

Document public



Document public

Etude de faisabilité pour l'estimation des tendances d'évolution de la qualité des eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse

Rapport final

BRGM/RP-60649-FR
Décembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service Public - PSP11EAU31

B. Lopez et N. Baran
Avec la collaboration de
S. Ollagnier



Vérificateur :

Nom : BLUM A.

Date : 09/01/2012

Signature :

Approbateur :

Nom : MIDOT D.

Date : 19/01/2012

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.



Mots clés : eaux souterraines, pollution diffuse, analyse statistique, tendance, bassin Rhin-Meuse

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

B. LOPEZ, N. BARAN (2011) - Etude de faisabilité pour l'estimation des tendances d'évolution de la qualité des eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse. Rapport BRGM/RP-60649-FR, 140 p., 54 ill., 6 ann.

Synthèse

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 chimique. 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 et d'inverser les tendances identifiées à la hausse. En cas de non atteinte du bon état et des objectifs d'inversion de tendance, les Etats Membres devront être en mesure d'expliquer les raisons de ce constat et des demandes de dérogation de délai, étayées à partir d'éléments scientifiques, devront être réalisées.

Des méthodes statistiques doivent être employées pour identifier les tendances et les inversions de tendances mais peu d'études spécifiques au domaine de la qualité des eaux souterraines et orientées vers les gestionnaires ont été menées pour évaluer l'aptitude des tests disponibles à répondre à ces objectifs. L'étude de faisabilité menée ici vise à réaliser des premiers tests permettant de juger de l'applicabilité de ces méthodes sur le bassin Rhin-Meuse. Elle s'appuie sur les résultats de la revue bibliographique menée en 2010 pour le compte de l'ONEMA (Lopez et Leynet, 2011) dans laquelle des méthodes statistiques théoriquement adaptées à l'analyse des chroniques d'évolution des concentrations en polluants dans les eaux souterraines sont proposées.

L'étude est réalisée conjointement par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse et le BRGM et vise, en premier lieu, à caractériser les données de pollutions diffuses disponibles sur le bassin dans le but d'estimer les potentialités d'application de méthodes statistiques adaptées à la problématique de la qualité des eaux souterraines. En effet, en fonction de critères tels que la longueur de la chronique, le nombre et la distribution des données ainsi que les fréquences de prélèvements, les méthodes statistiques d'identification des ruptures de pentes et d'évaluation des tendances d'évolution apparaissent plus ou moins appropriées.

Dans un second temps, les tests des méthodes statistiques sélectionnées sont réalisés afin de caractériser la contamination des eaux souterraines par les nitrates, les sulfates et quatre produits phytosanitaires ou métabolites retenus (atrazine, déséthylatrazine, métolachore et glyphosate). L'ensemble des chroniques disponibles d'évolution des concentrations de ces polluants est tout d'abord caractérisé en dégagant les caractères qui peuvent impacter les potentialités d'application des méthodes statistiques. Les méthodes statistiques sont ensuite appliquées sur des jeux de données spécifiques, ces derniers étant sélectionnés de façon à couvrir des situations plus ou moins favorables à l'application de ces tests. Il est ainsi possible d'identifier les tests les plus robustes vis-à-vis des caractéristiques des données disponibles sur le bassin Rhin-Meuse.

La caractérisation des jeux de données souligne les différences existantes entre les paramètres investigués ; les données de concentrations en nitrate et en sulfate apparaissent bien plus favorables (longueur des chroniques, nombre de données, absence de données reportées inférieures à une limite de quantification) à l'application des méthodes statistiques que les données de concentrations en substances phytosanitaires et/ou métabolites. Pour ces dernières, des méthodes alternatives d'analyse doivent être développées. De plus, pour un paramètre donné, des variabilités spatiales apparaissent autant dans la répartition des points de prélèvements que dans les caractéristiques des chroniques disponibles pour chaque aquifère du bassin. Des masses d'eau sont en effet suivies à partir de plus de points, depuis plus longtemps et à fréquence de prélèvement plus importante que d'autres. Ces observations influencent à la fois les potentialités d'application des méthodes statistiques aux points de prélèvement, et les potentialités d'application des méthodes spatialisées d'analyse des tendances.

L'étude de faisabilité aboutit à des préconisations aussi bien pour l'analyse des états de contamination que pour l'estimation des dates de ruptures et des tendances d'évolution « récentes », aux échelles des points de prélèvement et de zones géographiques. A l'échelle du point d'eau, deux scénarii sont proposés pour l'analyse des dates de rupture de pente et des tendances :

- Un scénario dit « idéal » reposant sur la mise en œuvre des méthodes statistiques les plus robustes et les plus puissantes possibles en fonction de la distribution des données et de la présence possible de cycles d'évolution (cas par cas),
- Un scénario dit « a minima » reposant sur la mise en œuvre de méthodes simples mais néanmoins assez robustes permettant de s'affranchir de la caractérisation fine des données à traiter (méthode commune pour tous les points d'eau).

Sommaire

1. Introduction	13
2. Contexte et historique des études sur le bassin Rhin-Meuse	15
2.1. LES ASPECTS REGLEMENTAIRES	15
2.2. LE CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN RHIN-MEUSE	17
2.3. LES ETUDES ANTERIEURES SUR L'ESTIMATION DES TENDANCES	18
3. Les outils statistiques de détection des tendances et des ruptures	19
3.1. TESTS STATISTIQUES APPLIQUES A L'EVALUATION DES TENDANCES ET DES RUPTURES DE PENTES DES CHRONIQUES TEMPORELLES	19
3.1.1. Définitions et concepts de base sur les tests statistiques	19
3.1.2. Les tests statistiques appliqués au point de mesure	22
3.1.3. Les tests statistiques spatialisés	28
3.2. PRISE EN COMPTE DES DONNEES INFERIEURES A UNE LIMITE DE QUANTIFICATION (LQ) OU DE DETECTION (LD)	31
3.2.1. Ce que dit la législation	31
3.2.2. Les solutions alternatives	32
4. Sélection des chroniques et des méthodes statistiques d'intérêt	35
4.1. EXAMEN PRELIMINAIRES DES DONNEES DISPONIBLES	37
4.1.1. Les données de concentrations en nitrate	38
4.1.2. Les données de concentrations en sulfate	46
4.1.3. Les données de concentrations en substances phytosanitaires	52
4.2. SELECTION DES CHRONIQUES SUR LESQUELLES LES TESTS STATISTIQUES VONT ETRE MIS EN OEUVRE	59
4.2.1. Les chroniques d'évolution des concentrations en nitrate	59
4.2.2. Les chroniques d'évolution des concentrations en sulfate	63
4.2.3. Les chroniques d'évolutions des concentrations en substances phytosanitaires	69
4.3. PLAN D'ACTION DE MISE EN ŒUVRE DES METHODES STATISTIQUES POUR L'ETUDE DE FAISABILITE	73
4.3.1. Paramètres « nitrate » et « sulfate »	74

4.3.2. Paramètre « phytosanitaires »	76
5. Application des méthodes statistiques sur les jeux de données sélectionnés	79
5.1. TESTS PARAMETRIQUE ET NON PARAMETRIQUE, TEST DE NORMALITE	79
5.2. DETECTION DES DATES DE RUPTURE DE PENTE SUR LES CHRONIQUES D'EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN NITRATE ET EN SULFATE	81
5.2.1. Chroniques d'évolution des concentrations en nitrate	81
5.2.2. Chroniques d'évolution des concentrations en sulfate	85
5.2.3. Comparaison des résultats obtenus par l'application des tests de Buishand et de Pettitt avec ceux du CUSUM modifié	87
5.3. TESTS DE TENDANCE SUR LES CHRONIQUES PONCTUELLES	89
5.3.1. Comparaison des tests réalisés sur la durée totale des chroniques	89
5.3.2. Intérêt du calcul des ruptures de pentes pour l'évaluation des tendances d'évolution	93
5.4. TESTS SPATIALISES DE TENDANCE	97
5.4.1. Agrégation des données	98
5.4.2. L'outil « Boite à moustaches »	99
5.4.3. Comparaison des résultats d'évaluation des tendances	102
5.5. TRAITEMENTS STATISTIQUES DES DONNEES DE CONCENTRATIONS EN SUBSTANCES PHYTOSANITAIRES	108
5.5.1. Représentation de l'évolution des teneurs en pesticides par l'outil « boite à moustaches	110
5.5.2. Problématique des limites de quantifications (LQ)	111
5.5.3. Application des méthodes statistiques « classiques » d'analyse des séries chronologiques	112
6. Bilan de l'examen des données et des tests des méthodes statistiques	115
6.1. EXAMEN DES DONNEES DISPONIBLES SUR LA CONTAMINATION DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN RHIN-MEUSE	115
6.2. RUPTURES ET TENDANCES AUX POINTS DE PRELEVEMENTS	117
6.3. RUPTURES ET TENDANCES SPATIALISEES	119
7. Conclusion de l'étude de faisabilité	121
8. Bibliographie	123

Liste des illustrations

Illustration 1 :	Masses d'eau souterraine à risque de non atteinte du bon état d'équilibre et paramètres chimiques en cause.	16
Illustration 2 :	Valeurs critique de Z du test de Buishand	26
Illustration 3 :	Aide à la lecture d'un diagramme théorique boîte à moustache	29
Illustration 4 :	Exemple d'application de la méthode de la distribution des données pour la prise en compte des valeurs reportées inférieures à une limite de quantification a) courbe de répartition des concentrations et loi de distribution estimée b) moyenne et médiane des données estimées suivant la loi de distribution (extrait de Helsel et Hirsch, 2002).	33
Illustration 5 :	Exemple d'application de la méthode robuste pour la prise en compte des données reportées inférieures à une limite de quantification a) régression des logs des concentrations selon les quantiles d'une distribution normale pour l'extrapolation des données inférieures à une LQ b) après transformation des données extrapolées en vraies valeurs et combinaison avec les valeurs reportées supérieures à une LQ, estimations des statistiques de la série chronologique (extrait de Helsel et Hirsch, 2002).	34
Illustration 6 :	Méthodes statistiques appliquées pour l'étude de faisabilité	36
Illustration 7 :	Résumé statistique des caractéristiques des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse (extraction ADES de février 2011 et données transmises par l'Agence).....	38
Illustration 8 :	a) Courbe de répartition du nombre de données par chronique et b) nombre de chroniques par classes de nombre de données par chronique d'évolution des concentrations en nitrate disponibles sur la bassin Rhin-Meuse.....	39
Illustration 9 :	Courbes de répartition a) des longueurs de chroniques et c) des fréquences moyennes de prélèvements en nitrate. Nombre de chroniques d'évolution des concentrations en nitrate b) par classes de longueur et d) par classe de fréquences de prélèvements disponibles sur le bassin Rhin-Meuse.	41
Illustration 10 :	Répartition des points de prélèvements sur le bassin Rhin-Meuse en fonction du nombre de données de concentration en nitrate par chronique.....	44
Illustration 11 :	Répartition des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate de 10 données ou plus sur le bassin Rhin-Meuse en fonction de leur longueur (en années).	45
Illustration 12 :	Résumé statistique des caractéristiques des chroniques d'évolution des concentrations en sulfate dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse.....	47
Illustration 13 :	a) Courbe de répartition du nombre de données par chronique et b) nombre de chroniques par classes de nombre de données par chronique d'évolution des concentrations en sulfate disponibles sur la bassin Rhin-Meuse.....	48

Illustration 14 : Courbes de répartition a) des longueurs de chroniques et c) des fréquences moyennes de prélèvements en sulfate. Nombre de chroniques d'évolution des concentrations en sulfate b) par classes de longueur et d) par classe de fréquences de prélèvements disponibles sur le bassin Rhin-Meuse.....	49
Illustration 15 : Répartition des points de prélèvements sur le bassin Rhin-Meuse en fonction du nombre de données de concentration en sulfate par chronique.....	51
Illustration 16 : Répartition des chroniques d'évolution des concentrations en sulfate de 10 données ou plus sur le bassin Rhin-Meuse en fonction de leur longueur (en années).....	52
Illustration 17 : Substances phytosanitaires analysées sur plus de 200 points les plus fréquemment quantifiées (> 1%) sur le bassin Rhin-Meuse.....	53
Illustration 18 : Caractéristiques des données disponibles sur les 5 paramètres phytosanitaires sélectionnés.....	56
Illustration 19 : Répartition, à l'échelle du bassin Rhin-Meuse, de l'état de contamination des eaux souterraines par a) l'atrazine, b) l'atrazine déséthyl, c) le métolachlore et d) le glyphosate. Seuls les points de 10 données ou plus sont représentés, la taille du point augmentant avec le nombre de prélèvements et la couleur définissant la fréquence de quantification.	58
Illustration 20 : Localisation des points de prélèvement sélectionnés sur le bassin Rhin-Meuse pour l'analyse des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate.	62
Illustration 21 : Périodes d'ennoyage des principaux réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain	63
Illustration 22 : Localisation du bassin ferrifère Lorrain et des différents réservoirs miniers	64
Illustration 23 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique du bassin ferrifère... ..	65
Illustration 24 : Typologie des stations du réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain (stations actives uniquement)	67
Illustration 25 : Carte de localisation des stations de surveillance du bassin ferrifère lorrain (les étiquettes en bleu correspondent aux stations suivies sur la période 2008-2010 dans le cadre des réseaux 0200000013 et 0200000018).....	68
Illustration 26 : Carte des indicateurs de pression en pesticides sur le bassin Rhin-Meuse.	70
Illustration 27 : Localisation des points de prélèvements sélectionnés pour l'analyse de l'évolution des concentrations en atrazine, déséthylatrazine, métolachlore et glyphosate dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse.	73
Illustration 28 : Méthodes statistiques testées sur les chroniques d'évolution des concentrations en nitrate et en sulfate sélectionnées sur le bassin Rhin-Meuse (les méthodes permettant une identification des dates de rupture de pente sont notées en italique).....	75
Illustration 29 : Méthodes statistiques testées pour l'analyses des chroniques d'évolution des substances phytosanitaires sélectionnées sur le bassin Rhin-Meuse.....	77
Illustration 30 : Distribution des données de deux chroniques d'évolution des concentrations en nitrate a) distribution des données non normale, b) distribution des données normale.....	80

Illustration 31 : Chroniques d'évolution des concentrations en nitrate à rupture de pente identifiée par le test de Buishand mais non par le test de Pettitt.	81
Illustration 32 : P-value des tests de Buishand et de Pettitt dans le cas de non rejet de l'hypothèse H0 (pas de rupture de pente détectée) pour les chroniques à distribution des données normale et non normale.	82
Illustration 33 : Représentation cartographique des dates de rupture de pente identifiées par l'application du test de Pettitt des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate. En encart, zoom sur les points de la zone sud-est du bassin Rhin-Meuse.	84
Illustration 34 : Chronique d'évolution des concentrations en sulfate à rupture de pente identifiée par le test de Buishand mais non par le test de Pettitt.	85
Illustration 35 : Dates de rupture de pente selon les tests de Buishand et de Pettitt sur les chroniques d'évolution des concentrations en sulfate aux points a) 01372X0197/EX, b) 01374X0234/TUNNEL et c) 01138X0172/BURBAC.	86
Illustration 36 : Exemple de chroniques d'évolution des concentrations en nitrate avec identification des ruptures de pentes différentes suivant le test appliqué.	88
Illustration 37 : Exemple de chronique d'évolution des concentrations en nitrate a) et en sulfate b) à rupture de pente marquée et identifiée de façon similaire par les trois méthodes testées.	89
Illustration 38 : Comparaison des tendances Mann-Kendall et régression linéaire sur trois chroniques d'évolution des concentrations en nitrate du bassin Rhin-Meuse.	91
Illustration 39 : Comparaison des tendances Mann-Kendall et régression linéaire sur deux chroniques d'évolution des concentrations en sulfate du bassin Rhin-Meuse.	92
Illustration 40 : Comparaison des tendances Mann-Kendall calculées sur la durée totale des chronique et sur le tronçon post-rupture sur les 18 chroniques d'évolutions des concentrations en nitrate.	94
Illustration 41 : Comparaison des tendances Mann-Kendall calculées sur la durée totale et sur le tronçon post-rupture de la chronique d'évolution des concentrations en nitrate au point 03032X0006/HY.	95
Illustration 42 : Représentation des tendances d'évolution des concentrations en nitrate aux point de prélèvement sélectionnés pour l'étude de faisabilité calculées par le test de Mann-Kendall appliqué a) sur la durée totale des chroniques et b) sur le tronçon post rupture de pente. En bas, zoom sur les points sélectionnés dans ou proches de la masse d'eau 2011 «Calcaires du Dogger du plateau de Haye ».	96
Illustration 43 : Comparaison des tendances Mann-Kendall calculées sur la durée totale et sur le tronçon post-rupture de la chronique d'évolution des concentrations en sulfate au point 01377X0212/M02.	97
Illustration 44 : Chronique virtuelle Ci et vecteur régional Vi d'évolution des concentrations en nitrate au sein de la masse d'eau 2013 « calcaires oxfordiens ».	99
Illustration 45 : Limites des classes et nombre de données par boite à moustaches pour la chronique virtuelle Ci et le vecteur régional Vi.	100

Illustration 46 :	Représentation de l'évolution des concentrations en nitrate au sein de la masse d'eau 2013 par boîtes à moustache à partir des données agrégées selon les méthodes de a) la chronique virtuelle C_i et b) le vecteur régional V_i . Les résultats de la comparaison multiple par paire à partir du test de Kruskal-Wallis sont représentés sur chacun des graphiques.....	101
Illustration 47 :	Comparaison des dates de ruptures calculées selon les tests de Buishand, de Pettitt et du CUSUM modifié sur la chronique virtuelle C_i et sur le vecteur régional V_i	102
Illustration 48 :	a) régression linéaire et b) tendance Mann-Kendall sur la durée totale de la chronique virtuelle C_i et sur le tronçon post rupture (PostR).....	104
Illustration 49 :	a) régression linéaire et b) tendance Mann-Kendall sur la durée totale du vecteur régional V_i et sur le tronçon post rupture (PostR).....	105
Illustration 50 :	Analyse des tendances avant et après rupture de pente a) de la chronique virtuelle C_i et b) du vecteur régional V_i selon la méthode du CUSUM modifié.....	107
Illustration 51 :	Répartition, à l'échelle du bassin Rhin-Meuse, de l'état de contamination des eaux souterraines par a) l'atrazine, b) l'atrazine déséthyl, c) le métolachlore et d) le glyphosate. Seuls les points de 10 données ou plus sont représentés, la taille du point augmentant avec le nombre de prélèvements et la couleur définissant la fréquence de quantification.	109
Illustration 52 :	Comparaison de l'évolution des concentrations en atrazine dans les eaux souterraines à l'échelle du bassin Rhin-Meuse représentée par boîte à moustaches en prenant en compte soit a) l'ensemble des points de prélèvements du bassin, soit b) uniquement les points qui disposent d'une analyse en atrazine au moins pour chaque période de P0 à P9.	110
Illustration 53 :	a) Evolution des fréquences de quantification et de dépassement du seuil réglementaire 0,1 $\mu\text{g/L}$ des concentrations en glyphosate sur le bassin Rhin-Meuse, b) évolution des limites de quantification maximales du glyphosate et des fréquences de leurs dépassements.	112
Illustration 54 :	Comparaison des tendances d'évolution des concentrations en a) atrazine et b) déséthylatrazine déterminées sur deux points du bassin Rhin-Meuse par régression linéaire et test de Mann-Kendall sur la longueur totale des chroniques et après rupture de pente (CUSUM modifié).	113

Liste des annexes

Annexe 1 : Points de suivi des concentrations en nitrate non référencés dans ADES au 4/02/2011.....	125
Annexe 2 : Points de prélèvement en nitrate sélectionnés pour l'étude de faisabilité	127
Annexe 3 : Points de prélèvement en sulfate sélectionnés pour l'étude de faisabilité.....	131
Annexe 4 : Points de prélèvement en phytosanitaires sélectionnés pour l'étude de faisabilité.....	133
Annexe 5 : Résultats d'identification des ruptures de pente des chroniques nitrate et sulfate sélectionnées par l'application des tests de Buishand, Pettitt et du CUSUM modifié	137
Annexe 6 : Comparaison sur la durée totale des chroniques nitrate et sulfate des pentes des tendances identifiées selon la régression linéaire et le test de Mann-Kendall.....	139

1. Introduction

Afin de répondre aux exigences de la DCE qui demande aux Etats Membre d'identifier, selon une approche statistique, les tendances d'évolutions des concentrations en contaminants dans les eaux souterraines, et dans la perspective de la révision de l'état des lieux en 2013, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse et le BRGM ont souhaité évaluer la possibilité d'appliquer des méthodes statistiques sur les jeux de données disponibles sur le bassin Rhin-Meuse.

La présente étude vise donc à tester différentes méthodes statistiques susceptibles d'identifier les dates de rupture de pente et de décrire les tendances d'évolution de la qualité des eaux souterraines (pour les paramètres nitrate, sulfate et certains phytosanitaires et/ou métabolites particulièrement présents dans les nappes du bassin) en travaillant soit par point d'eau par point d'eau, soit par entité géographique, la masse d'eau par exemple. S'agissant d'une étude de faisabilité, un nombre restreint de chroniques est utilisé. Les chroniques sont sélectionnées en fonction de critères tels que leur longueur, la fréquence d'analyses, le nombre total de données etc. Il s'agit bien de montrer les limites d'application de chaque outil et de comparer les résultats obtenus afin de juger de la convergence des conclusions tirées ou à l'inverse de leurs divergences.

Les objectifs sont donc de :

- **tester différents outils jugés a priori pertinents sur le bassin Rhin-Meuse sur un nombre restreint de situations** (contextes hydrogéologiques et paramètre chimique),
- **identifier le ou les outils qui pourraient être appliqués** pour l'ensemble des données disponibles sur le bassin.

Plus largement, les informations obtenues permettront de :

- **juger de la pertinence d'entreprendre une étude plus conséquente** sur l'ensemble du bassin afin de mieux décrire les tendances d'évolution de la qualité des eaux souterraines,
- **proposer une méthodologie adaptée pour la description des tendances** par point d'eau ou zone géographique, dont la réalisation est nécessaire pour le prochain état des lieux.

2. Contexte et historique des études sur le bassin Rhin-Meuse

2.1. LES ASPECTS REGLEMENTAIRES

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

Pour les eaux souterraines, le principal objectif fixé par la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE) est l'atteinte d'ici 2015 d'un bon état quantitatif et qualitatif pour toutes les masses d'eau. 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 chimique, 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. Dans le cadre de l'état des lieux demandés par la DCE (Comité de Bassin Rhin-Meuse, 2005), les paramètres induisant un risque de non atteinte du bon état ont été définis par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, d'après les pollutions reconnues pour chaque masse d'eau (Illustration 1).

Les paramètres déclassants sont :

- les nitrates pour huit masses d'eau,
- les phytosanitaires pour douze masses d'eau,
- les chlorures dans deux masses d'eau : la nappe d'Alsace (bassin potassique) et la masse d'eau des alluvions de la Moselle (influencée par les fortes teneurs en sel de la Moselle),
- Les COHV (composés organo-halogénés volatils) dans la nappe d'Alsace, notamment le TCE (trichloroéthylène) et le PCE (perchloroéthylène, aussi nommé tétrachloroéthylène),
- les sulfates dans la masse d'eau du réservoir minier du bassin ferrifère.

MS_CD	Nom de la masse d'eau	Nitrates	Pesticides	Chlorures	COHV	Sulfates
2001	Pliocène d'Haguenau et nappe d'Alsace	X	X	X	X	
2002	Sundgau versant Rhin et Jura alsacien	X	X			
2006	Calcaires du Muschelkalk	X	X			
2008	Plateau lorrain versant Rhin	X	X			
2009	Calcaires du Dogger des côtes de Meuse ardennaises	X	X			
2010	Calcaires du Dogger des côtes de Moselle	X	X			
2011	Calcaires du Dogger du plateau de Haye	X	X			
2013	Calcaires oxfordiens	X	X			
2015	Alluvions de la Meuse, de la Chiers, et de la Bar		X			
2016	Alluvions de la Moselle en aval de la confluence avec la Meurthe		X	X		
2017	Alluvions de la Meurthe et de la Moselle en amont de la confluence avec la Meurthe		X			
2026	Réservoir minier – Bassin ferrifère lorrain					X
2027	Champ de fractures de Saverne		X			

Illustration 1 : Masses d'eau souterraine à risque de non atteinte du bon état d'équilibre et paramètres chimiques en cause.

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/L de nitrate ou susceptibles de dépasser cette limite si des mesures préventives ne sont pas engagées.

2.2. LE CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN RHIN-MEUSE

Le bassin Rhin-Meuse est riche en eau souterraine. De l'ordre de 15 % des eaux souterraines captées en France le sont dans le bassin Rhin-Meuse qui couvre 6 % du territoire national. Les principales nappes du bassin sont :

- **La nappe phréatique de la plaine d'Alsace** : la nappe d'Alsace est contenue dans les alluvions déposées par le Rhin et ses affluents dans le fossé rhénan. Ces alluvions sont très perméables, formés de sables, graviers et galets d'une épaisseur de 15 m vers Saint-Louis, 200 m à Neuf-Brisach et 80 m vers Strasbourg. L'alimentation est principalement assurée par l'infiltration des cours d'eau, l'Ill notamment. Le débit des forages peut dépasser 300m³/h.
- **La nappe des Grès vosgiens** : l'ensemble des Grès du Trias inférieur forme un réservoir pouvant atteindre 300 à 400 mètres d'épaisseur. Il affleure dans le massif vosgien et le bassin houiller et s'enfonce, sous couverture, en direction de la Champagne. Il est constitué d'un feuilletage irrégulier de grès plus ou moins cimentés, de conglomérats et d'argiles. Il permet un écoulement facile dans le sens des couches et s'oppose aux infiltrations verticales. Jouant un rôle comparable à un empilement de tuiles, il permet l'apparition de sources nombreuses en zone de montagne. La ressource réelle se situe néanmoins là où les grès sont totalement noyés (sous couverture et dans le bassin houiller).
- **Le réservoir du Dogger** : en Lorraine et au sud des Ardennes, le réservoir du Dogger est constitué par des formations alternativement calcaires et marneuses. Alimentée sur la zone d'affleurement, (des Ardennes au plateau de Langres), par l'infiltration des cours d'eau et des précipitations, la nappe est drainée par la Meuse, la Moselle et leurs affluents. Le débit des forages dans ces calcaires fissurés et karstiques est très variable.
- **La nappe des côtes de Meuse** : assez peu utilisée, cette nappe occupe un réservoir calcaire et les alluvions de la Meuse. Ce réservoir bénéficie d'une alimentation supérieure aux besoins exprimés dans la région de la vallée de la Meuse.
- **Les autres nappes alluviales** : les plus importantes se situent dans les vallées de la Meuse ardennaise, la Moselle et la Meurthe. Ces nappes sont en étroite relation avec les cours d'eau. Leur exploitation est intense dans la vallée de la Moselle, de la Fecht et dans les Ardennes.

Le volume d'eau contenu dans les nappes du bassin se compte en centaines de milliards de m³. Le renouvellement moyen annuel de ces eaux est estimé à près de 1,3 milliards de m³, soit pour les principales nappes :

- nappe phréatique de la Plaine d'Alsace, une des plus importantes d'Europe occidentale, d'origine alluviale : 1,3 milliard de m³,
- nappe des grès vosgiens : 130 millions de m³,
- nappe alluviale de la Moselle et de la Meurthe : 160 millions de m³,
- nappe des calcaires dans le bassin ferrifère : 200 millions de m³,
- nappe des calcaires jurassiques et des alluvions de la Meuse : 230 millions de m³.

2.3. ETUDES ANTERIEURES SUR L'ESTIMATION STATISTIQUES DES TENDANCES SUR LE BASSIN RHIN-MEUSE

Outre le suivi de la qualité des eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse réalisé dans le cadre des programmes de suivis de la Directive Cadre Européenne sur l'eau et la surveillance spécifique du bassin ferrifère lorrain inscrit au programme du SAGE et mené en parallèle par le BRGM (Thonnon et Vaute, 2010), peu de travaux sur l'estimation statistique des tendances d'évolution de la qualité des eaux souterraines sur le bassin Rhin-Meuse sont répertoriés dans la littérature.

L'Agence de l'eau Rhin-Meuse a toutefois réalisé au cours de l'année 2010 une étude exploratoire sur l'estimation des tendances vis-à-vis du paramètre nitrate sur les 7 masses d'eau ayant été identifiées lors de l'état des lieux comme présentant une tendance à la hausse (masse d'eau 2001, 2002, 2006, 2010, 2011, 2013). Deux approches ont été mises en œuvre :

- une méthode CUSUM modifiée pour estimer la tendance pour un point d'eau,
- la méthode du vecteur régional permettant de travailler à une échelle plus régionale, celle de la masse d'eau dans le cas présent.

Les méthodes développées et utilisées pour ces travaux sont reprises pour l'étude et comparées à d'autres méthodes expérimentées sur des données de qualité des eaux souterraines provenant d'autres bassins.

3. Les outils statistiques de détection des tendances et des ruptures

3.1. TESTS STATISTIQUES APPLIQUES A L'EVALUATION DES TENDANCES ET DES RUPTURES DE PENTES DES CHRONIQUES TEMPORELLES

Au-delà de l'identification des tendances d'évolution des concentrations en contaminants dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse, l'étude de faisabilité permet de comparer les résultats de cet exercice réalisé par l'application de méthodes statistiques différentes. Des études récentes (Helsel et Hirsch, 2002 ; Baran et al., 2010 ; Lopez et Leynet, 2011) ont décrit et listé un certain nombre de méthodes statistiques qu'il est possible d'utiliser dans le domaine de la qualité des eaux souterraines. Des méthodes sont spécifiques à l'identification et à l'évaluation des tendances d'évolution des chroniques temporelles, d'autres sont spécifiques à la détection des ruptures alors que certaines peuvent remplir ces deux objectifs à la fois. L'échelle de travail peut être le point de mesure ou bien une unité spatiale à définir.

Avant de présenter le détail des méthodes statistiques pouvant être appliquées sur des données de qualité des eaux souterraines, quelques définitions de concepts statistiques sont rappelées. Ces définitions sont reprises de Lopez et Leynet (2011).

3.1.1. Définitions et concepts de base sur les tests statistiques

La stationnarité (d'une chronique) : Une des grandes questions dans l'étude de séries temporelles (ou chronologiques) est de savoir si celles-ci suivent un processus stationnaire. On entend par là le fait que la structure du processus sous-jacent supposé évolue ou non avec le temps. Si la structure reste la même, le processus est alors stationnaire. Autrement dit, une chronique stationnaire aura toujours le même comportement que l'on regarde à la date t ou à la date $t+k$. Par exemple, une chronique dont la moyenne n'évolue pas avec le temps est stationnaire. Il en est de même si la variance et/ou l'autocorrélation n'évoluent pas avec le temps. Les causes de non stationnarité peuvent être :

- soit une modification graduelle de la série au cours du temps, qui se manifeste par une tendance à la baisse (ou à la hausse) des valeurs de la série,
- soit une (ou plus) d'une rupture survenant à une certaine date, les caractéristiques de la série n'étant plus les mêmes à partir de la date de rupture,
- soit un changement dans la distribution de probabilité d'une variable caractéristique à partir d'une date donnée.

Tester la stationnarité d'une chronique sera donc par exemple de rechercher la présence d'une tendance. En effet, par définition, **une tendance** (au sens mathématique) correspond à une certaine orientation prise par les valeurs d'une série de données en fonction du temps, c'est-à-dire à une évolution du processus observé en fonction du temps.

L'hypothèse nulle : Le point de départ pour la mise en œuvre d'un test statistique est la définition d'une hypothèse dite nulle (H_0) et de son alternative (H_a). Dans le cas d'un test de tendance d'une série chronologique, H_0 est l'absence de tendance dans la série de données, et H_a est la présence d'une tendance croissance ou décroissante. Dans le cas d'un test de rupture de pente, l'hypothèse H_0 est l'absence de rupture, H_a correspondant à la présence d'une rupture de pente dans la série de données.

Le test statistique : Le test statistique est le moyen de comparer les deux hypothèses H_0 et H_a . C'est une valeur numérique calculée à partir de la série de données testée (on calcule la valeur d'une certaine variable appelée la « statistique » du test). Le test permet de choisir, parmi les deux hypothèses émises, celle qui a le plus de chances d'être vraie. Toutefois, en statistique, les hypothèses ne sont jamais « acceptées ». Il est préféré l'expression « on ne peut rejeter l'hypothèse H_0 à un niveau de confiance α » ou bien, dans le cas de l'alternative, « on doit rejeter l'hypothèse H_0 et retenir l'hypothèse H_a à un niveau de confiance α ».

Niveau de confiance : Le niveau de confiance (α), ou niveau de signification, est un seuil de probabilité donné, comparé à la valeur calculée de la "statistique" du test pour savoir si l'écart observé est compatible avec l'hypothèse nulle ou non. On appelle **p-value** le niveau de signification le plus bas où l'hypothèse nulle peut être rejetée. Ainsi donc si $p\text{-value} > \alpha$ alors l'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée.

Le niveau de confiance correspond à la probabilité qu'a la valeur du test statistique d'égaliser ou de dépasser la valeur observée lorsque l'hypothèse H_0 (pas de tendance) est vraie. Par exemple, pour $\alpha = 0,05$ la valeur critique du test statistique est celle qui serait dépassée par 5 % des valeurs des tests statistiques réalisés sur des données aléatoires. Si la valeur du test statistique est plus importante que la valeur critique, alors l'hypothèse H_0 est rejetée.

Le niveau de confiance permet de rendre compte de la probabilité pour un test de détecter une tendance (rejet de H_0) alors qu'aucune n'est effectivement présente (erreur de Type I ou erreur de première espèce).

Ainsi le niveau de confiance peut être interprété comme suit :

$\alpha > 0,1$	faible preuve contre l'hypothèse H_0
$0,05 < \alpha < 0,1$	preuve possible contre l'hypothèse H_0
$0,01 < \alpha < 0,05$	forte preuve contre l'hypothèse H_0
$\alpha < 0,01$	très forte preuve contre l'hypothèse H_0

Pour l'essentiel des méthodes statistiques classiques, les valeurs critiques des tests statistiques sont reportées dans des tables statistiques ou calculées pour toutes valeurs de niveaux de confiance. Lorsque les séries statistiques testées ne satisfont pas les conditions initiales des tests statistiques (autocorrélation, distribution normale...) des tests spécifiques doivent être utilisés. Il est par exemple possible d'utiliser des méthodes de ré-échantillonnage pour estimer le niveau de confiance du test statistique.

Le calcul de la "statistique" du test (c'est-à-dire la façon dont elle est construite) renvoie soit à une valeur dont la probabilité est $\alpha/2$ soit à une valeur dont la probabilité est α . Suivant ce qui est recherché, suivant l'hypothèse H_0 émise et suivant la loi de probabilité du test, il est alors possible de définir une région d'acceptation et 2 régions de rejet de part et d'autre de la région d'acceptation de H_0 ("two tailed test") ou bien une région d'acceptation et une seule région de rejet à l'une ou l'autre extrémité de la loi de distribution ("one tailed test"). Ce sont donc les valeurs de la loi de probabilité qui diffèrent mais non le niveau de signification, $\pm S_{\alpha/2}$ dans un cas, $+S'_{\alpha}$ ou $-S'_{\alpha}$ dans l'autre cas (si distribution symétrique).

Erreur du test statistique : Il existe deux types possibles d'erreurs. Une erreur de Type I, ou risque de première espèce, qui apparaît lorsque l'hypothèse H_0 est incorrectement rejetée. Une erreur de type II, ou risque de seconde espèce, exprime le fait que l'hypothèse H_0 n'est pas rejetée alors que l'hypothèse H_a est vraie. Un test statistique avec une faible erreur de type II est dit puissant.

Robustesse du test statistique : La première qualité d'un test statistique est de respecter le risque de première espèce (erreur de type 1). Or, les valeurs critiques des tests ne sont en général valables que sous certaines conditions d'application (nombre de données, distribution...). Si ces contraintes ne sont pas respectées, le test pourra avoir tendance à rejeter l'hypothèse H_0 trop souvent (test dit « libéral ») ou au contraire trop rarement (test dit « conservatif »). Les tests conservatifs sont généralement préférés aux tests libéraux car le risque de première espèce sera en réalité plus faible que celui spécifié (au détriment de la puissance définie ci-après). Si le risque reste stable même en dehors des conditions d'applications requises, le test sera dit robuste.

Puissance du test statistique : C'est la probabilité de rejeter à raison l'hypothèse H_0 . Dans le cadre de la détection de non-stationnarité il s'agit de la probabilité de détecter correctement une tendance ou une rupture. Cette probabilité dépend d'un certain nombre de facteurs comme la taille de l'échantillon, l'importance du changement à détecter, la position de la rupture, la distribution de la série à traiter, etc.

Tests paramétriques et les tests non-paramétriques.

Les tests paramétriques présument que les données des séries chronologiques ainsi que leurs erreurs (écarts à la tendance par exemple) suivent une distribution particulière (généralement une distribution normale). Cette condition doit être remplie pour pouvoir appliquer ces tests. Ils sont utiles car ils permettent de quantifier les changements dans les données (amplitude du changement de moyenne ou gradient de tendance) et sont généralement plus puissants que les tests non-paramétriques.

Lorsque l'hypothèse de distribution normale des données n'est pas satisfaite, il est parfois possible de procéder à un ré-échantillonnage pour estimer le niveau de confiance ou les valeurs critiques du test statistique pour différents niveaux de confiance.

Les tests non-paramétriques ne nécessitent pas d'hypothèse sur la distribution des données des séries chronologiques. Ces tests permettent de détecter des tendances ou des changements mais ne sont généralement pas appropriés pour quantifier les pentes des tendances ou l'amplitude des changements. Ils sont toutefois très utiles dans le domaine des sciences de l'eau car beaucoup de séries hydrologiques, hydrogéologiques ou hydrochimiques ne suivent pas une loi de distribution normale. Quelques tests non-paramétriques sont utilisés conjointement avec des méthodes permettant de quantifier les phénomènes (tendances ou ruptures) identifiés.

Autocorrélation des données : correspond à la dépendance d'une donnée observée à un instant t à des événements observés antérieurement. L'autocorrélation peut être estimée par le calcul de l'autocorrélogramme de la série temporelle qui correspond à la corrélation croisée d'un signal par lui-même pour différents décalages de temps. L'autocorrélation permet de détecter des régularités, des profils répétés dans un signal comme un signal périodique perturbé par beaucoup de bruit, ou bien une fréquence fondamentale d'un signal qui ne contient pas effectivement cette fondamentale, mais l'implique avec plusieurs de ses harmoniques.

Le détail des méthodes utilisées pour l'analyse des chroniques d'évolution des concentrations en différents contaminants des eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse est présenté dans les paragraphes suivants.

3.1.2. Les tests statistiques appliqués au point de mesure

Les tests de tendance

• **La Régression linéaire** est un test paramétrique pour les données à distribution normale.

Il faut aussi que les "erreurs" soient :

- distribuées suivant une loi normale (ce qui découle de l'hypothèse de la distribution normale des données de la série),
- de moyenne nulle,
- non corrélées entre elles.

Elle permet de tester s'il existe une tendance linéaire par l'examen des relations entre le temps (x) et la variable considérée (y).

La pente a de la régression est estimée selon la relation :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

et l'ordonnée à l'origine b est estimée comme suit :

$$b = \bar{y} - a \cdot \bar{x}$$

Le test statistique S est :

$$S = a / \sigma$$

$$\text{où } \sigma = \sqrt{\frac{12 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - b - ax_i)^2}{n \cdot (n-2) \cdot (n^2-1)}}$$

Or, cette expression n'est vraie que si la séquence de temps est régulière ($t, t+1, t+2, \dots$).

Sinon :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-2} \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - (at_i + b))^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}$$

Le test statistique S suit une distribution de Student à $n-2$ degrés de liberté sous l'hypothèse nulle H_0 (pas de tendance significative). Les valeurs critiques du test statistique pour différents niveaux de confiance peuvent être obtenus à partir des tables statistiques de Student-t.

- **La méthode de Mann-Kendall** permet de tester s'il existe une tendance monotone dans une série de données chronologiques. Ce test est non paramétrique et ne demande donc pas de vérification de la distribution des données.

Le principe du test est le remplacement des n valeurs de la série temporelle de valeurs brutes ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_{n-1}, X_n$) par leur rang relatif ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_{n-1}, R_n$).

Le test statistique S est alors le suivant :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \left[\sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(R_j - R_i) \right]$$

où

$$\begin{cases} \text{sgn}(x) = 1 & \text{pour } x > 0 \\ \text{sgn}(x) = 0 & \text{pour } x = 0 \\ \text{sgn}(x) = -1 & \text{pour } x < 0 \end{cases}$$

Si l'hypothèse nulle H_0 est vraie, S approche d'une distribution normale avec la valeur de moyenne μ et de variance σ^2 respectivement :

$$\mu = 0$$

$$\sigma^2 = n \cdot (n-1) \cdot (2n+5)/18$$

La statistique z est alors de la forme (les valeurs critiques du test statistique pour différents niveau de confiance sont reportées dans les tables de probabilités de distribution normale) :

$$z = |S| / \sigma^{0.5}$$

S'il y a des valeurs égales dans la série, la variance σ^2 doit être calculée comme suit :

$$\sigma^2 = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q E_p (E_p - 1)(2E_p + 5) \right]$$

où E_p désigne le nombre d'égalités identifiées dans la série impliquant p valeurs.

Si le nombre n de valeurs de la série est supérieur à 10, la mise en œuvre du test fait intervenir la variable aléatoire Z définie par :

$$Z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad \text{si } S > 0$$

$$Z = \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad \text{si } S < 0$$

$$Z = 0 \text{ si } S=0$$

Cette variable suit (approximativement) une loi normale centrée réduite. La probabilité d'observer une tendance pour laquelle la valeur de Z est au moins égale en valeur absolue à z_{obs} est alors :

$$P(|Z| \geq |z_{\text{obs}}|) = 2(1 - \Phi(|z_{\text{obs}}|))$$

Une valeur positive de S indique une tendance à l'augmentation et vice versa.

La pente de la tendance et l'intervalle sont estimés en utilisant **la méthode de la ligne robuste de Kendall-Theil** (ou méthode de Sen ; Helsel and Hirsch, 1992). La pente

β est calculée comme la médiane de toutes les $\frac{n(n-1)}{2}$ pentes entre chaque paire de données (X, Y) :

$$\beta = \frac{(Y_j - Y_i)}{(X_j - X_i)} \text{ pour tout } i < j \text{ et } i = 1, 2, \dots, (n-1) \text{ et } j = 2, 3, \dots, n$$

Le coefficient de corrélation τ (Tau) du test Kendall est une mesure robuste de la corrélation avec une bonne résistance aux biais dus à quelques valeurs exceptionnelles ou incohérentes. Le coefficient de corrélation τ (Tau) égale :

$$\tau = \frac{S}{n(n-1)/2}$$

Les tests de rupture

- **Le test de Buishand** est un test qui peut théoriquement être utilisé sur des variables suivant des distributions quelconques mais dont les propriétés ont été particulièrement étudiées pour le cas normal. De ce fait, il sera abusivement classé comme test paramétrique dans la suite de l'étude, son comportement sur des données s'écartant de la normalité n'étant pas connu.

Le test est construit à partir des écarts cumulés à la moyenne jusqu'à un certain rang k en définissant la variable suivante :

$$U(k) = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})$$

Sous l'hypothèse H0 (pas de rupture) l'écart cumulé devrait osciller autour de 0, sans atteindre de trop grandes valeurs. A l'inverse, une valeur trop importante en un point de rang k peut être le signe d'une rupture à cet endroit.

La valeur critique Z du test statistique est :

$$Z = \max_{k=1, \dots, n} \left(\frac{|U(k)|}{\sqrt{n \cdot \sigma_x}} \right)$$

L'instant de rupture \hat{k} peut être estimé par la relation :

$$\hat{k} = \text{Arg} \max_{k=1, \dots, n} \left(\frac{|U(k)|}{\sqrt{n \cdot \sigma_x}} \right)$$

Les valeurs critiques Z pour différents niveaux de confiance et différentes tailles d'échantillon sont données dans l'illustration 2.

N	Z au niveau de confiance		
	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
10	1.05	1.14	1.29
20	1.10	1.22	1.42
30	1.12	1.24	1.46
40	1.13	1.26	1.50
50	1.14	1.27	1.52
100	1.17	1.29	1.55
∞	1.22	1.36	1.63

Illustration 2 : Valeurs critique de Z du test de Buishand

- **La libre distribution CUSUM** (ou somme cumulée) est une méthode non paramétrique qui permet de tester si les moyennes de deux parties d'une série chronologique sont différentes (pour une date de changement inconnue).

Etant donné une série chronologique $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, le test statistique est défini par :

$$V_k = \sum_{i=1}^k \text{sgn}(x_i - x_{\text{median}}) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\text{où} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{sgn}(x) = 1 \text{ pour } x > 0 \\ \text{sgn}(x) = 0 \text{ pour } x = 0 \\ \text{sgn}(x) = -1 \text{ pour } x < 0 \\ x_{median} \text{ est la valeur médiane de la série } x_i \end{array} \right.$$

La distribution de V_k suit une loi statistique de Kolmogorov-Smirnov à deux échantillons ($KS = (2/n) \cdot \max|V_k|$) avec les valeurs critiques de $\max|V_k|$ données par :

$$\begin{array}{ll} \alpha = 0.10 & 1.22\sqrt{n} \\ \alpha = 0.05 & 1.36\sqrt{n} \\ \alpha = 0.01 & 1.63\sqrt{n} \end{array}$$

Une valeur négative de V_k indique que la dernière partie de la série chronologique (partie la plus récente) a une moyenne plus grande que la partie plus ancienne et inversement.

Remarque : L'Agence de l'Eau Rhin-Meuse a développé une méthode permettant d'estimer les tendances d'évolution des séries chronologiques à partir du test de CUSUM. Le principe de cette méthode modifiée est présenté dans la note « *Tendances d'évolution des polluants dans les eaux souterraines : éléments de méthode* » disponible directement auprès de l'organisme. Cette méthode nommée « CUSUM modifié » dans la suite du rapport est celle utilisée pour les tests de faisabilité.

• **Le test de Pettitt** est à rapprocher, dans sa construction, au test de Mann-Kendall mais il est plutôt dédié à la détection d'une rupture que d'une tendance. Le principe de ce test non paramétrique est d'évaluer si les couples de valeurs ont tendance à être rangés préférentiellement dans un sens, les couples étant formés par sélection d'une valeur de chaque côté d'un point de rupture hypothétique k . k est un entier compris entre 1 et $n-1$. Le test statistique de Pettitt $U(k)$ est de la forme :

$$U(k) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=k+1}^n \text{signe}(X_j - X_i)$$

La statistique Z de ce test vaut :

$$Z = \max_{k=1, \dots, n-1} |U(k)|$$

La fonction de répartition de Z peut-être approchée asymptotiquement par :

$$F(z) = P(Z \leq z) = 1 - 2 \exp\left(-\frac{6z^2}{n^3 + n^2}\right)$$

Le test de Pettitt permet en outre de faire une estimation du point de rupture \hat{k} telle que :

$$\hat{k} = \underset{k=1, \dots, n-1}{\text{Arg max}} |U(k)|$$

3.1.3. Les tests statistiques spatialisés

• **La Boîte à moustache** est un moyen rapide de figurer le profil essentiel d'une série statistique quantitative. Elle a été inventée en 1977 par John Tukey, mais peut faire l'objet de certains aménagements selon les utilisateurs. Ce diagramme (Illustration 3) résume quelques caractéristiques de position du paramètre étudié (médiane, quartiles, minimum, maximum et outliers). Il est utilisé principalement pour comparer un même caractère dans deux populations différentes. Il s'agit de tracer un rectangle allant du premier quartile (0,25) au troisième quartile (0,75) et coupé par la médiane. Ce rectangle suffit pour le diagramme en boîte. On ajoute alors des segments (les moustaches) aux extrémités de la boîte menant jusqu'à la valeur minimum de la série vers le bas et maximum vers le haut.

Les valeurs extrêmes (outliers en anglais) exclues de l'analyse statistique sont représentées en points individuels sur le même diagramme. Un outlier est un point dont la valeur est inférieure à $QL - 1,5 \cdot IQR$ ou supérieure à $QU + 1,5 \cdot IQR$ avec :

IQR : différence entre les quartiles

QL : valeur du premier quartile (bas de la boîte)

QU : valeur du dernier quartile (haut de la boîte)

« Boîte à moustache » est le nom courant, mais ce type de représentation peut prendre le nom de diagramme à pattes ou bien de Box plot en anglais.

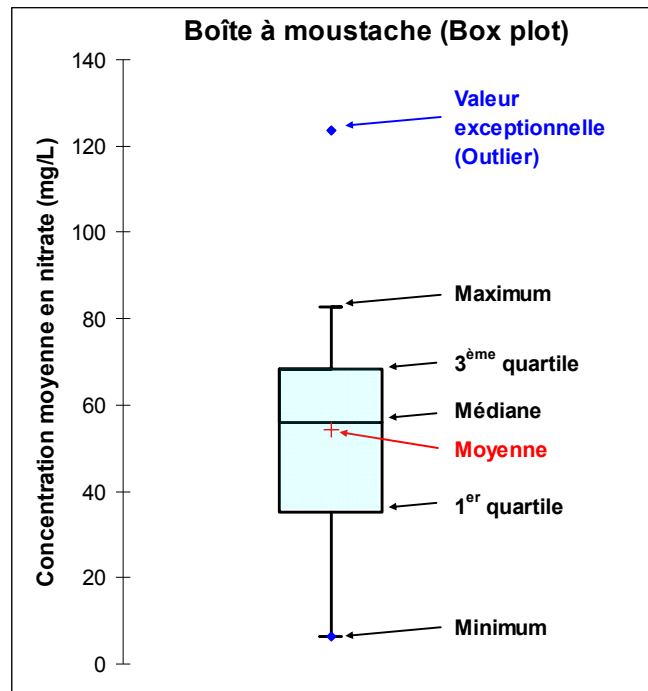


Illustration 3 : Aide à la lecture d'un diagramme théorique boîte à moustache

Dans l'exemple théorique présenté dans l'illustration 3 :

- Minimum = 6,2 mg/L
- Maximum = 82,7 mg/L
- Outlier = 123,5 mg/L
- Moyenne = 54,3 mg/L
- Médiane = 56 mg/L
- 1^{er} quartile = 35,2 mg/L
- 3^{ème} quartile = 68,5 mg/L

La boîte à moustache est un outil tout à fait approprié pour représenter l'évolution d'un paramètre de la qualité des eaux sur un secteur entre deux périodes choisies. Le caractère spatialisé de l'analyse de tendance est rendu possible par l'agrégation, pour la constitution de la boîte à moustache, de données issues de plusieurs points d'un même secteur. L'estimation des tendances d'évolution des contaminations sur un secteur donné est réalisée en comparant les paramètres statistiques (représentés sous la forme des boîtes à moustaches) entre deux périodes différentes. Le test de Kruskal-

Wallis permet alors d'estimer si la différence entre les deux périodes est significative à un seuil de significativité α donné.

- **Le test Kendall-Régional** est un test non paramétrique spécifiquement développé pour obtenir des informations spatialisées. Il a été utilisé récemment avec succès par Frans et Helsel (2005) ou encore Frans (2008). Le principe théorique de la méthode est de créer un « qualitomètre régional virtuel » défini comme le regroupement de plusieurs qualitomètres réels appartenant à une même zone au préalable définie comme homogène. Comme pour le test de Mann-Kendall, 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.

L'utilisation du test Kendall régional permet alors de déterminer la pente d'une tendance générale d'évolution des concentrations en nitrate (en mg/L/an) sur une zone homogène en créant un réseau de points de mesures qui constitue un qualitomètre régional virtuel.

- **La Méthode du Vecteur Régional** consiste en la réalisation d'une série synthétique élaborée à partir de l'ensemble des chroniques d'évolution d'un contaminant disponibles sur une unité spatiale donnée.

C_{ij} étant la valeur prise par le paramètre de qualité à l'instant i au site de surveillance j , sont calculés pour les m sites de l'unité spatiale :

- la moyenne C_j et l'écart type σ_j ,

et pour l'ensemble des données :

- la moyenne C_m et l'écart type σ_m .

Chaque valeur de concentration C_{ij} est alors transformée en une valeur C'_{ij} telle que :

$$C'_{ij} = C_m + \frac{\sigma_m}{\sigma_j} (C_{ij} - C_j)$$

Cette transformation permet d'obtenir, sur chacun des points de prélèvements j , la même moyenne C_m et le même écart type σ_m .

La moyenne arithmétique des variables transformées C'_{ij} calculée à chaque instant i fournit le « vecteur régional » V_i .

Les tendances d'évolution et les ruptures sont alors évaluées de manière spatialisée par la mise en œuvre des tests précédemment exposés sur les séries synthétiques d'évolution des concentrations en contaminant dans les eaux souterraines.

Remarque sur les tests de tendance spatialisée : La difficulté de mise en œuvre de toutes les méthodes statistiques d'évaluation des tendances et des ruptures de manière spatialisée provient de la définition de l'unité de travail et donc du choix des différentes chroniques à regrouper. Dans le domaine de la qualité des eaux souterraines, l'exercice de sectorisation consiste à créer des unités spatiales homogènes d'un point de vue lithologique, climatique, du comportement hydrodynamique, du comportement hydrochimique ainsi qu'en termes de pression. Il est souvent difficile d'accéder à l'ensemble de ces données de sorte qu'il peut être judicieux de rechercher des indices intégrateurs de plusieurs paramètres qui influent sur l'homogénéité des secteurs à créer.

En première approche pour l'étude de faisabilité, il est choisi de travailler à l'échelle de la masse d'eau.

3.2. PRISE EN COMPTE DES DONNEES INFÉRIEURES A UNE LIMITE DE QUANTIFICATION (LQ) OU DE DETECTION (LD)

3.2.1. Ce que dit la législation

L'annexe IV.2.d de la directive fille sur la protection des eaux souterraines 2006/118/CE (GWD – Groundwater Directive) recommande, pour l'évaluation de la tendance, que les résultats $<LQ$ soient remplacés par $LQ/2$ pour les substances individuelles et par zéro pour le total pesticides. Ce choix est d'autant plus justifié qu'il est cohérent avec les préconisations de la directive 2009/90/CE de la Commission Européenne sur les spécifications techniques pour l'analyse chimique et la surveillance de l'état des eaux.

Dans le cas des **micropolluants**, conformément au point 2.d de l'annexe IV de la GWD, la valeur de $LQ/2$ « la plus élevée de toutes les séries temporelles est affectée à toutes les mesures inférieures à la limite de quantification, sauf pour le total des pesticides ».

L'article 5 de cette directive, qui concerne toutes les catégories d'eau couvertes par la DCE (eaux de surface, eaux souterraines, eaux marines), est consacré au calcul des valeurs moyennes. Le paragraphe 1 précise ainsi que « lorsque les quantités de mesures physico-chimiques ou chimiques dans un échantillon donné sont inférieures à la limite de quantification, les résultats de mesures devront être établis comme la **moitié de la valeur de la limite de quantification concernée** pour le calcul des valeurs moyennes ».

Plus loin (paragraphe 3), il est écrit que cette règle « ne s'appliquera pas aux mesures qui correspondent aux **sommes totales de paramètres physico-chimiques** donnés, y compris leur métabolites, et produits de dégradation et réaction pertinents. Dans ces cas, les résultats inférieurs à la limite de quantification des substances individuelles devront être remplacés par **zéro** ».

3.2.2. Les solutions alternatives

Une alternative relativement simple de prise en compte des données inférieures à une limite de quantification consiste à compter le nombre de ces données dans la série temporelle. Il ne s'agit alors plus de travailler en valeurs vraies mais en fréquence de dépassement de la limite de quantification. Ainsi, selon un pas de temps choisi en fonction du calendrier de prélèvement de la chronique (l'année par exemple si la fréquence de prélèvement est pluriannuelle), l'information reportée correspond à l'évolution temporelle de la fréquence annuelle de dépassement de la limite de quantification. Une augmentation de la fréquence de dépassement de la limite de quantification avec le temps est le signe d'une orientation à la hausse des concentrations et inversement.

La « tendance » ainsi obtenue n'est pas aussi robuste d'un point de vue statistique que les tendances déterminées avec les méthodes citées au § 3.1, mais cette méthode permet de valoriser de façon satisfaisante des données initialement peu informatives. Aussi, cet exercice n'est possible que si les limites de quantification sont égales pour toute la longueur de la chronique. Dans le cas contraire, il est nécessaire de rechercher une méthode plus complexe ou de l'harmoniser en gardant la limite la plus haute.

Deux autres approches alternatives sont décrites en détail dans Helsel et Hirsch (2002), Chapitre 13 : la « *méthode de la distribution des données* » et la « *méthode robuste* ». Ces alternatives sont issues du constat qu'une substitution par 0 des données reportées inférieures à une limite de quantification (LQ) tend à sous-estimer grandement les vraies valeurs des tests, alors qu'une substitution par la valeur de la LQ tend à les surestimer. Il est aussi montré par les auteurs qu'une substitution par $\frac{1}{2}$ de la valeur de LQ est très peu puissante face aux approches alternatives proposées.

Sans entrer dans le détail, le principe de la méthode de la distribution des données utilise les caractéristiques d'une distribution estimée des données afin d'évaluer les statistiques de la série chronologique. Dans l'exemple extrait de Helsel et Hirsch (2002) présenté en Illustration 4, la courbe de répartition des données montre une distribution qui peut être ajustée suivant une loi log-normale (Illustration 4 a).

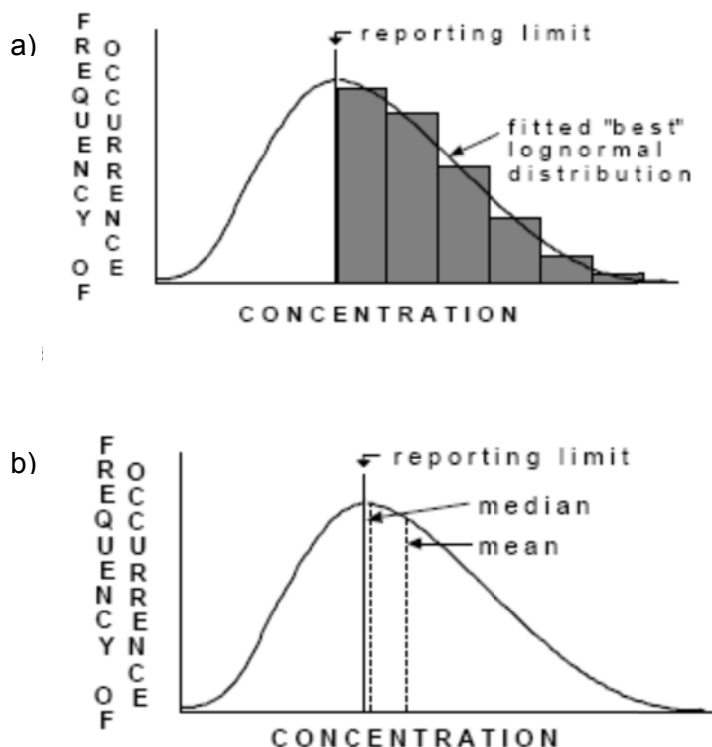
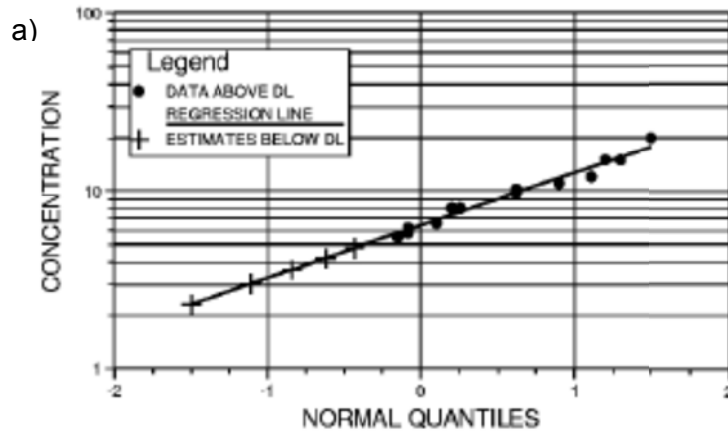


Illustration 4 : Exemple d'application de la méthode de la distribution des données pour la prise en compte des valeurs reportées inférieures à une limite de quantification a) courbe de répartition des concentrations et loi de distribution estimée b) moyenne et médiane des données estimées suivant la loi de distribution (extrait de Helsel et Hirsch, 2002).

Connaissant la loi de distribution des données, il est alors possible d'estimer les statistiques de la série chronologique et notamment sa moyenne et sa médiane (Illustration 4 b). Ces statistiques de la série entrent alors dans le calcul des tests de stationnarité.

La méthode robuste combine quant à elle les données observées reportées supérieures à une limite de quantification avec les données inférieures à une LQ extrapolées suivant une forme de distribution (Illustration 5). Les données inférieures à une LQ, après extrapolation (Illustration 5 a) ne sont pas considérées comme une estimation des valeurs initiales. Il est en effet impossible d'attribuer les valeurs extrapolées aux bonnes dates de prélèvements. Ces valeurs ne sont utilisées que pour dessiner la courbe de répartition de la chronique (Illustration 5 b) et ainsi estimer les paramètres statistiques de la série. Comme précédemment, ce sont ces paramètres qui seront utilisés lors du calcul des tests statistiques.



A.

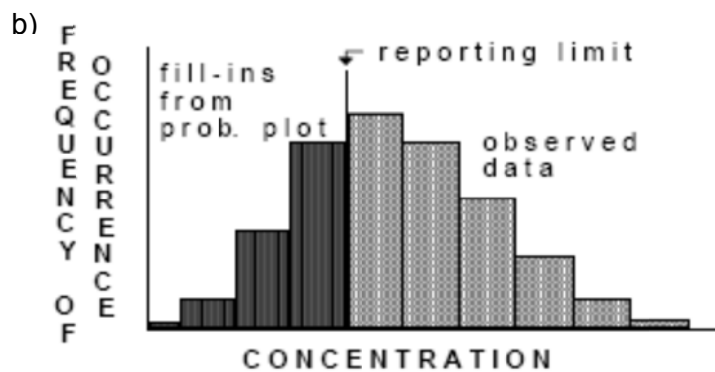


Illustration 5 : Exemple d'application de la méthode robuste pour la prise en compte des données reportées inférieures à une limite de quantification a) régression des logs des concentrations selon les quantiles d'une distribution normale pour l'extrapolation des données inférieures à une LQ b) après transformation des données extrapolées en vraies valeurs et combinaison avec les valeurs reportées supérieures à une LQ, estimations des statistiques de la série chronologique (extrait de Helsel et Hirsch, 2002).

4. Sélection des chroniques et des méthodes statistiques d'intérêt

La mise en œuvre des outils statistiques d'évaluation des tendances et des changements de tendance d'évolution de la qualité des eaux souterraines sur le bassin Rhin-Meuse est effectuée sur un nombre restreint de chroniques. Il ne s'agit pas en effet de réaliser l'étude à l'échelle du bassin mais bien de tester les potentialités d'application de ces outils sur les données existantes à l'échelle du bassin Rhin-Meuse.

La sélection des chroniques sur lesquelles les outils sont testés dépend de plusieurs critères définis par les objectifs de l'étude :

- couvrir des contextes hydrogéologiques différents et représentatifs du bassin,
- tester les potentialités d'application des outils statistiques sur des chroniques d'évolution des concentrations en différents paramètres,
- tester les outils statistiques sur des chroniques ayant des caractéristiques de longueur, fréquence de mesures etc. variables,
- cibler en priorité les masses d'eau à risque et/ou d'intérêt pour l'Agence,
- cibler en priorité les contextes où des changements de pratiques sont connus,
- comparer les résultats avec les travaux de détermination des tendances et des changements de tendance déjà réalisés par l'Agence.

En ce qui concerne le type de chroniques de données de qualité des eaux souterraines, 3 grandes familles sont testées.

Le premier paramètre sélectionné est le paramètre **Nitrate** (NO_3^- ; code SANDRE 1340). Il s'agit d'un paramètre classiquement recherché depuis de nombreuses années et dont les concentrations dans les aquifères sont souvent responsables du classement « à risque » des masses d'eau (Illustration 1). De plus, il s'agit vraisemblablement du cas le plus simple car il est fortement probable que l'ensemble des résultats d'analyses soit largement supérieur à la limite de quantification des laboratoires.

Le deuxième paramètre sélectionné est le paramètre **Sulfate** (SO_4^{2-} ; code SANDRE 1338). Ce paramètre constitue une problématique spécifique au bassin ferrifère lorrain en étant responsable du classement « à risque » de la masse d'eau 2026 (Illustration 1).

La troisième famille de paramètres testée est les **phytosanitaires**. Des paramètres différents sont sélectionnés pour la réalisation des tests en recherchant, dans un premier temps, les substances les plus fréquemment recherchées et quantifiées sur le bassin Rhin-Meuse. En complément et dans un deuxième temps, des molécules moins fréquemment quantifiées mais tout de même détectées sont sélectionnées afin de poser la problématique de la prise en compte des données inférieures à la limite de quantification dans le traitement statistique des chroniques d'évolution des concentrations en phytosanitaires dans les eaux souterraines.

Parmi l'ensemble des tests statistiques disponibles, il est choisi de comparer une méthode communément utilisée dans le domaine de la qualité des eaux (régression linéaire) avec des méthodes plus robustes et puissantes développées spécifiquement pour l'analyse de chroniques de paramètres environnementaux et déjà testées par le BRGM et/ou l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse et d'autres organismes (Baran et al., 2009 ; Lopez et Leynet, 2011 ; Lopez et al, 2011).

Echelle d'analyse	Type de test	Date de Rupture	Tendance
Ponctuelle	Paramétrique	Buishand	Régression linéaire
	Non paramétrique	Pettit	Mann-Kendall
		CUSUM modifié	Kendall Saisonnier
			CUSUM modifié
Spatiale			Boîte à moustaches
	Paramétrique	Vecteur Régional + Buishand	Vecteur Régional + Régression linéaire
	Non paramétrique	Vecteur régional + Pettit	Vecteur régional + Mann-Kendall
		Vecteur régional + CUSUM modifié	Vecteur régional + CUSUM modifié
			Kendall Régional

Illustration 6 : Méthodes statistiques appliquées pour l'étude de faisabilité

Il est ainsi décidé d'appliquer, sur des paramètres ayant des chroniques aux caractéristiques différentes dans les eaux souterraines, des tests paramétriques et non paramétriques, d'évaluation de tendances et de ruptures, aux échelles ponctuelle et spatiale. La liste des méthodes sélectionnées pour l'étude de faisabilité est présentée dans l'illustration 6. L'estimation des dates de rupture de pente est réalisée en amont de la mise en œuvre des tests statistiques de tendance, ceci afin d'étudier l'évolution des paramètres sur les derniers tronçons de chroniques à comportements homogènes (sans changement de pente significatif).

Certains paramètres, comme les substances phytosanitaires par exemple, sont caractérisés par la présence de données du type « inférieur à » (une limite de détection ou de quantification généralement). Or, il est fortement probable que ces données ne soient pas favorables à l'application des méthodes sélectionnées. Les méthodes présentées dans l'illustration 6 ne seront donc pas nécessairement appliquées sur l'ensemble des chroniques d'évolution de la qualité des eaux souterraines sélectionnées.

4.1. EXAMEN PRELIMINAIRES DES DONNEES DISPONIBLES

Les données exploitées pour l'étude sont issues, pour la grande majorité, de la base nationale des données sur l'eau souterraine ADES (www.ades.eaufrance.fr). Une extraction des données des paramètres NO_3^- , SO_4^{2-} et « phytosanitaires » disponibles sur le bassin Rhin-Meuse a été réalisée le 14 février 2011. En complément, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse a fourni des données de concentrations en nitrate dans les eaux souterraines du bassin (suivi CRAL INRA sur les opérations Fertimieux) non encore bancarisées dans ADES au moment de l'extraction.

L'objectif de l'examen préliminaire des données extraites est de définir, par paramètre :

- le nombre de chroniques disponibles,
- leur longueur moyenne et médiane,
- le nombre d'analyses moyen par chronique,
- les fréquences moyennes de prélèvements,
- la distribution statistique de ces variables au sein de chaque famille de paramètre extrait.

Pour les substances phytosanitaires, les occurrences de quantification ainsi que les nombres moyens d'analyses reportées inférieures aux limites de quantification et de détection sont pris en compte spécifiquement.

Cette analyse permet de rendre compte des caractéristiques de l'ensemble des données de qualité des eaux souterraines disponibles sur le bassin. Ces caractéristiques peuvent impacter les potentialités d'application des tests statistiques d'évaluation des tendances et des changements de tendance et peuvent donc influencer la réalisation d'une étude à plus grande échelle postérieurement à cette étude de faisabilité.

De plus, cet examen détaillé permet de rechercher, au sein de chaque famille de paramètres, les chroniques les plus longues possibles et présentant les fréquences de mesure les plus élevées. Ces chroniques permettent en effet d'évaluer les performances des outils statistiques dans les situations les plus favorables à la mise en évidence d'évolutions à court pas de temps et/ou sur de longues périodes. Une comparaison peut ainsi être faite avec une mise en œuvre sur des chroniques dont les caractéristiques sont moins favorables à l'analyse statistique.

4.1.1. Les données de concentrations en nitrate

Les 11604 données de concentrations en nitrate fournies par l'Agence et non bancarisées concernent 35 points dont 12 pour lesquels aucune donnée de concentration en nitrate n'est disponible à l'heure actuelle dans ADES. La liste de ces 12 nouveaux qualitomètres est présentée en Annexe 1. Pour un point en particulier, 03028X0017/HY, les données issues du suivi automatique des concentrations en nitrate n'ont pas été intégrées dans la base de données exploitée pour l'étude de faisabilité. Les concentrations fournies semblent en effet confondues avec les données de débits au point de mesure de sorte que les ordres de grandeur des valeurs disponibles dans ADES et celles de l'Agence sont incohérentes.

Après extraction et agrégation des données, **66 339 analyses des concentrations en nitrate réparties sur 5 045 points de mesure** sont disponibles pour l'estimation des tendances d'évolution de ce paramètre sur le bassin Rhin-Meuse.

	N : nombre moyen de données par chronique	L : longueur des chroniques		F : fréquence moyenne de prélèvements	C : concentration moyenne en nitrate
		années	jours	nombre de prélèvements / an	mg/L
moyenne	13,1	8,9	3262,7	1,1	16,3
médiane	4,0	6,9	2539,0	0,5	9,1
écart type	39,6	8,3	3027,5	2,9	25,4
CV (%)	302	93		257	156
min	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
max	707,0	65,7	24009,0	60,9	1142,0
1^{er} quartile	2,0	2,1	775,8	0,2	3,5
3^{ème} quartile	10,0	12,7	4622,0	1,1	23,3

Illustration 7 : Résumé statistique des caractéristiques des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse (extraction ADES de février 2011 et données transmises par l'Agence).

L'illustration 7 propose un résumé statistique des données de concentrations en nitrate disponibles sur le bassin Rhin-Meuse. Les caractéristiques détaillées des chroniques sont le nombre de données par chroniques (N), la longueur (L), la fréquence de prélèvement (F) ainsi que les valeurs de concentrations en nitrate (C). Les paramètres statistiques des chroniques étudiées sont calculés sur les moyennes par chronique des caractéristiques N, F et C (Illustration 7). Par exemple, pour les concentrations en nitrate, la moyenne mentionnée correspond à la moyenne des concentrations moyennes par chronique disponible sur le bassin Rhin-Meuse (en première approximation les données notées « < LQ » ont été prises à la valeur de LQ alors que les données « < LD » ont été comptabilisées à la valeur 0).

Nombre de données par chronique

Le nombre moyen de données par chronique d'évolution des concentrations en nitrate est de 13 environ sur les 5045 points étudiés. Les valeurs élevées d'écart type (39,6) et du coefficient de variation (CV = 302 %) montrent la grande variabilité du nombre de données par chronique qui varie de 1 à 707 au point 02346X0001/F (Oberhausbergen dans le Bas-Rhin). De plus, la valeur médiane de 4 données par chronique indique que la répartition de ce paramètre n'est pas symétrique autour de la valeur moyenne. Il y a en effet plus de chroniques dont le nombre de données est inférieur à 13 que de chroniques dont le nombre de données est supérieur à 13 comme le montre la courbe de répartition de cette caractéristique présentée en Illustration 8a.

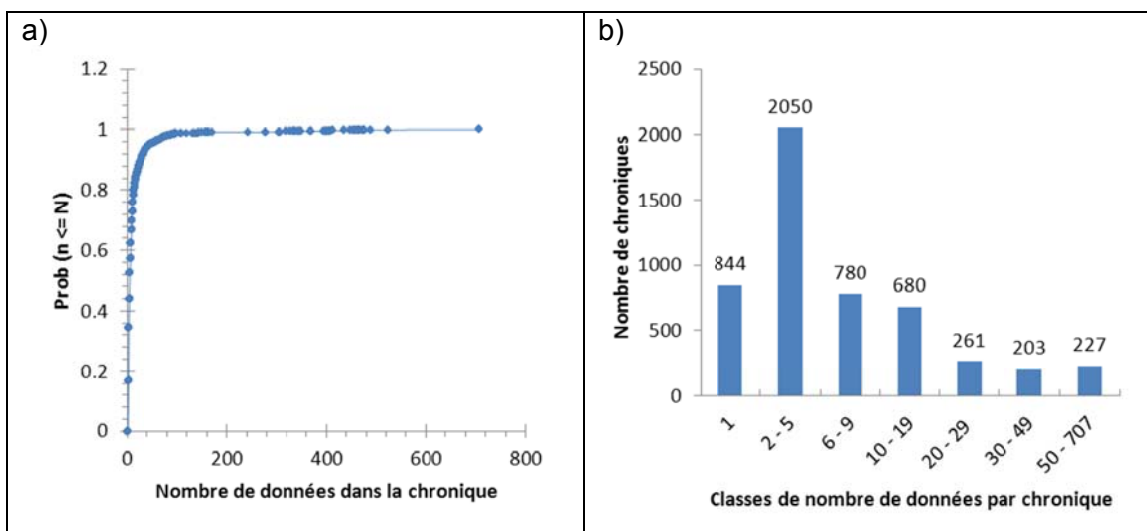


Illustration 8 : a) Courbe de répartition du nombre de données par chronique et b) nombre de chroniques par classes de nombre de données par chronique d'évolution des concentrations en nitrate disponibles sur la bassin Rhin-Meuse.

Il a été montré à plusieurs reprises (Helsel et Hirsch, 1992, 2002 ; Renard, 2006 ; Lopez et Leynet, 2011) qu'un nombre de données supérieur à 10 était préférable pour l'application de tests statistiques pertinents d'analyse de séries temporelles. Sur le bassin Rhin-Meuse et comme le montre l'illustration 8b, 1371 chroniques sur les 5045 disponibles remplissent ce critère. Ainsi, sous réserve de l'application des tests sur la longueur totale des séries, plus d'1/4 des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate disponibles sur le bassin pourrait être valorisé par l'analyse statistique ponctuelle des tendances d'évolution. De plus, un nombre non négligeable de chroniques (227) disposent d'un nombre de données égal ou supérieur à 50 qui favorise grandement la puissance des tests statistiques. Cependant, la valorisation des connaissances sur les comportements des nitrates dans les eaux souterraines dépend aussi des longueurs des chroniques disponibles et des fréquences de prélèvements.

Longueurs et fréquences de prélèvement

La longueur moyenne des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse est de 9 ans environ (Illustration 7). La valeur de la médiane proche de la moyenne (environ 7 ans) ainsi que l'allure de la courbe de répartition (Illustration 9a) montrent que les longueurs des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate sont à peu près équitablement réparties de part et d'autre de la moyenne. Les longueurs des chroniques varient de 0 à plus de 65 ans au point 04134X0022/39 (Rumersheim-Le-Haut dans le Haut-Rhin). Sur l'illustration 9b, il est montré que 1925 chroniques ont une longueur supérieure à 10 ans. Ce nombre est ramené à 1082 en ne considérant que les chroniques dont le nombre de données est égal ou supérieur à 10 (soit près de 80 % des chroniques sur lesquelles une analyse statistique est possible). Or, il a été montré lors d'études des évolutions des concentrations en nitrate sur les bassins Loire-Bretagne et Seine-Normandie (Baran et al., 2009 ; Lopez et al., 2011) que les concentrations en nitrate dans les eaux souterraines pouvaient varier selon des cycles à périodes de plus de dix ans. Ces cycles à longues périodes peuvent impacter l'évaluation des tendances d'évolution des concentrations dans les eaux souterraines de sorte qu'il est important d'avoir à disposition des chroniques qui permettent leur mise en évidence. Ainsi, si de tels cycles affectent les évolutions à long terme des concentrations en nitrate sur le bassin Rhin-Meuse, 38 % des chroniques disponibles pourraient confirmer ou infirmer leur présence.

De plus, 617 chroniques d'évolution des concentrations en nitrate sont longues de plus de 20 ans dont 347 disposent de 10 données ou plus. En supposant que le suivi se poursuit encore aujourd'hui pour la majorité d'entre elles, l'analyse des données en ces points permet d'avoir un recul important sur les évolutions passées et d'évaluer les impacts des grands changements de pratiques agricoles survenus au début des années 90. Ce panel de points correspond à plus de 12 % de l'ensemble des chroniques disponibles sur le bassin Rhin-Meuse. En ne considérant que les chroniques à 10 données ou plus, plus d'1/4 d'entre elles sont longues de 20 années ou plus.

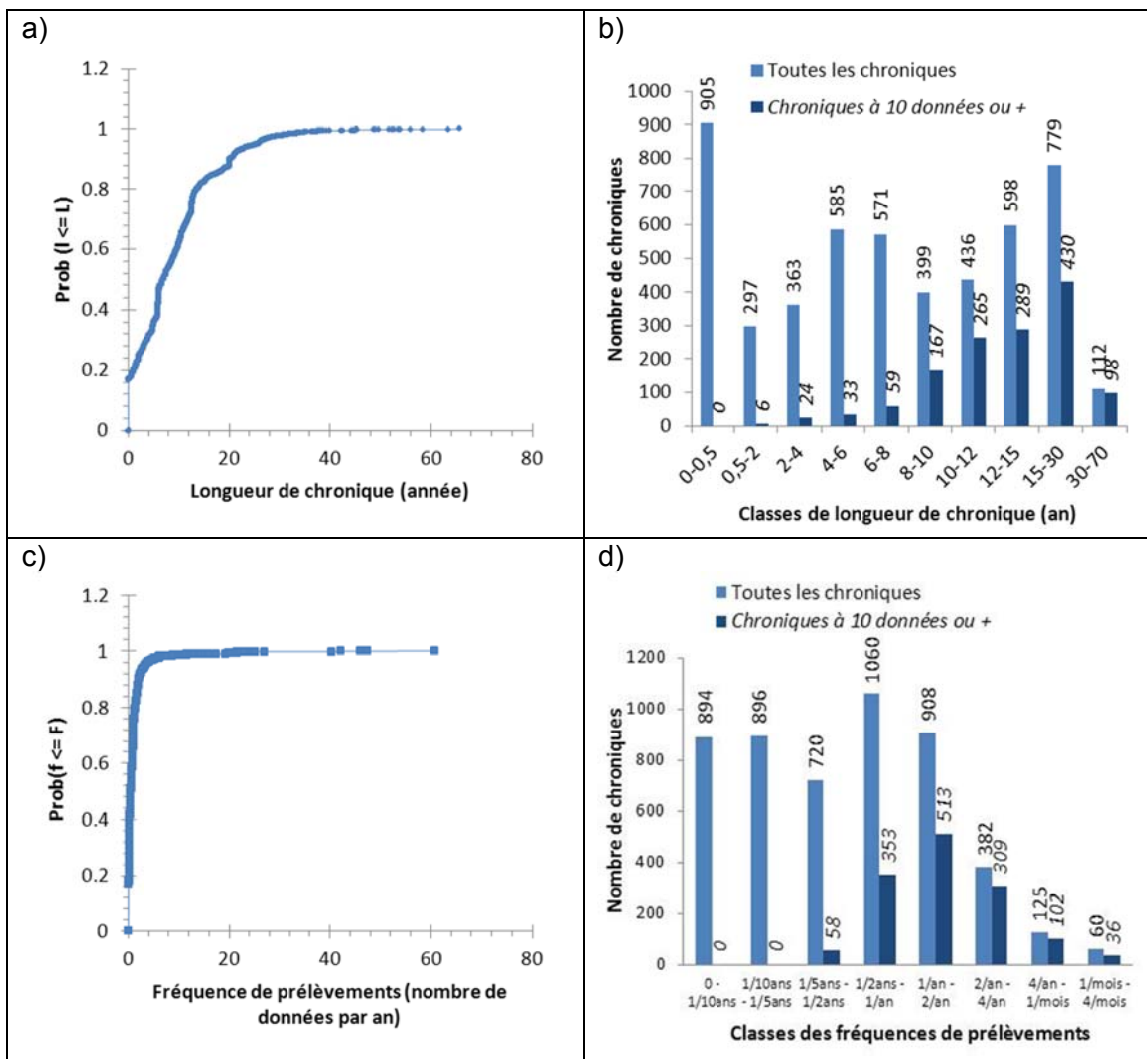


Illustration 9 : Courbes de répartition a) des longueurs de chroniques et c) des fréquences moyennes de prélèvements en nitrate. Nombre de chroniques d'évolution des concentrations en nitrate b) par classes de longueur et d) par classe de fréquences de prélèvements disponibles sur le bassin Rhin-Meuse.

La moyenne des fréquences moyennes de prélèvements par chronique est de 1,1 analyse par an avec une valeur médiane de 1 prélèvement tous les 2 ans. La répartition des fréquences moyennes de prélèvements autour de la moyenne est donc asymétrique comme le montre l'illustration 9c avec une probabilité de 0,7 environ d'avoir des fréquences de prélèvements inférieures à 1 par an et donc de 0,3 environ qu'elles soient supérieures ou égales à cette valeur. Or une fréquence de prélèvement de 1 analyse par an permet d'évaluer statistiquement les tendances d'évolution pluriannuelle des concentrations en nitrate mais ne permet pas, à l'inverse, de mettre en évidence des tendances d'évolutions saisonnières.

Ainsi, pour une analyse à plus court terme, des évolutions saisonnières notamment, une fréquence de prélèvement de 2 analyses par an au minimum, réparties sur l'année en une analyse en période de hautes eaux et une analyse en période de basses eaux, est nécessaire. L'illustration 9d révèle que 567 chroniques d'évolution des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse ont une fréquence moyenne de prélèvement égale ou supérieure à 2 analyses par an. Ainsi, 11 % environ de l'ensemble des chroniques disponibles permettent d'appréhender des variations saisonnières possibles dans l'évolution des concentrations en nitrate, en admettant toutefois que les prélèvements soient bien répartis dans l'année (hautes eaux/basses eaux). Pour la mise en œuvre d'une analyse statistique prenant en compte une possible saisonnalité des variations comme le test Kendall Saisonnier par exemple, 447 chroniques disposent de 10 données ou plus acquises à une fréquence minimale de 2 prélèvements par an. Ce jeu de données représente 32,6 % des chroniques sur lesquelles une analyse statistique est possible.

Il est enfin à noter que 60 chroniques présentent des fréquences de prélèvements élevées supérieures ou égales à 1 analyse par mois. Ces chroniques correspondent pour la plupart aux points de suivis des actions agroenvironnementales du type Fertimieux, dont les données acquises par l'INRA et/ou la CRAL ne sont pas encore bancarisées dans ADES. Ces chroniques présentent des fréquences de prélèvement très appropriées pour l'étude des variations à court terme des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines.

Remarque : L'analyse des valeurs des fréquences moyennes de prélèvements en vue de l'application de méthodes statistiques doit être réalisée en couplant cette caractéristique avec le nombre de points dans la chronique ainsi que la longueur de celle-ci. En effet, il est possible de calculer une fréquence moyenne de prélèvements élevée avec seulement deux analyses très rapprochées dans le temps. Or, une telle chronique n'est pas pertinente pour l'application de méthodes statistiques d'analyse des séries temporelles dont la première condition est de disposer d'au minimum 10 données.

Concentrations moyennes en nitrate

Même si les valeurs brutes de concentrations n'impactent pas a priori les potentialités d'application des tests statistiques, il est toujours intéressant d'analyser les paramètres statistiques de ces données disponibles sur l'ensemble du bassin Rhin-Meuse. La moyenne des concentrations moyennes en nitrate par point de prélèvements est de 16,3 mg/L avec une valeur médiane de 9,1 mg/L. Il y a donc plus de points dont la concentration moyenne en nitrate est inférieure à 16 mg/L qu'inversement.

De plus, l'analyse montre une assez forte variabilité spatiale des concentrations moyennes en nitrate sur le bassin Rhin-Meuse (écart type = 25,4 mg/L et CV = 156 %), avec notamment 36 points dont la moyenne des concentrations en nitrate est supérieure à 100 mg/L et un maximum de 1142 mg/L mesuré au point 00905X0077/PC5 (Longlaville, Meurthe-Et-Moselle). En contrepartie, les variations des concentrations en nitrate en chacun des points de mesure sont plus faibles avec une moyenne des écarts type établie à 3,6 mg/L et une moyenne des coefficients de variation à 30 % (données non présentées dans l'illustration 7). Cette observation incite à penser que les concentrations en nitrate sont organisées dans l'espace en fonction de leurs valeurs et qu'il est donc nécessaire d'utiliser ou de réaliser une sectorisation du bassin Rhin-Meuse avant de procéder à une analyse des tendances de manière spatialisée.

Conclusion sur les chroniques d'évolution des concentrations en nitrate disponibles

En première approche, l'analyse des données de concentrations en nitrate dans les eaux souterraines disponibles sur le bassin Rhin-Meuse montre la potentialité d'application des méthodes statistiques d'évaluation des tendances d'évolution. En effet, il est montré que plus d'¼ des chroniques disponibles sur le bassin disposent de 10 données de concentrations en nitrate ou plus, premier critère retenu pour l'application des méthodes statistiques.

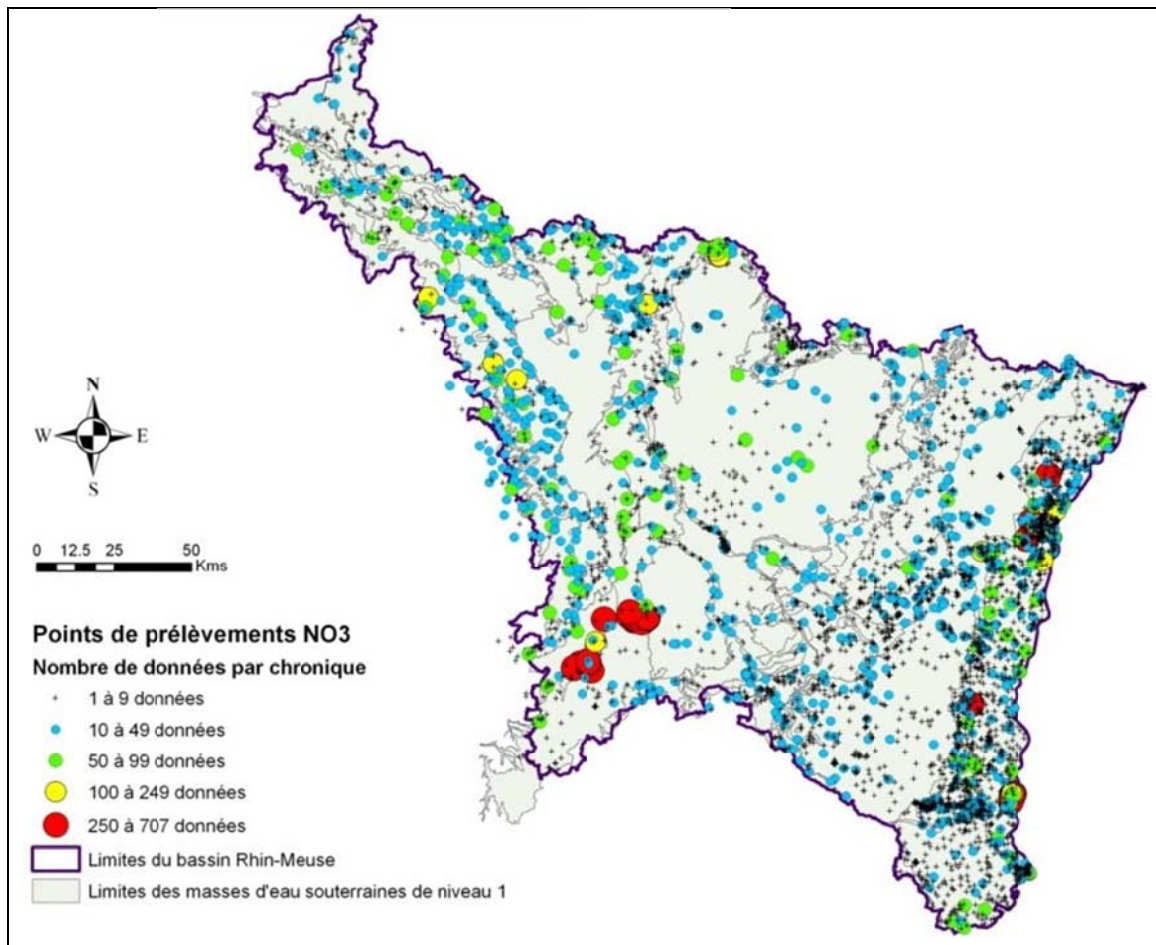


Illustration 10 : Répartition des points de prélèvements sur le bassin Rhin-Meuse en fonction du nombre de données de concentration en nitrate par chronique.

L'illustration 10 montre que l'ensemble des masses d'eau de niveau 1 du bassin Rhin-Meuse dispose de points de prélèvements dont la chronique d'évolution des concentrations en nitrate est construite avec 10 données ou plus. Cependant, certains secteurs montrent une densité de points sur lesquels une analyse statistique est envisageable plus élevée que la moyenne du bassin. La masse d'eau 2001 « Pliocène d'Haguenau et nappe d'Alsace » regroupe par exemple 503 chroniques constituées de 10 données ou plus soit 36,7 % des 1371 chroniques disponibles pour le traitement statistique sur l'ensemble du bassin. Or cette masse d'eau ne représente en surface que 10 % environ de la surface totale du bassin Rhin-Meuse. A l'inverse, la masse d'eau 2008 « Plateau lorrain versant Rhin », dont la surface représente plus de 20 % de la surface totale du bassin Rhin-Meuse, ne dispose que de 75 points à chroniques d'évolution des concentrations en nitrate de 10 données ou plus (soit 5,4 % des chroniques disponibles à l'analyse statistique sur l'ensemble du bassin).

Ces observations prennent de l'importance dans la perspective d'une étude spatialisée des tendances à l'échelle des masses d'eau. Les résultats seront en effet plus significatifs d'un point de vue statistique sur les masses d'eau à forte densité de points disposant de chroniques constituées d'un nombre important de données.

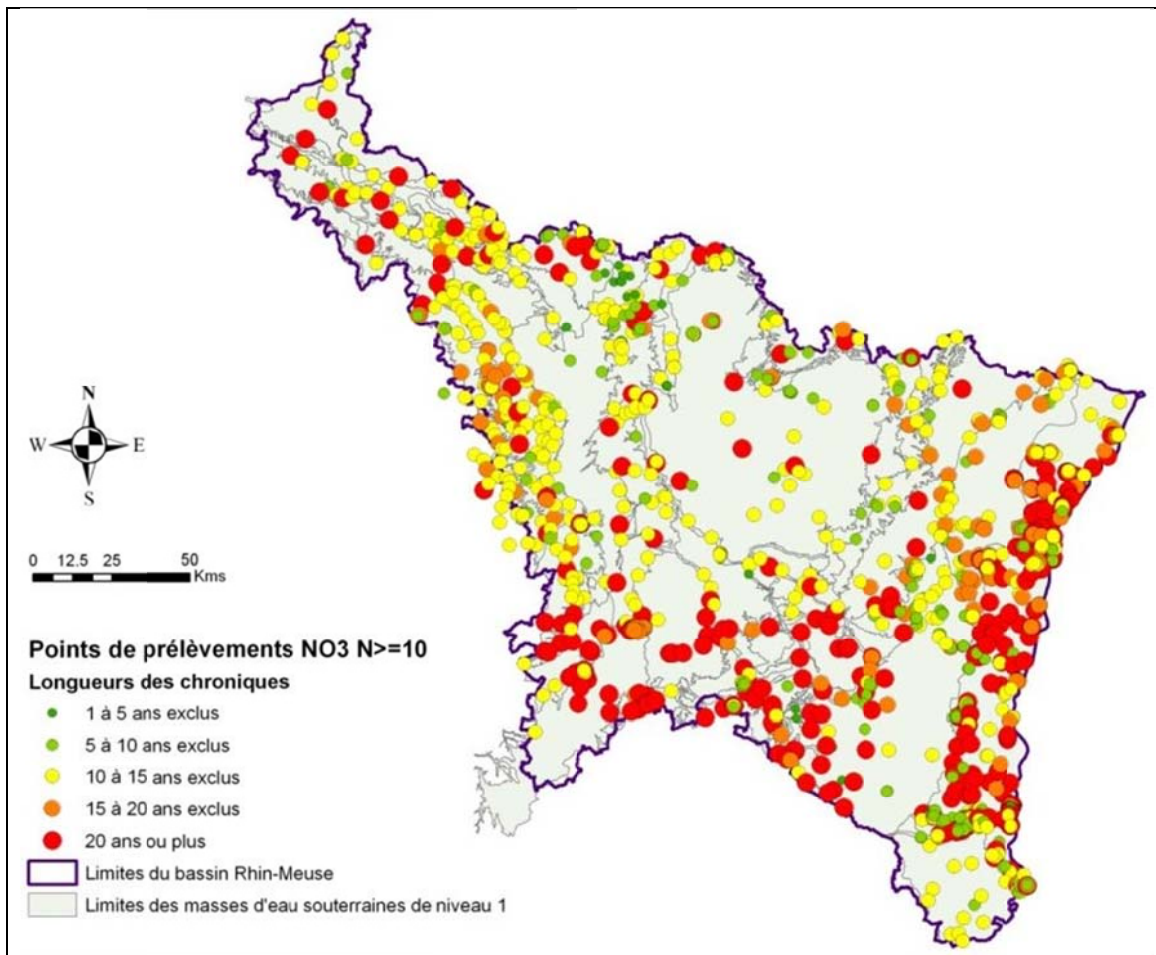


Illustration 11 : Répartition des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate de 10 données ou plus sur le bassin Rhin-Meuse en fonction de leur longueur (en années).

Les longueurs des chroniques à 10 données de concentrations en nitrate ou plus, sont globalement suffisantes pour décrire les évolutions passées et ainsi détecter des changements de comportements significatifs. La répartition des chroniques sur le bassin Rhin-Meuse en fonction de leur longueur n'est pas homogène comme observé sur l'illustration 11, avec les suivis les plus longs au sud et à l'est du bassin et les longueurs les plus faibles observées au nord, dans la masse d'eau 2010 « Calcaires du Dogger des côtes de Moselle » notamment. Toutefois, un nombre non négligeable de chroniques permet d'analyser de façon statistique le comportement des nitrates

dans les eaux souterraines à moyen et long terme et de mettre en évidence, notamment, des cycles à longues périodes dans les évolutions des concentrations. Cette condition est nécessaire pour pouvoir travailler sur les facteurs explicatifs des tendances observées. Aussi, les fréquences de prélèvements supérieures à 2 analyses par an (2 analyses par an n'apparaissant pas comme le cas optimal) permettent théoriquement de voir des variations saisonnières possibles dans les évolutions des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines. Or, ce préalable est nécessaire pour la mise en œuvre de méthodes statistiques qui prennent en compte ce phénomène perturbateur des tests classiques.

Enfin, le nombre important de chroniques disponibles sur le bassin Rhin-Meuse suggère la possibilité de réaliser une étude des tendances de manière spatialisée. Toutefois, la forte variabilité spatiale des valeurs de concentrations en nitrate indique la nécessité de créer des secteurs où les points sont représentatifs d'un même comportement vis-à-vis de l'évolution des concentrations en nitrate (ou d'utiliser une sectorisation existante comme les masses d'eau) avant l'application de méthodes statistiques spécifiques à l'analyse spatialisée des tendances.

4.1.2. Les données de concentrations en sulfate

L'ensemble des données de concentrations en sulfate utilisées pour l'étude de faisabilité sont extraites de la base de données sur les eaux souterraines ADES. **66 339 analyses des concentrations en sulfate réparties sur 5269 points de mesure** sont ainsi extraites de la base de données nationale sur les eaux souterraines le 14 février 2011.

L'illustration 12 propose un résumé statistique des principales caractéristiques des données de concentrations en sulfate dans les eaux souterraines disponibles sur le bassin Rhin-Meuse. Comme pour les nitrates, les statistiques sont calculées sur les moyennes, par chronique, des nombres de données (N), des fréquences de prélèvements (F) et des concentrations en sulfate (C).

	N : nombre moyen de données par chronique	L : longueur des chroniques		F : fréquence moyenne de prélèvements	C : concentration moyenne en sulfate
		années	jours		
moyenne	13.3	9.0	3282.3	1.2	105,6
médiane	4.0	7.0	2560.0	0.6	34,4
écart type	31.2	8.3	3036.9	2.4	382,4
CV (%)	234	93		205	362
min	1.0	0.0	0.0	0.0	0,0
max	708.0	63.5	23177.0	60.9	10958,0
1^{er} quartile	2.0	2.4	874.0	0.2	14,6
3^{ème} quartile	11.0	12.7	4622.0	1.2	66,4

Illustration 12 : Résumé statistique des caractéristiques des chroniques d'évolution des concentrations en sulfate dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse.

Nombres de données par chronique

Le nombre moyen de données par chroniques d'évolution des concentrations en sulfate dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse est de 13,3 soit un nombre moyen équivalent à celui des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate. La valeur médiane du nombre moyen de données par chronique est plus faible que la moyenne suggérant une répartition asymétrique autour de la moyenne. L'illustration 13a montre en effet une probabilité plus importante d'avoir un nombre de données dans la chronique inférieur à 13 ($\text{Prob}(n \leq 13) = 0,78$) que supérieur à cette valeur. Toutefois, sur les 5269 chroniques disponibles, 1581 disposent de 10 données ou plus (Illustration 13b). Ce critère constituant la première condition pour l'application des méthodes statistiques, 30 % des chroniques d'évolution des concentrations en sulfate dans les eaux souterraines disponibles sur le bassin Rhin-Meuse pourraient être valorisées selon cette voie, sous réserve de prendre en compte la longueur totale des séries chronologiques.

La variabilité du nombre de données par chronique d'évolution des concentrations en sulfate est assez importante comme le suggère la valeur du coefficient de variation (CV) de 234 % (Illustration 12). Les valeurs évoluent entre 1 et 708 données par chroniques avec 290 points qui disposent d'un suivi regroupant 50 données de concentrations en sulfate ou plus (Illustration 13 b). Le point qui présente le plus de données de concentrations en sulfate est le même que pour les nitrates : 02346X0001/F (Oberhausbergen dans le Bas-Rhin).

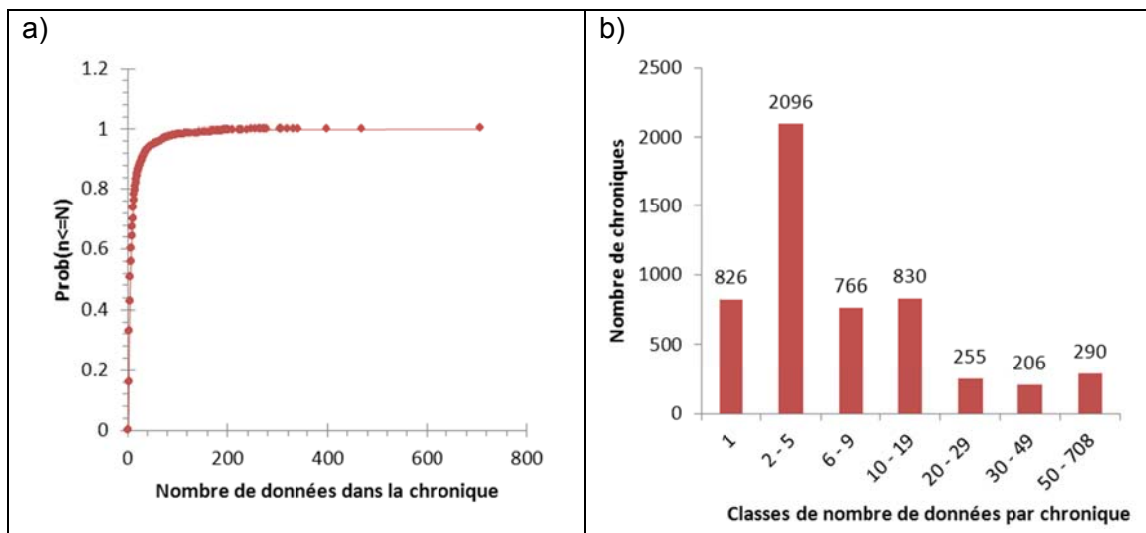


Illustration 13 : a) Courbe de répartition du nombre de données par chronique et b) nombre de chroniques par classes de nombre de données par chronique d'évolution des concentrations en sulfate disponibles sur la bassin Rhin-Meuse.

Longueurs et fréquences de prélèvement

La longueur moyenne des chroniques d'évolution des concentrations en sulfate dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse est de 9 ans, soit une valeur à peu près équivalente aux chroniques d'évolution des concentrations en nitrate.

Les longueurs de chroniques sont réparties de façon à peu près symétrique autour de la valeur moyenne avec une probabilité d'avoir des chroniques supérieures à 9 ans de 0,43 (Illustration 14 a). A l'instar de l'analyse des caractéristiques des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate, le nombre de chroniques d'évolution des concentrations en sulfate dont la longueur est égale ou supérieure à 10 ans est compté. Ainsi, 1995 chroniques, soit plus de 37 % des points disponibles (Illustration 14 b), proposent une longueur de suivi permettant la mise en évidence de cycles d'évolution des concentrations en sulfate à périodes relativement longues. De plus, 643 chroniques sont longues de 20 ans ou plus. Ces chroniques sont tout à fait intéressantes pour la caractérisation de changements de comportements sur le long terme.

Pour l'analyse statistique, 1160 chroniques à 10 données ou plus sont longues d'au moins 10 ans, ce qui représente plus de 73 % de l'ensemble des chroniques sur lesquelles une analyse statistique est envisageable. Parmi ces données, 379 chroniques ont une longueur égale ou supérieure à 20 ans.

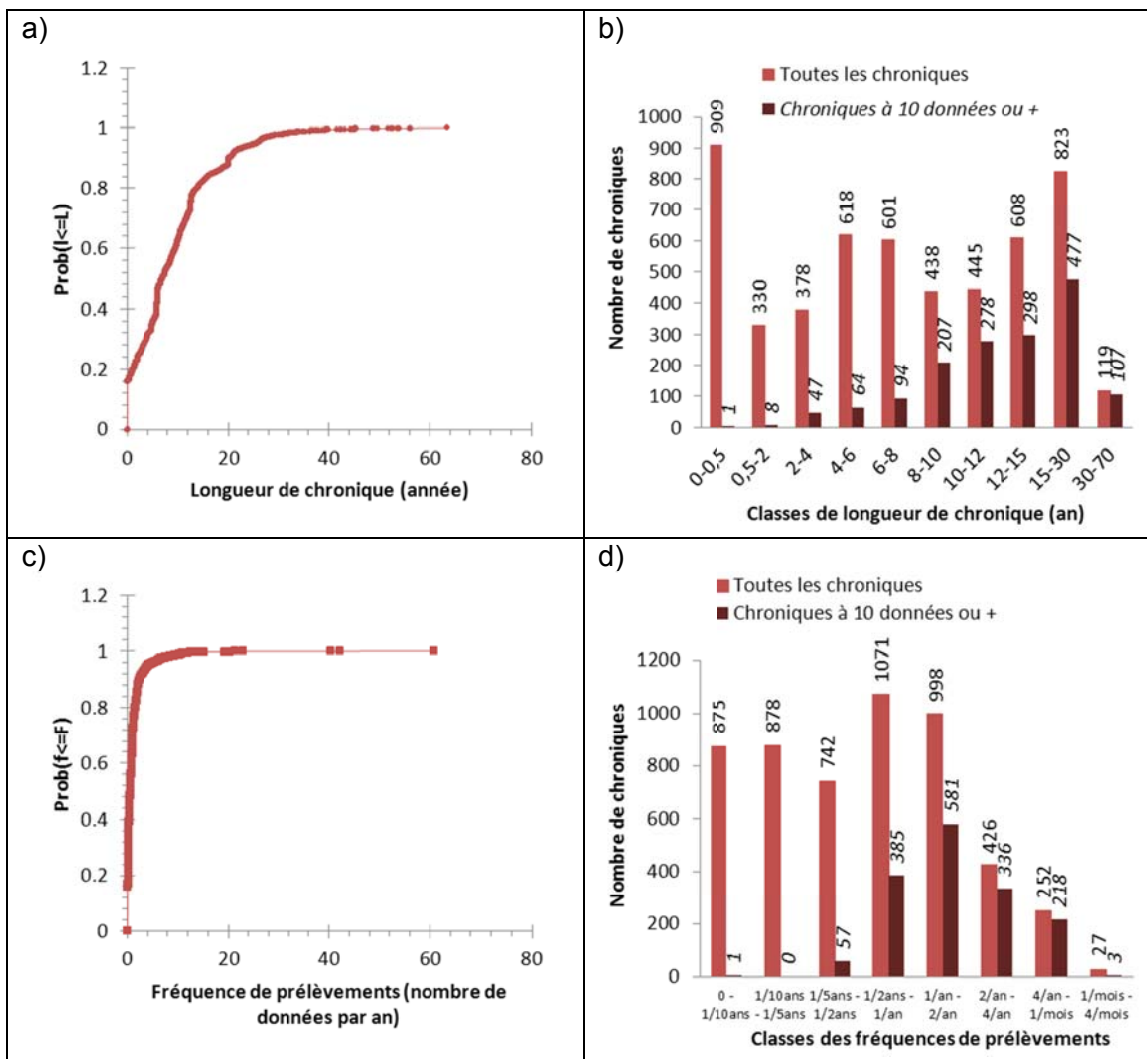


Illustration 14 : Courbes de répartition a) des longueurs de chroniques et c) des fréquences moyennes de prélèvements en sulfate. Nombre de chroniques d'évolution des concentrations en sulfate b) par classes de longueur et d) par classe de fréquences de prélèvements disponibles sur le bassin Rhin-Meuse.

Les fréquences moyennes de prélèvements pour l'analyse des concentrations en sulfate sont de 1,2 par an en moyenne sur l'ensemble des 5269 chroniques disponibles. Sur les chroniques de 10 données ou plus, la moyenne des fréquences moyennes de prélèvements double pour atteindre 2,4 analyses par an. La répartition de cette caractéristique au sein de la population représentée par l'ensemble des chroniques étudiées est asymétrique avec une probabilité d'avoir une fréquence moyenne de prélèvements inférieure à 1,2 analyses par an de 0,74 (Illustration 14c). Toutefois, comme le montre l'illustration 14d, 1703 chroniques d'évolution des

concentrations en sulfate ont une fréquence moyenne de prélèvements égale ou supérieure à 1 analyse par an. Parmi elles, 1228 chroniques ont 10 données de concentrations en sulfate ou plus. 705 chroniques à fréquences moyennes de prélèvements de 2 analyses par an ou plus permettent d'appréhender les variations saisonnières possibles des concentrations en sulfate. Pour en faire l'analyse statistique, 557 de ces chroniques ont 10 données ou plus.

Remarque : A l'instar des caractéristiques des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate, l'étude des potentialités d'application de méthodes statistiques sur les chroniques d'évolution des concentrations en sulfate repose sur l'analyse croisée de l'ensemble des caractéristiques détaillées. Une chronique très longue ne disposant que de très peu de données ne se prête pas à l'analyse statistique tout comme une chronique à très forte fréquence de prélèvement mais ne disposant que de très peu d'analyses.

Concentration moyenne en sulfate

La moyenne des concentrations en sulfate est élevée sur le bassin Rhin-Meuse avec une valeur de 105,6 mg/L reportée dans l'illustration 12. Les données disponibles sont très variables comme le montre le coefficient de variation établi à 362 %. La concentration maximale relevée est très élevée pour une eau souterraine avec presque 11 g/L de sulfate relevé au point 04133X0071/AVL localisé au sud de la nappe d'Alsace. Ces concentrations élevées sont toutefois caractéristiques de contextes particuliers d'envoyages d'anciennes mines.

Conclusions sur les chroniques d'évolutions des concentrations en sulfate disponibles

Les caractéristiques des chroniques d'évolution des concentrations en sulfate sont proches de celles concernant les nitrates. Ceci s'explique par l'analyse généralement concomitante de ces deux ions majeurs. Les différences sont expliquées essentiellement par des problématiques spécifiques à l'un ou l'autre paramètre dans certains secteurs. Les concentrations élevées en sulfate sont notamment observées dans les secteurs où des mines de fer ont été envoyées. Des augmentations brusques sont constatées lors de l'envoyage en raison de la dissolution de matériel évaporitique. Des suivis spécifiques ont ainsi été mis en œuvre sur ces points en particulier avec des fréquences de prélèvement élevées.

Comme pour les nitrates, la répartition des points sur le bassin Rhin-Meuse en fonction du nombre de données par chronique (Illustration 15) montre que toutes les masses d'eau disposent d'au moins une chronique d'évolution des concentrations en sulfate sur laquelle l'analyse statistique est envisageable. La répartition des points n'est toutefois pas homogène, avec des masses d'eau qui disposent d'un nombre important

de chroniques à plus de 10 données (nappe d'Alsace, calcaires oxfordiens et calcaires du Dogger par exemple) et d'autres moins bien suivies. La masse d'eau 2008 « Plateau lorrain versant Rhin » ne dispose par exemple que de 80 chroniques à 10 données ou plus alors que sa surface couvre plus de 20 % de la surface totale du bassin Rhin-Meuse.

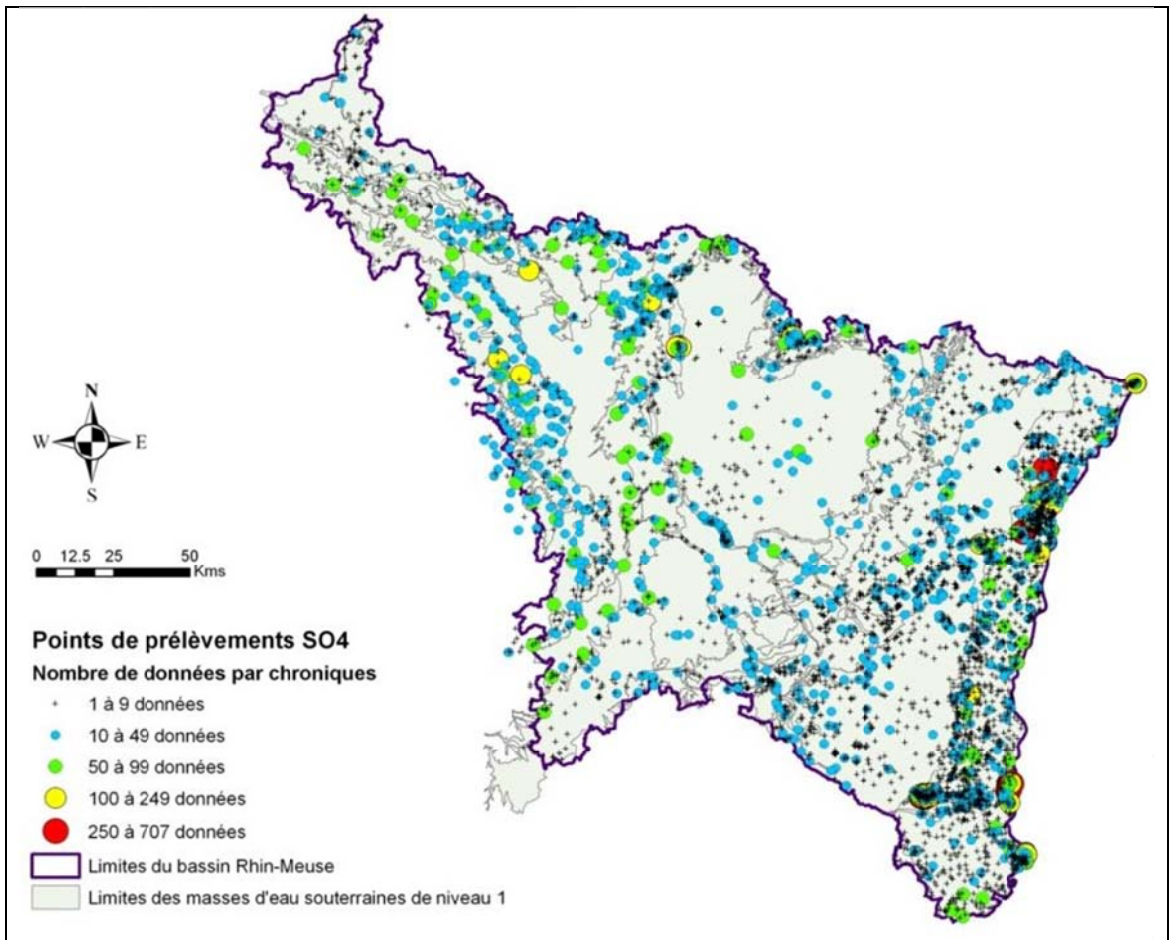


Illustration 15 : Répartition des points de prélèvements sur le bassin Rhin-Meuse en fonction du nombre de données de concentration en sulfate par chronique.

Les longueurs des chroniques d'évolution des concentrations en sulfate sur le bassin Rhin-Meuse sont globalement suffisantes pour d'écrire les évolutions passées et mettre en évidence d'éventuels cycles à périodes supérieures à 10 ans. L'illustration 16 rend compte de cet état de fait tout en mettant en évidence une densité de chroniques de longues durées (> 20 ans) plus importante au sud et à l'est du bassin que dans les autres secteurs.

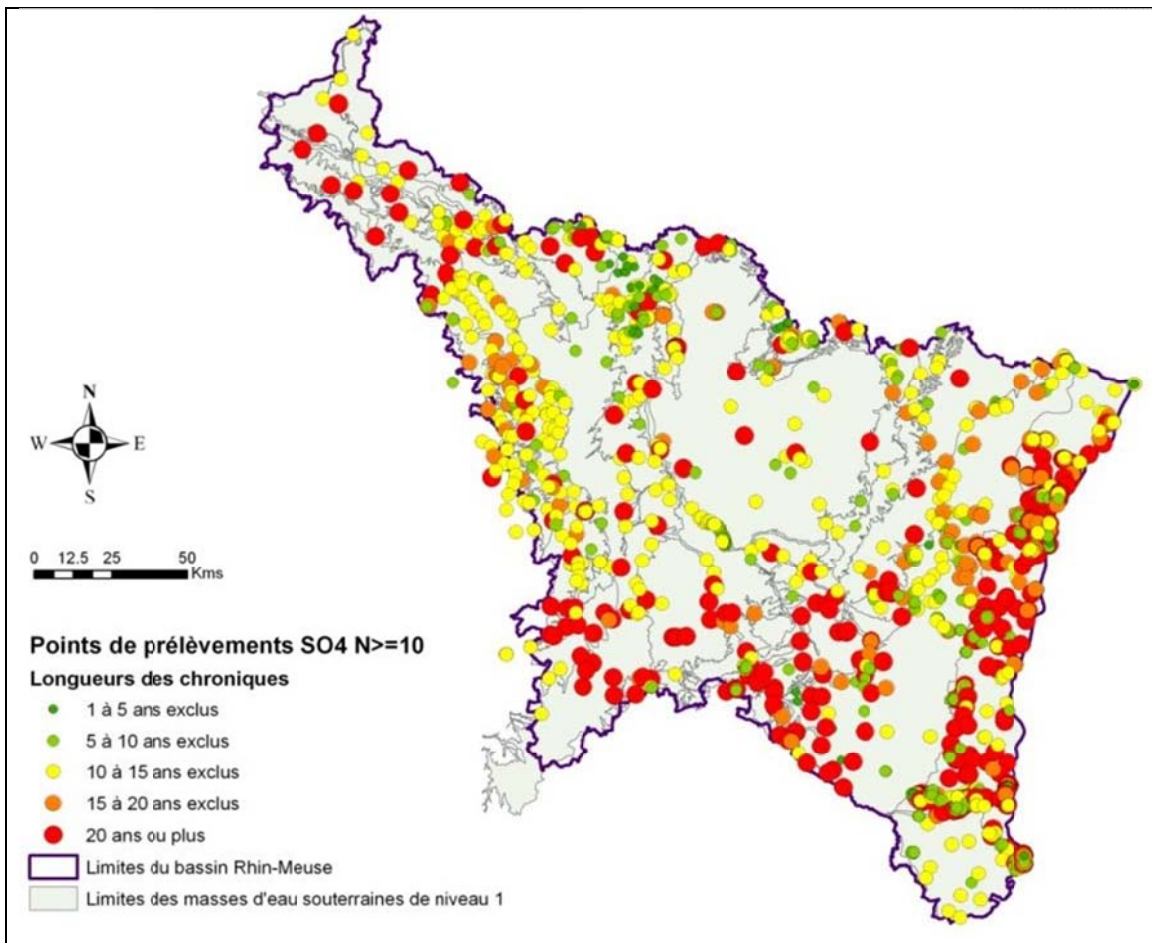


Illustration 16 : Répartition des chroniques d'évolution des concentrations en sulfate de 10 données ou plus sur le bassin Rhin-Meuse en fonction de leur longueur (en années).

4.1.3. Les données de concentrations en substances phytosanitaires

Données disponibles et sélection de substances phytosanitaires

L'approche pour décrire les caractéristiques des données de concentrations en substances phytosanitaires dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse diffère de celle utilisée pour décrire les données de concentrations en nitrate et sulfate. En effet, les teneurs des substances phytosanitaires dans les eaux souterraines sont généralement faibles voire nulles. Ainsi, lorsqu'une substance est détectée mais que les concentrations sont trop faibles pour être quantifiées de manière fiable, les données portent la mention « inférieur à la limite de quantification ». Cette indication, si elle n'est pas quantitative, informe tout de même sur la présence de la substance dans l'eau prélevée sans qu'il ait été possible d'en donner la concentration exacte. Lorsque la substance est absente dans le milieu de recherche, les données portent la mention

« inférieur à la limite de détection ». Néanmoins, si cette norme de bancarisation des données est bien utilisée aujourd'hui, il est possible que ce ne soit pas le cas pour les données plus anciennes, des confusions pouvant avoir été faites entre « limite de quantification » et « limite de détection ».

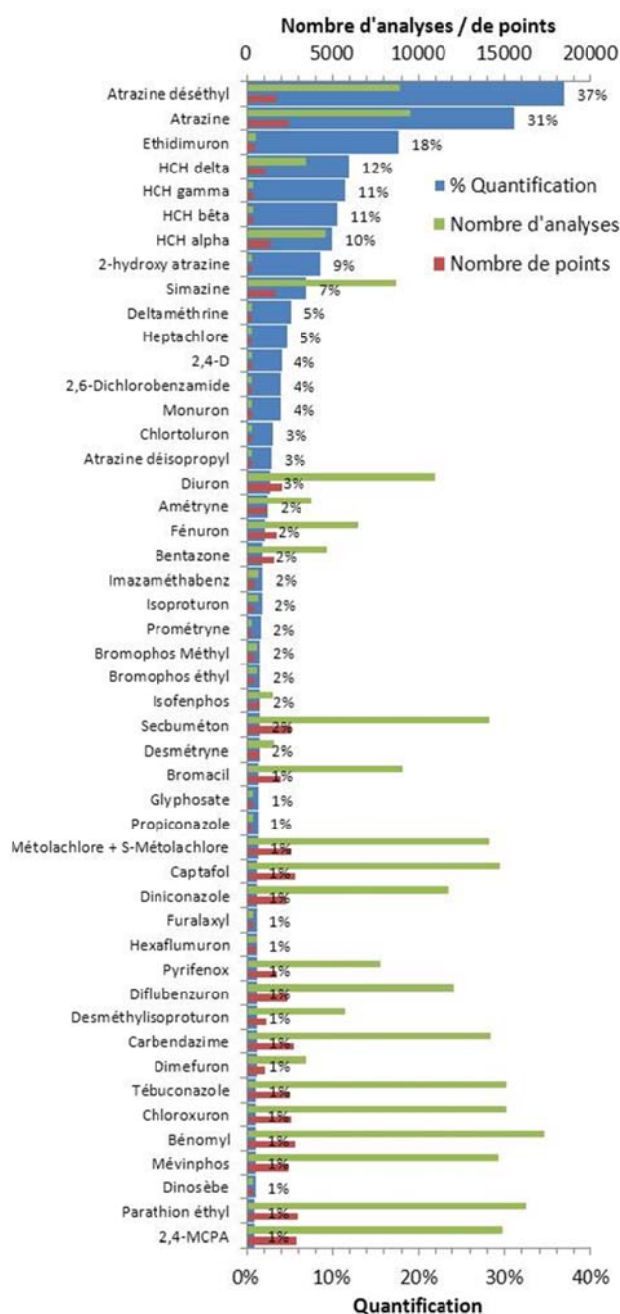


Illustration 17 : Substances phytosanitaires analysées sur plus de 200 points les plus fréquemment quantifiées (> 1 %) sur le bassin Rhin-Meuse.

De ce fait, au-delà de la connaissance exacte de la concentration des substances phytosanitaires dans les eaux souterraines, la première information qu'il est nécessaire d'étudier est leur fréquence de quantification.

Sur le bassin Rhin-Meuse, 448 substances phytosanitaires ont été recherchées au moins une fois. Parmi ces substances, 98 n'ont jamais été quantifiées. Néanmoins, 80 d'entre elles ne sont recherchées que récemment, depuis janvier ou mars 2008 pour 58 substances et depuis janvier 2009 pour les 22 restantes (avril 2009 pour la zoxamide). 18 substances phytosanitaires jamais quantifiées dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse sont recherchées depuis 2005 au moins (date minimale de recherche de 1986 à 2005).

L'illustration 17 montre, parmi les substances recherchées sur plus de 200 points (critère de représentativité fixé arbitrairement), celles quantifiées sur plus d'1 % des analyses effectuées. 7 substances ont été quantifiées sur 10 % des prélèvements effectués ; il s'agit, dans l'ordre décroissant de fréquence de quantification (FQ) :

- de la déséthylatrazine (FQ = 36,9 % ; 2830 points ; 14 908 analyses),
- de l'atrazine (FQ = 31,1 % ; 2973 points ; 16 231 analyses),
- de l'éthidimuron (FQ = 17,7 % ; 340 points ; 350 analyses) et
- des différentes formes du Lindane dont l'HCH delta (FQ = 12,1 % ; 2375 points ; 14 623 analyses) ; l'HCH gamma (FQ = 11,5 % ; 2801 points ; 17 286 analyses) ; l'HCH bêta (FQ = 10,7 % ; 2527 points ; 15 088 analyses) et l'HCH alpha (FQ = 10 % ; 2519 points ; 15 065 analyses).

Parmi les substances phytosanitaires les plus fréquemment quantifiées sur le bassin Rhin-Meuse, il est décidé, pour l'étude de faisabilité, de se concentrer sur 5 paramètres :

- l'atrazine,
- la déséthylatrazine,
- le métolachlore,
- le 2,6-dichlorobenzamide et
- le glyphosate.

Ces paramètres sont choisis à partir des statistiques générales établies et présentées dans l'illustration 17 et « à dire d'expert » de façon à appréhender la contamination des eaux souterraines du bassin pour des herbicides ou métabolites appartenant à des familles chimiques différentes.

En effet, l'atrazine est un herbicide de la famille des triazines dont l'usage est interdit en France depuis 2003. Il est pourtant encore fréquemment quantifié dans les eaux souterraines, généralement accompagné de ses métabolites comme la déséthylatrazine (DEA).

Le métolachlore est un herbicide sélectif de la famille des chloroacétamides utilisé principalement pour le désherbage du maïs. Si le métolachlore est interdit depuis 2005, le S-métolachlore est autorisé jusqu'en 2015 avant révision du dossier d'homologation. Il s'agit en fait d'une modification du ratio entre les isomères R et S de cette molécule. La fonction herbicide étant portée par les isomères S, le passage du métolachlore au S-métolachlore a conduit à une réduction des doses utilisées. Il convient de souligner que lors d'une analyse chimique classique, les différents isomères sont dosés simultanément sans distinction.

Le 2,6-dichlorobenzamide est un métabolite (fraction majeure) du dichlobenil, herbicide de la famille des benzonitriles dont l'usage n'est plus autorisé en France. Il est aussi un métabolite du fluopicolide, herbicide de la famille des benzamides récemment mis sur le marché.

Enfin, le glyphosate est un herbicide de la famille des phosphonoglycines. Cette substance est très utilisée à la fois pour des usages agricoles et non agricoles.

Données disponibles sur les paramètres phytosanitaires sélectionnés

L'illustration 18 regroupe les caractéristiques des données disponibles sur les 5 paramètres phytosanitaires sélectionnés pour l'étude de faisabilité. Il est montré que l'atrazine, la déséthylatrazine et le métolachlore disposent du plus grand nombre de données, supérieur à 10 000 sur l'ensemble du bassin Rhin-Meuse. Ces données sont collectées sur plus de 2000 points de prélèvements pour ces trois molécules. Ce nombre important de données disponibles peut être expliqué par une recherche relativement ancienne de ces paramètres dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse, depuis 1986 pour l'atrazine, 1995 pour son métabolite déséthyl et depuis 1999 pour le métolachlore. Les deux autres molécules sélectionnées sont recherchées depuis une date plus récente, ce qui peut expliquer en partie le faible nombre de données disponibles, notamment pour le 2,6-dichlorobenzamide.

La mise en œuvre de méthodes statistiques d'analyses des séries temporelles nécessite généralement un nombre minimum de 10 données dans la chronique. Environ 10 % des chroniques d'évolution des concentrations en atrazine, déséthylatrazine, métolachlore et glyphosate satisfont ce critère alors qu'il n'existe pas, à l'heure actuelle, de chronique d'évolution des concentrations en 2,6-dichlorobenzamide de 10 données ou plus. Les chroniques de 10 données ou plus ont des longueurs d'environ 10 ans en moyenne pour les paramètres atrazine, déséthylatrazine et métolachlore. Ces chroniques permettent ainsi d'avoir un recul non négligeable sur les évolutions passées des concentrations en ces molécules dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse. Les longueurs des chroniques d'évolution des concentrations en glyphosate sont plus faibles, en rapport avec une recherche de cet élément plus récente dans les eaux souterraines.

Parmi les données disponibles, il est important de rendre compte des fréquences de quantification dans les eaux souterraines des substances sélectionnées. L'atrazine et son métabolite déséthyl ont été quantifiés au moins une fois sur plus de 1300 points soit sur près de 50 % des points où ils ont été recherchés. La moyenne des fréquences de quantification par point est de 30,5 % pour l'atrazine et de 35,3 % pour la déséthylatrazine. Le métolachlore a été bien moins souvent quantifié avec seulement 99 points où la concentration en cet herbicide a été mesurée une fois au minimum (soit sur 5 % environ des points où la substance a été recherchée). La moyenne des fréquences de quantification par point est de 3,7 %. Elle est à peu près équivalente à celle du 2,6-dichlorobenzamide (4,1 % en moyenne) qui a été quantifié au moins une fois sur 23 points. Le glyphosate possède une moyenne des fréquences de quantification par point assez faible (2,4 %). Il a été quantifié au moins une fois sur 5 % environ des points où il a été recherché.

	Atrazine	Déséthylatrazine	Métolachlore	2,6-dichlorobenzamide	Glyphosate
Nombre d'analyses	16231	14908	10929	569	6464
Nombre de chroniques (+ de 10 données)	2973 (307)	2830 (267)	2016 (204)	536 (0)	1736 (191)
Longueur moyenne des chroniques (+ de 10 données)	4,6 ans (11,3 ans)	3,9 ans (10,1 ans)	2,9 ans (9,7 ans)	15 jours	1,9 ans (5,5 ans)
Nombre de données moyen par chronique	5,5	5,2	5,4	1,1	3,7
Date de la première recherche (moyenne)	Nov. 1986 (Juil. 2001)	Nov. 1995 (Oct. 2002)	Avr. 1999 (Déc. 2004)	Août 2003 (Janv. 2009)	Janv. 2003 (Mars 2006)
Points où quantifié 1 fois au minimum	1302	1353	99	23	89
Nombre de données > LQ	5049	5507	148	23	92
Moyenne des FQ (+ de 10 données)	30,5 % (31,5 %)	35,3 % (35,8 %)	3,7 % (1,2 %)	4,1 % (--)	2,4 % (0,5 %)
Nombre de données < LQ	7834	6703	8861	19	5688
Nombre de données < LD	3323	2686	1919	527	682

Illustration 18 : Caractéristiques des données disponibles sur les 5 paramètres phytosanitaires sélectionnés

Conclusion sur les données de concentrations dans les eaux souterraines des 5 substances phytosanitaires sélectionnées

La mise en œuvre d'une étude statistique des tendances d'évolutions des concentrations en substances phytosanitaires à l'échelle du bassin Rhin-Meuse dépend de la disponibilité sur le bassin de chroniques disposant d'un nombre suffisant de données (≥ 10) et sur lesquelles la substance étudiée est fréquemment quantifiée.

L'illustration 19 présente à cet effet la répartition des chroniques d'évolution des concentrations en atrazine, en déséthylatrazine, en métolachlore et en glyphosate qui disposent de 10 données de concentrations ou plus, en fonction du nombre de prélèvements et des fréquences de quantification des substances aux points. Le 2,6-dichlorobenzamide ne dispose pas de chroniques de 10 données minimum.

Comme le montre l'illustration 19, l'atrazine et la déséthylatrazine sont les deux paramètres, parmi les 5 sélectionnés, les plus favorables à l'analyse statistique. 55 chroniques d'évolution des concentrations en atrazine de 10 données ou plus montrent des fréquences de quantification de 75 % ou plus. Parmi ces chroniques, 15 ont des fréquences de quantification de l'atrazine de 100 % et pourront donc être analysées avec des tests statistiques classiques de détection des tendances. Pour la déséthylatrazine, 62 chroniques de plus de 10 données montrent des fréquences de quantification égales ou supérieures à 75 %. 18 d'entre elles ont toutes leurs données supérieures aux limites de quantifications. Ces chroniques sont localisées essentiellement dans les masses d'eau « pliocène de l'Haguenau et nappe d'Alsace » en bordure est du bassin Rhin-Meuse, « calcaires du Dogger » et « calcaires oxfordiens » à l'ouest.

Comme il a déjà été évoqué, les substances métolachlore et glyphosate sont plus rarement quantifiées dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse. Dans le panel de chroniques d'évolution des concentrations en métolachlore qui disposent de 10 données au minimum, cet herbicide a été quantifié au moins une fois sur 20 points de prélèvements dont 2 montrent des fréquences de quantification supérieures à 50 %. Le glyphosate est quantifié au moins une fois sur 19 points de prélèvements qui disposent de 10 données au minimum. Les fréquences de quantifications du glyphosate ne dépassent jamais 10 % pour l'ensemble de ces 19 chroniques.

Le cas du 2,6-dichlorobenzamide est à part en raison d'une recherche dans les eaux souterraines trop récente (janvier 2009 en moyenne) pour que les chroniques soient suffisamment renseignées. Le nombre moyen de données par chronique est proche de 1, les fréquences de quantification reportées étant de ce fait soit 0, soit 100 % dans la majorité des cas.

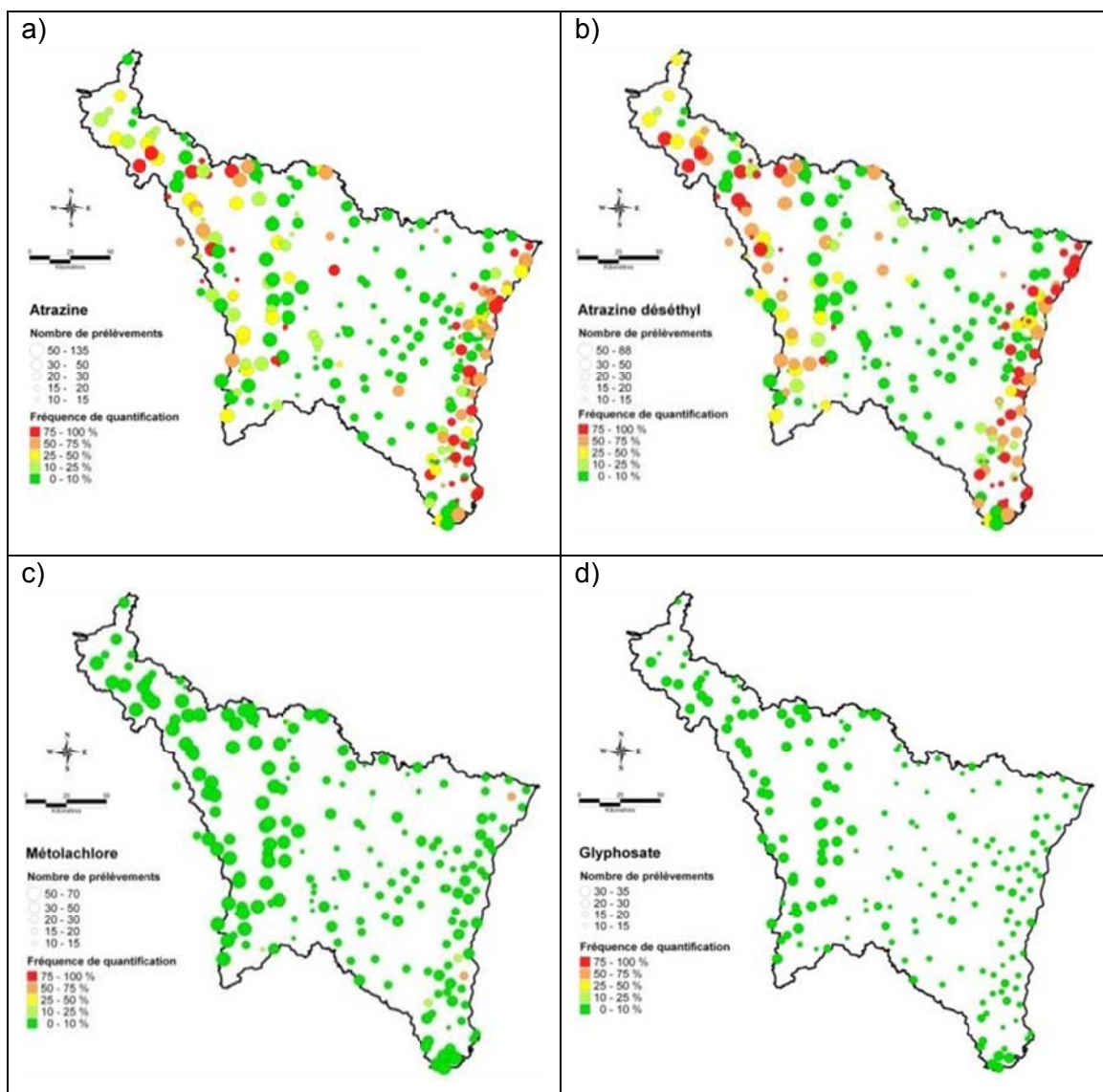


Illustration 19 : Répartition, à l'échelle du bassin Rhin-Meuse, de l'état de contamination des eaux souterraines par a) l'atrazine, b) l'atrazine déséthyl, c) le métolachlore et d) le glyphosate. Seuls les points de 10 données ou plus sont représentés, la taille du point augmentant avec le nombre de prélèvements et la couleur définissant la fréquence de quantification.

Sur les chroniques d'évolution des concentrations des paramètres qui ne sont pas quantifiés dans 100 % des prélèvements, il sera nécessaire d'appliquer des méthodes alternatives d'étude de leur évolution. Ces méthodes sont décrites au § 3.1 et plusieurs alternatives pourront être testées et comparées. Sur les chroniques où la fréquence de quantification est inférieure à 10 %, l'information soutenue par la série ne semble pas assez suffisante pour décrire la tendance d'évolution du paramètre étudié. Ce cas de figure est pourtant souvent rencontré dans les bases de données mises à disposition de sorte que d'autres voies de valorisations devront être explorées par ailleurs.

4.2. SELECTION DES CHRONIQUES SUR LESQUELLES LES TESTS STATISTIQUES VONT ETRE MIS EN OEUVRE

4.2.1. Les chroniques d'évolution des concentrations en nitrate

En 2010, l'Agence de l'eau Rhin-Meuse a travaillé sur l'évolution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines et la détermination des tendances à la hausse. Ces travaux se sont concentrés sur 7 des 26 masses d'eau du bassin identifiées comme présentant une tendance à la hausse significative et durable pour les nitrates lors de l'élaboration des SDAGE Rhin et Meuse adoptés en novembre 2009. Ces masses d'eau sont :

- Masse d'eau 2001 : Pliocène d'Haguenau et nappe d'Alsace
- Masse d'eau 2002 : Sundgau versant Rhin-Meuse et Jura alsacien
- Masse d'eau 2006 : Calcaires du Muschelkalk
- Masse d'eau 2008 : Plateau lorrain versant Rhin
- Masse d'eau 2010 : Calcaires du Dogger des côtes de Moselle
- Masse d'eau 2011 : Calcaires du Dogger du plateau de Haye
- Masse d'eau 2013 : Calcaires oxfordiens

Les chroniques d'évolution des concentrations en nitrate exploitées pour l'étude de faisabilité sont sélectionnées en priorité dans ces masses d'eau afin de pouvoir comparer les résultats avec ceux issus des travaux de l'Agence.

36 chroniques d'évolution des concentrations en nitrate appartiennent à l'une de ces sept masses d'eau, montrent une dégradation de la qualité de l'eau souterraine en raison du paramètre nitrate et disposent d'une fiche descriptive de l'aire d'alimentation du captage accompagnée d'un dossier de travail explicatif et cartographique de cette aire. Sur ces 36 points, 5 n'ont aucune donnée bancarisée dans ADES et ne sont pas des points dont les données auraient été fournies par l'Agence a posteriori. Il s'agit des points : 01938X0113/HY, 01938X0147/SCE1, 01938X0148/SCE2, 01938X0149/SCE3, 01938X0150/SCE4 tous situés sur la commune de Loisy, dans la masse d'eau n° 2008 « Plateau lorrain versant Rhin ». Ces chroniques ne sont donc pas sélectionnées. De plus, dans le fichier 'LISTE_GRENELLE_SDAGE_AERM_AIRES' fourni par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, les points 01143X0077 et 01143X0078 ont des indices erronés. L'indice vrai est /SCE pour les deux points et non /HY comme mentionné dans le fichier envoyé par l'Agence.

Ainsi, sur les 36 points appartenant à une masse d'eau du bassin dégradée pour un problème lié aux concentrations en nitrate et qui disposent d'informations descriptives et cartographiques de l'aire d'alimentation, 31 sont sélectionnés pour l'étude de faisabilité. Ces points sont localisés dans 6 masses d'eau au total (n°2001, 2006, 2008, 2010, 2011, 2013).

Afin de compléter cette liste, ont été ajoutés :

- 2 points à fréquences de prélèvements mensuelles sur 33 années de suivi (04134X0018/P13 et 04134X0136/PN4) au sud de la masse d'eau 2001 « Pliocène d'Haguenau et nappe d'Alsace »
- 1 point à chronique longue (54 ans) et à fréquence de prélèvement moyenne de 1 mesure tous les 2 mois (03427X0001/F1 masse d'eau 2001 « Pliocène d'Haguenau et nappe d'Alsace »)
- 5 points pour lesquels l'Agence a fourni des données de concentrations en nitrate complémentaires suivies depuis 18 à 19 ans aux fréquences de prélèvements moyennes proches de 1 mesure tous les 15 jours (03033X0017/HY, 03033X0019/HY, 03033X0020/HY, 03033X0021/HY et 03033X0023/HY). Ces points sont localisés dans la masse d'eau n°2008 « Plateau lorrain versant Rhin » et la masse d'eau n°2011 « Calcaires du Dogger du plateau de Haye » pour le point 03033X0023/HY.
- 4 points à fréquences moyennes de prélèvements élevées (prélèvements mensuels) sur une période relativement courte de 2 ans. Ces points 01641X0156/P1, 01641X0157/P2, 01641X0158/P3 et 01641X0159/P4 sont localisés dans la masse d'eau 2016 « alluvion de la Moselle en aval de la confluence avec la Meuse ».
- 1 point à longue chronique (plus de 58 ans) et fréquence de prélèvement moyenne proche de 1 mesure par mois (02722X0019/F). Ce point est localisé dans la masse d'eau 2001 : Pliocène d'Haguenau et nappe d'Alsace.

- 3 points (03028X0021/HY, 03031X0013/HY et 03033X0005/HY) proposant un suivi des concentrations en nitrate sur plus de 20 ans avec des fréquences de prélèvement supérieures à 1 mesure par mois. Les deux premiers points sont situés dans la masse d'eau n°2011 : Calcaires du Dogger du plateau de Haye, le dernier étant localisé dans la masse n°2008 : Plateau lorrain versant Rhin.

Au total, 48 chroniques d'évolution des concentrations en nitrate sont sélectionnées pour l'étude de faisabilité. Ces points, listés en Annexe 2, renseignent ainsi 7 masses d'eau.

De plus, dans cette étude de faisabilité, **il est proposé de comparer les résultats du calcul de tendance spatialisée réalisé à l'aide du test Kendall régional, aux résultats du même calcul issu de la méthode du vecteur régional. La masse d'eau 2013 « Calcaires oxfordiens » est proposée comme échelle de travail pour la réalisation de ces tests.** Cette masse d'eau dispose d'un nombre important de points de prélèvements en nitrate et les chroniques disposent généralement de plus de 10 données (139 points dont 80 ont 10 données ou plus). Aussi, cette masse d'eau fait partie des 7 masses d'eau sur lesquelles l'Agence de bassin a réalisé des études d'identification des tendances d'évolution des nitrate à la hausse.

L'illustration 20 localise les points de prélèvement d'où sont issues les chroniques d'évolution des concentrations en nitrate sélectionnées pour l'étude de faisabilité.

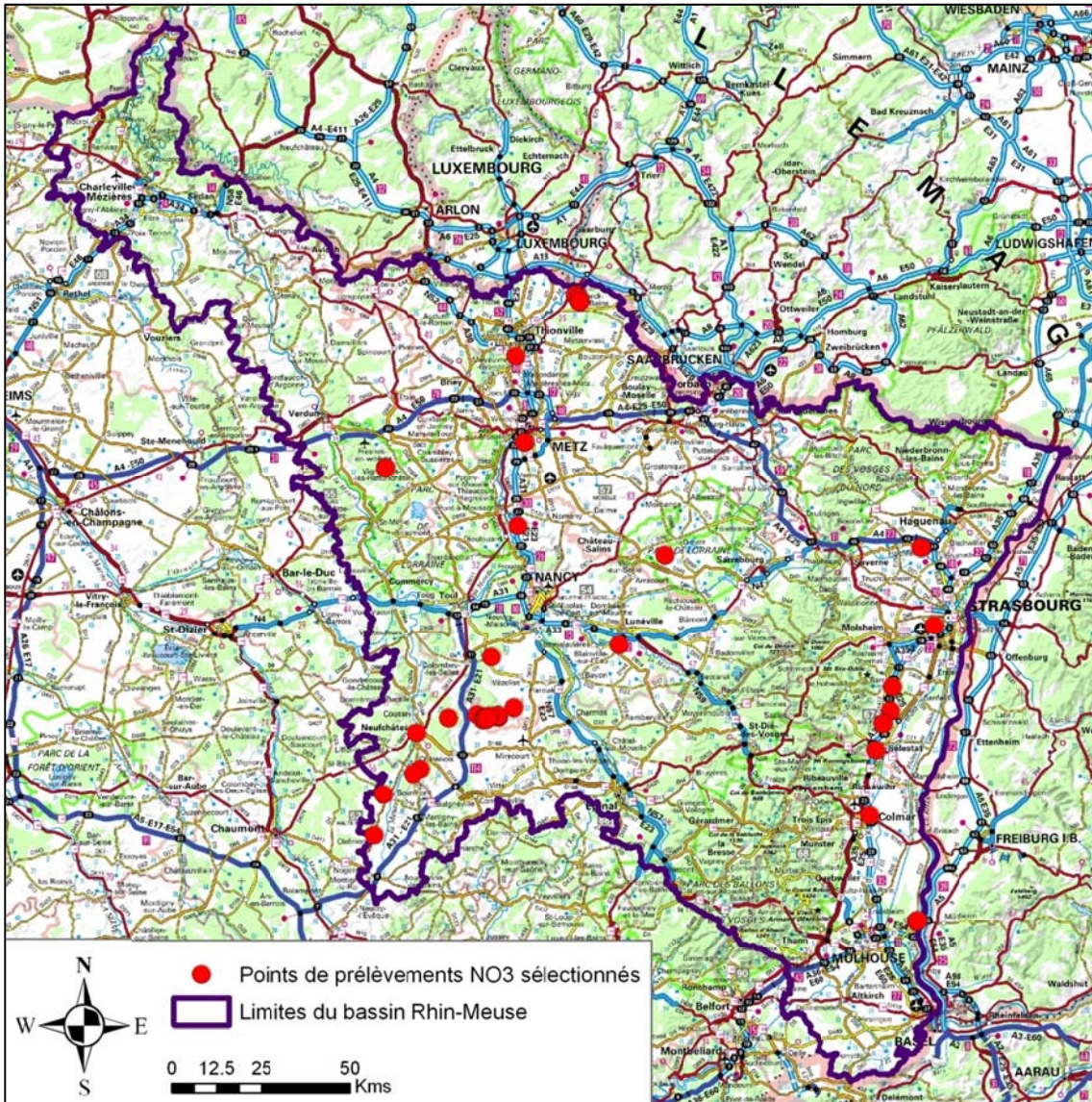


Illustration 20 : Localisation des points de prélèvement sélectionnés sur le bassin Rhin-Meuse pour l'analyse des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate.

4.2.2. Les chroniques d'évolution des concentrations en sulfate

Depuis la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, le nord de la Lorraine a connu une importante activité minière sur le bassin ferrifère, situé principalement dans le nord-ouest mosellan, le nord de la Meurthe-et-Moselle (Pays-Haut) et une frange meusienne. L'arrêt progressif de l'exploitation minière dans le bassin ferrifère ces deux dernières décennies, a conduit à des modifications du régime des eaux souterraines et superficielles, ainsi qu'à l'altération de leur qualité (en particulier à l'augmentation des concentrations en sulfates à des valeurs atteignant 2 à 3 g/L). Des réseaux de surveillance ont ainsi été constitués depuis les années 90 suite à plusieurs arrêtés préfectoraux en vue d'assurer le suivi des phases d'ennoyage des différents réservoirs miniers du bassin ferrifère Nord Lorrain.

Les réseaux de suivi quantitatif et qualitatifs ont été constitués de manière concomitante avec les phases d'ennoyage des différents réservoirs miniers. La durée des chroniques issues des réseaux de surveillance est donc en relation directe avec les dates d'ennoyage des réservoirs (pour information, les périodes d'ennoyage sont schématisées ci-dessous).

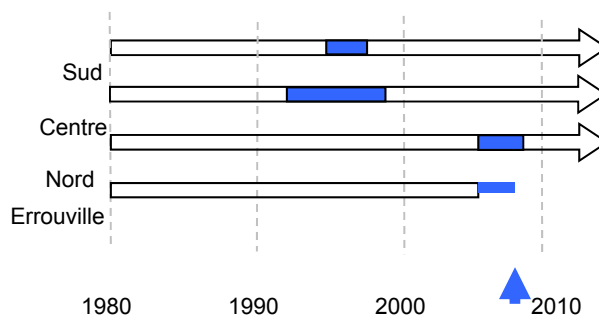


Illustration 21 : Périodes d'ennoyage des principaux réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain

La problématique des concentrations en sulfates résulte de l'ennoyage des réservoirs miniers. Cette situation est transitoire, jusqu'à ce que le stock d'eau minéralisée initial soit évacué par le jeu normal des circulations souterraines (les éléments chimiques responsables de la minéralisation de l'eau sont dissous totalement quelques dizaines de jours après le début de l'ennoyage, et ce stock d'éléments pouvant être dissous ne se renouvelle pas en milieu ennoyé). Cette situation transitoire peut durer plusieurs années, voire plusieurs dizaines d'années si le temps de résidence de l'eau dans le réservoir est long.

La localisation du bassin ferrifère en Lorraine et des réservoirs miniers est présentée en Illustration 22.

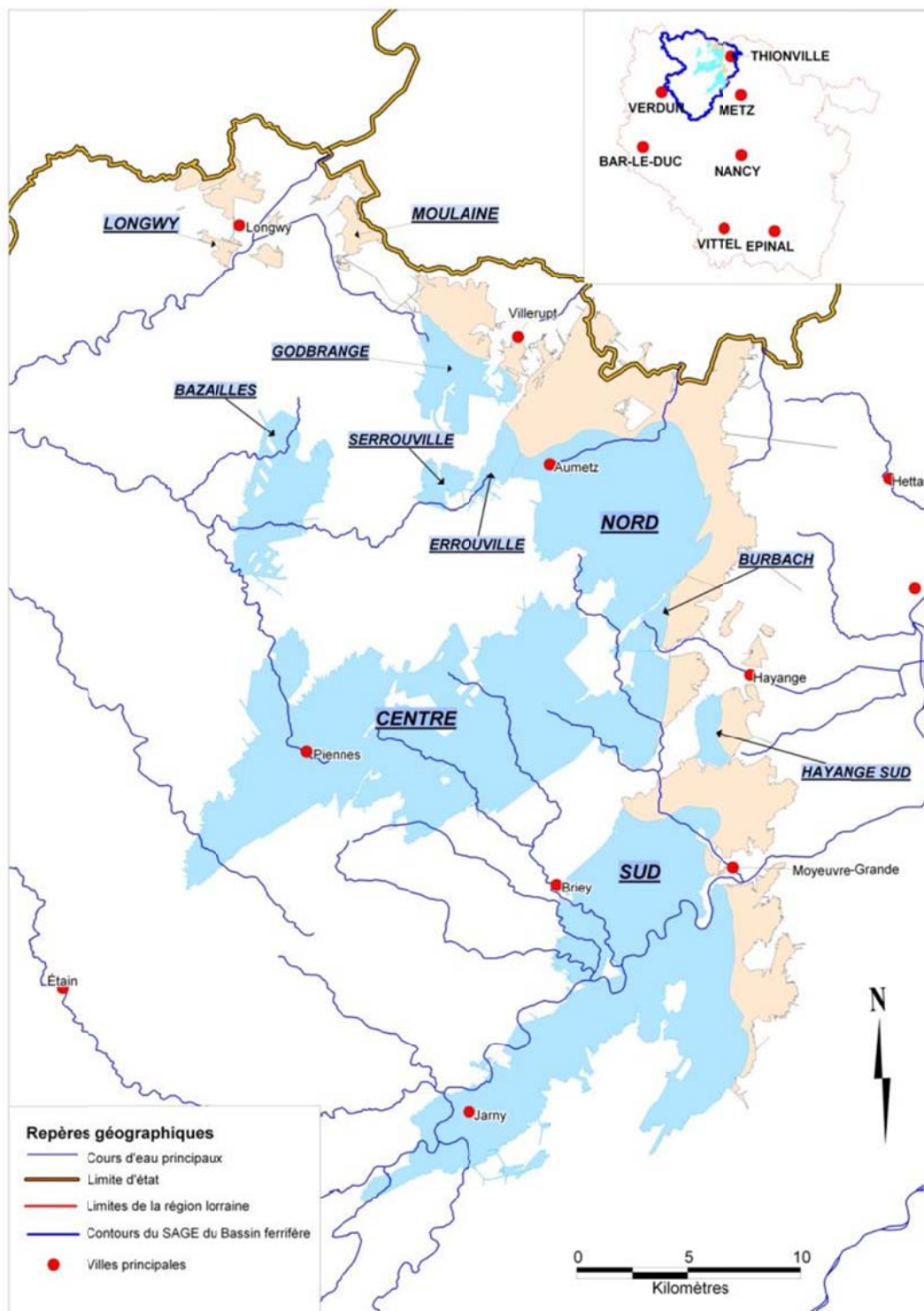


Illustration 22 : Localisation du bassin ferrifère Lorrain et des différents réservoirs miniers

L'illustration 23 schématise la complexité du fonctionnement hydrogéologique du bassin ferrifère et notamment les interactions entre les différents aquifères.

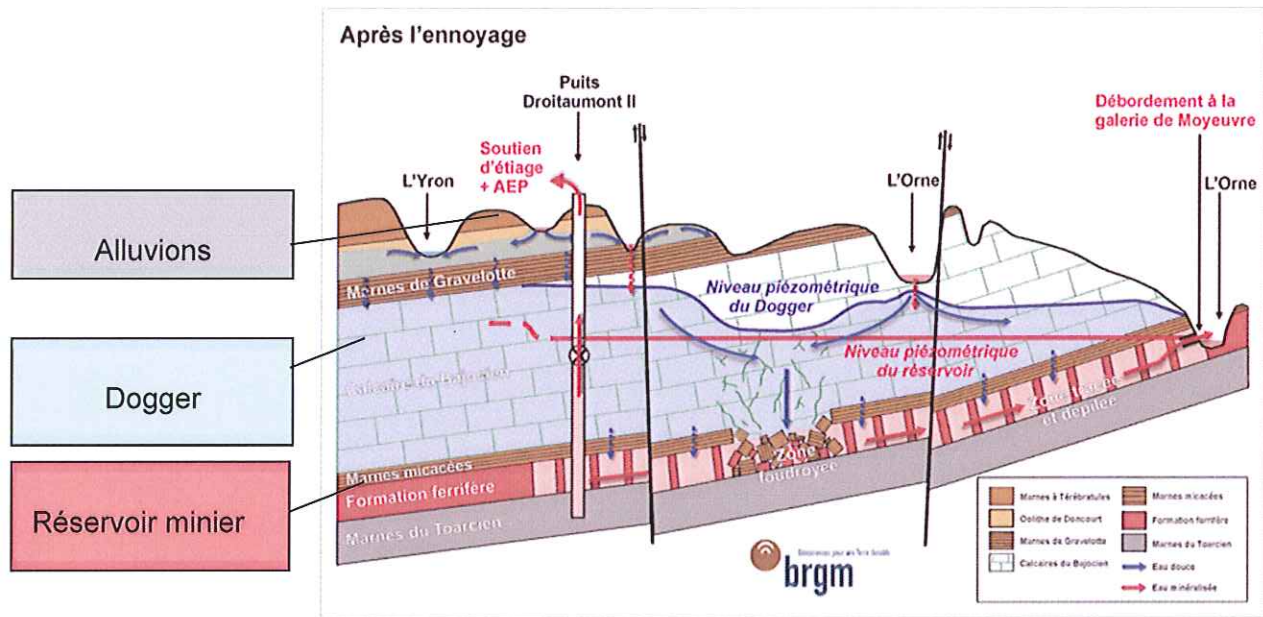


Illustration 23 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique du bassin ferrifère

Du point de vue hydrogéologique, la série fait apparaître les formations aquifères principales suivantes :

- la formation ferrifère aquifère reposant sur les marnes du Toarcien imperméables et surmontée des marnes micacées imperméables du bajocien inférieur, c'est un aquifère artificiel constitué des vides créés par les galeries minières,
- l'importante formation aquifère du Bajocien (nappe du Dogger), principalement karstique et fissurée,
- les nappes perchées du bajocien supérieur (Oolite de Doncourt, etc.) séparées par des épontes imperméables à semi-perméables (marnes de Gravelotte),
- des nappes alluviales de faible extension (alluvions de l'Orne, de la Fensh, etc.).

La nature des écoulements dans ces différentes formations présente une importante complexité. Dans la pratique, l'ensemble des formations aquifères sont susceptibles d'être en communication hydraulique. C'est le cas notamment :

- de la formation ferrifère et de l'aquifère du Dogger, mis en communication au niveau des zones foudroyées (affaissement de la formation micacée suite aux effondrements miniers),
- des aquifères perchés du bajocien inférieur et du bathonien avec l'aquifère principal du Dogger,
- des aquifères alluviaux avec les aquifères du Dogger et de la formation ferrifère au niveau des vallées.

Les directions d'écoulements font apparaître :

- le drainage de la nappe du Dogger par celle des formations ferrifères (réservoir minier),
- le drainage de la nappe des formations ferrifère par les cours d'eau au niveau des points de débordement des différents réservoirs et des points de rejets des exhaures conservés au titre du soutien d'étiage.

Remarque : Des informations détaillées sur le contexte géologique et hydrogéologique du bassin ferrifère Nord-Lorrain sont accessibles dans les rapports BRGM/RP-55434-FR et BRGM/RP-58029-FR.

Les chroniques de concentrations en sulfates sont extraites du réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines du bassin ferrifère Lorrain, géré par le BRGM en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhin-Meuse. Le réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain est déclaré sur ADES sous le code Sandre 0200000013. La zone concernée par l'opération de surveillance englobe les 3 principaux bassins du bassin ferrifère lorrain (Sud, Centre, Nord ennoyés respectivement de 1993 à octobre 1998, de 1995 à mars 1999 et de novembre 2005 à mars 2008), ainsi que les sous-bassins Hayange Sud et Burbach-Hauptont. Le réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain est composé de 53 stations dont 42 stations actives fin 2010.

Ces stations permettent d'assurer un suivi des réservoirs minier mais également de l'aquifère du Dogger (en relation hydraulique avec les réservoirs miniers au droit des zones foudroyées) et des alluvions suivant la répartition donnée dans l'illustration 24.

	Puits de mine	Piézomètre	Point de débordement	Source	Cours d'eau	TOTAL
Réservoir minier	8	11	6	1	1	27
Dogger		13				13
Alluvions		2				2
TOTAL	8	26	6	1	1	42

Illustration 24 : Typologie des stations du réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain (stations actives uniquement)

Les pas de temps de suivi des concentrations en sulfates sont très variables suivant la configuration des stations. Les sulfates sont suivis à un pas de temps mensuel sur les points de débordement des réservoirs miniers et à des pas de temps compris entre le trimestre et l'année sur les autres stations.

Parmi les critères employés pour le choix des stations traitées dans cette étude de faisabilité, figurent :

- la durée des chroniques,
- la continuité des mesures,
- le pas de temps de suivi.
- la représentativité hydrogéologique et spatiale des stations.

Les stations ont en effet été sélectionnées en vue d'obtenir une représentation de l'ensemble des réservoirs suivis (Sud, Centre, Nord et Burbach). Pour chacun des réservoirs, ont été sélectionnées des stations représentatives du réservoir minier et du Dogger (hormis le réservoir de Burbach qui ne comporte qu'une seule station au point de débordement). Sur ces principes, les stations ont ensuite été sélectionnées selon la quantité de mesures. La durée des chroniques étant directement liée aux périodes d'ennoyage, le choix a été opéré essentiellement sur les pas de temps. Ainsi, pour chaque réservoir figurent a minima une station correspondant à un point de débordement (pas de temps le plus fin de un mois).

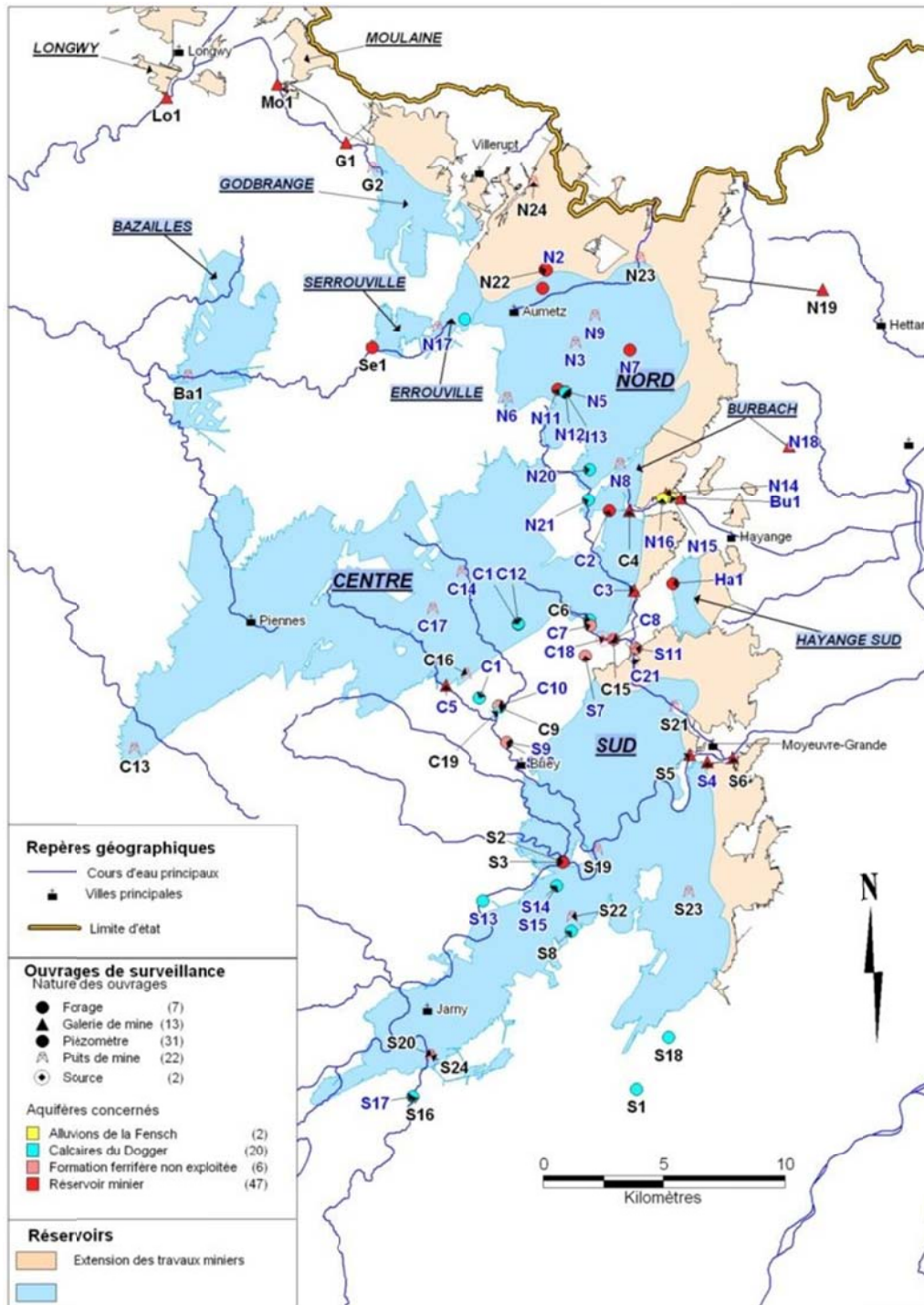


Illustration 25 : Carte de localisation des stations de surveillance du bassin ferrifère lorrain (les étiquettes en bleu correspondent aux stations suivies sur la période 2008-2010 dans le cadre des réseaux 0200000013 et 0200000018)

4.2.3. Les chroniques d'évolutions des concentrations en substances phytosanitaires

Les chroniques d'évolution des concentrations en substances phytosanitaires utilisées pour la réalisation de l'étude de faisabilité sont choisies en premier lieu en fonction du nombre de données disponibles par point. En effet, sous l'hypothèse d'une possible application des tests statistiques classiques, 10 données au minimum dans la série sont souhaitées. Si l'application des tests statistiques classiques n'est pas envisageable (présence de données inférieure à une limite de quantification par exemple) ce nombre minimum de données apparaît néanmoins justifié pour l'analyse de l'évolution des concentrations selon une méthode alternative. De plus, des études déjà réalisées sur le bassin permettent de cibler des masses d'eau sur lesquelles les concentrations en substances phytosanitaires dans les eaux souterraines représentent un risque fort et/ou un enjeu important.

Des travaux de sectorisation du bassin Rhin-Meuse ont été réalisés en 2008 pour l'élaboration des réseaux de contrôle des eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse (Schomburgk et Vaute, 2008). A cet effet, des cartes agrégées de pression par les pesticides ont été éditées à partir de cartographies communiquées par la DRAF Lorraine. Ces cartes, présentées en Illustration 26, permettent de cibler les masses d'eau sur lesquelles la pression en pesticides est la plus importante. Ainsi, outre la nappe d'Alsace, les masses d'eau 2013 « calcaires oxfordiens », 2010 « Calcaires du Dogger des côtes de Moselle », 2008 « Plateau lorrain versant Rhin » (zone ouest), 2002 « Sundgau versant Rhin-Meuse et Jura alsacien », 2022 « Argiles du Callovo-Oxfordien de la Woëvre » et 2023 « Argiles du Callovo-Oxfordien des Ardennes » apparaissent comme subissant les pressions en pesticides les plus fortes. Les points sélectionnés pour l'étude de faisabilité sont alors sélectionnés, dans la mesure du possible, sur ces masses d'eau spécifiquement.

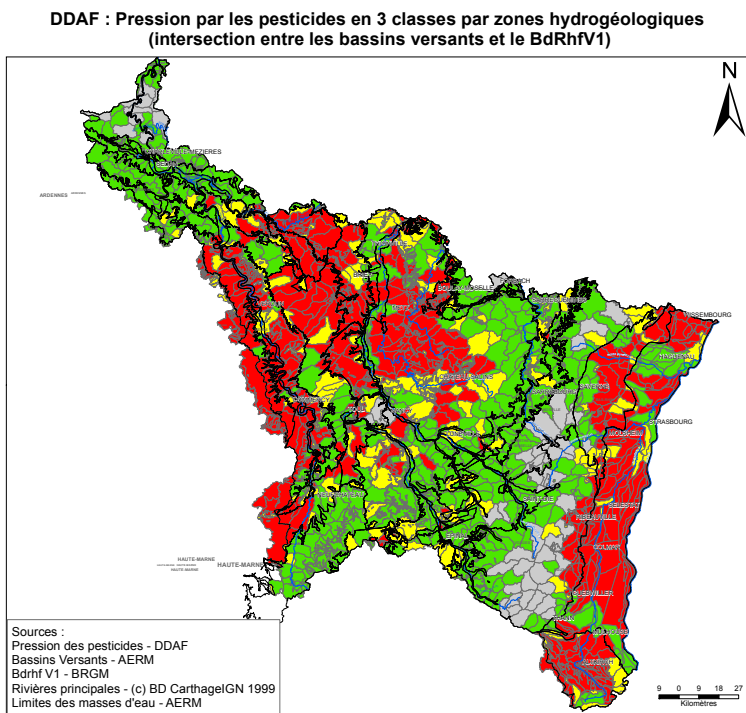
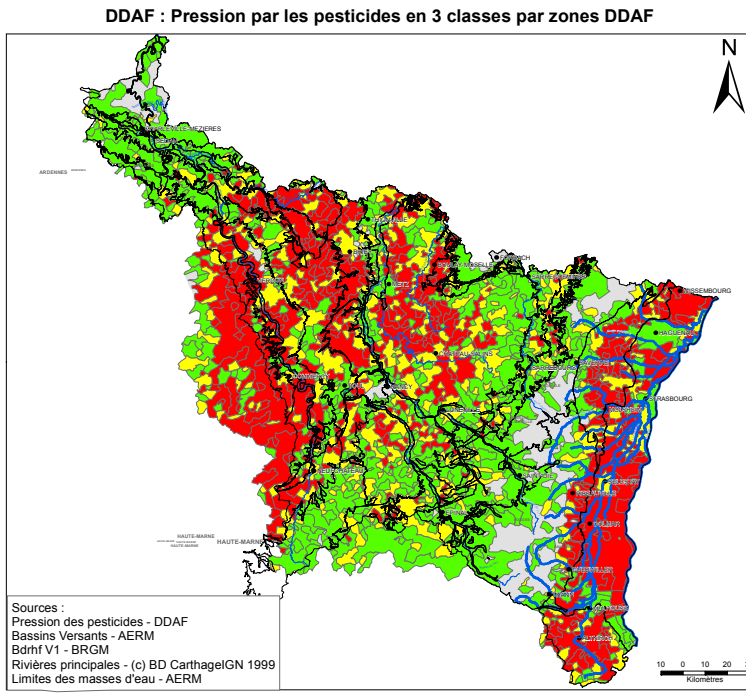


Illustration 26 : Carte des indicateurs de pression en pesticides sur le bassin Rhin-Meuse.

Ces informations sont couplées avec les informations fournies par l'Agence de l'eau sur les bassins d'alimentation des captages, les captages « Grenelle » ainsi que les captage reportés dans le SDAGE comme présentant des problèmes liés aux paramètres pesticides. Comme pour les nitrates, les points pour lesquels une fiche descriptive de l'aire d'alimentation et un dossier de travail explicatif et cartographique sont disponibles sont privilégiés.

Enfin, il est décidé de tester l'application des méthodes statistiques classiques d'identification des tendances ainsi que les méthodes alternatives pour la prise en compte des données censurées (<LQ ou <LD) sur 10 chroniques environ par paramètres.

Les chroniques d'évolution des concentrations en Atrazine

Comme évoqué au § 4.1.3, l'atrazine est un phytosanitaire fréquemment quantifié dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse. Nombre de chroniques de 10 données ou plus montrent une fréquence de quantification par point supérieure à 75 % et leur longueur peut être importante. Parmi les paramètres phytosanitaires, l'atrazine est donc une des substances les plus favorables à l'analyse statistique des tendances d'évolution des concentrations dans les eaux souterraines. Le croisement de ces chroniques avec la liste des points Grenelle et SDAGE à dégradation de l'eau brute par les phytosanitaires abouti à la sélection de 13 chroniques réparties sur 6 masses d'eau (Illustration 27). La liste des points ainsi sélectionnés est présentée en Annexe 4a.

Les chroniques d'évolution des concentrations en Déséthylatrazine

Le métabolite déséthyl de l'atrazine est lui aussi fréquemment quantifié dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse. Les fréquences de quantification par point reportées sont généralement fortes et, même si les longueurs des chroniques sont inférieures à celles de l'atrazine, elles restent suffisantes pour faire de la déséthylatrazine un paramètre favorable à l'analyse statistique des tendances d'évolution de ses concentrations dans les eaux souterraines. Le croisement de toutes les informations disponibles pour la sélection des chroniques aboutit à une liste de 14 points listés dans l'Annexe 4b et représentés dans l'illustration 27.

Les chroniques d'évolution des concentrations en Métolachlore

Sur l'ensemble des points où le métolachlore a été recherché, seules 20 chroniques de 10 données ou plus laissent apparaître au moins 1 valeur supérieure à la limite de quantification. Parmi ces 20 chroniques, 11 sont localisées dans la nappe d'Alsace. Une seule correspond à un point où le paramètre phytosanitaire est un problème au titre soit du Grenelle, soit du SDAGE et qui dispose d'un dossier cartographique et d'une fiche d'occupation des sols. Il s'agit du point 03074X0002F sur la commune Zellwiller. Ce point est sélectionné accompagné de 11 autres chroniques choisies dans 7 masses d'eau différentes de la nappe d'Alsace. La liste de ces points est reportée en Annexe 4c et représentés dans l'illustration 27.

Les chroniques d'évolution des concentrations en glyphosate

Les données de concentrations en glyphosate dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse semblent, en première approche, assez peu favorables à la mise en œuvre d'une analyse statistique. En effet, 19 chroniques seulement de 10 données ou plus montrent au moins 1 valeur supérieure à la limite de quantification. De plus, les fréquences de quantification par point ne dépassent jamais 10 % des données totale de la chronique. Toutefois, parmi ces 19 chroniques, 2 points de prélèvements disposent d'informations sur l'occupation des sols ainsi que sur la définition de l'aire d'alimentation du captage. Il s'agit des points 02664X0005/F1 sur la commune de Burey-en-Vaux et 02714X0061F3 sur la commune de Mutzig, sélectionnées pour l'étude de faisabilité sur le paramètre glyphosate. 10 autres points de prélèvements sélectionnés pour les tests d'identification des tendances d'évolution du glyphosate dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse sont listés en Annexe 4 d et représentés dans l'illustration 27.

Les chroniques d'évolution des concentrations en 2,6-dichlorobenzamide

Les données de concentrations en 2,6-dichlorobenzamide disponibles sur le bassin Rhin-Meuse représentent un cas défavorable pour la mise en œuvre d'une analyse statistique. En effet, malgré des fréquences de quantification parmi les plus importantes, les chroniques ne remplissent pas tous les critères nécessaires pour l'analyse statistique. Ce paramètre est en effet recherché depuis peu de temps dans les eaux souterraines de sorte que le nombre moyen de données par chronique est faible. Une chronique dispose de 4 données, 4 chroniques ont 3 données, 22 en ont 2, les autres ne disposant que d'une seule donnée de concentration. L'étude de ces données permet ainsi d'alimenter la réflexion sur les potentialités de mise en œuvre des analyses statistiques sur les paramètres phytosanitaires récemment recherchés.

L'illustration 27 montre la localisation des points de prélèvements en atrazine, en déséthylatrazine, en métolachlore et en glyphosate sur le bassin Rhin-Meuse sélectionnés pour l'étude de faisabilité.

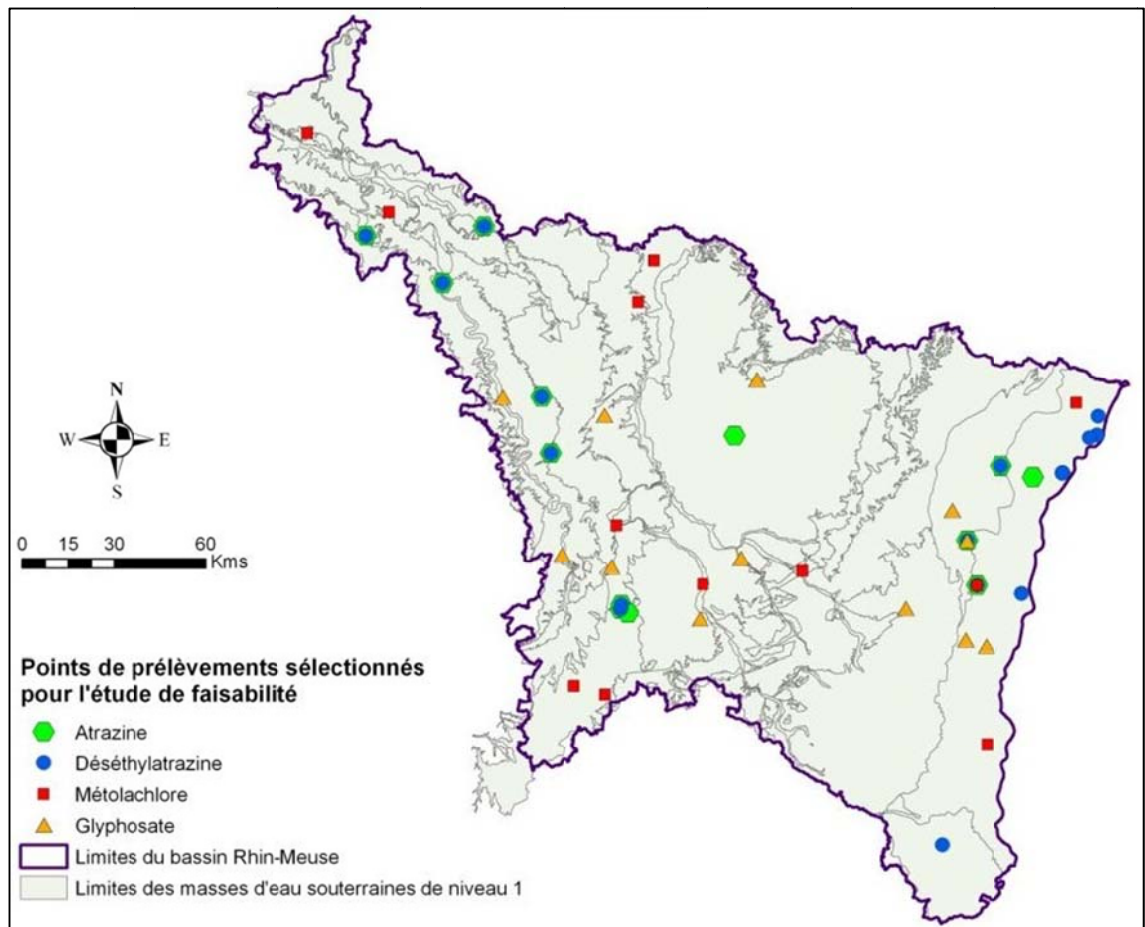


Illustration 27 : Localisation des points de prélèvements sélectionnés pour l'analyse de l'évolution des concentrations en atrazine, déséthylatrazine, métolachlore et glyphosate dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse.

4.3. PLAN D'ACTION DE MISE EN ŒUVRE DES METHODES STATISTIQUES POUR L'ETUDE DE FAISABILITE

Toutes les méthodes statistiques citées au § 3 ne peuvent être mises en œuvre sur l'ensemble des chroniques d'évolution des concentrations en contaminants sélectionnées au § 4. Les chroniques ont en effet été choisies afin de représenter des situations différentes en termes de caractéristiques de données impliquant la mise en œuvre de tests statistiques appropriés, généralement spécifiques à une situation particulière. Les tests prenant en compte les variations saisonnières de l'évolution des concentrations en contaminants ne sont par exemple appliqués que si ce type d'évolution caractérise le comportement du paramètre étudié. De la même manière, la mise en œuvre de méthodes prenant en compte les données reportées « inférieur à » n'a pas de sens si le jeu de données ne contient pas ce type de données. Enfin, plus

généralement, les tests paramétriques doivent généralement n'être appliqués que si les données constituant la chronique étudiée suivent une distribution normale, ce qui n'est pas le cas des méthodes statistiques non paramétriques.

Toutefois, un des objectifs de l'étude de faisabilité est de rendre compte de la possibilité ou non d'appliquer certaines méthodes statistiques dans des conditions initiales plus ou moins favorables et de comparer les résultats d'identification des ruptures et des tendances issus de tests différents. Les méthodes statistiques précitées seront donc appliquées autant que possible sur des séries chronologiques dont les caractéristiques s'écartent des conditions initiales optimales de leur utilisation. La comparaison des méthodes découlera de la mise en œuvre de tests différents sur des jeux de données identiques.

4.3.1. Paramètres « nitrate » et « sulfate »

Sur les paramètres nitrate et sulfate, l'exercice consiste essentiellement à comparer les résultats issus de méthodes paramétriques et non paramétriques d'estimation des ruptures et des tendances, appliquées au point de prélèvement ou sur un ensemble de points agrégés à l'échelle de la masse d'eau. Dans le détail et comme listés dans l'illustration 28, les tests de ruptures paramétrique (Buishand¹) et non paramétrique (CUSUM) seront comparés sur l'ensemble des chroniques sélectionnées. Les méthodes d'identification des tendances d'évolution des concentrations par point testées sont la régression linéaire (test paramétrique), le test de Mann-Kendall, le test Kendall saisonnier ainsi que la méthode CUSUM (tests non paramétriques). Il sera intéressant de comparer à la fois les résultats de l'application d'un test paramétrique couramment utilisé avec des tests non paramétriques, ainsi que les résultats issus de tests non paramétriques différents. Toutes les chroniques sélectionnées permettront a priori l'application de ces méthodes, excepté le test Kendall saisonnier qui suppose une fréquence de prélèvement relativement fine et régulière permettant la mise en évidence de cycles interannuels dans l'évolution des concentrations.

Il est à noter que ce sont les tendances d'évolutions les plus « récentes possibles » qui seront recherchées. Ceci nécessite d'identifier en premier lieu les ruptures de pente majeures dans les chroniques afin d'appliquer les tests de tendance sur les derniers tronçons qui montrent un comportement homogène de l'évolution des concentrations en contaminants. Ainsi, il est possible que certaines chroniques qui disposent de plus de 10 données lorsqu'elles sont considérées dans leur totalité ne montrent plus assez de données sur le dernier tronçon post rupture pour une analyse statistique.

¹ Comme mentionné au paragraphe 3.1.2, le test de Buishand n'est pas un test paramétrique au sens strict du terme mais ses propriétés ont été étudiées essentiellement dans le cas de données à distribution normale.

En ce qui concerne les méthodes spatialisées, l'objectif principal est de tester les performances de l'agrégation des points selon la méthode du vecteur régional, associé aux différents tests statistiques utilisés pour une identification des ruptures et des tendances à l'échelle des points de prélèvements. L'étude permettra aussi de comparer les résultats de détermination de tendance issus de la méthode du vecteur régional associé soit à une régression linéaire, soit au test de Mann-Kendall, avec la méthode Kendall régional.

Paramètres		Méthodes statistiques							
		Ponctuelles				Spatialisées			
		Paramétriques		Non paramétriques		Paramétriques		Non paramétriques	
		Méthodes	Nbre séries	Méthodes	Nbre séries	Méthodes	Nbre MESO	Méthodes	Nbre MESO
NO ₃ ⁻	<i>Date de rupture</i>	Buishand	48	CUSUM	48	Vecteur Régional (VR) + Buishand	1	VR + CUSUM	1
				Petit	48			VR + Petit	1
	Tendance	Régression Linéaire (RL)	48	Mann-Kendall (MK)	48	VR + RL	1	Kendall régional	1
				CUSUM	48			VR + CUSUM	
				Kendall saisonnier				VR + Mann-Kendall	1
	SO ₄ ²⁻	<i>Date de rupture</i>	Buishand	10	CUSUM	10			
				Petit	10				
Tendance		RL	10	MK	10				

Illustration 28 : Méthodes statistiques testées sur les chroniques d'évolution des concentrations en nitrate et en sulfate sélectionnées sur le bassin Rhin-Meuse (les méthodes permettant une identification des dates de rupture de pente sont notées en italique).

4.3.2. Paramètre « phytosanitaires »

Les caractéristiques spécifiques des chroniques d'évolution des concentrations en substances phytosanitaires dans les eaux souterraines (présence de données de type « inférieur à » dites censurées) modifient l'approche à suivre pour l'identification statistique des tendances et des ruptures de pente. En effet, si quelques chroniques d'évolution des concentrations en atrazine et en déséthylatrazine ont 100 % des données supérieures à la limite de quantification, la majorité des chroniques sélectionnées pour l'étude sont constituées d'un mélange de données quantitatives (valeurs vraies de concentrations) et de données censurées. Ainsi, sur les chroniques qui disposent d'au moins 90 % de données supérieures à une limite de quantification, il est vraisemblable que les méthodes statistiques classiques d'identification des ruptures et des tendances pourront être mise en œuvre en s'affranchissant de la prise en compte des données censurées. Les résultats seront alors comparés à ceux issus des méthodes, détaillées au § 3.2, qui prennent en compte ces données particulières. Suite à la reconstitution des données censurées suivant les différentes méthodes exposées (méthode réglementaire LQ/2 ; méthode robuste...) les mêmes méthodes statistiques utilisées sur les paramètres nitrate et sulfate seront appliquées sur les données reconstituées d'évolution des concentrations en substances phytosanitaires.

En complément de ces travaux, une réflexion sera menée sur les informations qu'il est possible de tirer d'une interprétation des évolutions des fréquences de quantification, approche alternative d'évaluation des tendances lorsque les données censurées constituent la majorité des données d'une chronique. A l'échelle de la masse d'eau, les méthodes d'analyses spatialisées des ruptures et des tendances seront choisies en fonction des résultats des différents essais de reconstitution des chroniques d'évolution des substances phytosanitaires. Les méthodes les plus robustes permettront en effet de constituer un jeu de données agrégées à l'échelle d'une masse d'eau selon la méthode du vecteur régional avant la mise en œuvre des mêmes tests utilisés pour les paramètres nitrate et phytosanitaire.

L'illustration 29 montre le cheminement suivi pour l'application des tests statistiques d'identification des ruptures de pente et des tendances d'évolutions sur les chroniques de concentrations en substances phytosanitaires sélectionnées spécifiquement pour l'étude.

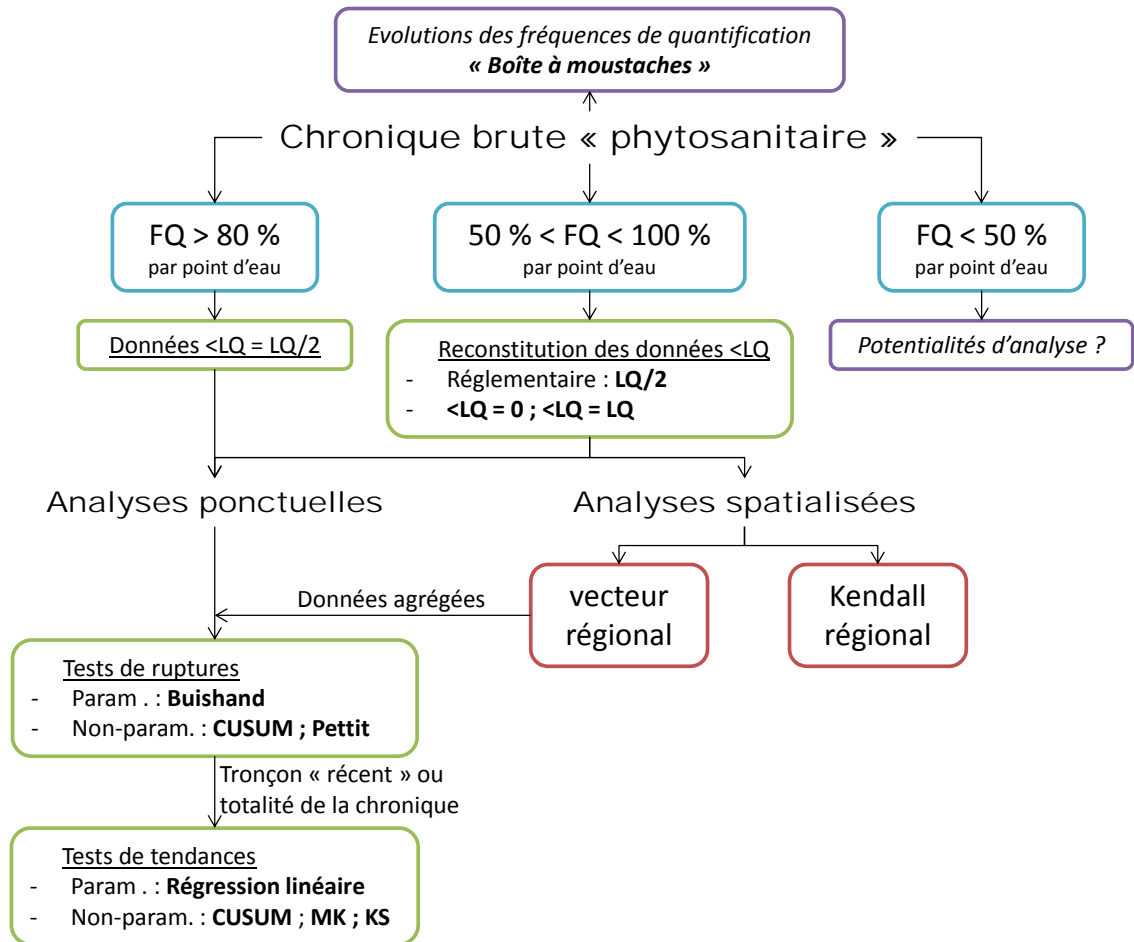


Illustration 29 : Méthodes statistiques testées pour l'analyse des chroniques d'évolution des substances phytosanitaires sélectionnées sur le bassin Rhin-Meuse.

5. Application des méthodes statistiques sur les jeux de données sélectionnés

5.1. TESTS PARAMETRIQUE ET NON PARAMETRIQUE, TEST DE NORMALITE

Les méthodes statistiques sélectionnées pour l'étude sont classées en deux groupes suivant les conditions initiales optimales d'application des tests. Théoriquement, les tests paramétriques sont robustes lorsque les données d'entrée montrent une distribution normale. La robustesse des tests non paramétriques, en raison du classement des données selon leur rang, est quant à elle indépendante de la distribution des données.

Dans un premier temps donc, la distribution des données sélectionnées pour l'étude de faisabilité est vérifiée afin d'estimer le nombre de chroniques théoriquement favorables à l'application de tests paramétriques tel que la régression linéaire pour l'identification des tendances. Le test de Shapiro-Wilk (1965), bien adapté à la description de la normalité des séries à faible nombre de données, est ainsi appliqué sur les 48 chroniques d'évolution des concentrations en nitrate et les 10 chroniques d'évolution des concentrations en sulfate sélectionnées sur le bassin Rhin-Meuse. Le test est réalisé avec un seuil de confiance de 0,05 c'est-à-dire que la probabilité de rejeter l'hypothèse de normalité des données d'une chronique alors qu'elle est vraie est de 5 %.

Sur les 48 chroniques d'évolution des concentrations en nitrate, 33 montrent une distribution des données qui s'écartent significativement de la normalité, soit près de 65 %. Ces chroniques ne sont théoriquement pas favorables à l'application des tests paramétriques de détection des ruptures et d'identification des tendances d'évolution. Sur les 10 chroniques d'évolution des concentrations en sulfate analysées, 6 s'écartent de la normalité au risque de 5 %.

Le caractère normal ou non de la distribution des données constitutives d'une chronique n'est pas identifiable par la seule analyse visuelle de la série. L'illustration 30 montre en exemple deux chroniques d'évolution des concentrations en nitrate aux points de prélèvement 03372X0031/SAEP13 et 03376X0014/SAEP1. Le nombre de données est respectivement de 59 et 66 avec des fréquences théoriques de prélèvement proches, de 6 analyses par an dans les deux cas. Les deux chroniques montrent des comportements relativement similaires avec une évolution cyclique saisonnière des concentrations en nitrate selon une amplitude de 20 mg/L approximativement. Or, la distribution des données de la première chronique est normale alors qu'elle ne l'est pas dans le second cas. La seule différence visuelle notable entre les deux chroniques est la présence d'un palier en 2004 sur la série 03376X0014/SAEP1 non présent sur la première chronique. Toutefois, il est difficile de relier cette augmentation brutale au caractère normal de la distribution statistique des données de la chronique.

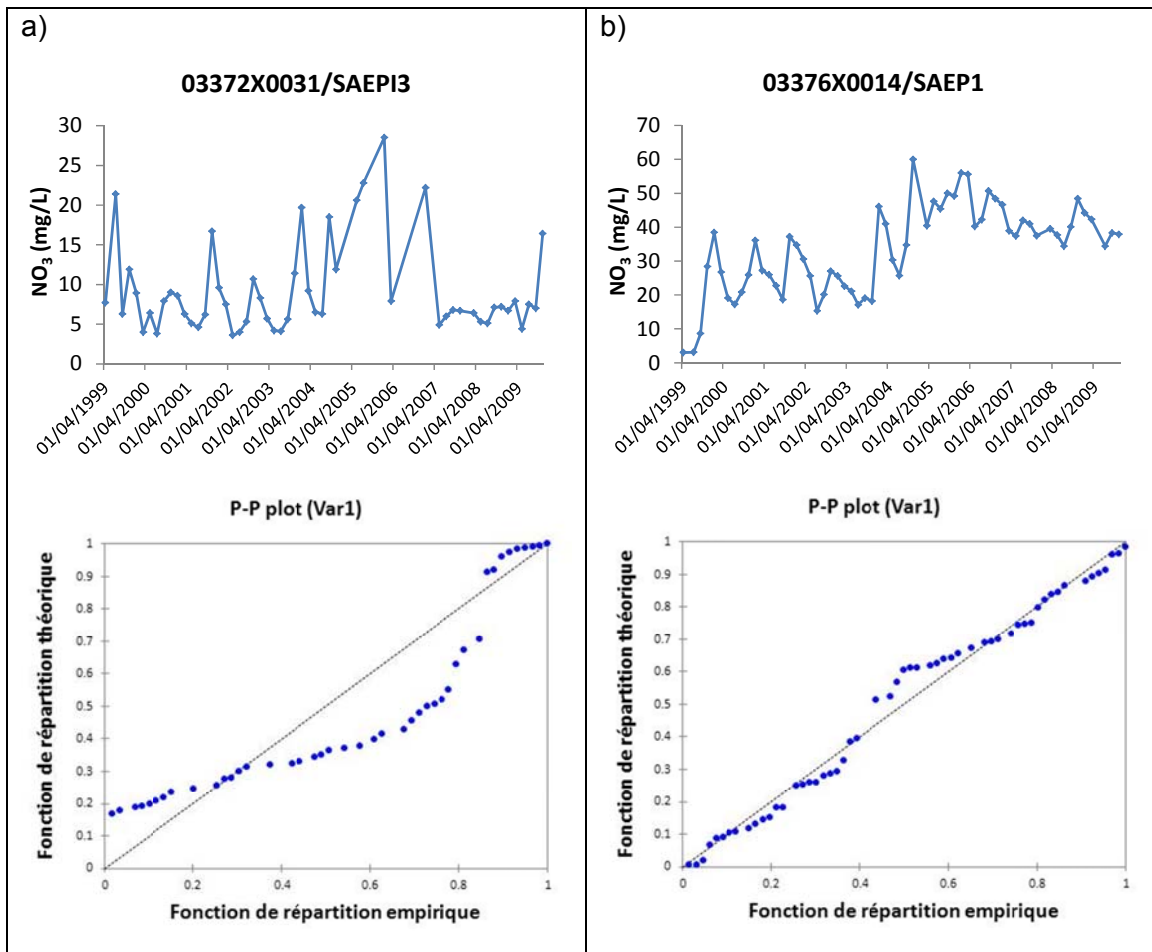


Illustration 30 : Distribution des données de deux chroniques d'évolution des concentrations en nitrate a) distribution des données non normale, b) distribution des données normale.

Par cette première analyse des données sélectionnées, il est possible d'alerter sur le non-respect des conditions initiales d'application des tests paramétriques pour la majorité des chroniques (65 % des chroniques NO₃ et 60 % des chroniques SO₄). La connaissance de cette caractéristique permettra d'aider à l'interprétation des résultats de l'application des tests de rupture et de tendance. Il est en effet probable d'observer les plus grandes différences de résultats entre les tests paramétriques et non paramétriques lorsque les données analysées s'éloignent de la normalité, c'est-à-dire des conditions initiales optimales d'application des premiers tests cités.

La problématique du traitement statistique des données phytosanitaires est quant à elle différente. C'est en effet la présence plus ou moins importante de données reportées inférieures aux limites de quantification qui va influencer de façon prépondérante sur le choix et la mise œuvre des méthodes statistiques. De plus, les données dites « censurées » biaisent trop fortement les résultats des tests de normalité pour pouvoir les utiliser.

5.2. DETECTION DES DATES DE RUPTURE DE PENTE SUR LES CHRONIQUES D'ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN NITRATE ET EN SULFATE

Trois tests de détections des ruptures de pente sont appliqués sur les chroniques ponctuelles d'évolution des concentrations en nitrate et en sulfate sélectionnées sur le bassin Rhin-Meuse. Il s'agit du test paramétrique de Buishand et des tests non paramétriques de Pettitt et du CUSUM modifié. Sont comparées la détection ou non d'une rupture de pente, le risque de rejeter l'hypothèse H_0 alors que celle-ci est vraie ainsi que la date de rupture si mentionnée. Les résultats d'identification des ruptures de pente sur les chroniques d'évolution des concentrations en nitrate et en sulfate sont consultables en Annexe 5.

Les résultats de l'application des tests de Buishand et de Pettitt sont comparés. L'hypothèse nulle H_0 testée est : « la série temporelle est homogène entre deux temps donnés », c'est-à-dire qu'il n'y a pas de rupture de pente significative dans la chronique d'évolution des concentrations en contaminants.

5.2.1. Chroniques d'évolution des concentrations en nitrate

Sur les 48 chroniques d'évolution des concentrations en nitrate sélectionnées, le test de Buishand en identifie 45 avec rupture de pente significative au risque $\alpha = 5\%$, c'est-à-dire rejette l'hypothèse H_0 avec un risque qu'elle soit vraie inférieur à 0,05. L'application du test de Pettitt permet de détecter 43 chroniques avec une rupture de pente significative. Deux chroniques (points 01381X0055/P8 et 01641X0157/P2, Illustration 31a et b respectivement) sont identifiées par le test de Buishand comme montrant une rupture de pente significative alors que l'application du test de Pettitt ne permet pas de rejeter l'hypothèse d'homogénéité de la série temporelle.

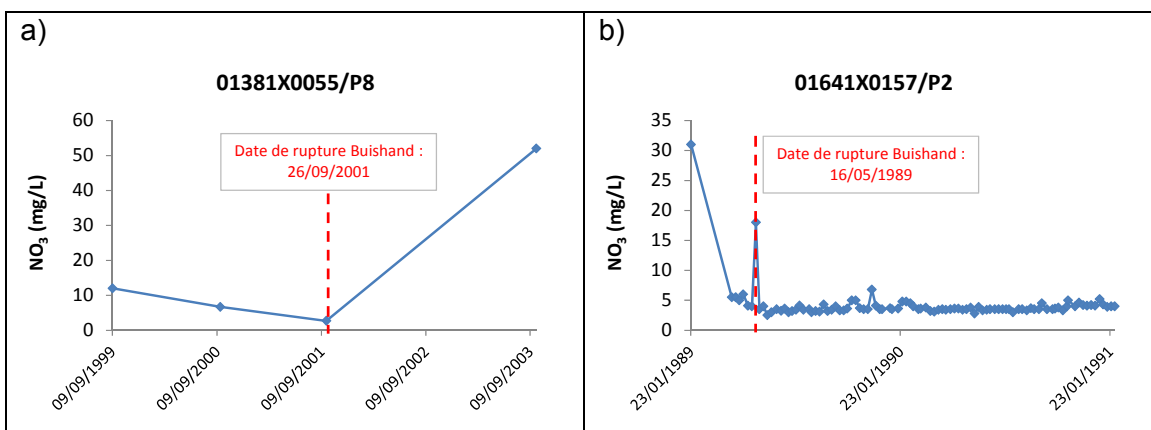


Illustration 31 : Chroniques d'évolution des concentrations en nitrate à rupture de pente identifiée par le test de Buishand mais non par le test de Pettitt.

La première chronique, 01381X0055/P8 sur l'illustration 31a), ne dispose que de 4 données seulement de sorte qu'il apparaît hasardeux de statuer de façon définitive sur la présence ou non d'un changement de comportement dans l'évolution de la contamination en nitrate. Sur la deuxième chronique, 01641X0157/P2 sur l'illustration 31b), l'analyse visuelle montre une grande stabilité de l'évolution des concentrations en nitrate avec deux anomalies positives: la première analyse de la série ainsi que celle du 16/05/1989. Le test de Buishand étant sensible aux valeurs réelles des données, cette dernière analyse impacte fortement le résultat engendrant la détection d'une rupture de comportement. Le test non paramétrique de Pettitt étant basé sur le classement relatif des données entre elles, il est moins sensible aux valeurs absolues des données et donc aux anomalies présentes dans la série.

Afin de comparer la robustesse des deux tests, il est intéressant d'analyser les valeurs de risque de rejet de l'hypothèse H_0 alors qu'elle est vraie (P-value) dans le cas du non rejet de l'homogénéité.

		Chroniques	Test de Buishand P-value	Test de Pettitt P-value
Non rejet de H_0 : pas de rupture	Distribution Normale	01938X0151/SCE6	0,501	0,4926
		02684X0018/HY	0,937	0,360
		P-value moyenne	0,719	0,398
	Distribution non normale	01143X0046/HY	0,1277	0,2093
		02673X0017/HY	0,5606	0,6201
		03372X0031/SAEPI3	0,2213	0,4368
		P-value moyenne	0,303	0,422

Illustration 32 : P-value des tests de Buishand et de Pettitt dans le cas de non rejet de l'hypothèse H_0 (pas de rupture de pente détectée) pour les chroniques à distribution des données normale et non normale.

L'illustration 32 montre à cet effet les valeurs de P-value des tests de Buishand et de Pettitt pour les chroniques sur lesquelles les deux tests n'ont pas détecté de rupture de pente. Plus la P-value est faible, plus le risque de ne pas détecter de rupture de comportement alors qu'elle existe est élevé. Bien que les conclusions suivantes ne soient tirées que de l'analyse de 5 cas particuliers, elles constituent des pistes de réflexions qui pourraient être approfondies par l'analyse d'un plus grand nombre de chroniques. Dans le cas de chroniques dont la distribution des données est normale, le test de Buishand montre une plus grande robustesse que le test de Pettitt (P-values moyennes respectives de 0,719 et 0,398). Ces conditions initiales correspondent en effet aux données pour lesquelles les propriétés du test de Buishand sont bien contraintes. Toutefois, lorsque les données des chroniques ne suivent plus une loi gaussienne, les P-values du test de Buishand chutent de manière importante indiquant une augmentation du risque de ne pas rejeter H_0 alors qu'une rupture de pente existe.

Le test de Pettitt maintient quant à lui le même niveau de risque indépendamment de la distribution des données. Ce dernier test semble ainsi, en première approche, plus robuste aux variations de conditions initiales que le test de Buishand. Le test de Pettitt sera ainsi préféré pour la détection des ruptures de pentes des chroniques d'évolution des concentrations en NO_3 sur le bassin Rhin-Meuse.

L'illustration 33 montre les date de ruptures de pentes des chroniques nitrate du bassin Rhin-Meuse sélectionnées pour l'étude de faisabilité déterminées par le test non paramétrique de Pettitt.

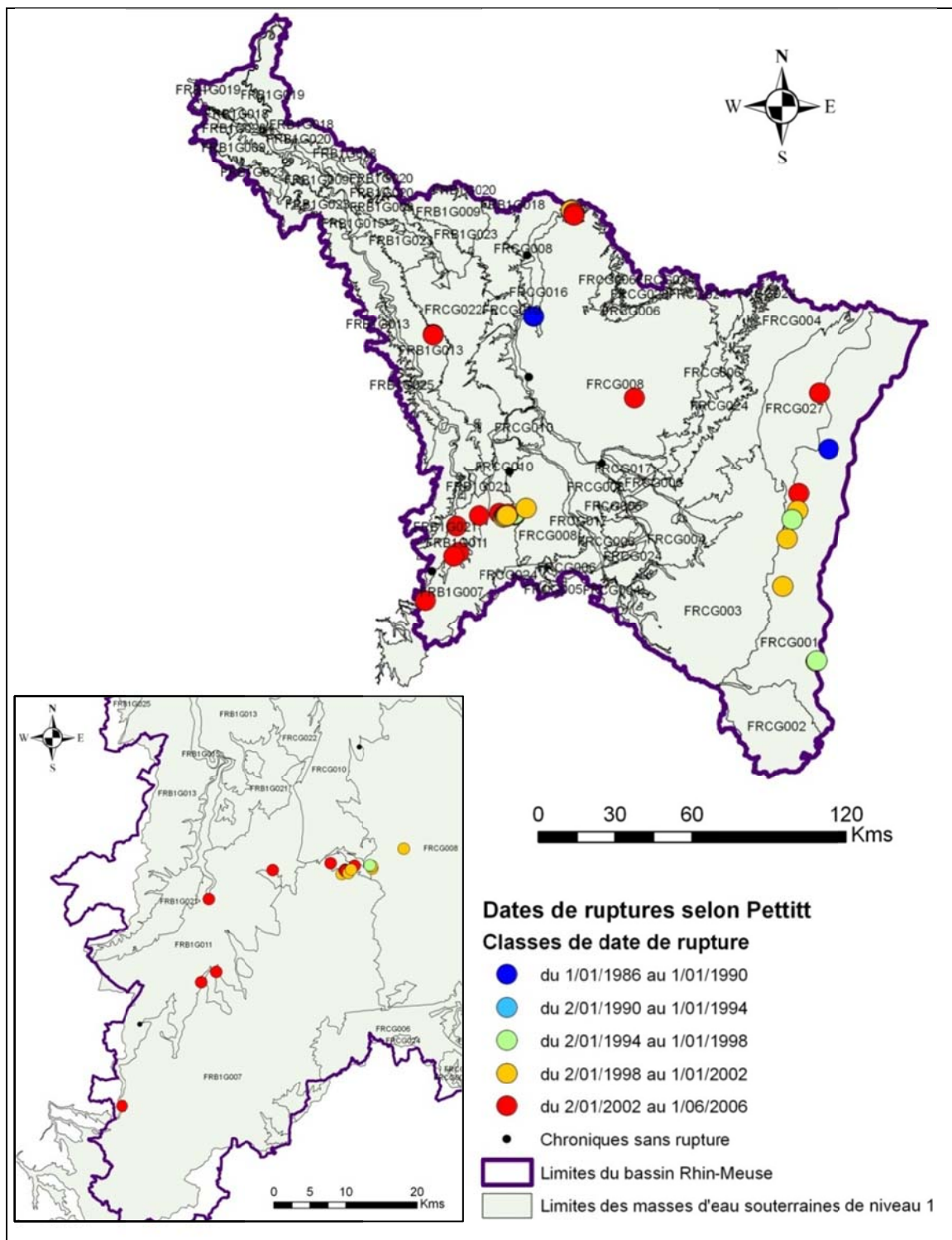


Illustration 33 : Représentation cartographique des dates de rupture de pente identifiées par l'application du test de Pettitt des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate. En encart, zoom sur les points de la zone sud-est du bassin Rhin-Meuse.

5.2.2. Chroniques d'évolution des concentrations en sulfate

En cohérence avec l'exercice réalisé sur les données d'évolution des concentrations en nitrate, les résultats des tests de Buishand et de Pettitt, appliqués sur les 10 chroniques d'évolution des concentrations en sulfate sélectionnées, sont comparés. L'application du test de Buishand permet d'identifier 9 chroniques à rupture de pente significative alors que le test de Pettitt ne révèle que 8 chroniques non homogènes. Comme précédemment, le test de Buishand montre une plus grande sensibilité que le test de Pettitt aux variations rapides dans les séries chronologiques.

L'illustration 34 montre en exemple la chronique d'évolution des concentrations en sulfate au point 01137X0173/PZ-12 pour laquelle une rupture de pente apparaît significative selon le test de Buishand mais pas selon le test de Pettitt.

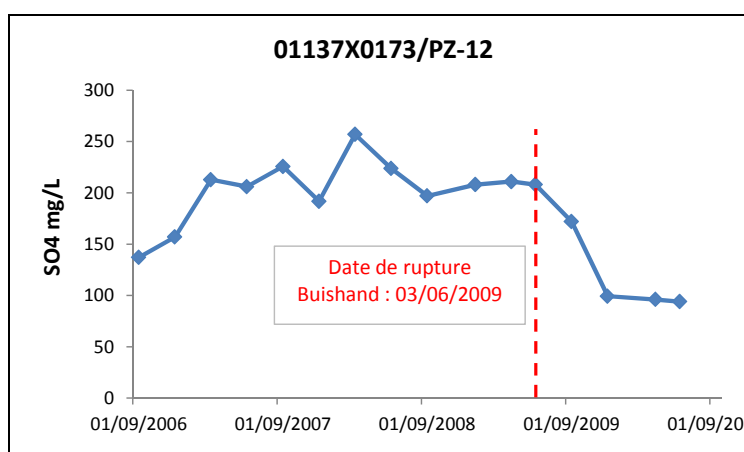


Illustration 34 : Chronique d'évolution des concentrations en sulfate à rupture de pente identifiée par le test de Buishand mais non par le test de Pettitt.

Les tests de Buishand et de Pettitt donnent les mêmes dates de ruptures sur 5 des 8 chroniques pour lesquelles les deux tests ont identifié une rupture de pente significative.

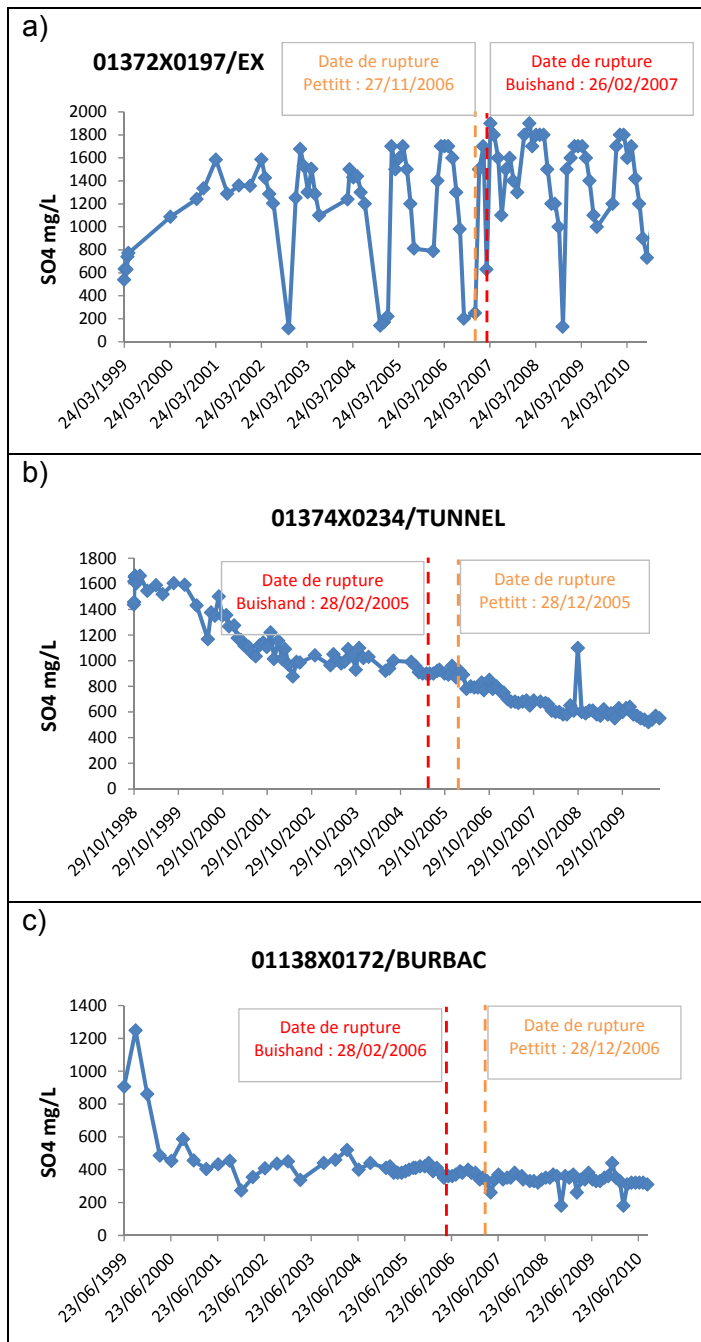


Illustration 35 : Dates de rupture de pente selon les tests de Buishand et de Pettitt sur les chroniques d'évolution des concentrations en sulfate aux points a) 01372X0197/EX, b) 01374X0234/TUNNEL et c) 01138X0172/BURBAC.

Des différences apparaissent pour les points de prélèvements 01372X0197/EX, 01374X0234/TUNNEL et 01138X0172/BURBAC représentés sur l'illustration 35a, b et c respectivement.

La première chronique de l'exemple montre une cyclicité importante de l'évolution des concentrations en sulfate. Ce phénomène complique la détermination des ruptures mais les résultats de l'application des 2 tests restent tout de même proches. Dans le second cas, une cassure semble se dessiner à la date de rupture identifiée par le test de Pettitt alors que rien ne semble justifier visuellement la date de rupture donnée par le test de Buishand. Sur la troisième chronique présentée, l'analyse visuelle de la chronique peut difficilement orienter le choix vers l'une ou l'autre des ruptures identifiées. La méthode de Pettitt pourrait néanmoins être préférée en raison de l'absence de cycle après la date indiquée alors qu'il semble s'en dessiner un entre la date de Buishand et celle de Pettitt.

Toutefois, pour les trois chroniques montrées en exemple, les dates de rupture sont proches, séparées d'une durée inférieure à 1 année.

5.2.3. Comparaison des résultats obtenus par l'application des tests de Buishand et de Pettitt avec ceux du CUSUM modifié

Le test du CUSUM modifié par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse a été appliqué sur l'ensemble des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate et en sulfate sélectionnées pour l'étude de faisabilité. Sur les 51 chroniques d'évolution des nitrates, 24 dates de ruptures sont communes aux tests de Buishand et du CUSUM, 16 sont communes aux tests de Pettitt et du CUSUM, 15 sont communes aux trois tests. Toutefois, sur l'ensemble des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate testées, la différence moyenne est de 326 jours entre le test du CUSUM modifié et le test de Buishand. Elle n'est plus que de 175 jours en moyenne entre le test du CUSUM modifié et le test de Pettitt.

Sur 31 chroniques, la différence entre les tests du CUSUM modifié et le test de Pettitt est comprise entre - 1 an et + 1 an. Dans 11 cas, la différence entre les dates de rupture est supérieure à 3 ans, le maximum étant atteint au point 03427X0001/F1 avec une date de rupture déterminée selon le test du CUSUM plus récente de plus de 8 ans que celles des tests de Pettitt et de Buishand. L'illustration 36 montre 3 chroniques d'évolution des concentrations en nitrate pour lesquelles les dates de ruptures déterminées selon les trois tests sont différentes. Les différences les plus importantes sont constatées lorsque la chronique ne dispose que de peu de données (Illustration 36a), lorsque les pas de temps d'acquisition sont hétérogènes (Illustration 36b) ou bien lorsque le signal évolue de manière cyclique en suivant une tendance sans qu'il n'y ait de rupture de comportement bien marquée (Illustration 36c). Toutefois, dans de nombreux autres cas, comme montré en exemple par l'illustration 37, ces outils montrent des résultats cohérents, les tests non paramétriques pouvant être préférés dans le cas d'une application sur des données environnementales.

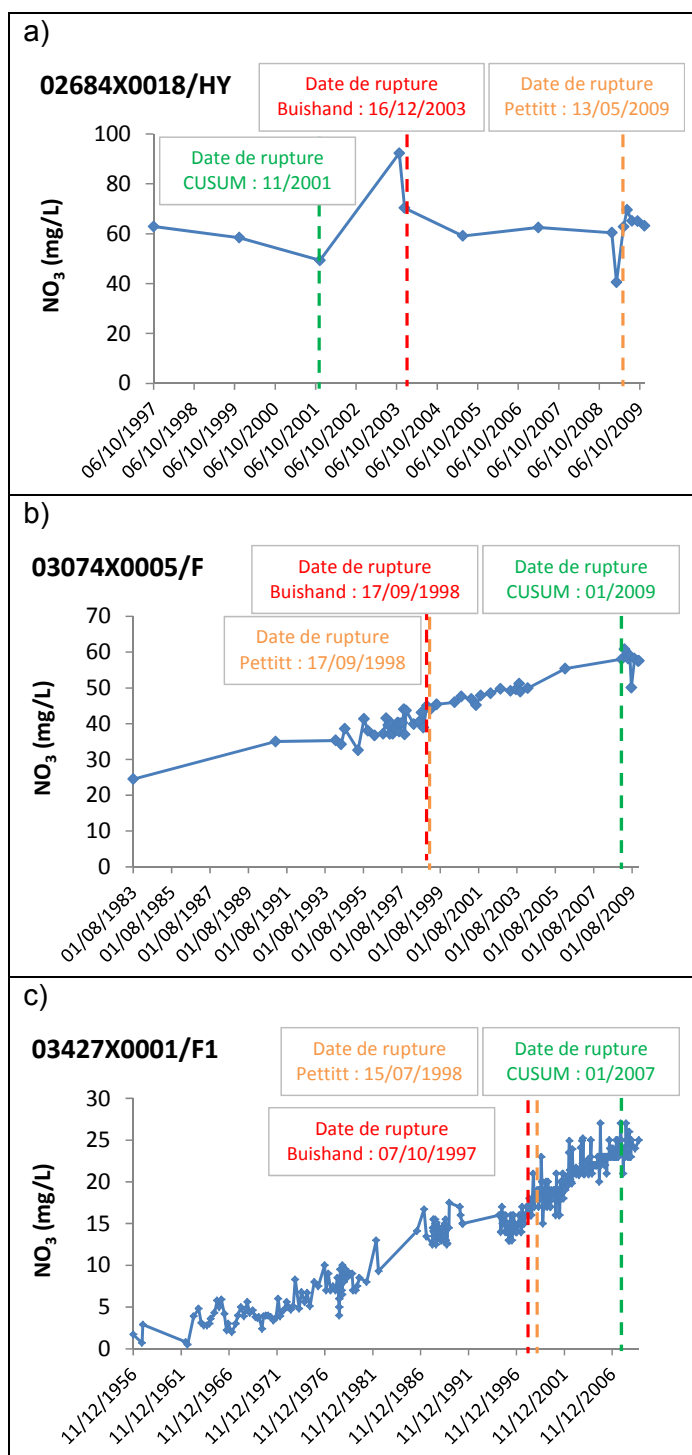


Illustration 36 : Exemple de chroniques d'évolution des concentrations en nitrate avec identification des ruptures de pentes différentes suivant le test appliqué.

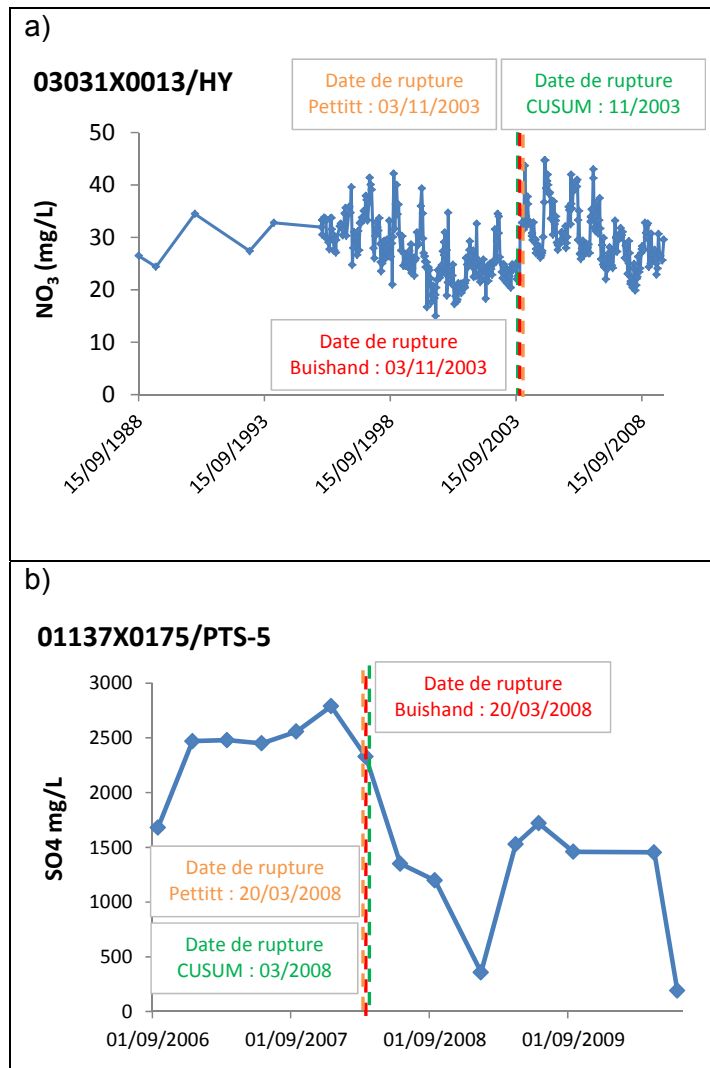


Illustration 37 : Exemple de chronique d'évolution des concentrations en nitrate a) et en sulfate b) à rupture de pente marquée et identifiée de façon similaire par les trois méthodes testées.

5.3. TESTS DE TENDANCE SUR LES CHRONIQUES PONCTUELLES

5.3.1. Comparaison des tests réalisés sur la durée totale des chroniques

2 tests d'identification des tendances d'évolution des concentrations sont comparés sur la durée totale des séries sélectionnées. Il s'agit du test paramétrique de la régression linéaire par moindres carrés et du test non paramétrique de Mann-Kendall (associé à la méthode de Sen pour la quantification de la pente de la tendance).

Sur les 51 chroniques de nitrate sélectionnées, le test de Mann-Kendall permet d'identifier 34 tendances significatives au risque de 5 %. La régression linéaire montre, sur les mêmes chroniques, des coefficients de régression généralement faibles, de 0,42 en moyenne des valeurs absolues. Sur les 10 chroniques d'évolution des concentrations en sulfate, le test de Mann-Kendall détermine 8 tendances significatives. Les coefficients de régression linéaire sont de 0,59 en moyenne des valeurs absolues, soit des valeurs plus importantes que lors de l'application du même test paramétrique sur les données de concentration en nitrate. La différence moyenne entre les pentes des régressions linéaires et du test de Mann-Kendall est aussi plus importante pour les données nitrate que pour les données sulfate avec 37 % de différence moyenne pour les premières contre 22 % pour les secondes.

Pour trois chroniques d'évolution des concentrations en nitrate représentées sur l'illustration 38 (01641X0156/P1, 02341X0024/F4 et 03077X0010/P1), la différence entre les pentes est supérieure à 0,5 mg/L/an. Sur le premier exemple (chronique au point 01641X0156/P1, illustration 38a, la différence importante entre les pentes des tendances s'explique par l'influence, sur la régression linéaire, des fortes valeurs de concentrations en nitrate rencontrées en début de chronique. La tendance fortement à la baisse identifiée par la régression linéaire est ainsi expliquée par deux ou trois valeurs seulement sur les 94 que compte la chronique. Dans ce cas, le test de Mann-Kendall apparaît plus approprié. Le test montre en effet une tendance dont la pente n'est pas influencée par les anomalies dans la chronique mais qui représente bien la tendance globale d'évolution des concentrations en nitrate.

Aux points de prélèvement 02341X0024/F4 et 03077X0010/P1 (illustration 38b et c), les chroniques sont constituées de deux analyses anciennes (années 80) espacées dans le temps puis d'un suivi plus régulier et rapproché de l'évolution des concentrations en nitrate. La régression linéaire appliquée en ces points montre dans les deux cas une pente croissante plus faible que la tendance déterminée selon le test de Mann-Kendall. L'influence des deux analyses anciennes est en effet bien marquée sur les résultats du test paramétrique alors que ce sont les analyses plus récentes qui expliquent la tendance identifiée par le test non paramétrique de Mann-Kendall. Le test de Mann-Kendall montre encore une fois sa plus grande pertinence pour l'identification des tendances d'évolution des chroniques environnementales souvent affectées par des valeurs extrêmes et dont les pas de temps d'acquisition peuvent être hétérogènes.

Le même constat est fait lors de la comparaison des résultats d'identification des tendances d'évolution des concentrations en sulfate selon la méthode de la régression linéaire et le test de Mann-Kendall. L'illustration 39 montre ainsi en exemple deux chroniques d'évolutions des sulfates pour lesquelles les pentes des tendances calculées selon les deux tests sont différentes. Comme lors de l'analyse des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate, l'influence sur la régression linéaire des valeurs qui sortent significativement de la série est mise en évidence.

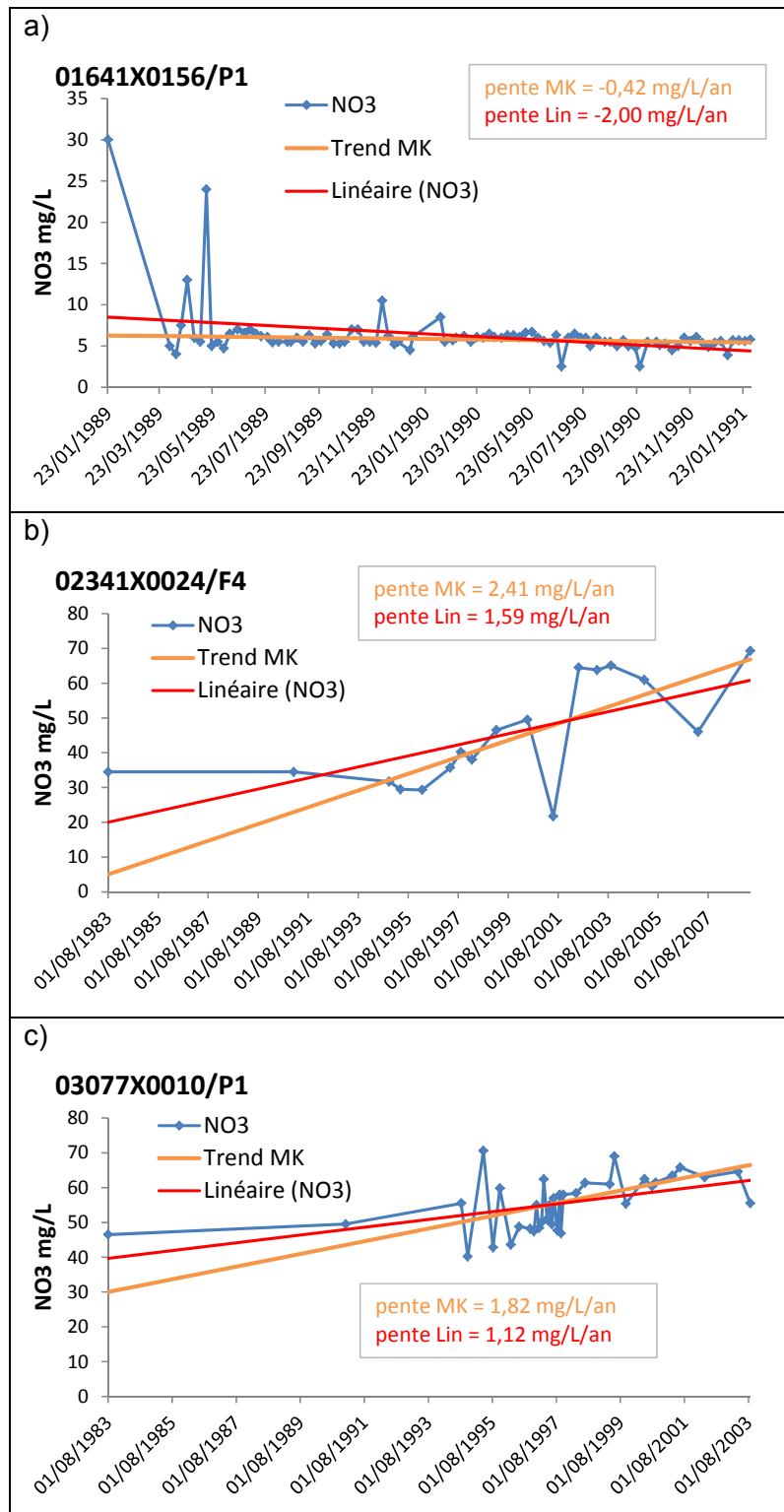


Illustration 38 : Comparaison des tendances Mann-Kendall et régression linéaire sur trois chroniques d'évolution des concentrations en nitrate du bassin Rhin-Meuse.

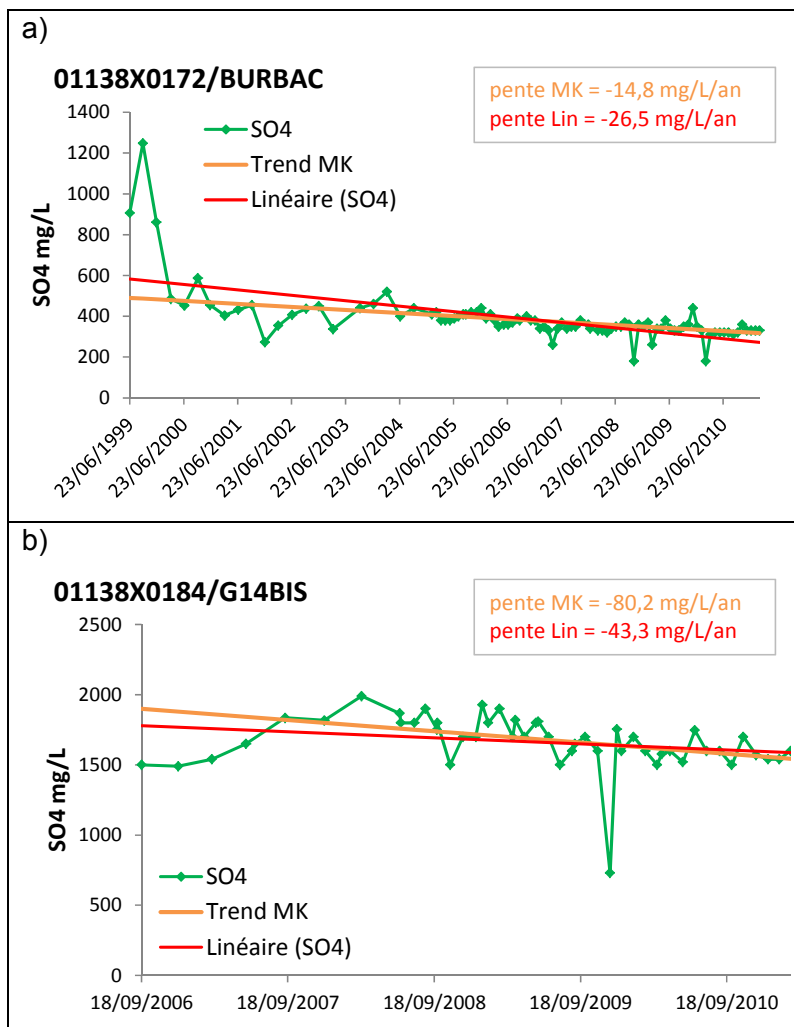


Illustration 39 : Comparaison des tendances Mann-Kendall et régression linéaire sur deux chroniques d'évolution des concentrations en sulfate du bassin Rhin-Meuse.

L'ensemble des résultats d'identification des tendances par application sur les chroniques d'évolution des concentrations en nitrate et sulfate sélectionnées de la régression linéaire et du test de Mann-Kendall est présenté en Annexe 6.

5.3.2. Intérêt du calcul des ruptures de pentes pour l'évaluation des tendances d'évolution

Les longueurs des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate et en sulfate disponibles sur le bassin Rhin-Meuse sont de près de 10 ans en moyenne, avec certaines séries dont l'acquisition des données débute dans les années 1980. L'historique d'évolution des concentrations auquel l'opérateur a accès couvre ainsi différentes périodes durant lesquelles les processus de contamination des eaux souterraines ont évolué, soit vers une augmentation des teneurs, soit vers une diminution. Pour les nitrates, les usages agricoles ont évolué d'une augmentation significative des intrants dans les années 80 vers une rationalisation de leur utilisation par la mise en place de mesures agroenvironnementales dans le milieu des années 90. De plus, dans certains contextes hydrogéologiques, l'évolution des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines est dépendante des conditions climatiques, qui ont aussi évolué par cycles à plus ou moins longues périodes depuis les années 80.

En contexte minier, les contaminations de certains aquifères par les sulfates dépendent essentiellement de l'historique de gestion de ces sites avec notamment l'impact important des périodes d'ennoyage. De ce fait, les résultats de l'analyse des tendances sur les durées totales des chroniques sont difficilement interprétables, ne sachant pas si les tendances identifiées sont impactées par des évolutions passées qui ne subsisteraient plus aujourd'hui et donc si les pentes des tendances ainsi calculées ont un caractère durable.

Les calculs de rupture de pente permettent d'identifier, au sein d'une chronique d'évolution des concentrations en un contaminant, les tronçons pour lesquels les données sont homogènes, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas affectées par un changement majeur de comportement. Le dernier tronçon (le plus récent) à comportement homogène des séries chronologiques correspond ainsi à l'évolution la plus récente du contaminant étudié dans le milieu naturel. La réalisation du calcul de tendance sur ce dernier tronçon de chronique prend alors tout son sens en termes de gestion. L'évolution la plus récente des teneurs en contaminant dans les eaux souterraines résultant, dans la plupart des contextes de nappe libre, de l'état actuel des pressions anthropiques et des conditions climatiques en entrée du système hydrogéologique, la tendance déterminée sur le dernier tronçon homogène des séries chronologiques possède une forte probabilité d'être durable si l'état actuel ne change pas de manière significative.

Afin d'illustrer ces propos, les tendances Mann-Kendall sont calculées sur la durée totale des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate et en sulfate sélectionnées, puis comparées aux résultats du même calcul appliqué sur les tronçons de chroniques post-rupture. La date de rupture sélectionnée est celle issue de l'application de la méthode du CUSUM modifié.

Sur l'ensemble des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate sélectionnées, 34 montrent une tendance Mann-Kendall significative d'un point de vue statistique lorsque le test est appliqué sur la durée totale de la série. Parmi ces chroniques, 18 tendances post-rupture ont été identifiées par le test de Mann-Kendall. La comparaison est donc réalisée sur ce jeu de données. Les résultats sont présentés dans l'illustration 40.

INDC BSS	N data	Date Min	Date Max	Date Rupture	Pente MK mg/L/an	Pente MK post-rupture mg/L/an	N data post-rupture
01143X0037/HY	141	05/11/1997	16/11/2010	04/2001	0.77	0.22	112
01143X0077/SCE	99	04/12/1997	16/11/2010	05/2004	0.35	-0.75	72
01144X0023/HY	135	04/12/1997	16/11/2010	04/2006	1.04	0.84	51
02722X0019/F	525	06/01/1950	09/06/2008	12/1987	0.06	-0.07	345
03028X0013/HY	395	21/07/1981	19/11/2009	08/2004	0.18	-0.60	146
03032X0006/HY	490	13/12/1988	10/11/2010	03/2006	0.52	-1.98	124
03033X0005/HY	473	13/12/1988	10/11/2010	06/1999	-1.45	-0.97	273
03033X0015/HY	464	13/12/1988	10/11/2010	03/2006	0.09	-1.38	100
03033X0016/HY	464	13/12/1988	10/11/2010	03/2006	0.09	-1.63	100
03033X0017/HY	467	17/12/1991	10/11/2010	03/2001	-0.64	0.48	230
03033X0019/HY	414	17/12/1991	10/11/2010	05/2006	-1.26	-1.20	52
03033X0020/HY	408	17/12/1991	10/11/2010	06/1999	-1.32	-0.53	273
03033X0021/HY	435	17/12/1991	10/11/2010	10/2000	-0.99	0.59	214
03077X0009/P2	44	01/08/1983	27/11/2009	06/1998	0.78	1.16	19
03077X0020/F	58	01/08/1983	04/03/2008	07/1998	0.27	-0.69	35
03376X0014/SAEP1	66	29/04/1999	20/11/2009	09/2004	2.35	-2.14	34
04134X0018/P13	408	03/10/1975	01/12/2008	06/1998	-0.45	-0.65	114
04134X0136/PN4	408	03/10/1975	01/12/2008	06/1994	0.71	-1.14	170

Illustration 40 : Comparaison des tendances Mann-Kendall calculées sur la durée totale des chroniques et sur le tronçon post-rupture sur les 18 chroniques d'évolutions des concentrations en nitrate.

9 chroniques ont une tendance globale à la hausse mais une tendance post rupture à la baisse. Elles sont mentionnées en bleu sur l'illustration 40. La chronique 03032X0006/HY présentée sur l'illustration 41 est un bon exemple de l'intérêt à porter à la comparaison de la tendance globale avec les tendances « récentes ». Dans ce cas particulier, il semble que l'évolution des concentrations en nitrate suit un comportement cyclique à longues périodes de retour (environ 8 ans). De fait, la tendance récente orientée à la baisse peut être soit une réelle orientation du signal à la baisse, soit une représentation de la partie décroissante du cycle d'évolution.

2 chroniques montrent le phénomène inverse avec une tendance globale à la baisse et une tendance « récente » à la hausse. Ces points sont notés en rouge sur l'illustration 40. Pour les autres séries analysées, les tendances ont le même sens qu'elles soient calculées sur la durée totale de la chronique ou sur le tronçon post-rupture. Les valeurs des pentes post-ruptures sont alors dans l'ensemble inférieures en valeur absolue aux pentes globales sauf pour deux points (03077X0009/P2 et 04134X0018/P13) où l'inverse se produit.

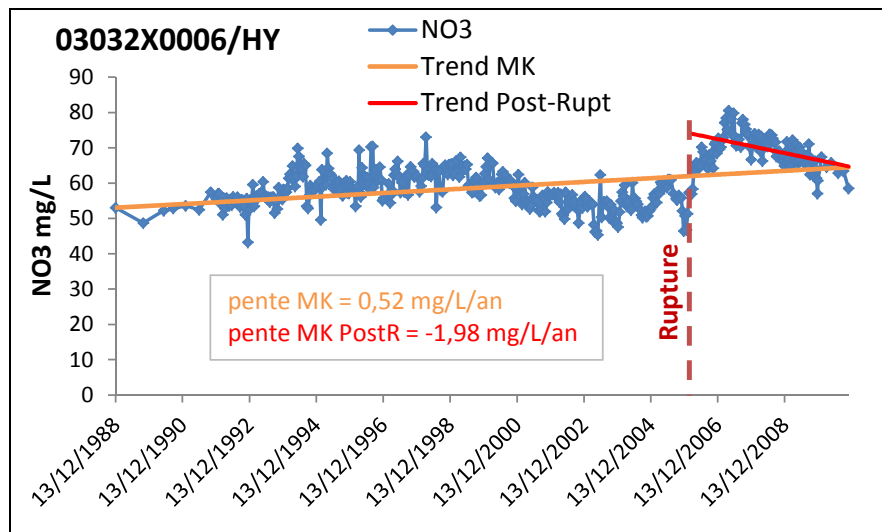


Illustration 41 : Comparaison des tendances Mann-Kendall calculées sur la durée totale et sur le tronçon post-rupture de la chronique d'évolution des concentrations en nitrate au point 03032X0006/HY.

Les tendances calculées selon le test de Mann-Kendall sur la durée totale des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate sélectionnées et après ruptures de pentes (identifiées par la méthode du CUSUM modifié) sont reportées sur le bassin Rhin-Meuse dans l'illustration 42. Cette représentation permet de cibler les points pour lesquels la tendance « récente » est plus favorable que la tendance globale de la chroniques et inversement, les points où l'évolution récente des concentrations en nitrate est plus critique comparée à l'évolution globale sur la durée totale du suivi.

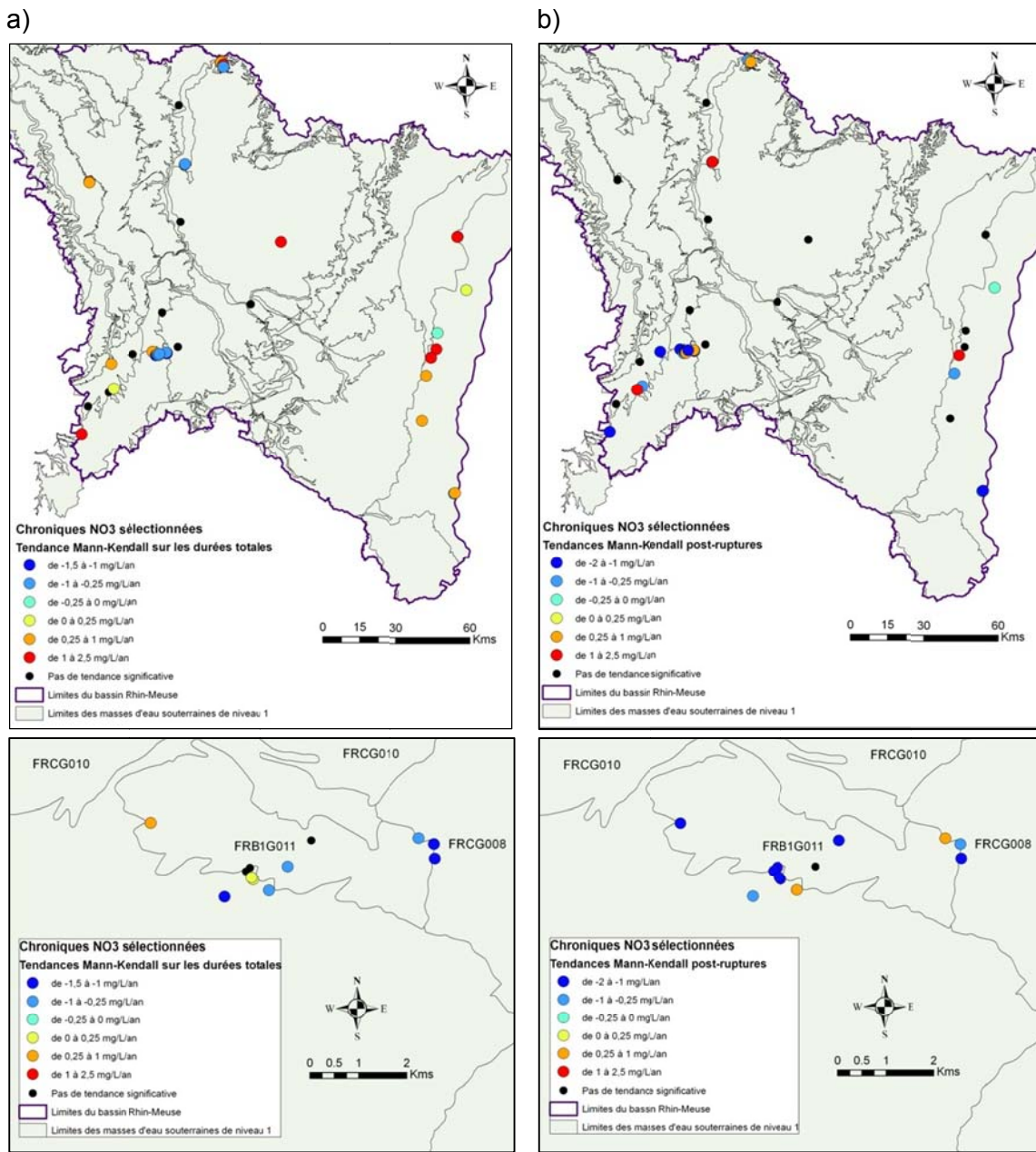


Illustration 42 : Représentation des tendances d'évolution des concentrations en nitrate au point de prélèvement sélectionnés pour l'étude de faisabilité calculées par le test de Mann-Kendall appliqué a) sur la durée totale des chroniques et b) sur le tronçon post rupture de pente. En bas, zoom sur les points sélectionnés dans ou proches de la masse d'eau 2011 « Calcaires du Dogger du plateau de Haye ».

8 chroniques d'évolutions des sulfates sur les 10 sélectionnées ont des tendances Mann-Kendall significatives lorsque le test est appliqué sur la durée totale des chroniques. Une tendance post-rupture a été identifiée sur trois de ces huit chroniques. La comparaison des pentes des tendances sur la durée totale et sur le tronçon post-rupture de ces séries révèle une baisse des teneurs, moins importante sur la partie post-rupture des chroniques. Les résultats de l'évaluation des tendances par le test de Mann-Kendall sur la durée totale et sur le tronçon post-rupture de la chronique d'évolution des concentrations en sulfate au point 01377X0212/M02 sont reportés sur l'illustration 43.

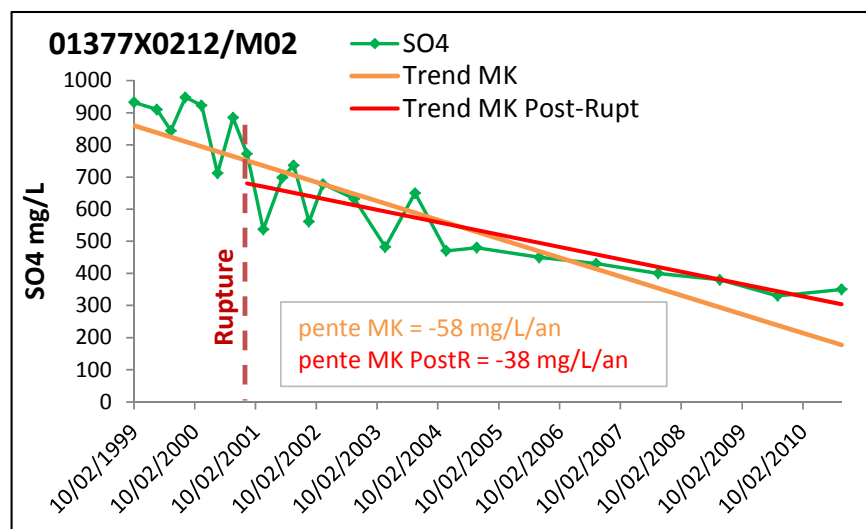


Illustration 43 : Comparaison des tendances Mann-Kendall calculées sur la durée totale et sur le tronçon post-rupture de la chronique d'évolution des concentrations en sulfate au point 01377X0212/M02.

5.4. TESTS SPATIALISES DE TENDANCE

Il est proposé de tester dans quelle mesure la spatialisation des tendances est possible sur le bassin Rhin-Meuse et quels outils peuvent être mis en œuvre pour atteindre cet objectif. Dans cette étude, les données de concentrations en nitrate au sein de la masse d'eau 2013 « calcaires oxfordiens » sont utilisées comme jeu de données test.

5.4.1. Agrégation des données

Avec la définition de l'unité spatiale de travail, l'un des verrous à lever pour réaliser l'exercice de spatialisation des tendances est la méthode d'agrégation des données à partir desquelles est calculée la tendance spatialisée. En admettant, en première approche, que l'unité spatiale de travail est la masse d'eau, deux méthodes d'agrégation sont testées et comparées.

La première méthode d'agrégation testée est aussi la plus simple. Il s'agit de récupérer l'ensemble des données de concentrations C du contaminant étudié sur l'unité spatiale choisie. A chaque donnée de concentration est associée une date de prélèvement i et un point de prélèvement j . Le regroupement de toutes les données de concentrations C_{ij} de l'unité spatiale, classées par dates i croissantes constitue la chronique virtuelle d'évolution des concentrations du contaminant étudié sur l'unité spatiale choisie. Les tests d'évaluation des ruptures de pente et des tendances d'évolution peuvent alors être directement appliqués sur la chronique virtuelle C_i . Cette méthode induit néanmoins deux inconvénients majeurs :

- La chronique virtuelle C_i peut contenir plusieurs analyses différentes pour une même date de prélèvement,
- La chronique virtuelle C_i est constituée de chroniques qui ne possèdent pas les mêmes paramètres statistiques (moyenne et écart type) induisant une hétérogénéité statistique artificielle.

La deuxième méthode d'agrégation testée permet de pallier ces inconvénients. Il s'agit de la méthode du vecteur régional V_i dont le principe est exposé au paragraphe 3.1.3. Le principe repose sur la normalisation de l'ensemble des chroniques ponctuelles C_{ij} de manière à ce qu'elles possèdent toutes la même moyenne et le même écart type. Après agrégation de l'ensemble des chroniques ponctuelles normalisées C'_{ij} , si plusieurs données sont affectées à une même date de mesure i , la valeur reportée correspond à la moyenne arithmétique des données à l'instant i .

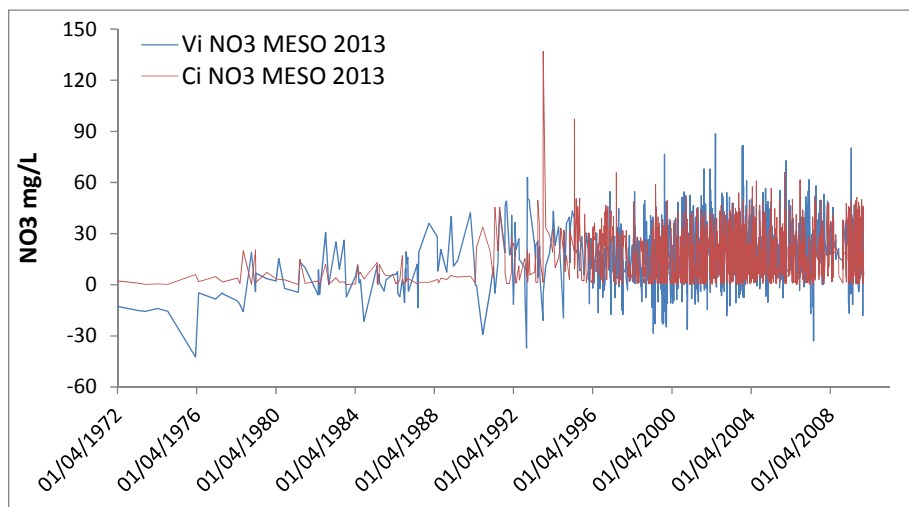


Illustration 44 : Chronique virtuelle Ci et vecteur régional Vi d'évolution des concentrations en nitrate au sein de la masse d'eau 2013 « calcaires oxfordiens ».

L'illustration 44 permet de comparer les résultats de l'agrégation des données de concentration en nitrate selon les deux méthodes précédemment citées. La chronique virtuelle Ci est composée de 2705 données alors que le vecteur régional Vi est constitué de 2095 données. Par le jeu de la normalisation, les chroniques C'ij utilisées pour construire le vecteur régional ont la même moyenne et le même écart type que la chronique virtuelle Ci (17,97 et 14,35 mg/L respectivement). Les valeurs de ces paramètres sont légèrement différentes pour le vecteur régional en raison du calcul de la moyenne arithmétique des concentrations communes aux instants i. La moyenne du vecteur régional est ainsi de 18,15 mg/L avec un écart type de 14,13 mg/L.

Ces deux chroniques, caractéristiques de l'évolution des concentrations en nitrate au sein de la masse d'eau 2013 « calcaires oxfordiens » constituent le jeu de données à partir desquelles sont calculées les ruptures de pente et les tendances d'évolution.

5.4.2. L'outil « Boite à moustaches »

Le principe de construction des « Boites à moustaches » est présenté au paragraphe 3.1.3. Le caractère spatialisé de l'analyse de tendance est rendu possible par l'agrégation, pour la constitution de la boite à moustache, de données issues de plusieurs points d'un même secteur. L'estimation des tendances d'évolution des contaminations sur un secteur donné est réalisée en comparant les paramètres statistiques (représentés sous la forme des boites à moustaches) entre deux périodes différentes. Le test de Kruskal-Wallis permet de tester l'hypothèse de l'appartenance de chaque échantillon (chaque boite à moustache) à une même population statistique. Dans le cas d'un rejet de cette hypothèse, une comparaison multiple par paire (Conover, 1999) permet d'identifier quels groupes en sont responsables.

Les limites des périodes sur lesquelles sont calculées et comparées les boîtes à moustaches correspondent aux dates des limites hydrologiques (du 1 octobre d'une année n au 31 septembre de l'année n+1) les plus proches des déciles de la distribution statistique des dates de prélèvement. Cette méthode permet de constituer des échantillons de tailles comparables et cohérents d'un point de vue hydrogéologique. Les nombres de données par classe, et donc par boîte à moustache, pour la chronique virtuelle Ci et le vecteur régional Vi, sont reportés dans l'illustration 45. Pour la chronique virtuelle, un nombre plus important de données est agrégé pour les périodes 72-96 et 96-99. Ceci est dû à la présence d'un nombre important d'analyse réalisée à des dates communes durant ces périodes.

Remarque : pour cet exercice, toutes les données disponibles sont prises en compte pour la constitution des boîtes à moustaches sans faire de sélection plus poussée pour ne garder que les points ayant des données sur chaque période par exemple. Une sélection des données plus stricte pourrait être réalisée a posteriori, permettant vraisemblablement de limiter les biais potentiellement engendrés par la fermeture de points de prélèvement en raison d'un dépassement de seuil de potabilité par exemple.

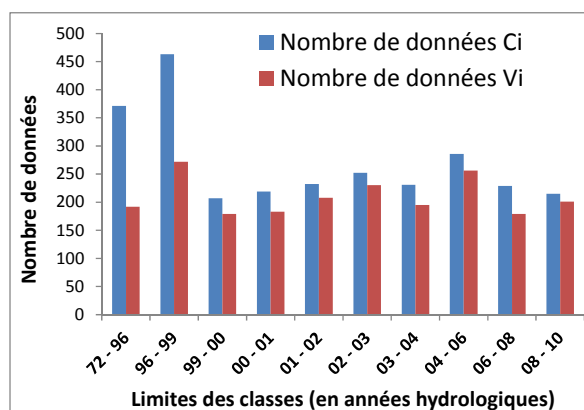


Illustration 45 : Limites des classes et nombre de données par boîte à moustaches pour la chronique virtuelle Ci et le vecteur régional Vi

L'illustration 46 représente les évolutions des concentrations en nitrate au sein de la masse d'eau 2013 par boîtes à moustaches. L'illustration 46a est créée à partir des données agrégées selon la méthode de la chronique virtuelle Ci alors que l'illustration 46b est issue de l'agrégation des données selon la méthode du vecteur régional.

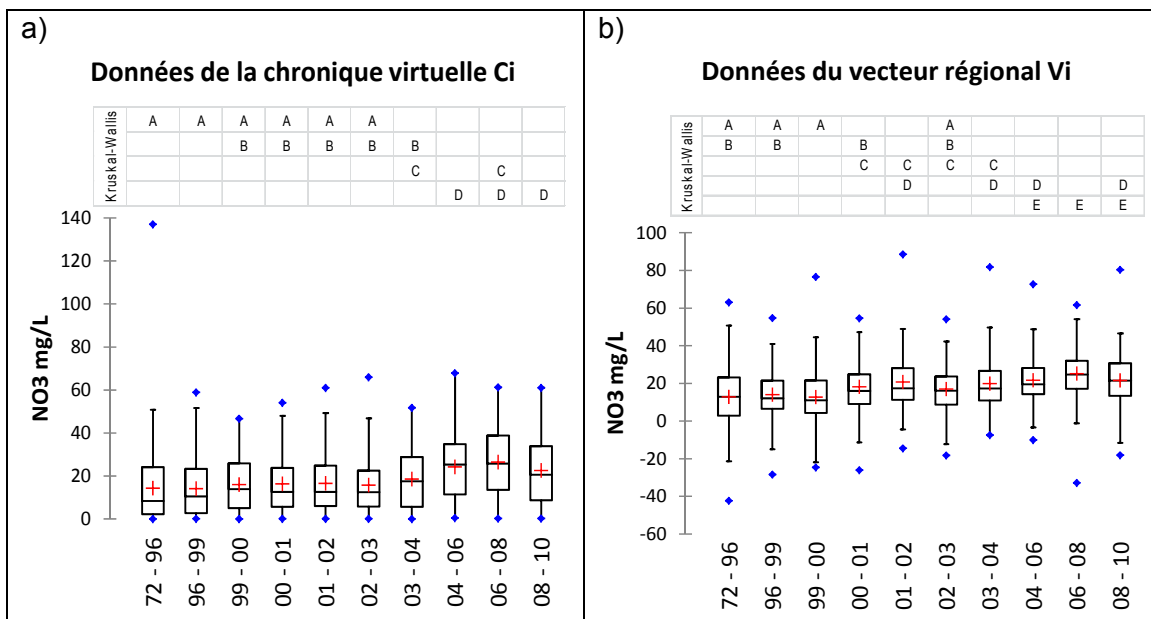


Illustration 46 : Représentation de l'évolution des concentrations en nitrate au sein de la masse d'eau 2013 par boîtes à moustache à partir des données agrégées selon les méthodes de a) la chronique virtuelle Ci et b) le vecteur régional Vi. Les résultats de la comparaison multiple par paire à partir du test de Kruskal-Wallis sont représentés sur chacun des graphiques.

Dans les deux cas, le test de Kruskal-Wallis indique un rejet de l'hypothèse d'appartenance des échantillons à une même population statistique. La comparaison multiple par paires qui fait suite à ce constat permet de créer des groupes homogènes d'un point de vue statistique, notés de A à D dans l'illustration 46a et de A à E dans l'illustration 46b. Quelle que soit la méthode d'agrégation des données, les trois dernières boîtes à moustaches s'individualisent indiquant un changement de comportement des concentrations en nitrate à partir de l'année 2004. Avant cette période, l'interprétation diffère suivant le graphique analysé : la comparaison des boîtes à moustaches issues de l'agrégation selon la méthode de la chronique virtuelle avant l'année hydrologique 2004 révèle la formation de groupes, les données de concentrations entre 72 et 99 et celles disponibles entre 99 et 04. Lorsque cette analyse est réalisée à partir de l'agrégation selon la méthode du vecteur régional, 5 groupes statistiques peuvent être formés sur la période avant 2004. La variabilité est ainsi plus importante avec un pic des concentrations en nitrate mis en évidence en 2001 - 2002.

L'agrégation selon le vecteur régional semble donc appropriée pour une analyse spatialisée de l'évolution des concentrations en nitrate par l'outil boîte à moustache. Le vecteur régional porte plus d'informations en terme de variabilité que le la chronique virtuelle permettant une analyse plus fine des changements potentiels de comportement de la contamination.

5.4.3. Comparaison des résultats d'évaluation des tendances

Identification des ruptures de pente

A l'instar des travaux réalisés sur les chroniques ponctuelles d'évolution des concentrations en nitrate et en sulfate, les tests de Buishand, de Pettitt et du CUSUM modifié sont appliqués sur la chronique virtuelle Ci et sur le vecteur régional Vi.

	Date de rupture		
	Test de Buishand	Test de Pettitt	Test de CUSUM
Ci	13/11/2003	13/11/2003	14/05/2008
Vi	24/09/2001	19/12/2003	03/10/2000

Illustration 47 : Comparaison des dates de ruptures calculées selon les tests de Buishand, de Pettitt et du CUSUM modifié sur la chronique virtuelle Ci et sur le vecteur régional Vi.

Les résultats présentés dans l'illustration 47 montrent, pour une même chronique de départ, des divergences entre les méthodes appliquées, constat déjà réalisé par l'analyse des chroniques ponctuelles. Sur la chronique virtuelle Ci, les tests de Buishand indique la même date de rupture qui correspond à un changement de comportement clairement montré par la représentation boîtes à moustaches couples au test de Kruskal-Wallis (abandon du groupe A à partir du 1/10/2003 sur l'illustration 46a). La date de rupture indiquée par la méthode du CUSUM modifié pour la chronique virtuelle correspond quant à elle à l'individualisation de la toute dernière période où les concentrations en nitrate sont sensiblement plus faibles. Sur le vecteur régional Vi, les trois dates de ruptures sont différentes mais peuvent tout de même être rapprochées d'un changement statistique indiqué sur l'illustration 46b. Toutefois, seules les dates de rupture déterminées par l'application du test de Pettitt restent cohérentes d'une chronique à l'autre. Ce test apparaît ainsi le plus robuste aux changements de méthodes d'agrégation et est de ce fait sans doute à privilégier pour un travail sur des données brutes non normalisées.

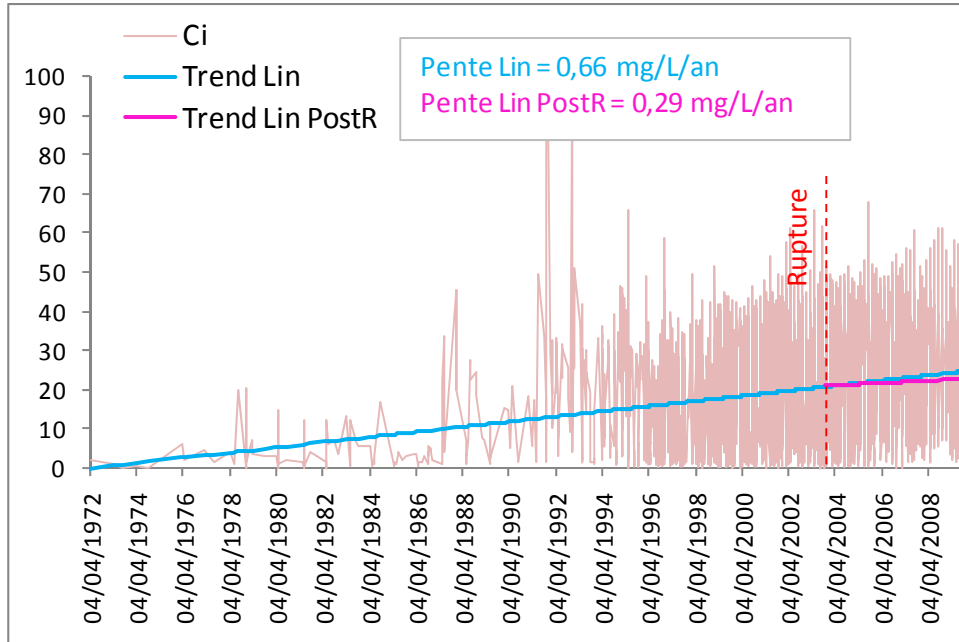
Evaluation des tendances spatialisées

L'évaluation de la tendance d'évolution des concentrations en nitrate à l'échelle de la masse d'eau 2013 « calcaires oxfordiens » est réalisée à la fois sur la chronique virtuelle C_i et le vecteur régional V_i suivant différentes méthodes choisies en fonction des résultats précédents :

- Régression linéaire sur la longueur totale des chroniques C_i et V_i
- Régression linéaire sur le tronçon post rupture dont la date est déterminée selon le test de Pettitt
- Test de Mann-Kendall sur la longueur totale des chroniques C_i et V_i (le test de Mann-Kendall sur la chronique virtuelle C_i correspond au test Kendall-Régional exposé au paragraphe 3.1.3)
- Test de Mann-Kendall sur le tronçon post rupture (Pettitt) des chroniques C_i et V_i .

L'illustration 48 et l'illustration 49 regroupent les résultats d'évaluation des tendances sur la chronique virtuelle C_i et le vecteur régional V_i respectivement. Les régressions linéaires sur la durée totale des chroniques et sur le tronçon après rupture de pente sont représentées sur l'illustration 48a et l'illustration 49a. Les tendances Mann-Kendall (durée totale et tronçon post rupture) sont représentées sur l'illustration 48b et l'illustration 49b.

a)



b)

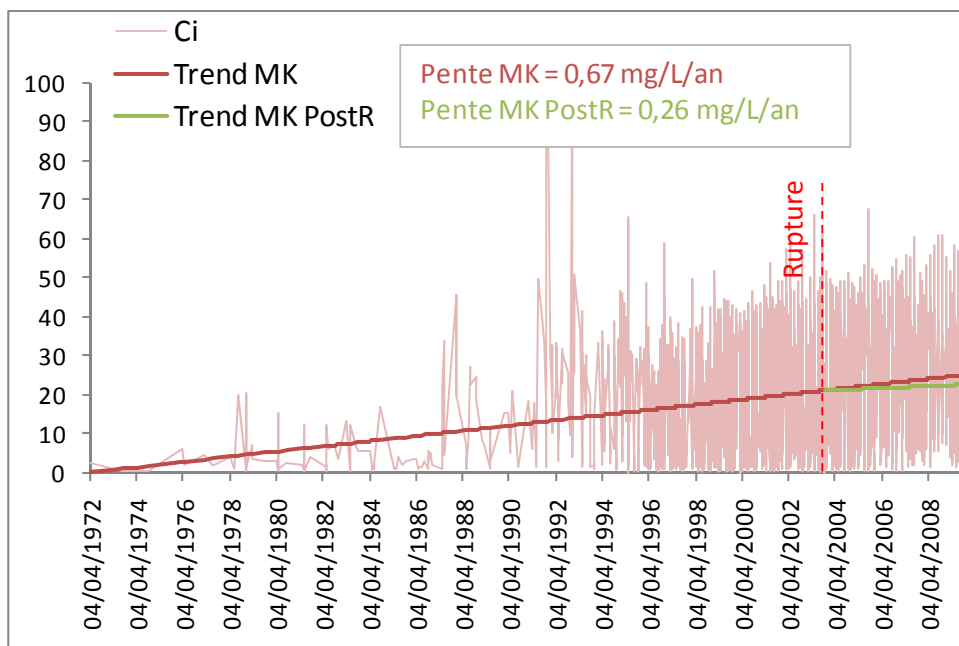


Illustration 48 : a) régression linéaire et b) tendance Mann-Kendall sur la durée totale de la chronique virtuelle Ci et sur le tronçon post rupture (PostR)

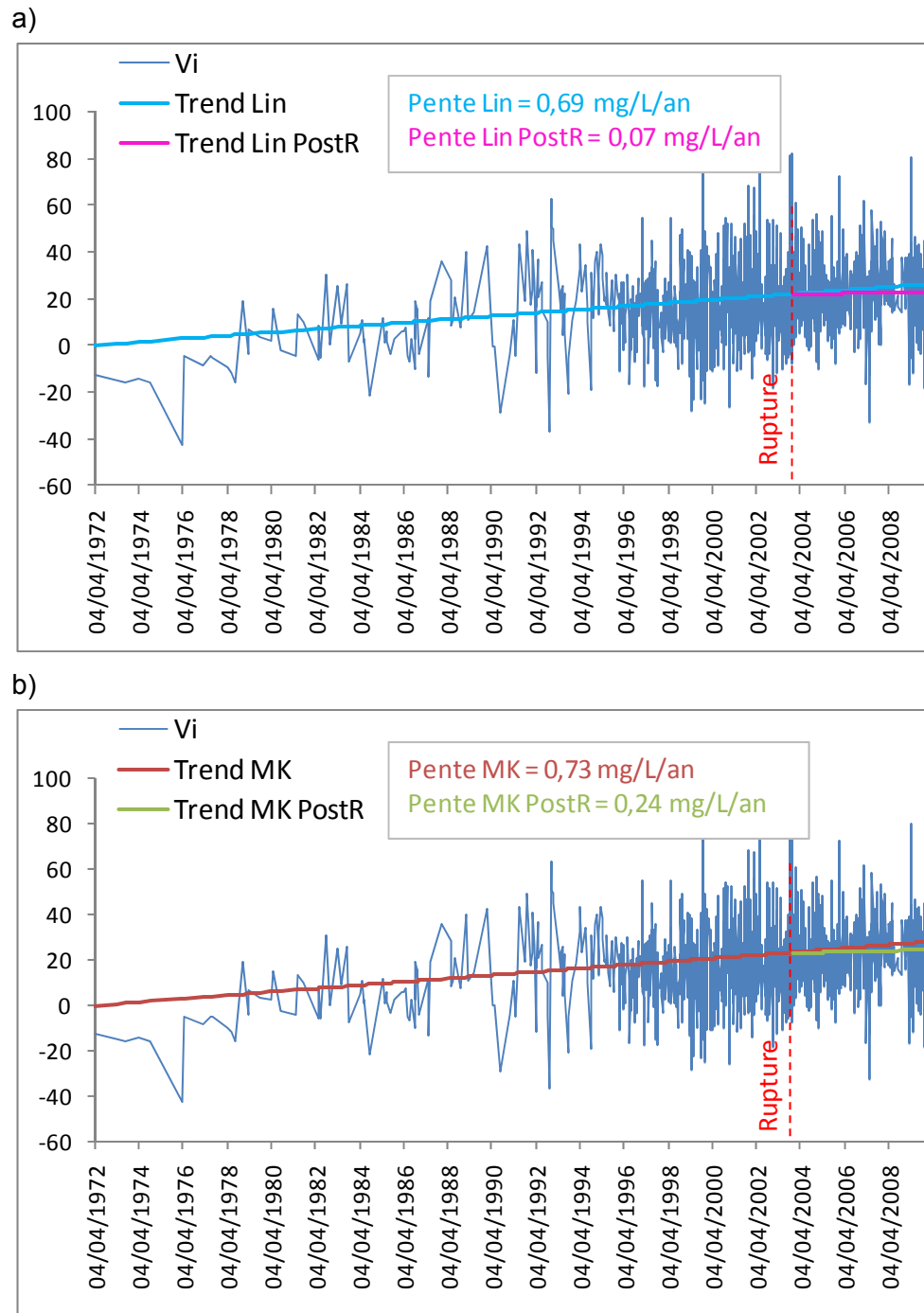


Illustration 49 : a) régression linéaire et b) tendance Mann-Kendall sur la durée totale du vecteur régional Vi et sur le tronçon post rupture (PostR)

Pour une même chronique, et quel que soit le test appliqué, les pentes des tendances post rupture sont toujours inférieures aux pentes des tendances générales. Sur la masse d'eau 2013 il est donc possible de conclure à une diminution générale de l'augmentation des teneurs en nitrate dans les eaux souterraines. Toutefois, si les pentes des tendances calculées sur la durée totale des chroniques sont très comparables quel que soit le mode d'agrégation des données et le test appliqué, il n'en est pas de même pour les pentes des tendances post rupture. En effet, les pentes des tendances post ruptures du vecteur régional sont plus faibles que celles de la chronique virtuelle, notamment lors de l'application de la régression linéaire. Une différence importante est en effet constatée entre les deux tests régression linéaire et Mann-Kendall. Plus généralement, la régression linéaire n'apparaît pas stable comme le montre la différence importante de pente de tendance calculée selon ce test sur les tronçons post rupture de la chronique virtuelle C_i et du vecteur régional V_i . Le test de Mann-Kendall apparaît plus robuste quelle que soit la méthode d'agrégation des données.

Comparaison des résultats avec la méthode du CUSUM modifié

La méthode du CUSUM modifié développée par l'Agence de l'Eau Rhin Meuse est appliquée sur les mêmes jeux de données afin de comparer les résultats avec les autres méthodes mises en œuvre.

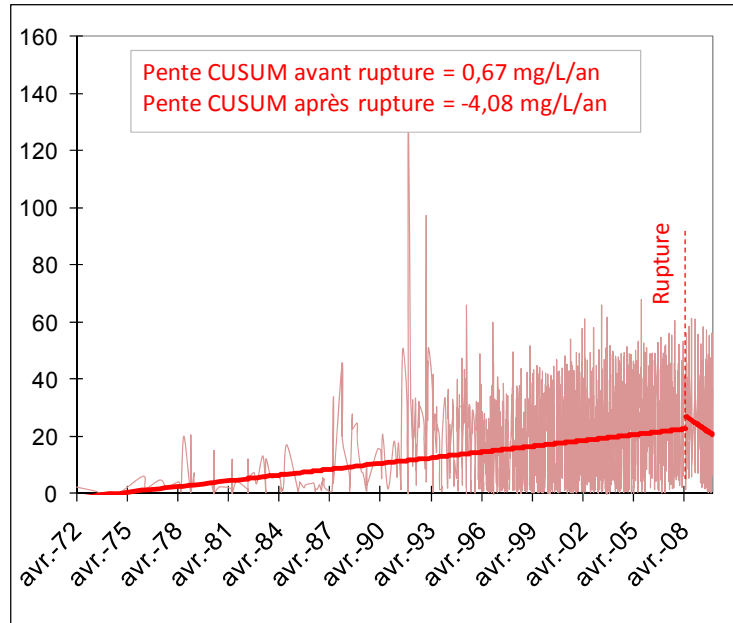
L'illustration 50 présente les résultats des traitements de la chronique virtuelle C_i et du vecteur régional V_i d'évolution des concentrations en nitrate à l'échelle de la masse d'eau 2013 par la méthode du CUSUM modifié. Comme il a été précisé auparavant, les dates de ruptures apparaissent différentes suivant le mode d'agrégation des données ainsi qu'avec les autres méthodes testées sur les mêmes chroniques. Ces différences peuvent en partie expliquer les valeurs de pentes différentes constatées après rupture, à la fois entre l'application de la méthode du CUSUM sur la chronique virtuelle C_i et le vecteur régional V_i , mais entre l'application de cette méthode et les valeurs post ruptures identifiées par le test Mann-Kendall notamment.

Dans le cas de la chronique virtuelle C_i , la rupture de pente tardive (14/05/2008) limite la longueur du tronçon sur lequel est calculée la tendance. Il est donc difficile de statuer sur le caractère durable de cette dernière, d'autant que la diminution importante restituée par la méthode du CUSUM modifié (-4 mg/L/an) apparaît particulièrement optimiste.

L'utilisation de la méthode du CUSUM modifié pour une analyse spatialisée des tendances apparaît, en première approche, plus pertinente lorsqu'elle est associée à la méthode du vecteur régional pour l'agrégation des données. Néanmoins, en l'absence d'autres tests, la méthode la plus robuste pour l'évaluation des tendances spatialisées semble être le test de Mann-Kendall, qui peut être appliqué soit sur une chronique virtuelle issue d'une agrégation simple des données (Kendall-Régional), soit sur un vecteur régional. Pour l'identification de tendances « récentes », le test de Pettitt apparaît comme le plus robuste pour l'identification des ruptures de pentes. L'outil « boîte à

moustache » représente quant à lui un bon complément d'information, notamment lorsqu'il est appliqué sur des données normalisées.

a)



b)

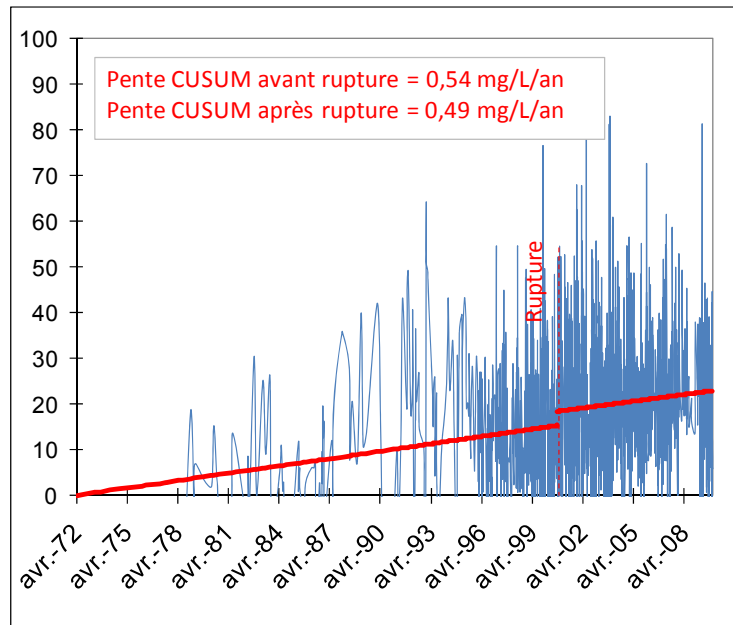


Illustration 50 : Analyse des tendances avant et après rupture de pente a) de la chronique virtuelle C_i et b) du vecteur régional V_i selon la méthode du CUSUM modifié.

5.5. TRAITEMENTS STATISTIQUES DES DONNEES DE CONCENTRATIONS EN SUBSTANCES PHYTOSANITAIRES

L'étude de l'état de contamination des eaux souterraines par les pesticides ne peut se faire selon les mêmes modalités que pour les polluants majeurs tels les nitrates ou les sulfates par exemple. Les données disponibles sont en effet du type « inférieur à » (une limite de détection ou de quantification) limitant les possibilités d'une analyse statistique classique des concentrations.

La représentation de l'état de contamination ne peut être réalisée par la simple représentation des concentrations en pesticides dans les eaux souterraines. L'information est biaisée par la présence des données « censurées » qui ne peuvent entrer telles quelles dans les calculs statistiques. Afin de pallier cette difficulté il est proposé d'analyser la répartition des fréquences de quantification de la substance phytosanitaire étudiée rapportées au nombre d'analyses. L'illustration 51, reprise du paragraphe 4.1.3 montre ainsi cette répartition à l'échelle du bassin Rhin-Meuse, pour l'atrazine, la déséthylatrazine, le métolachlore et le glyphosate. Cette représentation présente plusieurs avantages : (i) elle permet de rechercher les secteurs les plus impactés par la contamination en un pesticide, (ii) la comparaison des cartes par paramètre facilite l'identification des pesticides les plus fréquemment quantifiés dans les eaux souterraines du secteur étudié et (iii) il est possible de relever les points favorables à une analyse statistique « classique », c'est-à-dire les points sur lesquels le pesticide est recherché 10 fois au minimum et où il est fréquemment quantifié (FQ > 75 % en première approche).

L'analyse de l'illustration 51 révèle une contamination des eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse par l'atrazine et la déséthylatrazine bien plus importante que par le métolachlore ou le glyphosate. Ce sont les bordures est et nord-ouest les plus impactées par la contamination en atrazine et déséthylatrazine alors que seuls quelques points de mesure à l'est (nappe d'alsace) montre une contamination des eaux souterraines par le métolachlore. Le glyphosate, moins fréquemment recherché, présente aussi des fréquences de quantification par point toujours inférieures à 10 %. Seuls les paramètres atrazine et déséthylatrazine disposent de points répondant aux critères d'application d'un test statistique d'analyse ponctuelle des tendances d'évolution de la contamination.

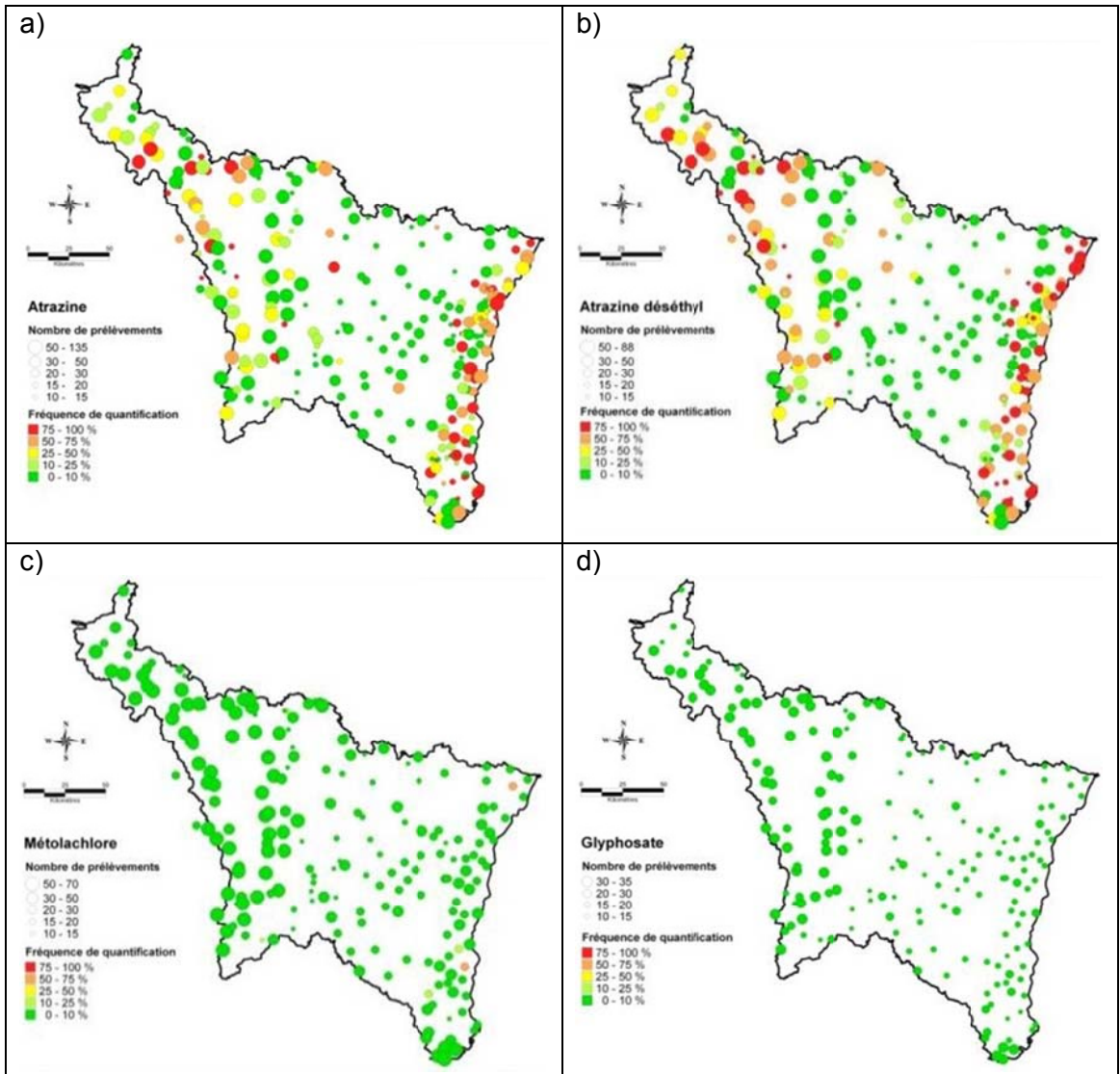


Illustration 51 : Répartition, à l'échelle du bassin Rhin-Meuse, de l'état de contamination des eaux souterraines par a) l'atrazine, b) l'atrazine déséthyl, c) le métolachlore et d) le glyphosate. Seuls les points de 10 données ou plus sont représentés, la taille du point augmentant avec le nombre de prélèvements et la couleur définissant la fréquence de quantification.

5.5.1. Représentation de l'évolution des teneurs en pesticides par l'outil « boîte à moustaches »

La boîte à moustache est un moyen rapide de figurer le profil essentiel d'une série statistique quantitative. De ce fait, c'est un outil tout à fait approprié pour représenter l'évolution des concentrations en pesticides dans les eaux souterraines sur un secteur et entre deux périodes donnés. L'illustration 52 montre la représentation par boîtes à moustaches de l'évolution des concentrations en atrazine dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse. Lorsque les données sont inférieures à la limite de quantification, elles prennent la valeur LQ/2 (préconisation réglementaire). L'analyse est réalisée soit en agrégeant les données issues de tous les points du bassin qui disposent d'au moins une analyse en atrazine sur la période 1986 – 2009 (Illustration 52a) soit en agrégeant les données issues des points qui disposent d'au moins une analyse en atrazine sur chacune des 10 périodes (de P0 à P9, Illustration 52b). Dans le 1^{er} cas, 2173 points sont pris en compte alors que les données de 52 points seulement sont agrégées pour la constitution du 2^{ème} diagramme. Le test de Kruskal-Wallis associé à la comparaison multiple par paire est figuré par les lettres majuscules présentes sur les diagrammes (de A à G dans l'illustration 52a et de A à C dans l'illustration 52b). Chaque lettre correspond à une population statistique, un échantillon (boîte à moustache) pouvant appartenir à plusieurs populations. Dans les deux cas, une décroissance significative des concentrations en atrazine est mise en évidence, les boîtes à moustaches des premières périodes appartenant à des populations différentes de celles des périodes les plus récentes. Toutefois, la prise en compte de tous les points accentue la significativité de la décroissance observée.

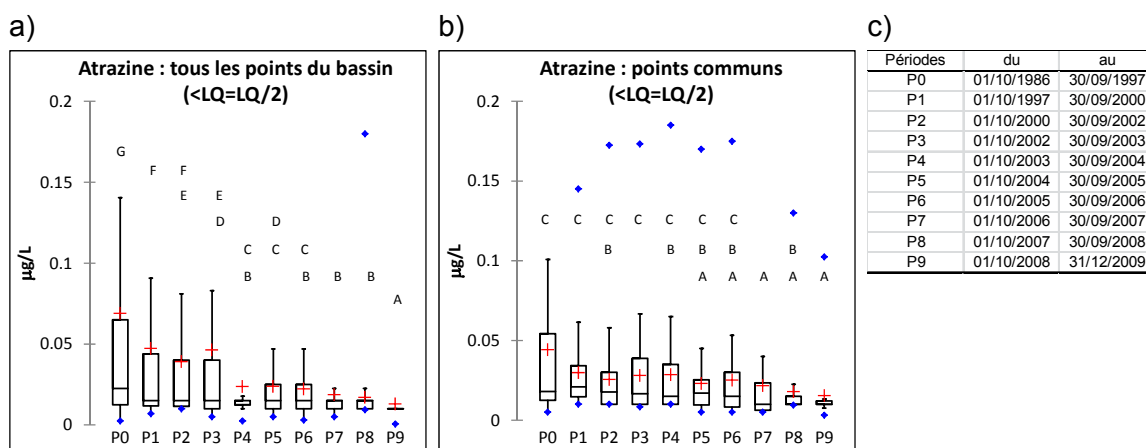


Illustration 52 : Comparaison de l'évolution des concentrations en atrazine dans les eaux souterraines à l'échelle du bassin Rhin-Meuse représentée par boîte à moustaches en prenant en compte soit a) l'ensemble des points de prélèvements du bassin, soit b) uniquement les points qui disposent d'une analyse en atrazine au moins pour chaque période de P0 à P9.

Le choix des périodes d'agrégation des données (Illustration 52c) peut aussi grandement impacter l'analyse par boîte à moustaches. Afin d'homogénéiser le nombre de données pour la constitution des boîtes à moustaches tout en ne mélangeant pas des données appartenant à des périodes hydrologiques différentes, il est proposé de calculer les limites des périodes en deux étapes : (i) la première étape est le calcul des déciles de la distribution de l'ensemble des dates de prélèvements qui constituent le jeu de données à analyser puis (ii) ces limites statistiques sont ajustées aux limites hydrologiques les plus proches. Le nombre de données par périodes hydrologiques est ainsi le plus homogène possible au sein de périodes ayant une cohérence d'un point de vue hydrogéologique.

5.5.2. Problématique des limites de quantifications (LQ)

De nombreuses données d'analyse de la présence des pesticides dans les eaux souterraines sont qualitatives du type « inférieure à la limite de quantification ». Afin de représenter l'évolution de la présence de ces substances dans les eaux souterraines, il peut être tentant d'étudier l'évolution de leurs fréquences de quantification. Seulement, cette information est très dépendante des valeurs des limites de quantification qui peuvent évoluer dans le temps (pour un même laboratoire et entre laboratoires d'analyse) en fonction de la méthode analytique utilisé. De fausses tendances peuvent ainsi apparaître par la seule évolution des limites de quantification.

Il est ainsi préférable d'étudier l'évolution des fréquences de dépassement d'un seuil dont la valeur est unique sur toute la durée d'analyse (Illustration 53). L'analyse des données de concentrations en atrazine et en déséthylatrazine sur le bassin Rhin-Meuse montre en effet que si les fréquences de quantification ont une évolution fortement anticorrélée à celle des valeurs des limites de quantification, il n'en est pas de même de l'évolution des fréquences de dépassement du seuil 0,1 µg/L. Or, et contrairement à l'évolution des fréquences de quantification, l'évolution des fréquences de dépassement du seuil 0,1 µg/L est fortement corrélée avec l'évolution de la médiane des concentrations en pesticides. L'évolution des fréquences de dépassement du seuil réglementaire des concentrations en atrazine et déséthylatrazine sur le bassin Rhin-Meuse constitue donc une représentation robuste des tendances d'évolution de la présence de ces pesticides dans les eaux souterraines.

La valeur du seuil doit néanmoins être fixée en fonction des données disponibles. L'illustration 53a montre en exemple l'évolution comparée, par périodes précédemment définies, des concentrations moyennes en glyphosate, des limites de quantifications moyennes, des fréquences de quantification et de dépassement du seuil réglementaire 0,1 µg/L. Pour les périodes P0, P1 et P4, les fréquences de dépassement du seuil 0,1 µg/L sont supérieures aux fréquences de quantification. Ceci intervient lorsque les limites de quantifications sont supérieures ou égales au double de la valeur du seuil choisi (Illustration 53b). La véracité du dépassement du seuil peut, dans ce cas précis, être remise en cause en raison de la méconnaissance de la concentration exacte en pesticide. L'analyse de l'évolution des fréquences de dépassement d'un seuil théorique

n'est donc pertinente que si la valeur du seuil est, au minimum, strictement supérieure à la valeur de la limite de quantification maximale de la substance étudiée.

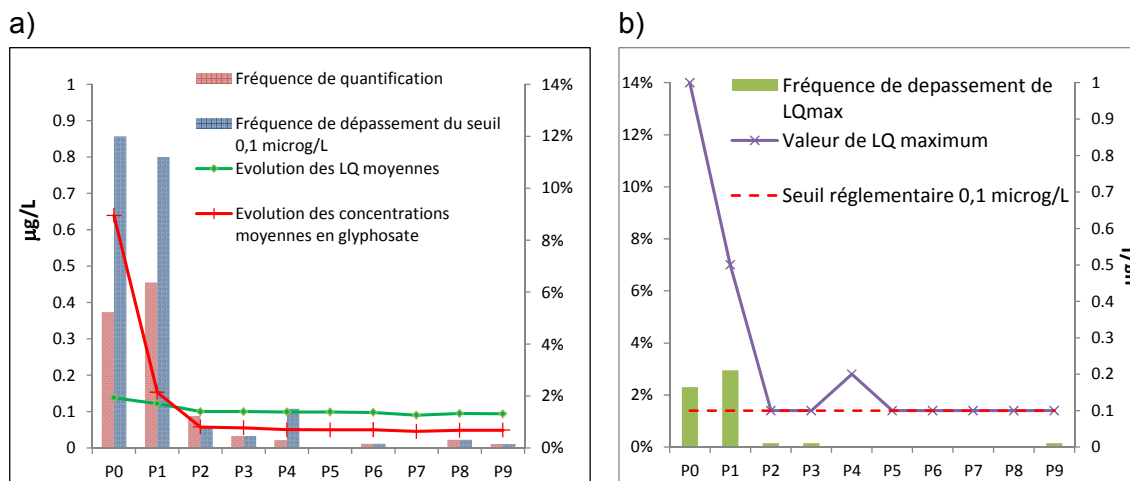


Illustration 53 : a) Evolution des fréquences de quantification et de dépassement du seuil réglementaire 0,1 µg/L des concentrations en glyphosate sur le bassin Rhin-Meuse, b) évolution des limites de quantification maximales du glyphosate et des fréquences de leurs dépassements.

5.5.3. Application des méthodes statistiques « classiques » d'analyse des séries chronologiques

Certaines chroniques d'évolution des concentrations en pesticides dans les eaux souterraines présentent des caractéristiques de données (10 données ou plus, FQ > 75 %) favorables à la mise en œuvre de tests statistiques de ruptures et de tendances des séries temporelles.

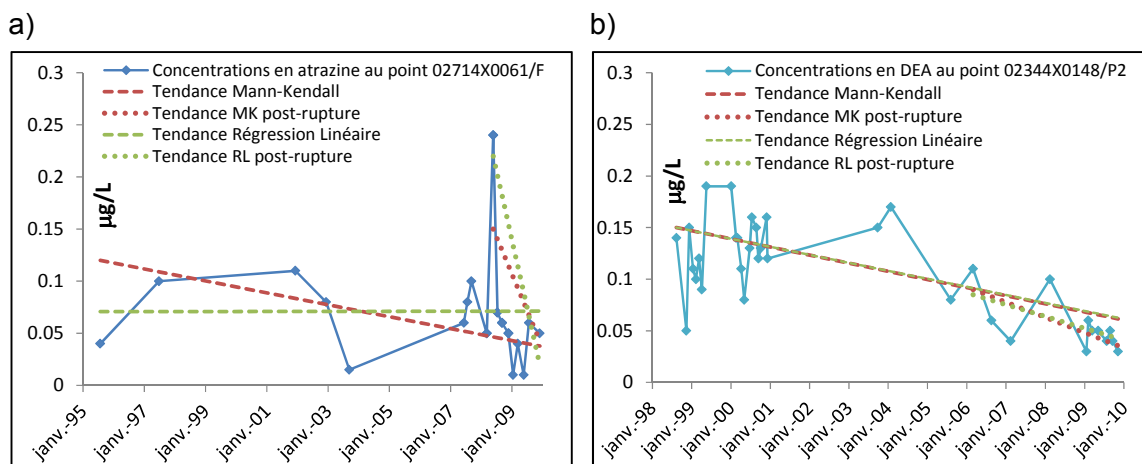


Illustration 54 : Comparaison des tendances d'évolution des concentrations en a) atrazine et b) déséthylatrazine déterminées sur deux points du bassin Rhin-Meuse par régression linéaire et test de Mann-Kendall sur la longueur totale des chroniques et après rupture de pente (CUSUM modifié).

L'illustration 54a illustre la différence des valeurs de pentes obtenues par l'application de tests paramétriques (régression linéaire) et non paramétriques (Mann-Kendall) sur une chronique à distribution des données non normale, c'est-à-dire qui ne respecte pas les conditions initiales d'application des tests paramétriques. Cette différence est significative que les tests soient réalisés sur la durée totale de la chronique ou bien seulement sur la partie après rupture (déterminée selon le test du CUSUM modifié). Dans le cas de données à distribution normale (Illustration 54b) les tests paramétriques et non paramétriques proposent des résultats similaires.

6. Bilan de l'examen des données et des tests des méthodes statistiques

6.1. EXAMEN DES DONNEES DISPONIBLES SUR LA CONTAMINATION DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN RHIN-MEUSE

Les données de concentrations en contaminants dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse ont été examinées dans le but d'estimer la potentialité d'appliquer des tests statistiques d'identification des ruptures de pente et des tendances d'évolution. Bien que les conditions initiales d'application des tests varient d'une méthode à l'autre, certaines caractéristiques des données doivent être respectées. Ces caractéristiques sont définies afin de fiabiliser les interprétations tirées des résultats statistiques.

Des tests de puissance et de robustesse de méthodes statistiques d'analyse des ruptures de pente et des tendances d'évolution ont montré l'intérêt d'émettre plusieurs postulats de base simples pour optimiser leur application sur des données de qualité des eaux souterraines (Lopez et Leynet, 2011) :

- 10 données au minimum dans les séries chronologiques
- 10 années minimum pour l'analyse des évolutions passées et des grandes tendances d'évolution
- 2 données par an minimum réparties hautes eaux/basses eaux pour l'analyse des fluctuations saisonnières

Les données de concentration en nitrate

L'analyse des données de concentration en nitrate dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse montre que sur les 5045 chroniques disponibles (66339 analyses), 1317 disposent de 10 données au moins. En théorie donc, plus d'un quart des chroniques d'évolution des concentrations en nitrate sont favorables à l'application des tests statistiques.

De plus, 38 % des chroniques des chroniques sont longues de 10 ans ou plus et ainsi favorables à l'analyse des évolutions passées. Ces chroniques couvrent aussi une période durant laquelle des changements de pratiques agroenvironnementales sont intervenues.

Les fréquences moyennes de prélèvements sur les chroniques d'évolution des concentrations en nitrate sont dans l'ensemble adaptées à une analyse des fluctuations saisonnières. En effet, 11 % des chroniques disponibles présentent des fréquences moyennes de prélèvement de 2 données par an ou plus (sans présumer de leur répartition dans l'année).

Enfin, une analyse spatialisée des tendances d'évolution des concentrations en nitrate semble envisageable sur l'ensemble du bassin. En effet, en considérant en première approche les masses d'eau comme unités spatiales de travail, il apparaît que toutes disposent d'au moins un point de prélèvement à 10 analyses au moins des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines. Toutefois, la densité de points de 10 données minimum est très variable en fonction des masses d'eau du bassin et de leurs caractéristiques hydrogéologiques : la masse d'eau 2008 qui représente près de 20 % de la surface totale du bassin ne regroupe par exemple que 5,4 % de l'ensemble des chroniques à 10 données ou plus ; alors que la masse d'eau 2001, qui représente 10 % de la surface totale du bassin, regroupe 37 % des points de prélèvement à 10 données ou plus.

Les données de concentrations en sulfate

Comme pour les nitrates, l'analyse des données de concentrations en sulfate dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse montre que sur les 5269 points de prélèvement identifiés (66339 analyses), 1581 chroniques disposent de 10 analyses ou plus. 30% environ des chroniques d'évolution des concentrations en sulfate disponibles sur le bassin sont ainsi théoriquement favorables à l'application des tests statistiques.

Il est aussi à noter que 38 % des chroniques sont longues de 10 ans ou plus, permettant d'avoir un recul non négligeable sur les évolutions passées des concentrations en sulfate.

De plus, 32 % des chroniques ont une fréquence moyenne de prélèvement de 1 analyse par an permettant d'analyser les évolutions pluriannuelles des signaux. 13 % environ des chroniques disponibles ont des fréquences moyennes de prélèvement de 2 analyses par an au moins, condition nécessaire pour l'étude des fluctuations saisonnières des concentrations en sulfate dans les eaux souterraines.

Enfin, pour une analyse spatialisée à l'échelle des masses d'eau, les données apparaissent suffisantes. Toutefois, à l'instar des nitrates, la densité de points à 10 prélèvements au moins pour l'analyse des concentrations en sulfate est variable en fonction des masses d'eau : la nappe d'Alsace, les calcaires oxfordiens et calcaires du Dogger représentent les unités à plus fortes densité de points à 10 données ou plus alors que le Plateau lorrain versant Rhin est le moins renseigné.

Les données de concentrations en substances phytosanitaires

Les caractéristiques des données de concentrations en substances phytosanitaires dans les eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse apparaissent peu favorables à l'application des tests statistiques « classiques » :

- Longueur des chroniques encore faibles pour de nombreuses substances et peu de données par chroniques (« jeunesses » des réseaux et des programmes de mesures actuels) ;
- Faibles taux de quantification et nombreuses analyses reportées inférieures à une limite de quantification ;
- Signaux à variations temporelles plus aléatoires que pour les nitrates ou les sulfates.

Seules quelques chroniques d'évolution des concentrations en atrazine et en déséthylatrazine, longues et à fortes fréquences de quantification, peuvent aujourd'hui être analysées avec les mêmes méthodes utilisées pour les chroniques d'évolution des concentrations en nitrate et en sulfate. Pour les autres substances, et en l'état actuel des suivis, d'autres méthodes alternatives doivent être développées pour qualifier à la fois l'état de contamination des eaux souterraines et les tendances d'évolution des contaminations.

6.2. RUPTURES ET TENDANCES AUX POINTS DE PRELEVEMENTS

Sur les données de concentrations en nitrate et en sulfate, les méthodes statistiques proposées peuvent être appliquées sur un nombre important de chroniques. L'exercice de recherche des tendances d'évolution récentes des contaminations peut être abordé selon deux niveaux de complexité : le premier repose sur une adaptation individuelle des tests statistiques aux caractéristiques de chaque chronique ; le second propose d'utiliser la même méthode statistique pour toutes les chroniques et donc de choisir celle qui est la plus robuste aux changements de conditions initiales d'application. Les deux niveaux de traitements sont résumés comme suit.

Dans l'idéal, adapter la méthode aux caractéristiques des données

Tout d'abord, il serait nécessaire de **vérifier de la normalité** de l'ensemble des chroniques d'évolutions des concentrations en nitrate ou en sulfate. Le test statistique de **Shapiro-Wilk** paraît alors tout à fait approprié pour cet exercice.

- Sur **les chroniques à distribution normale** des données de concentrations application des **tests statistiques paramétriques** de détermination des ruptures de pente et des tendances d'évolution. Il serait ainsi proposé :
 - **Le test de Buishand** pour identifier les ruptures de pente,
 - **La régression linéaire** sur les tronçons de chroniques « post-rupture » pour l'identification des tendances récentes
- Sur **les chroniques à distribution non normale** des données de concentrations les tests statistiques non paramétriques seraient appliqués :
 - **Le test de Pettitt** pour l'identification des ruptures de pente
 - **Le test de Mann-Kendall** sur les tronçons de chroniques « post-rupture » pour l'identification des tendances récentes.

De plus, en complément de la vérification de la normalité des données, il serait nécessaire de **vérifier la présence de cycles** répétés dans l'évolution des contaminations. **Le calcul des corrélogrammes** des chroniques permet d'identifier les cycles annuels et/ou pluriannuels qui peuvent potentiellement affecter les signaux d'évolution des contaminations en nitrate et en sulfate et biaiser les tests statistiques. Dans le cas de la présence de cycles dans les chroniques, le **test statistique de Kendall Saisonnier** serait appliqué. Cette méthode nécessite toutefois de régulariser en préalable les pas de temps des chroniques.

Le schéma de traitement ainsi proposé demande un investissement important en tri de données et codages de méthodes statistiques. Aussi, il est possible, en première approche, de simplifier l'analyse en choisissant les tests les plus robustes aux changements de conditions initiales d'application.

A minima, sans caractérisation des données

Les tests non paramétriques, s'ils sont moins puissants que les tests paramétriques appliqués sur les chroniques à distribution non normale des données, sont néanmoins plus robustes lorsqu'ils sont appliqués sur des données aux caractéristiques différentes. **En s'affranchissant du processus de caractérisation des données, il est donc proposé l'application des tests statistiques non paramétriques qui apparaissent les plus puissants :**

- **Le test statistique de Pettitt** pour l'identification des ruptures de pente,
- **Le test statistique de Mann-Kendall** sur les tronçons « post-rupture » pour estimer les tendances récentes d'évolution des contaminations.

Ce schéma de traitement « *a minima* », même s'il s'avérerait moins précis que le premier schéma proposé, permettrait d'avoir une bonne vision générale des grandes tendances d'évolution des concentrations en nitrate et en sulfate à l'échelle du bassin Rhin-Meuse.

6.3. RUPTURES ET TENDANCES SPATIALISEES

De la même manière que pour l'identification des tendances d'évolution des contaminations aux points de prélèvement, l'étude spatialisée des tendances peut être menée selon deux niveaux de complexité :

Dans l'idéal

Le schéma idéal serait de définir en préalable des unités spatiales homogènes vis-à-vis de l'évolution des contaminations. Ces unités pourraient être créées en couplant des informations à la fois d'ordre hydrogéologiques, hydrodynamiques, climatiques, agronomiques, pédologiques et toutes autres données sur des facteurs qui peuvent potentiellement impacter le transfert du polluant considéré vers les eaux souterraines.

Les données de concentrations en contaminants seraient alors agrégées à l'échelle des unités nouvellement créées selon la méthode du vecteur régional. Sur ces chroniques d'évolutions spatialisées, les méthodes de caractérisation des données déjà exposées pour l'analyse à l'échelle du point de prélèvement seraient reprises :

- Test statistique de Shapiro-Wilk pour vérifier la normalité des chroniques,
- Corrélogrammes pour rechercher des cycles éventuels.

Suivant les caractéristiques du vecteur régional, les tests appropriés seraient mis en œuvre pour identifier les ruptures de pentes dans un premier temps, et rechercher les tendances sur les tronçons post-rupture dans un second temps. Si des cycles étaient mis en évidence, les tests modifiés seraient appliqués après régularisation des pas de temps.

En complément de de ces approches, la création et la comparaison des boîtes à moustaches par unités homogène et par période des données normalisées permettraient d'aller plus loin dans l'analyse des tendances d'évolution spatialisées.

A minima et compte tenu des caractéristiques des données nitrates et sulfates du bassin Rhin-Meuse

En première approche, il serait possible de travailler à l'échelle des masses d'eau qui représentent déjà, mais seulement sur des critères hydrogéologiques, des unités homogènes.

De la même manière que précédemment, les données de concentrations seraient agrégées à l'échelle des masses d'eau selon la méthode du **vecteur régional**.

Le test non paramétrique de Pettitt appliqué sur les vecteurs régionaux permettrait d'identifier les dates de ruptures de pentes que la chronique virtuelle soit à distribution normale des données ou non.

Le test non paramétrique de Kendall-Regional appliqué sur les tronçons post-rupture des chroniques brutes et des vecteurs régionaux permettrait d'identifier de manière robuste les tendances récentes spatialisées à l'échelle des masses d'eau du bassin Rhin-Meuse.

7. Conclusion de l'étude de faisabilité

L'étude de faisabilité a permis de caractériser les données de concentrations en nitrate, sulfate et certaines substances phytosanitaires dans l'objectif d'estimer les potentialités d'application de méthodes statistiques pour l'analyse des ruptures de pentes et des tendances d'évolution de ces contaminants dans les eaux souterraines. Des tests ont été réalisés sur des jeux de données sélectionnés, représentatifs de la variété des caractéristiques des chroniques temporelles potentiellement rencontrées sur le bassin Rhin-Meuse. Ces tests ont été réalisés à l'échelle des points de prélèvements et de zones géographiques représentées par les masses d'eau.

Les résultats de l'étude montrent que les données de **concentrations en nitrate et en sulfate disponibles dans les eaux souterraines du bassin présentent des caractéristiques favorables à l'application des méthodes statistiques proposées ici**. Pour une étude plus poussée à l'échelle du bassin de ces deux paramètres, deux options sont proposées : une étude au cas par cas qui permettrait d'obtenir les résultats les plus fiables mais dont la mise en œuvre paraît plus fastidieuse (méthodes appliquées différentes suivant les points d'eau) et une approche identique pour tous les points d'eau quelles que soient les caractéristiques des chroniques. **Pour les produits phytosanitaires**, compte-tenu de la durée des chroniques et des nombreux résultats inférieurs à la limite de quantification, **ces approches semblent peu adaptées**.

L'exercice d'identification des ruptures de pente et d'évaluation des tendances pour les nitrates et les sulfates est réalisable en prenant en compte plus d'un quart des chroniques disponibles, couvrant ainsi l'ensemble des contextes rencontrés. Une étude plus poussée des tendances, et notamment des facteurs qui les expliquent, nécessiterait néanmoins l'acquisition de données supplémentaires sur les contextes géologiques, hydroclimatiques, hydrodynamiques et de pressions anthropiques. Leurs évolutions temporelles seraient aussi des informations nécessaires permettant de bien contraindre la recherche des facteurs explicatifs des tendances mises en évidence. Comprendre les causes des tendances d'évolution des concentrations en contaminants dans les eaux souterraines est en effet une condition absolument nécessaire en vue d'inverser les tendances identifiées à la hausse.

De plus, pour affiner l'identification des tendances aux points de prélèvements, un effort pourrait être fait sur l'identification des chroniques à comportement cyclique. En effet, ce travail permettrait à la fois d'appliquer des tests statistiques non biaisés par l'autocorrélation des données et de repérer les tendances « récentes » qui correspondent à l'évolution des concentrations au sein d'un cycle. Ces tendances sont en effet vouées à s'inverser à l'échéance maximale d'une demie période du cycle auxquelles elles appartiennent.

Pour les tendances spatialisées des paramètres nitrate ou sulfate, à nouveau deux options peuvent être retenues. Quelle que soit l'option retenue, un important travail de réflexion doit être mené afin de définir les secteurs sur lesquels les méthodes seront appliquées. Dans le cas présent, il a été choisi d'appliquer les tests à l'échelle de masses d'eaux. Dans d'autres cas (bassins Loire-Bretagne et Seine-Normandie), le bassin a été sectorisé en zones prenant en compte des paramètres liés aux contextes hydrogéologiques, aux comportements hydrodynamiques des aquifères, aux contextes hydroclimatiques ainsi qu'aux évolutions des pressions polluantes en entrée des systèmes. L'objectif était de définir des unités spatiales homogènes vis-à-vis du comportement du contaminant étudié, à savoir le nitrate. En ce qui concerne les phytosanitaires, si d'un point de vue théorique ces mêmes tests pourraient être appliqués, les caractéristiques actuelles des chroniques ne sont pas favorables. La caractérisation par boîtes à moustache couplé à un test statistique de comparaison entre périodes et l'examen des fréquences de quantification et de dépassement d'un seuil apparaissent comme les outils à privilégier actuellement.

8. Bibliographie

Baran N., Gourcy L., Lopez B., Bourguine B., Mardhel V. (2009) - Transfert des nitrates à l'échelle du bassin Loire-Bretagne. Phase 1 : temps de transfert et typologie des aquifères. Rapport BRGM RP-54830-FR, 105 p.

Conover W.J. (1999) – Practical Nonparametric Statistics, 3rd edition, Wiley.

Elsass P., Surdyk N. (2009) - Etude prospective de l'évolution des concentrations en phytosanitaires en nappe d'Alsace. Rapport BRGM RP-57404-FR, 73 p., 52 ill.

Frans L.M., Helsel D.R. (2005) – Evaluating regional trends in ground water nitrate concentrations of the Columbia Basin Ground Water management Area, Washington. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5078, 7 p.

Frans L. (2008) – Trends of pesticides and nitrate in ground water of the Central Columbia Plateau, Washington, 1993-2003. J. environ. Qual., 37 : 273-280.

Helsel D.R., Hirsch R.M. (1992) - Statistical method in water resources, Studies in Environmental Science 49, Elsevier, Amsterdam

Helsel D.R., Hirsch R.M. (2002) - Statistical Methods in Water Resources. Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey. Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation, Chapter A3.

Lopez B., Baran N., Bourguine B., Brugeron A., Gourcy L. et al. (2011) - Pollution diffuse des aquifères du bassin Seine-Normandie par les nitrates et les produits phytosanitaires : temps de transfert et tendances. Rapport final BRGM/RP-60402-FR ; 281 p.

Lopez B., Leynet A. (2011) - Evaluation des tendances d'évolution des concentrations en polluants dans les eaux souterraines. Revue des méthodes statistiques existantes et recommandations pour la mise en œuvre de la DCE. Rapport BRGM RP-59515-FR, 166 p.

Renard B. (2006) - Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble. Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique, Cemagref (Lyon).

Shapiro S. S., Wilk M. B. (1965) - An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, 52, 3 and 4, 591-611.

Thonnon J., Vaute L. (2010) – Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 2007. Rapport BRGM/RP-58029-FR, 106 p.

Turkey J. W. (1977) – Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley Pub., Reading MA, 506 p.

Annexe 1 :

Points de suivi des concentrations en nitrate non référencés dans ADES au 4/02/2011

Liste des points non référencés dans ADES intégrés dans la base de données initiale de l'étude de faisabilité :

- | | |
|------------------|-------------------|
| - 01143X0040/HY | - 03028X0034/VR20 |
| - 01143X0077/SCE | - 03028X0035/VR21 |
| - 01143X0078/SCE | - 03028X0036/VR17 |
| - 01144X0023/HY | - 03028X0039/VR16 |
| - 01144X0024/HY | - 03033X0025/HY |
| - 01144X0054/SCE | - 03033X0034/SCE |

Incorporation des données Fertimieux 88, Problèmes rencontrés :

03028X0017/HY : Dans ADES, les concentrations tournent autour de 20/30 mg/L, Le suivi automatique des C° fournit par l'Agence Rhin-Meuse donne des concentrations plus de 10 fois moindre (0-2 mg/L), Ces données n'ont pas été intégrées à la base de données initiale,

03031X0013/HY : Données Fertimieux intégrées dans la base de donnée initiale, Des différences de concentrations de l'ordre de +/- 5mg/L entre les analyses ponctuelles et le suivi automatique lorsque les résultats concernent la même date de prélèvement,

03028X0013/HY : données Ferti88 intégrées dans la base de données initiale, Différence de +/- 2 mg/L entre les données ADES et Fertimieux lorsque les données renseigne la même date,

03028X0018/HY1 : données Ferti88 intégrées dans la base de données initiale, Différence de +/- 2 mg/L entre les données ADES et Fertimieux lorsque les données renseigne la même date,

03028X0024/HY : données Ferti88 intégrées dans la base de données initiale, Pas de prélèvements synchrones entre les deux sources de données, Les concentrations en nitrate évoluent dans une même gamme de valeurs,

03028X0024/HY : données Ferti88 intégrées dans la base de données initiale, Pas de prélèvements synchrones entre les deux sources de données, Les concentrations en nitrate évoluent dans une même gamme de valeurs, La chronique présente de brèves variations de fortes amplitudes,

03035X0009/HY : données Ferti88 intégrées dans la base de données initiale, Pas de prélèvements synchrones entre les deux sources de données, Les concentrations en nitrate évoluent dans une même gamme de valeurs,

03028X0039/VR16 : point non référencé dans ADES, La comparaison est impossible,

Annexe 2 :

Points de prélèvement en nitrate sélectionnés
pour l'étude de faisabilité

Code BSS	Nom de l'ouvrage SISE	COMMUNE	N° masse d'eau	Nom de la masse d'eau	Cartographie occupation des sols	Dossier de travail explicatif et cartographique	Fiche descriptive de l'eau	Date min	Date max	N	Longueur Chronique (années)	fréquence prél (années ⁻¹)
01143X0037/HY	SOURCE BININGESSER	RUSTROFF	2006	Calcaires du Muschelkalk	OUI	Dossier	Fiche	05/11/1997	16/11/2010	141	13	10.7
01143X0039/HY	SOURCE BURRE 2	RUSTROFF	2006	Calcaires du Muschelkalk	NON	Dossier	Fiche	04/12/1997	16/11/2010	150	13	11.5
01143X0040/HY	SOURCE BRUCH	RUSTROFF	2006	Calcaires du Muschelkalk	NON	Dossier	Fiche	04/12/1997	16/11/2010	133	13	10.2
01143X0046/HY	SOURCE 1	MONTENACH	2006	Calcaires du Muschelkalk	NON	Dossier	Fiche	05/11/1997	16/11/2010	143	13	10.9
01143X0077/SCE	SOURCE BURRE 1	RUSTROFF	2006	Calcaires du Muschelkalk	NON	Dossier	Fiche	04/12/1997	16/11/2010	99	13.0	7.6
01143X0078/SCE	SOURCE BURRE 3	RUSTROFF	2006	Calcaires du Muschelkalk	NON	Dossier	Fiche	04/12/1997	16/11/2010	131	13.0	10.0
01144X0022/HY	SOURCE 1	KIRSCH-LES-SIERCK	2006	Calcaires du Muschelkalk	NON	Dossier	Fiche	25/08/2003	16/11/2009	3	6.2	0.3
01144X0023/HY	SOURCE 2	KIRSCH-LES-SIERCK	2006	Calcaires du Muschelkalk	NON	Dossier	Fiche	04/12/1997	16/11/2010	135	13	10.3
01144X0024/HY	SOURCE 2	MONTENACH	2006	Calcaires du Muschelkalk	NON	Dossier	Fiche	05/11/1997	16/11/2010	132	13	10.1
01144X0054/SCE	SOURCE 3	MONTENACH	2006	Calcaires du Muschelkalk	NON	Dossier	Fiche	05/11/1997	16/11/2010	133	13	10.1
01381X0055/P8	PUITS 8 ANCIENNE BROUCK	UCKANGE	2008	Plateau lorrain versant Rhin	OUI	Dossier	Fiche	09/09/1999	30/09/2003	4	4.1	0.7
01627X0014/HY	SOURCE DU FAYET	DOMMARTIN-LA-MONTAGNE	2013	Calcaires oxfordiens	OUI	Dossier	Fiche	31/07/1996	20/11/2009	45	13.3	3.3
01627X0094/SCE	SOURCE DE LAVAUX	DOMMARTIN-LA-MONTAGNE	2013	Calcaires oxfordiens	OUI	Dossier	Fiche	31/07/1996	20/11/2009	40	13.3	2.9
01641X0156/P1								23/01/1989	31/01/1991	94	2	46
01641X0157/P2								23/01/1989	31/01/1991	97	2	47.5
01641X0158/P3								23/01/1989	31/01/1991	97	2	47.5
01641X0159/P4								23/01/1989	31/01/1991	96	2	47
02313X0042/HY	SOURCE DE LOGEATTE	JUVELIZE	2008	Plateau lorrain versant Rhin	OUI	Dossier	Fiche	26/10/1999	20/11/2009	15	10.1	1.4
02341X0024/F4	FORAGE 4 DE MOMMENHEIM	MOMMENHEIM	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace	OUI	Dossier	Fiche	01/08/1983	08/04/2009	17	25.7	0.6

Code BSS	Nom de l'ouvrage SBE	COMMUNE	N° masse d'eau	Nom de la masse d'eau	Cartographie occupation des sols	Dossier de travail explicatif et cartographique de l'aire	Fiche descriptive de l'aire	Date min	Date max	N	Longueur Chronique (années)	fréquence prel (années-1)
02341X0046/F6	FORAGE 6 DE MOMMENHEIM	MOMMENHEIM	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace	OUI	Dossier	Fiche	01/08/1983	06/11/2009	25	26.3	0.9
02673X0017/HY	SOURCE DU FRENE	GERMINY	2010	Calcaires du Dogger des côtes de Moselle	OUI	Dossier	Fiche	27/03/1997	25/09/2009	10	12.5	0.7
02684X0018/HY	CAPTAGE DE REHAINVILLER (N°1)	REHAINVILLER	2008	Plateau lorrain versant Rhin	OUI	Dossier	Fiche	06/10/1997	18/11/2009	14	12.1	1.1
02722X0019/F								06/01/1950	09/06/2008	525	58.4	9
03028X0021/HY								23/06/1988	14/10/2009	337	21.3	15.8
03031X0013/HY								15/09/1988	29/07/2009	449	20.9	21.5
03032X0006/HY	SCE DE LA MORLEY	SONCOURT	2011	Calcaires du Dogger du plateau de Haye	OUI	Dossier	Fiche	13/12/1988	10/11/2010	490	21.9	22.3
03033X0005/HY								13/12/1988	10/11/2010	473	21.9	21.5
03033X0013/HY	SCE LAVEAU HAUT	VICHEREY	2011	Calcaires du Dogger du plateau de Haye	OUI	Dossier	Fiche	13/12/1988	10/11/2010	475	21.9	21.6
03033X0014/HY	SCE LAVEAU BAS	VICHEREY	2011	Calcaires du Dogger du plateau de Haye	OUI	Dossier	Fiche	13/12/1988	10/11/2010	466	21.9	21.2
03033X0015/HY	SCE DUREAU GROSSE	VICHEREY	2011	Calcaires du Dogger du plateau de Haye	OUI	Dossier	Fiche	13/12/1988	10/11/2010	464	21.9	21.1
03033X0016/HY		VICHEREY	2011	Calcaires du Dogger du plateau de Haye	OUI	Dossier	Fiche	13/12/1988	10/11/2010	464	21.9	21.1
03033X0017/HY								17/12/1991	10/11/2010	467	18.9	24.7
03033X0019/HY								17/12/1991	10/11/2010	414	18.9	21.9
03033X0020/HY								17/12/1991	10/11/2010	408	18.9	21.5
03033X0021/HY								17/12/1991	10/11/2010	435	18.9	23
03033X0023/HY								17/12/1991	10/12/2009	454	18	25.2
03033X0024/HY	SOURCE DE MALIN VEZEY	BEUVEZIN	2011	Calcaires du Dogger du plateau de Haye	OUI	Dossier	Fiche	17/12/1991	10/11/2010	477	18.9	25.2
03034X0008/HY	SOURCE LA VIGNOTTE	THEY-SOUS-VAUDEMONT	2008	Plateau lorrain versant Rhin	OUI	Dossier	Fiche	07/02/1997	25/06/2008	10	11.4	0.8

Etude de faisabilité d'estimation des tendances sur le bassin Rhin-Meuse

Code BSS	Nom de l'ouvrage SISE	COMMUNE	N° masse d'eau	Nom de la masse d'eau	Cartographie occupation des sols	Dossier de travail explicatif et cartographique de l'aire	Fiche descriptive de l'aire	Date min	Date max	N	Longueur Chronique (années)	fréquence prel (années-1)
03074X0002/F	FORAGE DE ZELLWILLER	ZELLWILLER	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace	OUI	Dossier	Fiche	01/08/1983	27/11/2009	87	26.3	3.3
03074X0005/F	FORAGE D'EPFIG SDE BERNSTEIN	EPFIG	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace	OUI sur document à part	Dossier	Fiche	01/08/1983	11/12/2009	52	26.4	1.9
03077X0009/P2	F1 DAMBACH SDE BERNSTEIN	DAMBACH-LA-VILLE	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace	OUI	Dossier	Fiche	01/08/1983	27/11/2009	44	26.3	1.6
03077X0010/P1	F2 DAMBACH SDE BERNSTEIN	DAMBACH-LA-VILLE	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace	OUI	Dossier	Fiche	01/08/1983	22/08/2003	36	20.1	1.7
03077X0020/F	FORAGE DE KINTZHEIM	SELESTAT	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace	OUI sur document à part	Dossier	Fiche	01/08/1983	04/03/2008	58	24.6	2.3
03427X0001/F1								11/12/1956	29/09/2009	371	52.8	7
04134X0018/P1 3								03/10/1975	01/12/2008	408	33.2	12.3
04134X0136/PN 4								03/10/1975	01/12/2008	408	33.2	12.3

Annexe 3 :**Points de prélèvement en sulfate sélectionnés pour l'étude de faisabilité**

La liste des stations sélectionnées est présentée ci-dessous (indice BFL).

Réservoir	Code BSS	Indice BFL	Nom	Type d'ouvrage
Sud	01374X0234/TUNNEL	S5	Galerie du tunnel de Moyeuivre	Point de débordement
Sud	01374X0234/G	S4	Galerie du chenal de Moyeuivre	Point de débordement
Sud	01377X0212/M02	S15	Pz-M2 Paradis aval	Piézomètre implanté dans Dogger
Centre	01372X0197/EX	C5	Galerie du Woigot	Point de débordement
Centre	01373X0176/PREL	C21	Station du Conroy	Point de débordement
Centre	01373X0132/P01	C11	Pz-P1 St-Pierremont	Piézomètre implanté dans Dogger
Nord	01138X0184/G14BIS	N14BIS	Galerie de la paix	Point de débordement
Nord	01137X0175/PTS-5	N5	Cheminée Sud Grise	Puits minier
Nord	01133X0052/P1	N9	Puits de Bure	Puits minier
Nord	01137X0173/PZ-12	N12	Pz. Cheminée Sud Dogger inf.	Piézomètre implanté dans Dogger
Burbach	01138X0172/BURBAC	Bu1	Galerie de Burbach	Point de débordement

Annexe 4 :**Points de prélèvement en phytosanitaires
sélectionnés pour l'étude de faisabilité****a) Les points de suivi en atrazine**

Code BSS	Date Min	N prélèvements	N Quant i	Valeur r Max	FQ %	Longueur (an)	Nom de l'ouvrage SISE	COMMUNE	Code MESO	Nom MESO
02341X0046F6	01/01/1992	21	21	0.67	100.0 %	17.8	FORAGE 6 DE MOMMENHEIM	MOMMENHEIM	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace
02343X0023F3	22/06/1992	26	25	0.13	96.2 %	17.4	FORAGE 3 EST DE BIETLENHEIM	BIETLENHEIM	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace
03074X0002F	15/06/1994	49	40	0.15	81.6 %	15.5	FORAGE DE ZELLWILLER	ZELLWILLER	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace
01944X0002F	18/01/1999	34	28	0.124	82.4 %	10.8	FORAGE FONTENY	FONTENY	2008	Plateau lorrain versant Rhin
00888X0052HY	04/10/1993	16	16	0.224	100.0 %	15.9	SOURCE DES JONQUETTES	MONTMEDY	2009	Calcaires du Dogger des côtes de Meuse ardennaises
03032X0006HY	27/03/2000	14	13	0.76	92.9 %	9.6	SCE DE LA MORLEY	SONCOURT	2011	Calcaires du Dogger du plateau de Haye
03032X0012HY	22/07/2004	25	23	0.09	92.0 %	5.3	FONTAINE PRES STATION	TRAMONT- SAINT-ANDRE	2011	Calcaires du Dogger du plateau de Haye
03033X0017HY	26/05/1999	10	9	0.187	90.0 %	8.5	SOURCE N°1	BEUVEZIN	2011	Calcaires du Dogger du plateau de Haye
00876X0011S1	20/04/1999	66	62	0.32	93.9 %	10.6		TANNAY	2013	Calcaires oxfordiens
01116X0086HY	15/12/1987	12	10	0.19	83.3 %	21.9	SOURCE DES VIEILLES FONTAINES	DUN-SUR- MEUSE	2013	Calcaires oxfordiens
01627X0014HY	27/08/1996	15	14	0.235	93.3 %	13.2	SOURCE DU FAYET	DOMMARTIN- LA- MONTAGNE	2013	Calcaires oxfordiens
01927X0005HY	11/12/1996	12	11	0.11	91.7 %	12.9	SOURCE BOIS LE JURA	APREMONT- LA-FORET	2013	Calcaires oxfordiens
02714X0061F3	25/07/1995	23	20	0.24	87.0 %	14.3	F.MUTZIG STIERKOPF 3 (S351)	MUTZIG	2027	Champ de fractures de Saverne

b) Les points de suivi en déséthylatrazine

Code BSS	Date Min	N prélèvements	N Quant	Valeur Max	FQ	Longueur (an)	Nom de l'ouvrage SISE	COMMUNE	Code MESO	Nom MESO
02341X0046F6	12/06/1998	11	11	0.32	100.00%	11.4	FORAGE 6 DE MOMMENHEIM	MOMMENHEIM	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace
02344X0020F	15/09/1997	30	30	0.18	100.00%	11.9	FORAGE P1 DE HERRLISHEIM	HERRLISHEIM	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace
02344X0148P2	12/08/1998	35	35	0.19	100.00%	11.2	FORAGE P2 DE HERRLISHEIM	HERRLISHEIM	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace
03074X0002F	01/07/1997	47	42	0.24	89.40%	12.4	FORAGE DE ZELLWILLER	ZELLWILLER	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace
03082X0001F	17/09/1997	31	28	0.12	90.30%	12.2	FORAGE DE GERSTHEIM	GERSTHEIM	2001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace
04451X0148F	26/08/2003	10	10	0.193	100.00%	6.2	CAPTAGE FORAGE SYNDICAL	TAGOLSHEIM	2002	Sundgau versant Rhin et Jura alsacien
00888X0052HY	26/10/1998	14	13	0.435	92.90%	10.9	SOURCE DES JONQUETTES	MONTMEDY	2009	Calcaires du Dogger des côtes de Meuse ardennaises
03032X0006HY	13/09/2007	10	10	0.2	100.00%	2.2	SCE DE LA MORLEY	SONCOURT	2011	Calcaires du Dogger du plateau de Haye
03032X0012HY	22/07/2004	25	25	0.34	100.00%	5.3	FONTAINE PRES STATION	TRAMONT-SAINTE-ANDRE	2011	Calcaires du Dogger du plateau de Haye
00876X0011S1	20/04/1999	66	62	1.58	93.90%	10.6		TANNAY	2013	Calcaires oxfordiens
01116X0086HY	07/07/2000	10	10	0.3	100.00%	9.4	SOURCE DES VIEILLES FONTAINES	DUN-SUR-MEUSE	2013	Calcaires oxfordiens
01627X0014HY	14/04/2000	14	13	1.542	92.90%	9.6	SOURCE DU FAYET	DOMMARTIN-LA-MONTAGNE	2013	Calcaires oxfordiens
01927X0005HY	13/09/2000	11	10	0.35	90.90%	9.2	SOURCE BOIS LE JURA	APREMONT-LA-FORET	2013	Calcaires oxfordiens
02714X0061F3	25/06/1997	22	19	0.23	86.40%	12.4	F.MUTZIG STIERKOPF 3 (S351)	MUTZIG	2027	Champ de fractures de Saverne

c) Les points de suivi en métolachlore

Code_BSS	Date_Min	Date_Max	N_prélev em	N_Qu anti	Valeur_Max	FQ	EU_CD	NAME
03385X0003/F	20/04/1999	13/05/2009	14	2	0.07	14.3%	FRB1G007	Plateau lorrain versant Meuse
03374X0003/P	20/04/1999	23/09/2009	29	1	0.03	3.4%	FRB1G007	Plateau lorrain versant Meuse
00878X0019/SAEP	29/04/1999	25/11/2009	67	1	0.08	1.5%	FRB1G009	Calcaires du Dogger des côtes de Meuse ardennaises
00684X0011/SAEP	27/04/1999	26/05/2009	25	1	0.17	4.0%	FRB1G018	Grès du Lias inférieur d'Hettange Luxembourg
03074X0002/F	26/04/1999	27/11/2009	35	1	0.04	2.9%	FRCG001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace
03788X0067/F	22/04/1999	11/12/2009	29	20	0.16	69.0%	FRCG001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace
01991X0079/F	29/04/1999	17/09/2009	27	16	1.89	59.3%	FRCG001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace
01141X0015/F	30/04/1999	22/10/2009	15	3	0.07	20.0%	FRCG008	Plateau lorrain versant Rhin
02296X0021/HY	26/04/1999	20/11/2009	66	1	0.03	1.5%	FRCG010	Calcaires du Dogger des côtes de Moselle
01374X0017/HY	29/04/1999	17/11/2009	67	1	0.05	1.5%	FRCG010	Calcaires du Dogger des côtes de Moselle
02686X0047/P	19/04/1999	10/03/2005	19	1	0.01	5.3%	FRCG017	Alluvions de la Meurthe et de la Moselle en amont de la confluence avec la Meurthe
02697X0035/F2	29/04/1999	12/05/2009	15	1	0.29	6.7%	FRCG024	Argiles du Muschelkalk

d) Les points de suivi en glyphosate

Code_BSS	Date_Min	Date_Max	N_prélev em	N_Qu anti	Valeur_Max	FQ	EU_CD	NAME
01625X0078/SCE	03/03/2004	18/11/2009	33	3	0.26	9.1%	FRB1G013	Calcaires oxfordiens
02664X0005/F1	02/03/2004	18/11/2009	27	1	0.1	3.7%	FRB1G015	Alluvions de la Meuse, de la Chiers, et de la Bar
03077X0007/P1	05/04/2004	16/09/2009	15	1	0.6	6.7%	FRCG001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace
03424X0084/F	04/03/2004	21/09/2009	16	1	0.14	6.3%	FRCG001	Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace
03064X0029/HY	04/03/2004	28/09/2009	17	1	0.95	5.9%	FRCG004	Grès vosgien en partie libre
01652X0127/F3	04/03/2004	28/05/2009	13	1	0.19	7.7%	FRCG006	Calcaires du Muschelkalk
03042X0018/F	02/03/2004	13/05/2009	11	1	0.14	9.1%	FRCG008	Plateau lorrain versant Rhin
01636X0036/F	17/03/2004	20/11/2009	34	1	0.6	2.9%	FRCG010	Calcaires du Dogger des côtes de Moselle
02672X0035/F	05/03/2004	25/09/2009	34	1	0.1	2.9%	FRCG010	Calcaires du Dogger des côtes de Moselle
02684X0044/P2	21/10/2003	15/09/2009	14	1	1.4	7.1%	FRCG017	Alluvions de la Meurthe et de la Moselle en amont de la confluence avec la Meurthe
02337X0114/P4	09/09/2003	14/09/2009	14	1	0.6	7.1%	FRCG027	Champ de fractures de Saverne
02714X0061/F3	10/09/2003	27/11/2009	18	1	14	5.6%	FRCG027	Champ de fractures de Saverne

Annexe 5 :

Résultats d'identification des ruptures de pente des chroniques nitrate et sulfate sélectionnées par l'application des tests de Buishand, Pettitt et du CUSUM modifié

a) Chroniques d'évolution des concentrations en nitrate

INDC	Normalité_W	Pval_Buishand	Date_Buishand	Pval_Pettitt	Date_Pettitt	Test de CUSUM
01143X0037/HY	NON	0.0001	21/02/2001	0.0001	21/02/2001	01/04/2001
01143X0039/HY	NON	0.0018	07/11/2000	0.0006	07/11/2000	01/04/2001
01143X0040/HY	NON	0.0001	20/09/2001	0.0001	21/11/2003	01/11/2003
01143X0046/HY	NON	0.1277		0.2093		01/08/2002
01143X0077/SCE	NON	0.0001	23/05/2000	0.0001	23/05/2000	01/05/2004
01143X0078/SCE	OUI	0.0006	23/05/2000	0.0014	23/05/2000	01/05/2001
01144X0022/HY	NA	NA	NA	NA	NA	01/07/2009
01144X0023/HY	NON	0.0001	19/05/2006	0.0001	19/05/2006	01/04/2006
01144X0024/HY	OUI	0.0001	24/02/2006	0.0001	24/02/2006	01/01/2006
01144X0054/SCE	OUI	0.0001	24/02/2006	0.0001	24/02/2006	01/01/2006
01381X0055/P8	OUI	0.0001	26/09/2001	0.3416		01/09/2001
01627X0014/HY	OUI	0.0001	23/12/2003	0.0001	23/12/2004	01/12/2003
01627X0094/SCE	OUI	0.0078	23/12/2004	0.0031	23/12/2004	01/12/2004
01641X0156/P1	NON	0.0037	16/05/1989	0.0021	26/07/1990	01/06/1990
01641X0157/P2	NON	0.0001	16/05/1989	0.0561		01/05/1989
01641X0158/P3	NON	0.0001	14/02/1990	0.0001	14/02/1990	01/02/1990
01641X0159/P4	NON	0.0008	21/06/1989	0.0076	31/07/1989	01/07/1989
01938X0151/SCE6	OUI	0.5010		0.4926		01/09/2009
02313X0042/HY	OUI	0.0028	20/01/2009	0.0025	11/03/2004	01/01/2009
02341X0024/F4	OUI	0.0011	22/05/2001	0.0041	22/05/2001	01/05/2001
02341X0046/F6	NON	0.0001	20/02/2003	0.0001	20/02/2003	01/06/2007
02673X0017/HY	NON	0.5606		0.6201		01/08/2003
02684X0018/HY	OUI	0.9370		0.3600		01/11/2001
02722X0019/F	NON	0.0001	29/06/1979	0.0001	21/03/1986	01/12/1987
03024X0024/D	NON	0.0034	02/09/2002	0.0024	01/07/2003	01/09/2002
03028X0013/HY	NON	0.0001	18/08/2004	0.0001	18/08/2004	01/08/2004
03028X0021/HY	NON	0.0006	20/12/2005	0.0001	20/12/2005	01/04/2001
03031X0013/HY	NON	0.0001	03/11/2003	0.0001	03/11/2003	01/11/2003
03032X0006/HY	NON	0.0001	15/03/2006	0.0001	15/03/2006	01/03/2006
03033X0005/HY	NON	0.0001	16/06/1999	0.0001	02/11/2000	01/06/1999
03033X0013/HY	NON	0.0001	15/03/2006	0.0001	15/03/2006	01/02/2006
03033X0014/HY	OUI	0.0001	15/02/2006	0.0001	29/03/2006	01/02/2006
03033X0015/HY	NON	0.0001	12/04/2006	0.0001	12/04/2006	01/03/2006
03033X0016/HY	OUI	0.0001	29/03/2006	0.0001	29/03/2006	01/03/2006
03033X0017/HY	NON	0.0001	15/11/2000	0.0001	15/11/2000	01/03/2006
03033X0019/HY	NON	0.0001	17/10/2000	0.0001	17/10/2000	01/05/2001
03033X0020/HY	NON	0.0001	21/09/2000	0.0001	07/03/2001	01/06/1999
03033X0021/HY	NON	0.0001	20/11/1996	0.0001	20/11/1996	01/10/2000
03033X0023/HY	NON	0.0001	29/09/2004	0.0001	29/09/2004	01/09/2004
03033X0024/HY	NON	0.0001	02/11/2000	0.0001	02/11/2000	01/11/2000

INDC	Normalité_W	Pval_Buishand	Date_Buishand	Pval_Pettitt	Date_Pettitt	Test de CUSUM
03034X0008/HY	OUI	0.0103	26/05/1999	0.0001	21/05/2001	01/05/1999
03074X0002/F	NON	0.0001	06/09/2004	0.0001	06/09/2004	01/03/2004
03074X0005/F	OUI	0.0001	17/09/1998	0.0001	17/09/1998	01/01/2009
03077X0009/P2	OUI	0.0045	12/08/1998	0.0048	15/03/2001	01/06/1998
03077X0010/P1	OUI	0.0001	22/09/1997	0.0003	22/09/1997	01/03/2001
03077X0020/F	OUI	0.0017	01/07/1998	0.0011	01/07/1998	01/07/1998
03372X0031/SAEPI3	NON	0.2213		0.4368		01/01/2007
03376X0014/SAEP1	OUI	0.0001	03/11/2003	0.0001	03/11/2003	01/09/2004
03427X0001/F1	NON	0.0001	07/10/1997	0.0001	15/07/1998	01/01/2007
04134X0018/P13	NON	0.0001	15/06/1998	0.0001	15/06/1998	01/06/1998
04134X0136/PN4	NON	0.0001	15/06/1994	0.0001	15/06/1994	01/06/1994

b) Chroniques d'évolution des concentrations en sulfate

INDC	Normalité_W	Pval_Buishand	Date_Buishand	Pval_Pettitt	Date_Pettitt	Test de CUSUM
01133X0052/P1	NON	0.0001	06/06/2007	0.0001	06/06/2007	01/01/2007
01137X0173/PZ-12	OUI	0.0191	03/06/2009	0.0517		01/06/2009
01137X0175/PTS-5	OUI	0.0009	20/03/2008	0.0006	20/03/2008	01/03/2008
01138X0172/BURBAC	NON	0.0001	28/02/2006	0.0001	28/12/2006	01/02/2006
01138X0184/G14BIS	NON	0.0003	30/06/2009	0.0003	30/06/2009	01/06/2009
01372X0197/EX	NON	0.0045	26/02/2007	0.0025	27/11/2006	01/02/2007
01373X0132/P01	OUI	0.0008	22/03/2002	0.0002	22/03/2002	01/10/2005
01373X0176/PREL	NON	0.5556		0.0751		01/02/2010
01374X0234/TUNNEL	NON	0.0001	28/02/2005	0.0001	28/12/2005	01/02/2005
01377X0212/M02	OUI	0.0001	26/09/2001	0.0001	26/09/2001	01/12/2000

Annexe 6 :**Comparaison sur la durée totale des chroniques nitrate et sulfate des pentes des tendances identifiées selon la régression linéaire et le test de Mann-Kendall.****a) Chroniques d'évolution des concentrations en nitrate**

INDC BSS	Nb_Mes	Date min	Date Max	Pente MK (mg/L/an)	Pente RL (mg/L/an)	RhoLin	Dif. %	Pentes
01143X0037/HY	141	05/11/1997	16/11/2010	0.768	0.863	0.535		12%
01143X0039/HY	150	04/12/1997	16/11/2010		0.185	0.145		
01143X0040/HY	133	04/12/1997	16/11/2010	0.612	0.597	0.665		2%
01143X0046/HY	143	05/11/1997	16/11/2010			-0.039		
01143X0077/SCE	99	04/12/1997	16/11/2010	0.348	0.567	0.406		63%
01143X0078/SCE	131	04/12/1997	16/11/2010			0.040		
01144X0022/HY	3	25/08/2003	17/11/2009		0.081	0.930		
01144X0023/HY	135	04/12/1997	16/11/2010	1.038	1.021	0.745		2%
01144X0024/HY	132	05/11/1997	16/11/2010	-0.548	-0.371	-0.255		32%
01144X0054/SCE	133	05/11/1997	16/11/2010	-0.525	-0.310	-0.208		41%
01381X0055/P8	4	09/09/1999	30/09/2003		10.289	0.783		
01627X0014/HY	45	31/07/1996	20/11/2009	1.018	1.122	0.647		10%
01627X0094/SCE	40	31/07/1996	20/11/2009	0.689	0.722	0.429		5%
01641X0156/P1	94	23/01/1989	31/01/1991	-0.419	-2.025	-0.337		383%
01641X0157/P2	97	24/01/1989	31/01/1991		-1.460	-0.251		
01641X0158/P3	97	24/01/1989	31/01/1991		-0.506	-0.218		
01641X0159/P4	96	24/01/1989	31/01/1991	-0.277	-0.940	-0.245		240%
01938X0151/SCE6	6	23/01/2009	17/11/2009		7.791	0.449		
02313X0042/HY	15	27/10/1999	20/11/2009	1.014	0.870	0.829		14%
02341X0024/F4	17	01/08/1983	08/04/2009	2.410	1.592	0.658		34%
02341X0046/F6	25	01/08/1983	06/11/2009	2.551	2.388	0.902		6%
02673X0017/HY	10	27/03/1997	25/09/2009		0.171	0.191		
02684X0018/HY	14	06/10/1997	19/11/2009			-0.055		
02722X0019/F	525	06/01/1950	09/06/2008	0.062	0.127	0.461		105%
03024X0024/D	76	04/06/1981	20/11/2009	0.264	0.219	0.259		17%
03028X0013/HY	395	21/07/1981	19/11/2009	0.182	0.194	0.183		7%
03028X0021/HY	337	23/06/1988	14/10/2009		0.197	0.105		
03031X0013/HY	449	15/09/1988	29/07/2009			-0.003		
03032X0006/HY	490	13/12/1988	10/11/2010	0.524	0.545	0.444		4%
03033X0005/HY	473	13/12/1988	10/11/2010	-1.450	-1.481	-0.863		2%
03033X0013/HY	475	13/12/1988	10/11/2010			0.073		
03033X0014/HY	466	13/12/1988	10/11/2010			-0.011		
03033X0015/HY	464	13/12/1988	10/11/2010	0.092	0.088	0.106		5%
03033X0016/HY	464	13/12/1988	10/11/2010	0.088	0.097	0.109		11%
03033X0017/HY	467	17/12/1991	10/11/2010	-0.644	-0.594	-0.505		8%
03033X0019/HY	414	17/12/1991	10/11/2010	-1.262	-1.183	-0.832		6%

INDC BSS	Nb_Mes	Date min	Date Max	Pente MK (mg/L/an)	Pente RL (mg/L/an)	RhoLin	Dif. Pentes %
03033X0020/HY	408	17/12/1991	10/11/2010	-1.315	-1.331	-0.850	1%
03033X0021/HY	435	17/12/1991	10/11/2010	-0.990	-0.950	-0.649	4%
03033X0023/HY	454	17/12/1991	10/12/2009			0.062	
03033X0024/HY	477	17/12/1991	10/11/2010	-0.723	-0.630	-0.404	13%
03034X0008/HY	10	07/02/1997	25/06/2008		2.819	0.665	
03074X0002/F	87	01/08/1983	27/11/2009	-0.204	-0.428	-0.227	110%
03074X0005/F	52	01/08/1983	12/12/2009	1.488	1.404	0.956	6%
03077X0009/P2	44	01/08/1983	27/11/2009	0.781	0.760	0.507	3%
03077X0010/P1	36	01/08/1983	22/08/2003	1.822	1.117	0.509	39%
03077X0020/F	58	01/08/1983	04/03/2008	0.269	0.216	0.173	20%
03372X0031/SAEPI	59	29/04/1999	20/11/2009			-0.008	
03376X0014/SAEP1	66	29/04/1999	20/11/2009	2.355	2.612	0.663	11%
03427X0001/F1	371	11/12/1956	29/09/2009	0.521	0.491	0.966	6%
04134X0018/P13	408	03/10/1975	01/12/2008	-0.446	-0.398	-0.472	11%
04134X0136/PN4	408	03/10/1975	01/12/2008	0.711	0.878	0.516	24%

b) Chroniques d'évolution des concentrations en sulfate

INDC BSS	Nb_Mes	Date min	Date Max	Pente MK (mg/L/an)	Pente RL (mg/L/an)	RhoLin	Dif. Pentes %
01133X0052/P1	23	11/10/1999	30/06/2010	168.76	175.24	0.83	4%
01137X0173/PZ-12	16	19/09/2006	29/06/2010		-18.69	-0.45	
01137X0175/PTS-5	15	19/09/2006	30/06/2010	-419.94	-462.82	-0.70	10%
01138X0172/BURBA	94	23/06/1999	24/02/2011	-14.78	-26.49	-0.63	79%
01138X0184/G14BI	48	18/09/2006	24/02/2011	-80.19	-43.35	-0.25	46%
01372X0197/EX	95	24/03/1999	24/02/2011	39.97	43.48	0.31	9%
01373X0132/P01	25	08/03/1999	01/10/2010	-1.55	-1.71	-0.78	10%
01373X0176/PREL	33	27/06/2008	24/02/2011		-19.65	-0.14	
01374X0234/TUNNE	127	29/10/1998	24/02/2011	-77.13	-81.08	-0.95	5%
01377X0212/M02	24	10/02/1999	30/09/2010	-58.71	-53.56	-0.89	9%



**Centre scientifique et technique
Service MMA**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34