Meyenheim, Ensisheim, Ottmarsheim).
- 2 populations pour les données de l'inventaire 2003 :
  - ✓ les données de l'inventaire correspondant aux forages du RBES (32 données) ;
  - ✓ l'ensemble des données de l'inventaire 2003 (658 données).

	Données RBES 2003			Données Inventaire 2003	
	Alluvions et pliocène	Alluvions	Alluvions (- 4 forages)	Forages équivalents RBES	Population complète
Effectif	41	36	32	32	658
Teneur minimale (NO3 mg/L)	2.3	3	3	1.9	0
Teneur maximale (NO3 mg/L)	96.2	77.2	77.2	71.8	217
Teneur Moyenne (NO3 mg/L)	25.8	25.2	23.4	22.3	26.4
Ecart-type	20.2	16.2	15.8	16	22.2
Intervalle de confiance à 95%	6.3	5.4	5.6	5.7	1.7

Tableau 1 : Paramètres statistiques des différentes séries de données ( RBES et Inventaire 2003)

La comparaison des **teneurs moyennes** du tableau 1 attire plusieurs remarques :

- ✓ les deux premières séries de données du réseau (colonnes 1, 2 du tableau) affichent des teneurs moyennes comparables (25,8 et 25,2 mg/L), la différence de 0,6 mg/L est négligeable ;
- ✓ la suppression de 4 forages dans les données du RBES (colonne 3), entraîne une diminution sensible de la teneur moyenne qui passe de 25,2 à 23,4 mg/L (teneur inférieure à la valeur-guide de 25 mg/L) ;
- ✓ les deux séries de données regroupant 32 forages communs (RBES/Inventaire) ont des teneurs moyennes comparables (23,4 et 22,3 mg/L). La différence moyenne, égale à 1,1, est comprise dans l'intervalle de confiance à 95% qui vaut 2,1 mg/L ; ce résultat confirme que les deux séries sont statistiquement comparables. Il n'y a pas de biais dû au fait que les prélèvements et analyses sont réalisés par des laboratoires différents.
- ✓ la teneur moyenne de ces 32 forages de l'inventaire (colonne 4 : 22,4 mg/L) est significativement inférieure à la moyenne de l'ensemble des données de l'inventaire (colonne 5 : 26,4 mg/L) ; la différence observée (4,1 mg/L), qui représente un écart de teneur de 16%, remet en cause la représentativité de cette série de données.
- ✓ L'intervalle de confiance calculé pour chaque série de données constitue un indicateur de la représentativité de la teneur moyenne. On constate que seule la série constituée par l'ensemble des données de l'inventaire affiche un intervalle de confiance acceptable qui vaut 1,7 mg/L, soit une **incertitude de 6%** sur la teneur moyenne mesurée ; les séries constituées par un nombre réduit de données montrent un intervalle de confiance supérieur à 5 mg/L, soit une erreur potentielle de l'ordre de 25% sur la teneur moyenne. On notera cependant que l'intervalle de confiance est une valeur maximale de l'erreur potentielle, qui est plus faible lorsque les données sont corrélées spatialement. Ce point va être examiné dans la suite.

### 3.3 ANALYSE DE LA VARIABILITE SPATIALE DES TENEURS EN NITRATES

Les données des inventaires de la qualité de la nappe d'Alsace réalisés sous maîtrise d'ouvrage de la Région Alsace ont déjà fait l'objet d'une étude géostatistique détaillée dans le cadre d'une étude prospective de l'impact économique de la pollution de la nappe d'Alsace par les nitrates réalisée par le BRGM pour la Région Alsace (Blanchin et Elsass, 2004). Cette étude fondée sur l'analyse variographique des teneurs a permis :

- de caractériser la variabilité des teneurs dans l'espace et le temps ;
- d'élaborer une cartographie des concentrations et de mettre en évidence leur évolution spatiale (stabilité, augmentation ou diminution entre les inventaires successifs).

Nous utiliserons les principaux résultats de l'étude ci-après.

Le but de l'analyse variographique est d'appréhender et de caractériser le comportement spatial des teneurs. Cette étape passe obligatoirement par le calcul des variogrammes directionnels et l'ajustement à un modèle théorique. Le variogramme expérimental permet de quantifier les corrélations entre les teneurs mesurées sur différents forages, en fonction de la distance qui les sépare. Pour mettre en évidence les anisotropies éventuelles, les variogrammes expérimentaux ont été calculés selon deux directions orthogonales à savoir N10°E qui représente la direction principale d'écoulement de la nappe, parallèle au Rhin, et la direction transversale N100°E qui correspond à peu près aux écoulements de la nappe au débouché des vallées vosgiennes.

La figure 2 regroupe les variogrammes sur lesquels reposent les résultats de l'analyse. Les figures 2a et 2b présentent les variogrammes directionnels calculés sur les 2 séries de données équivalentes regroupant 32 forages (la fig. 2a correspond aux données du réseau RBES et la fig. 2b aux données correspondantes de l'inventaire 2003).

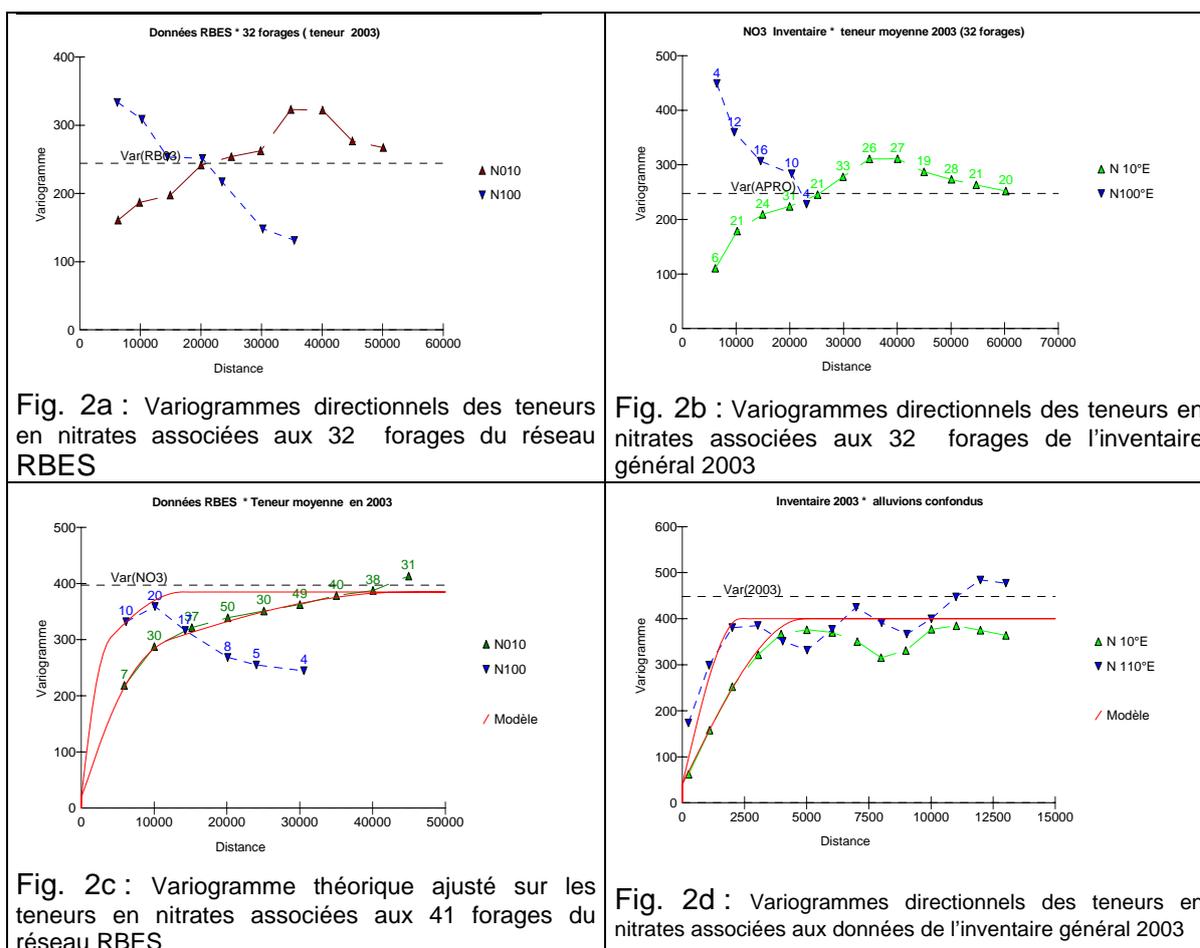


Fig. 2a : Variogrammes directionnels des teneurs en nitrates associées aux 32 forages du réseau RBES

Fig. 2b : Variogrammes directionnels des teneurs en nitrates associées aux 32 forages de l'inventaire général 2003

Fig. 2c : Variogramme théorique ajusté sur les teneurs en nitrates associées aux 41 forages du réseau RBES

Fig. 2d : Variogrammes directionnels des teneurs en nitrates associées aux données de l'inventaire général 2003

Fig. 2 : Variogrammes des teneurs en nitrates associées aux différentes séries de données

Le comportement des variogrammes, à travers l'allure des courbes, met en évidence plusieurs caractéristiques :

- ✓ une corrélation positive bien marquée suivant la direction principale d'écoulement (N10°E) ;
- ✓ une absence de corrélation suivant la direction orthogonale (N100°E) ; l'indépendance observée selon cette direction s'explique en partie par un nombre insuffisant de données dans les alluvions vosgiennes, mais également par un comportement plus aléatoire reflétant la variabilité des directions d'écoulement dans les zones de bordure de la nappe.

La figure 2c reproduit les variogrammes directionnels calculés sur la série complète des données du réseau RBES (n=41 données). Par comparaison avec les variogrammes des données de l'inventaire général 2003 (figure 2d), la corrélation suivant la direction N10°E est conservée et correspond incontestablement à une réalité physique du phénomène, en conformité avec les résultats de l'étude variographique réalisée sur l'ensemble des données de l'inventaire. Dans la direction orthogonale, on observe une faible corrélation marquée par un comportement croissant de la courbe correspondant aux deux premiers points expérimentaux du variogramme.

Le modèle théorique est ajusté avec 3 structures anisotropes dont les paramètres sont fournis dans le tableau 2. Ce modèle servira d'une part à construire la carte krigée des teneurs et d'autre part à analyser l'évolution de l'erreur d'estimation associée à la teneur moyenne krigée en fonction du nombre de données prise en compte.

Type de modèle	Palier	Portée direction N10°E	Portée direction N100°E
Effet de pépite	20		
Sphérique	55	7000	2500
Sphérique	170	2000	4000
Sphérique	140	45000	14000

Tableau 2 : Paramètres d'ajustement du variogramme calculé sur les 41 données du réseau RBES

## Cartographie des concentrations en nitrates

Un modèle numérique des concentrations en nitrates, limité aux deux faciès alluvionnaires (rhénan et vosgien), est construit à partir des données 2003 du réseau RBES. La méthode d'interpolation utilisée est le krigeage qui prend en compte le variogramme modélisé de la figure 2c. Le modèle krigé respecte une maille carrée de 2500 m de côté, compatible avec la densité du réseau de mesure qui regroupe 36 données.

La concentration moyenne estimée sur la zone d'étude est obtenue en moyennant les pixels krigés. La teneur estimée est égale à 24,8 mg/L ; cette valeur comparée à la teneur moyenne des données factuelles qui vaut 25,2 mg/L, confirme que le krigeage est un estimateur non biaisé.

La carte donnant l'image de la répartition spatiale des concentrations est présentée fig. 3a.

Parallèlement à cette carte, la figure 3b présente la cartographie des concentrations krigées issue des données de l'inventaire général 2003. La comparaison des 2 cartes attire les remarques suivantes :

- ✓ la carte des concentrations construite avec les données du réseau RBES ne reproduit pas les variations locales associées aux zones de fortes concentrations ;
- ✓ les tendances générales observées lors des études précédentes ne sont guère visibles, à l'exception de la zone située au nord de Strasbourg caractérisée par de faibles concentrations.

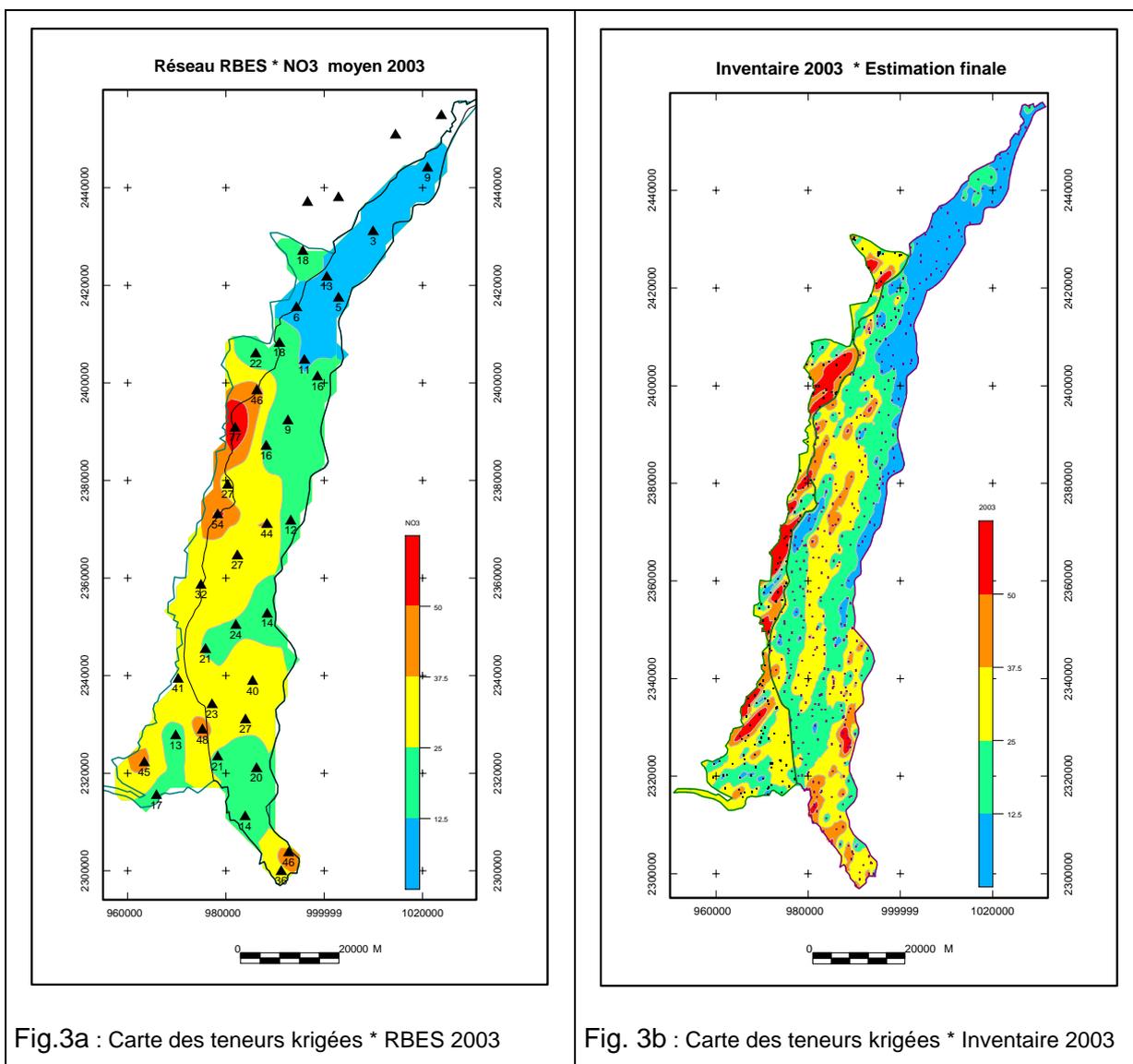


Fig. 3 : Cartographie des concentrations krigées

On peut donc dire que la carte construite à partir du réseau RBES n'est pas représentative du phénomène étudié puisque les tendances générales, et *a fortiori* les variations locales, ne sont pas respectées. Ce n'est d'ailleurs pas l'objet du RBES de permettre une cartographie générale de la nappe, mais de suivre des tendances.

### Optimisation du nombre de points de mesure du RBES

Le variogramme constitue un outil de décision qui permet d'optimiser un réseau de surveillance ; en effet, dans le cadre des modèles géostatistiques, la précision d'une estimation ne dépend pas des valeurs aux points de mesures mais de la localisation des données et des caractéristiques structurales synthétisées par le variogramme ; on peut donc envisager plusieurs scénarios de réseaux de mesure et prédire la précision qui découlera de chacun d'eux, ce qui permet de trouver la meilleure adéquation entre gain de précision et coût de l'opération.

Le tableau 3 ci-dessous affiche en fonction du nombre de mesures, la précision associée à la teneur moyenne krigée, en considérant un intervalle de confiance de 68%. On note dans le cas présent que l'erreur d'estimation associée à la teneur moyenne krigée à partir des 36 mesures est égal à 3,55 mg/L, autrement dit la teneur réelle inconnue peut varier dans l'intervalle **24,8 +/- 3,6 mg/L, soit une incertitude relative de 15%**. Les calculs montrent que l'erreur d'estimation n'est pas inversement proportionnelle au nombre de mesures mais qu'elle diminue progressivement en fonction du nombre de mesures (tableau 3).

On constate que dans le cas présent on se situe dans une fourchette où il faudrait énormément de points supplémentaires pour améliorer significativement la précision : on peut donc dire que **le réseau RBES actuel de la nappe d'Alsace est optimal**.

Nombre de points de mesure	36	36 + 20	36 + 40	36 + 80	36 + 160
Erreur globale d'estimation (mg/L)	3.6	3.1	2.8	2.4	2.1
Teneur estimée par krigeage (mg/L)	24.8				

Tableau 3 : Evolution de l'erreur d'estimation en fonction du nombre de mesures

### 3.4 ANALYSE TEMPORELLE DU RBES

L'objet d'un réseau tel que le RBES est de fournir des indications sur les tendances. Nous avons déjà constaté que l'incertitude sur la moyenne du RBES était de l'ordre de 15%. Nous allons maintenant nous intéresser à l'évolution temporelle des concentrations en nitrates mesurées à intervalle de temps régulier.

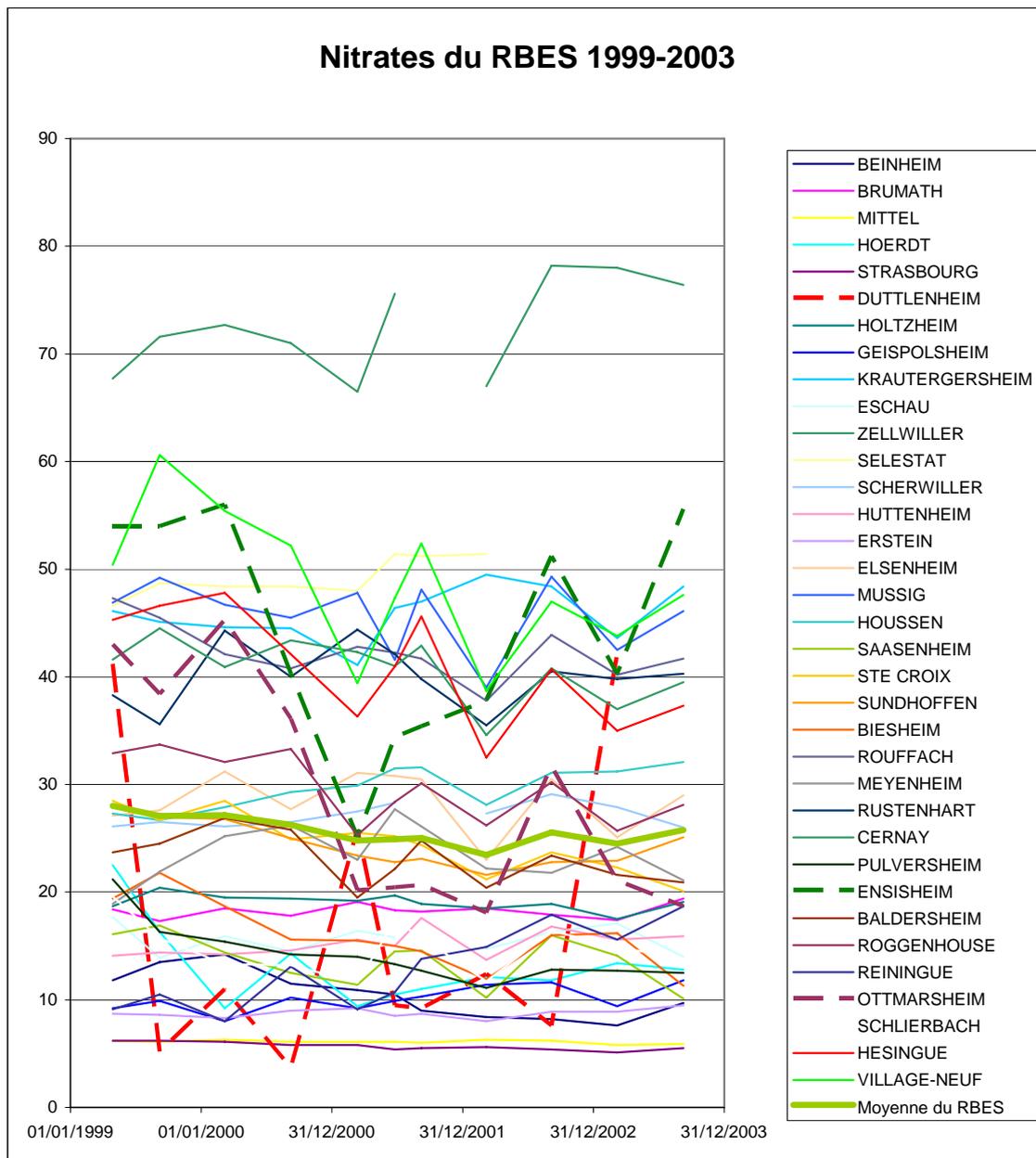


Figure 4 : Evolution des teneurs en nitrates du RBES de 1999 à 2003

### Examen des données disponibles

Le réseau RBES fait l'objet de prélèvements tous les 6 mois depuis mars 1999. Les campagnes sont réalisées en mars-avril (période de hautes eaux de la nappe en général) et en septembre-octobre-novembre (période de basses eaux). Le graphique de la figure 4 représente l'ensemble des données disponibles de 1999 à 2003 sur la nappe d'Alsace hors Pliocène de Haguenau.

Ce graphique permet de constater la large fourchette de teneurs des points mesurés. La plupart des points montrent une faible évolution sur la période, avec des oscillations inférieures à 10 mg/L. On remarque cependant trois historiques extrêmement erratiques (courbes pointillées), dont les valeurs fluctuent de 30 mg/L voire plus d'une

année sur l'autre : ce sont les points de Duttlenheim, Ensisheim et Ottmarsheim : il serait intéressant d'examiner le fonctionnement hydrologique de ces ouvrages et de se poser la question de leur représentativité.

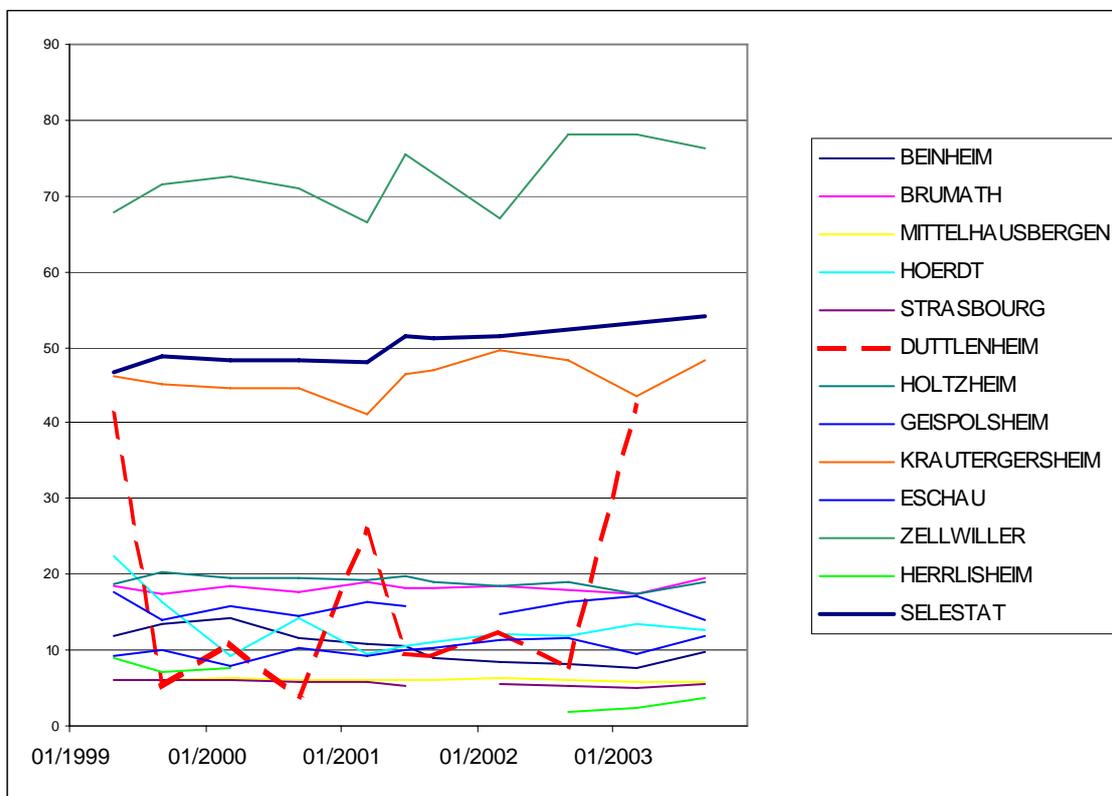


Figure 5 : Evolution des teneurs en nitrates du RBES de 1999 à 2003 au Nord de Sélestat

Si l'on examine les données au Nord de Sélestat, on constate qu'elles sont en général faibles (en dessous de 20 mg/L) et peu fluctuantes à l'exception de la série erratique de Duttlenheim (variations jusqu'à 40 mg/L !), et des valeurs très élevées de Zellwiller, Krautergersheim et Sélestat qui ont nettement tendance à augmenter.

Les teneurs au Sud de Sélestat sont beaucoup plus variées, entre 10 et 50 mg/L (fig. 6). On note les historiques erratiques d'Ensisheim et Ottmarsheim avec des variations de 30 mg/L. Mais on remarque également des fluctuations saisonnières bien marquées sur la plupart des historiques, de l'ordre de 5 mg/L, avec presque systématiquement un minimum au printemps et un maximum en automne.

L'explication de ce phénomène qui semble suivre les alternances de hautes eaux et basses eaux de la nappe n'est pas évidente. Une comparaison avec la pluviométrie montre qu'il n'est pas directement lié à la quantité de pluie tombée au cours du semestre, qui est beaucoup plus irrégulière d'une année sur l'autre.

Les données des points de mesure situés dans la terrasse pliocène de Haguenau sont très disparates et difficiles à interpréter (fig. 7). Seule la chronique du point de Haguenau montre une belle décroissance de type exponentiel qui mériterait un examen plus détaillé.

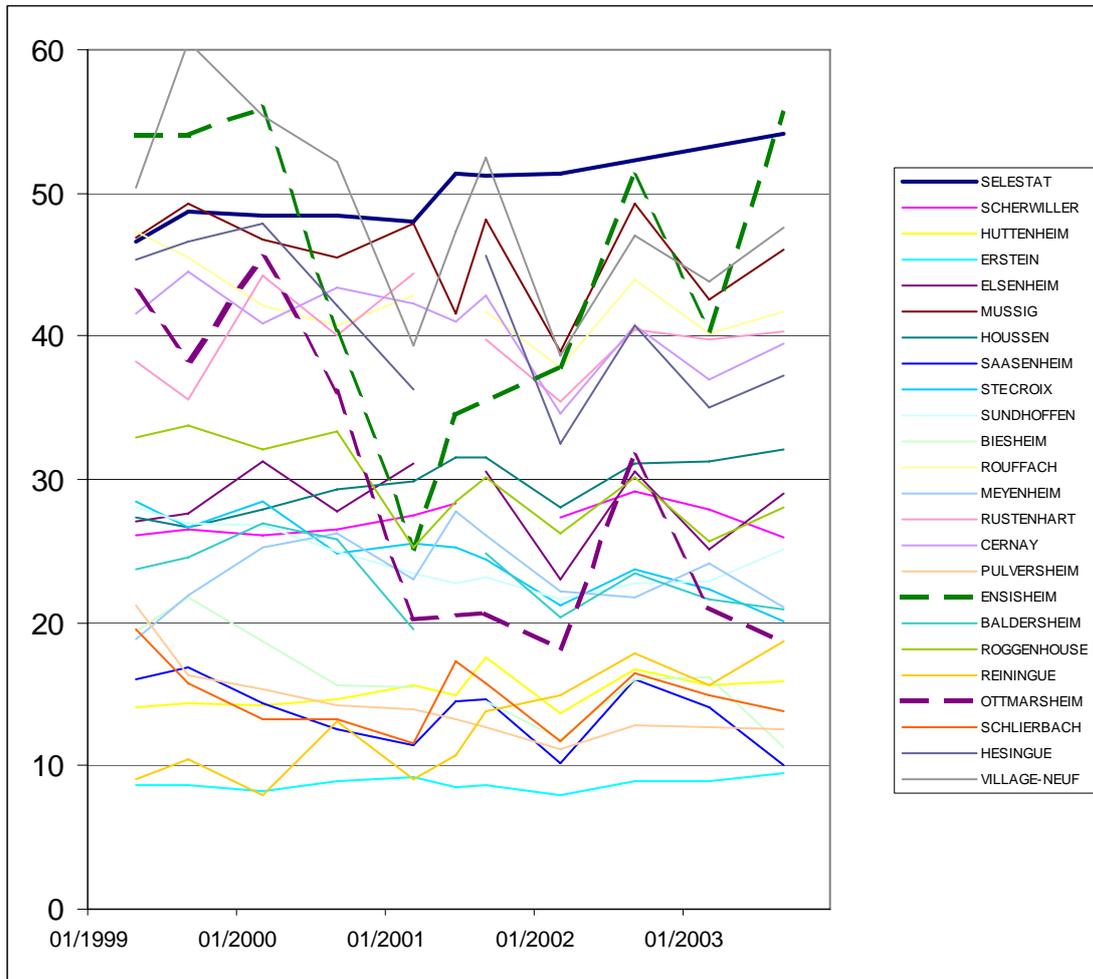


Figure 6 : Evolution des teneurs en nitrates du RBES de 1999 à 2003 au Sud de Sélestat

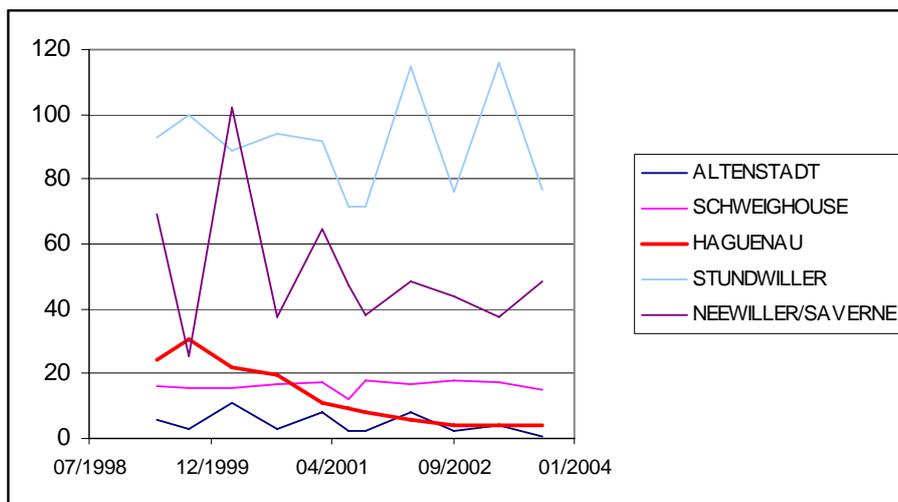


Figure 7 : Evolution des teneurs en nitrates du RBES de 1999 à 2003 dans le Pliocène de Haguenau

## Evolution de la moyenne des teneurs en nitrates du RBES

Nous avons vu que la variabilité saisonnière des données et le comportement instable des séries erratiques induisaient une incertitude certaine sur les données nitrates du RBES. Néanmoins, le coefficient de variation des données d'une campagne du RBES reste inférieur à 1 (0,6) et il est justifié de calculer une moyenne arithmétique de tous les ouvrages<sup>1</sup>.

Cette moyenne (courbe vert clair de la figure 7) baisse de 28 mg/L au printemps 1999 jusqu'à 23,5 mg/L au printemps 2002 pour remonter à 25,8 mg/L à l'automne 2003. Si l'on supprime les trois séries de données erratiques, la courbe fluctue moins et le minimum du printemps 2002 disparaît (fig. 8). Si l'on calcule une moyenne glissante sur une ou plusieurs années, l'évolution est lissée et la remontée de 2003 s'efface pour une moyenne glissante sur les 3 années précédentes.

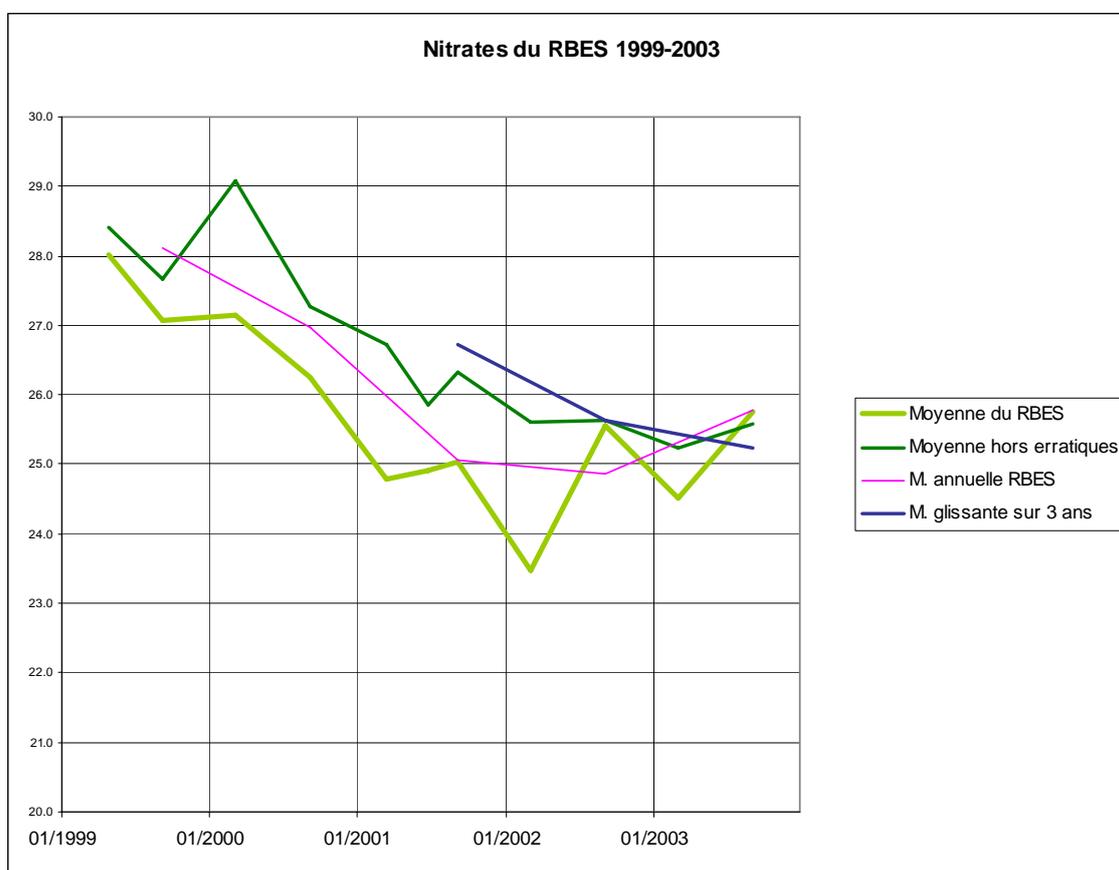


Figure 8 : Moyennes des nitrates du réseau RBES de 1999 à 2003

En dépit de ces problèmes de séries erratiques, les chroniques du RBES montrent globalement une baisse des teneurs en nitrates depuis 1999, que l'on peut mettre en évidence en calculant une moyenne glissante sur 3 ans. La situation de l'automne

<sup>1</sup> Un coefficient de variation inférieur à 1 indique que la distribution est proche d'une distribution gaussienne et que la moyenne arithmétique est une bonne estimation de l'espérance mathématique.

2003 semble par contre se situer dans un contexte de remontée des teneurs à court terme.

### Analyse variographique temporelle du RBES

Pour étudier la corrélation des teneurs en nitrates en fonction du temps, la géostatistique utilise également la fonction variogramme. L'analyse de la variabilité temporelle est fondée sur les données des 36 piézomètres du RBES localisés au droit des faciès alluvionnaires. La fig. 9 représente l'histogramme de l'ensemble des teneurs en nitrates. La distribution des teneurs est bimodale, avec une sous population qui regroupe les quelques forages caractérisés par des concentrations élevées (Zellwiller, Sélestat, Mussig, Krautergersheim, Ensisheim, Cernay, Helsingue, Village-Neuf).

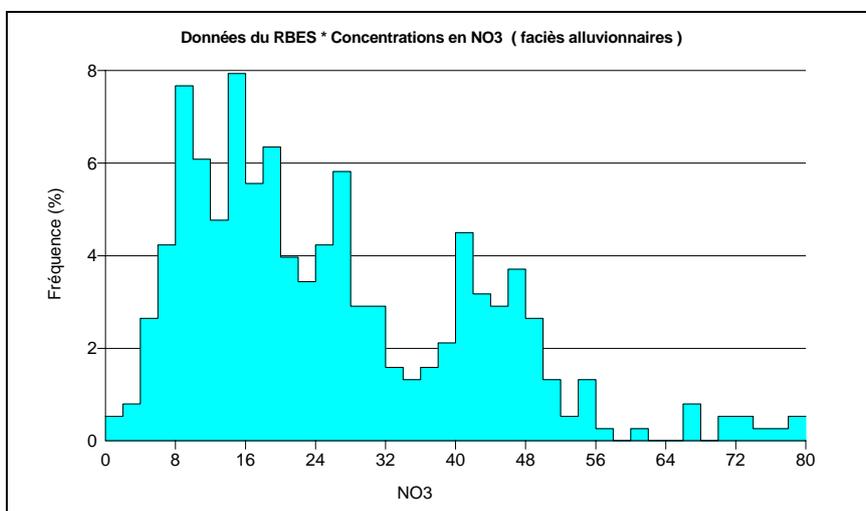


Fig. 9 : Histogramme des concentrations en nitrates (points de mesure du RBES localisés sur les faciès alluvionnaires hors Pliocène)

Les mesures disponibles sur le réseau RBES sont trop récentes et trop peu nombreuses (2 analyses annuelles en moyenne connues depuis mars/avril 1999) pour calculer un variogramme expérimental représentatif de la variabilité temporelle sur chaque forage. En conséquence la variabilité temporelle est calculée sur l'ensemble des mesures du RBES.

Les variogrammes expérimentaux ( fig. 10) sont calculés sur deux séries de données :

- ✓ la première intègre l'ensemble des données, soit 378 mesures ;
- ✓ la deuxième série correspond à la première après suppression de 10 valeurs jugées trop erratiques que l'on observe au droit de 3 forages (Duttlenheim, Elsenheim, Ensisheim).

L'allure des courbes et en particulier leur croissance en fonction du temps traduit une structuration ou corrélation temporelle que l'on peut évaluer graphiquement. Ainsi le variogramme expérimental calculé avec l'ensemble des données atteint son palier au voisinage de 24 mois, période de temps au delà de laquelle il est impossible de prévoir comment les teneurs vont évoluer.

La suppression des quelques valeurs jugées erratiques modifierait de façon significative le comportement du variogramme expérimental qui afficherait une corrélation supérieure à 4 ans (fig. 10, série "-10 valeurs"). On retrouve ainsi les observations que nous faisons sur la moyenne (cf. figure 8) : en effet, si l'on inclut les chroniques erratiques, l'évolution de la teneur moyenne du RBES peut s'inverser au bout de deux ans : la "visibilité" de la tendance en nitrates ne dépasse pas les deux ans. Si l'on exclut ces valeurs erratiques, l'évolution de la moyenne semble suivre une baisse plus régulière.

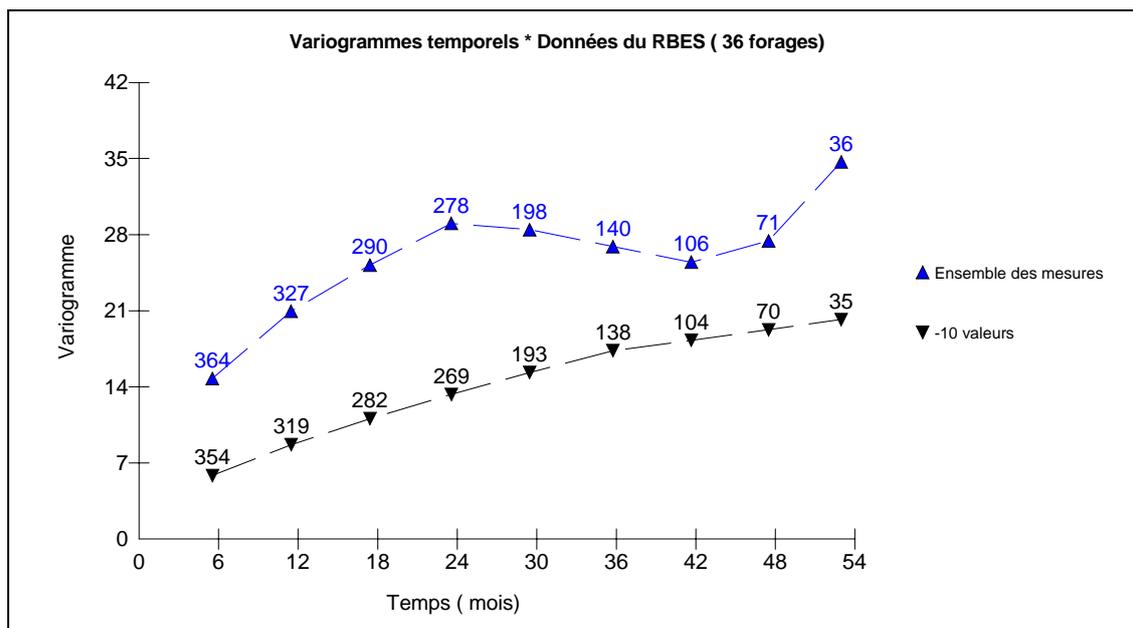


Fig. 10 : Variogrammes expérimentaux temporels

Ces observations soulignent l'intérêt d'examiner de plus près l'origine du comportement erratique des teneurs en nitrates mesurées sur les 3 forages en question. Si ce comportement est dû à des facteurs très locaux, il peut être intéressant de remplacer ces points de mesure par d'autres plus fiables.

### 3.5 CONCLUSIONS EN TERMES D'INDICATEURS

#### Indicateur "Moyenne des teneurs en nitrates du RBES"

La moyenne des teneurs en nitrates du RBES peut être proposée comme indicateur de l'état global de la nappe par comparaison avec les résultats de l'inventaire général 2003. Les paramètres statistiques (coefficient de variation) indiquent que la moyenne arithmétique des analyses du RBES est une bonne estimation, avec une précision de l'ordre de  $\pm 15\%$ .

Le réseau RBES actuel est optimal en termes de nombre de points de mesure, car il faudrait un grand nombre de points supplémentaires pour améliorer significativement cette précision.

Un certain nombre de points de mesure montrent un comportement erratique qui nuit à la visibilité des tendances. Le fonctionnement hydrogéologique local de ces points

serait à examiner afin de juger de leur représentativité et de leur maintien dans le réseau.

### Variation de l'indicateur

En termes d'évolution de cet indicateur, la précision de 15% sur la moyenne signifie qu'une variation de cette moyenne de moins de 15% ne peut être considérée comme significative puisqu'elle se trouve à l'intérieur de la fourchette d'incertitude. Inversement on considérera **les variations de plus de 15 % comme significatives**.

De fait les variations de la moyenne d'une année sur l'autre sont de l'ordre de 5 %, et l'examen variographique temporel montre que la visibilité de la tendance est de l'ordre de 2 ans : au-delà de deux ans un retournement de tendance est toujours possible. Cette absence de visibilité est en partie due aux points présentant des chroniques erratiques.

Ces constatations confortent le principe de la réalisation d'un inventaire général plus complet tous les 5 à 6 ans. Il est donc difficile de définir un indicateur de tendance fiable à partir de la moyenne du RBES : les variations de la moyenne nous donneront une tendance à très court terme (2 ans). La moyenne glissante sur 3 ans pourrait nous donner un indicateur plus stable, mais nous manquons de recul pour pouvoir l'affirmer.

### 3.6 COMPARAISON AVEC D'AUTRES INDICATEURS

La question de l'évolution de l'indicateur "Moyenne du RBES" nous amène à rechercher à quoi pourrait être liées les tendances constatées. Nous avons donc essayé de comparer l'évolution de la moyenne avec celle d'autres indicateurs.

La première question qui vient à l'esprit est l'influence du climat et notamment de la pluie. Si l'on reporte la moyenne des quantités de pluie mensuelles (en mm)<sup>2</sup> sur le semestre pour se ramener au pas de temps des mesures du RBES, on constate comme nous l'avons déjà noté que ces quantités varient énormément d'une année sur l'autre (fig. 11).

Lorsqu'on ramène les données de pluie à des moyennes glissantes, on obtient une évolution plus claire lorsqu'on regarde la moyenne des pluies mensuelles sur les 2 ou 3 années précédentes. Dans ce cas il apparaît un maximum de pluies à l'automne 2002, soit une évolution approximativement inverse de celle des teneurs en nitrates.

Nous avons également reporté, sur la suggestion de S. Ramon de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, les excédents d'azote agricole en Alsace (en kg d'azote par ha de SAU, cf. tableau 4). Ces excédents étaient en diminution constante jusqu'en 2001 en raison des efforts consentis par la profession agricole pour diminuer les quantités de fertilisants utilisés. Cette tendance à la diminution a commencé à s'inverser en 2002 et la situation s'est considérablement aggravée avec les mauvaises récoltes dues à la sécheresse de 2003.

---

<sup>2</sup> Données Météo France

Région Alsace		1980	1985	1990	1995	2000	2001	2002	2003
Apport d'azote animal	kgN/ha SAU	74.7	68.3	61.5	59	55.1	56.5	57.5	55.6
Apport d'azote d'engrais chimiques	kgN/ha SAU	88.9	97.3	106.8	108.8	121.5	97.2	115.1	116.2
Export d'azote par la récolte	kgN/ha SAU	109.3	120.5	117.3	119.9	152.8	135.6	139.7	109.2
EXCEDENT d'azote agricole	kgN/ha SAU	54.3	45.1	51.1	47.9	23.8	18.2	33	62.5
Apport d'azote organique total	kgN/ha SAU	54.3	49.5	44.2	38.2	29.3	23.1	25	37.9

Tableau 4 : Statistiques sur l'usage des engrais en région Alsace (source : Agence de l'eau Rhin-Meuse)

Si l'on reporte sur le graphique les valeurs d'excédents d'azote lissées sur les 3 à 5 années précédentes pour tenir compte du temps de transfert des nitrates minéralisés dans les sols jusqu'à la nappe, on obtient une courbe similaire à celle de l'évolution des teneurs en nitrates du RBES (courbe marron, figure 11).

**Il n'est donc pas impossible que la courbe des nitrates du RBES reflète les interactions entre la réduction d'utilisation des engrais et les conditions climatiques.**

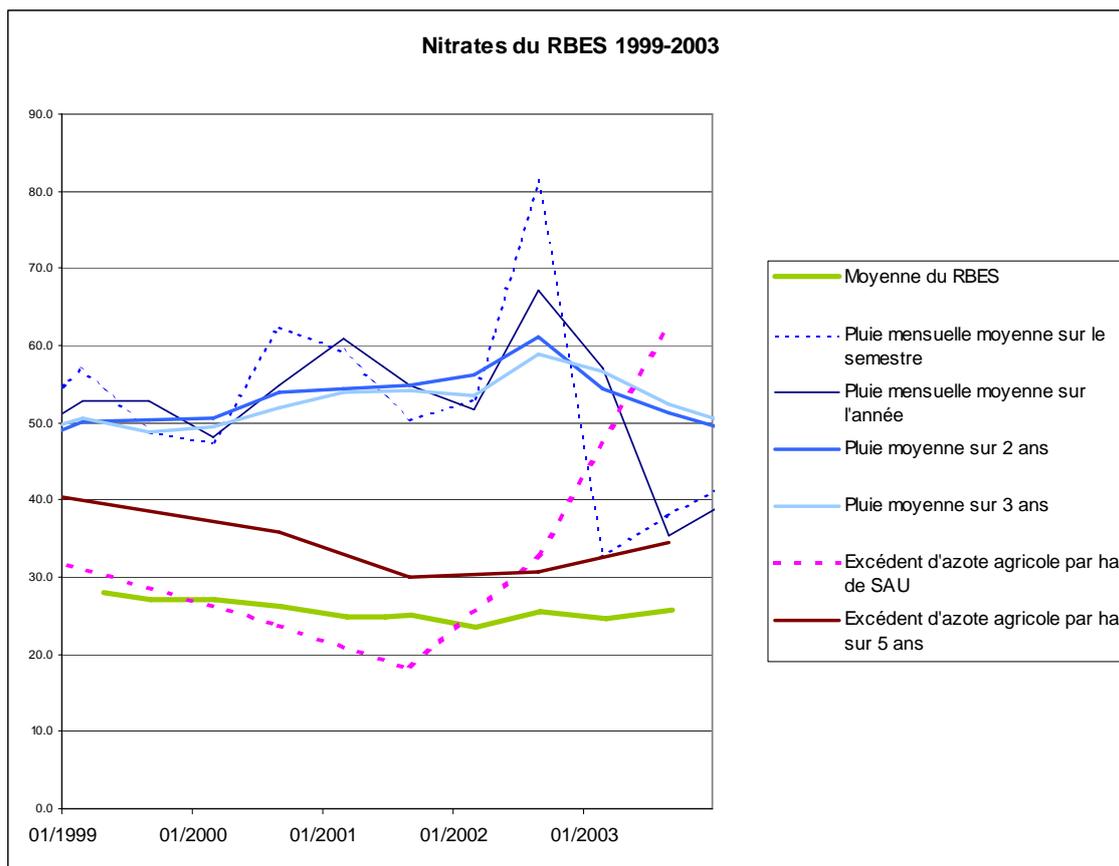


Figure 11 : Evolution des nitrates du RBES 1999-2003 - Comparaisons de tendances

## 4. Etude du réseau allemand EUA pour les nitrates

### 4.1 LE RESEAU ALLEMAND EUA

Au Bade-Würtemberg un grand nombre de points sont analysés chaque année dans le cadre d'un programme de routine. Les points prélevés et les paramètres analysés diffèrent chaque année, de sorte que l'on ne dispose pas tous les ans de l'équivalent d'un inventaire général de la qualité des eaux souterraines.

Il existe un réseau de référence badois comparable au RBES, servant à une évaluation annuelle de la qualité des eaux souterraines, et utilisé pour les rapports à l'Agence européenne de l'Environnement (*Europäisches Umweltamt*, EUA), que l'on désignera par réseau EUA dans la suite.

Les données aimablement mises à la disposition du projet "Indicateurs" par la Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU, aujourd'hui LUBW) concernent 15 points de mesure disposant tous d'analyses des nitrates depuis 1999 au moins. Les prélèvements sont réalisés tous les 2 mois sur 9 à 10 points et une fois par an (en automne) sur les 15 points depuis 1999.

La répartition des points est présentée en figure 12. On constate tout d'abord que les points Zeutern, Ettenheim et Höllstein (vallée de la Wiese) se situent en dehors des alluvions du Fossé rhénan supérieur, dans des alluvions de rivières de la Forêt-Noire. Le réseau EUA n'est donc pas strictement calé sur l'aquifère de la vallée du Rhin supérieur. La densité de points est très inférieure à celle du RBES.

### 4.2 COMPARAISON DU RESEAU EUA ET DE L'INVENTAIRE 2003 POUR LES NITRATES

La moyenne des teneurs en nitrates du réseau EUA en automne 2003 est de 22,1 mg/L. Si l'on élimine le point Höllstein qui est une source de la vallée de la Wiese assez éloignée du Fossé rhénan, la moyenne baisse à 21,9 mg/L pour 14 points, si l'on élimine les 3 points extérieurs au Fossé la moyenne baisse à 20,8 mg/L pour 12 points (cf. figure 12).

	EUA 15 points Octobre 2003	EUA 14 points Octobre 2003	EUA 12 points Octobre 2003	Inventaire 2003
Moyenne	22.1	21.9	20.8	30.3
Ecart	18.7	19.4	18.7	31.4
CV	0.8	0.9	0.9	1.0
Nombre	15	14	12	535
IC/2	9.6	11.4	11.9	2.7
Incertitude relative	44%	52%	57%	9%

Tableau 5 : Paramètres statistiques comparés

### 4.3 COMPARAISON DE LA VARIABILITE SPATIALE DES DONNEES EN ALSACE ET AU PAYS DE BADE

Dans une première étape, nous comparerons le comportement spatial des teneurs en nitrates côté allemand et côté français.

Pour la partie allemande, les données disponibles sont issues des analyses effectuées régulièrement par la LUBW (ex-LfU). Un travail universitaire diplômant de géostatistique vient d'être réalisé sur les données de la LUBW (Sonnentag, 2003).

La comparaison porte sur les résultats de l'analyse variographique acquis sur les données en nitrates de l'inventaire 2003 côté français et sur la zone du Hochrheingebiet/Oberrhein-Tiefland côté allemand.

On pourra se référer à la figure 2d qui reproduit les variogrammes directionnels calculés sur les données de l'inventaire 2003 (alluvions rhénanes et vosgiennes confondues). L'allure des courbes montre l'existence d'une anisotropie directionnelle, avec une corrélation plus importante selon la direction principale d'écoulement de la nappe N10°E.

Le tableau 6 regroupe les paramètres du variogramme théorique ajusté coté français et reporte également les paramètres du variogramme ajusté sur la zone du Hochrheingebiet /Oberrhein-Tiefland. La comparaison des paramètres fait ressortir les conclusions suivantes :

- ✓ les directions d'anisotropie sont globalement conservées : N10°E coté français, NS coté allemand pour la direction correspondant à la plus grande continuité ;
- ✓ les portées sont également comparables, à savoir 5000 m environ dans la direction d'écoulement et 2300 m dans la direction transversale WE ;
- ✓ l'effet de pépité ainsi que les paliers sont plus élevés côté allemand ; le seuillage des données pratiqué côté français (les teneurs en NO<sub>3</sub> sont écrêtées à 160 mg/L pour une meilleure corrélation), explique en partie l'écart observé.

On en conclut que **la variabilité des données est tout à fait comparable entre le côté alsacien et le côté badois de la nappe de la vallée du Rhin supérieur.**

			Directions d'anisotropie			
			N-S		E-W	
	Nombre de données (données anormales)	Effet de pépité	Portée	Palier	Portée	Palier
Inventaire 2003 Coté français	580 (5)	40	5200	360	2300	360
Inventaire Coté allemand	981 (0)	75	4950	712	2300	610

Tableau 6 : Comparaison des paramètres d'ajustement des variogrammes calculés sur les données de l'inventaire

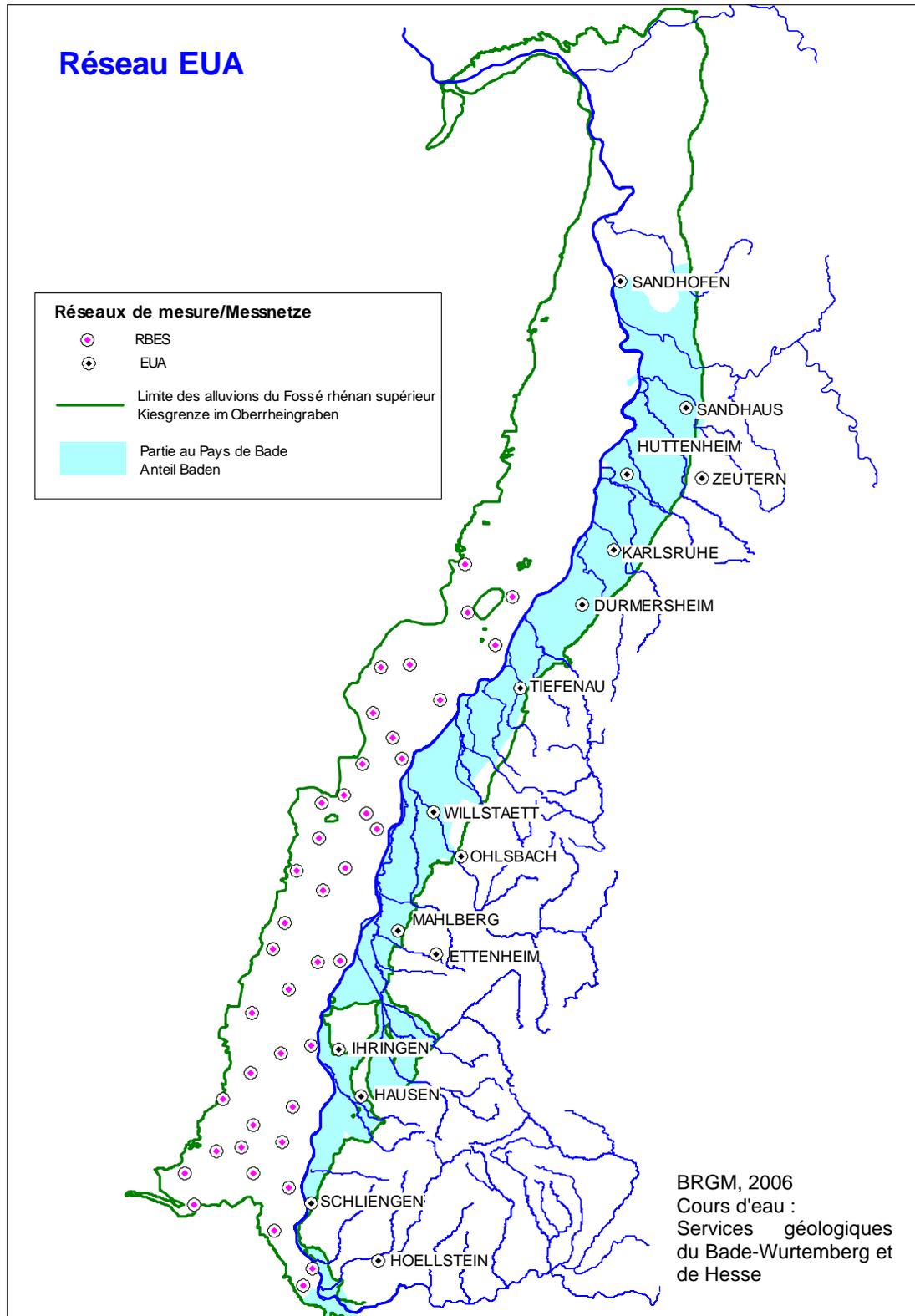


Figure 12 : Carte du réseau EUA (données LUBW)

#### 4.4 ANALYSE GEOSTATISTIQUE DU RESEAU ALLEMAND EUA

Les éléments variographiques sur la variabilité spatiale des données en nitrates côté badois peuvent être utilisés pour évaluer l'incertitude sur la moyenne des teneurs en nitrates du réseau ainsi que pour une étude d'optimisation du réseau EUA.

Pour cette étude 14 points ont été retenus (Höllstein a été éliminé comme trop loin du périmètre d'étude). La teneur moyenne estimée par krigeage est de 21,1 mg/L, à comparer à la moyenne arithmétique de 21,9 mg/L. L'erreur relative de l'estimation par krigeage est environ de moitié inférieure à celle donnée par la statistique classique : 26% (tableau 7).

Nombre de points de mesure	14	20	25	30	40
Ecart-type de krigeage global (mg/L)	5.5	4.95	4.6	4.3	3.9
Teneur estimée par krigeage (mg/L)	21.1				
Erreur relative	26%	23%	22%	20%	18%

*Table 7 : Evaluation géostatistique de l'erreur d'estimation*

L'erreur relative d'estimation a été calculée en ajoutant des points au réseau (tableau 7). On s'aperçoit que pour obtenir une erreur d'estimation comparable à celle du RBES il faudrait disposer de plus de 40 points de mesure également. **Le réseau EUA actuel n'est donc pas optimal.**

#### 4.5 ANALYSE TEMPORELLE DU RESEAU ALLEMAND EUA

Les données aimablement mises à la disposition du projet "Indicateurs" par la LUBW (ex-LfU) concernent 15 points de mesure disposant tous d'analyses des nitrates depuis 1999 au moins. Les prélèvements sont réalisés tous les 2 mois sur 9 à 10 points et une fois par an (en automne) sur les 15 points depuis 1999.

Les teneurs en nitrates s'étalent entre 0 et 60 mg/L. On note sur le graphique de la figure 13 un comportement curieux des chroniques de Tiefenau et de Mahlberg qui baissent fortement en 2003 et d'Ohlsbach qui monte au contraire.

La chronique de la moyenne n'est calculée que sur l'analyse d'automne qui est disponible sur les 15 points. Elle varie peu, passant de 23,3 en 1999 à 22,1 en 2003, avec un minimum en 2000.

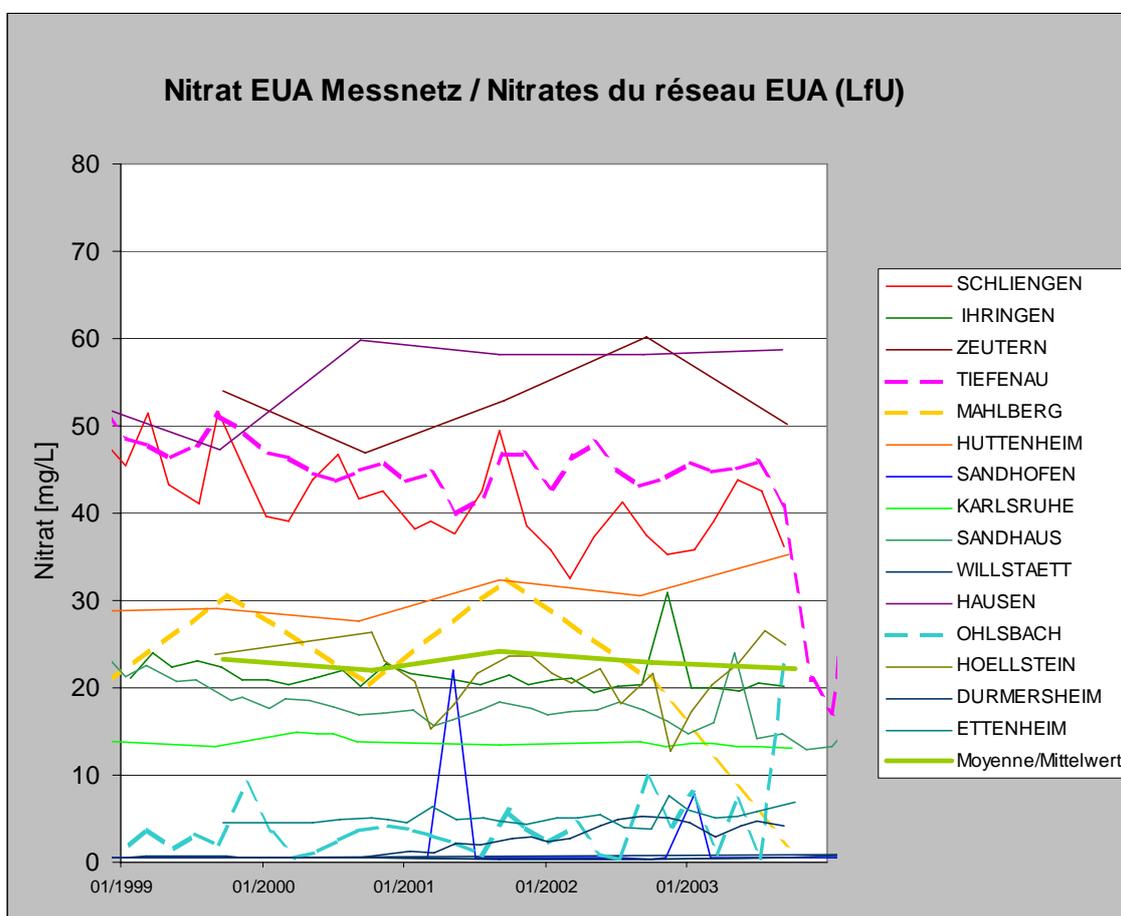


Fig. 13 : Teneurs en nitrates du réseau EUA de 1999 à 2003 (données LUBW)

## 4.6 CONCLUSIONS EN TERMES D'INDICATEURS

### Indicateur "Moyenne des teneurs en nitrates du réseau EUA"

La moyenne des teneurs en nitrates du réseau EUA pourrait être proposée comme indicateur de l'état de la nappe. Les paramètres statistiques (coefficient de variation de 0,8) indiquent que la moyenne arithmétique est en limite d'utilisation pour l'estimation. La précision de la moyenne est de l'ordre de  $\pm 25\%$ .

Le réseau EUA actuel n'est pas optimal en termes de nombre de points de mesure qu'il serait intéressant d'augmenter pour une meilleure estimation (jusqu'à une quarantaine de points par exemple). De plus il comprend des points qui ne se situent pas strictement dans l'aquifère des alluvions du Fossé rhénan supérieur, ce qui limite la possibilité de recalage sur les inventaires qualité transfrontaliers, et il apparaît quelques anomalies dans le comportement récent des chroniques de 3 points.

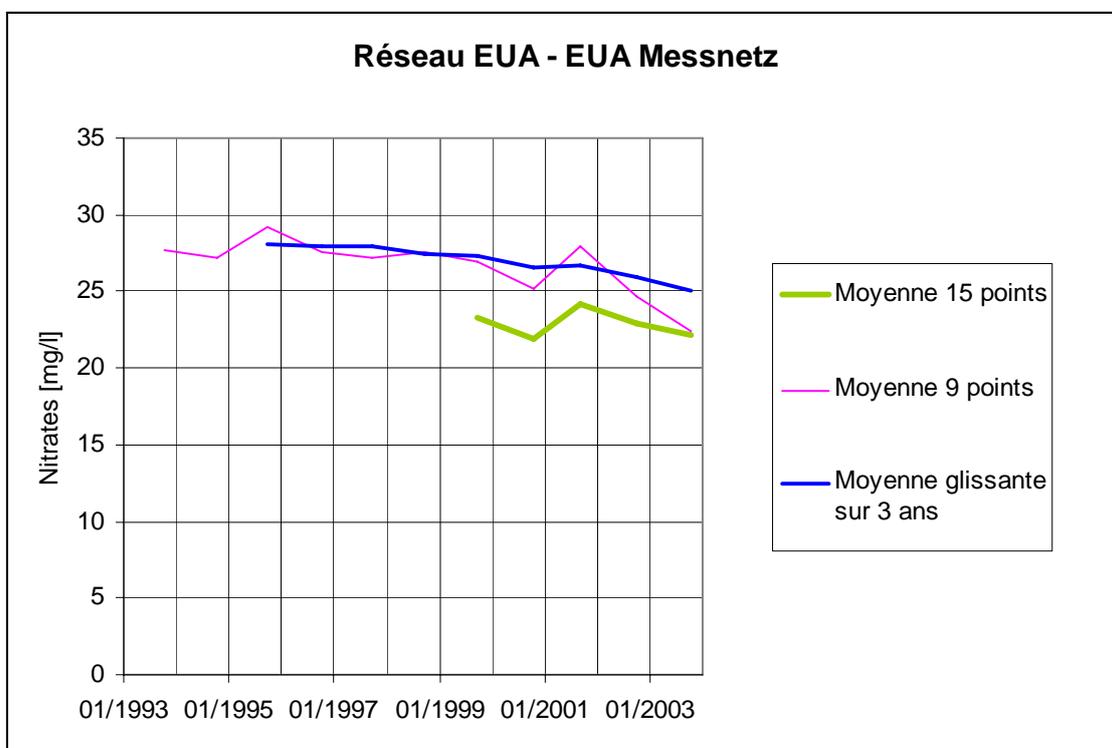


Figure 14 : Evolution temporelle de la moyenne en nitrates du réseau EUA

### Variation de l'indicateur

Les analyses disponibles permettent de remonter jusqu'à 1999 sur les 15 points et jusqu'à 1993 sur 9 points (fig. 14). On constate sur la chronique de la moyenne sur 9 points une décroissance nette depuis 1999, la moyenne est passée de 27,6 mg/L en 1992 à 22,4 en 2003. Les fluctuations interannuelles sont faibles, de moins de 3 mg/L.

On constate à nouveau que **l'indicateur ne peut être utilisé pour donner une tendance annuelle**. Même la moyenne glissante sur 3 ans ne permet pas d'obtenir une courbe uniformément décroissante : on n'a pas de visibilité à moins de 5 ans.

## 5. Examen du RBES du point de vue des produits phytosanitaires

### 5.1 METHODOLOGIE

L'analyse de la représentativité du RBES du point de vue des phytosanitaires se pose différemment de celle des nitrates, du fait du grand nombre de valeurs de mesure inférieures à une limite de quantification voire de détection.

Le seuil (ou limite) de détection analytique est défini comme la plus petite concentration fournissant un signal significativement différent du blanc mais dont la valeur ne peut être quantifiée. Le seuil (ou limite) de quantification est défini comme la plus petite concentration fournissant un signal quantifiable de façon fiable (c'est-à-dire répétitive).

Pour l'inventaire général comme pour le RBES, les données inférieures à un seuil sont des valeurs inférieures à la limite de quantification du laboratoire ayant effectué l'analyse. Pour la statistique ce sont des valeurs indéfinies, car leur valeur réelle peut être comprise entre zéro et la limite de quantification.

Du point de vue de la statistique la moyenne arithmétique d'une série de valeurs dont certaines ne sont pas strictement définies n'a pas de sens. Même la médiane ne peut être employée que si le nombre de valeurs indéfinies est largement inférieur à la moitié des données, ce qui n'est jamais le cas pour les produits phytosanitaires.

Cette difficulté peut être contournée en prenant comme variables des variables booléennes, du type vrai ou faux, en testant si une valeur est supérieure à un seuil donné (limite de détection, de quantification, CMA, ...). On se ramène ainsi à des valeurs 0 ou 1 que l'on peut traiter par des méthodes statistiques ou géostatistiques.

Le type d'indicateur correspondant sera le nombre ou le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de détection ou de quantification (pourcentage de quantifications, pourcentage de valeurs positives en allemand) ou supérieures à la CMA (limite de potabilité de 0,1 µg/L pour une seule substance et de 0,5 µg/l pour la somme des produits phytosanitaires).

### 5.2 COMPARAISON DU RBES ET DE L'INVENTAIRE GENERAL 2003 DU POINT DE VUE DES PRODUITS PHYTO SANITAIRES

On s'intéressera à l'atrazine et à ses métabolites qui sont parmi les molécules les plus fréquemment quantifiées. Le tableau ci-dessous présente les résultats comparatifs de l'inventaire général 2003 et du RBES pour 2003 en termes de nombre de quantifications. Le nombre de détections n'étant pas disponible pour le RBES n'a pas été étudié ici. Comme la limite de quantification des analyses de l'inventaire varie entre 0,010 et 0,025 µg/L suivant le laboratoire, le décompte est fait sur les points supérieurs à 0,025 µg/L. Le décompte a donc également été fait au seuil de 0,025 pour le RBES bien que toutes les analyses soient données avec un seuil de quantification de 0,020 µg/L.

On constate que pour l'atrazine et la déséthylatrazine (DEA), le pourcentage de valeurs quantifiées est de 47% et 49% des points respectivement pour l'inventaire 2003 et de 51% pour le RBES, soit proche de la moitié dans les deux cas. Si l'on regarde le

pourcentage de quantifications d'au moins l'une des 3 molécules, la divergence est un peu plus forte (60% contre 66%).

Par contre il est clair que pour la désisopropylatrazine (9% de valeurs quantifiées pour l'inventaire et 0% pour le RBES) le RBES n'est pas pertinent, ceci étant également vrai pour les autres substances phytosanitaires dont les concentrations sont rarement quantifiées.

<b>INVENTAIRE 2003</b>	Nombre de points de mesure	Valeurs quantifiées >0.025µg/L	Valeurs dépassant la CMA (0,1µg/L)	Pourcentage de valeurs quantifiées	Pourcentage de dépassements de la CMA
Atrazine	733	342	81	47%	11%
Déséthylatrazine	733	356	83	49%	11%
Désisopropylatrazine	733	40	9	5%	1%
Au moins 1 des 3 molécules	733	439	123	60%	17%
<b>RBES 2003</b>	Nombre de points de mesure	Valeurs quantifiées >0.025µg/L	Valeurs dépassant la CMA (0,1µg/L)	Pourcentage de valeurs quantifiées	Pourcentage de dépassements de la CMA
Atrazine	41	21	3	51%	7%
Déséthylatrazine	41	21	2	51%	5%
Désisopropylatrazine	41	0	0	0%	0%
Au moins 1 des 3 molécules	41	27	5	66%	12%

Tableau 8 : Statistiques comparatives de l'inventaire général 2003 et du RBES pour l'atrazine et ses métabolites

En ce qui concerne le pourcentage de valeurs en atrazine ou DEA dépassant la limite de quantification, il est possible de calculer une incertitude en se ramenant à des valeurs booléennes (0 ou 1) : on obtient une précision de l'ordre de  $\pm 5\%$  pour l'Inventaire 2003 et de  $\pm 16\%$  pour le RBES.

Les tests statistiques, et en particulier les tests paramétriques qui permettent de comparer deux populations de données, ne peuvent cependant pas être appliqués de façon robuste et rigoureuse pour conclure sur la représentativité du réseau RBES par comparaison avec les données de l'inventaire général en raison du nombre de données et de la distribution des valeurs :

- les distributions statistiques des phytosanitaires dans la nappe ne suivent pas une loi de type normale, elles sont de surcroît tronquées en raison du seuil de quantification ; la transformation en gaussienne n'est donc pas simple à mettre en œuvre ;
- pour le RBES, les valeurs supérieures au seuil sont au nombre de 21, effectif considéré comme insuffisant pour conduire à un test significatif.

Néanmoins, l'analyse statistique comparative des 2 populations (concentrations en atrazine mesurées en 2003 dans l'inventaire 2003 et le RBES) permet d'apporter des éléments de réponse concernant la représentativité du réseau pour les molécules les plus répandues (atrazine et DEA), sous réserve que le choix des points de mesure ait été fait de manière pertinente pour répondre à la problématique concernée.

La comparaison porte sur la distribution des **données sur l'atrazine** par classes de valeurs, l'intervalle de classe étant pris égal à 0.02 µg/L. Les histogrammes relatifs aux deux populations ainsi que les tableaux de distribution sont regroupés dans la figure 15.

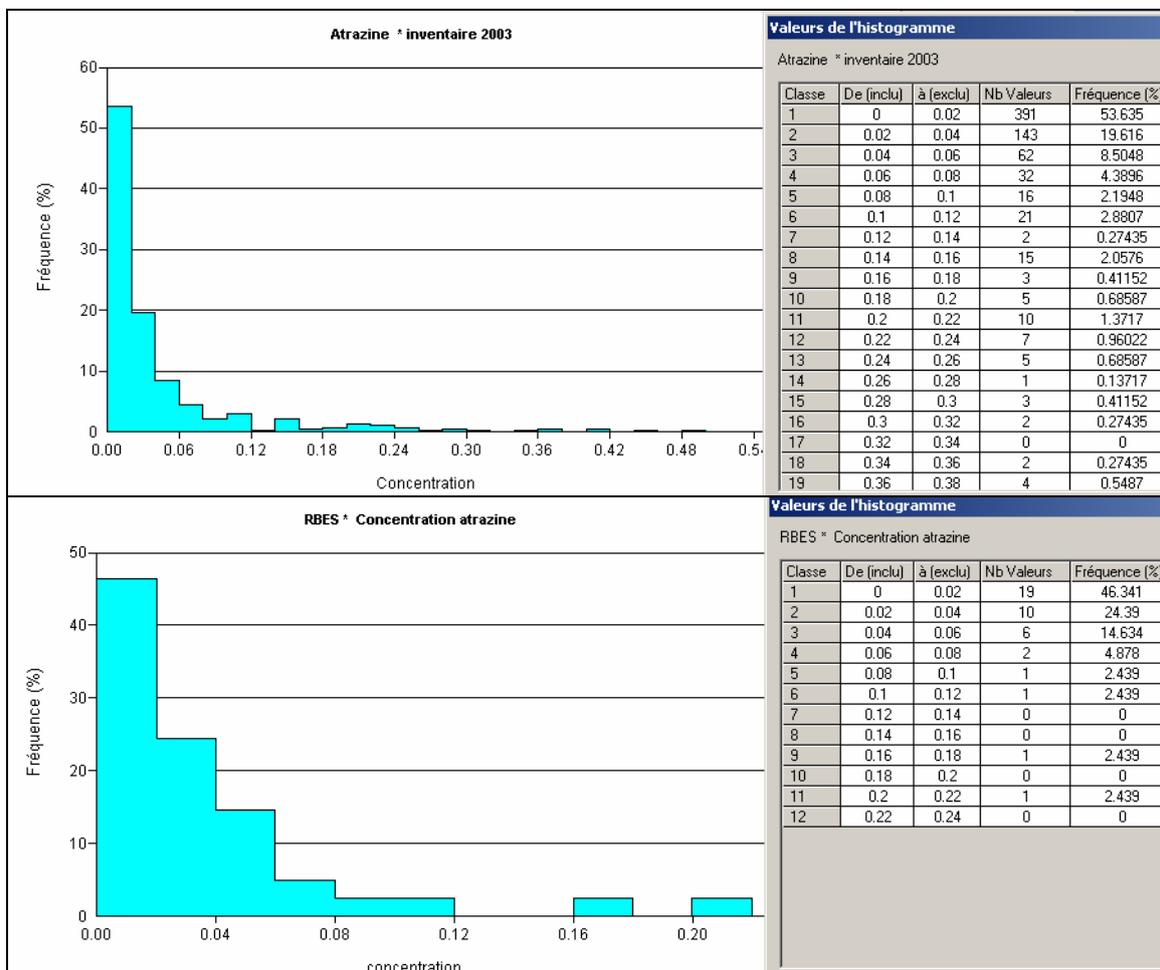


Figure 15 : Histogrammes des concentrations en atrazine pour l'inventaire général 2003 et le RBES

Ces tableaux attirent les remarques suivantes :

- Les données dont les concentrations sont inférieures au seuil de quantification montrent des fréquences qui ne sont pas significativement différentes (49% pour l'inventaire, contre 46% pour le RBES). La proportion des données du RBES est donc comprise à l'intérieur de la fourchette d'incertitude calculée de +/- 5%, mais on ne peut pas statuer sur la représentativité ; ce test ne représente pas à lui seul un indicateur suffisant.
- Le regroupement des classes 1 et 2 (concentrations comprises entre 0 et 0,04 µg/L) montre clairement que le pourcentage des données calculé lors de la fusion des deux classes est comparable (73% contre 71%) et la fourchette d'incertitude est dans ce cas respectée.

- De la même façon, le regroupement des classes 1 à 5 (concentrations comprises entre 0 et 0,1 µg/L), conduit à des résultats comparables en termes de pourcentage (89 % contre 93 %).
- La seule différence majeure qui caractérise les deux populations concerne les fortes concentrations ; pour le RBES les concentrations en atrazine ne dépassent pas 0,21µg/L alors qu'elles atteignent 5,4µg/L pour l'inventaire général 2003.

Ces observations peuvent être exprimées sous forme du diagramme de fréquences cumulées de la figure 16, qui montre la coïncidence des courbes du RBES et de l'inventaire général jusqu'à la valeur de coupure de 0,1 µg/L.

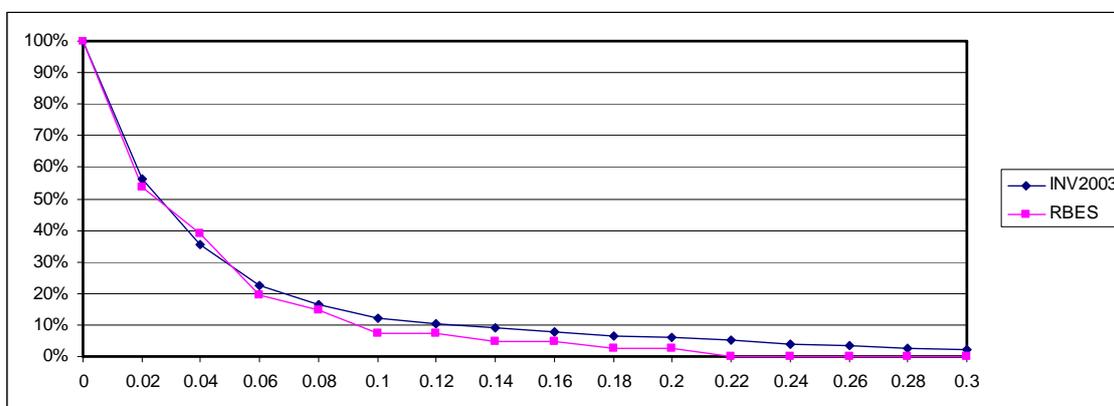


Figure 16 : Fréquences cumulées des concentrations en atrazine de l'inventaire général 2003 et du RBES (coupures en µg/L)

Nous concluons donc de cette analyse que le **RBES paraît représentatif de l'état général de la nappe pour les classes de valeurs faibles des concentrations en atrazine et DEA**. On peut admettre qu'il l'est également si l'on considère la variable booléenne "L'une au moins des 3 molécules est supérieure au seuil de quantification" bien que l'ajustement soit un peu moins bon.

**Le RBES n'est en revanche absolument pas pertinent pour les substances rarement détectées ou quantifiées dans les eaux souterraines, et n'est plus représentatif pour les fortes valeurs (supérieures à 0.1 µg/L).**

### 5.3 EVOLUTION TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS EN ATRAZINE ET DEA DU RBES

Si l'on examine l'évolution temporelle de l'indicateur "Pourcentage de valeurs quantifiées" pour l'atrazine et la DEA, on observe de fortes fluctuations d'une année sur l'autre, allant presque du simple au double (fig. 17). Le lissage obtenu en faisant la moyenne sur les 2 années précédentes montre une évolution plus régulière avec un minimum en 2002. On retrouve là une évolution analogue à celle des teneurs en nitrates.

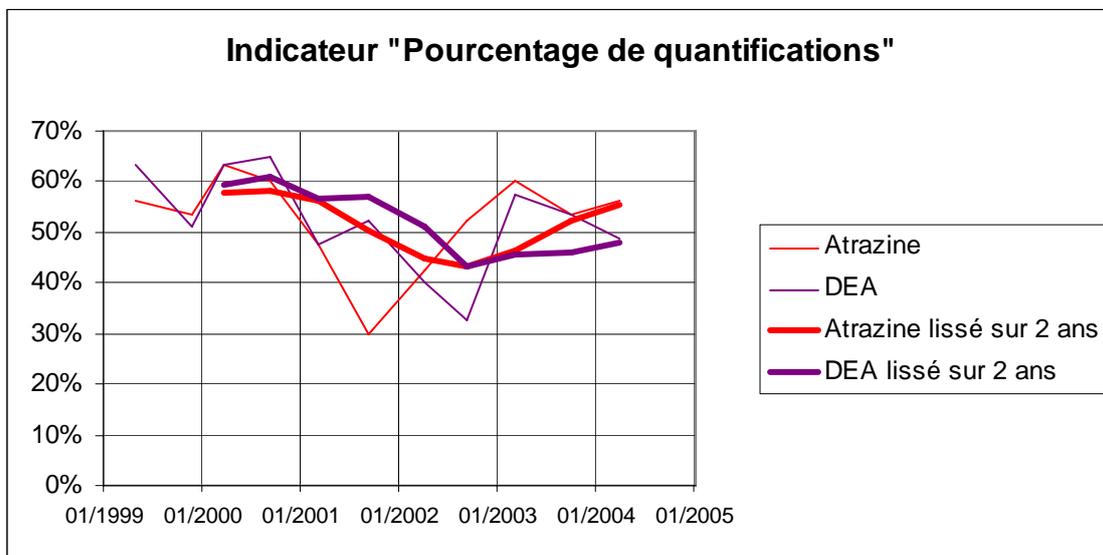


Figure 17 : Evolution de l'indicateur "Pourcentage de valeurs quantifiées" du RBES

Quant à l'évolution temporelle de l'indicateur "Pourcentage de dépassements de la CMA" pour l'atrazine et la DEA, elle apparaît beaucoup plus erratique, ceci en raison du faible nombre de points concernés (fig. 18). Les moyennes glissantes sur 2 ans n'amènent pas beaucoup d'amélioration, il n'apparaît pas de tendance nette.

Ceci confirme bien les conclusions de l'approche statistique : le RBES n'est pas représentatif pour les fortes valeurs en atrazine et en DEA (supérieures à la CMA de 0.1 µg/L).

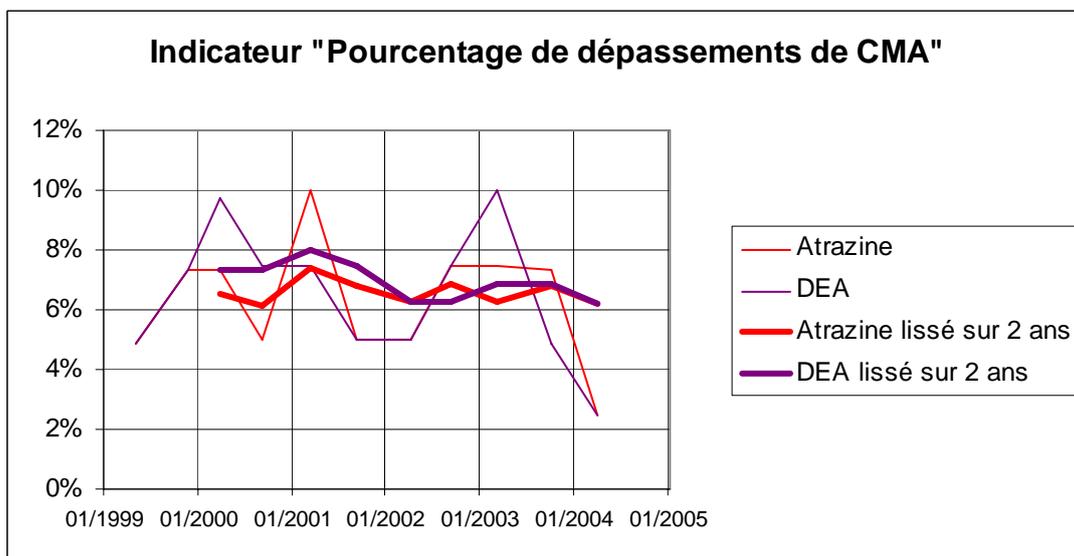


Figure 18 : Evolution de l'indicateur "Pourcentage de dépassements de CMA"

## **5.4 CONCLUSIONS EN TERMES D'INDICATEURS POUR LES PHYTOSANITAIRES**

### **Indicateur "Pourcentage de valeurs du RBES supérieures à la limite de quantification"**

Nous concluons tout d'abord que le RBES n'est pas pertinent pour le suivi des substances rarement quantifiées. Seules l'atrazine et la DEA peuvent être prises en considération en raison du grand nombre de détections de ces substances dans les eaux souterraines en Alsace. Le pourcentage de valeurs quantifiées est en effet proche de 50 %. La moyenne arithmétique ou la médiane des concentrations ne sont pas applicables en raison du grand nombre de valeurs indéfinies, trop élevé pour pouvoir calculer une valeur moyenne et insuffisant pour calculer une médiane.

En ce qui concerne l'atrazine et la DEA dont le pourcentage de quantifications avoisine les 50%, le RBES apparaît pertinent et peut être considéré comme représentatif de l'état général de la nappe tel qu'il est déterminé par les inventaires généraux, en ce qui concerne les classes de valeurs faibles (inférieures à 0,1 µg/L). Le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de quantification peut donc être proposé comme indicateur, ainsi que le pourcentage de points pour lesquels au moins l'une des molécules (atrazine et ses métabolites) est supérieure au seuil de quantification, bien que la correspondance soit un peu moins bonne.

Pour les classes de valeurs plus élevées le réseau RBES n'est plus représentatif : on ne peut notamment utiliser les résultats du RBES pour évaluer le pourcentage de valeurs en atrazine ou en DEA supérieures à la CMA de 0.1 µg/L. Le nombre ou le pourcentage de valeurs du RBES supérieures à la CMA ne peut donc être utilisé comme indicateur.

### **Variation de l'indicateur**

En termes d'évolution annuelle, les mêmes difficultés que pour les nitrates apparaissent. Les fluctuations interannuelles sont telles qu'un lissage sur au moins 2 ans est nécessaire. Une moyenne glissante sur 2 ans pourrait constituer un indicateur de tendance à très court terme. Cependant il est très probable qu'un tel indicateur ne permette pas de prévisions à plus long terme, comme dans le cas des nitrates.

## 6. Conclusions générales

L'état qualitatif des eaux souterraines dans le Fossé rhénan est mesuré tous les 5 à 6 ans par des inventaires généraux transfrontaliers. L'évolution de la situation entre ces inventaires est observée côté français par des analyses sur le Réseau de Bassin pour les Eaux Souterraines (RBES). De même côté allemand on se réfère actuellement à un sous-réseau dénommé réseau EUA pour rendre compte de l'évolution des teneurs en nitrates à la Communauté européenne.

L'analyse statistique et géostatistique montre que le RBES est un sous-réseau optimal pour les nitrates du point de vue du nombre de points de mesure, mais que certains points montrant des variations erratiques de teneurs mériteraient d'être examinés de plus près du point de vue hydrogéologique. On recommandera également que le réseau utilisé pour l'inventaire général comprenne tous les points du RBES afin de faciliter les comparaisons.

La moyenne des teneurs en nitrates du RBES peut être proposée comme indicateur de l'état de la nappe côté alsacien. La moyenne arithmétique est une bonne estimation, avec une précision de l'ordre de  $\pm 15\%$ .

L'examen variographique temporel montre que la visibilité de la tendance est seulement de l'ordre de 2 ans, notamment en raison des points présentant des chroniques erratiques. Les évolutions de l'indicateur "moyenne des teneurs en nitrates du RBES" ne donnent donc qu'une tendance à très court terme, dont l'intérêt est limité car il ne reflètera pas la tendance de fond de l'évolution des nitrates, mais plutôt des fluctuations interannuelles influencées notamment par la météorologie.

Il est donc difficile de définir un indicateur de tendance fiable à partir de la moyenne du RBES. Une moyenne glissante sur 3 ans semble donner une indication de tendance plus stable, mais nous manquons de recul pour pouvoir en juger.

Le réseau EUA quant à lui n'est pas optimal du point de vue du nombre de points de mesure, qu'il serait intéressant d'augmenter pour une meilleure estimation, et comprend des points qui ne se situent pas strictement dans l'aquifère des alluvions du Fossé rhénan supérieur, ce qui limite la possibilité de recalage sur les inventaires transfrontaliers de la qualité des eaux souterraines.

Il est donc recommandé, afin de disposer d'un indicateur côté badois, d'étudier la possibilité de composer un autre sous-réseau que le réseau EUA à partir des campagnes réalisées en routine chaque année.

En ce qui concerne les phytosanitaires, le RBES n'est pas pertinent pour les substances rarement quantifiées. Il peut par contre être considéré comme représentatif pour l'atrazine et la déséthylatrazine (DEA), sauf en ce qui concerne les fortes valeurs.

Le pourcentage de valeurs en atrazine ou DEA du RBES supérieures à la limite de quantification peut être proposé comme indicateur de l'état de la nappe côté alsacien, mais pas le pourcentage de valeurs supérieures à la CMA. La précision de ce pourcentage est comme pour les nitrates de l'ordre de 15%.

Un indicateur de tendance peut être défini à partir d'une moyenne glissante sur 2 ans, mais sa fiabilité à moyen ou long terme n'est pas assurée.

## Bibliographie

Blanchin R., Elsass P. (2004) – Région Alsace. Etude géostatistique des concentrations en nitrates de la nappe d'Alsace. Caractérisation et scénarios d'évolution. Rapport final – BRGM RP-53213-FR, 64 p., 20 fig., 6 tab., 1 ann.

Chilès J.P., Delfiner P. (1999) - Geostatistics: modeling spatial uncertainty. Wiley.

Rouhani S., Srivastava R. et al. (1996) - Geostatistics for environmental and geotechnical applications. ASTM, 1996.

Sonnentag O. (2003) – SIMIK+: Evaluation and conceptual improvement of a GIS-implemented kriging technique. Master's thesis – University of Salzburg.

Région Alsace (2000a) – Inventaire de la qualité des eaux souterraines dans la vallée du Rhin supérieur. *Bestandsaufnahme der Grundwasserqualität im Oberrheingraben*. Résultats de la campagne de prélèvements et d'analyses 1996/1997. *Ergebnisse der Beprobungskampagne 1996/1997*. Rapport Région Alsace, ISRN REGION-ALSACE-2000-01-FR+FRE/GER, 218 p.

Région Alsace (2000b) – Inventaire de la qualité des eaux souterraines dans la vallée du Rhin supérieur. *Bestandsaufnahme der Grundwasserqualität im Oberrheingraben*. Propositions communes d'actions contre la pollution de la nappe rhénane. *Gemeinsame Maßnahmenvorschläge zur Bekämpfung der Belastung des Grundwassers im Oberrheingraben*. Rapport Région Alsace, ISRN REGION-ALSACE-2000-03-FR+FRE/GER, 192 p.

Région Alsace (2004) – Inventaires 2003 de la qualité des eaux souterraines dans le Fossé rhénan. Premiers résultats pour la plaine d'Alsace et le Sundgau. 13 juillet 2004. Brochure, 12 p.

Région Alsace (2005) – Inventaire 2003 de la qualité des eaux souterraines dans la vallée du Rhin supérieur. *Bestandsaufnahme 2003 der Grundwasserqualität im Oberrheingraben*. Premiers résultats transfrontaliers. *Erste grenzüberschreitende Ergebnisse*. 7 mars 2005. 7. März 2005. Brochure, 24 p.



**SERVICE GEOLOGIQUE REGIONAL ALSACE**  
15 rue du Tanin – Lingolsheim – BP177 67834 TANNERIES Cedex France  
Tél. (33) 03-88-77-48-90. Fax : 03-88-76-12-26