



Geo³-Hydrogéologie – UR Urban & Environmental Engineering
(Département d'Architecture, Géologie, Environnement &
Constructions)
Université de Liège

Convention IBGE et HGE-ULg

**Mise en évidence des concentrations géochimiques de
référence dans les nappes phréatiques tertiaires et du Socle
en zone d'alimentation**

Rapport final

Juillet 2019

Coordinateur du projet :

Dr. ir. Serge Brouyère

Partenaires scientifiques :

ULg-HGE : Caroline Thomas, Dr. ir. Philippe Orban

Rédaction : Caroline Thomas, Philippe Orban, Serge Brouyère

Résumé

L'objectif de cette étude est de définir la concentration de référence de certains paramètres chimiques présents naturellement dans les masses d'eau souterraine du Socle en zone d'alimentation (BR02), de l'Yprésien (région des collines) (BR04) et du Bruxellien (BR05) en Région de Bruxelles-Capitale. Pour ce faire les méthodologies des projets européens FP6 BRIDGE (Müller, 2006), et BaSeLiNe (Edmunds and Shand, 2008) ainsi que la note de guidance 18 (European Commission, 2009) ont été appliquées.

Peu de stations d'échantillonnage sont présentes dans les masses d'eau BR02 et BR04 (5 et 4) contrairement à la masse d'eau BR05 (51). Des données supplémentaires provenant des masses d'eau souterraine voisines en Région wallonne et en Région flamande ont été ajoutées pour étoffer le jeu de données et replacer les masses d'eau souterraine étudiées dans leur contexte hydrogéologique et hydrochimique régional. La qualité des données a ensuite été examinée grâce au calcul de la balance ionique, l'analyse des limites de quantification et l'analyse de la présence de polluants permettant d'exclure certaines stations du jeu de données. Pour comprendre les processus influençant la composition géochimique des eaux souterraines de chaque masse d'eau, plusieurs outils ont été utilisés (diagramme de Piper, étude de l'évolution spatiale et temporelle des concentrations, rapport Na/Cl et indices de saturations de la calcite, la halite et le gypse pour comprendre l'origine de la salinité, étude des valeurs atypiques, matrice de corrélations, analyse multivariée). Sur base de l'ensemble de ces analyses, plusieurs stations d'échantillonnage ont été sélectionnées pour le calcul des concentrations de référence/fond de chaque masse d'eau. La concentration de référence/fond a été calculée comme le P90 des échantillons sélectionnés.

Pour l'aquifère du Socle, 8 stations ont été sectionnées en Région de Bruxelles-Capitale et en Région Flamande pour le calcul des concentrations de référence. Ces stations ne présentent pas ou très peu de contamination, les concentrations qui y sont mesurées peuvent donc être considérées comme naturelles.

Pour l'aquifère de l'Yprésien, 7 stations d'échantillonnage ont été sélectionnées en Région de Bruxelles Capitale et en Région flamande. Pour cette masse d'eau, il n'a pas été possible de sélectionner des sites non impactés par une contamination anthropique. Les percentiles 90 qui ont été calculés pour cette masse d'eau correspondent donc à des concentrations de fond plutôt qu'à des concentrations de référence.

Pour l'aquifère du Bruxellien, même s'il est fortement impacté par des contaminations anthropiques, certaines zones de la nappe libre ont néanmoins été identifiées comme peu ou pas contaminés (forêt de Soignes et certains sites au nord de la zone libre en Région flamande). 17 sites non impactés, présentant des concentrations supposées naturelles ont pu être sélectionnées en Région de Bruxelles Capitale pour le calcul des concentrations de référence.

Suite à l'analyse des données disponibles, des recommandations ont également été émises en vue d'améliorer la qualité du jeu de données disponibles et donc l'estimation des concentrations de référence.

Samenvatting

Het doel van deze studie is het bepalen van de natuurlijke achtergrondniveaus in de grondwaterlichamen van de Sokkel voedingsgebied (BR02), het Ieperiaan heuvelstreek (BR04) en de Brusseliaan zand (BR05) in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. Daartoe werden de methodologieën van de Europese FP6 BRIGDE (Müller, 2006) en BaSeLiNe (Edmunds en Shand, 2008) projecten en de richtlijnen van nota 18 (Europese Commissie, 2009) toegepast.

In de BR02 en BR04 grondwaterlichamen, zijn weinig meetstations aanwezig (5 en 4), in tegenstelling tot de BR05 (51). Aanvullende gegevens van naburige grondwaterlichamen in het Waalse en Vlaamse Gewest werden ook toegevoegd om de dataset aan te vullen en de bestudeerde grondwaterlichamen in hun regionale hydrogeologische en hydrochemische context te plaatsen. De kwaliteit van de gegevens werd vervolgens onderzocht door middel van de berekening van de ionenbalans, de analyse van de rapporteringsgrens en de analyse van de aanwezigheid van verontreinigingsstoffen om bepaalde meetstations uit te sluiten van de gegevensverzameling. Om de processen te begrijpen die de geochemische samenstelling van het grondwater in elk waterlichaam beïnvloeden, werden verschillende instrumenten gebruikt (Piper-diagram, studie van ruimtelijke en temporele veranderingen in concentraties, Na/Cl-verhouding en verzadigingsindexen van calciet, haliet en gips om de oorsprong van het zoutgehalte te begrijpen, studie van atypische waarden, correlatie matrix, multivariate analyse). Op basis van al deze analyses werden verschillende meetstations geselecteerd voor de berekening van de (natuurlijke) achtergrondniveaus van elk grondwaterlichaam. De achtergrondniveaus werd berekend als P90 van de geselecteerde meetstations.

Voor de Sokkel aquifer werden 8 meetstations in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest en het Vlaams Gewest verdeeld voor de berekening van de achtergrondniveaus. Deze stations hebben weinig of geen verontreiniging, zodat de gemeten concentraties bij deze stations als natuurlijk kunnen worden beschouwd.

Voor het Ieperiaan aquifer laag werden 7 bemonsteringsstations geselecteerd in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest en het Vlaams Gewest. Voor dit grondwaterlichaam was het niet mogelijk om meetstations te selecteren die niet door antropogene besmetting werden beïnvloed. De 90 percentielen die voor dit grondwaterlichaam zijn berekend, komen dus eerder overeen met achtergrondniveaus dan met natuurlijke achtergrondniveaus.

Voor de Brusseliaan aquifer, zijn ook al wordt deze sterk beïnvloed door antropogene verontreiniging, toch enkele gebieden van het freatische grondwater als licht of niet verontreinigd geïdentificeerd (Zoniënwoud en enkele sites ten noorden van het freatisch gebied in het Vlaamse Gewest). 17 niet-beïnvloede gebieden met veronderstelde natuurlijke concentraties kunnen in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest worden geselecteerd voor de berekening van de natuurlijke achtergrondniveaus.

Op basis van de analyse van de beschikbare gegevens werden ook aanbevelingen gedaan om de kwaliteit van de beschikbare dataset en dus de schatting van de achtergrondniveaus te verbeteren.

Summary

The objective of this study is to define the natural background levels in the groundwater bodies of the Socle in the recharge area (BR02), the Ypresian (hill region) (BR04) and the Bruxellian (BR05) in the Brussels Capital Region. To this end, the methodologies of the European FP6 BRIDGE (Müller, 2006) and BaSeLiNe (Edmunds and Shand, 2008) projects as well as guidance note 18 (European Commission, 2009) were applied.

Few sampling stations are present in the BR02 and BR04 groundwater bodies (5 and 4), unlike the BR05 water body (51). Additional data from neighbouring groundwater bodies in the Walloon and Flemish Regions have also been added to complete the dataset and place the studied groundwater bodies in their regional hydrogeological and hydrochemical context. Data quality was then examined through the calculation of the ionic balance, the analysis of limits of quantification and the analysis of the presence of pollutants to exclude some stations from the data set. To understand the processes influencing the geochemical composition of groundwater in each groundwater body, different tools were used (Piper diagram, study of spatial and temporal changes in concentrations, Na/Cl ratio and saturation indices of calcite, halite and gypsum to understand the origin of salinity, study of atypical values, correlation matrix, multivariate analysis). On the basis of all these analyses, several sampling stations were selected for the calculation of the (natural) background level of each groundwater body. The (natural) background level was calculated as the P90 of the selected samples.

For the Socle aquifer, 8 stations were sectioned in the Brussels Capital Region and the Flemish Region for the calculation of natural background level. These stations have low or no contamination, so the concentrations measured at them can be considered natural.

For the Ypresian aquifer, 7 sampling stations were selected in the Brussels Capital Region and in the Flemish Region. For this groundwater body, it was not possible to select sites not impacted by anthropogenic contamination. The 90 percentiles that were calculated for this groundwater body correspond to background levels rather than natural background levels.

For the Bruxellian aquifer, even if it is heavily impacted by anthropogenic contamination, some areas of the unconfined groundwater have nevertheless been identified as slightly or not contaminated (Soignes forest and some sites north of the unconfined area in the Flemish Region). 17 non-impacted stations with assumed natural concentrations could be selected in the Brussels Capital Region for the calculation of natural background levels.

Following the analysis of the available data, recommendations were also made to improve the quality of the available dataset and thus the estimation of (natural) background levels.

Table des matières

1. INTRODUCTION	16
2. APPROCHE BIBLIOGRAPHIQUE	18
2.1. Synthèse bibliographique des concentrations de référence au sein d'aquifères européens	18
2.2. Etude comparative et critique des méthodologies développées pour l'établissement des concentrations géochimiques de référence de partenaires européens en vue d'établir des valeurs seuils coordonnées	26
2.2.1. Recommandations européennes	26
2.2.2. Approche de la Région wallonne	31
2.2.2. Approche de la Région flamande	34
3. MÉTHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE POUR DÉTERMINER LES CONCENTRATIONS DE RÉFÉRENCE POUR LES MASSES D'EAU SOUTERRAINE BR02, BR04 ET BR05 EN RÉGION DE BRUXELLES CAPITALE.	37
3.1.1. Présentation et vérification de la qualité des données	37
3.1.2. Etude des processus chimiques influençant la composition géochimique des eaux souterraines	38
3.1.3. Descriptif des différentes méthodes utilisées	39
4. ANALYSE DES DONNÉES ET RÉSULTATS POUR LA MASSE D'EAU DU SOCLE EN ZONE D'ALIMENTATION (BR02)	44
4.1. Présentation et vérifications de la qualité des données	44
4.1.1. Présentation de la masse d'eau souterraine du Socle en zone d'alimentation (BR02)	44
4.1.2. Présentation des données	46
4.1.3. Vérification de la qualité des données	49
4.2. Etude des processus chimiques influençant la composition géochimique des eaux souterraines	58
4.2.1. Faciès hydrochimiques : diagramme de Piper	58
4.2.2. Variations spatiales des paramètres	60
4.2.3. Analyse des variations temporelles des concentrations en éléments chimiques	72
4.2.4. Origine de la salinité des eaux souterraines	77
4.2.5. Statistiques descriptives	79
4.2.6. Corrélation entre les éléments	83
4.2.7. Valeurs atypiques	86
4.2.8. Analyse multivariée par la méthode des matrices auto-organisantes	87
4.2.9. Modèle conceptuel de l'acquisition de la minéralisation	92
4.3. Calcul des concentrations de référence	93
4.3.1. Sélection des échantillons	93
4.3.2. Proposition de concentration de référence	95
5. ANALYSE DES DONNÉES ET RÉSULTATS POUR LA MASSE D'EAU DES SABLES YPRÉSIENS (RÉGION DES COLLINES) (BR04)	99

5.1.	Présentation et vérifications de la qualité des données	99
5.1.1.	Présentation de la masse d'eau souterraine des Sables yprésiens (région des collines) (BR04)	99
5.1.2.	Présentation des données	101
5.1.3.	Vérification de la qualité des données	105
5.2.	Etude des processus chimiques influençant la composition géochimique des eaux souterraines	114
5.2.1.	Faciès hydrochimiques : diagramme de Piper	114
5.2.2.	Variations spatiales des paramètres	116
5.2.3.	Analyse des variations temporelles des concentrations en éléments chimiques	128
5.2.4.	Origine de la salinité des eaux souterraines	131
5.2.5.	Statistiques descriptives	134
5.2.6.	Corrélation entre les éléments	138
5.2.7.	Valeurs atypiques	141
5.2.8.	Analyse multivariée par la méthode des matrices auto-organisantes	142
5.2.9.	Modèle conceptuel de l'acquisition de la minéralisation	146
5.3.	Calcul des concentrations de référence	147
5.3.1.	Sélection des échantillons	147
5.3.2.	Proposition de concentration de référence	149
6.	ANALYSE DES DONNÉES ET RÉSULTATS POUR LA MASSE D'EAU DES SABLES DU BRUXELLIEN (BR05)	153
6.1.	Présentation et vérifications de la qualité des données	153
6.1.1.	Présentation de la masse d'eau souterraine des Sables du Bruxellien (BR05)	153
6.1.2.	Présentation des données	155
6.1.3.	Vérification de la qualité des données	160
6.2.	Etude des processus chimiques influençant la composition géochimique des eaux souterraines	168
6.2.1.	Faciès hydrochimiques : diagramme de Piper	168
6.2.2.	Variations spatiales des paramètres	170
6.2.3.	Analyse des variations temporelles des concentrations en éléments chimiques	183
6.2.4.	Origine de la salinité des eaux souterraines	186
6.2.5.	Statistiques descriptives	189
6.2.6.	Corrélation entre les éléments	193
6.2.7.	Valeurs atypiques	196
6.2.8.	Analyse multivariée par la méthode des matrices auto-organisantes	197
6.2.9.	Modèle conceptuel de l'acquisition de la minéralisation	203
6.3.	Calcul des concentrations de référence	204
6.3.1.	Sélection des échantillons	204
6.3.2.	Proposition de concentration de référence	208
7.	RECOMMANDATIONS	212
7.1.	Recommandations relatives aux programmes d'échantillonnage des masses d'eau souterraine	212
7.2.	Recommandation relatives à la représentativité spatiale et temporelle des jeux de données	213

8. CONCLUSION	214
9. BIBLIOGRAPHIE	217
ANNEXE	221
A.1. Concentration de référence en Wallonie et en Flandre	221
A.2. Tableau de correspondance des masses d'eau et aquifères transfrontaliers du district de l'Escaut	225
A.3. Annexe 2 : Liste des stations d'échantillonnage utilisée en Wallonie et en Flandre	226
A.3.1. Stations d'échantillonnage de l'aquifère du Socle	226
A.3.2. Stations d'échantillonnage de l'aquifère de l'Yprésien	229
A.3.3. Stations d'échantillonnage de l'aquifère du Bruxellien	230

Table des Illustrations

FIGURE 2-1 : MÉTHODOLOGIE POUR LA DÉTERMINATION DES CONCENTRATIONS DE RÉFÉRENCE PROPOSÉE PAR LE PROJET BRIDGE (MÜLLER, 2006)	27
FIGURE 2-2 : ETAPES POUR DÉTERMINER LE STATUT (BON OU MAUVAIS ÉTAT) D'UN RÉCEPTEUR (MÜLLER, 2006)	29
FIGURE 2-3 : MÉTHODOLOGIE DE LA NOTE DE GUIDANCE 18 POUR ÉTABLIR LES VALEURS SEUILS (EUROPEAN COMMISSION, 2009)	31
FIGURE 3-1 : DIAGRAMME DE PIPER (SIMLER, 2013)	40
FIGURE 3-2 : DISTRIBUTION ET HISTOGRAMME	41
FIGURE 4-1 : AQUIFÈRES TRANSFRONTALIERS DU PALÉO-MÉSOZOÏQUE DU BASSIN DE L'ESCAUT (CIE, 2009)	45
FIGURE 4-2 : LOCALISATION DES MASSES D'EAU BR02 (BRUXELLES ENVIRONNEMENT, 2010) ET DES ZONES D'AFFLEUREMENT DU CAMBRIEN, SILURIEN ET DU DÉVONIEN (SERVICE GÉOLOGIQUE DE BELGIQUE, 2003)	46
FIGURE 4-3 : POINTS DE PRÉLÈVEMENT DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU SOCLE EN ZONE D'ALIMENTATION (BR02) POUR LESQUELS DES DONNÉES HYDROCHIMIQUES SONT DISPONIBLES	47
FIGURE 4-4 : OCCUPATION DU SOL AUX ALENTOURS DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU SOCLE EN ZONE D'ALIMENTATION (BR02)	47
FIGURE 4-5 : DONNÉES COMPLÉMENTAIRES POUR L'AQUIFÈRE DU SOCLE EN WALLONIE ET EN FLANDRE	49
FIGURE 4-6 : CONCENTRATION MAXIMALE EN ATRAZINE DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	53
FIGURE 4-7 : CONCENTRATION MAXIMALE EN ATRAZINE DÉSÉTHYL DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	53
FIGURE 4-8 : CONCENTRATION MAXIMALE EN BAM (2,6-DICHLOROBENZAMIDE) DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	54
FIGURE 4-9 : CONCENTRATION MAXIMALE EN NITRATE DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	54
FIGURE 4-10 : CONCENTRATION MAXIMALE EN CYANURES TOTAUX DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	55
FIGURE 4-11 : CONCENTRATION MAXIMALE EN HUILES MINÉRALES DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	55
FIGURE 4-12 : CONCENTRATION MAXIMALE EN TÉTRACHLOROÉTHYLÈNE DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	56
FIGURE 4-13 : CONCENTRATION MAXIMALE EN TRICHLORÉTHYLÈNE DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	56
FIGURE 4-14 : ERREUR SUR LA BALANCE IONIQUE DE LA MÉDIANE DES ÉCHANTILLONS DE L'AQUIFÈRE DU SOCLE	57
FIGURE 4-15 : REPRÉSENTATION DES ÉCHANTILLONS DE L'AQUIFÈRE DU SOCLE (MÉDIANE) DANS UN DIAGRAMME DE PIPER	59
FIGURE 4-16 : RÉPARTITION SPATIALE DES TYPES DE FACIÈS HYDROCHIMIQUES DE L'AQUIFÈRE DU SOCLE	59

FIGURE 4-17: RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONDUCTIVITÉ DE TERRAIN ($\mu\text{S}/\text{CM}$) DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	62
FIGURE 4-18 : RÉPARTITION SPATIALE DU PH DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	62
FIGURE 4-19 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN O ₂ DISSOUS DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	63
FIGURE 4-20 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN CA DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	63
FIGURE 4-21 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN CL DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	64
FIGURE 4-22 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN HCO ₃ DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	64
FIGURE 4-23 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN MG DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	65
FIGURE 4-24 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NA DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	65
FIGURE 4-25 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN K DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	66
FIGURE 4-26 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN SO ₄ DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	66
FIGURE 4-27 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NO ₃ DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	67
FIGURE 4-28 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NH ₄ DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	67
FIGURE 4-29 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN FE TOTAL DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	68
FIGURE 4-30 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN MN DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	68
FIGURE 4-31 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN AS DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	69
FIGURE 4-32 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN F DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	69
FIGURE 4-33 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN ZN DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	70
FIGURE 4-34 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN PB DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	70
FIGURE 4-35 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN B DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	71
FIGURE 4-36 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN CU DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	71
FIGURE 4-37 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NI DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	72
FIGURE 4-38: EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITÉ DE TERRAIN DANS LA MASSE D'EAU BR02	73
FIGURE 4-39 : EVOLUTION DU PH DANS LA MASSE D'EAU BR02	73
FIGURE 4-40 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN O ₂ DANS LA MASSE D'EAU BR02	73
FIGURE 4-41 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN CA DANS LA MASSE D'EAU BR02	74
FIGURE 4-42 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN MG DANS LA MASSE D'EAU BR02	74
FIGURE 4-43 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN HCO ₃ DANS LA MASSE D'EAU BR02	74
FIGURE 4-44 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN SO ₄ DANS LA MASSE D'EAU BR02	75
FIGURE 4-45 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN CL DANS LA MASSE D'EAU BR02	75
FIGURE 4-46 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN NA DANS LA MASSE D'EAU BR02	75
FIGURE 4-47 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN NO ₃ DANS LA MASSE D'EAU BR02	76
FIGURE 4-48 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN FE DANS LA MASSE D'EAU BR02	76
FIGURE 4-49 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN ZN DANS LA MASSE D'EAU BR02	76
FIGURE 4-50 : CONCENTRATION EN NA (MEQ/L) PAR RAPPORT À LA CONCENTRATION EN CL (MEQ/L)	77
FIGURE 4-51 : RÉPARTITION SPATIALE DU RAPPORT NA/CL (CONCENTRATIONS EN MEQ/L) DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE	78
FIGURE 4-52 : INDICE DE SATURATION (SI) DE LA CALCITE EN FONCTION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE CONTRÔLÉS PAR CES MINÉRAUX	78
FIGURE 4-53 : INDICE DE SATURATION (SI) DU GYPSE EN FONCTION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE CONTRÔLÉS PAR CES MINÉRAUX	79
FIGURE 4-54 : INDICE DE SATURATION (SI) DE LA HALITE EN FONCTION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE CONTRÔLÉS PAR CES MINÉRAUX	79
FIGURE 4-55 : HISTOGRAMMES ILLUSTRANT LA DISTRIBUTION DES PARAMÈTRES DE TERRAIN, DES ÉLÉMENTS MAJEURS ET QUELQUES ÉLÉMENTS DE L'AQUIFÈRE DU SOCLE	81
FIGURE 4-56 : HISTOGRAMMES ILLUSTRANT LA DISTRIBUTION DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS DE L'AQUIFÈRE DU SOCLE (POUR LES MÉTAUX, IL S'AGIT DE LA FRACTION TOTALE SAUF POUR LE FE OÙ LA FRACTION DISSOUE EST ÉGALEMENT REPRÉSENTÉE)	82
FIGURE 4-57 : LOCALISATION DES STATIONS (EN JAUNE ET ORANGE) DE L'AQUIFÈRE DU SOCLE PRÉSENTANT DES VALEURS ATYPIQUES	87

FIGURE 4-58 : RÉSULTATS DES SOMS POUR LA MINÉRALISATION GLOBALE DU SOCLE AVEC LA MATRICE DES COMPOSANTS, LA MATRICE U ET LES GROUPES D'ÉCHANTILLONS SEMBLABLES DÉFINIS PAR LES SOMS	88
FIGURE 4-59 : DISTRIBUTION SPATIALE DES 3 GROUPES DÉFINIS GRÂCE À L'ANALYSE MULTIVARIÉE (MINÉRALISATION GLOBALE)	90
FIGURE 4-60 : RÉSULTATS DES SOMS POUR LES PROCESSUS REDOX DU SOCLE AVEC LA MATRICE DES COMPOSANTS, LA MATRICE U ET LES GROUPES D'ÉCHANTILLONS SEMBLABLES DÉFINIS PAR LES SOMS	91
FIGURE 4-61 : DISTRIBUTION SPATIALE DES 3 GROUPES DÉFINIS GRÂCE À L'ANALYSE MULTIVARIÉE (PROCESSUS REDOX)	92
FIGURE 4-62 : BUFFER DE 10 KM AUTOUR DE LA MASSE D'EAU BR02 AVEC LE RÉSULTAT DES SOMS POUR LA MINÉRALISATION GLOBALE	94
FIGURE 4-63 : BUFFER DE 10 KM AUTOUR DE LA MASSE D'EAU BR02 AVEC LE NOMBRE DE VALEURS ATYPIQUES PAR SITE	95
FIGURE 5-1 : LOCALISATION DE LA MASSE D'EAU BR04 (BRUXELLES ENVIRONNEMENT, 2010) ET DES AFFLEUREMENTS DE L'YPRÉSIEEN (SERVICE GÉOLOGIQUE DE BELGIQUE, 2003)	99
FIGURE 5-2 : AQUIFÈRES TRANSFRONTALIERS DU PALÉOCÈNE ET DE L'EOCÈNE DU BASSIN DE L'ESCAUT (CIE, 2009)	100
FIGURE 5-3 : TERRAINS DE COUVERTURES DE LA MASSE D'EAU BR04 EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE (BRUXELLES ENVIRONNEMENT, 2019)	101
FIGURE 5-4 : POINTS DE PRÉLÈVEMENT DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DE L'YPRÉSIEEN (RÉGION DES COLLINES) POUR LESQUELS DES DONNÉES HYDROCHIMIQUES SONT DISPONIBLES	103
FIGURE 5-5 : OCCUPATION DU SOL AUX ALENTOURS DES STATIONS DE PRÉLÈVEMENT DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DE L'YPRÉSIEEN (RÉGION DES COLLINES).	104
FIGURE 5-6 : DONNÉES COMPLÉMENTAIRES DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN EN WALLONIE ET EN FLANDRE	105
FIGURE 5-7: CONCENTRATION MAXIMALE EN ATRAZINE DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	109
FIGURE 5-8 : CONCENTRATION MAXIMALE EN ATRAZINE DÉSÉTHYL DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	109
FIGURE 5-9 : CONCENTRATION MAXIMALE EN BAM (2,6-DICHLOROBENZAMIDE) DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	110
FIGURE 5-10 : CONCENTRATION MAXIMALE EN NITRATE DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	110
FIGURE 5-11 : CONCENTRATION MAXIMALE EN CYANURES TOTAUX DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	111
FIGURE 5-12 : CONCENTRATION MAXIMALE EN HUILES MINÉRALES DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	111
FIGURE 5-13 : CONCENTRATION MAXIMALE EN TÉTRACHLOROÉTHYLÈNE DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	112
FIGURE 5-14 : CONCENTRATION MAXIMALE EN TRICHLORÉTHYLÈNE DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	112
FIGURE 5-15 : ERREUR SUR LA BALANCE IONIQUE DE LA MÉDIANE DES ÉCHANTILLONS DE L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	113
FIGURE 5-16 : REPRÉSENTATION DES ÉCHANTILLONS DE L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN (MÉDIANE) DANS UN DIAGRAMME DE PIPER	115
FIGURE 5-17 : RÉPARTITION SPATIALE DES TYPES DE FACIÈS HYDROCHIMIQUES DE L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	115
FIGURE 5-18 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONDUCTIVITÉ DE TERRAIN ($\mu\text{S}/\text{CM}$) DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	118
FIGURE 5-19 : RÉPARTITION SPATIALE DU PH DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	118
FIGURE 5-20 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN O ₂ DISSOUS DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	119
FIGURE 5-21 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN CA DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	119
FIGURE 5-22 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN CL DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	120
FIGURE 5-23 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN HCO ₃ DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	120
FIGURE 5-24 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN MG DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	121
FIGURE 5-25 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NA DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	121
FIGURE 5-26 ; RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN K DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	122

FIGURE 5-27 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN SO ₄ DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE	122
FIGURE 5-28 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NO ₃ DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE	123
FIGURE 5-29 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NH ₄ DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE	123
FIGURE 5-30 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN FE DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE	124
FIGURE 5-31 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN MN DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE	124
FIGURE 5-32 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN AS DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE	125
FIGURE 5-33 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN F DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE	125
FIGURE 5-34 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN ZN DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE	126
FIGURE 5-35 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN PB DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE	126
FIGURE 5-36 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN B DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE	127
FIGURE 5-37 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN CU DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE	127
FIGURE 5-38 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NI DANS L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE	128
FIGURE 5-39 : EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITÉ DE TERRAIN DANS LA MASSE D'EAU BR04	129
FIGURE 5-40 : EVOLUTION DU PH DANS LA MASSE D'EAU BR04	129
FIGURE 5-41 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN O ₂ DANS LA MASSE D'EAU BR04	129
FIGURE 5-42 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN CA DANS LA MASSE D'EAU BR04	129
FIGURE 5-43 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN HCO ₃ DANS LA MASSE D'EAU BR04	130
FIGURE 5-44 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN SO ₄ DANS LA MASSE D'EAU BR04	130
FIGURE 5-45 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN NO ₃ DANS LA MASSE D'EAU BR04	130
FIGURE 5-46 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN NA DANS LA MASSE D'EAU BR04	130
FIGURE 5-47 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN CL DANS LA MASSE D'EAU BR04	131
FIGURE 5-48 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN FE DANS LA MASSE D'EAU BR04	131
FIGURE 5-49 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN ZN DANS LA MASSE D'EAU BR04	131
FIGURE 5-50 : CONCENTRATION EN NA (MEQ/L) PAR RAPPORT À LA CONCENTRATION EN CL (MEQ/L)	132
FIGURE 5-51 : RÉPARTITION SPATIALE DU RAPPORT NA/CL (CONCENTRATION EN MEQ/L) DE L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE	133
FIGURE 5-52 : INDICE DE SATURATION (SI) DE LA CALCITE EN FONCTION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE CONTRÔLÉS PAR CES MINÉRAUX	133
FIGURE 5-53 : INDICE DE SATURATION (SI) DU GYPSE EN FONCTION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE CONTRÔLÉS PAR CES MINÉRAUX	134
FIGURE 5-54 : INDICE DE SATURATION (SI) DE LA HALITE EN FONCTION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE CONTRÔLÉS PAR CES MINÉRAUX	134
FIGURE 5-55 : HISTOGRAMMES ILLUSTRANT LA DISTRIBUTION DES PARAMÈTRES DE TERRAIN, DES ÉLÉMENTS MAJEURS ET QUELQUES ÉLÉMENTS MINEURS DE L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE	136
FIGURE 5-56 : HISTOGRAMMES ILLUSTRANT LA DISTRIBUTION DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS DE L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE (POUR LES MÉTAUX, IL S'AGIT DE LA FRACTION TOTALE SAUF POUR LE FE OÙ LA FRACTION DISSOUE EST ÉGALEMENT REPRÉSENTÉE).	137
FIGURE 5-57 : LOCALISATION DES STATIONS DE L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE PRÉSENTANT DES VALEURS ATYPIQUES	142
FIGURE 5-58 : RÉSULTATS DES SOMS POUR LA MINÉRALISATION GLOBALE DE L'YPRÉSIE AVEC LA MATRICE DES COMPOSANTS, LA MATRICE U ET LES GROUPES D'ÉCHANTILLONS SEMBLABLES DÉFINIS PAR LES SOMS	143
FIGURE 5-59 : DISTRIBUTION SPATIALE DES 3 GROUPES DÉFINIS GRÂCE À L'ANALYSE MULTIVARIÉE (MINÉRALISATION GLOBALE)	144
FIGURE 5-60: RÉSULTATS DES SOMS POUR LES PROCESSUS DE L'YPRÉSIE AVEC LA MATRICE DES COMPOSANTS, LA MATRICE U ET LES GROUPES D'ÉCHANTILLONS SEMBLABLES DÉFINIS PAR LES SOMS	145
FIGURE 5-61 : DISTRIBUTION SPATIALE DES 3 GROUPES DÉFINIS GRÂCE À L'ANALYSE MULTIVARIÉE (PROCESSUS REDOX)	146
FIGURE 5-62 : BUFFER DE 10 KM AUTOUR DE LA MASSE D'EAU BR04 AVEC LE RÉSULTAT DES SOMS POUR LA MINÉRALISATION GLOBALE	148

FIGURE 5-63 : BUFFER DE 10 KM AUTOUR DE LA MASSE D'EAU BR04 AVEC LE NOMBRE DE VALEUR ATYPIQUE PAR SITE	149
FIGURE 6-1 : LOCALISATION DE LA MASSE D'EAU BR05 (BRUXELLES ENVIRONNEMENT, 2010) ET DES AFFLEUREMENTS DU BRUXELLIEN ET DU LÉDO-PANISÉLIEN (SERVICE GÉOLOGIQUE DE BELGIQUE, 2003)	153
FIGURE 6-2 : AQUIFÈRES TRANSFRONTALIERS DU PALÉOCÈNE ET DE L'EOCÈNE DU BASSIN DE L'ESCAUT (CIE, 2009)	154
FIGURE 6-3 : TERRAINS DE COUVERTURES DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE BR05 EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE (BRUXELLES ENVIRONNEMENT, 2019)	155
FIGURE 6-4 : POINTS DE PRÉLÈVEMENT DE LA MASSE D'EAU DU BRUXELLIEN POUR LESQUELS DES DONNÉES HYDROCHIMIQUES SONT DISPONIBLES	157
FIGURE 6-5 : OCCUPATION DU SOL AUX ALENTOURS DES STATIONS DE PRÉLÈVEMENT DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU BRUXELLIEN (BR05).	158
FIGURE 6-6 : DONNÉES COMPLÉMENTAIRES DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN EN WALLONIE ET EN FLANDRE	159
FIGURE 6-7 : CONCENTRATION MAXIMALE EN ATRAZINE DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	163
FIGURE 6-8 : CONCENTRATION MAXIMALE EN ATRAZINE DÉSÉTHYL DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	163
FIGURE 6-9 : CONCENTRATION MAXIMALE EN BAM (2,6-DICHLOROBENZAMIDE) DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	164
FIGURE 6-10 : CONCENTRATION MAXIMALE EN NITRATE DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	164
FIGURE 6-11 : CONCENTRATION MAXIMALE EN CYANURES TOTAUX DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	165
FIGURE 6-12 : CONCENTRATION MAXIMALE EN HUILES MINÉRALES DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	165
FIGURE 6-13 : CONCENTRATION MAXIMALE EN TÉTRACHLOROÉTHYLÈNE DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	166
FIGURE 6-14 : CONCENTRATION MAXIMALE EN TRICHLORÉTHYLÈNE DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	166
FIGURE 6-15 : ERREUR SUR LA BALANCE IONIQUE DE LA MÉDIANE DES ÉCHANTILLONS DE L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	168
FIGURE 6-16 : REPRÉSENTATION DES ÉCHANTILLONS DE L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN (MÉDIANE) DANS UN DIAGRAMME DE PIPER	169
FIGURE 6-17 : RÉPARTITION SPATIALE DES TYPES DE FACIÈS HYDROCHIMIQUES DE L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN, NO DATA SIGNIFIE QUE L'ENSEMBLE DES ÉLÉMENTS MAJEURS N'A PAS ÉTÉ MESURÉS POUR LE SITE ET QU'IL N'EST POSSIBLE DE LE SITUER DANS LE DIAGRAMME DE PIPER.	170
FIGURE 6-18 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONDUCTIVITÉ DE TERRAIN ($\mu\text{S}/\text{CM}$) DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	172
FIGURE 6-19 : RÉPARTITION SPATIALE DU PH DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	173
FIGURE 6-20 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN O ₂ DISSOUS DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	173
FIGURE 6-21 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN CA DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	174
FIGURE 6-22 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN CL DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	174
FIGURE 6-23 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN HCO ₃ DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	175
FIGURE 6-24 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN MG DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	175
FIGURE 6-25 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NA DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	176
FIGURE 6-26 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN K DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	176
FIGURE 6-27 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN SO ₄ DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	177
FIGURE 6-28 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NO ₃ DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	177
FIGURE 6-29 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NH ₄ DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	178
FIGURE 6-30 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN FE TOTAL DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	178
FIGURE 6-31 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN MN DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	179
FIGURE 6-32 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN F DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	179
FIGURE 6-33 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN AS DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	180

FIGURE 6-34 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN ZN DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	180
FIGURE 6-35 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN PB DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	181
FIGURE 6-36 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN B DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	181
FIGURE 6-37 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NI DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	182
FIGURE 6-38 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN CU DANS L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	182
FIGURE 6-39 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN CL DANS LA MASSE D'EAU BR05	183
FIGURE 6-40 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN CA DANS LA MASSE D'EAU BR05	184
FIGURE 6-41 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN SO4 DANS LA MASSE D'EAU BR05	184
FIGURE 6-42 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN NO3 DANS LA MASSE D'EAU BR05	185
FIGURE 6-43 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN ATRAZINE DANS LA MASSE D'EAU BR05	185
FIGURE 6-44 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN BAM DANS LA MASSE D'EAU BR05	186
FIGURE 6-45 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN TÉTRACHLOROÉTHYLÈNE DANS LA MASSE D'EAU BR05	186
FIGURE 6-46 : CONCENTRATION EN NA (MEQ/L) PAR RAPPORT À LA CONCENTRATION EN CL (MEQ/L)	187
FIGURE 6-47 : REPRÉSENTATION SPATIALE DU RAPPORT NA/CL (CONCENTRATION EN MEQ/L) POUR L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	188
FIGURE 6-48 : INDICE DE SATURATION (SI) DE LA CALCITE EN FONCTION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE CONTRÔLÉS PAR CES MINÉRAUX	188
FIGURE 6-49 : INDICE DE SATURATION (SI) DU GYPSE EN FONCTION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE CONTRÔLÉS PAR CES MINÉRAUX	189
FIGURE 6-50 : INDICE DE SATURATION (SI) DE LA HALITE EN FONCTION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE CONTRÔLÉS PAR CES MINÉRAUX	189
FIGURE 6-51 : HISTOGRAMMES ILLUSTRANT LA DISTRIBUTION DES PARAMÈTRES DE TERRAIN, DES ÉLÉMENTS MAJEURS ET QUELQUES ÉLÉMENTS MINEURS DE L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	191
FIGURE 6-52 : HISTOGRAMMES ILLUSTRANT LA DISTRIBUTION DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS DE L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN (POUR LES MÉTAUX, IL S'AGIT DE LA FRACTION TOTALE SAUF POUR LE FE OÙ LA FRACTION DISSOUE EST ÉGALEMENT REPRÉSENTÉE).	192
FIGURE 6-53 : LOCALISATION DES STATIONS (EN JAUNE ET ORANGE) DE L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN PRÉSENTANT DES VALEURS ATYPIQUES	197
FIGURE 6-54 : RÉSULTATS DES SOMS POUR LA MINÉRALISATION GLOBALE DU BRUXELLIEN AVEC LA MATRICE DES COMPOSANTS, LA MATRICE U ET LES GROUPES D'ÉCHANTILLONS SEMBLABLES DÉFINIS PAR LES SOMS	199
FIGURE 6-55 : DISTRIBUTION SPATIALE DES 5 GROUPES DÉFINIS GRÂCE À L'ANALYSE MULTIVARIÉE (MINÉRALISATION GLOBALE)	200
FIGURE 6-56 : RÉSULTATS DES SOMS POUR LES PROCESSUS REDOX DU BRUXELLIEN AVEC LA MATRICE DES COMPOSANTS, LA MATRICE U ET LES GROUPES D'ÉCHANTILLONS SEMBLABLES DÉFINIS PAR LES SOMS	201
FIGURE 6-57 : DISTRIBUTION SPATIALE DES 3 GROUPES DÉFINIS GRÂCE À L'ANALYSE MULTIVARIÉE (PROCESSUS REDOX)	203
FIGURE 6-58 : BUFFER DE 10 KM AUTOUR DE LA MASSE D'EAU BR05 AVEC LE RÉSULTAT DES SOMS POUR LA MINÉRALISATION GLOBALE	205
FIGURE 6-59 : BUFFER DE 10 KM AUTOUR DE LA MASSE D'EAU BR05 AVEC LE NOMBRE DE VALEURS ATYPIQUES PAR SITE	206
FIGURE 6-60 : SÉLECTION 1 DES SITES POUR LE CALCUL DES RÉFÉRENCES DU BRUXELLIEN	206
FIGURE 6-61 : SÉLECTION 2 DES SITES POUR LE CALCUL DES RÉFÉRENCES DU BRUXELLIEN	207
FIGURE 6-62 : SÉLECTION 3 DES SITES POUR LE CALCUL DES RÉFÉRENCES DU BRUXELLIEN	207

Table des Tableaux

TABLEAU 2-1 : RÉSUMÉ DES INFORMATIONS CONCERNANT LES CINQ MASSES D'EAU DE LA RÉGION BRUXELLES-CAPITALE (ARRÊTÉ DU GOUVERNEMENT DE LA RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE, 2010 & BUFFEL AND MATTHIJS, 2001). LES MASSES D'EAU ÉTUDIÉE DANS LE CADRE DE CETTE ÉTUDE SONT COLORÉES.	18
TABLEAU 2-2 : INFORMATIONS GÉNÉRALES DES ÉTUDES RÉALISÉES SUR DES MASSES D'EAU SIMILAIRES À CELLES DE LA RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE	22
TABLEAU 2-3 : TENEURS HABITUELLES EN ÉLÉMENTS MAJEURS ET MINEURS POUR DES AQUIFÈRES SABLEUX (PARTIE 1)	23
TABLEAU 2-4 : TENEURS HABITUELLES EN ÉLÉMENTS MAJEURS ET MINEURS POUR DES AQUIFÈRES SABLEUX (PARTIE 2)	24
TABLEAU 2-5 : TENEURS HABITUELLES EN ÉLÉMENTS MAJEURS ET MINEURS POUR DES AQUIFÈRES SCHISTO-GRÉSEUX	25
TABLEAU 2-6: VALEURS CRITÈRE POUR LES EAUX SOUTERRAINES EN RÉGION WALLONNE (GOUVERNEMENT WALLON, 2016)	33
TABLEAU 2-7 : NORMES DE QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE UTILISÉES EN RÉGION FLAMANDE (VMM, 2016)	35
TABLEAU 2-8 : VALEURS SEUILS POUR LES MASSES D'EAU SOUTERRAINES DE LA RÉGION FLAMANDE EN CONTINUITÉ AVEC CELLE DE LA RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE (VMM, 2016).	36
TABLEAU 4-1 : DONNÉES RELATIVES AUX POINTS DE PRÉLÈVEMENT DE LA MASSE D'EAU DU SOCLE EN ALIMENTATION (BR02) POUR LESQUELS DES DONNÉES HYDROCHIMIQUES SONT DISPONIBLES	46
TABLEAU 4-2: LIMITE DE QUANTIFICATION DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS ET EN TRACE DE L'AQUIFÈRE DU SOCLE (NB = NOMBRE, LQ = LIMITE DE QUANTIFICATION), EN ROUGE LES ÉLÉMENTS POUR LEQUEL LE POURCENTAGE DE QUANTIFICATION EST INFÉRIEUR À 25% OU POUR LESQUELS IL N'Y A PAS DE MESURES.	51
TABLEAU 4-3 : LIMITE DE QUANTIFICATION DE CERTAINS POLLUANTS DE L'AQUIFÈRE DU SOCLE (NB = NOMBRE, LQ = LIMITE DE QUANTIFICATION), EN ORANGE : LES POLLUANTS POUR LESQUELS LA LIMITE DE QUANTIFICATION EST SUPÉRIEUR À 10%.	52
TABLEAU 4-4 : CALCUL DE LA BALANCE IONIQUE DES ÉCHANTILLONS DE L'AQUIFÈRE DU SOCLE (NB = NOMBRE, BI = BALANCE IONIQUE)	57
TABLEAU 4-5 : PRINCIPAUX PARAMÈTRES STATISTIQUES DE L'AQUIFÈRE DU SOCLE	80
TABLEAU 4-6 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES PRINCIPAUX PARAMÈTRES DE TERRAIN, LES ÉLÉMENTS MAJEURS ET LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS ET LES POLLUANTS DE L'AQUIFÈRE DU SOCLE	84
TABLEAU 4-7 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES PRINCIPAUX PARAMÈTRES DE TERRAIN, LES ÉLÉMENTS MAJEURS ET LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS DE L'AQUIFÈRE DU SOCLE	85
TABLEAU 4-8 : STATIONS DE L'AQUIFÈRE DU SOCLE PRÉSENTANT DES VALEURS ATYPIQUES	86
TABLEAU 4-9 : CARACTÉRISTIQUES DE CHACUN DES TROIS GROUPES	89
TABLEAU 4-10 : CARACTÉRISTIQUES DE CHACUN DES TROIS GROUPES	91
TABLEAU 4-11 : PARAMÈTRES STATISTIQUES CALCULÉS POUR ESTIMER LA CONCENTRATION TYPE DE LA MASSE D'EAU DU SOCLE EN ZONE D'ALIMENTATION BR02 SUR BASE DES MÉDIANES DES STATIONS, EN ROUGE : LES PARAMÈTRES AVEC LE POURCENTAGE DE VALEURS SUPÉRIEURES À LA LIMITE DE QUANTIFICATION TRÈS FAIBLE (<25%)	97
TABLEAU 4-12 : CONCENTRATIONS DE RÉFÉRENCE DU SOCLE EN FLANDRE ET EN WALLONIE (SPW-DGO3-DEE, 2016 ET VMM, 2016) COMPARÉES AUX VALEURS PROPOSÉES POUR LA MASSE D'EAU BR02 (EN ROUGE : LES PARAMÈTRES AVEC LE POURCENTAGE DE VALEURS SUPÉRIEURES À LA LIMITE DE QUANTIFICATION TRÈS FAIBLE)	98
TABLEAU 5-1 : DONNÉES RELATIVES AUX POINTS DE PRÉLÈVEMENT DE LA MASSE D'EAU DE L'YPRÉSIEN (RÉGION DES COLLINES) POUR LESQUELS DES DONNÉES HYDROCHIMIQUES SONT DISPONIBLES	102

TABLEAU 5-2 : LIMITE DE QUANTIFICATION DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS ET EN TRACE DE L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN (NB = NOMBRE, LQ = LIMITE DE QUANTIFICATION), EN ROUGE LES ÉLÉMENTS POUR LEQUEL LE POURCENTAGE DE QUANTIFICATION EST INFÉRIEUR À 25% OU POUR LESQUELS IL N'Y A PAS DE MESURES.	106
TABLEAU 5-3 : LIMITE DE QUANTIFICATION DE CERTAINS POLLUANTS DE L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN (NB = NOMBRE, LQ = LIMITE DE QUANTIFICATION), EN ORANGE : LES POLLUANTS POUR LESQUELS LA LIMITE DE QUANTIFICATION EST SUPÉRIEUR À 10%.	108
TABLEAU 5-4 : CALCUL DE LA BALANCE IONIQUE DES ÉCHANTILLONS DE L'YPRÉSIEEN (NB = NOMBRE, BI = BALANCE IONIQUE).	113
TABLEAU 5-5: PRINCIPAUX PARAMÈTRES STATISTIQUES DE L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	135
TABLEAU 5-6 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES PRINCIPAUX PARAMÈTRES DE TERRAIN, LES ÉLÉMENTS MAJEURS ET LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS ET LES POLLUANTS DE L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	139
TABLEAU 5-7 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES PRINCIPAUX POLLUANTS ET LES ÉLÉMENTS MINEURS DE L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN	140
TABLEAU 5-8: STATIONS DE L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIEEN PRÉSENTANT DES VALEURS ATYPIQUES	141
TABLEAU 5-9 : CARACTÉRISTIQUES DE CHACUN DES TROIS GROUPES	144
TABLEAU 5-10 : CARACTÉRISTIQUES DE CHACUN DES TROIS GROUPES	145
TABLEAU 5-11 : PARAMÈTRES STATISTIQUES CALCULÉS POUR ESTIMER LA CONCENTRATION TYPE DE LA MASSE D'EAU DE L'YPRÉSIEEN BR04 SUR BASE DES MÉDIANES DES STATIONS, EN ROUGE : LES PARAMÈTRES AVEC LE POURCENTAGE DE VALEURS SUPÉRIEURES À LA LIMITE DE QUANTIFICATION TRÈS FAIBLE (<25%)	151
TABLEAU 5-12 : CONCENTRATIONS DE RÉFÉRENCE DE L'YPRÉSIEEN EN FLANDRE ET EN WALLONIE (SPW-DGO3-DEE, 2016 ET VMM, 2016) COMPARÉES AUX VALEURS PROPOSÉES POUR LA MASSE D'EAU BR04 (EN ROUGE : LES PARAMÈTRES AVEC LE POURCENTAGE DE VALEURS SUPÉRIEURES À LA LIMITE DE QUANTIFICATION.	152
TABLEAU 6-1 : DONNÉES RELATIVES AUX POINTS DE PRÉLÈVEMENT DE LA MASSE D'EAU DU BRUXELLIEN POUR LESQUELS DES DONNÉES HYDROCHIMIQUES SONT DISPONIBLES	157
TABLEAU 6-2 : LIMITE DE QUANTIFICATION DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS ET EN TRACE DE L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN (NB = NOMBRE, LQ = LIMITE DE QUANTIFICATION)	161
TABLEAU 6-3 : LIMITE DE QUANTIFICATION DE CERTAINS POLLUANTS DE L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN (NB = NOMBRE, LQ = LIMITE DE QUANTIFICATION)	162
TABLEAU 6-4 : CALCUL DE LA BALANCE IONIQUE DES ÉCHANTILLONS DE L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN (NB = NOMBRE, BI = BALANCE IONIQUE)	167
TABLEAU 6-5 : PRINCIPAUX PARAMÈTRES STATISTIQUES DE L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	190
TABLEAU 6-6 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES PRINCIPAUX PARAMÈTRES DE TERRAIN, LES ÉLÉMENTS MAJEURS ET LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS ET LES POLLUANTS DE L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	194
TABLEAU 6-7 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES PRINCIPAUX POLLUANTS ET LES MÉTAUX DE L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN	195
TABLEAU 6-8: STATIONS DE L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN PRÉSENTANT DES VALEURS ATYPIQUES	197
TABLEAU 6-9 : CARACTÉRISTIQUES DE CHACUN DES 5 GROUPES	200
TABLEAU 6-10 : CARACTÉRISTIQUES DE CHACUN DES 3 GROUPES	202
TABLEAU 6-11 : PARAMÈTRES STATISTIQUES CALCULÉS POUR ESTIMER LA CONCENTRATION TYPE DE LA MASSE D'EAU DU BRUXELLIEN BR05 SUR BASE DES MÉDIANES DES STATIONS, EN ROUGE : LES PARAMÈTRES AVEC LE POURCENTAGE DE VALEURS SUPÉRIEURES À LA LIMITE DE QUANTIFICATION TRÈS FAIBLE (<25%) (PARTIE 1)	209
TABLEAU 6-12 : PARAMÈTRES STATISTIQUES CALCULÉS POUR ESTIMER LA CONCENTRATION TYPE DE LA MASSE D'EAU DU BRUXELLIEN BR05 SUR BASE DES MÉDIANES DES STATIONS, EN ROUGE : LES PARAMÈTRES AVEC LE POURCENTAGE DE VALEURS SUPÉRIEURES À LA LIMITE DE QUANTIFICATION TRÈS FAIBLE (<25%) (PARTIE 2)	210

TABLEAU 6-13 : CONCENTRATIONS DE RÉFÉRENCE DU BRUXELLIEN EN FLANDRE ET EN WALLONIE (SPW-DGO3-DEE, 2016 ET VMM, 2016) COMPARÉES AUX VALEURS PROPOSÉES POUR LA MASSE D'EAU BR05 (EN ROUGE : LES PARAMÈTRES AVEC LE POURCENTAGE DE VALEURS SUPÉRIEURES À LA LIMITE DE QUANTIFICATION TRÈS FAIBLE ; * : CONCENTRATION DE RÉFÉRENCE NON DÉTERMINÉE CAR MESURES < LIMITE DE QUANTIFICATION)	211
TABLEAU 0-1: CONCENTRATIONS DE RÉFÉRENCE EN RÉGION WALLONNE (SPW-DGO3-DEE, 2016)	222
TABLEAU 0-2 : CONCENTRATIONS DE RÉFÉRENCE EN RÉGION FLAMANDE (VMM, 2016)	224
TABLEAU 0-3 : TABLEAU DE CORRESPONDANCE DES MASSES D'EAU ET AQUIFÈRES TRANSFRONTALIERS DU DISTRICT DE L'ESCAUT (F = FRANCE, NL = PAYS-BAS, BX = RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE, VL = RÉGION FLAMANDE, W = RÉGION WALLONNE ; EN BLEU : LES MASSES D'EAU DÉSIGNÉES COMME MASSES D'EAU DESTINÉES À L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE)	225
TABLEAU 0-4 : RÉCAPITULATIF DES DONNÉES COMPLÉMENTAIRES DE L'AQUIFÈRE DU SOCLE SÉLECTIONNÉES EN WALLONIE ET EN FLANDRE.	228
TABLEAU 0-5 : RÉCAPITULATIF DES DONNÉES COMPLÉMENTAIRES DE L'AQUIFÈRE DE L'YPRÉSIE SÉLECTIONNÉES EN WALLONIE ET EN FLANDRE.	230
TABLEAU 0-6 : RÉCAPITULATIF DES DONNÉES COMPLÉMENTAIRES DE L'AQUIFÈRE DU BRUXELLIEN SÉLECTIONNÉES EN WALLONIE ET EN FLANDRE.	235

1. Introduction

La nécessité de protéger les ressources en eaux, et en particulier l'eau souterraine, fait partie des préoccupations de l'Union européenne depuis plusieurs dizaines d'années. La directive cadre eau (DCE 2000/60/CE) et sa directive fille (2006/118/CE) et sa révision fixent les objectifs pour la préservation et la restauration de l'état des eaux souterraines. Pour ce faire, les états membres ont dû délimiter des masses d'eau souterraine regroupant les principaux aquifères et établir des réseaux de monitoring. Un des objectifs principaux de ces directives européennes est d'atteindre le « bon état » qualitatif et quantitatif pour chaque masse d'eau (initialement à l'échéance 2015).

Pour déterminer l'état qualitatif d'une masse d'eau souterraine, et ainsi voir si elle est polluée ou non, les états membres doivent établir des valeurs seuils pour les polluants et indicateurs de pollution. Un dépassement de ces valeurs seuils est susceptible d'indiquer des eaux souterraines qui ne sont pas en bon état. Une liste (minimale) de polluants pour lesquels les états membres doivent établir des valeurs seuils a été fixée dans la directive fille (2006/118/CE) et sa révision (2014/80/UE). Cependant, certains éléments indésirables peuvent être présents naturellement dans l'eau. Il est donc également nécessaire de déterminer les concentrations en éléments naturellement présents dans le milieu sans modification anthropique. Il s'agit des concentrations de référence. Certains pays (ou région) de l'Union européenne, comme la Région wallonne, font aussi une distinction entre concentration de référence et concentration de fond. Pour la concentration de référence, il n'y est pas censé y avoir d'influence anthropique tandis que la concentration de fond traduit plutôt la concentration ambiante d'un polluant dans l'eau souterraine.

Cette étude a été effectuée par le Groupe d'Hydrogéologie et de Géologie de l'Environnement de l'Université de Liège (HGE-ULiège) dans le cadre d'une convention avec Bruxelles Environnement. L'objectif de cette convention est de caractériser la concentration de référence de certains paramètres chimiques présents naturellement dans les masses d'eau souterraine des Sables du Bruxellien (Br05), de l'Yprésien (Région des collines) (Br04) et du Socle en zone d'alimentation (BR02). Cette étude fait suite à une précédente convention « *Caractérisation de la concentration de référence de certains paramètres chimiques présents naturellement dans les masses d'eau souterraine captives du Socle et du Crétacé (BR01) et du Landénien (BR03) en Région de Bruxelles-Capitale* » également menée par l'équipe HGE-ULiège pour Bruxelles Environnement.

Les concentrations de référence (ou de fond) seront déterminées pour les paramètres polluants à risque présents naturellement dans les eaux souterraines et les paramètres non à risque significativement présents dans ces masses d'eau. Les concentrations de référence (ou de fond) seront déterminées pour les paramètres de la liste minimale de la directive fille (2006/118/CE) révisée, à savoir : l'arsenic le cadmium, le plomb, le mercure, l'ammonium, le chlorure, les sulfates, les nitrites, le phosphore total¹ et la conductivité. Dans la directive fille, il est également précisé que les états membres doivent fixer des valeurs seuils pour le trichloroéthylène et le tétrachloroéthylène mais ces deux polluants sont d'origine exclusivement anthropique, les concentrations de référence ne seront donc pas déterminées pour ces composants. A la liste minimale s'ajoutent les paramètres à

¹ Dans la directive fille, pour le phosphore, le choix est laissé aux Etats membres de fixer une valeur seuil pour le phosphore total ou les phosphates. En Région de Bruxelles-Capitale (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale, 2014), la valeur seuil a été fixée pour le phosphore total. Les concentrations de références seront déterminées dans cette étude pour le phosphore total et les phosphates pour être le plus précis possible et pouvoir comparer les valeurs avec les autres régions.

risque spécifiques mis en évidence par les programmes de surveillance des différents états/régions, soit le Ni pour le Région de Bruxelles-Capitale (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale, 2016). Les concentrations de référence seront également déterminées pour les paramètres suivants : Al, B, Ca, Cu, F, Fe, K, Mg, Mn, Na, NO₃, Zn pour caractériser au mieux les masses d'eau étudiées.

Les concentrations de références pour les paramètres repris ci-dessus seront fixées selon les principes à prendre en considération repris dans la directive (2014/80/UE) à savoir :

- Se fonder sur la caractérisation des masses d'eau souterraine ainsi que sur les résultats de la surveillance des eaux souterraines conformément à la directive 2000/60/CE ;
- Tenir compte du fait que les conditions de circulation et les propriétés chimiques des eaux souterraines connaissent des variations aussi bien latérales que verticales ;
- Lorsque les données ne sont pas disponibles en quantité suffisante, il convient d'en rassembler davantage et, dans l'intervalle, de fixer les concentrations de référence à partir de ces données de surveillance limitées, le cas échéant à l'aide d'une méthode simplifiée utilisant un sous-ensemble d'échantillons pour lesquels les indicateurs ne révèlent aucune influence de l'activité humaine.
- Il y a lieu de prendre également en considération les informations sur les transferts et les processus géochimiques, lorsqu'elles sont disponibles.
- Si les données sont vraiment insuffisantes, dans l'intervalle pour l'acquisition de nouvelle données, il convient d'estimer les concentrations de référence en se fondant sur des résultats statistiques de référence pour le même type de nappes aquifères situées dans d'autres zones pour lesquelles suffisamment de données de surveillance sont disponibles.

Ce rapport s'articule en quatre parties : (1) une recherche bibliographique, (2) la description de la méthodologie utilisée, (3) l'analyse des données et la détermination des concentrations de référence pour les trois masses d'eau souterraine étudiées et enfin (4) des recommandations et perspectives.

La recherche bibliographique a été effectuée sur les teneurs en éléments majeurs et mineurs rencontrés dans des aquifères européens présentant des contextes hydrogéologiques semblables aux 3 masses d'eau souterraine de la Région de Bruxelles-Capitale étudiées dans cette étude. Dans cette partie, se trouve également une présentation des méthodes utilisées en Wallonie et en Flandre pour déterminer les concentrations de référence et les valeurs seuils.

La partie concernant l'analyse des données se divise en trois chapitres, un par masse d'eau étudiée. Les données disponibles sont d'abord présentées puis elles sont analysées pour comprendre les processus géochimiques influençant la minéralisation des eaux. Sur base de l'analyse, des concentrations de référence sont ensuite proposées.

Un chapitre porte également sur des recommandations pour améliorer l'estimation des concentrations de référence avec notamment des propositions d'acquisition de nouvelles données

2. Approche bibliographique

2.1. Synthèse bibliographique des concentrations de référence au sein d'aquifères européens

La première partie de ce travail porte sur une étude bibliographique. Avant d'analyser les données de la Région de Bruxelles-Capitale et de déterminer des concentrations de référence, la recherche portera sur les teneurs en éléments majeurs et mineurs dans des aquifères avec des typologies semblables à ceux de la zone étudiée.

Cinq masses d'eau souterraine ont été définies en Région de Bruxelles-Capitale (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale, 2010). Le Tableau 2-1 reprend les informations principales, le nom des masses d'eau, la lithologie, le contexte hydrogéologique (libre, captif, à proximité ou éloigné de la mer) et le nombre de stations de mesure présentes sur le territoire bruxellois dont les analyses ont été investiguées dans le cadre de l'étude portant sur la période de 2004 à 2016 pour le suivi qualitatif. Les masses d'eau étudiées dans le cadre de cette étude sont celles en bleu dans le tableau.

Masse d'eau	Lithologie	Contexte hydrogéologique	Nb stations de mesure
BR01 : Socle et Crétacé	Grès, schistes, quartzites et craies	Captif, ± 100 km mer	9
BR02 : Socle en zone d'alimentation	Grès, schistes, quartzites	Captif, ± 100 km mer	5
BR03: Sables du Landénien	Sables et argiles	Captif, ± 100 km mer	15
BR04 : Sables yprésiens (région des collines)	Sables et quelques couches d'argile	Libre (localement captif), ± 100 km mer	4
BR05: Sables du Bruxellien	Sables	Libre (localement captif), ± 100 km mer	51

Tableau 2-1 : Résumé des informations concernant les cinq masses d'eau de la Région Bruxelles-Capitale (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale, 2010 & Buffel and Matthijs, 2001). Les lignes du tableau correspondant aux masses d'eau étudiée dans le cadre de cette étude sont colorées en bleu.

De nombreuses études ont été menées à l'échelle internationale pour déterminer les teneurs habituelles en éléments majeurs et mineurs des principaux aquifères. En Europe, elles ont principalement été réalisées dans le cadre des projets BaSeLiNe (EVK-CT-1999-00006) (Edmunds and Shand, 2008) et FP6 BRIDGE (Background cRiteria for the Identification of Groundwater thrEsholds) (Müller, 2006). Ces deux projets européens ont défini des gammes de valeurs de concentration de référence de chaque paramètre pour les principaux types d'aquifères en Europe. Suite à la Directive Cadre Eau (DCE 2000/60/CE) et sa directive fille (2006/118/CE), de nombreux états membres ont aussi réalisé des études sur la teneur en éléments majeurs et mineurs de leurs masses d'eau. Il existe donc un certain nombre de données pour pouvoir approximer les teneurs attendues dans les masses d'eau souterraine de la Région de Bruxelles-Capitale.

Les aquifères/masses d'eau souterraine (MESO) qui ont été choisis pour avoir une idée des concentrations attendues dans les masses d'eau de la Région de Bruxelles-Capitale sont présentés dans le Tableau 2-2. Il s'agit de données provenant de Belgique (Région Wallonne, Région Flamande), de France et d'Angleterre. Les méthodologies appliquées ne sont pas les mêmes dans les différents pays/régions.

En Wallonie et en Flandre, les masses d'eau qui sont présentées dans le Tableau 2-2 sont généralement équivalentes (logées dans les mêmes aquifères) et en continuité avec celles de la Région de Bruxelles-Capitale. La teneur habituelle en éléments majeurs et mineurs des masses d'eau est donnée en Flandre par le percentile 90. En Wallonie, elle est également donnée pour chaque masse d'eau par le percentile 90 mais la moyenne des valeurs de chaque aquifère (à l'échelle de la Wallonie) est également présentée. La méthodologie suivie par ces 2 régions est présentée plus en détail dans le paragraphe 2.2.

En France, la détermination des concentrations de référence n'a pas été réalisée par masse d'eau. L'ensemble des données du réseau de monitoring a été classé selon 4 critères : la lithologie, le type d'aquifère, la distance à la côte et la teneur en nitrate pour définir différentes typologies d'aquifères. Une analyse statistique simple a été réalisée pour chaque typologie (min, max, moyenne, médiane, écart-type, p25 et le p75). Les typologies qui seront présentées ici sont celles qui sont semblables aux masses d'eau de la Région de Bruxelles-Capitale et dont les teneurs en nitrate sont inférieures à 10 mg/L pour exclure les eaux influencées par l'activité anthropique.

Au Royaume-Uni, environ 30 zones d'études ont été définies sur base de la lithologie des principaux aquifères et des données disponibles. Une étude détaillée a été réalisée pour chaque zone d'étude pour comprendre les processus influençant la minéralisation. La composition de l'aquifère est décrite par le minimum, le maximum, la moyenne, la médiane et le percentile 97,7. Les 2 aquifères du Royaume-Uni présentés dans le tableau 2-2 ont une lithologie et un contexte hydrogéologique semblables à ceux des masses d'eau de la Région Bruxelles-Capitale.

Les teneurs habituelles en éléments majeurs et mineurs de ces différents aquifères sont présentées dans les Tableaux 2-3, 2-4 et 2-5. Les Tableaux 2-3 et 2-4 concernent des aquifères sableux qui pourraient donc être comparés aux masses d'eau des sables de l'Yprésien (région des collines) (BR04) et des sables du Bruxellien (BR05). Le Tableau 2-5 reprend les teneurs habituelles en éléments majeurs et mineurs des aquifères localisés dans des formations schisto-gréseuses. Ces valeurs pourront être comparées aux données géochimiques de la masse d'eau du Socle en zone d'alimentation (BR02).

Les valeurs des tableaux 2-3, 2-4 et 2-5 permettent d'approximer les concentrations attendues dans les masses d'eau de la Région de Bruxelles-Capitale. De manière générale, les éléments majeurs ont un ordre de grandeur relativement similaire, dans les aquifères de même typologies mais des différences relativement importantes existent notamment pour le chlore et les métaux. Des aquifères avec une lithologie semblable peuvent avoir des signatures hydrochimiques différentes parce que de nombreux processus différents peuvent influencer la minéralisation de l'eau souterraine.

Il faut aussi noter que pour les métaux la concentration donnée dans les tableaux est soit en fraction totale soit en fraction dissoute. La première valeur (qu'on appellera par la suite « concentration

totale » ou qu'on précisera en ajoutant le vocable « total » à l'élément chimique concerné ; ex : Fe total) est mesurée sur de l'eau brute (non filtrée) et reflète ce qui est dissous dans l'eau et ce qui s'y trouve sous forme particulaire ou colloïdale. La deuxième valeur (qu'on appellera par la suite « concentration dissoute » ou qu'on précisera en ajoutant le vocable « dissous » à l'élément chimique concerné ; ex : Fe dissous) est mesurée sur échantillon filtré et reflète uniquement ce qui était dissous dans l'eau (les particules et colloïdes étant éliminés par la filtration). La concentration est déterminée pour les métaux dissous en Région Flamande et au Royaume-Uni. Le type d'éléments analysés n'est pas précisé pour les données provenant de la Région wallonne et la France.

Pays/ Région	Auteur(s) (Date)	Méthodologie	MESO/ aquifère	Lithologie	Contexte hydrogéologique	Nb stations de mesure
Belgique : Flandre	VMM (Vlaams Milieumaatschappij) (2016)	Les concentrations de référence sont déterminées sur base d'une approche statistique (percentiles 90). Les données proviennent des réseaux de mesures phréatique et primaire du VMM entre 2004 et 2013 sans influence anthropique. Les concentrations de références sont définies pour chaque masse d'eau.	Sables yprésiens (région des collines) Ieperiaan Aquifer Heuvelstreken CVS_0800_GWL_3	Sables	Nappe semi-captive, <100 km mer	
			Sables du Bruxellien Brusseliaan aquifer BLKS_0600_GWL_1	Sables	Nappe libre, <100 km mer	
			Socle et Crétacé en zone d'alimentation Sokkel+Krijt Aquifersysteem (voedingsgebied) SS_1300_GWL_2	Craies, schistes, phyllades, grès	Zone d'alimentation Nappe semi-captive, <100 km mer	
Belgique : Wallonie	DGO3 (Direction Générale Opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement) (2015)	Les concentrations de référence sont calculées comme percentiles 90 des concentrations moyennes des sites non influencés par une pollution ponctuelle pour chaque combinaison masse d'eau + aquifère principal	E053 Sables du Landénien et de l'Yprésien Est	Sables, argiles	Nappe libre, >100 km mer	11
			E031 Sables du Landénien et de l'Yprésien Ouest	Sables, argiles	nappe libre et localement captive, >100 km mer	5
			E061 Sables du Landénien et de l'Yprésien Ouest	Sables, argiles	nappe libre et captive, >100 km mer	7
			E051 Sables du Bruxellien	Sables	Nappe libre, >100 km mer	80
			E160 Cambro-Silurien du Massif du Brabant	Grès, schistes, quartzites	Nappe semi-captive, >100 km mer	21
France	L. Chery, BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) (2006)	Plusieurs typologies d'aquifères ont été définies sur base de 4 niveaux : la lithologie, la distance à la côte et le type d'aquifère (libre ou captif et la teneur en nitrate. Une analyse statistique simple a été réalisée pour chaque typologie (min, max, moyenne, médiane, écart-type, p25 et le p75)	/	Sables	Nappe captive <100 km mer	4
					Nappe captive >100 km mer	52
					Nappe libre <100 km mer	34
					Nappe libre >100 km mer	93
				Grès	Captif <100 km mer	72
					Captif >100 km mer	1

Royaume-Uni	British Geological Survey (2002-2005)	Shand et al (2004)	Environ 30 zones d'études ont été définies en Angleterre, au Pays de Galles et en Ecosse, sur base de la lithologie des principaux aquifères et des données disponibles. Une étude a été réalisée pour chaque zone d'étude pour comprendre les processus influençant la minéralisation. Les concentrations de référence sont déterminées sur base de la médiane et du p97.7	The Bridport Sands of Dorset and Somerset	Sables	Libre <100 km mer	2
		Neumann et al (2004)		The Palaeogene of the Wessex Basin	Sables et argiles	Libre/captif/ semi-captif <100 km mer	52

Tableau 2-2 : Informations générales sur les études réalisées sur des masses d'eau similaires à celles de la Région de Bruxelles-Capitale

Pays/ Région		Belgique : Région Flamande		Belgique : Région Wallonne				Royaume-Unis											
Masse d'eau		Sables yprésiens (région des collines) CVS_0800_GWL_3	Sables du Bruxellien BLKS_0600_GWL_1	Sables du Bruxellien et du Landénien	E053 Sables du Landénien et de l'Yprésien Est	E031 Sables du Landénien et de l'Yprésien Ouest	E061 Sables du Landénien et de l'Yprésien Ouest	E051 Sables Bruxelliens	The Bridport Sands of Dorset and Somerset					The Palaeogene of the Wessex Basin					
Lithologie		Sables	Sables	Sables	Sables	Sables	Sables	Sables	Sables					Sables et argiles					
Contexte		Semi-captif, >100 km mer	Libre, >100 km mer		Libre, <100 km mer			Libre, <100 km mer	Libre <100 km mer					Libre/captif/ semi-captif <100 km mer					
Nb stations					11	5	7	80	52					27					
Paramètres	unité	P90	P90	moyenne	P90	P90	P90	P90	min	max	moyenne	P50	p 97.7	min	max	P50	moyenne	p 97.7	
Ca	mg/L	200	160	131,4					42	165	115	116	156	5,2	128	47	48,8	102	
Na	mg/L	54	18	14,9					73	101	22	16	75	11,4	111	19,2	25,5	105,3	
Mg	mg/L	27	18	10,5					2,2	15	5,9	5	13	1,72	15,7	5,46	7,37	15,1	
K	mg/L	10	4,1	1,94					0,4	11	2,4	2	5	0,9	15,5	2,4	3,61	11,02	
NH4	mg/L	0,58	0,66	0,01	0,06	0,6	0,96	0,03	<0.003	0,14	0,14	0,01	0,068	<0.03	0,323	0,0375	0,0646	0,232	
Cl	mg/L	87	55	47,2	79,89	115,28	107,87	61,07	12	55	28	26	49	17,4	108	33,7	37,5	104	
HCO3	mg/L			268,8					115	447	297	300	413	5,2	315	153	146	306	
SO4	mg/L	190	150	77,5	122,39	286,5	229,24	91,69	14	113	50	44	110	27,7	91,8	29,6	33,7	87,8	
SiO2	mg/L			26															
NO3	mg/L			40,6	60,8	164,06	152,2	65,55	0,009	42,7	5	4,9	16,7	<0.2	34,8	<0.2	4,32	33,7	
Al total	µg/L			20														728	
Al dissous	µg/L	120	120						0,36	1103	29	3	66	<1.0	1152	5	99		
As total	µg/L				0,58	2,42	2,19	0,59										3,1	
As dissous	µg/L	6							0,15	12	0,94	0,52	3,74	<0.5	3,1	<0.5	0,61	3,1	
B total	µg/L				19,05	83,7	675,1	37,3										302	
B dissous	µg/L	67	39						<20	573	58	22	372	5	310	26,5	51,2		
Ba	µg/L			38,2					1,3	17,6	6,8	5,7	16,2	13,9	404	65,4	90,6	324	
Cd total	µg/L				0,12	0,14	0,07	0,09										0,31	
Cd dissous	µg/L								<0.05	0,67	0,093	0,08	0,45	<0.05	0,33	<0.05	0,05	0,31	
Cr total	µg/L				2,84	1,7	0,76	2,57										0,9	
Cr dissous	µg/L								<0.5	6,7	0,52	<0.5	1,76	<0.5	0,9	<0.5	0,35		
Cu total	µg/L				5,89	10,76	99,5	2,85										6,79	
Cu dissous	µg/L	5							<0.04	68,97	2,56	0,5	10,8	0,4	7,8	1,2	1,85		
F	µg/L	300	200	100					120	740	290	270	690	<100	3400	<100	454	3147	
Fe total	µg/L			10	24,29	3764,47	446,35	22,41										11100	
Fe dissous	µg/L	5500	4400						<5	887	133	6,5	844	7	11300	680	1970		
Mn total	µg/L			3	3,44	145,07	549,36	4,58										310	
Mn dissous	µg/L	1000	520						<2	348	29	1	282	<2	310	50	90		
Ni total	µg/L				2,39	5,31	6,03	1,83										23,3	
Ni dissous	µg/L	15	6						<0.2	72	6,2	6	17	<0.2	26,1	0,6	5,12		
Pb total	µg/L				0,73	3,33	2,97	0,71										2,09	
Pb dissous	µg/L								<0.1	3,6	0,4	0,27	1,58	<0.1	2,9	0,1	0,36		
Zn total	µg/L				51,61	37,86	406,25	24										332	
Zn dissous	µg/L	110	30						<0.5	227	14	2,7	70	2,1	373	18,8	58,9		

Tableau 2-3 : Teneurs habituelles en éléments majeurs et mineurs pour des aquifères sableux (partie 1)

Pays/ Région		France																								
Masse d'eau		Sables							Sables							Sables							Sables			
Lithologie		Sables							Sables							Sables							Sables			
Contexte		Captif <100 km mer							Captif >100 km mer							Libre <100 km mer							Libre >100 km mer			
Nb stations		4							52							34							93			
Paramètres	unité	min	max	moyenne	P25	P50	P75	min	max	moyenne	P25	P50	P75	min	max	moyenne	P25	P50	P75	min	max	moyenne	P25	P50	P75	
Ca	mg/L	24.5	76	50.98	28.5	51.7	73.45	73	181.7	111.76	98.2	107	125.5	12.8	168	78.84	39.5	76.15	117	34,6	160	86,35	60,7	89	113	
Na	mg/L	6.2	41.9	25.1	8.9	26.15	41.3	4	64	9.15	6.15	7.6	9.3	2.88	95	31.76	13.25	32.125	42.8	1,8	48,9	12,33	6,9	10	15	
Mg	mg/L	1.07	28	13.24	2.035	11.95	24.45	5.2	49	21.46	17.8	21	24.5	2.05	39.9	17.69	4.2	10.725	36.1	1,7	48	14,58	5,6	11	22	
K	mg/L	0.86	1.85	1.54	1.28	1.72	1.795	0.83	7.5	1.86	1.2	1.5	1.85	0.9	18.9	6.61	2.1	3.95	12.4	0,2	11,4	4,45	2,3	3,8	6.9	
NH4	mg/L	0.05	0.2	0.09	0.05	0.05	0.125	0.02	0.31	0.08	0.05	0.05	0.1	0.01	0.41	0.14	0.05	0.065	0.3	0,01	1,55	0,18	0,05	0,1	0.19	
Cl	mg/L	10.8	84	40.15	12.85	32.9	67.45	7.5	73	18.61	13	14.3	19.75	4	185	35.5	16.05	27	47	1,86	36	16,34	10,25	15,7	21	
HCO3	mg/L	80.5	328	214.33	116.15	224.4	312.5	274	421	363.03	339.5	368.5	395.5	22.55	482	292.54	164.7	279.8	443	97,6	461	305,57	244	305	383.5	
SO4	mg/L	0.41	42	15.05	2.755	8.9	27.35	12	187	60.51	30.5	43.5	84	2.3	190	56.55	16.1	37.925	108	7,8	71	32,12	20,2	28	39.175	
SiO2	mg/L	12.9	20.2	15.38	12.95	14.2	17.8	8	34	18.7	14.5	18	22	5.6	23.45	12.66	10	11.9	13	1	28,27	12,01	8	10,7	15.05	
NO3	mg/L	0.02	2.2	1.11	0.51	1.1	1.7	0.01	8	3.04	2	3	4	0.1	9.3	2.28	0.5	0.5	3.5	0,1	9,7	2,80	1	2	3.575	
Al total	µg/L																									
Al dissous	µg/L																									
As total	µg/L	1	1	1	1	1	1							5	10	5.83	5	5	5	1	25	7,14	2	5	5	
As dissous	µg/L																									
B total	µg/L							10	30	20	10	20	30	20	490	99.5	20	20	27	20	190	90,15	46	85	125	
B dissous	µg/L																									
Ba	µg/L																			7	130	28,73	10	18	30	
Cd total	µg/L																									
Cd dissous	µg/L																									
Cr total	µg/L													2	6	3.4	2	2	5.5	1	10	5,00	1	5	10	
Cr dissous	µg/L																									
Cu total	µg/L	0.5	20	10.25	0.5	10.25	20	1	100	51.78	50	50	50	1	30	14.9	10	20	20	1	230	31,55	5	30	50	
Cu dissous	µg/L																									
F	µg/L	30	230	120	65	115	180	150	2130	370	200	295	410	50	1600	580	100	350	1090	40	2100	400	125	200	460	
Fe total	µg/L	20	95	60	28	62.5	92	20	2150	338.96	30	120	390	2	2462	325.79	25	192.5	460	10	4970	512,34	60	250	753	
Fe dissous	µg/L																									
Mn total	µg/L	5	56	21.5	5	12.5	38	5	62	12.37	10	10	10	1	783	42.26	10	20	20	1	1150	51,07	6	12	32	
Mn dissous	µg/L																									
Ni total	µg/L													5	10	5.9	5	5	5.4	1	20	6,25	2	5	7.5	
Ni dissous	µg/L																									
Pb total	µg/L	1	5	3	1	3	5	2	20	8.28	5	10	10	1	20	6.44	2	5	10	1	20	7,03	5	5	10	
Pb dissous	µg/L																									
Zn total	µg/L	18	20	19	18	19	20	10	130	46.4	50	50	50	4	50	29.57	10	30	50	1	260	36,62	13	30	50	
Zn dissous	µg/L																									

Tableau 2-4 : Teneurs habituelles en éléments majeurs et mineurs pour des aquifères sableux (partie 2)

Pays/ Région		Belgique : Région Flamande	Belgique : Région Wallonne		France						
Masse d'eau		Socle et Crétacé en zone d'alimentation SS_1300_GWL_2	E160 Cambro-Silurien du Massif du Brabant								
Lithologie		Grès, schistes, quartzites	Grès, schistes, quartzites		Grès	Grès					
Contexte		Semi-captif, <100km mer	Semi-Captif, >100km mer		Captif <100 km mer	Captif >100 km mer					
Nb stations				21	1	2					
Paramètres	unité	P90	moyenne	P90	Valeur	min	max	moyenne	P25	P50	P75
Ca	mg/L	110	101.5		70	41.4	44.6	43	41.4	43	44.6
Na	mg/L	88	16.4		11.4	50.7	57	53.85	50.7	53.85	57
Mg	mg/L	27	13.7		3	18.5	20	19.25	18.5	19.25	20
K	mg/L	22	2.51		1.4	3.6	4.4	4	3.6	4	4.4
NH4	mg/L	0.52	0.03	0.16	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cl	mg/L	57	45.3	167.45	19	14.6	19.5	17.05	14.6	17.05	19.5
HCO3	mg/L		212.6		207.4	287	292	289.5	287	289.5	292
SO4	mg/L	71	87.6	410.44	7.1	35.5	54.7	45.1	35.5	45.1	54.7
SiO2	mg/L		13.6		10.5	13.3	13.6	13.45	13.3	13.45	13.6
NO3	mg/L		15.9	14.16	6.3	1	1	1	1	1	1
Al total	µg/L		62								
Al dissous	µg/L										
As total	µg/L			3.09							
As dissous	µg/L	6									
B total	µg/L			85.93							
B dissous	µg/L	660									
Ba total	µg/L		44								
Cd total	µg/L			0.2							
Cd dissous	µg/L										
Cr total	µg/L			3.56							
Cr dissous	µg/L										
Cu total	µg/L			6.4		2	4	3	2	3	4
Cu dissous	µg/L										
F	µg/L	1700	110		370	460	480	470	460	470	480
Fe total	µg/L		647	2887.28		34	62	48	34	48	62
Fe dissous	µg/L	1100									
Mn total	µg/L		402	833.09		5	5	5	5	5	5
Mn dissous	µg/L	90									
Ni total	µg/L			13.38							
Ni dissous	µg/L										
Pb total	µg/L			1.04		5	10	7.5	5	7.5	10
Pb dissous	µg/L										
Zn total	µg/L			89.23	35	100	100	100	100	100	100
Zn dissous	µg/L	17									

Tableau 2-5 : Teneurs habituelles en éléments majeurs et mineurs pour des aquifères schisto-gréseux

2.2. Etude comparative et critique des méthodologies développées pour l'établissement des concentrations géochimiques de référence de partenaires européens en vue d'établir des valeurs seuils coordonnées

2.2.1. Recommandations européennes

Détermination des concentrations de référence

Plusieurs projets européens se sont penchés sur les méthodologies pour déterminer les concentrations de référence des eaux souterraines. Les principaux sont le projet FP6 BRIDGE (Müller, 2006) et le projet BaSeLiNe (Edmunds and Shand, 2008).

Ces projets détaillent plusieurs méthodologies envisageables en fonction du niveau de connaissance de l'aquifère (Figure 2-1). Si l'aquifère est peu connu et qu'il n'y a pas (ou peu) de données de monitoring (cas de figure n°1), il est possible d'estimer des concentrations de référence sur base des résultats statistiques obtenus pour un aquifère de typologie semblable. Dans le cas d'un aquifère pour lequel il existe des données de monitoring mais avec un niveau moyen de connaissance (cas de figure n°2), il est possible de déterminer des concentrations de référence sur base d'une méthode simplifiée (basée sur la présélection des échantillons à considérer). Cette méthode sera présentée ci-dessous. Si l'aquifère est très bien connu, avec un grand réseau d'échantillonnage et de nombreuses analyses (cas de figure n°3), les valeurs de référence peuvent être déterminées sur base d'une approche élaborée spécialement pour l'aquifère étudié.

La méthode simplifiée de présélection utilisée dans le cas de figure n°2 est basée sur l'exclusion de certains échantillons présentant des concentrations pour des indicateurs de pression anthropique supérieures à certaines valeurs. Ces indicateurs peuvent être des polluants organiques, mais aussi certains polluants inorganiques en concentration élevée, par exemple : NO₃, K, Cl, Na, NH₄. Cependant, il faut s'assurer que ces substances ne sont pas présentes naturellement à des concentrations élevées. Le critère qui est habituellement utilisé est d'exclure les échantillons avec des teneurs en nitrate supérieures à 10 mg/L. Dans des milieux anaérobies, il faut cependant faire attention. S'il y a présence d'un processus de dénitrification, l'absence de nitrate n'est en effet pas forcément indicatrice d'une absence de contamination anthropique. L'impact anthropique peut également être évalué en datant l'eau. Si la recharge est datée d'il y a plus d'un siècle, l'impact anthropique sera vraisemblablement nul ou assez faible. Une fois les échantillons potentiellement contaminés enlevés du jeu de données, les concentrations de référence peuvent être déterminées sur base d'une méthode statistique classique. Habituellement, c'est le percentile 90 des concentrations observées qui est choisi comme valeur de référence. Dans le cas d'un aquifère bien connu et sans influence anthropique, le percentile 97.7 peut être utilisé.

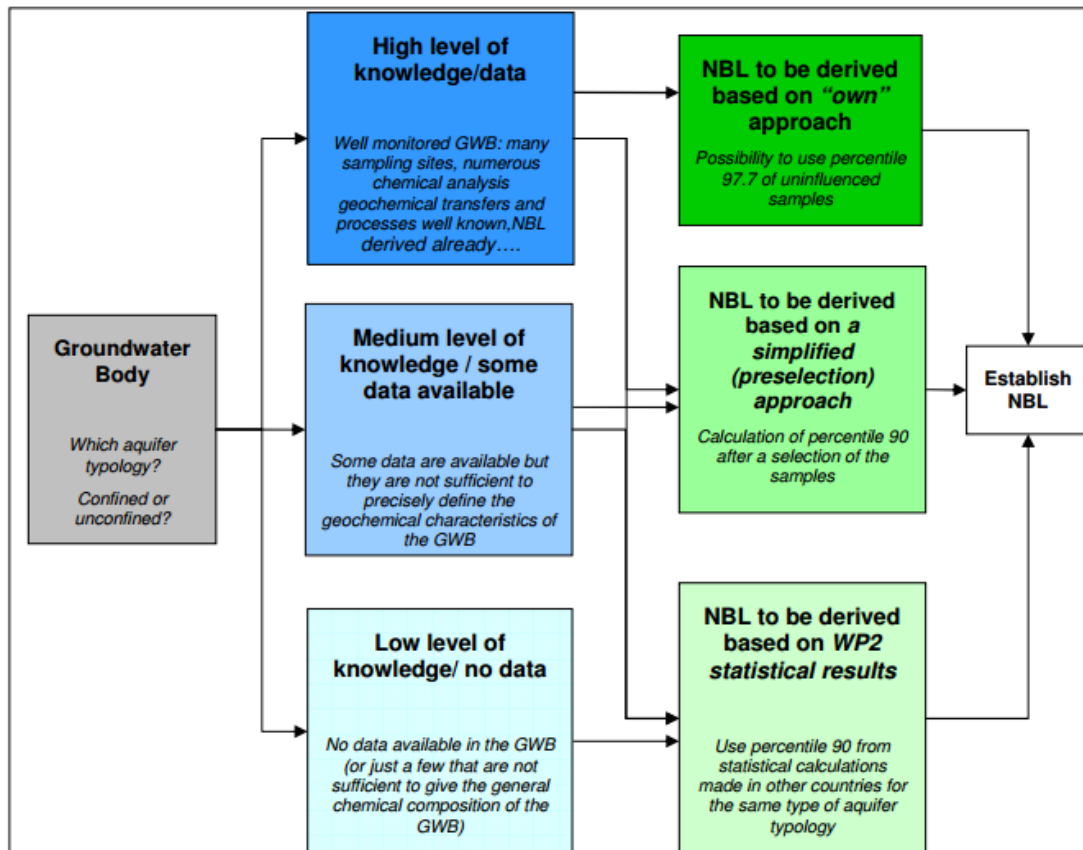


Figure 2-1 : Méthodologie pour la détermination des concentrations de référence proposée par le projet Bridge (Müller, 2006)

D'après ces études européennes, les polluants pour lesquels il est important de déterminer les concentrations de référence sont les suivants : Al, Cr, Cu, Zn, As, NO₃, PO₄, NO₂, NH₄, Cd, Cl, Hg, Pb, SO₄. La liste minimale de polluants pouvant être présents naturellement, définie dans la directive fille (2006/118/CE) et sa révision (2014/80/EU) est un peu moins exhaustive : As, Cd, Pb, Hg, NH₄, Cl, SO₄, NO₂, P/PO₄. A cette liste s'ajoutent les paramètres à risque spécifiques mis en évidence par les programmes de surveillance des différents états/régions. Pour la Région de Bruxelles-Capitale, le Ni a été identifié comme paramètre à risque. Les polluants organiques n'étant normalement pas présents naturellement dans les eaux souterraines, il n'est pas pertinent de déterminer des concentrations de référence pour ces polluants. D'autres éléments chimiques naturellement présents dans les eaux souterraines peuvent, par contre, être intéressants pour déterminer l'état qualitatif de l'aquifère, en particulier Na, K, pH, la conductivité électrique, Ca, Mg, HCO₃, B, Fe, Mn, Sr, Ni, F. Il peut donc être pertinent de définir les concentrations de référence pour ces éléments.

Plusieurs recommandations pratiques sont données dans le projet BRIDGE (Müller, 2006) pour la détermination des concentrations de référence :

- Pour les concentrations inférieures à la limite de quantification, il est recommandé de prendre la valeur de la limite de quantification divisée par deux pour l'analyse statistique. Généralement pour les éléments en traces, l'approche statistique est plus limitée à cause d'un nombre d'échantillons souvent réduit et d'un nombre important de valeurs sous la limite de quantification. De plus, la limite de quantification peut varier pour un même paramètre si les méthodes analytiques utilisées diffèrent. Il faut donc faire très attention au

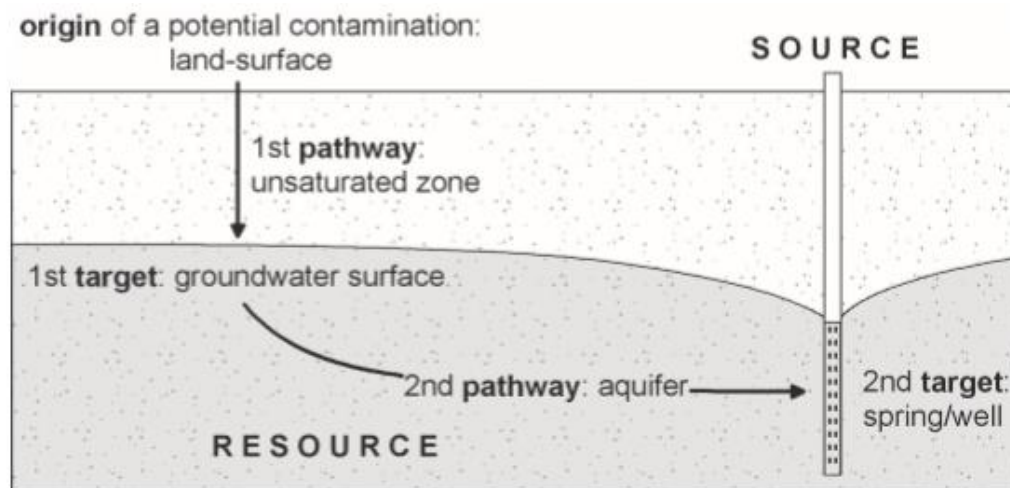
nombre d'échantillons et à la qualité des données. Si celle-ci n'est pas jugée suffisante pour certains éléments en traces, il peut être préférable de déterminer la concentration de référence sur base des valeurs obtenues pour des aquifères types en Europe.

- Il est prudent d'exclure les échantillons avec une erreur sur la balance ionique excédant 10%.
- Il est recommandé d'exclure des échantillons pour lesquels la profondeur de prélèvement est inconnue.
- Les aquifères salins doivent être étudiés séparément des autres aquifères. De même, il est préférable de séparer les échantillons des aquifères aérobies de ceux des aquifères anaérobies parce que les conditions d'oxydo-réduction ne sont pas les mêmes et donc les processus de minéralisation sont différents.
- Il est recommandé d'utiliser la médiane pour représenter une série temporelle de données pour une même station d'échantillonnage. De cette manière, tous les sites d'échantillonnage contribuent de manière égale à la détermination des concentrations de référence. Le calcul de la médiane permet de ne conserver qu'une valeur par site et par paramètre afin d'éviter toute redondance dans le jeu de données.

Détermination des valeurs seuils

Dans le projet Bridge (Müller, 2006), la méthodologie pour déterminer le statut (bon ou mauvais état) d'un récepteur (masse d'eau souterraine, source, écosystèmes des eaux de surface,...) est composée de plusieurs étapes (Figure 2-2). Premièrement, Il est nécessaire de comparer les valeurs mesurées avec les concentrations de référence (Natural Background Level (NBL)). Ensuite, dans les étapes 2 à 4, les valeurs mesurées sont comparées aux normes de qualité (Quality Standard (QS) en prenant en compte des facteurs de dilution et d'atténuation. Ces étapes ne sont pas pertinentes dans le cadre ce présent rapport parce qu'elles sont uniquement utilisées si l'eau souterraine est un récepteur intermédiaire². Dans le cas, où l'eau souterraine est le récepteur final, il faut juste prendre en compte l'étape 2a où les valeurs seuils sont dérivées à partir des concentrations de référence et

² Le concept de la vulnérabilité souterraine est basé sur le modèle origine – cheminement - objectif (récepteur). L'origine est la source potentielle de contamination. Le polluant s'écoule à travers la zone non saturé (le cheminement) pour atteindre l'aquifère (objectif/récepteur). Dans le cas de la protection de la ressource, le récepteur est l'aquifère mais dans le cadre de protections plus spécifiques (protection de captages, écosystèmes, ...), l'aquifère est un récepteur intermédiaire et le récepteur final est le puits, la source, ...



Modèle : origine-cheminement-objectif (Zwahlen, 2004)

des normes de qualité. Les normes de qualité généralement utilisées sont les normes de potabilité ou les normes de qualité environnementale. D'autres valeurs peuvent être également utilisées mais il est recommandé de choisir la valeur la plus contraignante pour déterminer les valeurs seuils. Pour calculer les valeurs seuils (Threshold values (TV)) les formules suivantes sont proposées :

$$\text{Si } \text{NBL} < \text{QS} \Rightarrow \text{TV} = (\text{QS} + \text{NBL}) / 2$$

$$\text{Si } \text{NBL} > \text{QS} \Rightarrow \text{TV} = \text{NBL}$$

Dans le cas de substances anthropiques (les concentrations de référence sont donc égale à 0), il est proposé que la valeur seuil soit égale à la moitié de la norme de qualité.

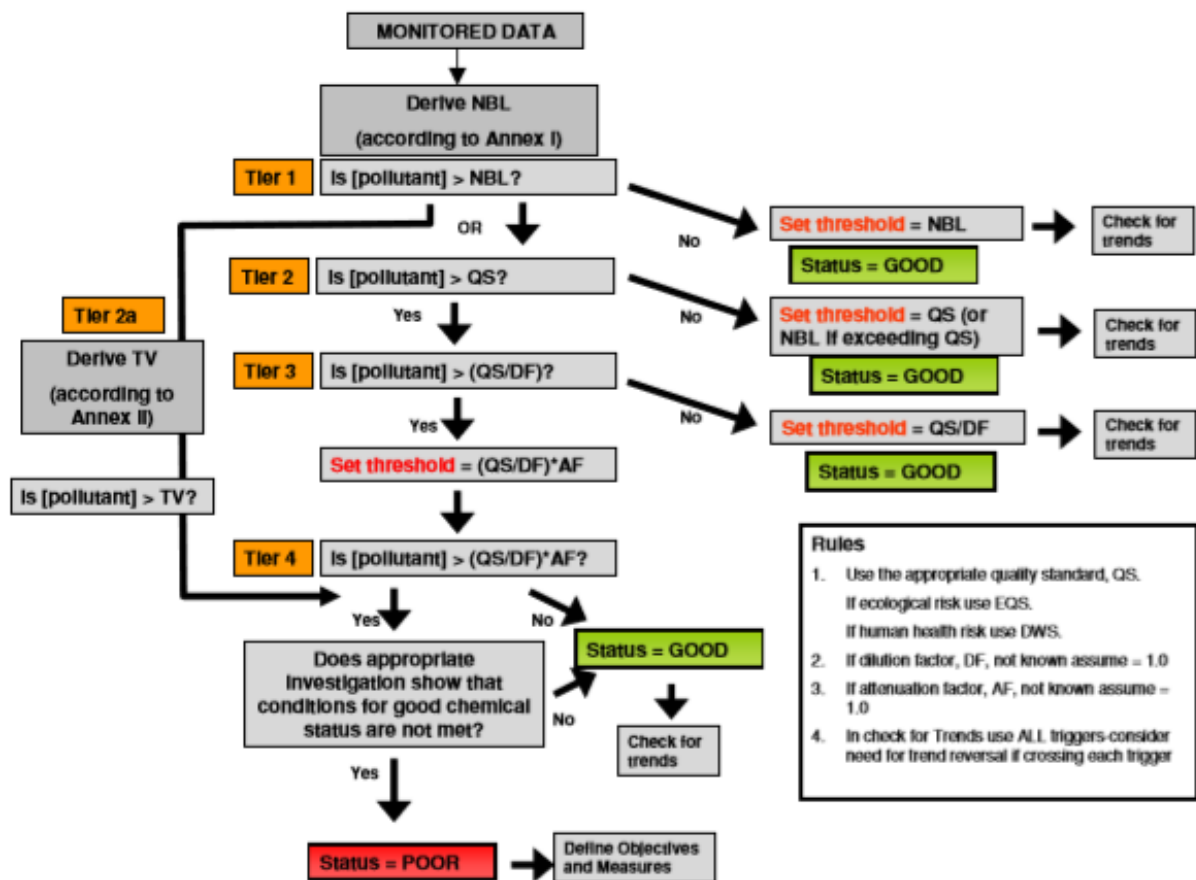


Figure 2-2 : Etapes pour déterminer le statut (bon ou mauvais état) d'un récepteur (Müller, 2006)

Pour aider les états membres (de l'Union européenne), dans la mise en œuvre de la Directive Cadre Eau (2000/60/EC), plusieurs des notes de guidance ont été élaborées. La note de guidance 18 (European Commission, 2009) est un guide pratique qui décrit les méthodologies pour déterminer les valeurs seuils, évaluer l'état de la masse d'eau et les éventuelles tendances. Cette note de guidance est principalement basée sur les résultats du projet BRIDGE (Müller, 2006) et sur la consultation de nombreux experts des eaux souterraines à travers l'Europe. Cette note n'est pas contraignante légalement c'est plutôt un support pour aider les Etats membres et ceux-ci peuvent l'adapter librement en fonction des caractéristiques de leurs masses d'eau.

La méthodologie proposée par la note de guidance (European Commission, 2009) pour la détermination des valeurs seuils est illustrée à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** La méthode est très semblable à ce qui est proposé dans le projet BRIDGE (Müller, 2006). Avant de déterminer les valeurs seuils il faut calculer les concentrations de référence (Background Level, BL). Il faut ensuite sélectionner des « valeurs critère » (CV) correspondant aux normes de qualité de la méthodologie du projet BRIDGE. La valeur critère est la concentration en polluant qui, si elle est dépassée, peut amener au mauvais état de la masse d'eau. Il y a deux types de valeurs critères : les critères environnementaux (protection des écosystèmes) et les critères d'usages (eau potable, cultures, industrie...). Ces valeurs ne tiennent pas compte des concentrations naturelles (concentration de référence). Il faut donc comparer ces valeurs critères avec les concentrations de référence. Comme dans le projet BRIDGE, si la concentration de référence est supérieure à la valeur critère alors la valeur seuil est égale à la concentration de référence. Par contre, si la concentration de référence est inférieure à la valeur critère alors la valeur seuil doit être comprise entre les deux. Dans ce deuxième cas de figure, Il est néanmoins suggéré que la valeur seuil soit légèrement supérieure à la concentration de référence pour prendre en compte une légère quantité de polluant qui serait liée à l'activité anthropique mais qui ne serait pas trop néfaste pour l'eau souterraine. De cette manière, il ne faudrait pas entreprendre trop de mesures de restauration pour des sites dont les concentrations dépasseraient très légèrement les concentrations de référence (European Commission, 2009). Pour rappel, les concentrations de référence sont déterminées par le percentile 90. Il y a donc 10% des puits dont les concentrations dépassent les concentrations de référence.

La note de guidance (European Commission, 2009) est donc est peu plus souple que le projet Bridge (Müller, 2006) dans le cas où la concentration de référence est inférieure à la valeur critère. Là où le projet Bridge préconise de faire la moyenne des deux, la note de guidance dit juste que la valeur seuil doit se trouver entre la concentration de référence et la valeur critère.

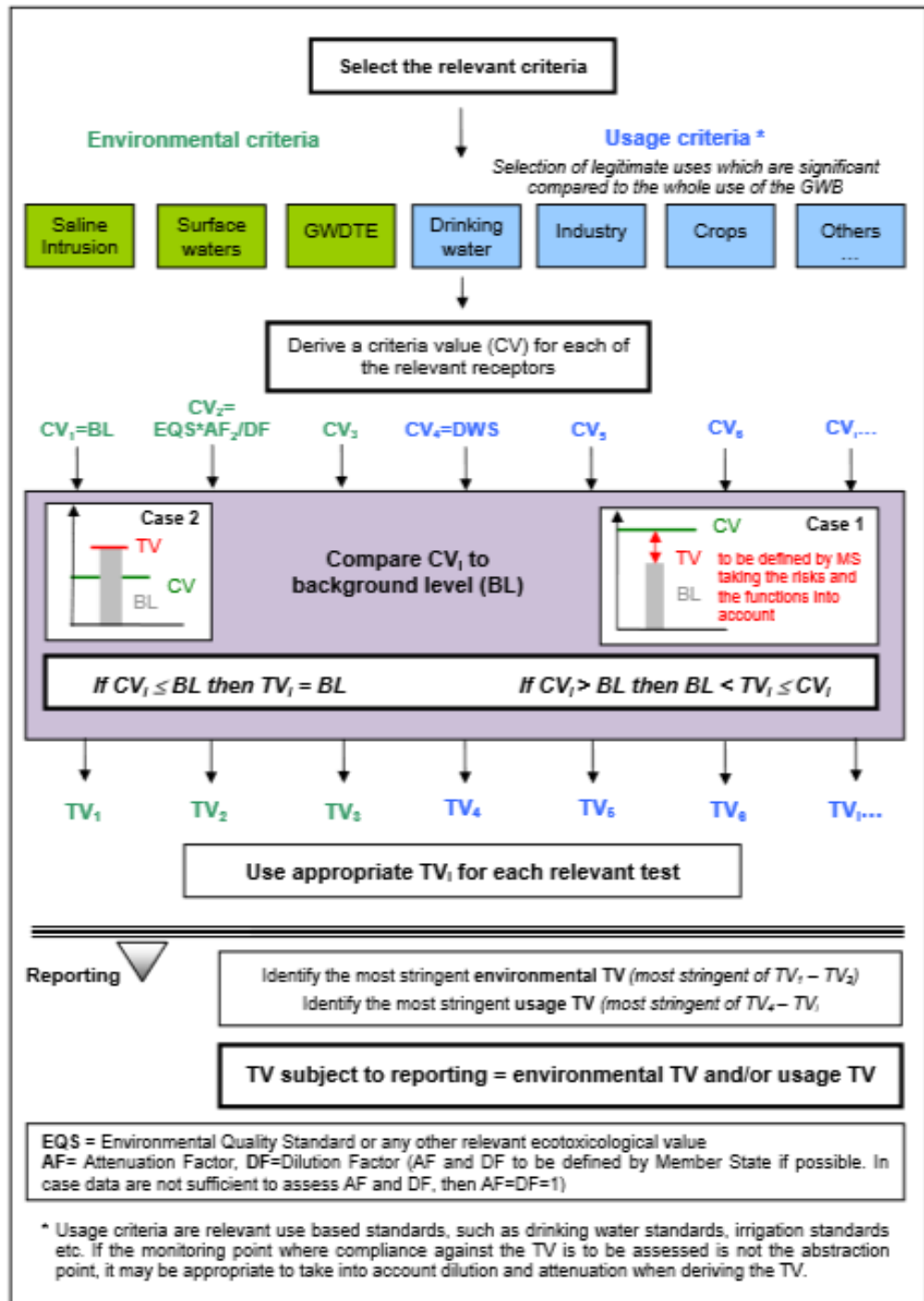


Figure 2-3 : Méthodologie de la note de guidance 18 pour établir les valeurs seuils (European Commission, 2009)

2.2.2. Approche de la Région wallonne

Concentrations de référence

En Région wallonne, les concentrations de référence sont calculées comme les percentiles 90 des concentrations moyennes des sites non influencés par des activités anthropiques pour chaque combinaison masse d'eau + aquifère principal (SPW-DGO3-DEE, 2016). Par rapport aux recommandations du projet BRIDGE, les masses d'eau sont plutôt dans le deuxième cas de figure avec une connaissance moyenne de l'aquifère. Les concentrations de référence ont été calculées pour les paramètres suivants : Sr, Cl, SO₄, Fe, Mn ; Cu, Zn, As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Sn, Se, NO₃, NO₂, NH₄,

P, B, C.O.T et oxydabilité. Les concentrations de référence de la Région wallonne sont présentées en annexe (Tableau 0-1).

Pour éliminer les sites influencés par l'activité anthropique, les analyses effectuées dans le contexte de la surveillance de sites à risques (centres d'enfouissement techniques, dépotoirs, sites industriels pollués, contrôles d'enquête...) ont été retirées du jeu de données. Ensuite, les points utilisés pour le réseau de surveillance DCE mais classés comme contaminés, ont été supprimés également des statistiques. Pour les sites restants (environ 1000 sites pour la Région wallonne), les moyennes des paramètres de chaque site ont été calculées. L'examen des valeurs atypiques (outliers) a amené à supprimer certains prélèvements singuliers vis à vis des autres pour un même site, et aussi à supprimer certains sites totalement singuliers par rapport aux autres sites de l'aquifère (Delloye F., communication personnelle, 28 juin 2018).

Pour éliminer les sites impactés, il n'y a pas eu de présélection comme supprimer les prélèvements avec des concentrations supérieures à 10 mg/L de NO₃. Les sites qui ont été éliminés correspondent plutôt à des pollutions ponctuelles. Les concentrations de référence calculées par la Région wallonne prennent en compte la pollution diffuse. Il s'agit donc plutôt de concentrations de fond que de concentrations de référence. Les percentiles 90 des concentrations en NO₃ ont également été calculés pour pouvoir juger de l'état des masses d'eau (Delloye F., communication personnelle, 28 juin 2018).

Valeurs seuils

Les valeurs seuils ont été établies à partir des valeurs de critères retenus pour l'évaluation de la qualité des eaux souterraines présentées dans le Tableau 2-6. Dans ce tableau la valeur critère du mercure est indiquée même s'il n'est plus considéré comme polluant des eaux souterraine en Wallonie³, il ne doit donc plus avoir de valeur seuil associée (SPW-DGO3-DEE, 2016).

Les valeurs critères ont été comparées aux concentrations de référence. Dans le cas où la concentration de référence est inférieure à la valeur critère alors la valeur seuil choisie est la valeur critère (Gouvernement Wallon, 2016). C'est en accord avec la note de guidance 18 qui préconise dans ce cas-là de choisir une valeur seuil entre la concentration de référence et inférieure ou égale à la valeur critère.

Lorsque la concentration de référence est supérieure à la valeur critère, la valeur seuil est généralement supérieure à la valeur critère pour prendre en compte la concentration de référence. C'est le cas pour les paramètres sulfates (masses d'eau RWE160, VS = 400 mg/l et RWM073, VS = 500 mg/l), ammonium (masse d'eau RWE060, VS = 1,5 mg/l), nickel (masse d'eau RWM141, VS = 30 µg/l) et zinc (masse d'eau RWM141, VS = 300 µg/l) (SPW-DGO3-DEE, 2016). Ces paramètres sont signalés par un * dans le Tableau 2-6.

³ A l'exception d'un site contaminé et confiné, le mercure n'a jamais été quantifié dans aucune analyse du réseau de surveillance DCE en Wallonie. La limite de quantification est 0,05 µg/L soit 5% de la valeur seuil de 1 µg/L fixée au 1er PGDH (Delloye F., communication personnelle, 6 septembre 2019).

Polluants d'origine naturelle ou anthropique	Critère prépondérant	Valeur "critère"
Arsenic*	Santé humaine (eau potable)	10 µg/l
Cadmium	Protection des écosystèmes	3 µg/l
Chrome VI (hexavalent)	Santé humaine (eau potable)	9 µg/l
Cuivre	Protection des écosystèmes	100 µg/l
Mercure	Santé humaine (eau potable)	1 µg/l
Nickel*	Santé humaine (eau potable)	20 µg/l
Plomb	Santé humaine (eau potable)	10 µg/l
Zinc	Protection des écosystèmes	200 µg/l
Ammonium (expression NH ₄)*	Santé humaine (eau potable)	0,5 mg/l
Chlorures	Principe de précaution	150 mg/l
Cyanures totaux	Santé humaine (eau potable)	50 µg/l
Nitrates (masses d'eau RWM100, RWR101, RWM102 et RWM103)	Protection des écosystèmes	25 mg/l
Nitrites (expression NO ₂)	Santé humaine (eau potable)	0,1 mg/l
Phosphore total (expression P ₂ O ₅)	Protection des écosystèmes	1,15 mg/l
Phosphore total (masses d'eau RWM100, RWR101, RWM102 et RWM103)	Protection des écosystèmes (eutrophisation des cours d'eau)	0,46 mg/l
Sulfates*	Santé humaine (eau potable)	250 mg/l
Substances artificielles confirmées comme polluants :		
2,6-dichlorobenzamide (BAM)	Principe de précaution	0,5 µg/l
Chlorothalonil ESA (métabolite VIS-01)	Principe de précaution	1,5 µg/l
Métazachlore ESA (forme sulfonique acide)	Principe de précaution	1,5 µg/l
Méthyl-terbuthylether (MTBE)	Principe de précaution	30 µg/l
Tétrachloréthylène	Santé humaine (eau potable)	4 µg/l
Trichloréthylène	Santé humaine (eau potable)	7 µg/l
1,2-Dichloréthylène	Principe de précaution	5 µg/l
Chlorure de vinyle	Protection des écosystèmes	0,25 µg/l

Tableau 2-6: valeurs critère pour les eaux souterraines en Région wallonne (Gouvernement Wallon, 2016)⁴

Dans le tableau en annexe reprenant les concentrations de référence des masses d'eau de Wallonie (Tableau 0-1), il est possible de constater que même dans le cas de concentrations de référence supérieures aux valeurs critère, certaines valeurs seuils ont été prises égales aux valeurs critères. Il y a plusieurs raisons à cela. La première est qu'il s'agit plutôt de concentration de fond que de concentration de référence. Certaines concentrations élevées sont donc liées à des activités humaines. C'est par exemple le cas de la combinaison masse d'eau RWE061/ aquifère des sables du Landénien et de l'Yprésien. Les « concentrations de référence » y dépassent les valeurs critère pour le zinc et l'ammonium. En parallèle, des concentrations importantes en nitrate, en phosphore et en bore sont observées. La masse d'eau semble donc fortement impactée à cause des eaux usées domestiques et de l'agriculture (la concentration en zinc est corrélée au nitrate et au bore et l'origine

⁴ Les valeurs critères du nitrate et du phosphore total sont différentes pour les masses d'eau souterraine RWM100, RWM101, RWM102, RWM103 (masses d'eau souterraines ardennaises). Cette différence est liée au fait que les normes de qualité environnementale pour l'état écologique des eaux de surface sont plus strictes pour les nitrates (25 mg/L au lieu de 50 mg/L) et le phosphore (0,2 mg P/l au lieu de 0,5 mg P/l) pour les masses d'eau de surface de typologie ardennaise (Delloye F., communication personnelle, 6 septembre 2019).

semble être liée aux compléments alimentaires du bétail). Pour cette masse d'eau, les valeurs seuil n'ont donc pas été majorées (Delloye F., communication personnelle, 28 juin 2018).

La deuxième raison pour laquelle les valeurs seuils n'ont pas toujours été majorées est qu'il a été estimé inutile de le faire quand les « concentrations de référence » ne dépassent pas à plus de 20 % les valeurs critère. Dans ce cas-là, il peut y avoir quelques dépassements mais limités et qui ne déclassent pas la masse d'eau (moins de 20% des sites de la masse d'eau contaminés) (Delloye F., communication personnelle, 28 juin 2018).

2.2.2. Approche de la Région flamande

Concentrations de référence

En Région flamande, les concentrations de référence ont été déterminées en suivant les prescriptions du projet BRIDGE. Une analyse statistique a été effectuée en se basant sur les mesures de qualité de l'eau souterraine sans influence anthropique. Les données proviennent de mesures datant de 2004 à 2013 (VMM, 2016).

Les concentrations de références des masses d'eau de la Région flamande sont présentées en annexe (Tableau 0-2). Les paramètres pour lesquelles les concentrations de référence sont déterminées sont les suivants : pH (min et max), Al, As, B, Ca, Cl, Cr, Cu, conductivité électrique, F, Fe, K, Mg, Mn, Na, NH₄, Ni, NO₂, Pb, PO₄, SO₄, Zn. Le Hg et le Cd ont été retirés de la liste parce qu'ils ne sont pas naturellement présents en Région flamande (Uyttendaele, 2016). La concentration de référence n'est pas mentionnée pour les éléments mis en évidence par un astérisque dans le tableau car elle est inférieure à la limite de quantification (VMM, 2016).

Pour déterminer les concentrations de référence, une sélection a été effectuée parmi les données. Les prélèvements avec des erreurs sur la balance ionique trop élevées ont été supprimés. Les sites avec des influences anthropiques évidentes ont été supprimés. C'est le cas pour ceux avec un percentile 80 de la concentration en NO₃ supérieur à 10 mg/L ainsi que ceux avec une présence en pesticide dans au moins 20% des échantillons. Certains sites ont également été écartés quand la concentration en métaux était élevée et semblait d'origine anthropique. Par exemple, quand le percentile 80 du Cd était supérieur à 1µg/L, le site a été écarté parce qu'il a été estimé que le Cd n'est pas présent naturellement en concentration importante dans les sédiments. Certaines valeurs aberrantes ont également été exclues du jeu de données pour les métaux (As, Ni, Zn, Pb et Cu) quand la valeur mesurée est supérieure à la somme de trois fois l'écart-type et de la valeur du percentile 80 (Eppinger R., communication personnelle, 4 juillet 2018).

Pour ne garder qu'un seul échantillon par site, dans le cas de série temporelle, les données ont été agrégées en calculant le percentile 80 de chaque paramètre. Enfin, les concentrations de référence sont déterminées en se basant sur le percentile 90 de toutes les valeurs de percentile 80 des points de mesure par masse d'eau souterraine (Eppinger R., communication personnelle, 4 juillet 2018).

Valeurs seuils

Les normes de qualité de l'eau souterraine (ou valeurs critères) utilisées en Région flamande pour la détermination des valeurs seuils sont présentées dans le Tableau 2-7. Elles sont basées sur une combinaison de plusieurs normes : les normes eau potable, les normes d'assainissement du sol en vigueur, dans certains cas sur les normes d'assainissement des sols existantes (Vlarebo, Annexe 4) pour As, Ni, Pb, Zn, Cr et Cu ou sur des normes de qualité environnementale plus anciennes pour le K.

Dans d'autres cas, elles sont liées à un jugement d'expert basé sur des valeurs de mesure et de la littérature et en tenant compte de l'atténuation naturelle (par exemple pour le PO₄). Le choix de normes autres que les normes d'eau potable a été fait quand les normes d'eau potable semblaient trop strictes pour pouvoir être atteintes dans les eaux souterraines ou pour les paramètres pour lesquelles les normes d'eau potable n'existent pas (Eppinger R., communication personnelle, 4 juillet 2018).

Paramètres	Unités	Norme de qualité eaux souterraines
Température	°C	25
pH		5 ≤ pH ≤ 8,5
Conductivité électrique	μS/cm à 20 °C	1600
Cl	mg/l Cl ⁻	250
SO ₄	mg/l SO ₄ ²⁻	250
Ca	mg/l Ca ²⁺	270
Mg	mg/l Mg ²⁺	50
Na	mg/l Na ⁺	150
K	mg/l K ⁺	12
Al	mg/l Al ³⁺	0,2
NO ₃	mg/l NO ₃ ⁻	50
NO ₂	mg/l NO ₂ ⁻	0,1
NH ₄	mg/l NH ₄ ⁺	0,5
Huiles minérales	μg/l	10
Phénols	μg/l C ₆ H ₅ OH	0,5
B	μg/l B ³⁺	1000
Fe	mg/l Fe ^{2+/3+}	20
Mn	mg/l Mn ^{2+/3+/4+/7+}	1
Cu	μg/l Cu ⁺²⁺	100
Zn	μg/l Zn ²⁺	500
PO ₄	mg/l PO ₄ ^{-2- /3-}	1,34
F	mg/l F ⁻	1,5

Paramètres	Unités	Norme de qualité eaux souterraines
Ba	mg/l Ba ²⁺	1
As	μg/l As ^{3- /3+/5+}	20
Cd	μg/l Cd ²⁺	5
CN	μg/l CN ⁻	50
Cr	μg/l Cr ^{2+/3+/6+}	50
Hg	μg/l Hg ⁺²⁺	1
Ni	μg/l Ni ^{2+/3+}	40
Pb	μg/l Pb ^{2+/4+}	20
Sb	μg/l Sb ^{3- /3+/5+}	10
Se	μg/l Se ^{2- /4+/6+}	10
Pesticides et produits dérivés		
• individuel	μg/l	0,1
• total		0,5
Hydrocarbures polycycliques aromatiques (total)	μg/l	0,2
Tétrachloroéthylène et trichloroéthylène (total)	μg/l	10

Tableau 2-7 : Normes de qualité de l'eau souterraine utilisées en Région Flamande pour la détermination des valeurs seuils (VMM, 2016)

Les valeurs seuils sont déterminées d'après les recommandations du projet BRIDGE (Müller, 2016) :

- Si la concentration de référence est inférieure à la norme de qualité des eaux souterraines, la valeur seuil est égale à la moyenne de la norme de qualité environnementale et de la concentration de référence.
- Si la concentration de référence est supérieure à la norme de qualité de l'eau souterraine, la valeur seuil est égale à la concentration de référence.
- Si la concentration de référence est inférieure à la limite de quantification, la valeur seuil est égale à la moitié de la norme de qualité environnementale.
- Si la moitié de la norme de qualité environnementale est également inférieure à la limite de quantification, la limite de quantification est la valeur seuil (Uyttendaele, 2016).

Les valeurs seuils définies en Région flamande sont présentées dans le Tableau 2-8. Seules les valeurs pour les masses d'eau en continuités avec celles de la Région de Bruxelles-Capitale sont présentées.

Les valeurs seuils ont été déterminées pour les paramètres de la liste minimale de la directive fille (2006/118/CE) à l'exception du mercure, du trichloroéthylène et du tétrachloroéthylène. Ces paramètres n'ont pas été retenus car rien n'indique qu'ils risquent de ne pas atteindre un bon état chimique dans les masses d'eau souterraine. Quatre paramètres ont également été ajoutés : fluor (spécifique au Sokkelsysteem), potassium (en tant qu'indicateur de contamination), nickel et zinc en tant que contaminants (Uyttendaele, 2016).

Paramètre	MESO (+correspondance RBC / unité)	BLKS_0600_	CVS_0800_	SS_1000_	BLKS_1000_	SS_1300_	SS_1300_	BLKS_1100_
		_GWL_1	GWL_3	GWL_2	GWL_2S	GWL_2	GWL_4	GWL_2S
		BR05	BR04	BR03 (ouest)	BR03 (est)	BR02	BR01 (ouest)	BR01 est
As ³⁻ /3+/5+	µg/l	10	13	19	10	13	20	13
Cd ²⁺	µg/l	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Cl ⁻	mg/l	150	170	480	140	150	650	210
Ec	µS/cm	1200	1400	3500	1200	1200	3800	1400
F ⁻	mg/l	0,9	0,9	6,4	1,2	1,7	6,9	1,3
K ⁺	mg/l	8	11	24	18	22	24	19
NH ₄ ⁺	mg/l	0,66	0,58	0,82	0,69	0,52	1,3	0,81
Ni ^{2+/3+}	µg/l	23	28	24	20	20	24	20
NO ²⁻	mg/l	0,07	0,09	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Pb ^{2+/4+}	µg/l	10	10	10	10	10	10	10
PO ₄ ^{-/2-} /3-	mg/l	0,87	0,93	2,20	1,09	0,83	1,22	0,84
SO ₄ ²⁻	mg/l	200	220	370	170	160	420	160
Zn ²⁺	µg/l	270	310	270	260	260	260	260

Tableau 2-8 : Valeurs seuils pour les masses d'eau souterraines de la Région flamande en continuité avec celles de la Région de Bruxelles-Capitale (VMM, 2016).

3. Méthodologie mise en œuvre pour déterminer les concentrations de référence pour les masses d'eau souterraine BR02, BR04 et BR05 en Région de Bruxelles Capitale.

Pour calculer les concentrations de référence des masses d'eau BR02, BR04 et BR05, les recommandations des projets BRIDGE et Baseline seront appliquées. Pour les masses d'eau du Socle en zone d'alimentation (BR02) et de l'Yprésien (BR04), peu de données sont disponibles et la superficie de ces masses d'eau n'est pas très grande. Pour la masse d'eau des sables du Bruxellien (BR05), plus de données sont disponibles mais la superficie de la masse d'eau reste relativement faible. L'approche qui sera choisie sera la suivante : le jeu de données sera élargi en ajoutant autant que possible des données provenant des masses d'eau souterraine semblables en Région wallonne et en Région flamande. Une analyse des données disponibles sera ensuite réalisée pour tenter de comprendre les processus influençant la minéralisation des masses d'eau (§3.1.2). Enfin, les concentrations de référence seront calculées sur base des résultats de l'analyse hydrochimique. Le percentile 90 des sites dont l'impact anthropique n'influence pas la minéralisation, sera calculée pour déterminer des concentrations de référence. Si l'impact anthropique sur l'ensemble des sites est trop important les percentiles 90 qui seront calculés correspondront plutôt à des concentrations de fond.

3.1.1. Présentation et vérification de la qualité des données

Les données hydrochimiques des masses d'eau BR02, BR04 et BR05 seront d'abord replacées dans leur contexte en présentant brièvement la zone d'étude. Les données de la Région de Bruxelles-Capitale ainsi que celles des Régions wallonne et flamande seront ensuite présentées (localisation des stations, nombre de mesures, paramètres échantillonnés...).

La qualité des données sera ensuite vérifiée. La première étape dans cette analyse est de vérifier si l'aquifère dans lequel le piézomètre est crépiné, correspond bien à la masse d'eau souterraine qui est étudiée. Ensuite, pour vérifier la qualité des données, le pourcentage de valeurs quantifiées par paramètre sera analysé. Les valeurs inférieures à la limite de quantification seront traitées comme recommandé par le projet BRIDGE (Müller, 2006) en les remplaçant par la moitié de la limite de quantification. Les analyses pour lesquelles les valeurs de limite de quantification sont égales ou supérieures aux normes seront exclues du jeu de données. Les normes qui seront considérées sont celles déterminées pour les eaux souterraines de la Région de Bruxelles-Capitale (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles Capitale relatif à la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration, 2010 et sa révision de 2016) et celles de la directive cadre européenne "Eau potable" (CE, 1998) transposée dans l'Arrêté du 24 janvier 2002 relatif à la qualité de l'eau distribuée par réseau (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale, 2002).

La présence de polluants dans la nappe sera ensuite étudiée pour identifier si certains sites semblent contaminés ou pas et si les normes "eaux souterraines" (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles Capitale, 2010 et 2016) et "eau distribuée par le réseau" (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale, 2002) sont dépassées. Des cartes représentant la répartition spatiale des principaux polluants seront également dressées pour identifier l'impact des activités anthropiques sur la nappe et s'il s'agit de pollution diffuse ou ponctuelle.

Pour clore ce chapitre sur la qualité des données, la balance ionique^{*5} sera également calculée. Les sites d'échantillonnage situés en (Région wallonne et Région flamande qui n'ont pas une balance ionique dans l'intervalle de confiance (entre -10 et 10), ne seront pas repris pour l'étude des processus chimiques et le calcul des concentrations de référence. Comme il s'agit de données complémentaires et qu'il y a généralement un nombre relativement important de stations par aquifère en Wallonie et en Flandre, il vaut mieux prendre uniquement celle avec une balance ionique correcte.

3.1.2. Etude des processus chimiques influençant la composition géochimique des eaux souterraines

Lorsque plusieurs échantillons ont été prélevés pour une même station d'échantillonnage, le projet BRIDGE recommande d'utiliser la médiane pour ne conserver qu'un échantillon représentatif. La médiane de chaque paramètre sera donc calculée par station d'échantillonnage. Pour les masses d'eau souterraine de la région de Bruxelles-Capitale étudiées, la médiane sera calculée en ne conservant que les échantillons de ou postérieurs à l'année 2006. Le programme de surveillance a, en effet, officiellement commencé en 2004 mais c'est à partir de 2006 qu'il est estimé être représentatif.

Sur base de ces médianes, le diagramme de Piper* sera tracé pour déterminer le faciès des échantillons. Des cartes seront aussi tracées pour représenter la variation spatiale des paramètres et des concentrations en éléments majeurs et mineurs. Des graphiques représentant l'évolution des paramètres en fonction du temps seront également tracés pour analyser les variations temporelles des paramètres. Pour définir l'origine de la salinité, plusieurs méthodes seront appliquées : le calcul du rapport Na/Cl* et le calcul des indices de saturation* de la calcite, de la halite et du gypse.

Une analyse statistique descriptive sera ensuite réalisée. Les paramètres statistiques de base (minimum, moyenne, la médiane, percentile 25, percentile 75, percentile 90 et maximum) seront calculés pour chaque masse d'eau souterraine à partir des médianes des paramètres de chaque station d'échantillonnage. Les distributions statistiques des éléments seront étudiées avec l'aide d'histogrammes*. Avant d'effectuer une analyse multivariée, les coefficients de corrélations* seront également calculés pour mettre en évidence des relations entre des couples de variables. Une analyse des valeurs atypiques* (outliers) sera également réalisée pour tenter de mettre en évidence des sites impactés par une pollution ponctuelle.

Une analyse multivariée sera ensuite réalisée en utilisant la méthode des matrices auto-organisantes* (self-organizing maps – SOMs). L'analyse multivariée permet de mettre en évidence les relations entre un nombre élevé de paramètres dans un système hydrogéologique avec une dynamique complexe. Les SOMs permettront aussi de diviser les échantillons en groupe d'eaux avec les signatures géochimiques semblables. Dans le cas de l'étude des masses d'eau souterraine du Socle, de l'Yprésien et du Bruxellien, de nombreux processus géochimiques ont un impact sur la composition des eaux souterraines. Pour l'analyse multivariée, les données seront donc examinées sous 2 angles : (1) les processus influençant la minéralisation globale (interaction eau-roche, processus de rafraîchissement, apports anthropiques éventuels...) et (2) les processus d'oxydoréduction (liés au confinement de la nappe) qui peuvent notamment influencer les teneurs en métaux.

⁵ Les méthodes suivies d'un * seront décrites de manière détaillée à la fin de ce chapitre

Pour étudier la minéralisation globale, la technique de statistiques multivariées sera appliquée sur une sélection de certains éléments majeurs (Cl, NO₃, Ca, K, Na, SO₄), le B et le rapport Na/Cl (molaire). Ces paramètres ont été choisis pour mettre en évidence l'origine de la salinité (notamment les concentrations élevées en Cl), identifier d'éventuelles contaminations anthropiques et voir si la contamination a un impact significatif sur la minéralisation globale. Le NO₃ est un indicateur de pollution et les paramètres : K, Na, SO₄, B ont été sélectionnés parce qu'ils peuvent être soit naturels, soit d'origine anthropique. Le rapport Na/Cl donne également des indications sur l'origine du Cl. Un rapport Na/Cl (molaire) inférieur à 0.86 correspond généralement à une eau impactée par une pollution (Müller, 2006). Pour la masse d'eau du Bruxellien qui est fortement impactée, des polluants seront également rajoutés dans l'analyse multivariée. Les concentrations en éléments chimiques ont été exprimées sous forme logarithmique à cause de leur distribution asymétrique tandis que les rapports entre éléments ont été utilisés tel quels.

Pour mettre en évidence les processus d'oxydoréduction, les SOMs seront appliquées une seconde fois avec une autre sélection de paramètres. Il s'agit des paramètres impliqués dans les réactions d'oxydoréduction, à savoir : NO₃, Mn, SO₄, HCO₃ (potentiellement produits par ces réactions), le NH₄ ainsi que les métaux pouvant être influencés par les conditions redox. Les concentrations en éléments chimiques ont été exprimées sous forme logarithmique à cause de leur distribution asymétrique tandis que le pH et les rapports Na/Cl ont été utilisés tel quels.

Par masse d'eau souterraine, le modèle conceptuel de l'acquisition de la minéralisation sera établi.

3.1.3. Descriptif des différentes méthodes utilisées

Balance ionique

La balance ionique permet de vérifier la qualité des données. Elle se définit d'après la formule suivante :

$$\text{Balance ionique} = 100 \times \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \text{ (Eq. 3-1)}$$

Les cations et les anions sont exprimés en meq/L et la balance ionique s'exprime en %. D'après les recommandations du projet BRIDGE (Müller, 2006), elle doit être comprise entre -10% et 10%. Si la balance ionique n'est pas comprise dans cet intervalle, cela peut indiquer une analyse chimique de mauvaise qualité liée à de mauvaises mesures de concentrations ou l'absence d'analyse de certains paramètres (tous les éléments majeurs n'ont pas été analysés ou un élément mineur de concentration non négligeable n'a pas été mesuré). Dans le cadre de ce travail, les analyses avec une balance ionique sortant de l'intervalle de confiance [-10%-10%] ne seront pas écartés de manière systématique. Dans le premier cas, si tous les éléments majeurs sont analysés et que la balance ionique sort de l'intervalle de confiance, l'analyse sera écartée. Dans le deuxième cas, si tous les éléments majeurs n'ont pas été analysés, s'il s'agit de données complémentaires (Région wallonne et Région flamande) l'analyse sera écartée. Par contre s'il s'agit de données de la Région de Bruxelles-Capitale, l'analyse sera conservée s'il n'y a ni polluants ni anomalies dans les analyses.

Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper (Piper, 1944) permettant de déterminer le faciès hydrochimique des eaux étudiées (Figure 3-1) sera tracé à l'aide du logiciel « DIAGRAMMES » du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (Simler, 2013). Les échantillons sont représentés au sein d'un premier diagramme ternaire

reprenant les concentrations (en meq/l) relatives des principaux cations (Ca, Mg, Na, K), d'un deuxième diagramme ternaire avec les concentrations (en meq/l) relatives des principaux anions (Cl, SO₄, NO₃, HCO₃) et d'un losange des compositions qui regroupe l'ensemble des ions. Les diagrammes ternaires permettent de déterminer quels anions et cations sont dominants et le losange des compositions permet de déterminer le faciès hydrochimique (bicarbonaté calcique et magnésienne, bicarbonaté sodique et potassique, chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne, chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique).

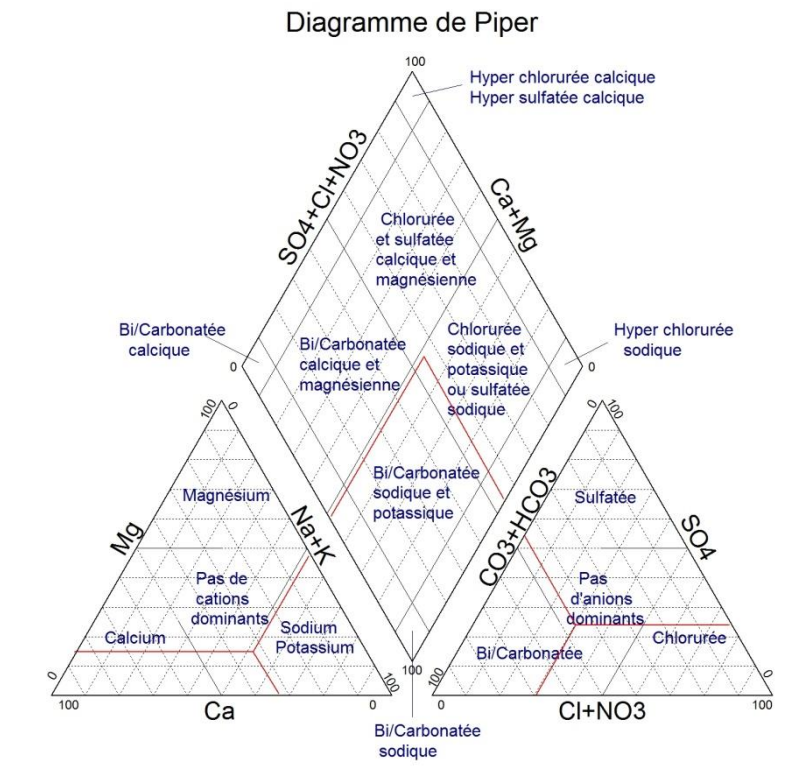


Figure 3-1 : Diagramme de Piper (Simler, 2013)

Rapport Na/Cl

La salinité de l'eau souterraine peut avoir différentes origines. Une des techniques les plus utilisées pour les identifier consiste à calculer le ratio Na/Cl. Le Cl est un élément conservateur, il est donc peu affecté par les différents processus physico-chimiques qui ont lieu dans le milieu souterrain.

Un rapport Na/Cl (molaire) égal à 1 indique que les deux composants proviennent de la dissolution d'évaporites (ici la halite NaCl), tandis qu'un rapport molaire de 0.86 indique que les ions ont plutôt une origine marine. Dans le cas d'un phénomène de rafraîchissement, suite aux phénomènes d'échanges ioniques, le rapport Na/Cl peut être bien plus grand que 1. Par contre, dans le cas de certaines pollutions, s'il y a un apport en Cl mais pas en Na, le rapport Na/Cl peut être inférieur à celui de l'eau de mer (Müller, 2006).

Indices de saturation

Le calcul des indices de saturation permet d'évaluer quels sont les minéraux secondaires qui influencent la minéralisation de l'eau souterraine. L'indice de saturation se calcule d'après la formule suivante :

$$SI = \log \frac{IAP}{K} \quad (\text{Équation 3-1})$$

Avec :

K : le produit de solubilité

Exemple : $K_{gypse} = [Ca^{2+}][SO_4^{2-}]$ (activités à l'équilibre)

IAP : the Ion Activity Product (produit d'activité ionique)

Exemple : $IAP_{gypse} = [Ca^{2+}][SO_4^{2-}]$ (activités réelles dans l'échantillon d'eau)

Un indice de saturation compris entre -0.5 et 0.5 indique que l'eau est vraisemblablement en équilibre avec le minéral considéré, lequel contrôle alors la concentration dans l'eau de l'un ou l'autre de ces éléments constitutifs (mais pas les deux). Si l'indice de saturation est supérieur à 0.5, l'eau est sursaturée et si l'indice est inférieur à 0.5, l'eau est sous-saturée. Les indices de saturation de la calcite, du gypse et de la halite ont été calculés via le module PHREEQC (Parkhurst and Appelo 1999) implémenté dans le programme « Diagrammes » de l'université d'Avignon (Simler, 2013).

Histogramme

L'histogramme permet de visualiser la distribution d'une variable (Figure 3-2). Les données sont divisées en plusieurs classes de même amplitude. Pour chaque classe, un rectangle est tracé, dont la hauteur est proportionnelle au nombre d'échantillons dans la classe. L'allure de l'histogramme permet d'identifier le type de distribution des données (normale, asymétrique...).

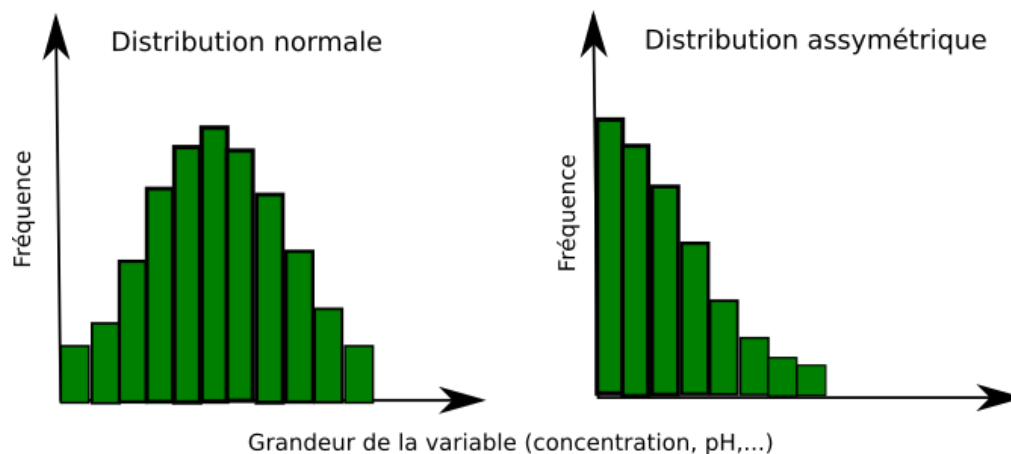


Figure 3-2 : Distribution et histogramme

Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation permet de donner une mesure synthétique de l'intensité de la relation entre deux variables. Il existe plusieurs méthodes de calcul de ce coefficient qui dépendent de la distribution des données et du type de relation existant entre ces données. Par exemple,

Le coefficient de corrélation de Pearson permet d'analyser les relations linéaires et le coefficient de corrélation de Kendall les relations non-linéaires. L'analyse statistique est considérée comme significative si la p-value est inférieure à 0.05. La p-value est souvent utilisée dans les tests d'hypothèses qui permettent de rejeter, ou non, une hypothèse nulle. Dans ce cas-ci, l'hypothèse nulle est qu'il n'y a pas de corrélation entre les variables et l'hypothèse alternative est qu'il y ait une corrélation entre les variables. La p-value représente la probabilité de faire une erreur de type 1, c'est-à-dire, de rejeter l'hypothèse nulle si elle est vraie. Plus la p-value est petite, plus la probabilité de faire une erreur en rejetant l'hypothèse nulle est faible. Une valeur limite de 0,05 est souvent utilisée. Autrement dit, l'hypothèse nulle peut être rejetée si la p-value est inférieure à 0,05. Dans notre cas, quand la p-value est inférieure à 0.05, on peut rejeter l'hypothèse qu'il n'y a pas de corrélation entre les variables.

Valeurs atypiques (outliers)

Les valeurs atypiques ou aberrantes sont des valeurs qui s'écartent fortement des autres valeurs. Ces valeurs atypiques peuvent permettre de mettre en évidence des sites avec des minéralisations particulières notamment liées à de pollutions ponctuelles. Une valeur est considérée comme atypique quand la valeur est supérieure au $P75 + 1.5 \times (P75 - P25)$. Ici la formule a été utilisée en calculant le P75 et P25 en considérant le logarithme des données parce que certains paramètres ont une distribution statistique asymétrique.

Matrices auto-organisantes ou Self-Organizing-Map (SOMs)

L'analyse statistique multivariée est de plus en plus utilisée pour étudier les processus géochimiques influençant la composition de l'eau. Ces méthodes permettent de mettre en évidence les relations entre un nombre élevé de paramètres dans un système hydrogéologique avec une dynamique complexe où plusieurs processus géochimiques peuvent s'influencer mutuellement.

La méthode appliquée dans cette étude, appelée 'matrices auto-organisantes' ou 'Self-Organizing-Map (SOMs)', est une méthode de statistiques multivariées non-linéaire et non-hiérarchique (Kohonen 2001). Cette technique utilise un algorithme de type réseau neuronal artificiel dont la conception est inspirée du fonctionnement du cerveau avec des neurones qui sont capables de tirer un apprentissage à partir des données et de faire des généralisations. La méthode des SOMs permet de visualiser des relations entre paramètres et d'identifier des groupes de compositions chimiques similaires dans le jeu de données (Peeters et al., 2007).

Le résultat de la méthode des SOMs est visualisé sous forme d'une matrice 2D avec un nombre 'm x n' de nœuds. Chaque échantillon est associé au nœud ayant la composition chimique la plus proche. Les échantillons placés à proximité les uns des autres dans la matrice présentent généralement le même type de composition chimique. Les résultats peuvent être représentés sous deux formes : la matrice U et la matrice des composants (Vesanto et al., 2000).

La matrice des composants permet de visualiser les corrélations entre les paramètres. Les concentrations de chaque paramètre sont représentées dans la matrice 2D, il y a donc autant de matrices qu'il y a de paramètres. Pour chaque paramètre, les zones rouges de la matrice sont associées aux teneurs les plus élevées en ce paramètre et les zones bleues de la matrice sont associées aux teneurs les plus basses en ce paramètre. Si, pour 2 paramètres, les zones rouges sont

situées dans la même partie de la matrice et les zones bleues sont également situées dans la même partie de la matrice les 2 paramètres sont corrélés.

La matrice U montre la distance euclidienne entre chaque nœud et ses voisins. Elle permet de visualiser si les échantillons voisins ont des compositions similaires (en bleu) ou très différentes (en rouge). Elle a été calculée via le logiciel Matlab en utilisant la Toolbox SOM (Alhoniemi et al., 2000-2005). La distance euclidienne est calculée en fonction de la valeur de tous les paramètres (sélectionnés) des échantillons. A partir de la matrice U, des groupes de compositions semblables peuvent être créés automatiquement en utilisant l'algorithme des SOMs (Ullsh et Hermann, 2005).

4. Analyse des données et résultats pour la masse d'eau du Socle en zone d'alimentation (BR02)

4.1. Présentation et vérifications de la qualité des données

4.1.1. Présentation de la masse d'eau souterraine du Socle en zone d'alimentation (BR02)

En Région de Bruxelles-Capitale, le Socle est divisé en deux masses d'eau souterraine : celle du Socle en zone d'alimentation (BR02) dont il est question dans cette étude et celle du Socle et du Crétacé (BR01) qui a déjà été traitée lors du précédent projet (Thomas *et al*, 2018). La masse d'eau BR02 est présente au Sud de la Région de Bruxelles-Capitale et a une superficie de 51 km² tandis que la masse BR01 s'étend sur la partie centrale et nord de la région avec une superficie de 111 km².

En Région de Bruxelles-Capitale, le Socle, appelé également Massif du Brabant, est composé des formations cambriennes de Tubize et de Blamont et leur lithologie varie entre grès feldspathiques, phyllades et quartzites. Ce Socle peut être recouvert localement de craie à silex de la Formation de Gulpen. L'épaisseur de la craie est variable, elle est absente dans le sud de la Région (masse d'eau BR02) et elle est d'environ une dizaine de mètres dans la masse d'eau souterraine BR01. Le Socle et le Crétacé sont ensuite recouverts par une alternance de formations sableuses et argileuses, notamment les sables et argiles du Landénien et de l'Yprésien et par les sables du Bruxellien (Buffel & Matthijs, 2001). La présence de couches d'argiles dans le Landénien et l'Yprésien rend les couches sous-jacentes captives en Région de Bruxelles-Capitale.

Les masses d'eau souterraines (BR01) et (BR02) délimitées en Région de Bruxelles-Capitale font partie d'aquifères transfrontaliers du district hydrographique de l'Escaut (Figure 5-2). Parmi les grands aquifères, il y a le Socle du Massif du Brabant et Craies Est (zone captive) (id 9), le Socle du Massif du Brabant et Craies Ouest (zone captive) (id 8) et le Socle du Massif du Brabant et Craies (zone d'alimentation) (id7).

Le Tableau 0-3, issu d'une coordination entre les différents partenaires du District de l'Escaut reprend les correspondances entre les masses d'eau souterraine transfrontalières et les aquifères transfrontaliers issus d'une coordination entre les différents partenaires du District de l'Escaut (figure en annexe).

Dans la masse d'eau souterraine du Socle en zone d'alimentation (BR02), la présence de craie est rare et les sédiments du tertiaire reposent généralement directement sur le Socle. Dans cette masse d'eau, l'aquifère du Socle est localement libre. En Région Wallonne, une partie du Socle a un statut non défini entre la zone captive et la zone d'alimentation. Il affleure localement dans les vallées et il n'est pas recouvert par une couche imperméable (Landénien ou Yprésien) sur toute sa surface. En Région Wallonne, il peut également y avoir des sédiments dévoniens entre le Socle et les craies.

Les zones d'affleurements du Socle (et du Dévonien) sont présentées à la Figure 4-2. Les zones d'affleurements sont principalement situées, au nord de Namur et dans les vallées au sud de la Région de Bruxelles-Capitale. Ces zones d'affleurements constituent des zones de recharge de l'aquifère.

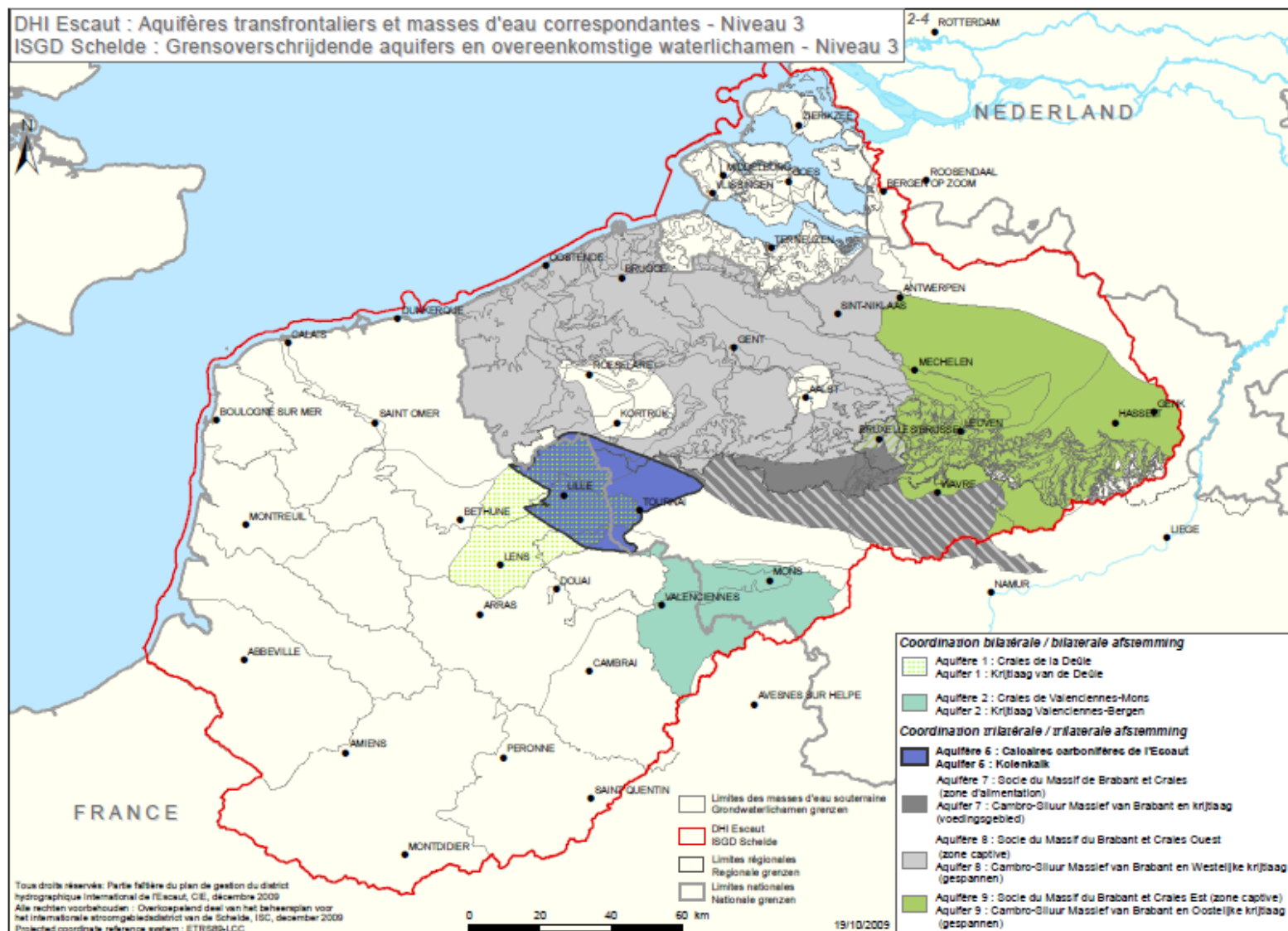


Figure 4-1 : Aquifères transfrontaliers du Paléo-Mésozoïque du bassin de l'Escaut (CIE, 2009)

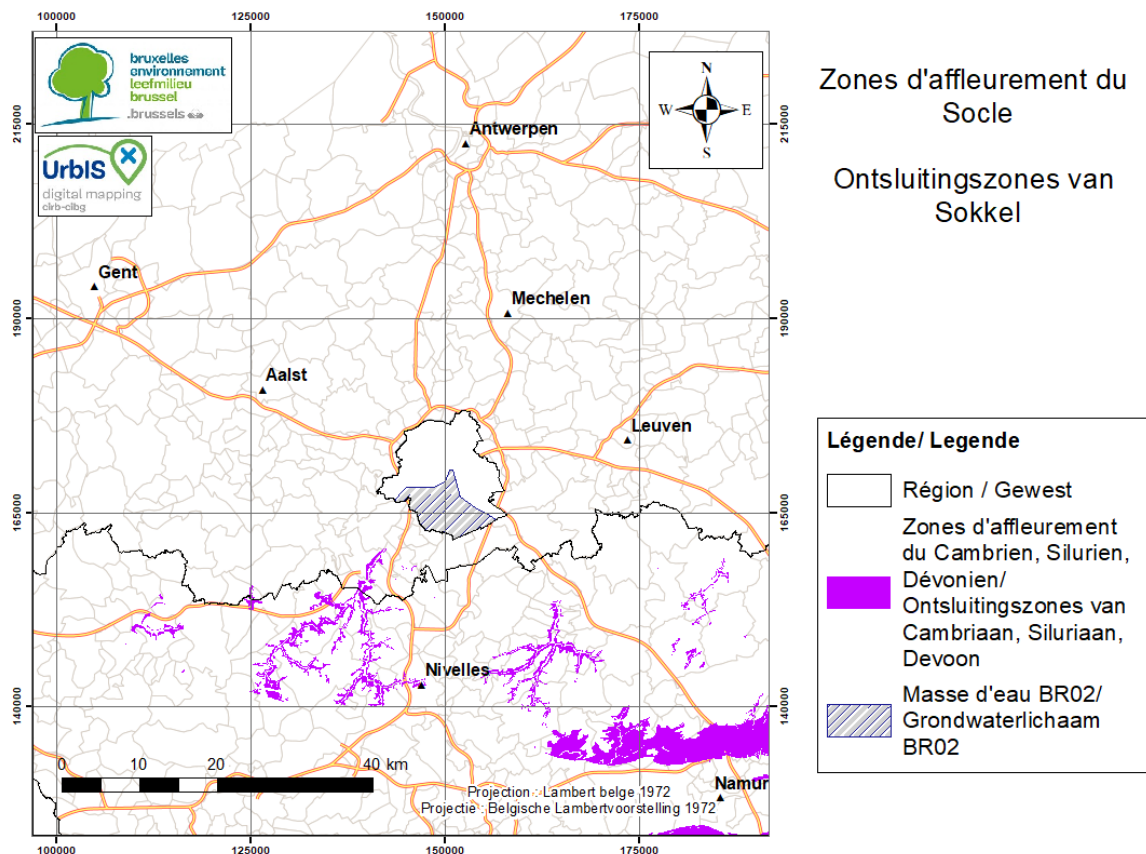


Figure 4-2 : Localisation des masses d'eau BR02 (Bruxelles Environnement, 2010) et des zones d'affleurements du Cambrien, Silurien et du Dévonien (Service géologique de Belgique, 2003)

4.1.2. Présentation des données

4.1.2.1. Données en Région de Bruxelles-Capitale

Les données sur lesquelles se basent l'étude ont été fournies par Bruxelles Environnement. Elles proviennent des sites d'échantillonnage déclarés dans les programmes de surveillance, liés à la directive cadre eau, et de sites exploratoires de la qualité des nappes qui ne sont, de ce fait, pas analysés de façon récurrente. Les points de prélèvements de la masse d'eau souterraine du Socle en zone d'alimentation (BR02) pour lesquelles des données hydrochimiques sont disponibles, sont décrits dans le Tableau 4-1. Leur répartition spatiale est illustrée à la Figure 4-3. Les stations de la masse d'eau BR02 sont au nombre de 5. La profondeur des puits varie entre 65m et 164 m. L'occupation du sol aux alentours des stations de prélèvement est exclusivement urbain, il n'y a pas d'espaces vert dans leur environnement proche (Figure 4-4)

Point de prélèvement	Code	Type d'ouvrage	Période de suivi	Nombre de mesures	X Lambert belge 72 (m)	Y Lambert belge 72 (m)	Profondeur (m)
Usine Union sa	384	puits	2004-2015	12	146770	167414	100
Calypso	P23	puits	2010-2015	3	152801	166208	115.4
Lavoir Carsen Stalle	P24	puits	2010-2011	2	147706	165535	65
Royal Leopold Club	P45	puits	2009-2015	11	148802	166249	164
St Niklaas Instituut	P4	puits	2005-2015	18	144160	167010	77

Tableau 4-1 : Données relatives aux points de prélèvement de la masse d'eau souterraine du Socle en zone d'alimentation (BR02) pour lesquelles des données hydrochimiques sont disponibles

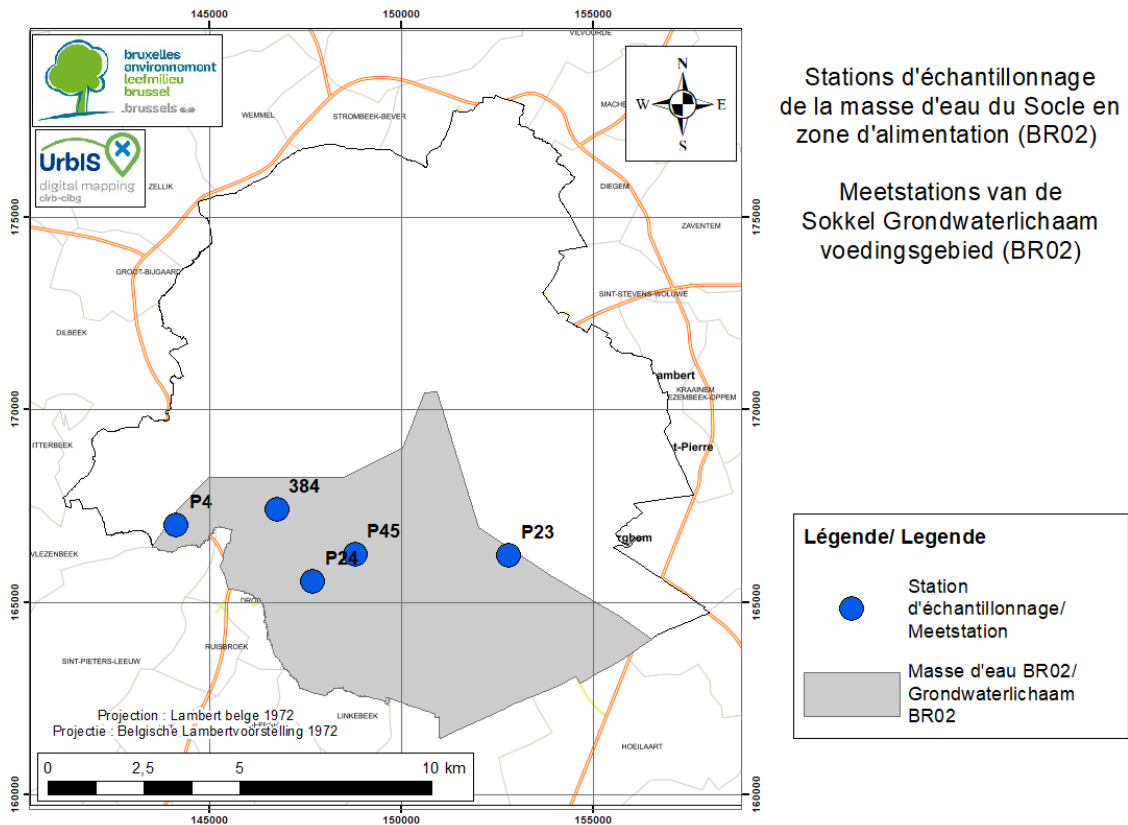


Figure 4-3 : Points de prélèvement de la masse d'eau souterraine du Socle en zone d'alimentation (BR02) pour lesquels des données hydrochimiques sont disponibles

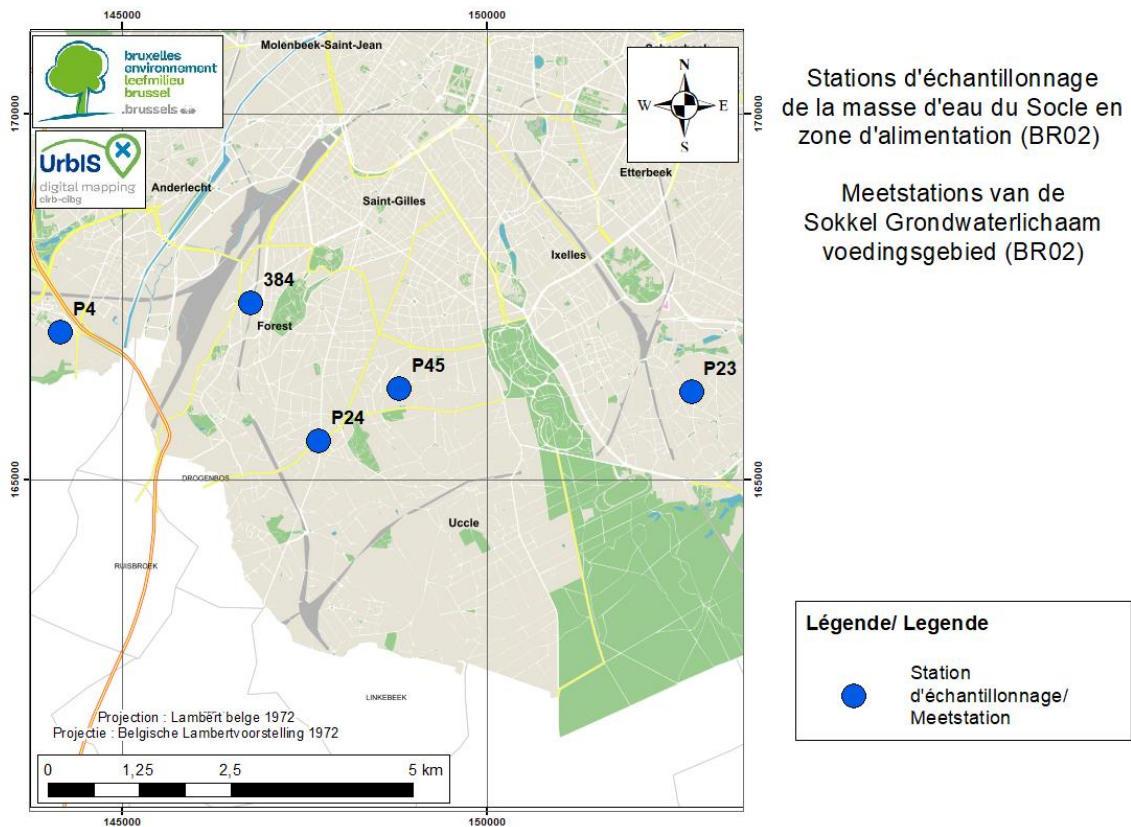


Figure 4-4 : Occupation du sol aux alentours des points de prélèvement de la masse d'eau souterraine du Socle en zone d'alimentation (BR02)

Le programme de surveillance de l'état chimique a été progressivement mis en place à partir de 2004. La période de suivi pour les données qui ont été fournies s'étale entre 2004 et 2015. Le nombre de campagnes d'échantillonnage par station de prélèvement est relativement peu élevé : de deux échantillonnages pour le Lavoir Carsen Stalle (P24) à 18 pour le point St Niklaas Instituut (P4).

Les paramètres qui ont généralement été mesurés sont la teneur en oxygène dissous, la température, le pH et la conductivité électrique, les éléments majeurs, les éléments mineurs (notamment B et F), ainsi qu'une centaine de substances polluantes (pesticides, micropolluants organiques, cyanures, métaux lourds ...). L'ensemble de ces paramètres n'a cependant pas été analysé pour chaque échantillon prélevé. Les concentrations en métaux ont généralement été mesurées en « concentration totale » (sans filtration préalable de l'échantillon sur le terrain). Seuls les métaux : Ni, Hg, Pb, Cd, ont également été mesurés en « concentration dissoute » (avec filtration préalable).

4.1.2.2. Données complémentaires

Afin d'élargir le jeu de données, des données complémentaires ont également été recherchées pour le même aquifère en Flandre et en Wallonie, autour de la région de Bruxelles-Capitale. Les données de la Région flamande proviennent de la DOV et les données de la Région wallonne proviennent de la base de données Calypso du SPW. 42 stations d'échantillonnage ont été sélectionnées en Wallonie et 45 en Flandre. La localisation de ces stations est présentée à la Figure 4-5. La liste de ces stations complémentaires est également reprise en annexe (Tableau 0-4). Toutes les stations d'échantillonnage de Flandre et de Wallonie sélectionnées, sont crépinées uniquement dans le Socle. Les données complémentaires concernent donc bien le même aquifère que celui de la masse d'eau BR02.

Avoir un nombre plus élevé de données et couvrir une zone plus large permet d'étudier les variations des compositions chimiques de l'aquifère et de pouvoir ainsi replacer la masse d'eau souterraine du Socle en zone d'alimentation (BR02) dans son contexte hydrogéologique et hydrochimique. Avoir un nombre plus élevé de données permet également d'effectuer des statistiques plus robustes pour la détermination des concentrations de référence. Dans le reste du rapport, quand il sera question de l'ensemble du jeu de données du Socle en zone d'alimentation, il s'agira des données fournies par l'Institut Bruxellois de Gestion de l'Environnement pour la masse d'eau BR02 et des stations de prélèvement sélectionnées dans le Socle en Wallonie et en Flandre.

Les paramètres mesurés en Wallonie et en Flandre ne sont pas forcément les mêmes que ceux mesurés en Région de Bruxelles-Capitale. En Flandre, les paramètres mesurés sont la température, le pH, l'Eh, la conductivité électrique et l'oxygène dissous, les éléments majeurs, quelques éléments mineurs (NH₄, F, NO₂, PO₄), les métaux mesurés en fraction totale et ou dissoute. Tous les paramètres n'ont pas forcément été mesurés pour chaque analyse. En Région wallonne, les mêmes paramètres qu'en Flandre sont mesurés. Les métaux sont mesurés en concentration totale à l'exception du fer qui est mesuré en concentration dissoute. En Wallonie, des données complémentaires concernant les concentrations en polluants (pesticides, micropolluants organiques, cyanures ...) sont disponibles.

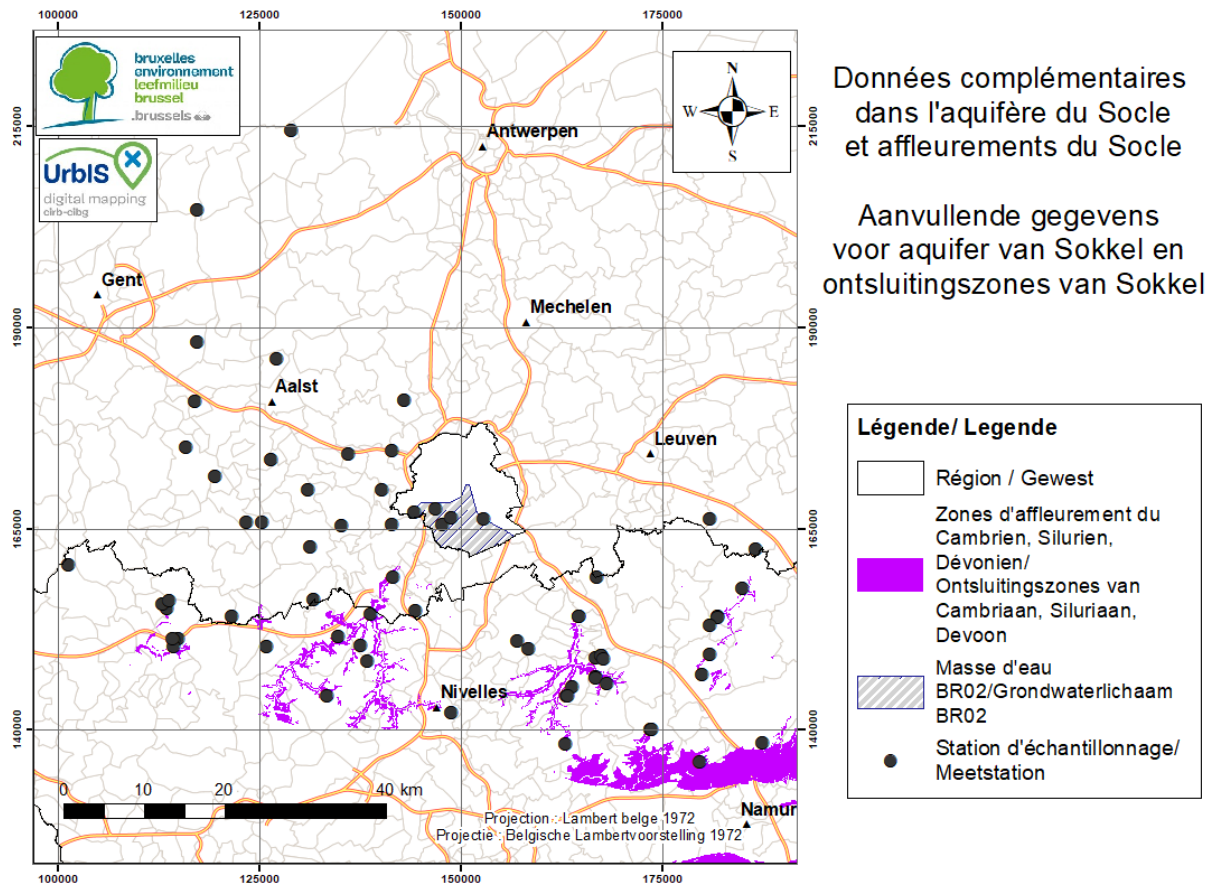


Figure 4-5 : Données complémentaires pour l'aquifère du Socle en Wallonie et en Flandre

4.1.3. Vérification de la qualité des données

4.1.3.1. Correspondance avec la masse d'eau souterraine étudiée

Lors de la précédente étude (Thomas *et al.*, 2018), l'aquifère sollicité par chaque point de prélèvement avait été identifié en croisant les informations concernant la profondeur des crépines avec le modèle numérique de terrain (Lidar) et le modèle stratigraphique (v2.0) développé au sein de Bruxelles Environnement dans le cadre du projet Hydroland portant sur le Landénien (Service Géologique de Belgique, 2015).

Pour les stations de prélèvement associées à la masse d'eau BR02, 3 ouvrages (Usine Union sa (384), Royal Leopold Club (P45) et St Niklaas Instituut (P4)) sont crépinés dans le Socle. Par contre, le point Lavoir Carsen Stalle (P24) est crépiné dans le Socle et le Landénien. Le point Calypso (P23) est crépiné majoritairement dans le Socle mais potentiellement un peu dans la craie et un peu dans les argiles de Lincent du Landénien. Ces deux points vont être conservés pour la suite de l'analyse hydrochimique mais en restant critique vis-à-vis des résultats qui pourraient être le résultat d'un mélange de plusieurs masses d'eau. Ces points ne seront a priori, pas inclus dans le calcul final des concentrations de référence.

4.1.3.2. Limite de quantification des éléments mineurs et des éléments en trace

Les limites de quantification des principaux éléments mineurs et en traces sont présentées dans le Tableau 4-2. Pour chaque élément, le nombre total d'analyses est indiqué ainsi que le pourcentage de quantifications et la ou les valeurs de limites de quantification. Un même élément peut avoir

plusieurs limites de quantification en fonction de la méthode analytique utilisée et/ou de la période de mesure. De manière générale, les limites de quantification observées sur la période de 2006 à 2016 deviennent de plus en plus basses avec le temps en fonction de l'amélioration de la précision des méthodes analytiques. Dans certains cas la limite de quantification varie également à cause d'un changement de laboratoire.

Paramètre (unité)	Région de Bruxelles-Capitale		Région wallonne		Région flamande		valeurs LQ
	Nb analyses	% > LQ	Nb analyses	% > LQ	Nb analyses	% > LQ	
Aluminium (Al) dissous (µg/l)	0	0.0	0	0.0	101	23.76	
Aluminium total (Al) (µg/l)	42	81.0	288	64.2			10, 1, 0.1
Ammonium (mg/l)	44	77.3	265	57.7	147	78.91	0.1, 0.065, 0.06, 0.05, 0.03, 0.02
Arsenic total (As) (µg/l)	42	0.0	295	77.6	124	40.32	5, 1.5, 1, 0.5
Arsenic (dissous) (µg/l)			0	0.0			
Baryum total (Ba) (µg/l)	42	95.2	244	100.0			1
Bicarbonate (mg HCO ₃ -/l)	40	97.5	25	100.0	145	97.24	
Bore total (B) (µg/l)	43	97.7	286	88.8	78	79.49	60, 50, 26, 10, 5, 0.01
Bromure (Br-) (µg/l)	22	95.5	72	86.1			5
Cadmium (Cd) dissous (µg/l)	40	0.0	0	0.0	124	4.84	0.4, 0.3, 0.1, 0.01
Cadmium total (Cd) (µg/l)	44	4.5	301	26.6			0.7, 0.5, 0.4, 0.1, 0.01
Calcium (Ca) (mg/l)	42	95.2	297	100.0	145	100.00	2
Carbone organique total non purgeable (NPOC) (mg/l)	42	95.2	218	94.0	129	76.74	
Chlorure (mg/l)	44	95.5	291	99.7	146	100.00	
Chrome total (Cr) (µg/l)	42	7.1	301	40.2	124	7.26	2, 0.5, 0.01
Cobalt total (Co) (µg/l)	42	11.9	27	88.9	77	32.47	2, 0.1, 0.02
Cuivre total (Cu) (µg/l)	42	38.1	290	55.9	124	5.65	2, 1, 0.01
Fer total (Fe) (µg/l)	42	88.1	26	100.0	144	83.33	50, 10, 5, 0.01
Fer dissous (Fe) (µg/l)			253	91.3	125	46.40	
Fluorure (F-) (µg/l)	40	95.0	275	98.5	138	90.58	
Magnésium (Mg) (mg/l)	42	95.2	297	100.0	145	98.62	
Manganèse total (Mn) (µg/l)	42	88.1	293	96.9	134	79.10	20, 1, 0.5, 0.01
Mercure (Hg) dissous (µg/l)	38	0.0	0	0.0	126	0.79	0.05, 0.03, 0.02
Mercure total (Hg) (µg/l)	44	0.0	202	11.9			0.1, 0.05, 0.03, 0.02
Nickel (Ni) dissous (µg/l)	38	13.2	0	0.0	124	8.87	5, 2, 1
Nickel total (Ni) (µg/l)	44	13.6	301	78.1			5, 2, 1, 0.005
Nitrate (mg/l)	44	34.1	279	71.0	147	36.73	2, 1, 0.9, 0.2, 0.1, 0.09, 0.05
Nitrite (mg/l)	44	11.4	275	40.7	145	20.69	30, 0.07, 0.05, 0.03, 0.02, 0.0046
Orthophosphates (mg/l de P)	34	88.2	234	46.6	134	70.90	0.02, 0.0066
Phosphate (PO ₄) ³⁻ (µg/l)	2	100.0	4	25.0	11	81.82	150
Phosphore total (mg P/l)	44	20.5	162	43.2			0.1, 0.5
Plomb (Pb) dissous (µg/l)	40	7.5	0	0.0	124	5.65	5, 3, 0.1, 0.005
Plomb total (Pb) (µg/l)	42	78.6	301	32.9			6, 5, 0.1
Potassium (K) (mg/l)	42	100.0	301	98.0	145	100.00	
Silice (SiO ₂) (mg/l)	1	0.0	246	99.6			
Sodium (Na) (mg/l)	42	95.2	296	100.0	145	100.00	
Strontium (Sr) (mg/l)	40	95.0	208	100.0			
Sulfate (mg/l)	41	95.1	279	99.3	146	100.00	2
Zinc total (Zn) (µg/l)	44	95.5	301	75.7	124	48.39	2

Tableau 4-2: Limite de quantification des principaux éléments mineurs et en trace de l'aquifère du Socle (Nb = nombre d'analyses, LQ = limite de quantification), en rouge les éléments pour lesquels le pourcentage de quantification est inférieur à 25% ou pour lesquels il n'y a pas de mesures.

Pour la Région de Bruxelles-Capitale, les données qui sont présentées sont celles des échantillons prélevés à partir de 2006. Le programme de surveillance a officiellement commencé en 2004 mais c'est à partir de 2006 qu'il est estimé être représentatif.

Les valeurs inférieures à la limite de quantification seront traitées comme recommandé par le projet BRIDGE (Müller, 2006). La valeur de concentration utilisée sera la limite de quantification divisée par 2. Les valeurs de limite de quantification qui sont égales ou supérieures aux normes seront exclues de l'analyse. Les normes considérées sont celles déterminées pour les eaux souterraines de la Région de Bruxelles-Capitale (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles Capitale relatif à la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration, 2010 et sa révision de 2016) et celles de la directive cadre européenne "Eau potable" (CE, 1998) transposée dans l'Arrêté du 24 janvier 2002 relatif à la qualité de l'eau distribuée par réseau (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale, 2002).

Le Cd, le Hg, le Ni et le NO₂, repris dans la liste minimale des éléments pour lesquels il faut déterminer une concentration de référence d'après la directive 2006/118/CE (CE, 2006), présentent un pourcentage de quantification très faible. Pour ces paramètres, il ne sera pas possible de calculer directement la concentration de référence.

En outre, certains paramètres ne sont pas mesurés de la même manière dans les différentes régions. Pour les métaux, la concentration mesurée est soit la fraction totale soit la fraction dissoute dans les différentes Régions. Il est donc compliqué de comparer ces concentrations en métaux mesurées dans les différentes Régions. Concernant le phosphore, en Région de Bruxelles-Capitale et en Région wallonne, les orthophosphates et le phosphore total (et dans une moindre mesure les phosphates) sont mesurés tandis qu'en Région flamande, il n'y a pas de données de phosphore total.

4.1.3.3. Présence de polluant

Pour déterminer les concentrations de référence, il faut normalement écarter du jeu de données les points qui sont impactés par des contaminations anthropiques. Dans ce travail, les sites impactés ne seront pas écartés de manière systématique. Ils seront conservés pour la suite de l'analyse hydrochimique pour évaluer si la contamination a un impact significatif ou non sur la minéralisation et ainsi déterminer s'ils seront utilisés ou non pour le calcul des concentrations de référence.

Le Tableau 4-3 reprend pour les principaux polluants qui sont quantifiés dans l'aquifère du Socle, le nombre d'analyses réalisées et le pourcentage de quantification. Les concentrations en polluants sont généralement inférieures aux limites de quantification en Région Bruxelloise, tandis qu'en Région wallonne, ces polluants sont plus fréquemment présents à des concentrations supérieures aux limites de quantification. En Région flamande très peu de mesures concernant les polluants ont été transmises.

Paramètres	Région de Bruxelles-Capitale		Région wallonne		Région flamande	
	Nb analyses	% > LQ	Nb analyses	% > LQ	Nb analyses	% > LQ
1,1,1-Trichloroéthane (µg/l)	44	0.0	158	19.0		
1,1,2-Trichloroéthane (µg/l)	42	0.0	154	0.0		
2,6-Dichlorobenzamide (BAM) (µg/l)	35	8.6	161	34.2	0	0.0
Atrazine (µg/l)	43	4.7	240	50.0	1	0.0
Atrazine déséthyl (µg/l)	42	4.8	229	53.7	0	0.0
Atrazine desisopropyl (µg/l)	43	7.0	218	26.6	0	0.0
Bentazone (µg/l)	39	0.0	180	34.4	0	0.0
Benzène (µg/l)	44	2.3	178	2.2		
Cyanures totaux (µg/l)	33	0.0	209	22.0	0	0.0
Diuron (µg/l)	41	7.3	243	10.3	0	0.0
Glyphosate (µg/l)	14	0.0	0	0.0	0	0.0
Huiles minérales (totales)(mg/l)	8	25.0	73	60.3		
Naphtalène (µg/l)	38	2.6	77	1.3		
Simazine (µg/l)	42	7.1	243	8.6	0	0.0
Tétrachloroéthylène (C2Cl4) (µg/l)	44	0.0	175	26.9	0	0.0
Toluène (µg/l)	44	4.5	156	8.3		
Trichloroéthylène (C2HCl3) (µg/l)	44	9.1	176	29.0	0	0.0

Tableau 4-3 : Pourcentage d'analyses supérieures à la limite de quantification pour certains polluants de l'aquifère du Socle (Nb = nombre d'analyse, LQ = limite de quantification), en orange : les polluants pour lesquels le pourcentage de quantification est supérieur à 10%.

Pour identifier les sites dans lesquels des polluants ont été quantifiés, des cartes avec les concentrations maximales quantifiées par polluant pour chaque station ont été réalisées (Figures 4-6 à 4-13). Au regard de ces cartes, il semble que l'aquifère du Socle est partiellement impacté par les activités anthropiques en Région wallonne. Des pesticides, du nitrate en concentration supérieure à 10 mg/L et localement des huiles minérales, du trichloréthylène et du tétrachloroéthylène sont en effet observés. Généralement les concentrations en ces polluants ne dépassent pas les normes de potabilité.

En Région de Bruxelles-Capitale, les stations semblent peu impactées à l'exception du site P23 (Calypso) et dans une moindre mesure du point 384 (Usine union sa). Au P23, les concentrations en nitrate sont très importantes et des pesticides sont quantifiés. Au point 384 (Usine union sa) certains polluants comme le trichloréthylène et le benzène sont détectés en quantité infime et de manière non régulière (généralement une fois).

En Région flamande, seules les données relatives aux concentrations en nitrate ont été communiquées. De manière générale, celle-ci sont inférieures à 10 mg/L. Il n'est pas exclu qu'il y ait des pollutions ponctuelles mais à ce stade, avec les données à disposition, il n'est pas possible de le savoir.

Pour résumer, il semble qu'en Région wallonne là où l'aquifère est libre à proximité des zones d'affleurement, la nappe est partiellement impactée par les nitrates et pesticides notamment même si les normes sont rarement dépassées. Plus au nord, en Région flamande et en région de Bruxelles-

Capitale, là où la nappe est majoritairement captive, peu de polluants sont observés à l'exception de pollution locale comme au point P23.

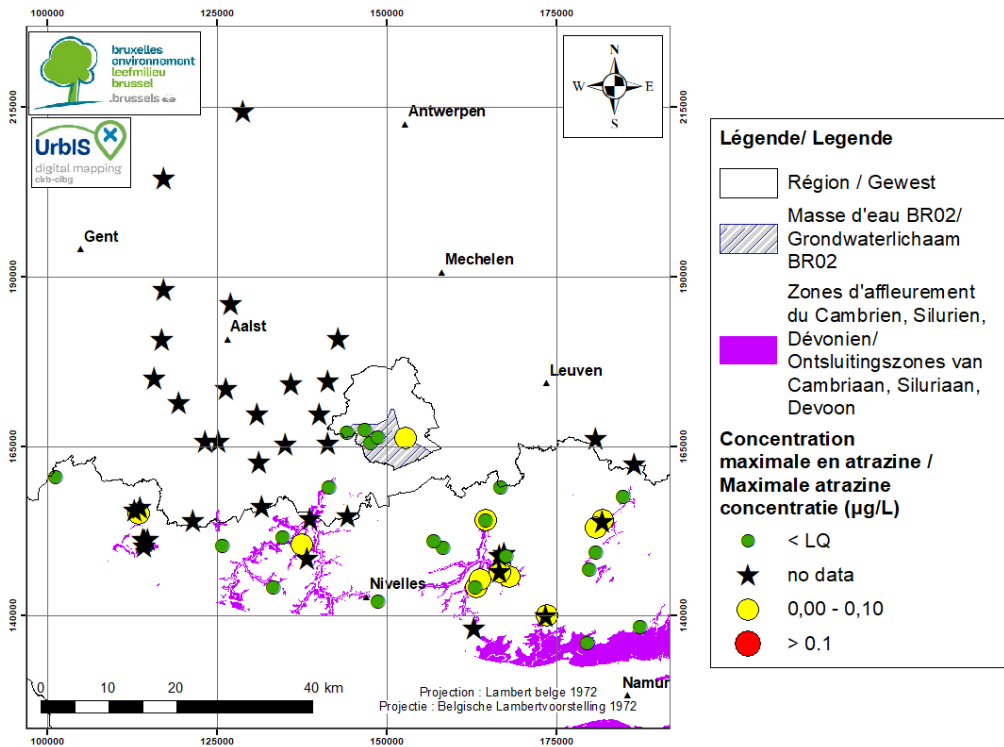


Figure 4-6 : Concentration maximale en atrazine dans l'aquifère du Socle

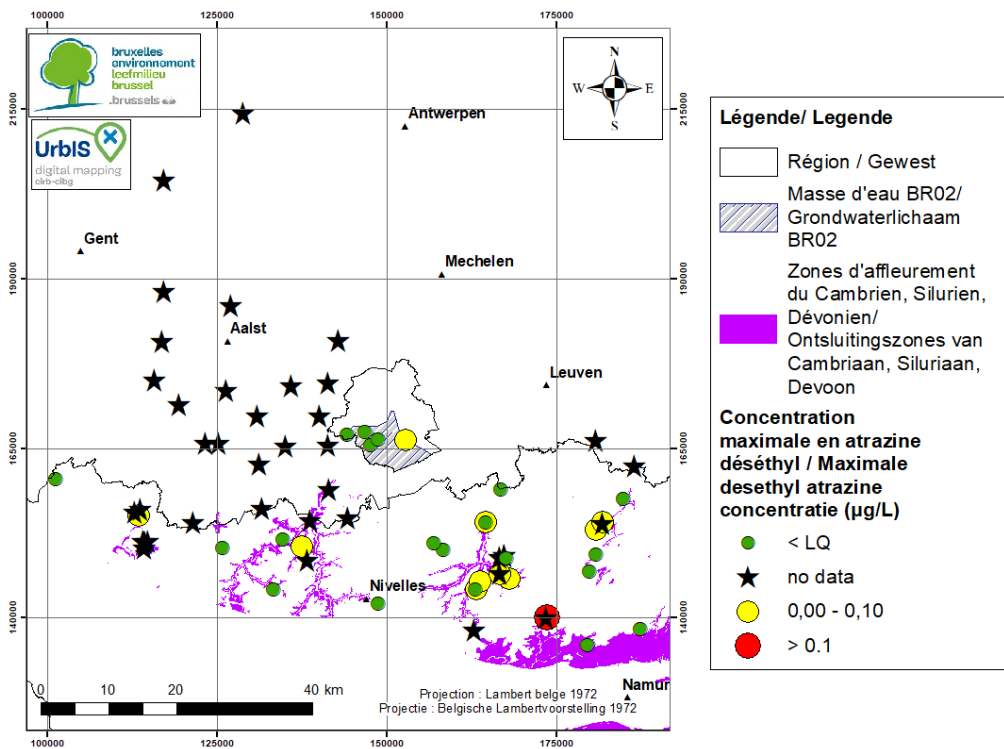


Figure 4-7 : Concentration maximale en atrazine déséthyl dans l'aquifère du Socle

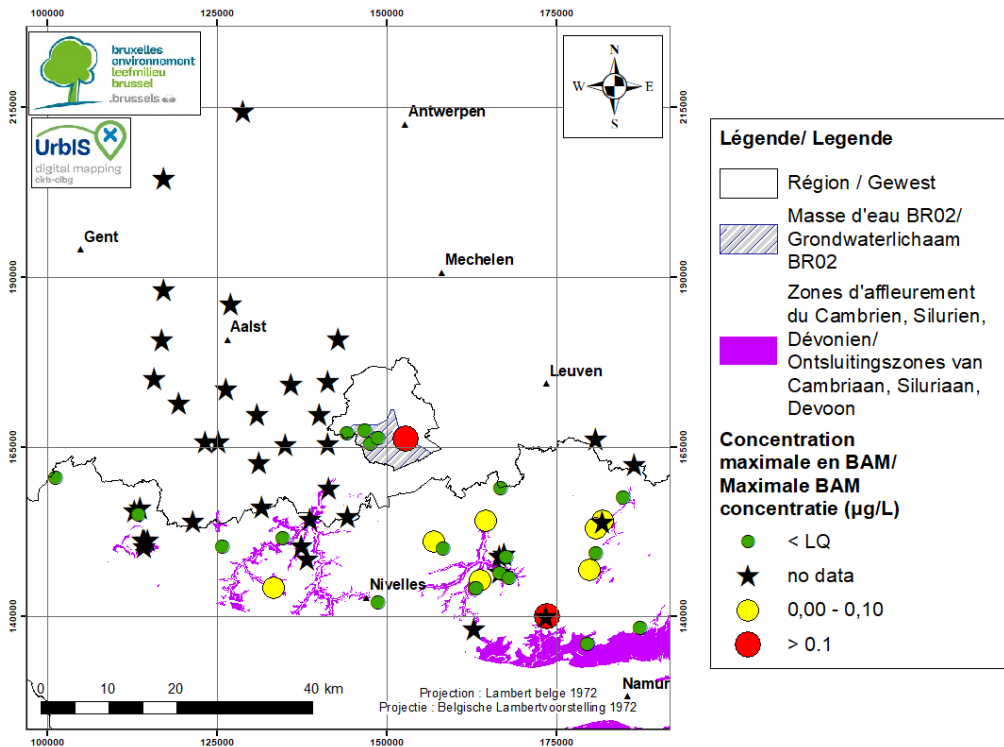


Figure 4-8 : Concentration maximale en BAM (2,6-Dichlorobenzamide) dans l'aquifère du Socle

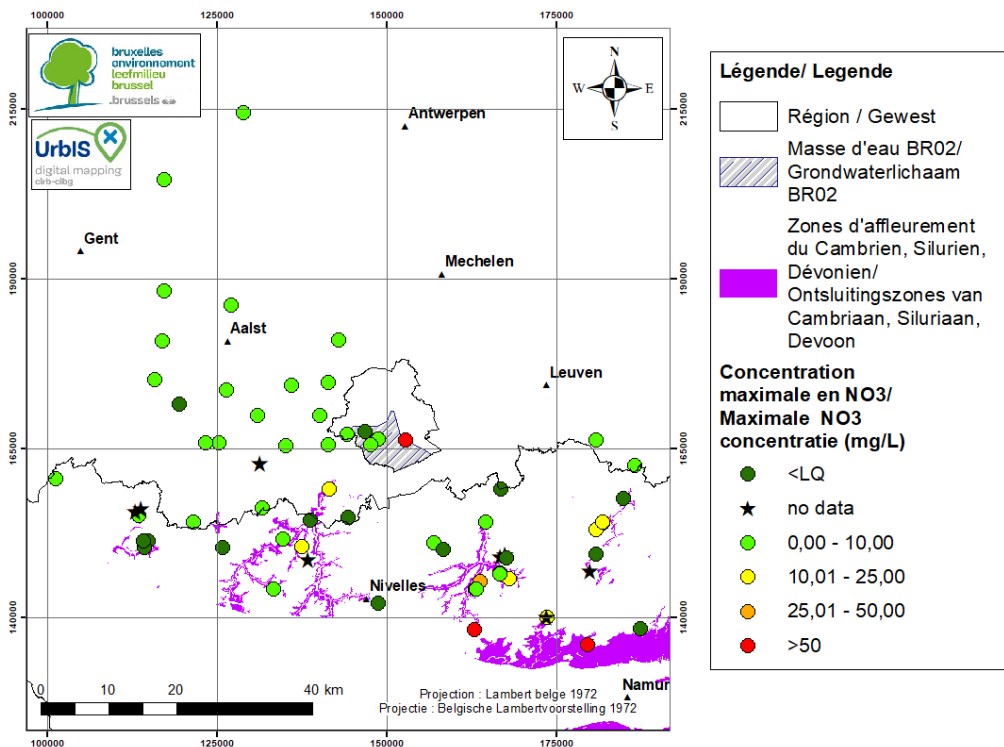


Figure 4-9 : Concentration maximale en nitrate dans l'aquifère du Socle

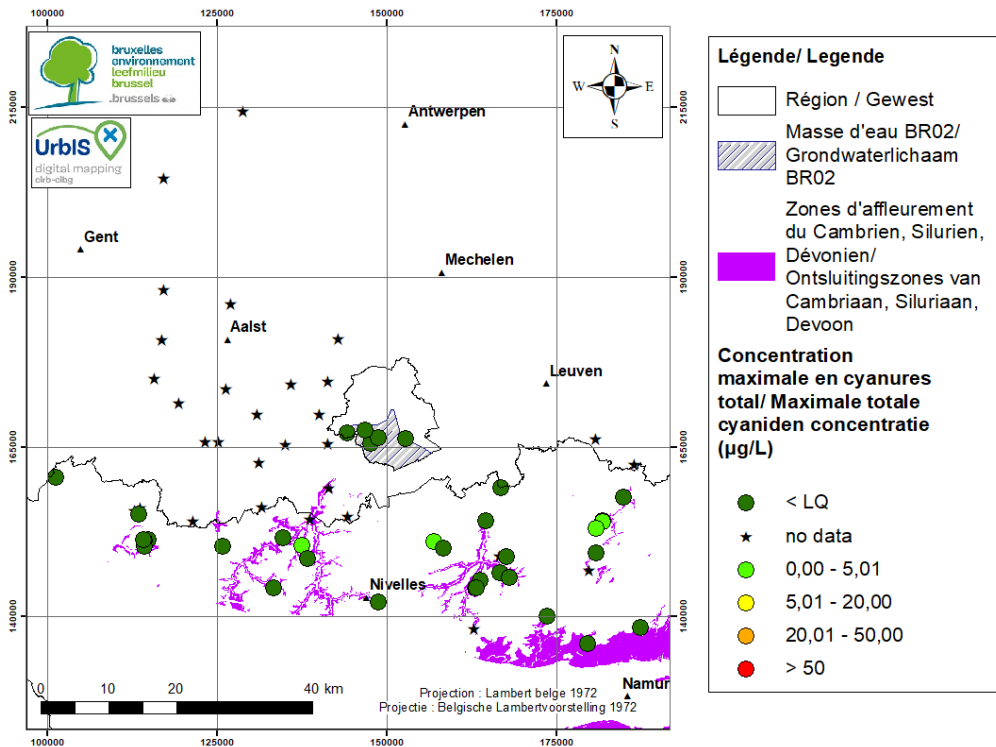


Figure 4-10 : Concentration maximale en cyanures totaux dans l'aquifère du Socle

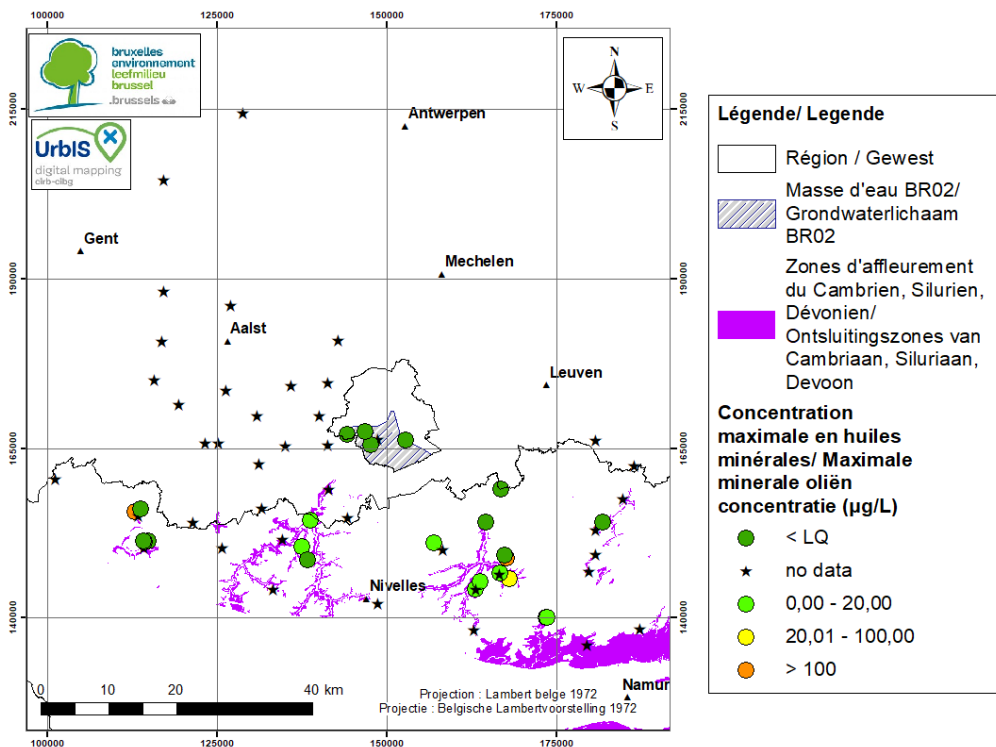


Figure 4-11 : Concentration maximale en huiles minérales dans l'aquifère du Socle

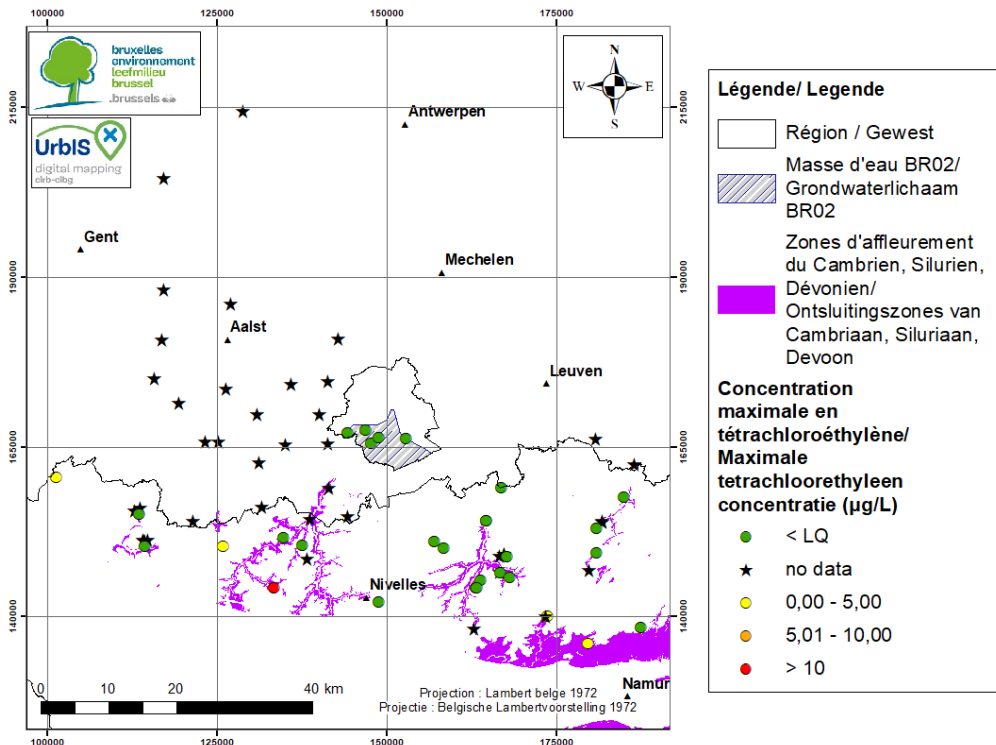


Figure 4-12 : Concentration maximale en tétrachloroéthylène dans l'aquifère du Socle

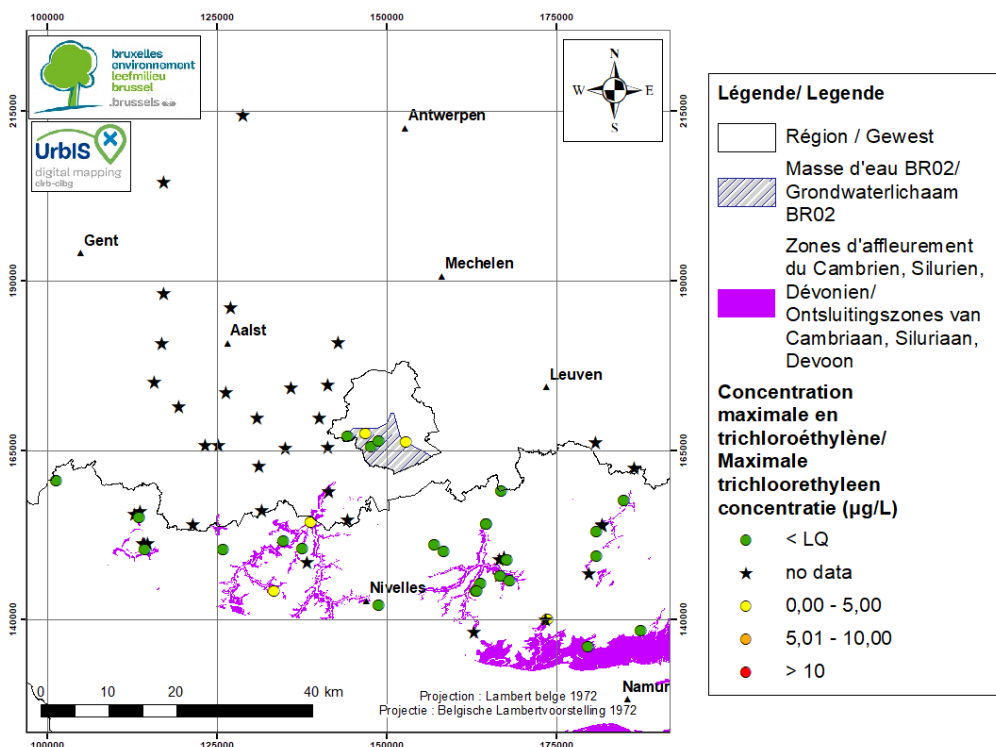


Figure 4-13 : Concentration maximale en trichloroéthylène dans l'aquifère du Socle

4.1.3.4. Balance ionique

La balance ionique a été calculée pour chaque échantillon. Un certain nombre d'échantillons présentent des balances ioniques supérieures à 10 % ou inférieures à -10 % principalement en Région flamande et en Région wallonne (Tableau 4-4). Ces balances ioniques qui sortent de

l'intervalle de confiance sont quasi exclusivement liées à des analyses incomplètes, l'ensemble des éléments majeurs n'ayant pas été analysé. Ces analyses incomplètes n'ont pas été systématiquement exclues de l'analyse. Pour vérifier la qualité des données, la balance ionique est ensuite recalculée à partir de la médiane des concentrations de chaque élément pour chaque station. Pour la région de Bruxelles-Capitale, cette balance ionique 'médiane' est comprise entre -10% et 10% pour chaque station d'échantillonnage (5). En Régions flamande et wallonne, pour certaines stations, l'ensemble des éléments majeurs n'ont même pas été mesurés une seule fois. Les balances ioniques 'médianes' sont donc également hors de l'intervalle -10% et 10%. Comme il s'agit de données complémentaires et qu'il y a un nombre relativement important de stations en Wallonie et en Flandre pour l'aquifère du Socle, il est proposé de sélectionner uniquement celles avec une balance ionique dans l'intervalle de confiance. Les 24 stations et 18 stations sélectionnées respectivement en Région wallonne et en Région flamande sont localisées sur la carte de la Figure 4-14. Les stations sélectionnées sont mises en évidence dans le Tableau 0-4 en annexe.

	Région de Bruxelles-Capitale	Région wallonne	Région flamande
Nombre d'analyses	44	381	158
Pourcentage des analyses avec $-10\% < BI < 10\%$	90.1	57	68
Nombre de stations d'échantillonnage	5	42	24
Pourcentage des stations d'échantillonnage avec $-10\% < BI \text{ (médiane)} < 10\%$	100	57	75
Nombre des stations d'échantillonnage avec $-10\% < BI \text{ (médiane)} < 10\%$	5	24	18

Tableau 4-4 : Calcul de la balance ionique des échantillons de l'aquifère du Socle (Nb = nombre, BI = balance ionique)

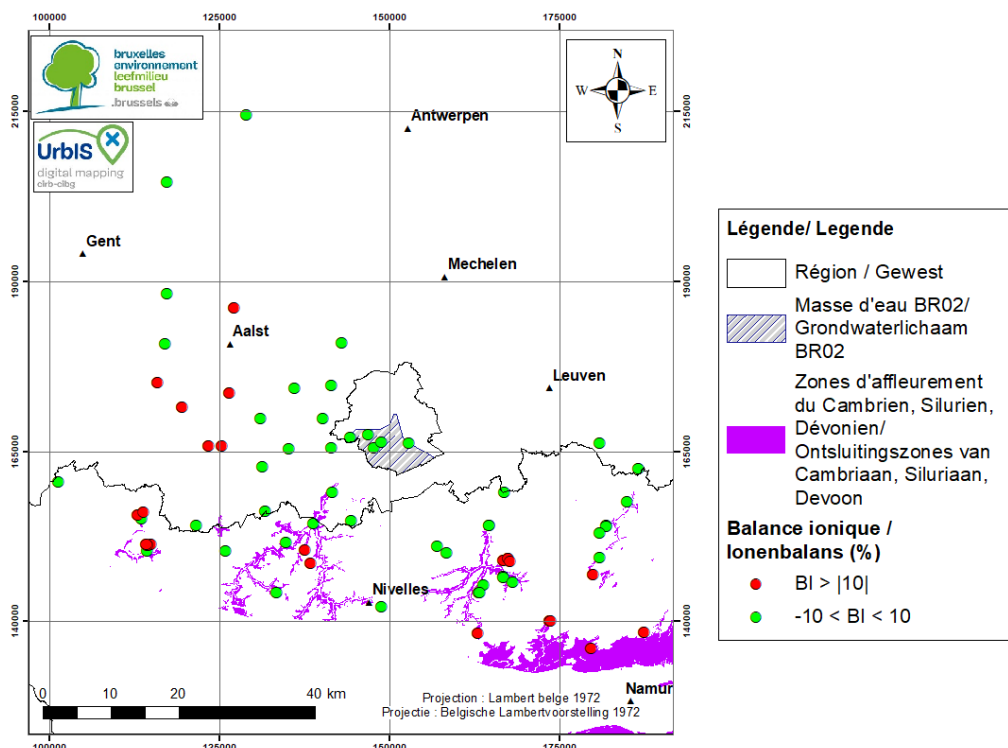


Figure 4-14 : Erreur sur la balance ionique de la médiane des échantillons de l'aquifère du Socle

4.2. Etude des processus chimiques influençant la composition géochimique des eaux souterraines

4.2.1. Faciès hydrochimiques : diagramme de Piper

Les échantillons de l'aquifère du Socle sont représentés dans un diagramme de Piper à la Figure 4-15. Dans le cas où il aurait eu plusieurs échantillonnages, c'est la médiane des concentrations qui est utilisée. Les échantillons de l'aquifère du Socle appartiennent principalement au faciès bicarbonaté calcique mais quelques échantillons appartiennent également aux trois autres faciès : au faciès bicarbonaté sodique et potassique, faciès chloruré sodique et potassique et faciès chloruré calcique.

Au sein des faciès bicarbonatés calcique et chloruré calcique, 2 pôles se distinguent : un avec une proportion faible en SO₄, Cl et NO₃ et un avec une proportion élevée en ces éléments. Le premier groupe rassemble des eaux « douces » qui ne sont à priori pas contaminées. Le deuxième groupe rassemble plutôt des eaux avec une proportion importante en nitrate, chlorure ou sulfate. Cette position dans le diagramme de Piper peut-être liée à une intrusion d'eau marine ou une contamination anthropique. Dans cette présente étude, au vu des fortes concentrations en nitrates et de la position des sites, il s'agit plutôt d'une contamination. Ce second groupe comporte principalement les échantillons de la Région wallonne mais également un échantillon de la Région Bruxelles-Capitale (P23) qui présente une concentration en nitrate relativement élevée.

Le diagramme de Piper montre qu'il y a une évolution depuis les eaux douces (bicarbonatées calciques) vers les eaux bicarbonatées sodiques et potassiques et les eaux chlorurées sodiques et potassiques. Dans le diagramme des cations, il y a une augmentation progressive des proportions de sodium et potassium et une diminution de la proportion en calcium. D'après Appelo et Postma (2005), une évolution des eaux douces (bicarbonatées calcique et magnésienne) vers des eaux bicarbonatées sodique et potassique voir chlorurées sodique et potassique reflète un phénomène naturel de rafraichissement (repoussée des eaux salées par des eaux douces).

Les différents faciès des échantillons sont représentés spatialement à la Figure 4-16. En Région wallonne et au sud de la Région Bruxelles-Capitale et de la Région flamande, les eaux sont majoritairement de type bicarbonaté calcique. Dans cette zone, il y a également des eaux de type chloruré calcique qui correspondent à des eaux fortement impactée par une contamination anthropique. Au nord de la Région de Bruxelles-Capitale et de la Région flamande, les eaux évoluent vers les faciès bicarbonatés sodique et potassique et chloruré sodique et potassique. Les eaux s'écoulent globalement du sud vers les nord. Les eaux jeunes sont donc bicarbonatées calciques ou chlorurées sodique si elles polluées et les eaux plus anciennes sont de type bicarbonaté sodique et potassique ou chloruré sodique et potassique.

La Région de Bruxelles-Capitale est une zone de transition entre ces eaux jeunes et des eaux plus anciennes. La masse d'eau du Socle en Zone d'Alimentation (BR02) contient principalement des eaux bicarbonatées calciques qui sont à priori jeunes, à l'exception du point Carsen Stalle (P24) qui a un faciès bicarbonaté sodique et potassique. Les échantillons de la Région flamande avec des faciès bicarbonatés sodique et potassique ou chloruré sodique et potassique sont situés à seulement quelques kilomètres de la Région de Bruxelles-Capitale.

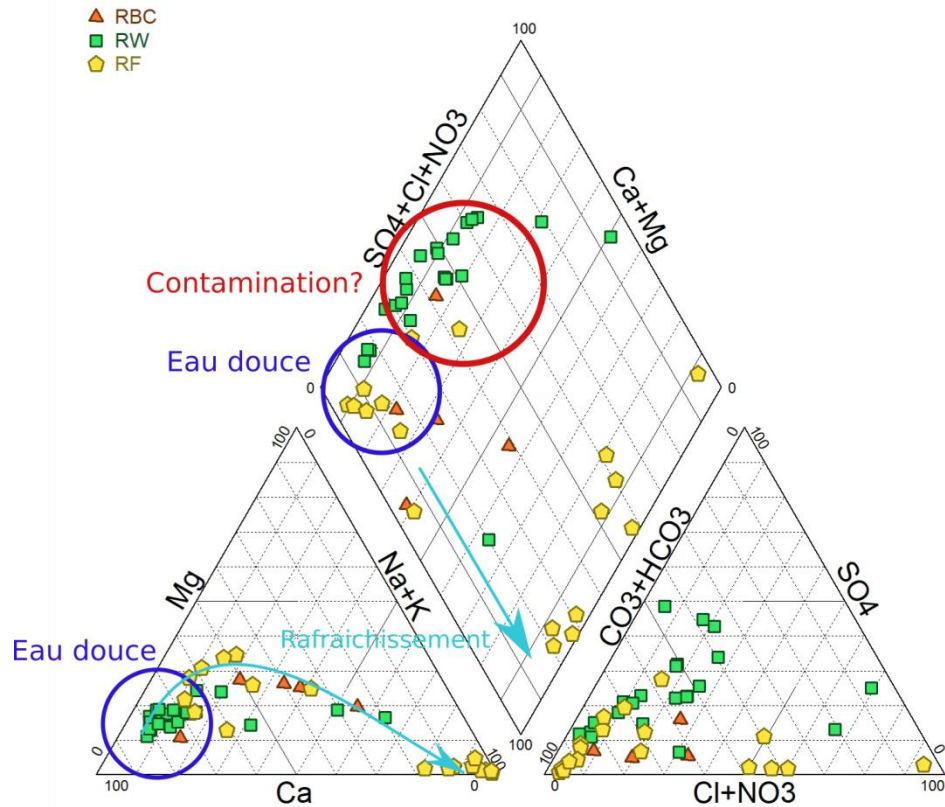


Figure 4-15 : Représentation des échantillons de l'aquifère du Socle (médiane) dans un diagramme de Piper

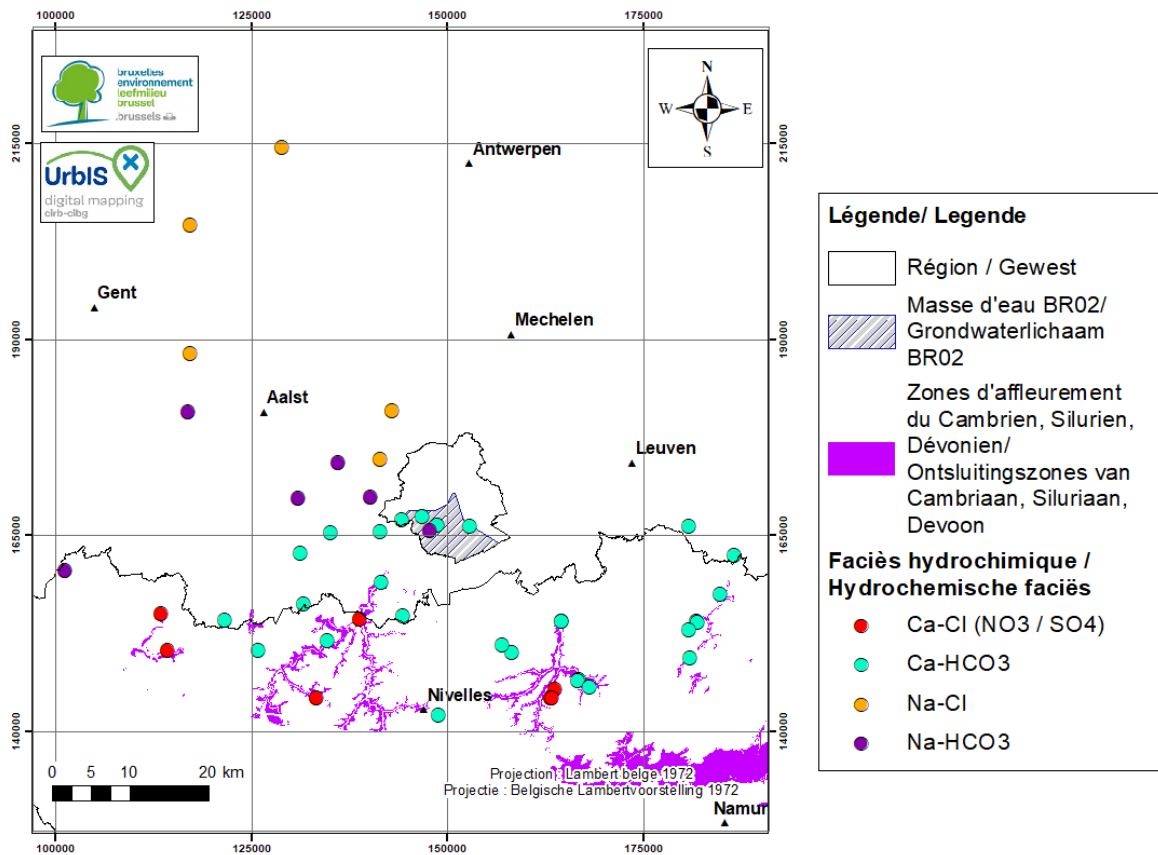


Figure 4-16 : Répartition spatiale des types de faciès hydrochimiques de l'aquifère du Socle

4.2.2. Variations spatiales des paramètres

Les Figures 4-17 à 4-37 présentent les distributions spatiales des principaux paramètres physico-chimiques, des éléments majeurs et de certains éléments mineurs, à savoir la conductivité électrique de l'eau, le pH, et les concentrations en O₂ dissous, Ca, Cl, HCO₃, Mg, Na, K, SO₄, NO₃, NH₄, Fe, Mn, F, As, Zn, B, Pb, Cu, Ni.

La conductivité électrique moyenne varie entre 400 et 800 µS/cm pour l'ensemble de l'aquifère du Socle. Il y a néanmoins quelques stations avec une conductivité plus élevée (> 1000µS/cm) qui se situent principalement dans la partie nord de l'aquifère et il y en a aussi quelques-unes en Wallonie. Les valeurs de pH sont plutôt neutres au sud et deviennent progressivement basiques vers le nord (jusqu'à un pH de 9.5). Les valeurs de concentrations en O₂ dissous sont plutôt élevées en Région wallonne et faibles en Région flamande. Elles sont également élevées en Région de Bruxelles-Capitale (jusqu'à 10.8 mg/L). Les valeurs de concentrations en Ca sont plus élevées au sud (jusqu'à 200 mg/L) qu'au nord (< 20 mg/L). Les valeurs de concentrations en Cl sont variables en Région wallonne, plutôt moyennes à proximité des zones d'affleurement et faibles ailleurs. En Région flamande, les concentrations en Cl sont faibles au sud et élevées au nord. La Région de Bruxelles capitale se situe dans une zone de transition avec des concentrations faibles à moyennes. Les valeurs de concentrations en HCO₃ sont généralement moyennes ou faibles sur l'ensemble de la zone. Les valeurs de concentrations en Mg sont moyennes à élevées au sud (entre 5 et 35 mg/L), relativement élevées en Région de Bruxelles-Capitale (jusqu'à 35 mg/L) et puis deviennent faibles au nord (< 5mg/L). Les valeurs de concentrations en Na sont globalement faibles (< 25 mg/L) au sud et élevées au Nord (> 250 mg/L). Il y a juste quelques sites avec des concentrations moyennes à élevées à proximité des zones d'affleurement en Région wallonne. Les valeurs de concentrations en K sont globalement plus faibles au sud qu'au nord même si l'augmentation n'est partout homogène. Les valeurs de concentrations en SO₄ sont plutôt moyennes à élevées en Région wallonne (entre 30 et 150 mg/L) et moyennes à faibles au Nord (entre 0 et 80 mg/L). Les valeurs de concentrations en NO₃ sont presque partout inférieures à 10mg/L sauf quelques points en Région wallonne, un point en Région de Bruxelles-Capitale (P23) et un point en Flandre. Les valeurs de concentrations en NH₄ sont faibles (< 0.1 mg/L) dans le sud-est de la zone et pour le point P23 tandis qu'elles sont moyennes à élevées dans le reste de la zone.

Les valeurs de concentrations en Fe total sont élevées au sud et diminuent vers le nord mais pour certains sites la concentration en fer total n'est pas mesurée. Les concentrations en Mn sont assez variables dans l'ensemble de la zone. Les concentrations en F sont plus élevées au nord (> 0.5 mg/L) qu'au sud (< 0.5mg/L). Les concentrations en As sont variables en région wallonne, très faibles en Région de Bruxelles-Capitale et moyennes en Flandre. La concentration en Zn est généralement faible (< 20 µg/L) à l'exception de quelques sites en Région de Bruxelles-capitale et en Région wallonne. La concentration en B augmente progressivement du sud vers le nord. La concentration en Pb semble également augmenter du sud vers nord. La concentration en Cu est relativement faible sur l'ensemble de la zone. La concentration en Ni est faible sur la majorité de la zone (< 5 µg/L) sauf quelques sites en Région wallonne à proximité des zones d'affleurements.

Pour de nombreux paramètres, on constate donc une grande différence entre le sud et le nord de l'aquifère du Socle. La Région de Bruxelles-Capitale se situe à la limite entre ces deux zones. La répartition spatiale des faciès, établis par le diagramme de Piper, avait déjà permis de mettre en évidence une différence dans la minéralisation entre le nord et le sud. Les eaux bicarbonatées

calciques et magnésiennes du sud, ont des concentrations plus élevées en Ca, Mg, un pH relativement neutre, une concentration plus faible en Na, K, Cl, B et F. Pour les eaux bicarbonatées sodiques et potassiques et les eaux chlorurées sodiques et potassiques du nord, le pH est basique et un comportement inverse à celui constaté au sud est observé pour les concentrations. Ces évolutions conjointes du Ca, Mg, Na, K sont typiques d'un phénomène de chromatographie ionique associés aux échanges cationiques qui se produisent lors du retrait des eaux marines d'un aquifère (Appelo et Postma 2005). Au sud, on observe donc vraisemblablement des eaux de recharge assez récentes et au nord des eaux marines plus anciennes. Entre les deux, on observe des eaux dont les compositions chimiques évoluent suite au phénomène de rafraichissement.

En plus de ce processus de rafraichissement, les réactions d'oxydoréduction influencent également la minéralisation des eaux souterraines. En Région wallonne, les concentrations en O₂ dissous sont généralement plus élevées et elles diminuent progressivement vers le nord, suivant l'écoulement souterrain. Il y a une exception, en Région de Bruxelles-Capitale, la concentration en O₂ dissous est élevée. Sachant que la nappe est supposée captive à cet endroit, une telle concentration en oxygène n'est pas attendue. Il est possible que la mesure n'ait pas été réalisée dans des conditions adéquates (purge insuffisamment longue ? Non-contrôle des échanges avec l'atmosphère ? Calibration de la sonde ?). Dans le cas contraire, cela signifierait que la nappe est en contact avec la surface et qu'elle pourrait être facilement contaminée. Les mesure concernant l'oxygène dissous ne semblent pas fiables et sont à prendre avec précautions.

La concentration en nitrate est faible à moyenne en Région wallonne et faible pour le reste de la zone. La concentration en NH₄ est plus élevée vers le nord-ouest, ce qui indique des conditions réductrices. Les teneurs en Fe et en Mn sont assez variables et elles peuvent déjà être présentes en grande quantité dans la partie Sud. En Flandre et en Région de Bruxelles-Capitale les conditions semblent réductrices. Par contre, en Région wallonne, le caractère libre ou captif est fort variable d'un endroit à l'autre en fonction de la présence ou non d'une couche d'argile surmontant le Socle. Il n'y a pas de transition nette entre la partie libre et la partie captive. C'est pour cette raison qu'il est plus difficile de distinguer la zone oxiq, la zone suboxiq et la zone réductrice.

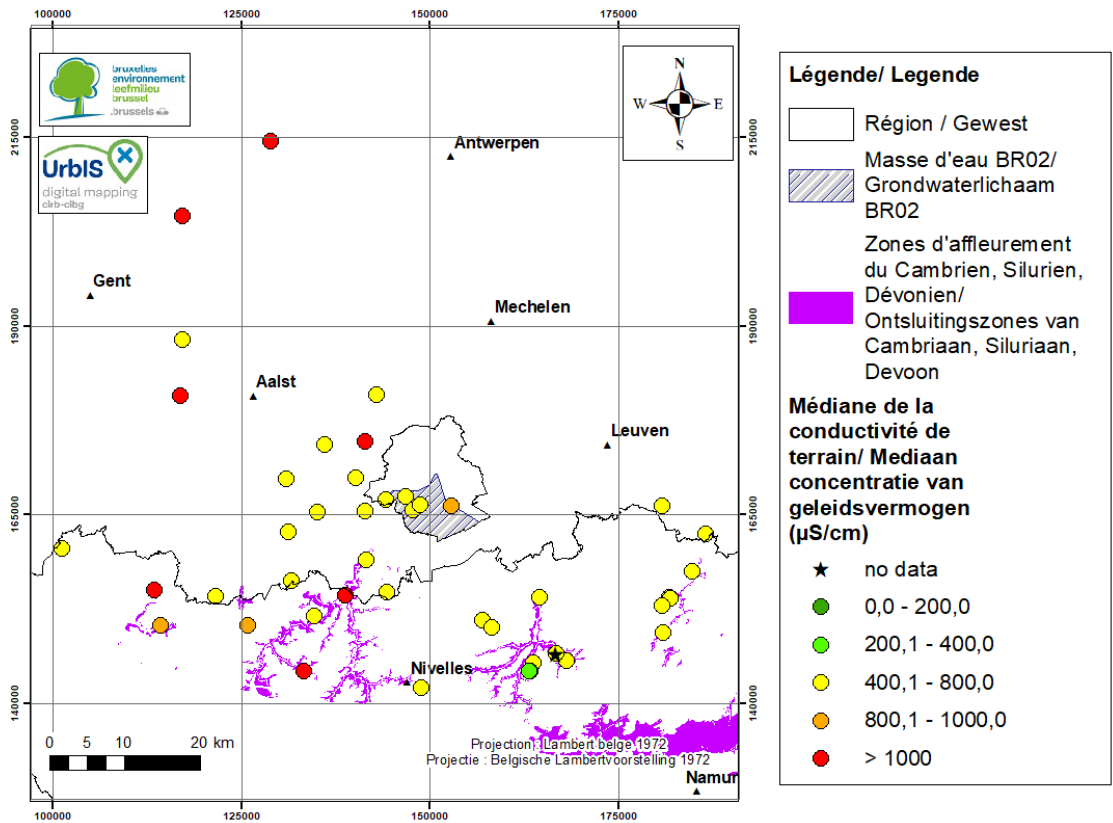


Figure 4-17: Répartition spatiale de la conductivité de terrain (µS/cm) dans l'aquifère du Socle

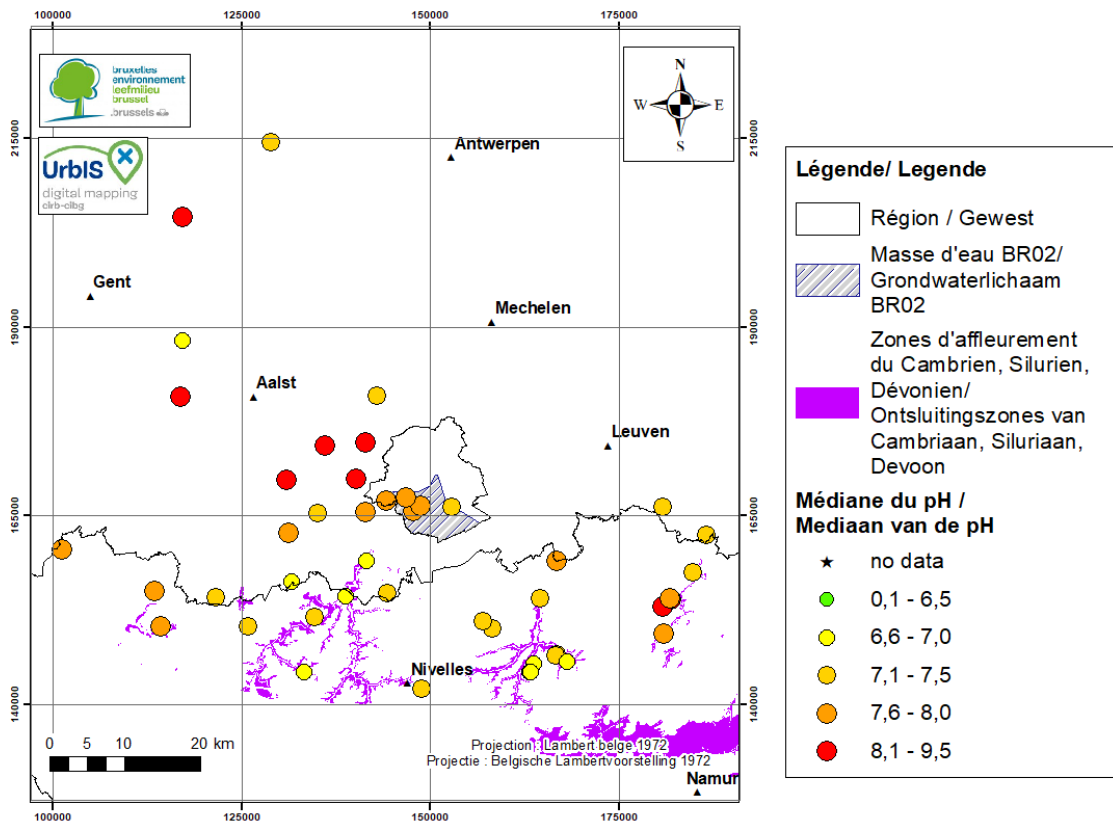


Figure 4-18 : Répartition spatiale du pH dans l'aquifère du Socle

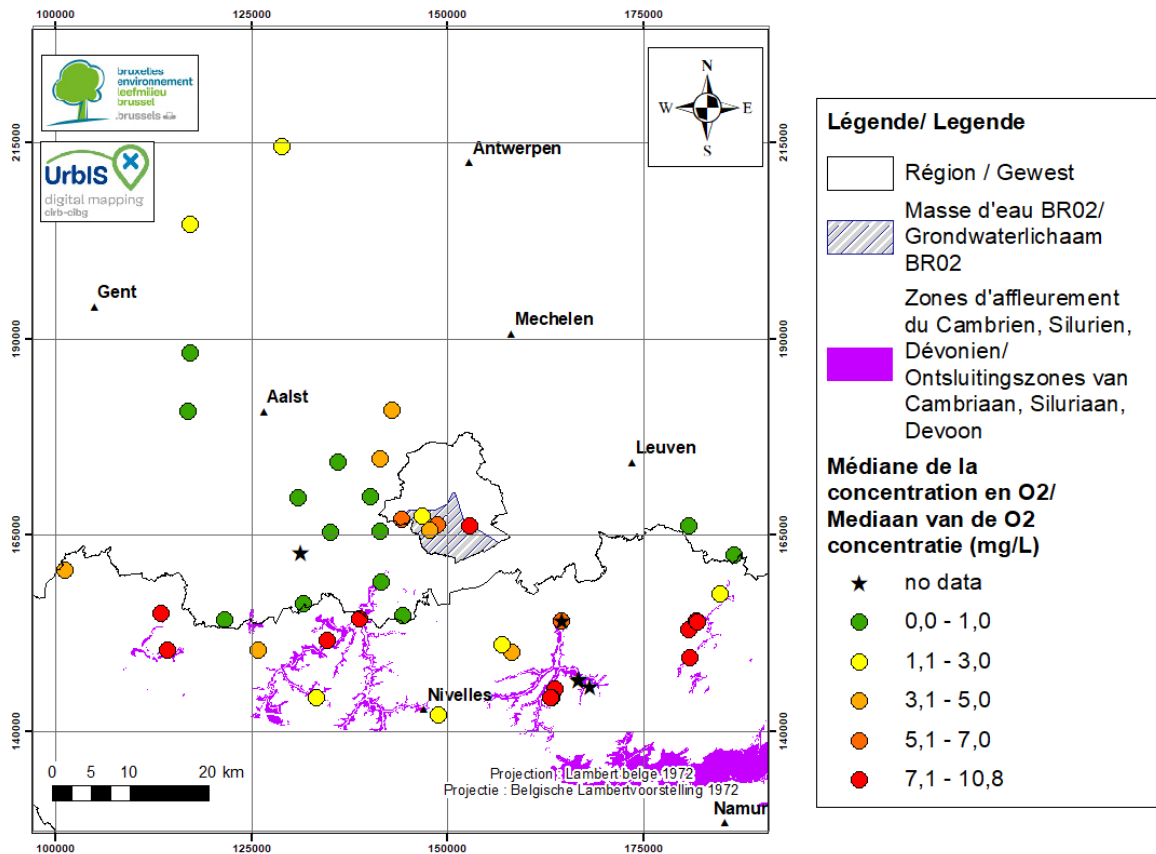


Figure 4-19 : Répartition spatiale de la concentration en O2 dissous dans l'aquifère du Sole

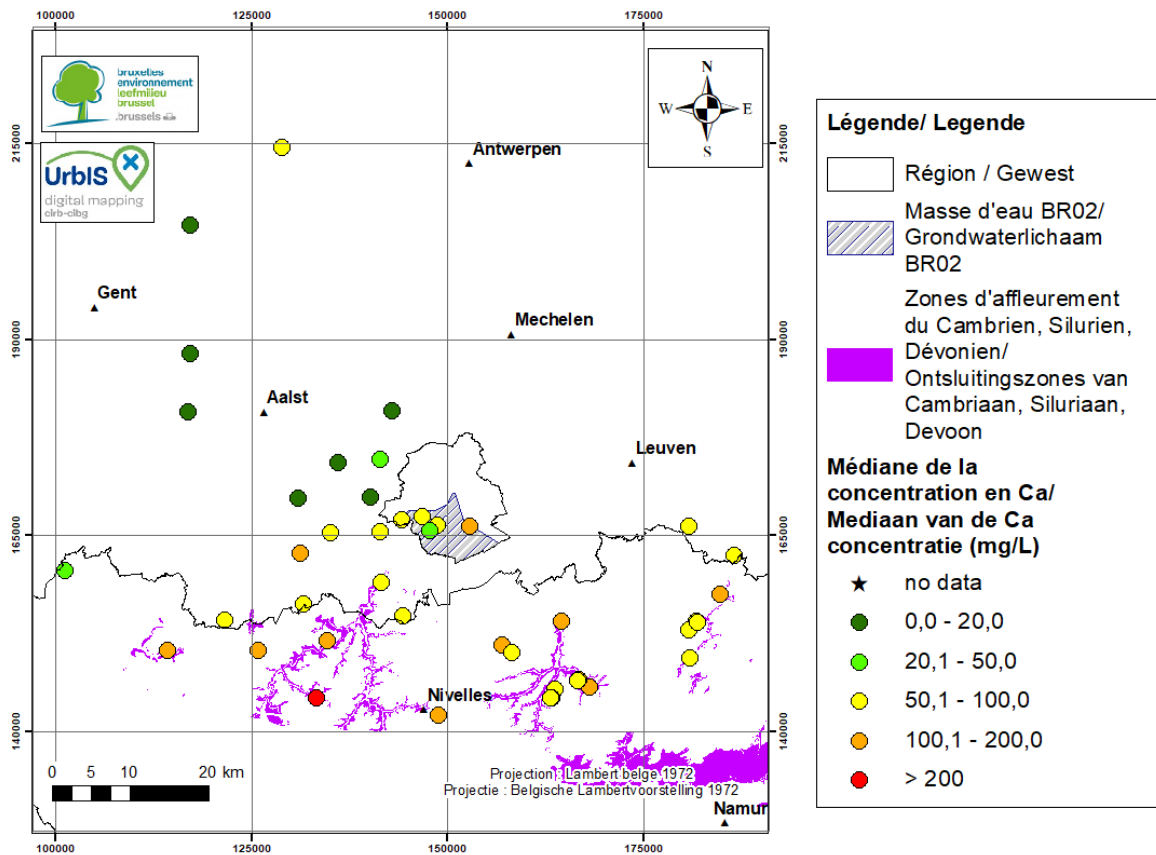


Figure 4-20 : Répartition spatiale de la concentration en Ca dans l'aquifère du Sole

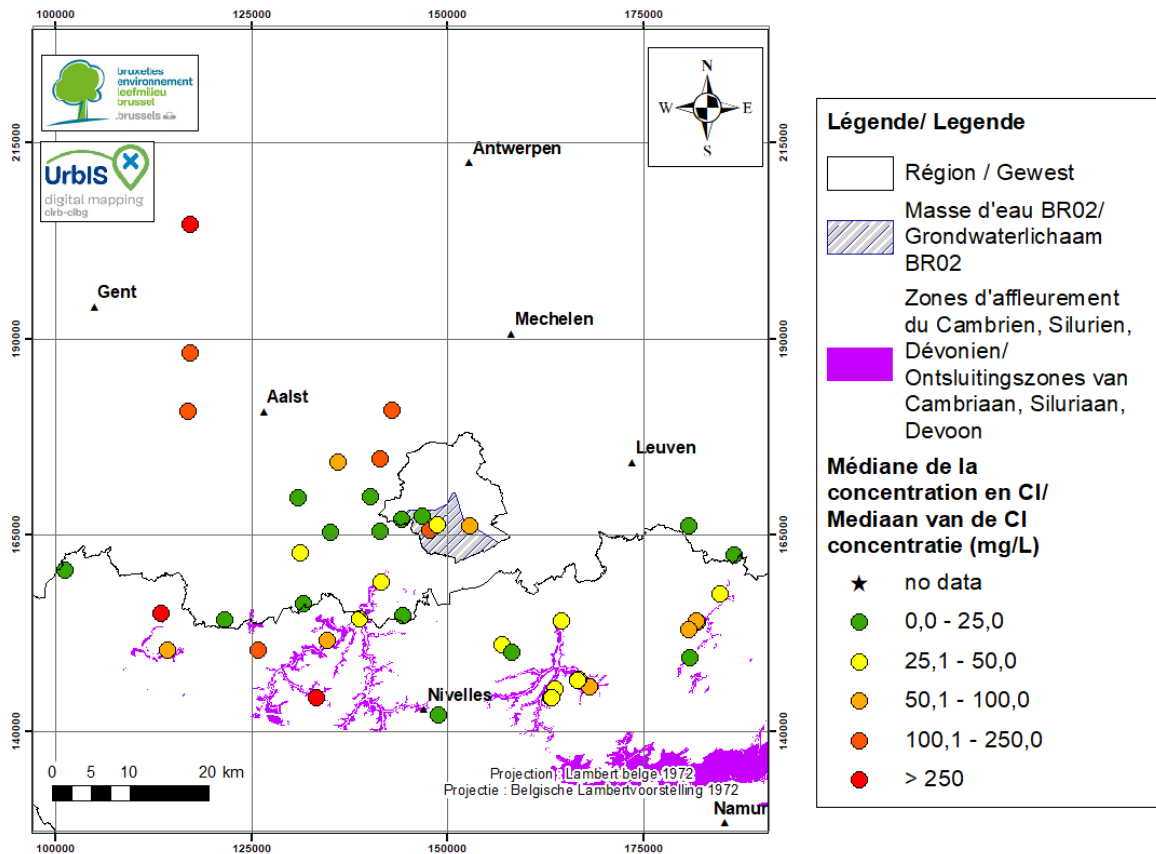


Figure 4-21 : Répartition spatiale de la concentration en Cl dans l'aquifère du Socle

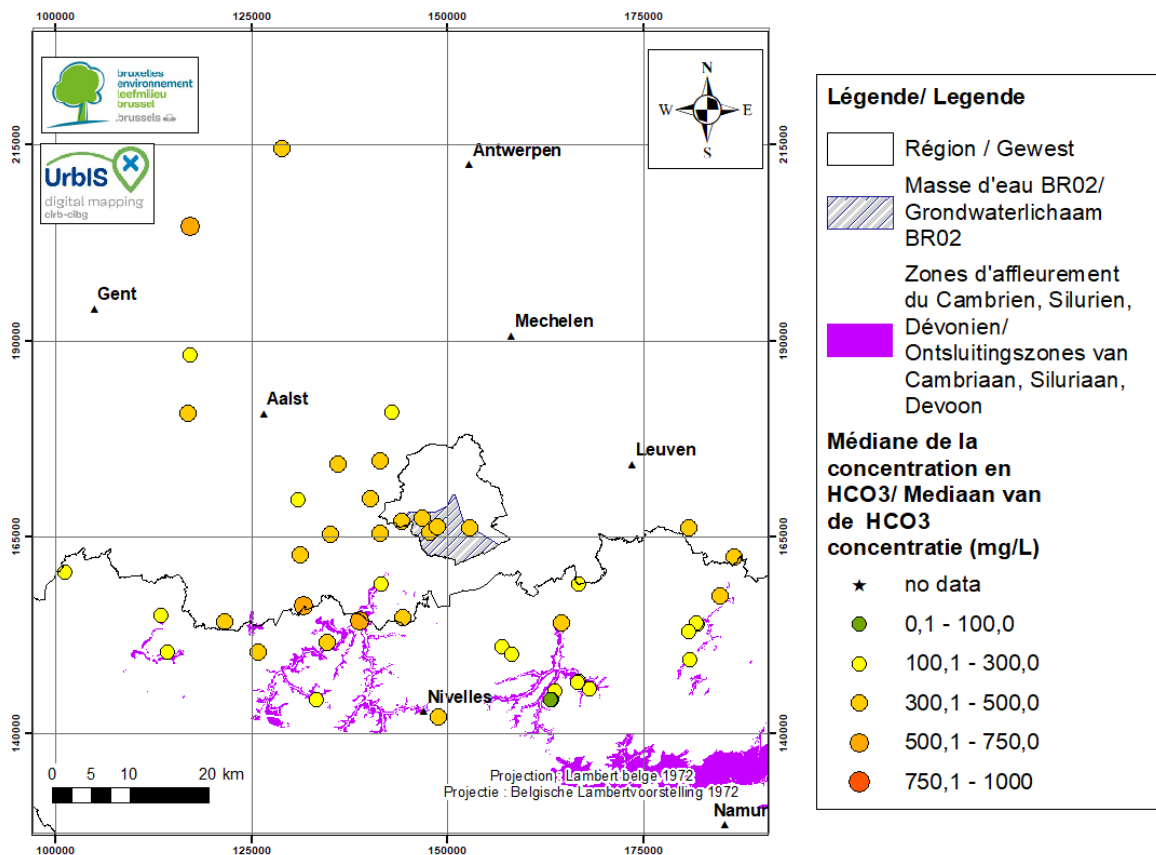


Figure 4-22 : Répartition spatiale de la concentration en HCO3 dans l'aquifère du Socle

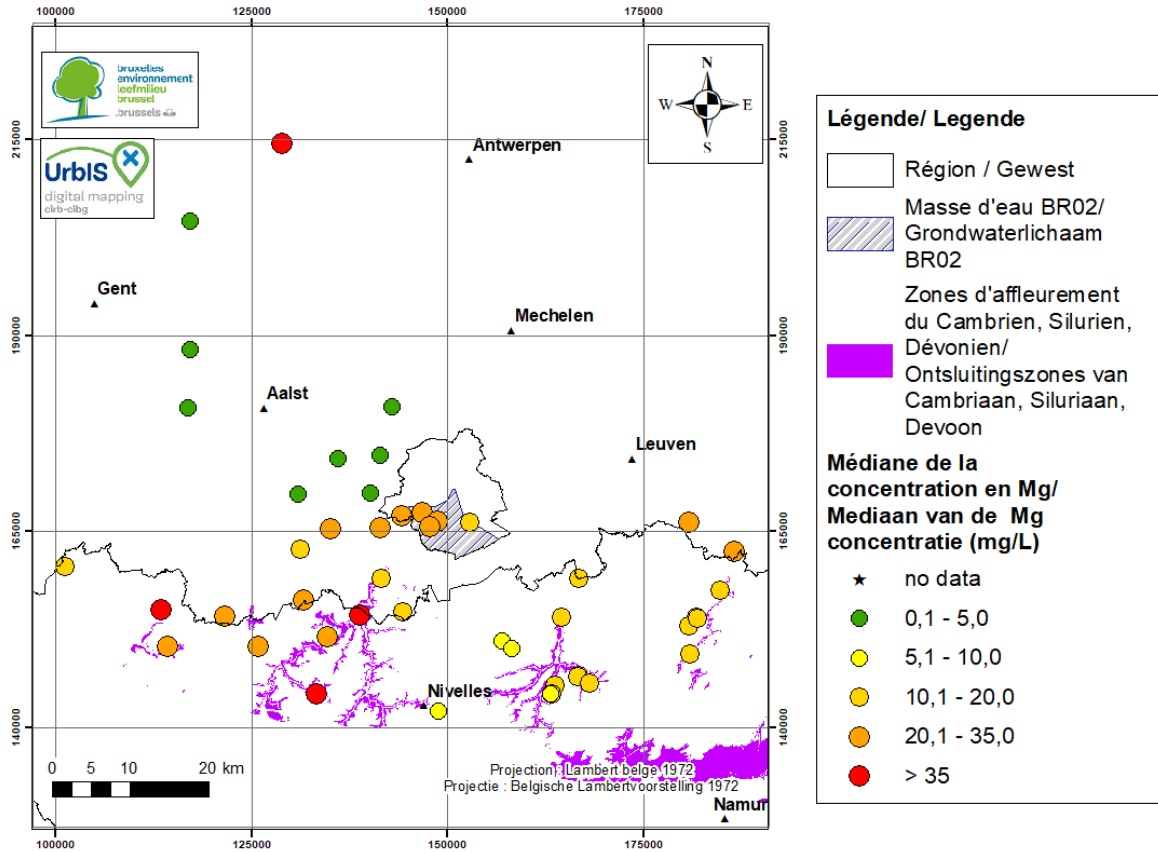


Figure 4-23 : Répartition spatiale de la concentration en Mg dans l'aquifère du Socle

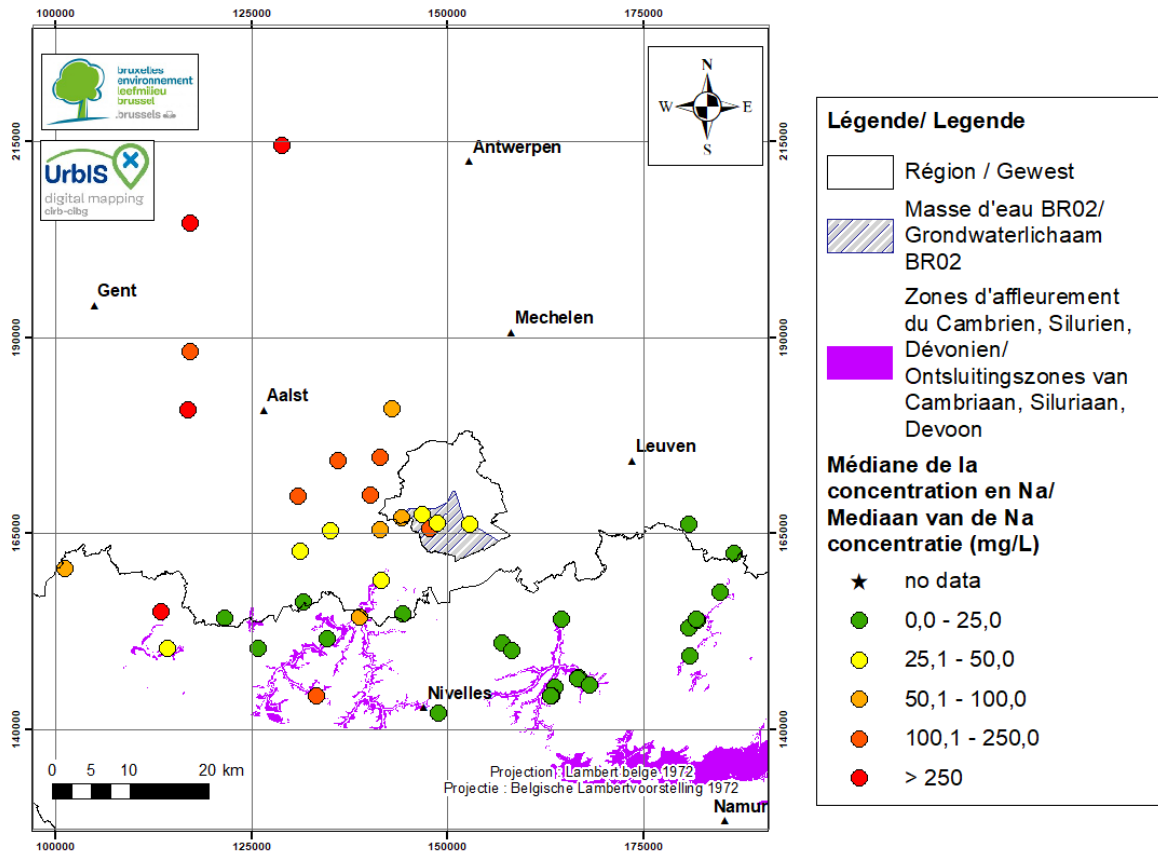


Figure 4-24 : Répartition spatiale de la concentration en Na dans l'aquifère du Socle

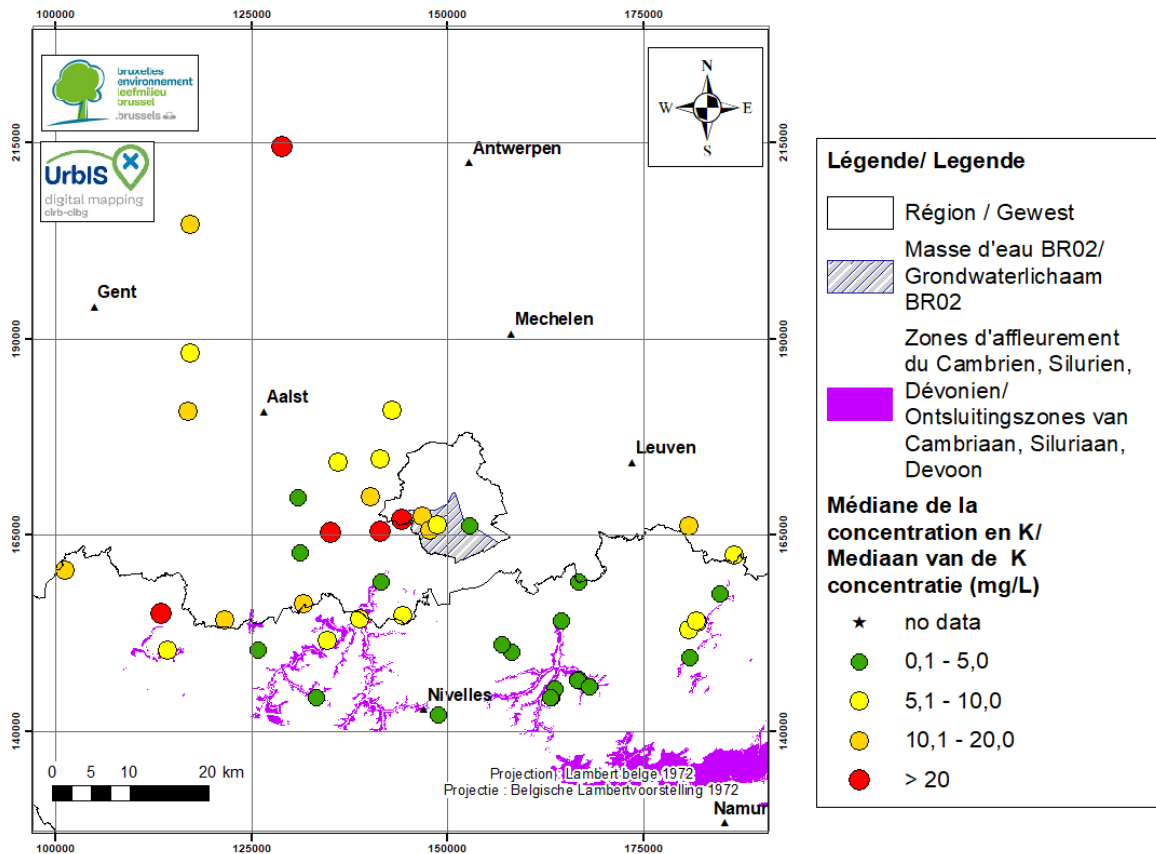


Figure 4-25 : Répartition spatiale de la concentration en K dans l'aquifère du Socle

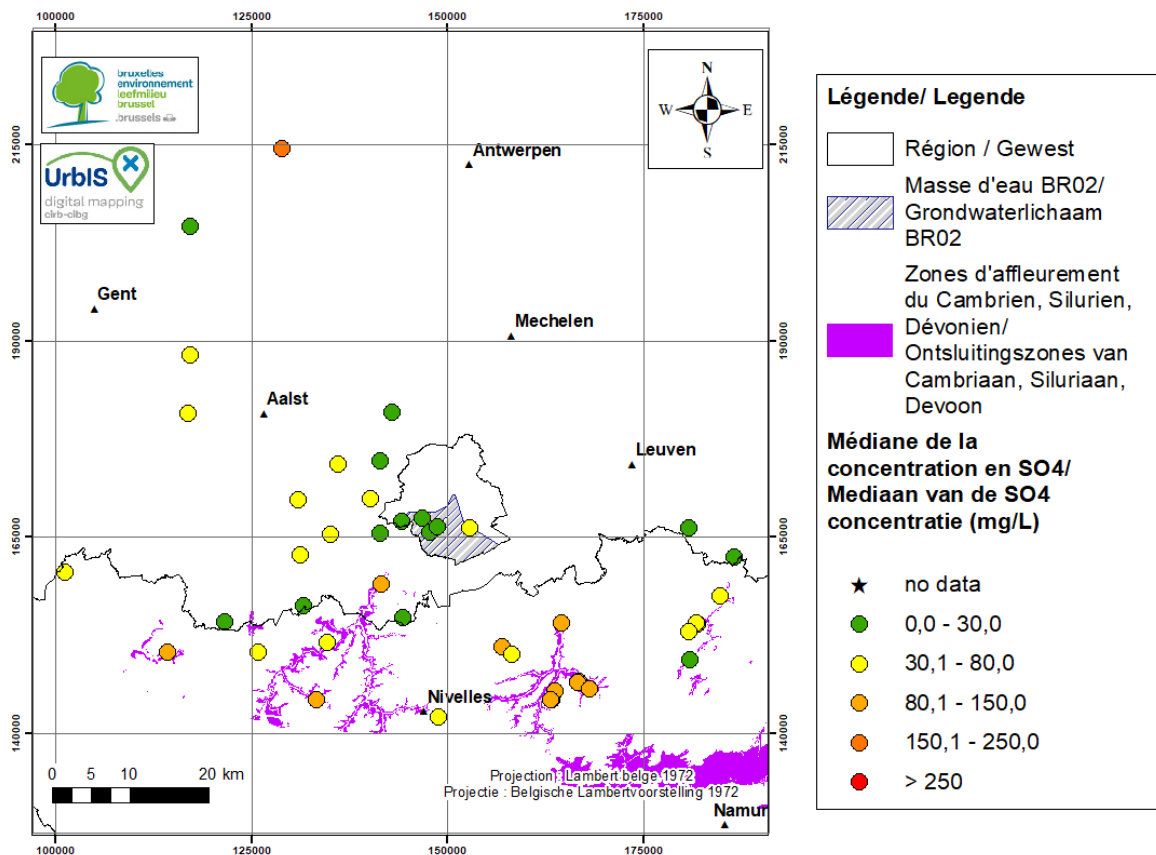


Figure 4-26 : Répartition spatiale de la concentration en SO4 dans l'aquifère du Socle

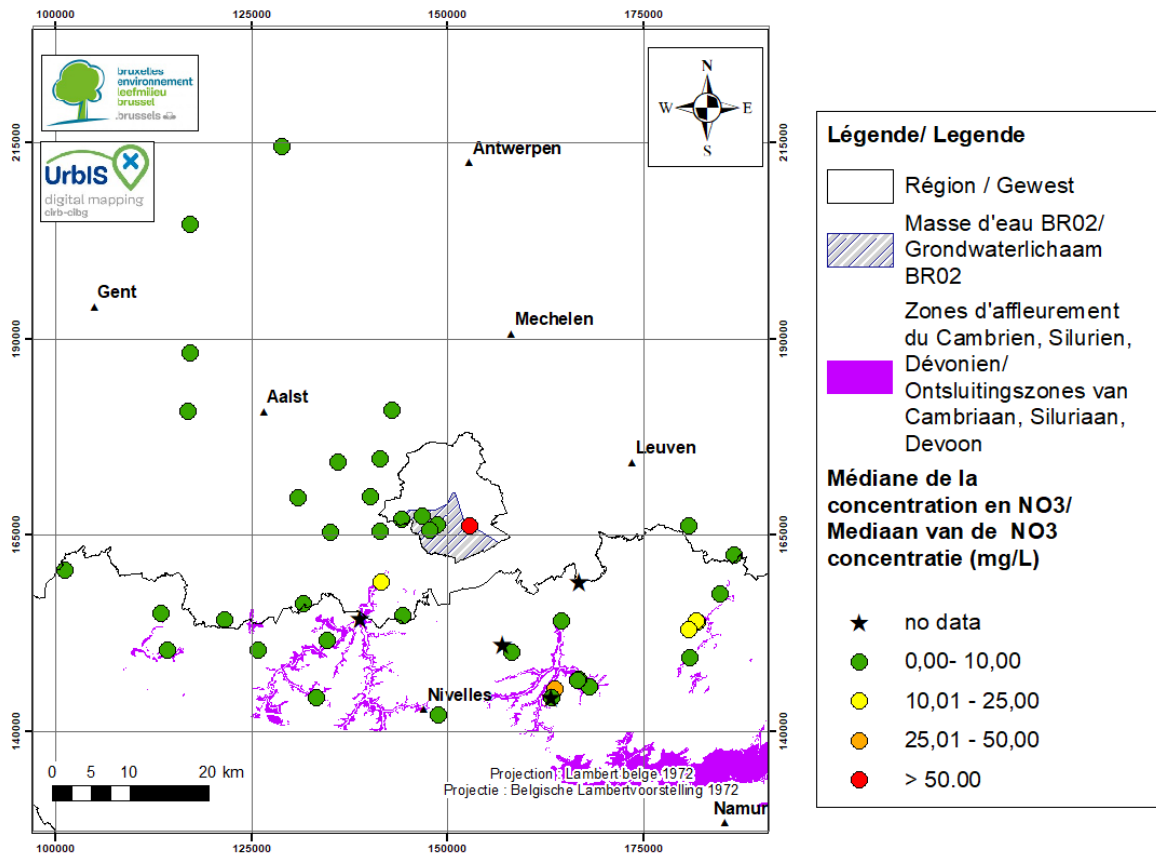


Figure 4-27 : Répartition spatiale de la concentration en NO₃ dans l'aquifère du Socle

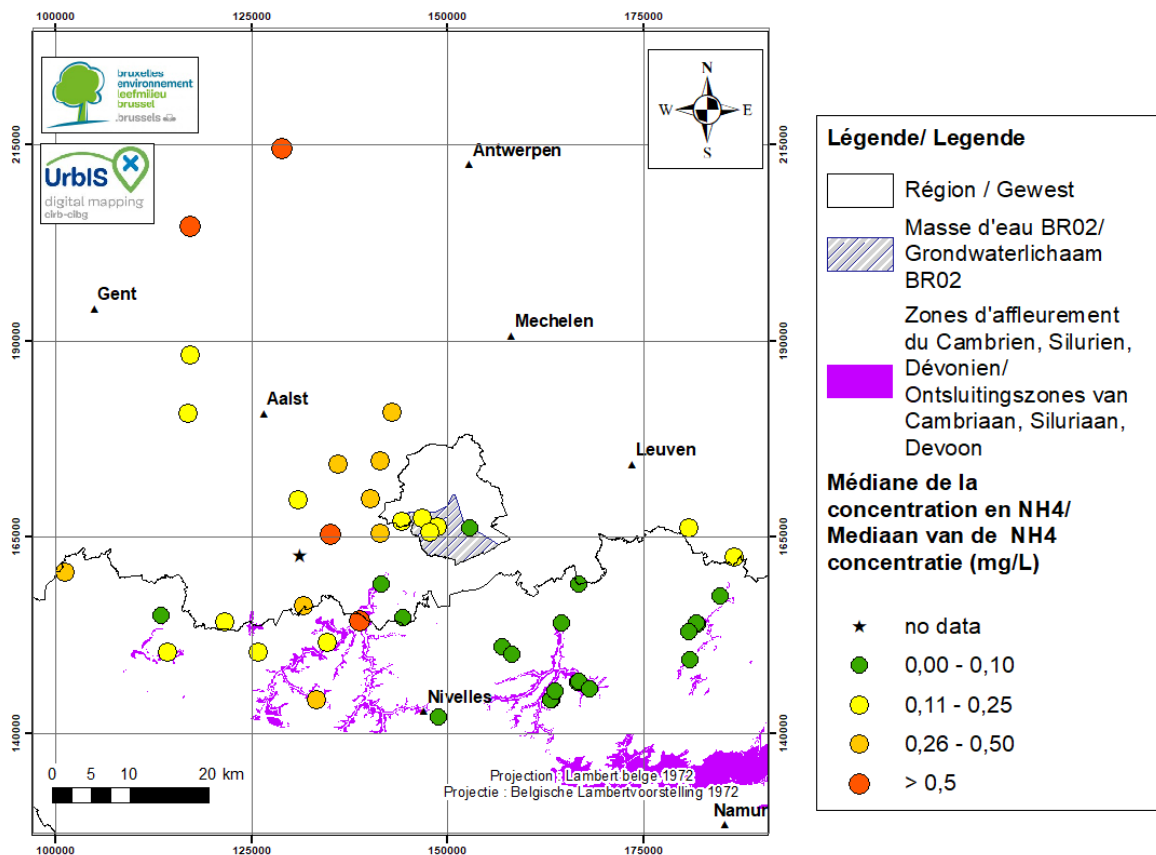


Figure 4-28 : Répartition spatiale de la concentration en NH₄ dans l'aquifère du Socle

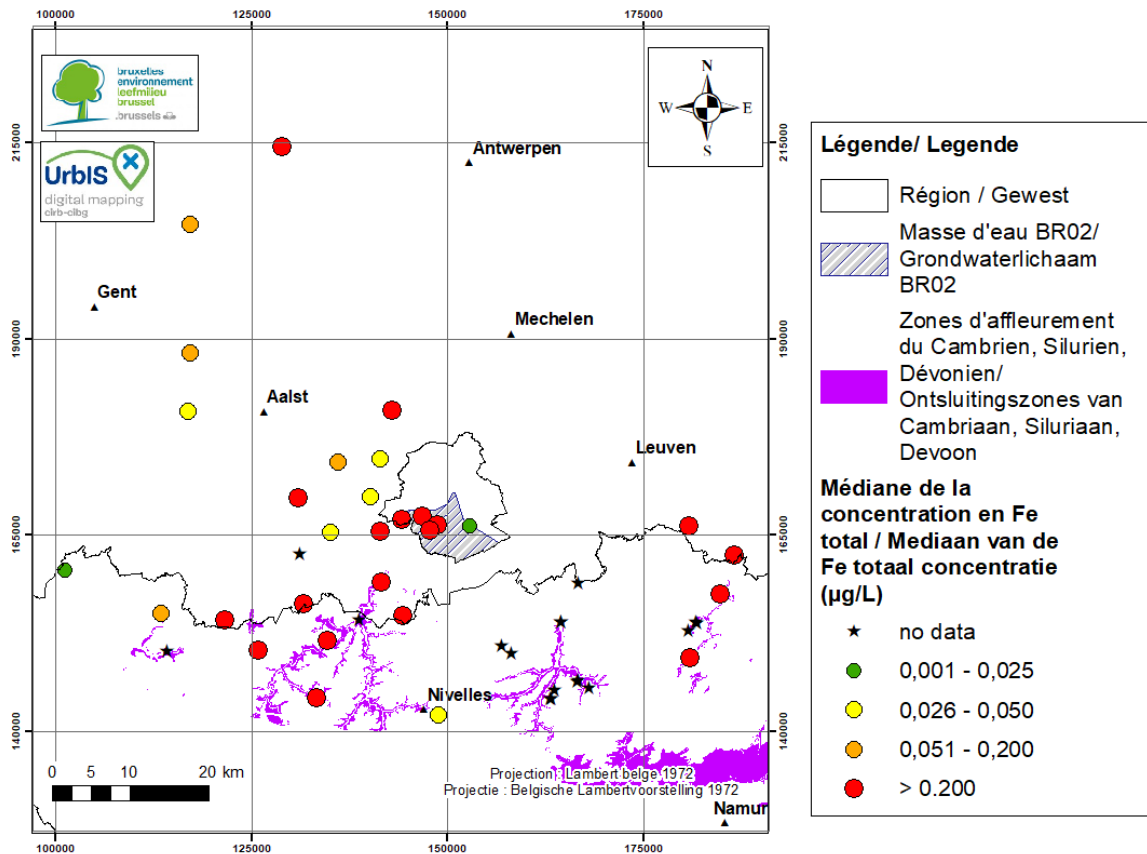


Figure 4-29 : Répartition spatiale de la concentration en Fe total dans l'aquifère du Socle

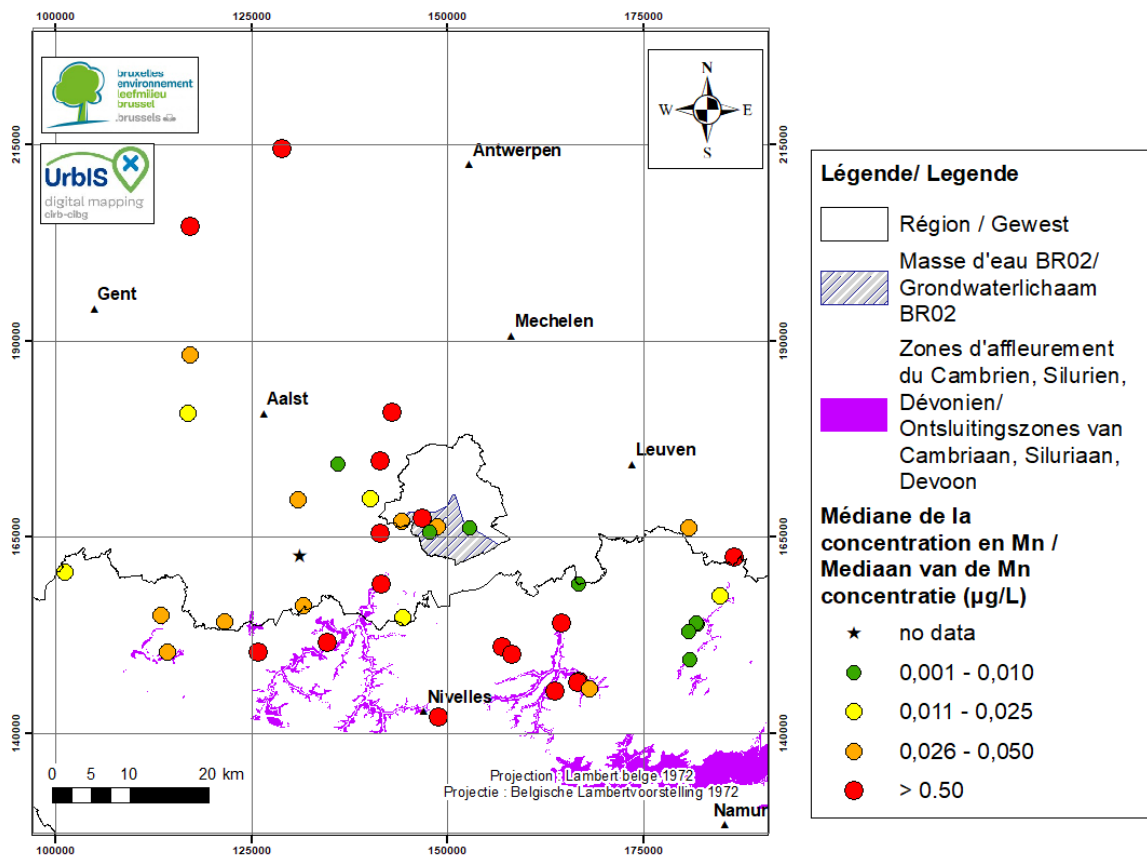


Figure 4-30 : Répartition spatiale de la concentration en Mn dans l'aquifère du Socle

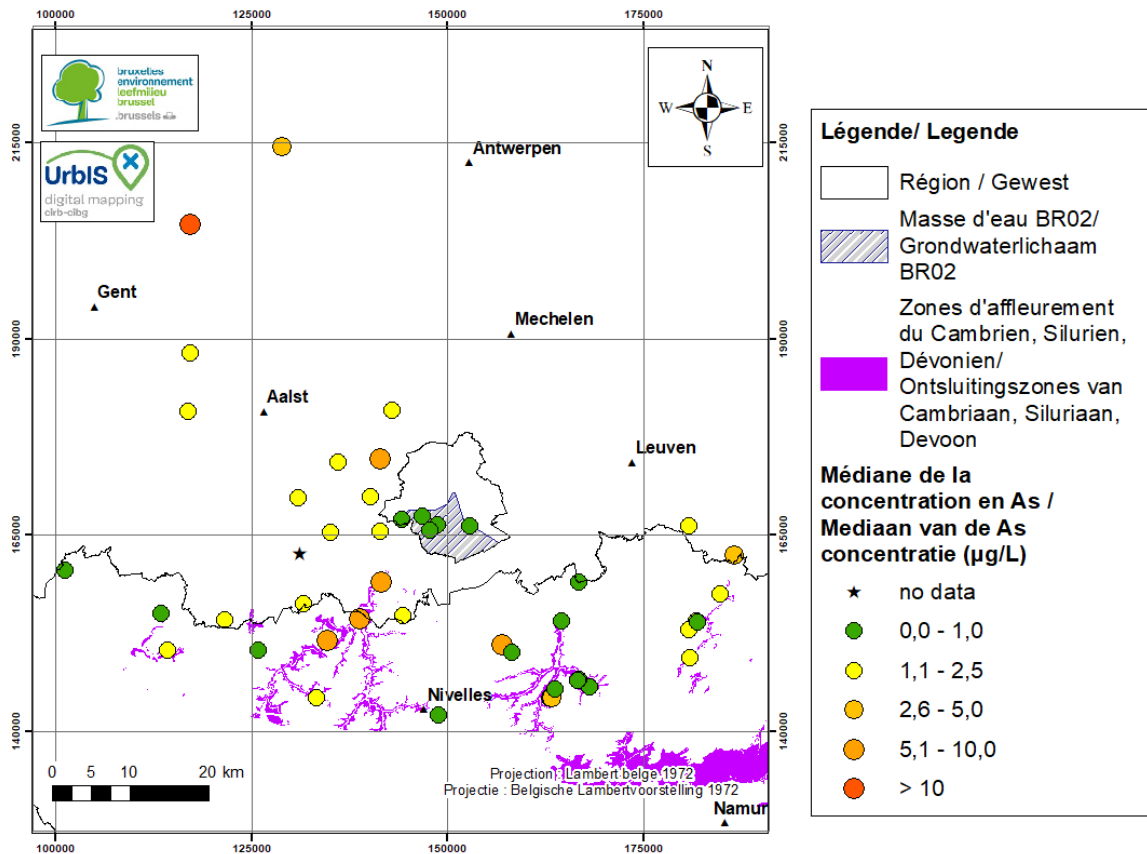


Figure 4-31 : Répartition spatiale de la concentration en As dans l'aquifère du Socle

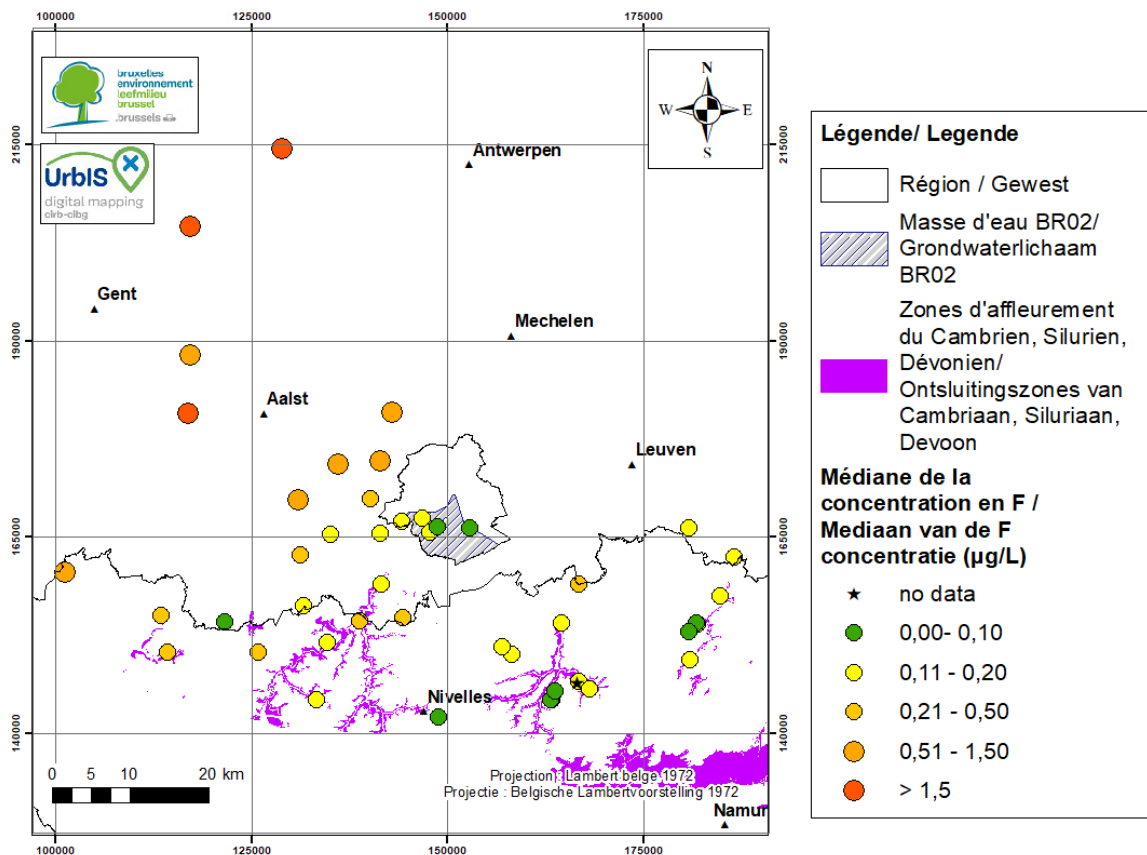


Figure 4-32 : Répartition spatiale de la concentration en F dans l'aquifère du Socle

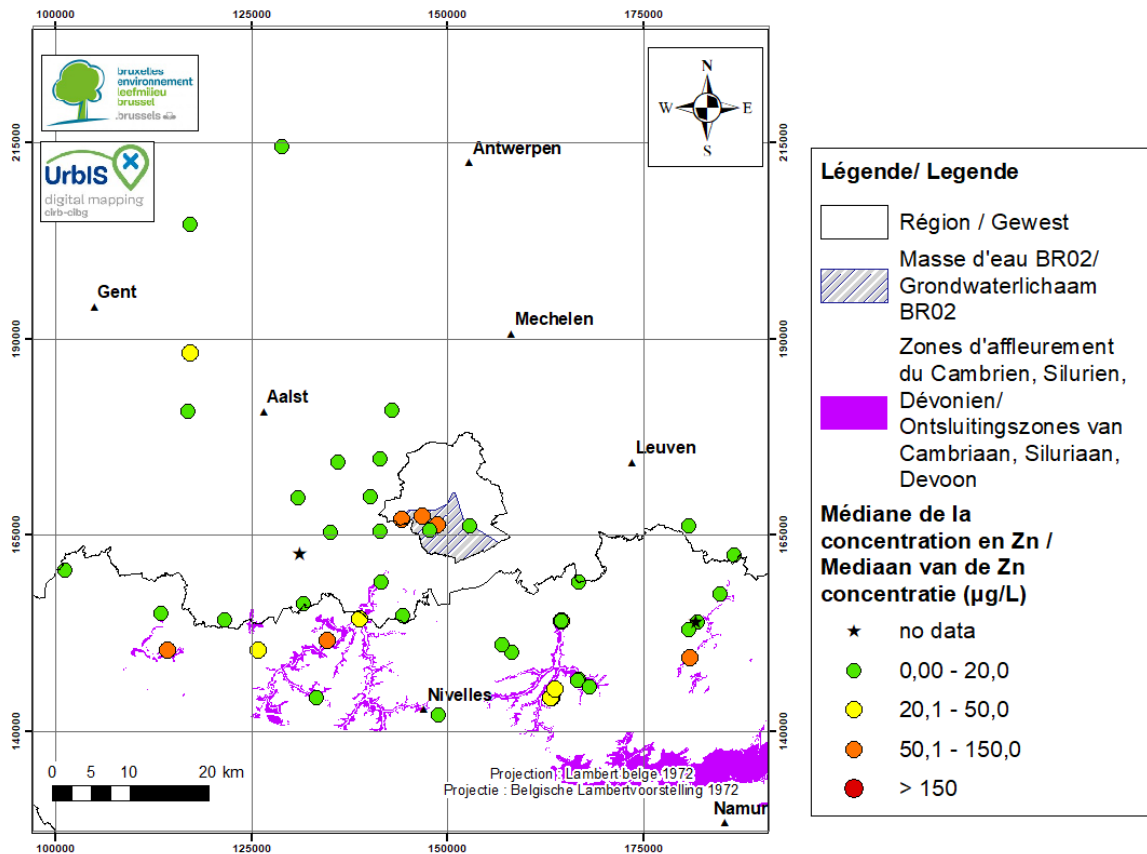


Figure 4-33 : Répartition spatiale de la concentration en Zn dans l'aquifère du Socle

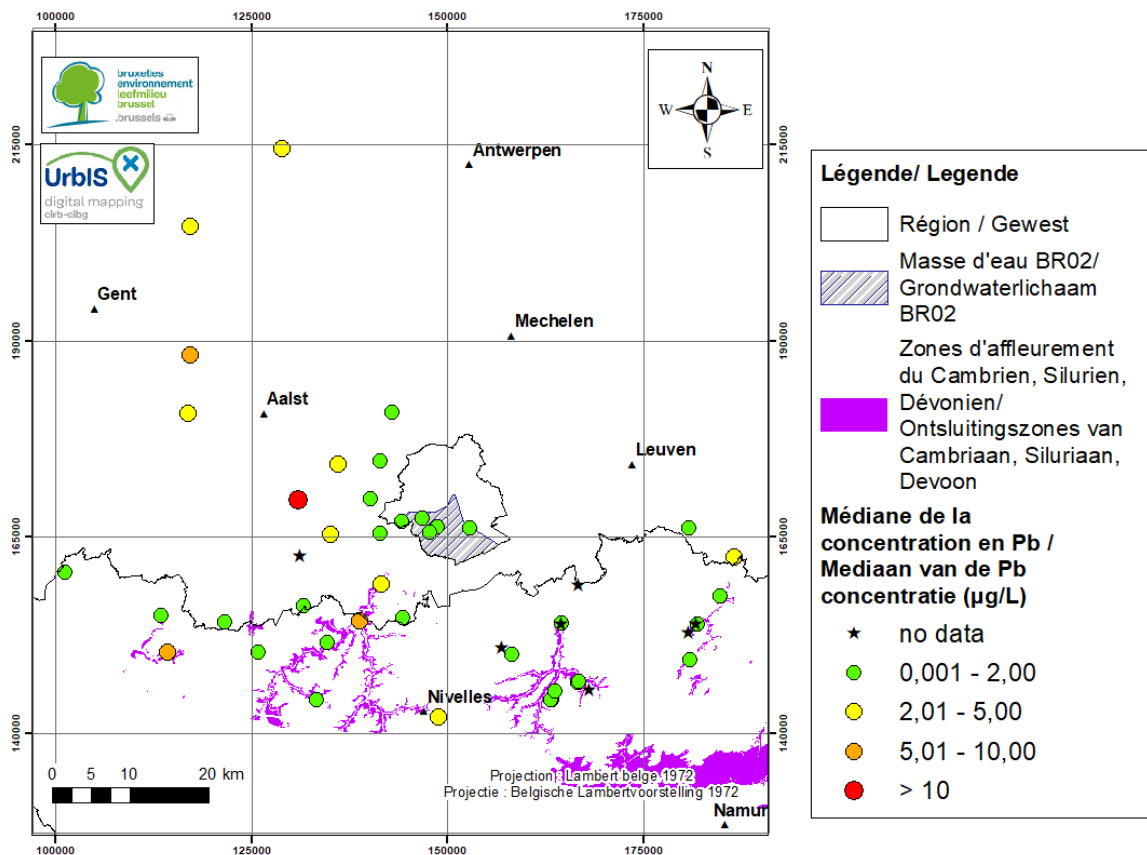


Figure 4-34 : Répartition spatiale de la concentration en Pb dans l'aquifère du Socle

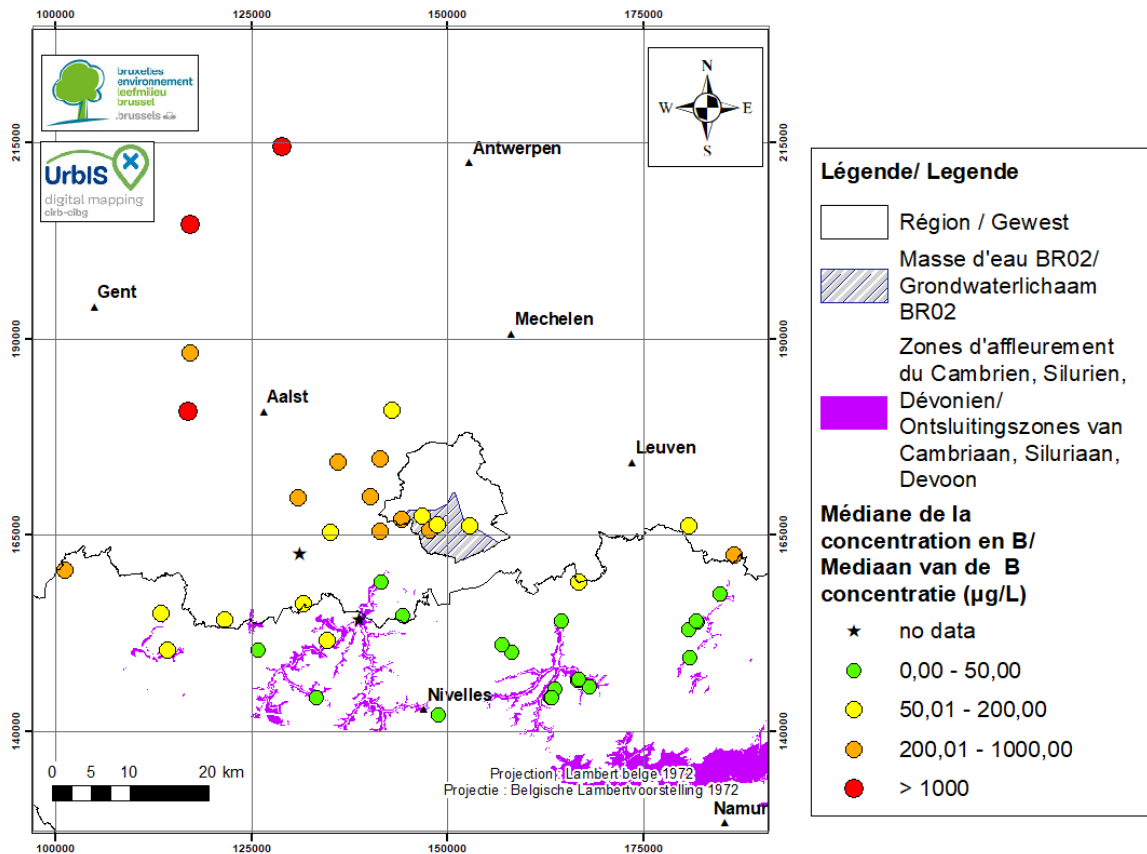


Figure 4-35 : Répartition spatiale de la concentration en B dans l'aquifère du Socle

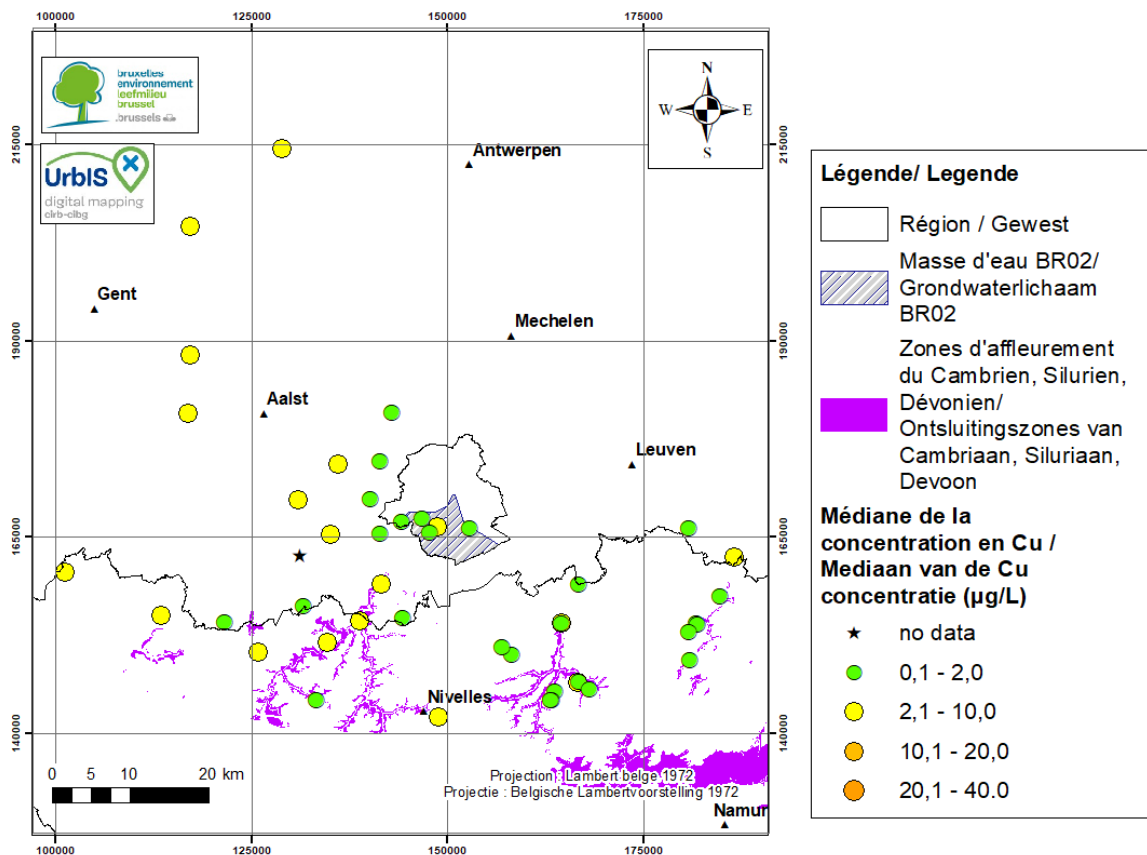


Figure 4-36 : Répartition spatiale de la concentration en Cu dans l'aquifère du Socle

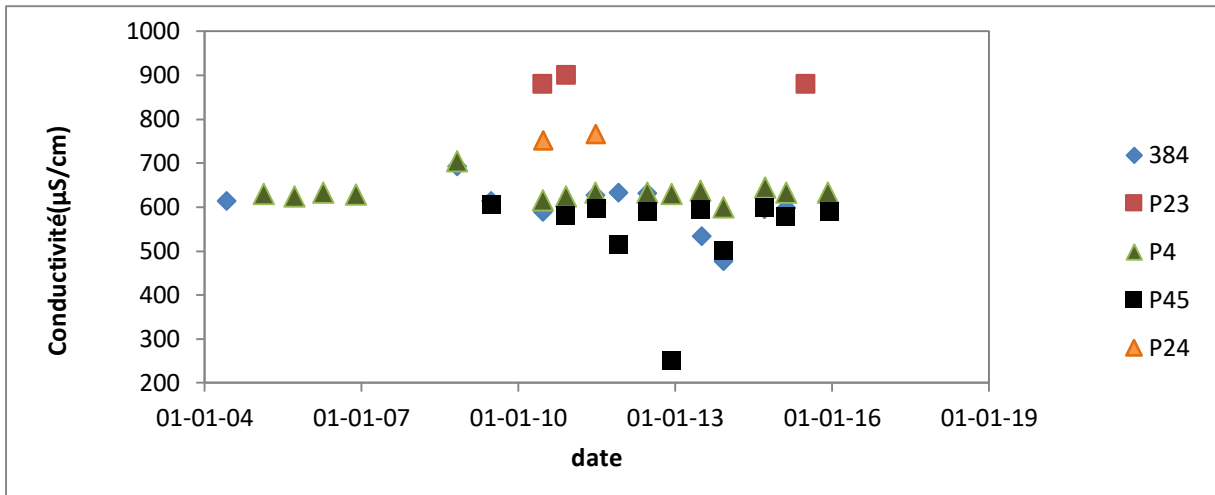


Figure 4-38: Evolution de la conductivité de terrain dans la masse d'eau BR02

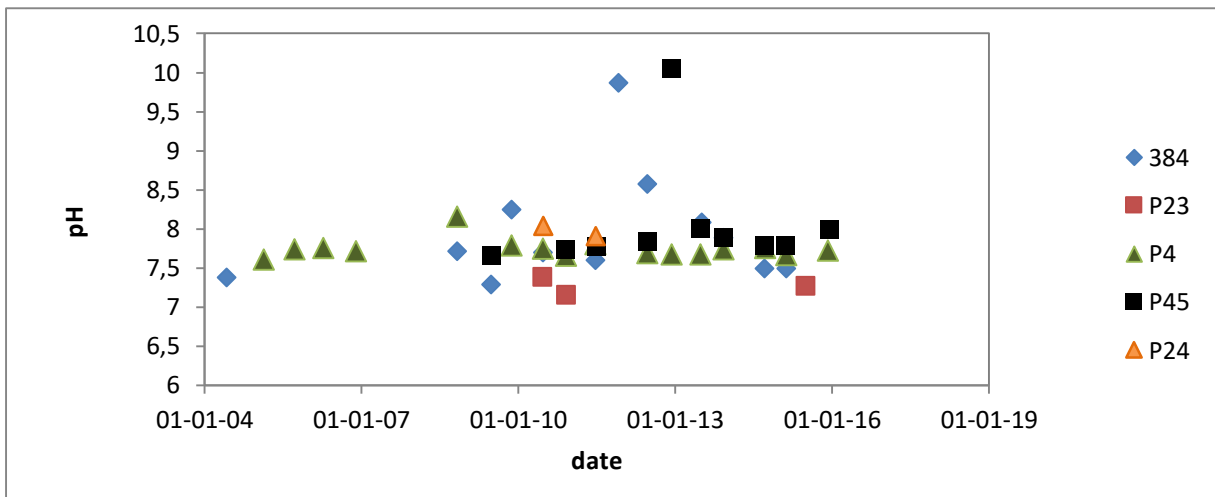


Figure 4-39 : Evolution du pH dans la masse d'eau BR02

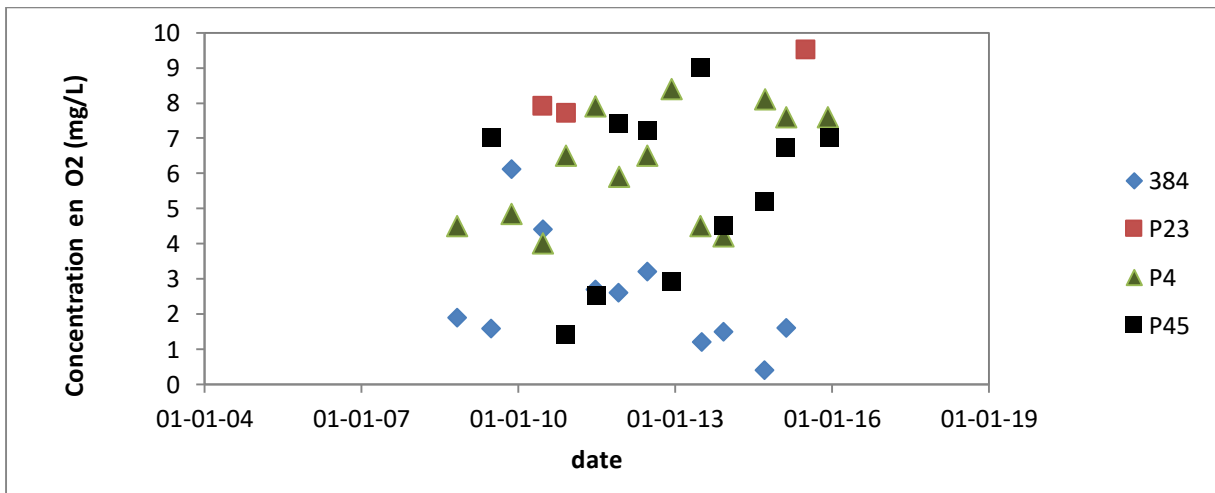


Figure 4-40 : Evolution de la concentration en O2 dans la masse d'eau BR02

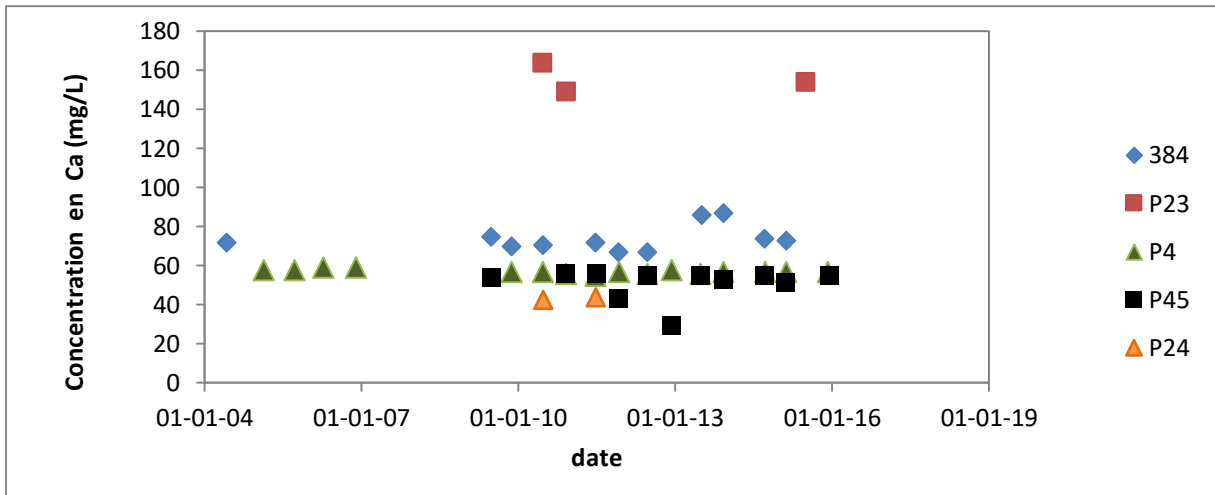


Figure 4-41 : Evolution de la concentration en Ca dans la masse d'eau BR02

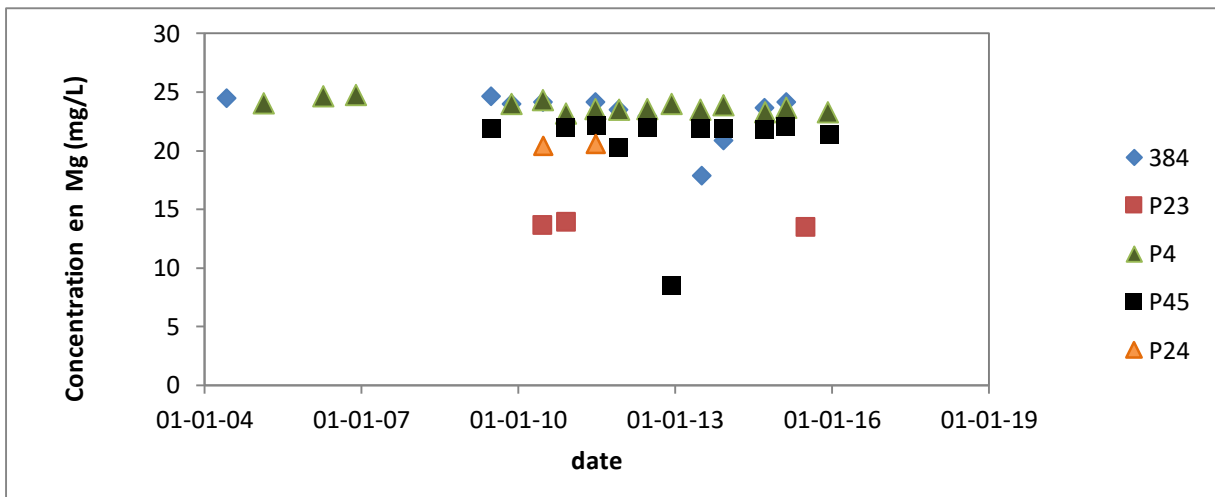


Figure 4-42 : Evolution de la concentration en Mg dans la masse d'eau BR02

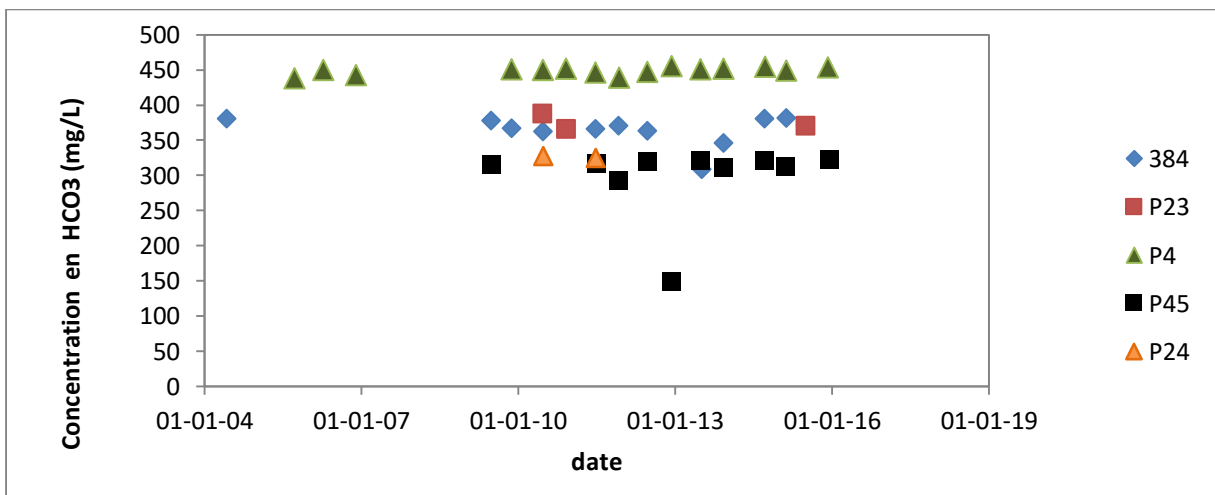


Figure 4-43 : Evolution de la concentration en HCO3 dans la masse d'eau BR02

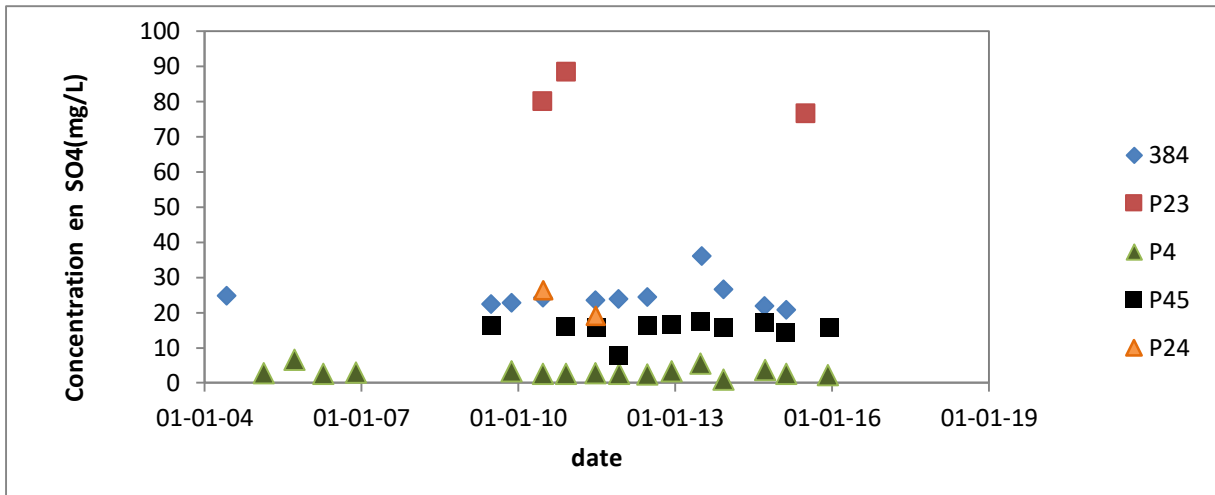


Figure 4-44 : Evolution de la concentration en SO4 dans la masse d'eau BR02

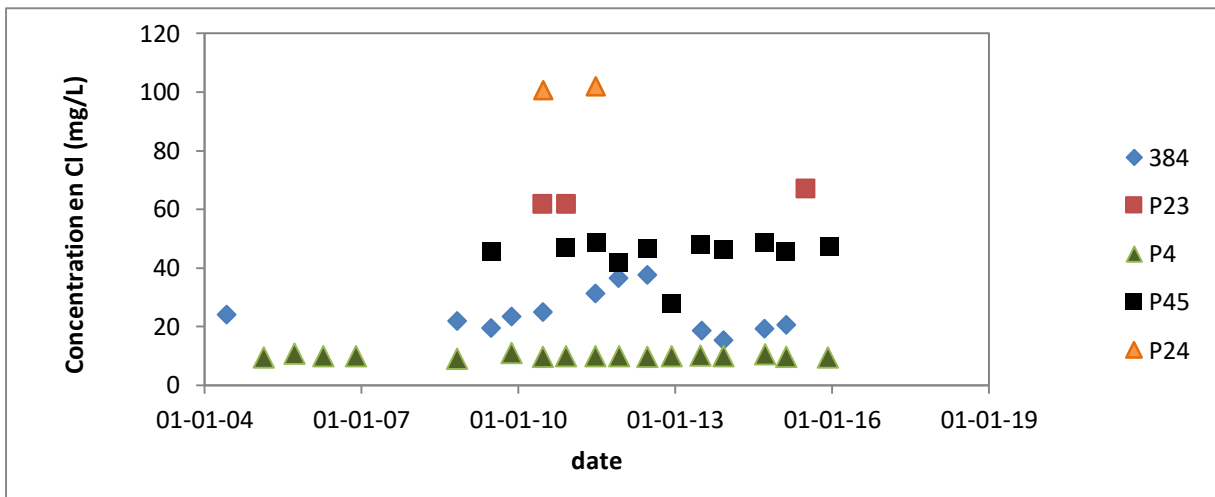


Figure 4-45 : Evolution de la concentration en Cl dans la masse d'eau BR02

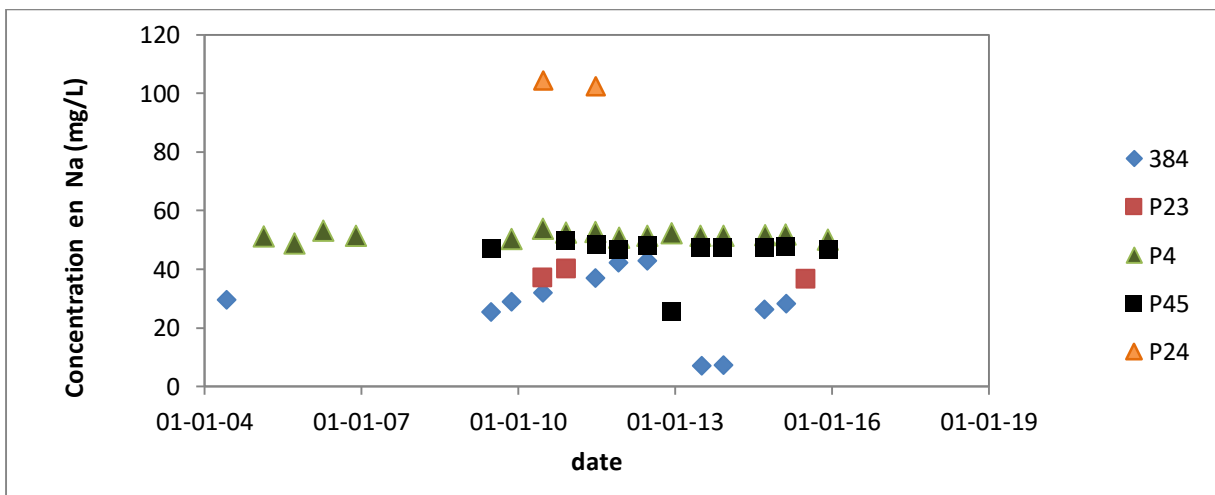


Figure 4-46 : Evolution de la concentration en Na dans la masse d'eau BR02

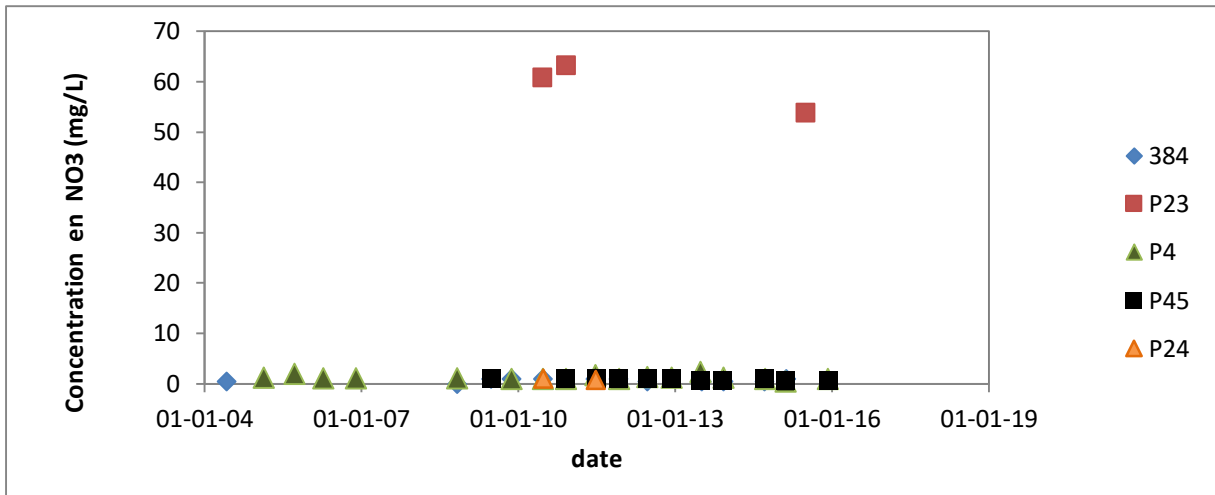


Figure 4-47 : Evolution de la concentration en NO3 dans la masse d'eau BR02

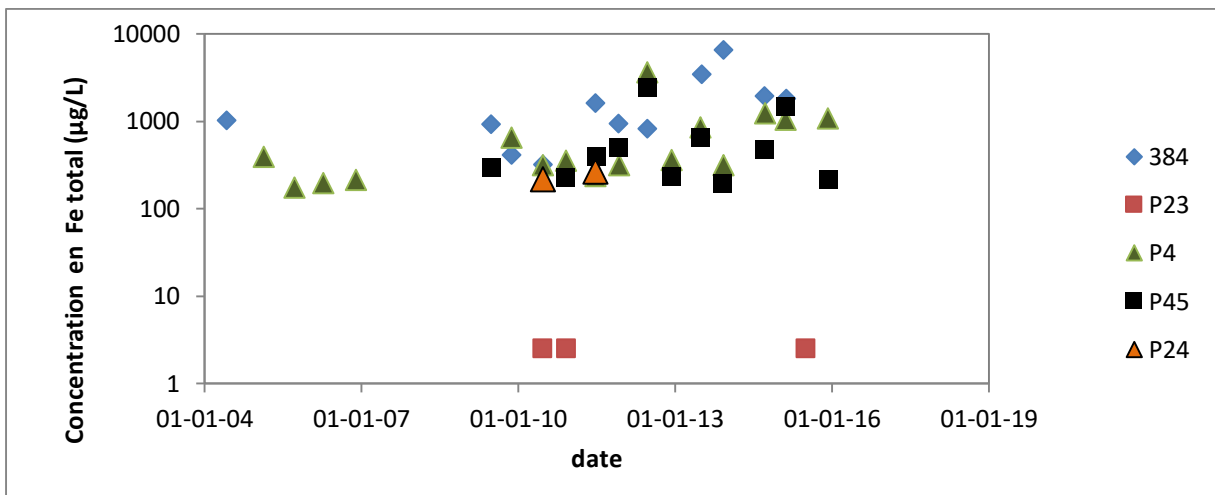


Figure 4-48 : Evolution de la concentration en Fe dans la masse d'eau BR02

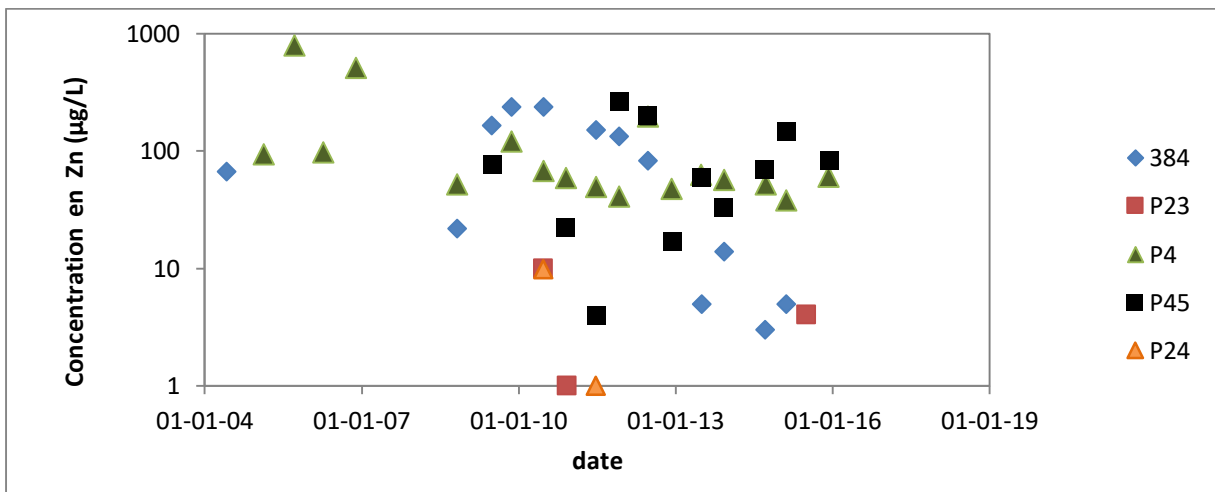


Figure 4-49 : Evolution de la concentration en Zn dans la masse d'eau BR02

4.2.4. Origine de la salinité des eaux souterraines

Dans le diagramme Na vs Cl (Figure 4-50), les points situés en Flandre et en Région de Bruxelles-Capitale présentent généralement des rapports Na/Cl supérieurs à un. Ceci traduit vraisemblablement l'enrichissement de l'eau en sodium associé aux échanges cationiques Na-Ca, lors du phénomène de rafraîchissement. Les cations de Na fixés sur les sites d'adsorption des matériaux géologiques constitutifs du sous-sol sont libérés dans l'eau au détriment des ions Ca qui les y remplacent. La distribution spatiale du rapport Na/Cl est également représenté à la Figure 4-51.

La majorité des points en Région wallonne présentent un rapport Na/Cl inférieur à celui de l'eau de mer (0.86). Ceci indique pour ces points que l'origine du Cl est peut-être anthropique (pollution).

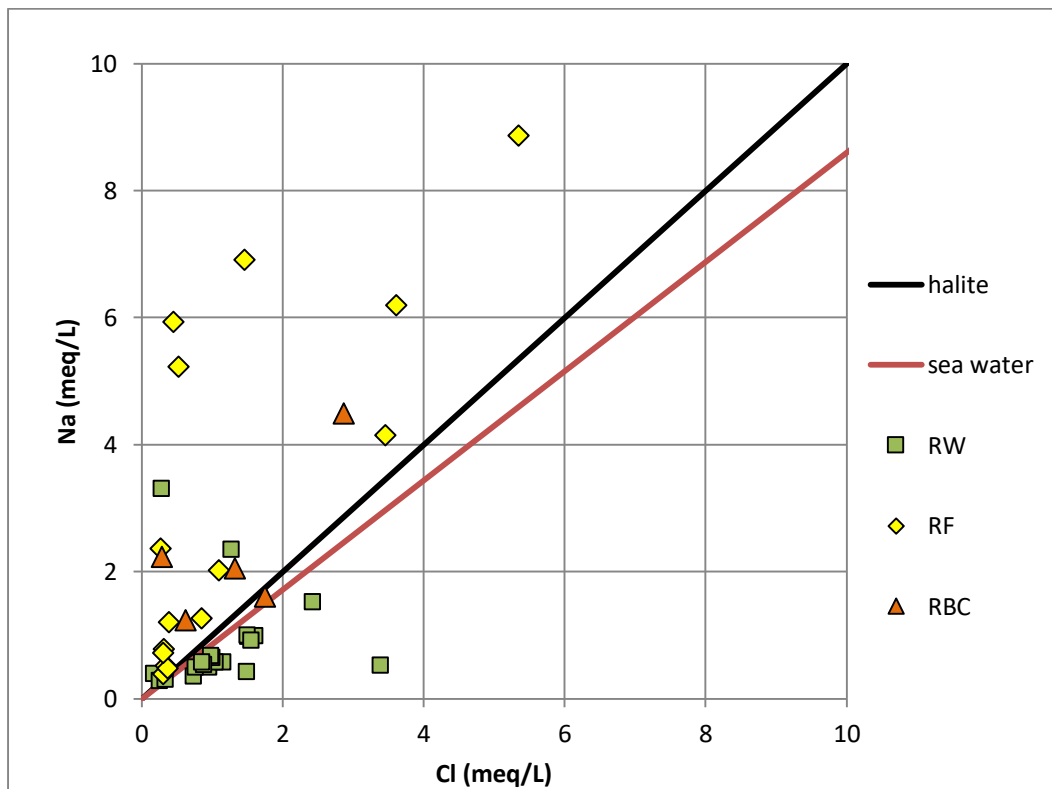


Figure 4-50 : Concentration en Na (meq/L) par rapport à la concentration en Cl (meq/L)

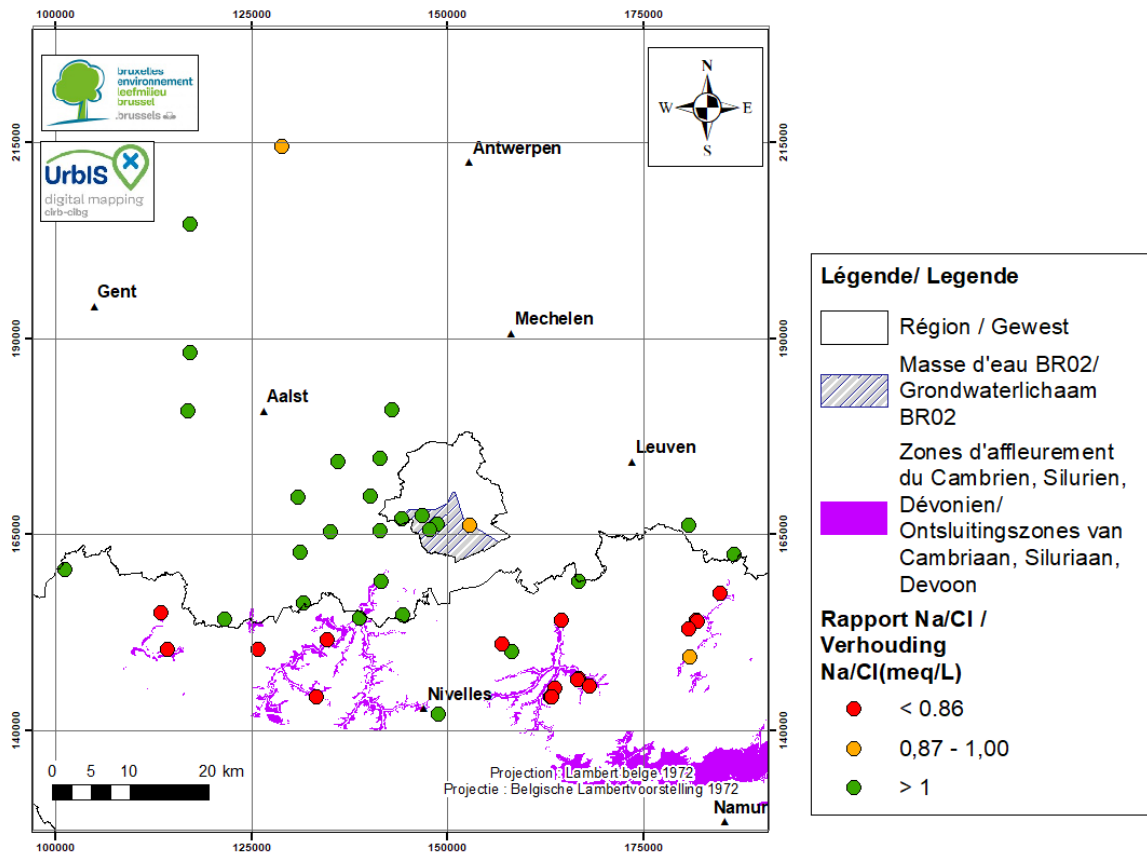


Figure 4-51 : Répartition spatiale du rapport Na/Cl (concentrations en meq/L) dans l'aquifère du Socle

Les indices de saturation de la calcite, du gypse et de la halite (Figures 4-52, 4-53, 4-54) ont été calculés via le module PHREEQC (Parkurst and Appelo 1999) implémenté dans le programme « DIAGRAMMES » (Simler, 2013) de l'Université d'Avignon. Les résultats montrent que les eaux souterraines du Socle sont sous-saturées par rapport au gypse et à la halite. Il semble donc que ces deux minéraux ne contrôlent pas ici la salinité des eaux souterraines. Le chlore ne semble donc pas provenir de dissolution d'évaporites. A contrario, les indices de saturation de la calcite avoisinent 0, certains points étant même légèrement sursaturés. La calcite est donc réactive au sein du milieu aquifère et elle influence la minéralisation de l'eau en y contrôlant la concentration en calcium.

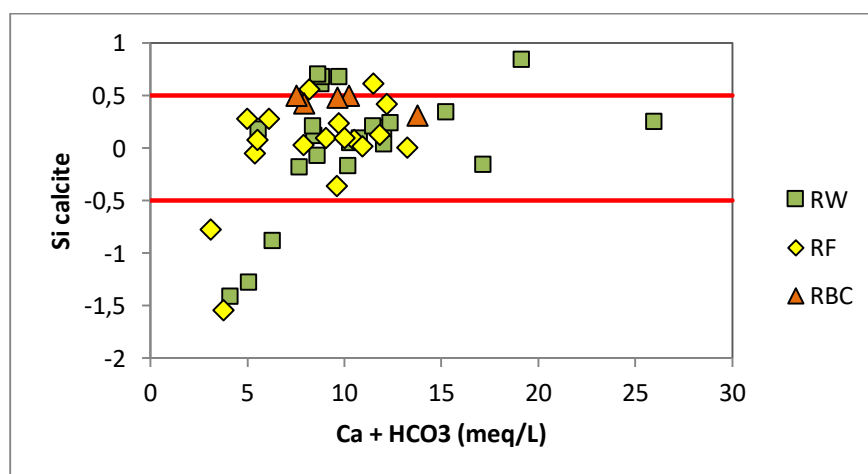


Figure 4-52 : Indice de saturation (SI) de la calcite en fonction des éléments chimiques susceptibles d'être contrôlés par ces minéraux

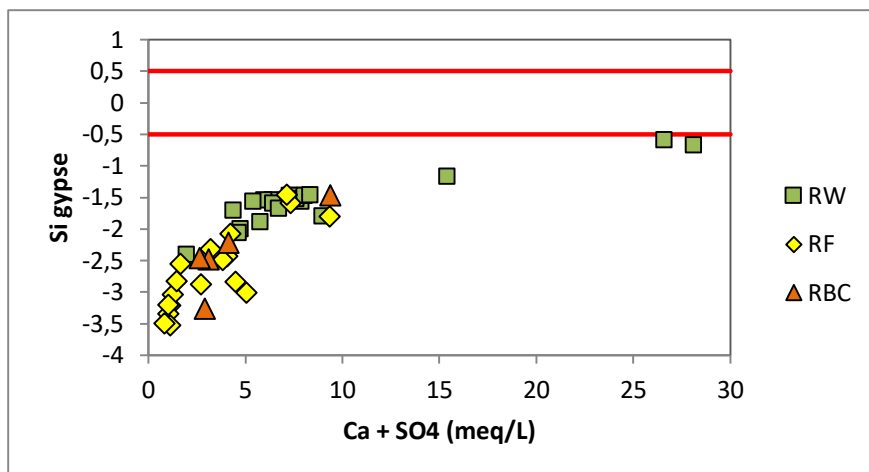


Figure 4-53 : Indice de saturation (SI) du gypse en fonction des éléments chimiques susceptibles d'être contrôlés par ces minéraux

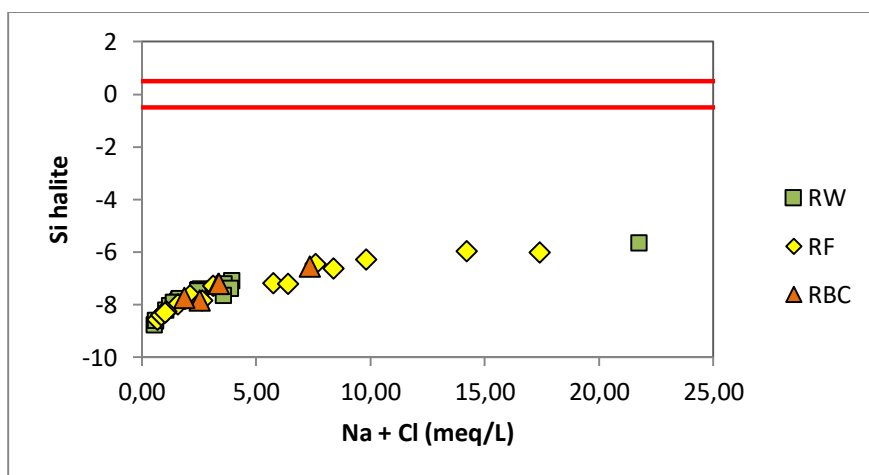


Figure 4-54 : Indice de saturation (SI) de la halite en fonction des éléments chimiques susceptibles d'être contrôlés par ces minéraux

4.2.5. Statistiques descriptives

4.2.5.1. Principaux paramètres

Les principaux paramètres de statistique descriptive sont repris dans le Tableau 4-5. Ils ont été calculés pour l'ensemble des stations d'échantillonnage de la masse d'eau souterraine BR02 et celles qui ont été sélectionnées en Région wallonne et en Région flamande (chapitre 4.1). Les paramètres statistiques repris sont : le minimum, le maximum, la moyenne, la médiane, le percentile 25 (P25), le percentile 75 (P75), le percentile 90 (P90). Ils ont été calculés sur base de la médiane des valeurs disponibles pour les paramètres de terrain (conductivité électrique, pH, O₂ dissous) et des concentrations en éléments majeurs et mineurs de chaque station d'échantillonnage. Le nombre de stations d'échantillonnage où chaque paramètre est mesuré est également mentionné.

Paramètre	Nb. stations	Min	P25	Moyenne	Médiane	P75	P90	Max
Al (mg)	42	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.32
As total (µg/l)	46	0.00	0.50	2.63	1.90	2.50	5.46	19.29
B total (µg/l)	45	2.50	28.00	330.23	96.00	215.00	739.94	2998.00
Br (mg)	14	0.00	0.05	0.09	0.07	0.09	0.23	0.34
Ca (mg)	47	2.60	53.63	89.80	82.00	105.75	140.20	326.00
Cd total (µg/l)	46	0.00	0.02	0.15	0.10	0.25	0.25	2.00
Cl (mg)	47	6.20	13.08	199.13	35.30	59.37	152.37	5163.00
Cu total (µg/l)	46	0.00	1.00	2.65	1.63	2.50	2.70	40.00
EC terrain (µs/cm)	46	387.50	548.33	1169.72	651.00	761.50	1745.50	15320.00
F (mg)	46	0.06	0.11	0.53	0.14	0.29	1.30	6.32
Fer dissous (mg)	41	0.00	0.03	0.94	0.05	0.33	1.65	17.00
Fer total (mg)	30	0.00	0.08	0.53	0.30	0.80	1.28	3.00
HCO3 (mg)	47	92.72	261.08	320.59	315.34	368.87	451.99	725.90
Hg total (µg/l)	44	0.00	0.01	0.10	0.03	0.25	0.25	0.25
K (mg)	47	1.00	2.13	8.99	5.80	11.48	21.60	51.38
Mg (mg)	47	0.81	10.00	19.34	15.00	23.76	28.07	120.00
Mn ((mg)	46	0.00	0.02	0.59	0.05	0.12	0.91	15.00
Na (mg)	47	6.50	12.12	145.69	22.90	85.72	179.64	3284.45
NH4 (mg)	46	0.00	0.03	0.30	0.12	0.26	0.42	3.61
Ni total (µg/l)	46	0.00	1.00	4.96	2.50	2.50	9.68	50.00
NO2 (mg)	45	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.11
NO3 (mg)	46	0.00	0.10	3.91	0.10	1.10	13.87	60.74
O2 (mg)	42	0.10	0.47	4.32	3.51	7.94	10.06	10.70
Orthophosphates (mg/l de P)	45	0.00	0.00	0.12	0.02	0.06	0.35	1.22
Pb total (µg/l)	46	0.00	0.14	1.65	0.60	2.09	2.50	19.00
pH	47	6.54	7.16	7.52	7.40	7.89	8.28	9.40
Phosphore (mg)	27	0.00	0.00	0.07	0.05	0.12	0.17	0.22
PO4 (mg)	16	0.00	0.01	0.43	0.05	0.45	1.38	2.40
SO4 (mg)	47	2.67	23.24	77.04	48.02	84.40	112.40	568.00
Sr (mg)	27	0.11	0.27	0.69	0.42	0.67	0.76	7.07
Zn total (µg/l)	46	0.00	5.00	20.92	10.00	24.45	57.50	143.00

Tableau 4-5 : Principaux paramètres statistiques de l'aquifère du Socle

4.2.5.2. Distribution des paramètres et éléments

Aux Figures 4-55 et 4-56, les histogrammes des paramètres de terrain, des concentrations en éléments majeurs et mineurs sont représentés. Les histogrammes ont également été tracés pour l'ensemble du jeu de données du Socle (Région de Bruxelles-Capitale, Région wallonne, Région flamande). Les histogrammes permettent de représenter la distribution des données. Les données utilisées sont les médianes des valeurs disponibles à chaque station d'échantillonnage. Sur les graphiques, les teneurs sont regroupées en 7 classes et pour chaque classe, un rectangle est tracé dont la hauteur est fonction de la fréquence de la classe. Il est possible de constater que pour de nombreux éléments, la distribution est asymétrique et l'histogramme est fortement étiré vers la droite.

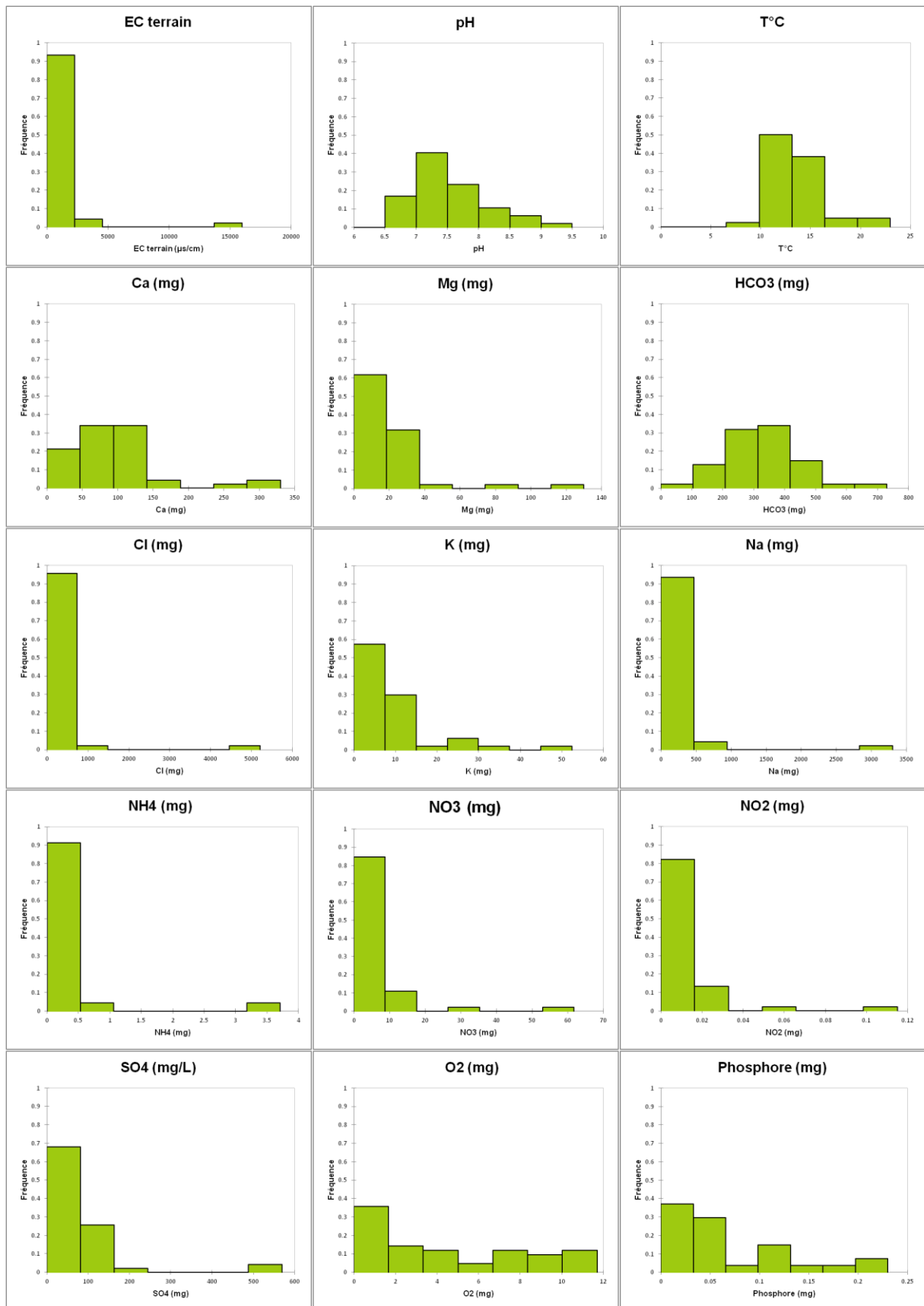


Figure 4-55 : Histogrammes illustrant la distribution des paramètres de terrain, des éléments majeurs et quelques éléments de l'aquifère du Socle

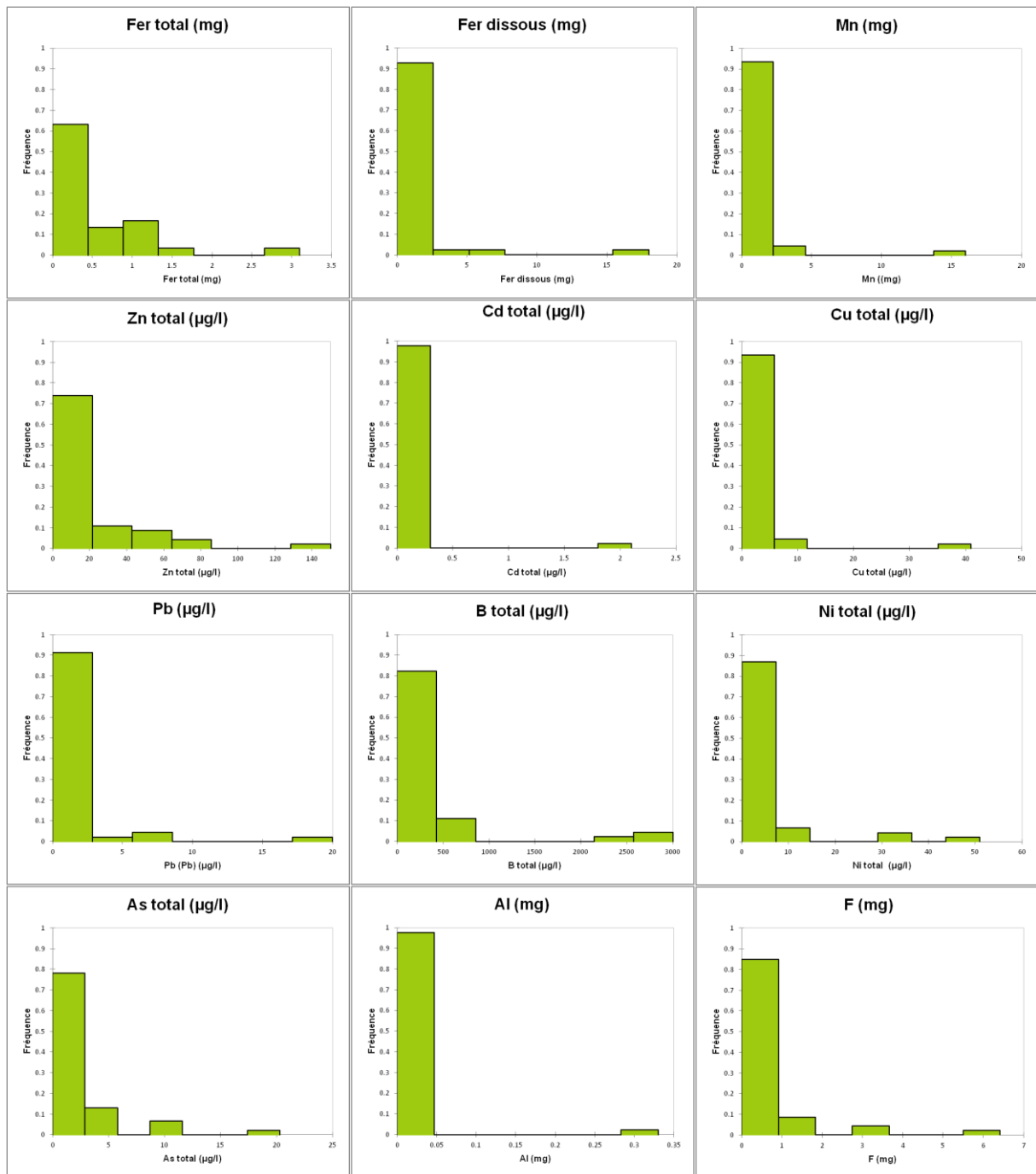


Figure 4-56 : Histogrammes illustrant la distribution des principaux éléments mineurs de l'aquifère du Socle (pour les métaux, il s'agit de la fraction totale sauf pour le Fe où la fraction dissoute est également représentée)

4.2.6. Corrélation entre les éléments

Pour mettre en évidence les relations existantes entre les variables, des coefficients de corrélation ont été déterminés pour chaque couple de variables. La méthode de Kendall a été utilisée pour le calcul des coefficients de corrélation à cause de la distribution généralement asymétrique des données. La matrice des coefficients de corrélation des principaux polluants avec les paramètres de terrain, les éléments majeurs et quelques éléments mineurs est présentée au Tableau 4-6. Une deuxième matrice de corrélation avec les éléments majeurs et les éléments mineurs est reprise au Tableau 4-7. Les coefficients de corrélations non significatifs (avec une p-value > 0.05) ne sont pas repris dans la matrice. Les coefficients de corrélations supérieurs à 0.25 sont mis évidence par un fond orange, ceux supérieurs à 0.5 en rouge et les coefficients de corrélation inférieurs à -0.25 sont mis en évidence par un fond vert, ceux inférieurs -0.50 en bleu.

Il est possible de constater que de nombreuses variables sont corrélées. La plupart des polluants sont corrélés positivement entre eux, avec certains éléments majeurs (Ca, Na, K, SO₄), avec la conductivité électrique, le pH et la concentration en O₂ dissous. Les sites qui sont impactés par ces polluants semblent être hyper minéralisés, les conditions oxydantes et quand un polluant est quantifié il y en a généralement plusieurs. Les polluants sont par contre corrélés négativement à certains métaux comme le Fe, le Mn, le Pb, le Zn ainsi que le NH₄. Le tétrachloroéthylène ne semble pas être présent dans le même environnement que la plupart des autres polluants parce qu'il n'y a pas de corrélation entre eux et parce qu'il est positivement corrélé avec le NH₄ et négativement avec l'O₂ dissous.

Les corrélations entre les paramètres majeurs et mineurs sont exposées au Tableau 4-7. La minéralisation semble principalement liée à trois processus : le processus de rafraichissement et la lithologie qui vont influencer la concentration en certains éléments majeurs et mineurs (HCO₃, Ca, Mg, Na, Cl, SO₄, F, B) et les processus redox qui vont influencer la concentration en O₂, NO₃, et certains métaux.

Variables	BAM	Atrazine	Atrazine desé.	Atrazine desi.	Bentazone	Benzène	Cyanures	Diuron	Naphtalène	Nitrate	Nitrite	Simazine	Tétrachloroéthylène
BAM	1.00	0.19	0.17	0.17	0.38			0.31		0.28		0.42	0.22
Al total		0.40	0.43	0.46			0.36			0.31	0.36		-0.17
NH4		-0.12	-0.16		-0.16			-0.13	0.18	-0.38	-0.13	-0.14	0.35
As total		0.16	0.12	0.14	0.20						0.13		
Atrazine	0.19	1.00	0.80	0.73			0.38	0.15		0.50	0.55	0.19	
Atrazine desé.	0.17	0.80	1.00	0.79	0.18		0.56	0.13		0.59	0.61	0.13	
Atrazine desi.	0.17	0.73	0.79	1.00			0.55	0.17		0.56	0.61	0.26	
Ba (total)		-0.12	-0.15	-0.12									
Bentazone	0.38		0.18		1.00		0.18						
Benzène						1.00							
HCO3										-0.19	-0.16		
B total					-0.17					-0.20			
Br										-0.19			
Cd total										0.19			
Ca	0.31	0.22	0.16	0.19	0.19			0.11		0.21	0.14	0.13	0.24
COT	0.19	0.41	0.47	0.46			0.35			0.24	0.26		
Chlorure	0.20	0.43	0.46	0.50	0.14		0.37	0.15		0.23	0.25	0.15	0.20
EC	0.19	0.23	0.14	0.21			0.12						0.27
Cu total		-0.14	-0.18	-0.22			-0.23	0.13					
Cyanures		0.38	0.56	0.55	0.18		1.00			0.35	0.51		
Diuron	0.31	0.15	0.13	0.17				1.00		0.18		0.29	
Fe total		-0.25	-0.26	-0.32				-0.32				-0.32	
Fe dissous		-0.54	-0.65	-0.60			-0.44			-0.13	-0.22		
F		-0.14	-0.21	-0.16						-0.28	-0.12		0.17
Mg		0.17	0.15	0.14	-0.18				0.16				0.24
Mn		-0.47	-0.52	-0.57			-0.39	-0.14		-0.27	-0.30	-0.11	0.18
Hg total			0.20	0.20	0.30								
Naphtalène									1.00				
Ni total										0.25	0.14		
NO3	0.28	0.50	0.59	0.56			0.35	0.18		1.00	0.46	0.22	
NO2		0.55	0.61	0.61			0.51			0.46	1.00	0.12	
O-PO4		0.17	0.17	0.21				0.17					-0.16
O2		0.49	0.47	0.42			0.30			0.36	0.33	0.15	-0.31
pH		0.36	0.31	0.37			0.30				0.18		
Pb total		-0.30	-0.30	-0.31			-0.21						
K	-0.18	0.16	0.15	0.16	-0.19		0.14			-0.18			
Simazine	0.42	0.19	0.13	0.26				0.29		0.22	0.12	1.00	
Na		0.18	0.20	0.22			0.14		0.16				0.32
SO4	0.27				0.24					0.29	0.15		0.24
Tétrachloroéthylène	0.22												1.00
Toluène											0.22		
Trichloroéthylène	0.43			0.29				0.37	0.33			0.24	0.70
Zn total	-0.16	-0.41	-0.44	-0.45	-0.15		-0.33			-0.14	-0.21	-0.16	

Tableau 4-6 : Coefficients de corrélation entre les principaux paramètres de terrain, les éléments majeurs et les principaux éléments mineurs et les polluants de l'aquifère du Socle

Variables	Al t	NH4	As t	Ba	HCO3	B t	Br	Cd t	Ca	COT	Cl	EC	Cu	Eh	Fe d	Fe t	F	Mg	Mn	Hg	Ni t	NO3	NO2	O-PO4	O2	pH	P	Pb t	K	Na	Sr	SO4	Zn	
Al t	1.00	-0.13			-0.20		0.32		0.12	0.29	0.24		0.11				-0.13	0.12	-0.23		0.17	0.31	0.36	0.46	0.24	-0.13	0.15							
NH4	-0.13	1.00	0.09		0.29	0.29	0.23		-0.23			0.25	-0.14		-0.13		0.33	0.13	0.11		-0.21	-0.38	-0.13	0.23	-0.24	0.13	0.13		0.39	0.35	0.25	-0.20		
As t		0.09	1.00	-0.18		-0.28			0.13	0.10	0.15				0.10		-0.14	0.16	0.16		0.13				0.11	-0.10		-0.09	-0.19		-0.24	0.29		
Ba			-0.18	1.00	0.32				-0.13				0.12		0.11		0.09	0.12								-0.10		0.16		0.10				0.18
HCO3	-0.20	0.29		0.32	1.00	0.27	-0.52	-0.19				0.32	-0.23		-0.31		0.21	0.25	-0.16		-0.38	-0.19	-0.16		0.17			0.49	0.23	0.55	-0.29			
B t		0.29	-0.28		0.27	1.00		-0.10	-0.21			0.26			-0.29	-0.20	0.37	0.26	-0.17		-0.35	-0.20	0.21	-0.23	0.35	-0.14		0.53	0.48	0.47	-0.36			
Br	0.32	0.23			-0.52		1.00		-0.19		0.44																0.24		0.24				0.16	
Cd t				-0.19	-0.10		1.00						0.17					0.13	0.14	0.22	0.19					-0.16		0.23	-0.10		-0.11	0.20	0.18	
Ca	0.12	-0.23	0.13	-0.13		-0.21	-0.19		1.00		0.19	0.23	0.09	-0.18	0.08	0.26	-0.15	0.30		0.22	0.11	0.21	0.14	-0.25	0.25	-0.19	0.15		-0.25	-0.24	0.17	0.33	-0.13	
COT	0.29		0.10						1.00	0.27	0.12			0.22	-0.10	-0.16	0.06		-0.17	0.11	0.21	0.24	0.26	0.17	0.23	0.21			0.17	-0.13			-0.08	
Cl	0.24		0.15				0.44		0.19	0.27	1.00	0.37			-0.22		0.09		-0.16	0.08	0.23	0.25	0.13	0.15	0.14				0.30		0.27	-0.19		
EC		0.25			0.32	0.26			0.23	0.12	0.37	1.00	-0.18		-0.28		0.30	0.22	-0.08		-0.27			0.17	-0.14	0.15		-0.17	0.24	0.39	0.23	0.08	-0.19	
Cu t	0.11	-0.14		0.12	-0.23			0.17	0.09			-0.18	1.00	-0.16	0.22			0.11		0.31			-0.10	0.13	-0.12		0.41	-0.14	-0.16		0.09	0.33		
Eh								-0.18	0.22				1.00	0.20	0.20		0.19		0.13					0.30	0.16		-0.17	0.13	0.18	0.56				
Fe d		-0.13	0.10	0.11	-0.31	-0.29			0.08	-0.10	-0.22	-0.28	0.22	0.20	1.00		-0.11	-0.30	0.49		0.28	-0.13	-0.22		0.11	-0.37		0.25	-0.47	-0.35		0.28	0.35	
Fe t						-0.20			0.26	-0.16						1.00	-0.17	0.24	0.28					-0.22		-0.14	0.44	0.18		-0.15			0.18	
F	-0.13	0.33		0.09	0.21	0.37			-0.15	0.09	0.30		0.19	-0.11	-0.17	1.00					-0.34	-0.28	-0.12	0.19	-0.26	0.23			0.27	0.32	0.25	-0.15		
Mg	0.12	0.13	-0.14	0.12	0.25	0.26			0.30			0.22		0.19	-0.30	0.24		1.00	-0.08		-0.13			-0.20					0.34	0.14	0.41	-0.08		
Mn	-0.23	0.11	0.16		-0.16	-0.17		0.13		-0.17	-0.16	-0.08	0.11	0.13	0.49	0.28		-0.08	1.00		0.12	-0.27	-0.30		-0.22	-0.46	0.17	0.15	-0.19	-0.14		0.16	0.27	
Hg t								0.14		0.11										1.00							0.17							
Ni t	0.17	-0.21	0.16		-0.38	-0.35		0.22	0.11	0.11	0.08	-0.27	0.31		0.28		-0.34	-0.13	0.12		1.00	0.25	0.14	-0.15	0.39	-0.27		0.21	-0.35	-0.26	-0.44	0.37	0.23	
NO3	0.31	-0.38			-0.19	-0.20	-0.19	0.19	0.21	0.24	0.23				-0.13		-0.28		-0.27		0.25	1.00	0.46		0.36			-0.18		-0.36	0.29	-0.14		
NO2	0.36	-0.13	0.13		-0.16				0.14	0.26	0.25				-0.22		-0.12		-0.30	0.14	0.46	1.00		0.33	0.18					-0.22	0.15	-0.21		
O-PO4		0.23				0.21			-0.25	0.17	0.13	0.17	-0.10	0.30		-0.22	0.19	-0.20			-0.15		1.00		0.25	-0.26		0.16	0.29		-0.13			
O2	0.46	-0.24	0.11			-0.23			0.25	0.23	0.15	-0.14	0.13	0.16	0.11		-0.26		-0.22		0.39	0.36	0.33		1.00	0.13			-0.18	-0.15	-0.35	0.23		
pH	0.24	0.13	-0.10	-0.10	0.17	0.35		-0.16	-0.19	0.21	0.14	0.15	-0.12		-0.37	-0.14	0.23		-0.46		-0.27		0.18	0.25	0.13	1.00	-0.09	0.36	0.32	0.20	-0.25	-0.21		
PO4																													0.34	0.54				
P	-0.13	0.13				-0.14			0.15							0.44			0.17					-0.26			1.00				-0.17			
Pb t	0.15		-0.09	0.16			0.24	0.23				-0.17	0.41	-0.17	0.25	0.18			0.15	0.17	0.21					-0.09		1.00		0.16		0.40		
K		0.39	-0.19		0.49	0.53		-0.10	-0.25			0.24	-0.14	0.13	-0.47		0.27	0.34	-0.19		-0.35	-0.18		0.16	-0.18	0.36		1.00	0.49	0.35	-0.39			
Na		0.35		0.10	0.23	0.48	0.24		-0.24	0.17	0.30	0.39	-0.16	0.18	-0.35	-0.15	0.32	0.14	-0.14		-0.26		0.29	-0.15	0.32			0.49	1.00	0.29	-0.07			
Sr		0.25	-0.24		0.55	0.47		-0.11	0.17	-0.13	0.23			0.56			0.25	0.41			-0.44	-0.36	-0.22		-0.35	0.20	-0.17	0.16	0.35	0.29	1.00	-0.38	0.10	
SO4		-0.20	0.29		-0.29	-0.36		0.20	0.33		0.27	0.08	0.09		0.28	-0.15	-0.08	0.16		0.37	0.29	0.15	-0.13	0.23	-0.25			-0.39	-0.07	-0.38	1.00			
Zn t				0.18			0.16	0.18	-0.13	-0.08	-0.19	-0.19	0.33		0.35	0.18			0.27		0.23	-0.14	-0.21			-0.21		0.40			0.10		1.00	

Tableau 4-7 : Coefficients de corrélation entre les principaux paramètres de terrain, les éléments majeurs et les principaux éléments mineurs de l'aquifère du Socle

4.2.7. Valeurs atypiques

Les valeurs atypiques ou aberrantes sont des valeurs qui s'écartent fortement des autres valeurs. Ces valeurs atypiques peuvent permettre de mettre en évidence des sites avec des minéralisations particulières pouvant être associées notamment à des pollutions ponctuelles. Une valeur est considérée comme atypique quand la valeur est supérieure au $P75 + 1.5 \times (P75 - P25)$. Ici la formule a été utilisée avec le logarithme des valeurs parce que certains paramètres ont une distribution asymétrique. Le Tableau 4-8 présente les sites avec des valeurs atypiques et ils sont localisés à la Figure 4-57.

Tous les sites au nord de la zone où la nappe est captive et a une signature d'une ancienne eau marine semblent présenter de nombreuses valeurs atypiques. Ces sites ne sont pas contaminés mais les valeurs sont considérées comme atypiques parce qu'elles sont fort différentes du reste de l'aquifère. Les autres sites avec des valeurs atypiques sont majoritairement en Région wallonne à proximité des zones d'affleurements. Ces sites avaient déjà été mis en évidence à cause de la présence de polluant et d'une minéralisation particulière. En Région de Bruxelles-Capitale, le point P23 qui a également déjà été identifié comme contaminé et le puits P24 montrent également des valeurs atypiques. Le site P24 a une valeur atypique pour le Br. La présence de valeurs atypique ne signifie pas forcément qu'il y a une contamination ponctuelle. Ici cette concentration anormale est peut-être liée au fait que le puits P24 recoupe plusieurs aquifères.

Région	nom	no_code	valeurs atypiques
RBC	Calypso	P23	NO3, Atrazine deséthyl, Atrazine desisopropyl, BAM
RBC	Lavoir Carsen Stalle	P24	Br
Rwsocle	CARRIERE LENOIR FRERE	RWS4	Al, EC, Cl, Ca, Mg, Sr
Rwsocle	CARRIERES DE DONGELBERG I	RWS5	Atrazine, Atrazine deséthyl, Atrazine desisopropyl, BAM
Rwsocle	CARRIERES DE DONGELBERG II	RWS6	Al
Rwsocle	CENTRALE A BETON 60M	RWS7	Br, Cu
Rwsocle	FP02_MONITO CETRAVAL	RWS8	T°, EC, Fe d, Mn, Ca, Ni
Rwsocle	L'ORNOY (P 30 PUIITS) HS99	RWS12	Atrazine deséthyl
Rwsocle	PUITS JAUMOTTE LIMAL	RWS15	Atrazine desisopropyl, BAM
Rwsocle	Puits Martineau	RWS16	Atrazine desisopropyl, BAM
Rwsocle	RUE DE MONS 75M	RWS17	EC, Atrazine desisopropyl, BAM
Rwsocle	SART (RUE DE LA CHAPELLE)	RWS19	Atrazine deséthyl, Atrazine desisopropyl, BAM
Rwsocle	SENTIER DONGELBERG	RWS20	Atrazine deséthyl
Rwsocle	STE GERTRUDE 1	RWS21	Mn, Ni
Rwsocle	STE GERTRUDE 2	RWS22	Mn, Ni
Rwsocle	TRY A FOURCHE NOUVEAU 60M	RWS24	Ni
Rfsocle	2-0048	RFS4	Atrazine
Rfsocle	2-0427a	RFS9	Al
Rfsocle	2-0432a	RFS11	Al
Rfsocle	4-0070	RFS15	pH, EC, F
Rfsocle	4-0113	RFS16	Al, T°C, EC, Cl, Mg, Na, F
Rfsocle	4-0115	RFS17	Al, EC, Cl, HCO3, F
Rfsocle	4-0272a	RFS18	F, Ni

Tableau 4-8 : Stations de l'aquifère du Socle présentant des valeurs atypiques

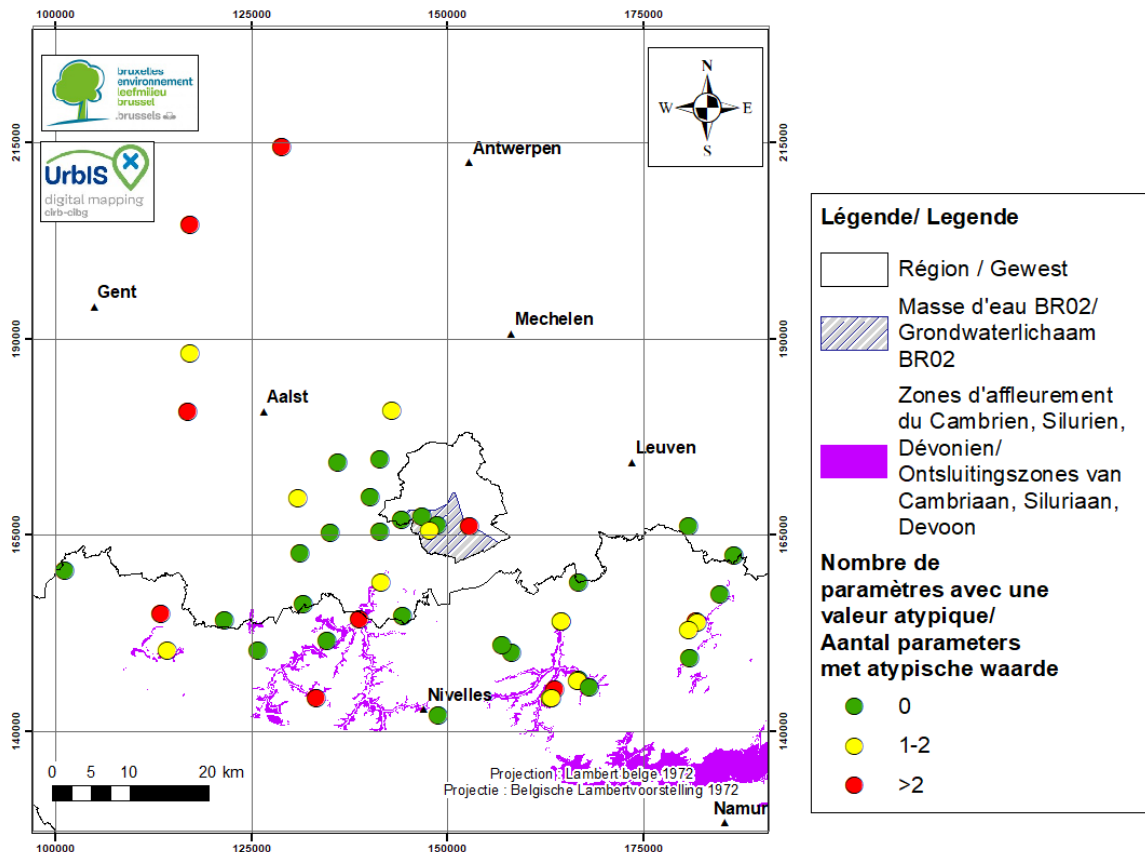


Figure 4-57 : Localisation des stations (en jaune et orange) de l'aquifère du Socle présentant des valeurs atypiques

4.2.8. Analyse multivariée par la méthode des matrices auto-organisantes

Une analyse multivariée a été réalisée en utilisant la méthode des matrices auto-organisantes (self-organizing maps – SOMs). L'analyse multivariée permet de mettre en évidence les relations entre un nombre élevé de paramètres dans un système hydrogéologique avec une dynamique complexe. Les SOMs permettent aussi de diviser les échantillons en groupes d'eaux ayant des signatures géochimiques semblables.

Dans le cas de la masse d'eau souterraine du Socle, de nombreux processus géochimiques ont un impact sur la composition des eaux souterraines. Pour l'analyse multivariée, les données seront donc examinées sous 2 angles : (1) les processus influençant la minéralisation globale (interaction eau-roche, processus de rafraîchissement, apports anthropiques éventuels...) et (2) les processus d'oxydo-réduction (liés au confinement de la nappe) qui peuvent notamment influencer les teneurs en métaux.

Pour étudier la minéralisation globale, la technique de statistiques multivariées sera appliquée sur une sélection de 10 paramètres. Il s'agit de certains éléments majeurs (Cl, NO₃, SO₄, Ca, Mg, K, Na) le B, le F et le rapport Na/Cl (molaire)⁶. Ces paramètres ont été choisis pour mettre en évidence l'origine de la salinité (notamment les concentrations élevées en Cl) et identifier d'éventuelles contaminations anthropiques. Le NO₃ est un indicateur de pollution et les paramètres K, Na, SO₄, B

⁶ Les éléments majeurs choisis ne sont pas forcément les mêmes pour les différentes masses d'eau souterraine (Socle, Yprésien et Bruxellien) parce que chaque masse d'eau a ces spécificités et pour chaque masse d'eau plusieurs itérations sont réalisées en réduisant au fur et à mesure le nombre de paramètres. Celle qui est choisie est celle montrant les corrélations les plus intéressantes et qui identifie des groupes d'eau plausibles.

ont été sélectionnés parce qu'ils peuvent être soit naturels, soit d'origine anthropique. Le rapport Na/Cl donne également des indications sur l'origine du Cl. Un rapport Na/Cl (molaire) inférieur à 0.86 correspond généralement à une eau impactée par une pollution (Müller, 2006). Les concentrations en éléments chimiques ont été exprimées sous forme logarithmique à cause de leur distribution asymétrique tandis que le rapport Na/Cl a été utilisé tel quel.

Pour mettre en évidence les processus d'oxydo-réduction, les SOMs seront appliquées une seconde fois avec une autre sélection de paramètres. Il s'agit des paramètres impliqués dans les réactions d'oxydoréduction, à savoir NO₃, Mn, HCO₃ (potentiellement produits par ces réactions), pH, NH₄, SO₄, B, Fe, ainsi que d'autres métaux (As, Pb, Zn) pouvant être influencés par les conditions redox. Les concentrations ont été exprimées en logarithme à cause de leur distribution asymétrique tandis que le pH a été exprimé comme tel.

4.2.8.1. Influence de la minéralisation globale

Les résultats des SOMs, concernant l'influence de la minéralisation globale sur la masse d'eau du Socle, sont représentés à la Figure 4-58. La matrice des composants permet de montrer les relations entre les paramètres. Il est notamment possible de voir que le Cl, le Na, B et le F sont corrélés positivement, que le Ca et le SO₄ sont également corrélés positivement et qu'ils sont corrélés négativement au rapport Na/Cl. La matrice U est également présentée à la Figure 4-58 et de cette matrice U, 3 groupes ont été déduits par le logiciel. Le Tableau 4-9 synthétise les principales caractéristiques de ces trois groupes et ceux-ci sont représentés spatialement à la Figure 4-59.

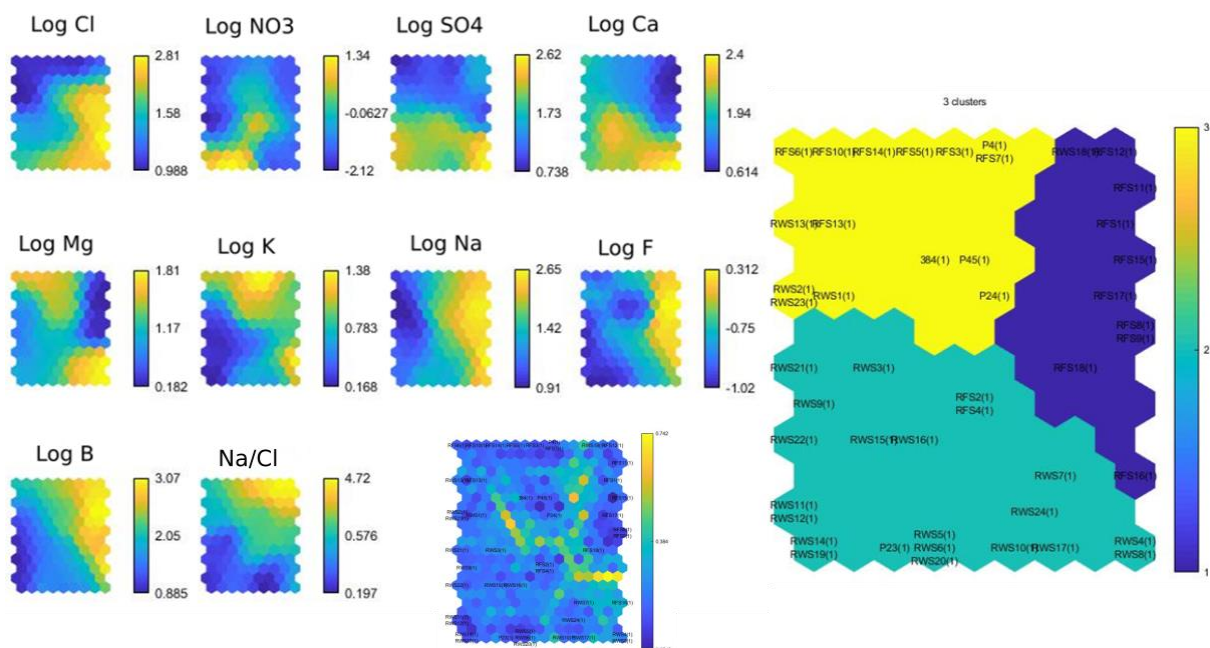


Figure 4-58 : Résultats des SOMs pour la minéralisation globale du Socle avec la matrice des composants, la matrice U et les groupes d'échantillons semblables définis par les SOMs

Groupe	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	K	Na	F	B	Na/Cl
1 : Eau de mer fossile	++	-	-	--	--	+	++	++	++	+
2 : Recharge récente (contaminée)	X	X	++	++	+	-	X	-	--	--
3 : Recharge plus ancienne	-	-	-	-	+	++	X	-	O	+

Tableau 4-9 : Caractéristiques de chacun des trois groupes

++ Concentrations les plus élevées du jeu de données

- concentrations bas dans le jeu de données

+ Concentrations élevées dans le jeu de données

-- concentrations les plus bas du jeu de données

O concentrations moyens par rapport au jeu de données

X concentrations variés (des plus élevés aux plus bas)

Les échantillons du groupe 1, en bleu foncé, présentent des concentrations élevées en Cl, Na, F, B, une concentration moyenne à élevées en SO₄ et K, des concentrations faibles en NO₃, Ca et Mg et un rapport Na/Cl moyen à élevé. Les échantillons de ce groupe sont localisés au nord-ouest de la masse d'eau BR02 de la Région de Bruxelles-Capitale, dans la partie captive de l'aquifère. La salinité est élevée suite à la présence d'eau de mer fossile, piégée lors de la sédimentation.

Le groupe 2, en vert, présente des concentrations élevées en SO₄, Mg, Ca, des concentrations faibles en, B, F et K, un rapport Na/Cl bas, des concentrations variables en NO₃, Cl et Na mais qui peuvent être élevées. Les échantillons de ce groupe se retrouvent principalement en Région wallonne, à proximité des zones d'affleurements mais il y a également deux points en Région flamande et un point en Région de Bruxelles-Capitale. L'échantillon en Région Bruxelles-Capitale est le point P23. Celui-ci avait déjà été identifié comme contaminé. Le groupe 2 semble correspondre à la zone de recharge actuelle qui est impactée par des contaminations anthropiques.

Les échantillons du groupe 3, en jaune, présentent des concentrations faibles en Cl, NO₃, Ca, SO₄, F, des concentrations moyennes en B, une concentration variable en Na et des concentrations et des rapports élevés en K, Mg, Na/Cl. Ces échantillons sont localisés en Région de Bruxelles-Capitale, dans la masse d'eau BR02 et au sud de celle-ci. Ils sont situés entre les points des groupes 1 et 2. Le groupe 3 correspond à la transition entre la zone de recharge et l'eau de mer fossile. Ce groupe est probablement lié à une eau de recharge plus ancienne et non contaminée.

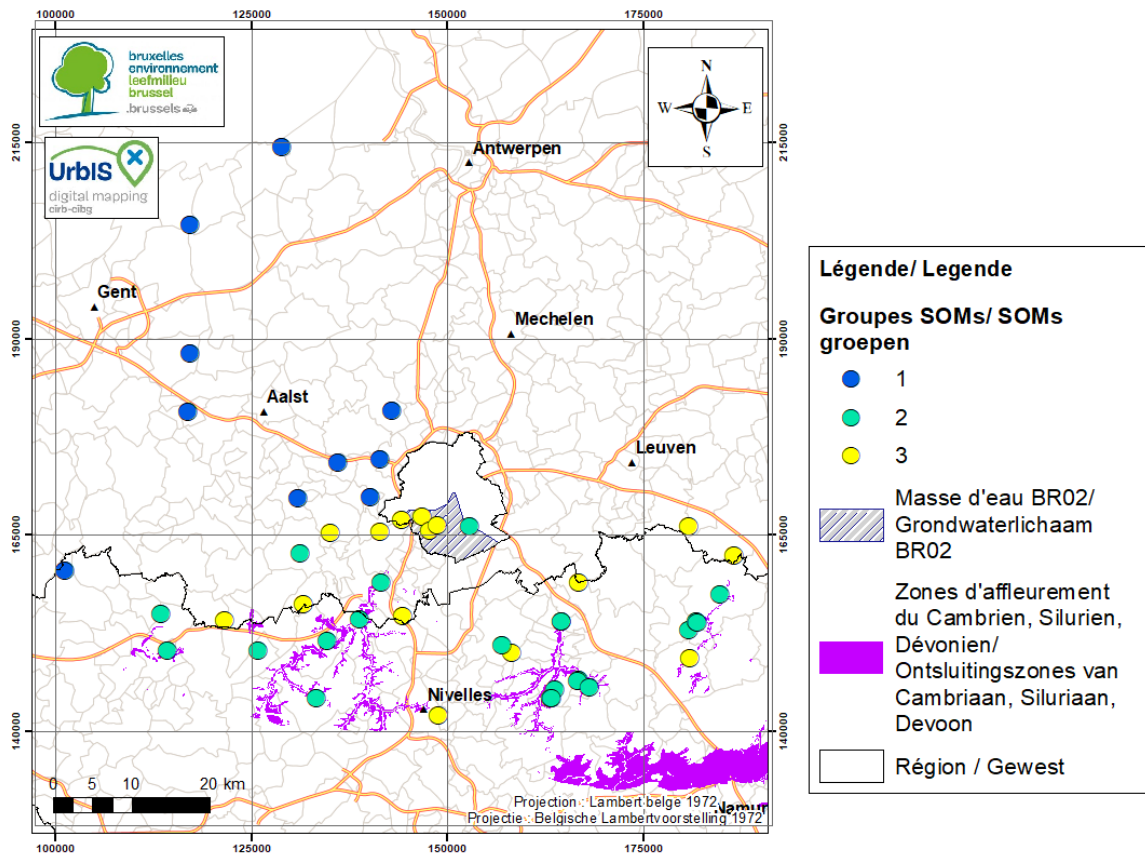


Figure 4-59 : Distribution spatiale des 3 groupes définis grâce à l'analyse multivariée (minéralisation globale)

4.2.8.2. *Processus redox*

Les résultats de l'analyse statistique multivariée, concernant l'influence des processus d'oxydoréduction sur la masse d'eau du Socle, sont représentés à la Figure 4-60. Certaines corrélations peuvent être observées, le B et le NH_4 sont corrélés positivement, le NO_3 et le NH_4 sont corrélés négativement, le B et le SO_4 sont inversement corrélés. La matrice U est également présentée à la Figure 4-60 et de cette matrice U, 3 groupes ont été déduits par le logiciel. Le Tableau 4-10 synthétise les principales caractéristiques de ces trois groupes et ceux-ci sont représentés spatialement à la Figure 4-61.

Les échantillons du groupe 1, en bleu, présentent des concentrations faibles en NO_3 et en Zn, des concentrations élevées en NH_4 , B, As, Pb, un pH élevé et des concentrations variables en Mn, Fe, HCO_3 et SO_4 . Ces échantillons sont principalement localisés au nord-ouest de la Région de Bruxelles-Capitale. Ce groupe correspond à la zone fortement réductrice de la nappe du Socle. Dans ces conditions réductrices, les métaux tel que le Pb et As sont présents naturellement en concentrations importantes.

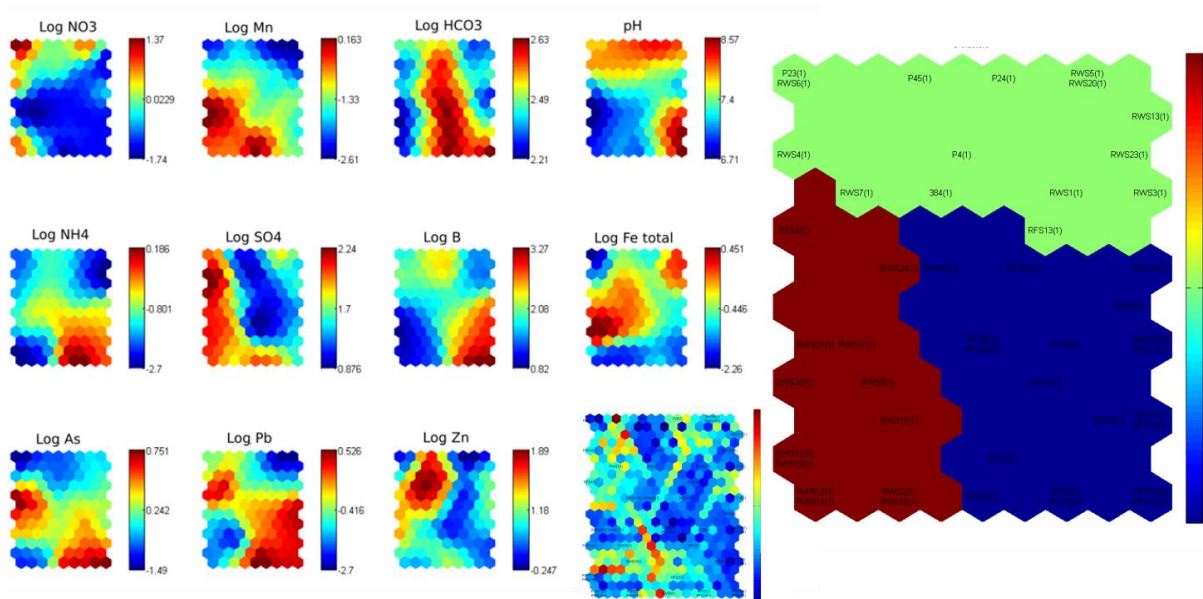


Figure 4-60 : Résultats des SOMs pour les processus redox du Socle avec la matrice des composants, la matrice U et les groupes d'échantillons semblables définis par les SOMs

Groupe	NO3	Mn	HCO3	pH	NH4	SO4	B	Fe t	As	Pb	Zn
1 : Zone fortement réductrice	--	X	X	+	+	X	++	X	++	++	-
2 : Zone de transition a	X	-	X	+	-	-	-	X	-	X	X
3 : Zone de transition b	X	++	-	--	-	++	---	X	X	X	X

Tableau 4-10 : Caractéristiques de chacun des trois groupes

- ++ Concentrations les plus élevées du jeu de données
- + Concentrations élevées dans le jeu de données
- concentrations moyens par rapport au jeu de données
- concentrations bas dans le jeu de données
- concentrations les plus bas du jeu de données
- X concentrations variés (des plus élevés aux plus bas)

Les échantillons du deuxième groupe, en vert, présentent des concentrations variables en NO₃, HCO₃, Fe, Pb, Zn, SO₄, des concentrations faibles pour les paramètres Mn, NH₄, SO₄, As, B. Les échantillons de ce groupe se retrouvent en Région de Bruxelles-Capitale et en Région wallonne. Les échantillons du groupe 2 sont en partie dans la zone oxydante en partie dans la zone suboxydante.

Les échantillons du groupe 3, en brun, présentent des concentrations variables en NO₃, Fe, As, Pb, Zn, des concentrations élevées en Mn et SO₄, des concentrations faibles en NH₄, HCO₃, B. Les points de ce groupe sont localisés en Région wallonne. Ce groupe correspond également avec une eau oxydante à suboxydante mais la différence avec le groupe 2 est liée à des concentrations en SO₄ et en certains métaux plus élevées.

Les résultats de l'analyse de la minéralisation globale et des processus redox ne sont pas tout à fait les mêmes. Certains points qui avaient été identifiés comme correspondant à la recharge récente font partie de la zone de transition pour les processus redox mais cela reste cohérent parce que l'eau de la recharge récente et contaminée peut avoir subi la dénitrification relativement rapidement et ne plus faire partie de la zone oxydante de la nappe.

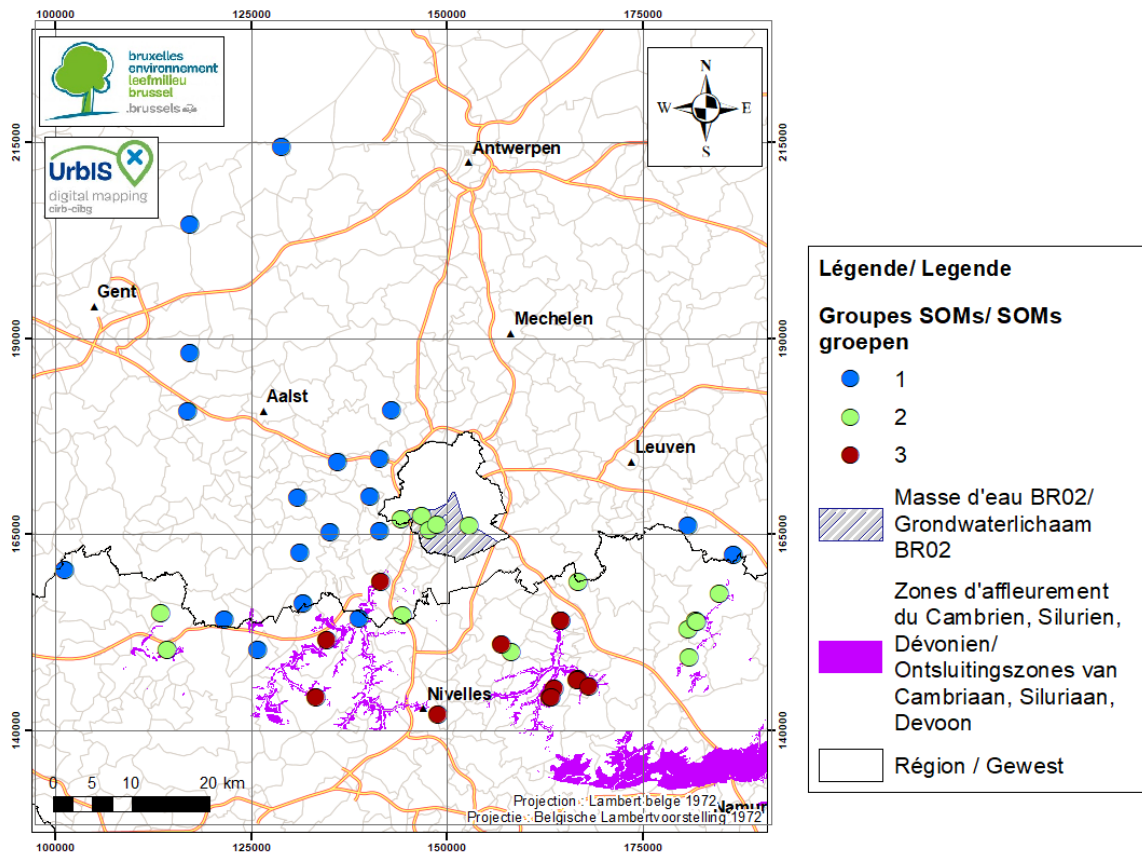


Figure 4-61 : Distribution spatiale des 3 groupes définis grâce à l'analyse multivariée (processus redox)

4.2.9. Modèle conceptuel de l'acquisition de la minéralisation

La synthèse des observations et des conclusions tirées dans ce chapitre permet de proposer un modèle conceptuel de l'acquisition de la minéralisation dans la masse d'eau du Socle. Pour cet aquifère, il y a une évolution des concentrations du sud vers le nord ; les SOMs ont permis de mettre en évidence trois zones différentes.

La première zone, la zone de recharge actuelle, est située au sud, principalement en Région wallonne, là où le Socle affleure. Les eaux sont de type bicarbonaté calcique ou chloruré calcique. Dans cette zone, la concentration en Ca est importante. Un des principaux processus qui influence la minéralisation dans cette zone, semble être la dissolution de la calcite. Les concentrations en Mg sont également élevées, le pH est neutre, les concentrations en Cl sont moyennes et les concentrations en SO₄ sont moyenne à élevées. Des pesticides sont parfois quantifiés et la concentration en nitrate peut être supérieure à 10 mg/L. De nombreux sites présentent des valeurs atypiques et un rapport Na/Cl inférieur à 0.86. Dans cette partie de l'aquifère, des contaminations sont donc présentes et elles semblent affecter la minéralisation. Des concentrations en NO₃ moyennes à faibles et des concentrations élevées en Fe, Mn et SO₄ indique des conditions redox oxygène à suboxygène.

Plus au nord, il y a ensuite la zone de transition. La masse d'eau BR02 se trouve dans cette zone. L'eau semble provenir d'une eau de recharge plus ancienne. C'est également une eau de type bicarbonaté calcique, riche en Ca. La dissolution de la calcite semble donc toujours influencer la minéralisation. Par contre les concentrations en K, Na et Mg peuvent être plus élevées que dans la première zone. Cette zone ne semble pas être impactée par des contaminations anthropiques sauf

ponctuellement (P23). Les conditions redox sont variables mais principalement suboxique voir réductrice.

La troisième zone est située en Flandre, au nord de la masse d'eau BR02. Il s'agit majoritairement d'eaux de type bicarbonaté sodique et potassique et de type chloruré sodique et potassique. Les concentrations en Cl, Na, F, NH₄ sont importantes. La salinité importante provient d'une eau marine résiduelle. Cette eau marine a subi un phénomène de rafraîchissement au cours duquel il y a eu des échanges cationiques. Les ions Ca présents dans l'eau souterraine ont pris la place des ions Na fixés sur les sites d'adsorption des constituants du sous-sol. Dans cette troisième zone, les conditions sont également plus réductrices. Cela se marque notamment par une concentration en NH₄ élevée.

4.3. Calcul des concentrations de référence

4.3.1. Sélection des échantillons

Les résultats de l'étude des processus hydrochimiques et en particulier, l'analyse statistique multivariée, vont permettre de sélectionner les échantillons qui seront utilisés pour le calcul des concentrations de référence.

Les SOMs ont montré que la masse d'eau souterraine du Socle en zone d'alimentation (BR02) était dans la partie suboxique de la nappe et correspond principalement à une recharge relativement ancienne. Les sites avec une minéralisation influencée par l'eau marine et ou des conditions fortement réductrices ne sont pas présents dans la masse d'eau BR02 mais certains points sont tout de même très proches (à l'ouest ou nord ouest de la masse d'eau BR02).

Dans la masse d'eau BR02. Le point P23 a été identifié comme contaminé et il a une minéralisation fort différente du reste de la nappe. Il ne sera donc pas inclus dans le calcul des concentrations de référence. Le point P24, n'a pas été identifié comme contaminé d'après l'analyse multivariée mais celui-ci présente une valeur atypique. Ce point correspond probablement à un mélange d'eau du Landénien et du Socle. Par sécurité, ce point sera également exclu du calcul des concentrations de référence. Il ne reste donc que trois sites supposés représentatifs des conditions naturelles existantes dans la masse d'eau BR02, ce qui est vraiment très peu pour calculer des concentrations de référence. De plus, pour certains points, des polluants (polluants organiques et certaines bactéries ...) ont été identifiés de manière intermittente. De plus, en Région de Bruxelles-Capitale, la masse d'eau du Socle, qui est censée être captive, a des concentrations mesurées en oxygène dissous variables selon les échantillonnages mais relativement élevées. Il peut s'agir de mauvaises manipulations lors de l'échantillonnage ou d'un contact de la nappe avec de l'eau de la surface. La majorité des stations d'échantillonnage de la masse d'eau souterraine BR02 semblent impactées par une contamination anthropique. Pour déterminer les concentrations de référence, il est habituellement recommandé d'écarter l'ensemble des points contaminés. Dans ce rapport, cette approche n'a pas été utilisée sinon pratiquement tous les points auraient été écartés. Ici seuls les points pour lesquelles la contamination semblait impacter la minéralisation ont été écartés. Les concentrations « de référence » qui vont donc être calculées seront donc a priori des concentrations naturelles même s'il n'est pas totalement exclu que la concentration en certains éléments puisse être légèrement impactée par les activités anthropiques. Dans le doute et par sécurité il conviendrait donc peut être mieux de parler de concentration de fond plutôt que de concentration de référence même si les valeurs qui seront calculées seront normalement plus proches des concentrations naturelles.

Pour pouvoir effectuer un traitement statistique plus robuste il est plus adéquat de se baser sur un jeu de données plus grand. Les données concernant la nappe du Socle provenant de la Région flamande et de la Région wallonne seront donc également utilisées mais seulement celles des sites d'échantillonnage situés à proximité de la Région de Bruxelles-Capitale. Pour ce faire, un buffer de 10 km a été tracé autour de la masse d'eau BR02 (Figure 4-62 et Figure 4-63). Dans le buffer de 10 km, il y a des sites appartenant aux trois groupes définis par les SOMs : recharge récente contaminée, recharge plus ancienne et eau de mer fossile. Les échantillons faisant partie de la zone de recharge récente contaminée ne seront pas inclus dans le calcul des concentrations de référence. Concernant ceux de l'eau de mer fossile ils ne sont pas présents dans la masse d'eau BR02 mais ils sont tout de même très proches de celle-ci. Deux approches peuvent être envisagées : ne pas les considérer car leur minéralisation n'est pas la même que dans la masse d'eau BR02 ou les considérer parce qu'ils sont situés à proximité de la masse d'eau BR02 et qu'il vaut mieux calculer les concentrations de référence sur le plus grand nombre d'échantillons. Dans le prochain point, ces deux approches seront testées et discutées.

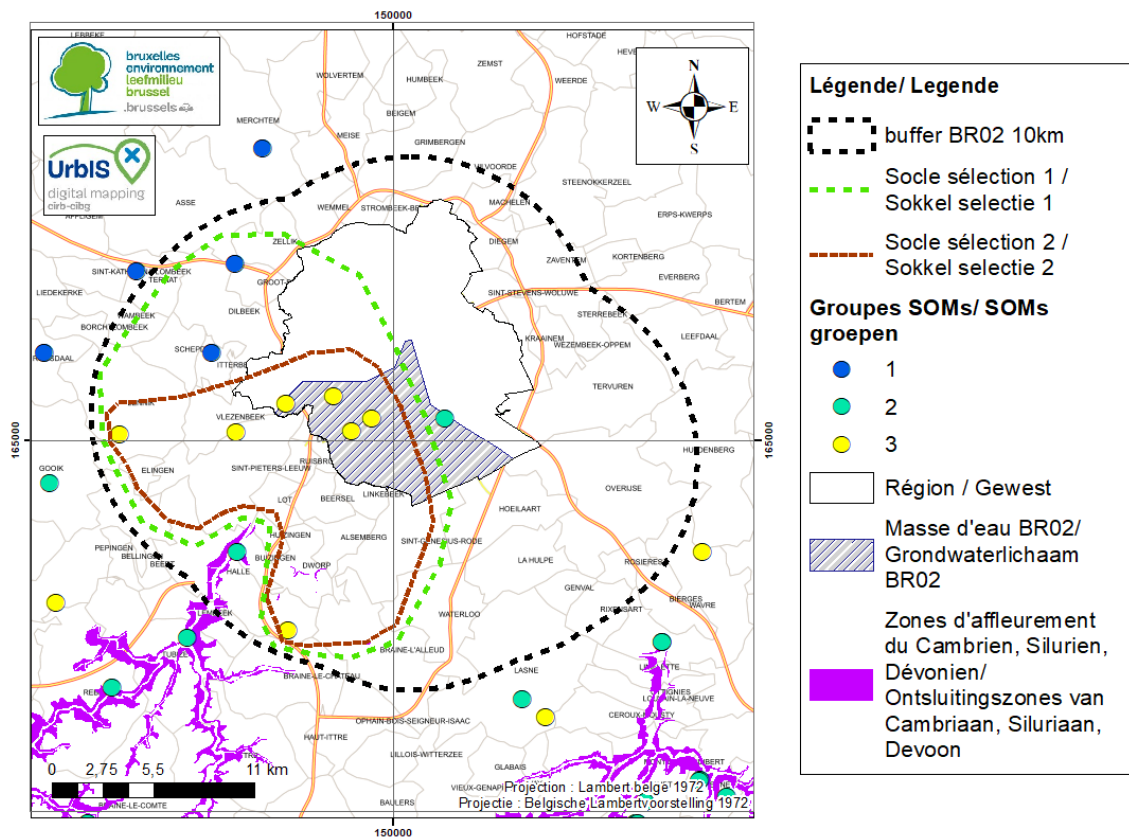


Figure 4-62 : Buffer de 10 km autour de la masse d'eau BR02 avec le résultat des SOMs pour la minéralisation globale

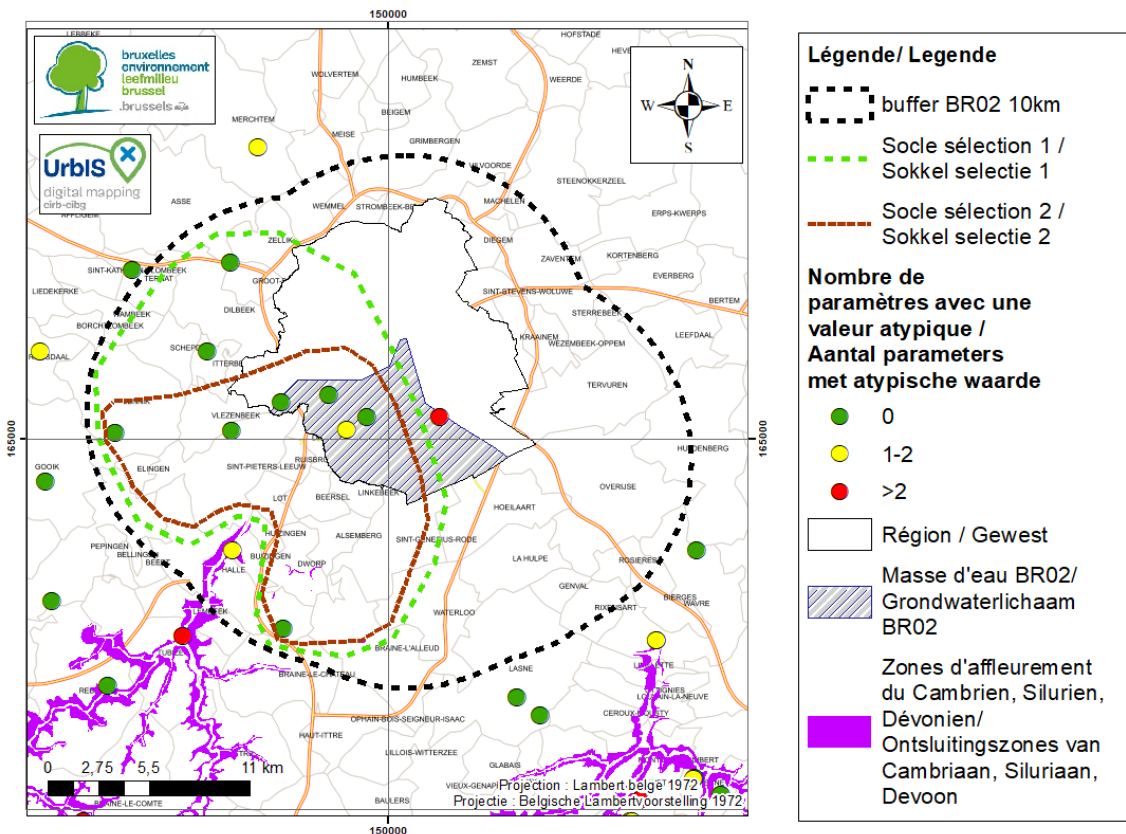


Figure 4-63 : Buffer de 10 km autour de la masse d'eau BR02 avec le nombre de valeurs atypiques par site

4.3.2. Proposition de concentration de référence

Pour les stations qui ont été sélectionnées dans le point précédent, les principaux paramètres statistiques sont calculés (Tableau 4-11). La sélection 1 inclut des sites avec une eau de mer fossile et la sélection 2 ne les inclut pas (Figure 4-62 et Figure 4-63). Les paramètres calculés sont : la moyenne, la médiane (P50), le P25, le P75 et le P90. Le nombre de stations d'échantillonnage est mentionné ainsi que le pourcentage de quantification de chaque valeur. Les paramètres statistiques ont été calculés sur base des médianes de chaque station d'échantillonnage. Lorsqu'un paramètre est en dessous de la limite de quantification, il est estimé en divisant la limite de quantification par 2. Pour les métaux les concentrations de référence seront déterminées pour la fraction totale parce que les valeurs seuils ont été fixées sur la fraction totale pour la masse d'eau souterraine BR02 (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles Capitale relatif à la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration, 2010 et sa révision de 2016).

Dans ce travail, le terme « concentration de référence » continuera à être utilisé même s'il serait plus prudent de parler de concentration de fond comme cela a déjà été évoqué précédemment.

Pour estimer les concentrations de référence, la médiane représente la valeur habituellement rencontrée et le P90, la valeur limite de la concentration naturelle. Il est généralement recommandé d'utiliser le P90 pour fixer une valeur de concentration de référence (Müller, 2006). Les résultats du calcul des concentrations de références sont assez semblables pour la sélection 1 et la sélection 2. Les seuls éléments pour lesquels il y a des différences significatives sont le Cl, Na, F, B qui sont plus élevées pour la sélection 1 mais qui restent quand même inférieures aux valeurs seuils. Les 2 sélections peuvent donc être utilisées pour déterminer les concentrations de référence même s'il est

préférable d'utiliser la première qui comporte un nombre plus élevé de stations d'échantillonnage. Dans un premier temps, les résultats seront présentés en tenant compte de la sélection 1 mais la décision finale reviendra au pouvoir adjudicateur.

Pour certains paramètres, le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de quantification est très faible (mis en évidence en rouge dans le Tableau 4-11). Pour ces paramètres il n'est pas recommandé d'utiliser le P90. La concentration de référence sera calculée en se basant sur la limite de quantification et sur les résultats pour des aquifères semblables (Müller, 2006). Les aquifères semblables considérés sont la masse d'eau SS_1300_GWL_2 en Flandre et la masse d'eau BERWE160 en Wallonie. La concentration de référence pour ces paramètres est la limite de quantification la plus grande, ce qui est généralement du même ordre de grandeur que les valeurs fixées en Région Wallonne et en Région flamande.

Les concentrations de références proposées pour la masse d'eau BR02 sont présentées dans le Tableau 4-12 et sont comparées aux valeurs de la Région flamande et de la région wallonne. Les concentrations de référence ne sont pas définies pour tous les paramètres en Région flamande et en Région wallonne, les valeurs ne peuvent pas être comparées pour tous les éléments. Il est tout de même possible de constater que les valeurs qui sont proposées pour la masse d'eau BR02 sont généralement du même ordre de grandeurs que celles des régions adjacentes.

Paramètres	Sélection 1										Sélection 2							
	NB	% > LQ	Valeur LQ	Min	P25	moy.	P50	P75	P90	max	NB	Min	P25	moy.	P50	P75	P90	max
Al (mg/L)	8	60	0.04, 0.02, 0.01, 0.001	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	6	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
As total (µg/l)	8	15	5, 1, 0.5	0.50	0.50	2.14	2.50	2.50	3.44	5.63	6	0.50	0.50	1.50	1.50	2.50	2.50	2.50
B total (µg/l)	8	90	100	50.00	139.33	257.10	226.50	327.33	452.92	597.40	6	50.00	119.99	178.07	149.50	264.75	304.55	306.10
Br (mg/L)	3	100		0.03	0.06	0.09	0.09	0.12	0.14	0.15	3	0.03	0.06	0.09	0.09	0.12	0.14	0.15
Ca (mg/L)	8	100		6.58	43.39	51.11	56.00	70.89	73.55	76.00	6	51.06	55.50	63.65	63.68	71.96	74.25	76.00
Cd total (µg/l)	8	3	0.5, 0.1, 0.03	0.05	0.05	0.18	0.25	0.25	0.25	0.25	6	0.05	0.05	0.15	0.15	0.25	0.25	0.25
Cl (mg/L)	8	100		9.40	12.07	39.91	14.60	28.15	89.41	189.30	6	9.40	10.69	19.03	13.08	19.85	34.30	46.60
Cu total (µg/l)	8	23	5, 2, 1	1.00	1.00	1.88	1.38	1.94	3.25	5.00	6	1.00	1.00	1.92	1.00	2.13	3.75	5.00
EC (µs/cm)	8	100		539.00	602.13	696.19	626.50	715.75	868.30	1121.00	6	539.00	593.38	638.08	619.75	684.00	730.50	760.00
F (mg/L)	8	93	0.2, 0.1	0.10	0.15	0.24	0.19	0.27	0.46	0.53	6	0.10	0.12	0.16	0.17	0.19	0.20	0.21
Fer (total) (mg/L)	8	89	0.05, 0.02	0.04	0.05	0.33	0.25	0.37	0.66	1.27	6	0.05	0.24	0.43	0.31	0.39	0.83	1.27
HCO3 (mg/L)	8	100		310.43	315.78	367.23	342.67	427.74	439.92	450.15	6	315.92	330.82	385.35	395.76	432.94	442.85	450.15
Hg total (µg/l)	8	0	0.5, 0.3, 0.2, 0.1, 0.05, 0.03, 0.02, 0.01	0.03	0.03	0.17	0.25	0.25	0.25	0.25	6	0.03	0.03	0.14	0.14	0.25	0.25	0.25
K (mg/L)	8	100		5.90	9.63	17.02	13.13	27.84	28.40	28.98	6	5.90	10.83	19.11	20.97	28.04	28.56	28.98
Mg (mg/L)	8	100		2.04	11.97	16.87	22.19	23.25	23.71	23.87	6	15.00	22.04	21.67	22.80	23.52	23.76	23.87
Mn (mg/L)	8	98		0.02	0.03	0.20	0.04	0.08	0.47	1.29	6	0.02	0.03	0.25	0.04	0.06	0.67	1.29
Na (mg/L)	8	100		11.00	28.28	70.09	49.38	74.96	156.69	203.85	6	11.00	27.88	36.73	37.89	50.41	52.95	54.45
NH4 (mg/L)	8	82	0.16, 0.05	0.08	0.14	0.26	0.22	0.40	0.45	0.53	6	0.08	0.13	0.24	0.14	0.34	0.47	0.53
Ni total (Ni) (µg/l)	8	10	5, 2, 1	1.00	1.00	1.94	2.50	2.50	2.50	2.50	6	1.00	1.00	1.75	1.75	2.50	2.50	2.50
NO2 (mg/L)	8	11	0.07, 0.03, 0.02, 0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	6	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
NO3 (mg/L)	8	29	2, 1, 0.9, 0.2, 0.05	0.10	0.10	0.47	0.20	1.00	1.03	1.10	6	0.10	0.15	0.60	0.65	1.00	1.05	1.10
O2 (mg/L)	8	94		0.10	0.13	2.47	1.24	4.45	6.56	6.70	6	0.10	0.23	2.65	1.24	5.35	6.60	6.70
Orthophosphates (mg/l de P)	8	75	0.31, 0.1, 0.05, 0.0066	0.01	0.02	0.14	0.03	0.11	0.33	0.81	6	0.01	0.01	0.04	0.03	0.03	0.07	0.11
Pb total (µg/l)	8	47	10, 5, 2, 0.1	0.20	0.58	1.14	1.00	1.75	1.98	2.50	6	0.20	0.35	0.94	0.85	1.00	1.75	2.50
pH	8	100		7.27	7.51	7.76	7.73	7.93	8.26	8.42	6	7.27	7.42	7.58	7.64	7.74	7.79	7.84
Phosphore total (mg/l de P)	3	24	0.1, 0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	3	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
SO4 (mg/L)	8	98	2	2.67	10.34	20.27	14.30	26.45	40.41	54.09	6	2.67	8.46	16.11	14.30	21.84	29.15	34.55
Zn total (µg/l)	8	75	10, 5	5.00	5.00	30.68	9.73	61.50	73.20	83.00	6	5.00	6.50	38.67	35.00	66.50	76.00	83.00

Tableau 4-11 : Paramètres statistiques calculés pour estimer la concentration type de la masse d'eau du Socle en zone d'alimentation BR02 sur base des médianes des stations, en rouge : les paramètres avec le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de quantification très faible (<25%)

Pays/ Région		Belgique : Région Flamande	Belgique : Région Wallonne	Région de Bruxelles-Capitale
Masse d'eau		Socle et Crétacé en zone d'alimentation SS_1300_GWL_2	E160 Cambro- Silurien du Massif du Brabant	BR02 : Socle en zone d'alimentation
Al total	mg/L	*		0.01
As dissous	µg/L	6	3.09	5
As total	µg/L			
B dissous	µg/L	660	85.93	452.9
B total	µg/L			
Ca	mg/L	110		73.5
Cd dissous	µg/L	*	0.2	0.5
Cd total	µg/L			
Cl	mg/L	57	167.45	89.4
Cu dissous	µg/L	*	6.4	5
Cu total	µg/L			
EC	(µs/cm)	750		868.3
F	(mg/L)	1.7		0.46
Fe dissous	µg/L	1100	2887.28	658
Fe total	µg/L			
HCO3	mg/L			439
Hg total	(µg/l)		0.04	0.5
K	mg/L	22		28.4
Mg	mg/L	27		23.7
Mn dissous	µg/L	90	833.09	470
Mn total	µg/L			
Na	mg/L	88		156.7
NH4	mg/L	0.52	0.16	0.45
Ni total	µg/L		13.38	5
Ni dissous	µg/L	*		
NO2	mg/L		0.02	0.02
NO3	mg/L		14.16	1.03
Orthophosphates	(mg/l de P)	0.31		0.33
Phosphore total	(mg/l de P)		0.1	0.1
Pb dissous	µg/L	*	1.04	1.98
Pb total	µg/L			
pH		7.1-8.3		8.3
SO4	mg/L	71	410.44	40.4
Zn dissous	µg/L	17	89.23	73.2
Zn total	µg/L			

Tableau 4-12 : Concentrations de référence du Socle en Flandre et en Wallonie (SPW-DGO3-DEE, 2016 et VMM, 2016) comparées aux valeurs proposées pour la masse d'eau BR02 (en rouge : les paramètres avec le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de quantification très faible)

5. Analyse des données et résultats pour la masse d'eau des Sables yprésiens (région des collines) (BR04)

5.1. Présentation et vérifications de la qualité des données

5.1.1. Présentation de la masse d'eau souterraine des Sables yprésiens (région des collines) (BR04)

La masse d'eau de l'Yprésien (région des collines) a une superficie très réduite (seulement 21km²) dans la Région de Bruxelles-Capitale, et elle est seulement présente dans le nord-ouest de la Région (Figure 5-1). Cette masse d'eau est située dans l'aquifère sableux de Tielt qui a une épaisseur moyenne de 20m (Buffel & Matthijs, 2001).

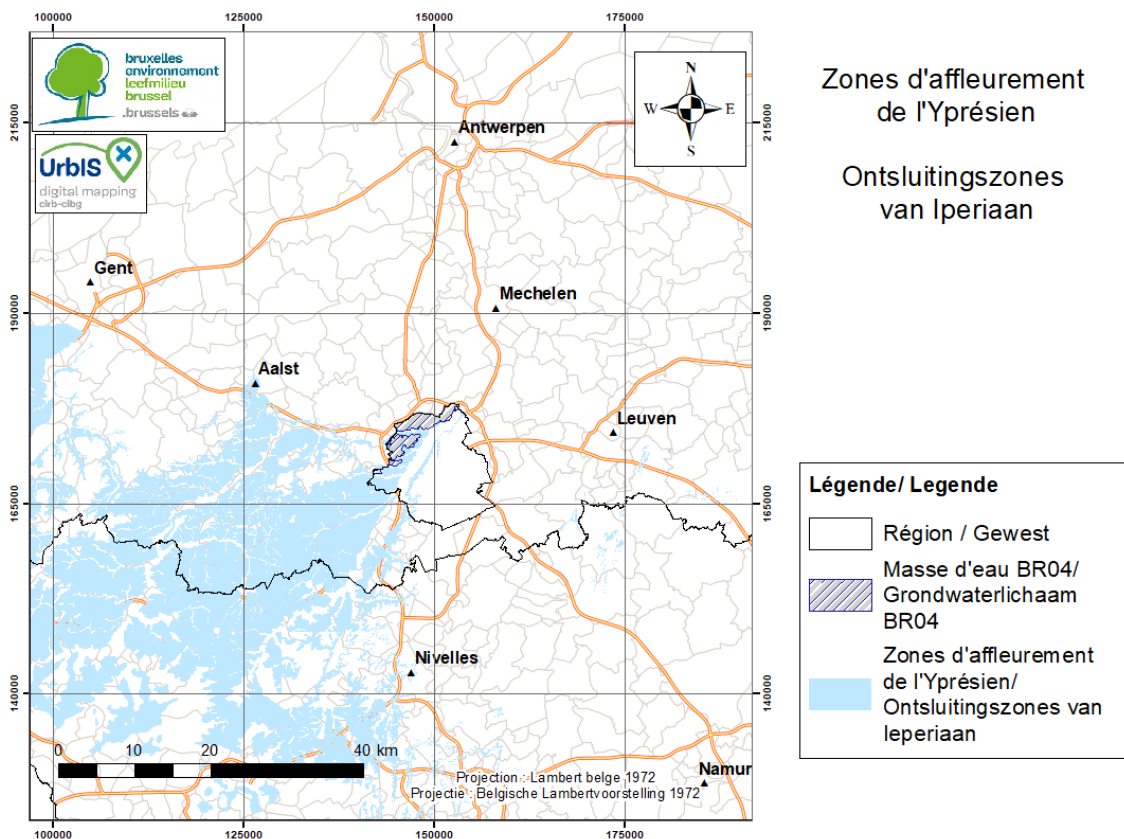


Figure 5-1 : Localisation de la masse d'eau BR04 (Bruxelles Environnement, 2010) et des affleurements De l'Yprésien (Service Géologique de Belgique, 2003)

Cette masse d'eau souterraine de l'Yprésien (BR04) fait partie de l'aquifère transfrontalier des sables Yprésien (région des collines) et sables de Mons-en Pélève (id 13). Les aquifères transfrontaliers sont présentés à la Figure 5-2 et dans un tableau en annexe de correspondance entre les masses d'eau souterraine transfrontalières et les aquifères transfrontaliers issus d'une coordination entre les différents partenaires du District de l'Escaut (Tableau 0-3).

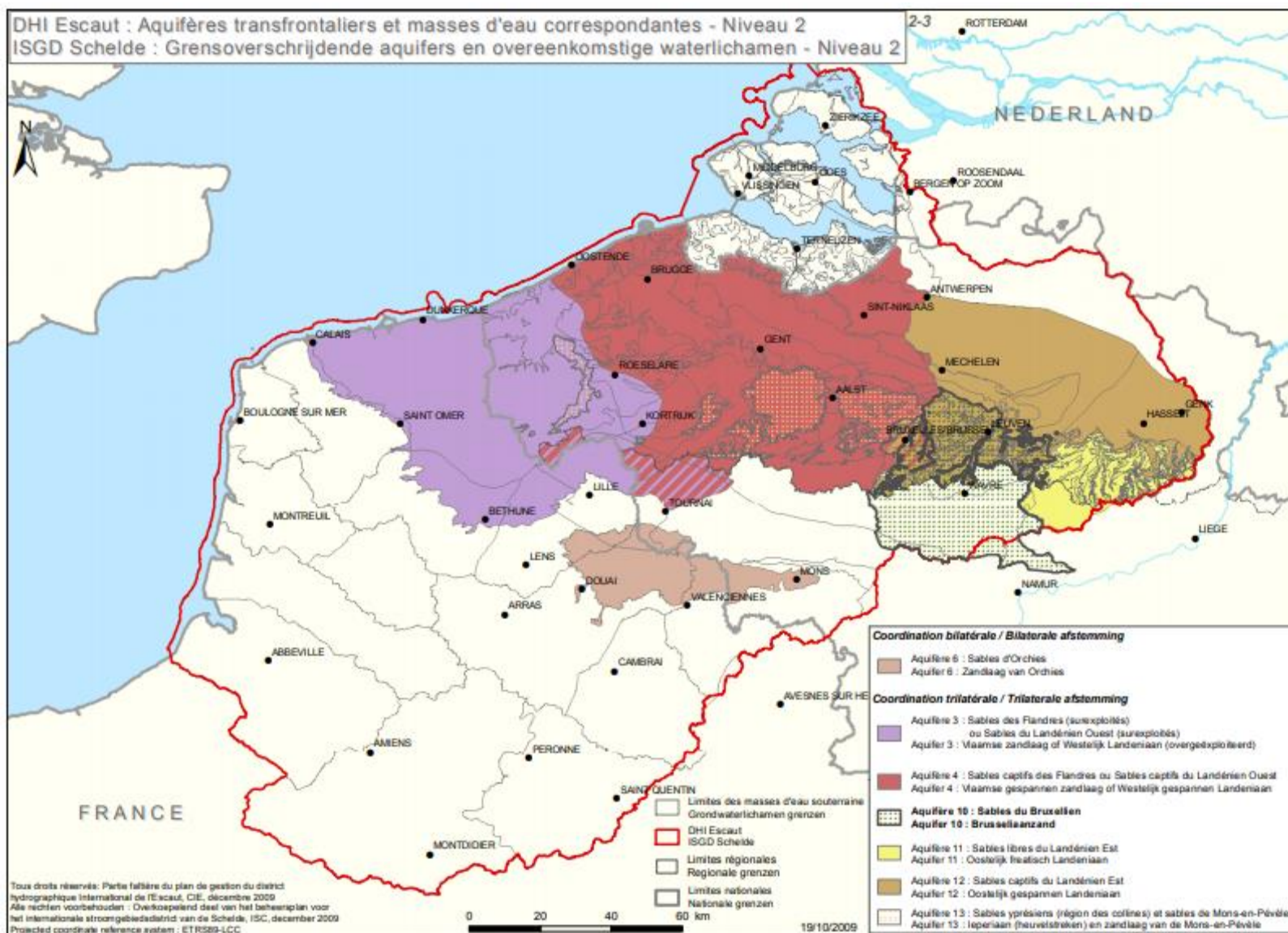


Figure 5-2 : Aquifères transfrontaliers du Paléocène et de l'Eocène du bassin de l'Escaut (CIE, 2009)

La masse d'eau de l'Yprésien (Région des collines) est principalement présente en Flandre, et très localement en Région de Bruxelles-Capitale. Elle est par contre absente en Wallonie. Des formations yprésiennes y affleurent (Figure 5-1) mais elles ne sont pas déclarées comme masse d'eau. L'aquifère de l'Yprésien est majoritairement libre mais il peut localement être captif notamment à Bruxelles, où il est localement recouvert d'unités plus argileuses (Figure 5-3) : l'aquiclude des argiles de Gent et l'aquiclude des argiles de Ursel et Asse. Il est aussi recouvert en partie par l'aquifère sableux perché et l'ensemble de la zone est recouverte de dépôts quaternaires (limons).

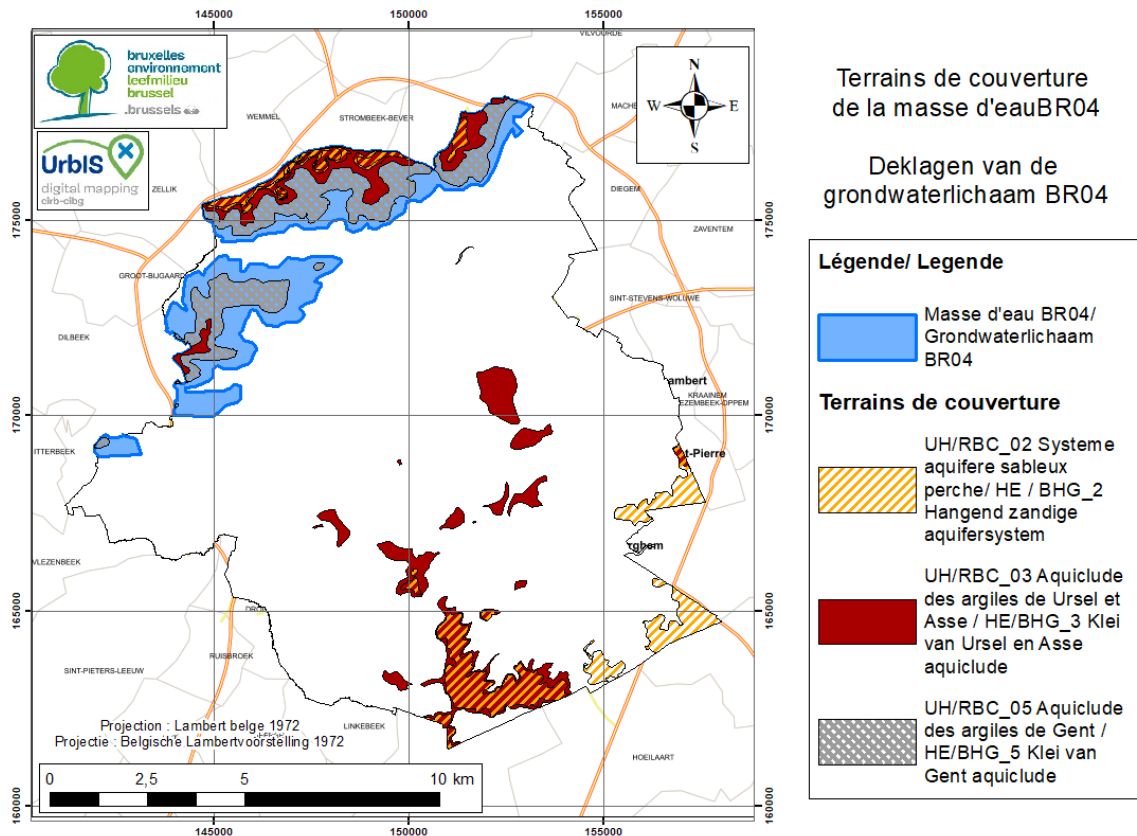


Figure 5-3 : Terrains de couvertures de la masse d'eau BR04 en Région de Bruxelles-Capitale (Bruxelles Environnement, 2019)

5.1.2. Présentation des données

5.1.2.1. Données en région de Bruxelles-Capitale

Les données sur lesquelles se base l'étude ont été fournies par Bruxelles Environnement. Elles proviennent des sites d'échantillonnage déclarés dans les programmes de surveillance, liés à la directive cadre eau, et de sites exploratoires de la qualité des nappes qui ne sont de ce fait pas analysés de façon récurrente. Les points de prélèvements de la masse d'eau souterraine de l'Yprésien pour lesquels des données hydrochimiques sont disponibles, sont décrits dans le Tableau 5-1. Leur répartition spatiale est illustrée à la Figure 5-4. Il y a uniquement 4 stations pour cette masse d'eau. La profondeur des différents puits est de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres, elle varie entre 17.5 et 46 m. L'environnement autour des stations de prélèvement est principalement urbain à l'exception du piézomètre P34 (Bois de Dielegem) qui est situé en zone Natura 2000.

Point de prélèvement	Code	Type d'ouvrage	Période de suivi	Nombre de mesures	X Lambert belge 72 (m)	Y Lambert belge 72 (m)	Profondeur (m)
387 Jotul Martin	P48	piézomètre	2015	1	145053	173846	46
Bois de Dieleghem	P34	piézomètre	2012-2015	7	146742	175158	15.5
Tennis Charles Quint	312	puits	2004-2015	19	145199	174219	35
YRCO2_cerisier	P51	piézomètre	2016	1	143972	172214	17.5

Tableau 5-1 : Données relatives aux points de prélèvement de la masse d'eau souterraine de l'Yprésien (Région des collines) pour lesquels des données hydrochimiques sont disponibles

Le programme de surveillance de l'état chimique mis en œuvre dans le cadre de la directive Cadre Eau a été progressivement mis en place à partir de 2004. Il n'y a qu'un seul point pour lequel le suivi continu a été effectué entre 2004 et 2015 : le point Tennis Charles Quint (312). Pour les autres stations de prélèvement, il y a eu très peu de mesures et le suivi a été mis en place beaucoup plus tard.

Les paramètres qui ont généralement été mesurés sont la teneur en oxygène dissous, la température, le pH et la conductivité, les éléments majeurs, les éléments mineurs (notamment B et F), ainsi qu'une centaine de substances polluantes (pesticides, micropolluants organiques, cyanures, métaux lourds, ...). L'ensemble de ces paramètres n'ont cependant pas été analysés pour chaque échantillon prélevé. Les concentrations en métaux ont généralement été mesurées en « concentration totale » (sans filtration préalable de l'échantillon sur le terrain). Seuls Ni, Hg, Pb, Cd ont également été mesurés en « concentration dissoute » (avec filtration préalable).

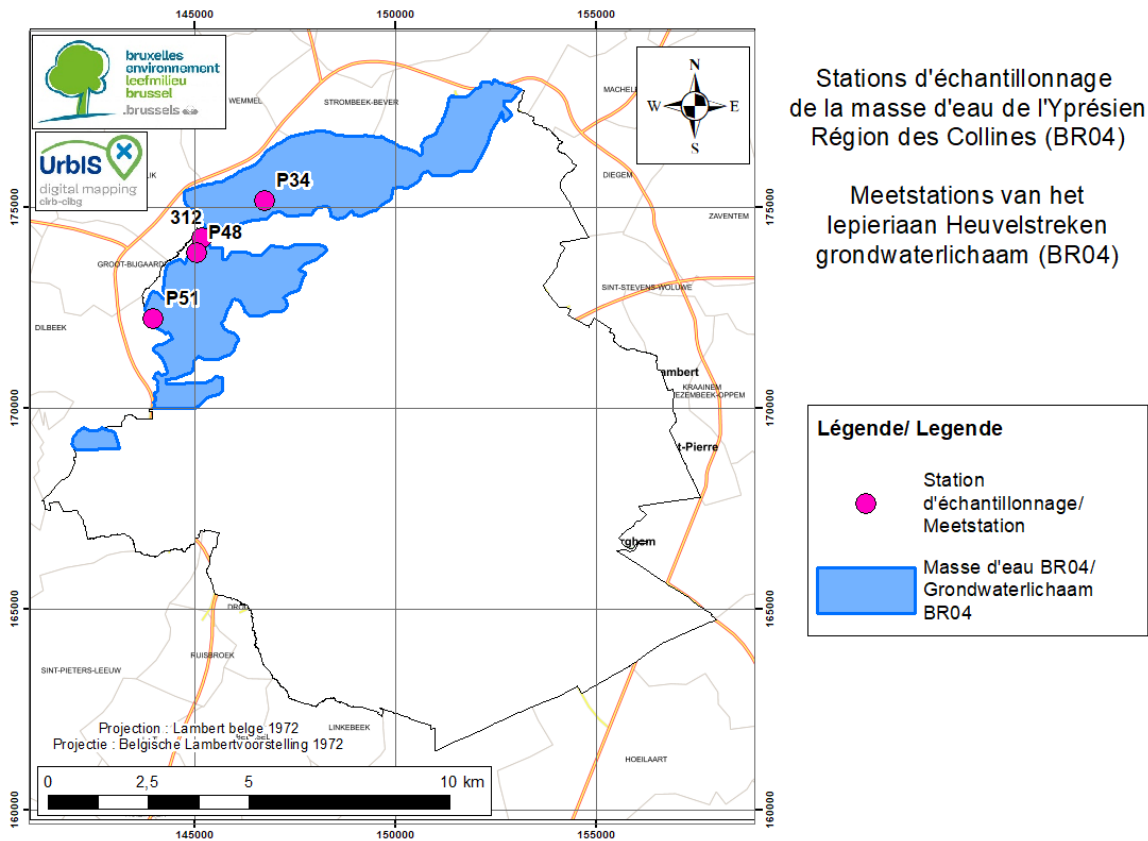


Figure 5-4: Points de prélèvement de la masse d'eau souterraine de l'Yprésien (Région des collines) pour lesquels des données hydrochimiques sont disponibles

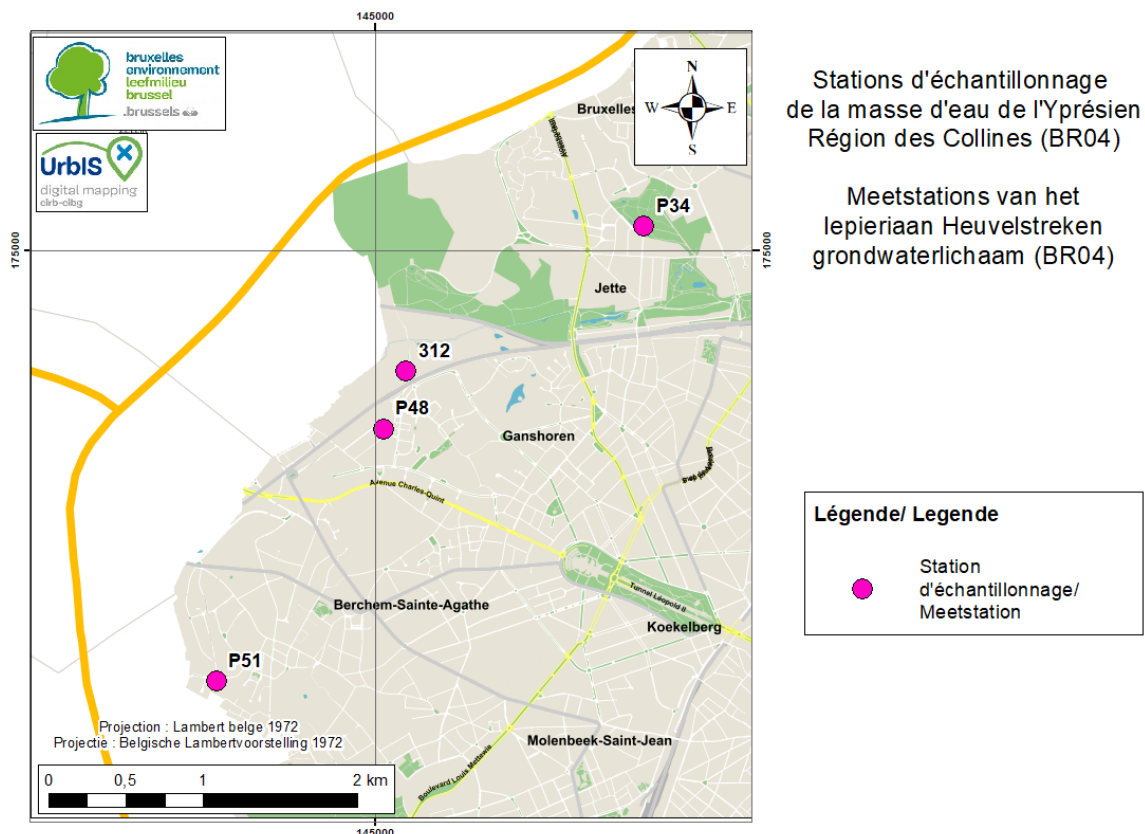


Figure 5-5 : Occupation du sol aux alentours des stations de prélèvement de la masse d'eau souterraine de l'Yprésien (Région des collines).

5.1.2.2. Données complémentaires

Afin d'élargir le jeu de données, des données complémentaires ont également été recherchées pour le même aquifère, en Flandre et en Wallonie. Les données de la Région flamande proviennent de la DOV et les données de la Région wallonne proviennent de la base de données Calypso du SPW. 19 stations d'échantillonnage ont été sélectionnées en Wallonie et 22 en Flandre. La localisation de ces stations est présentée à la Figure 5-6. La liste de ces stations complémentaires est également reprise en annexe (Tableau 0-5). Les stations sélectionnées en Flandre sont situées dans la même formation qu'à Bruxelles (Tielt) par contre en Wallonie, dans la base de données, il est uniquement précisé que les crépines sont localisées dans l'aquifère de l'Yprésien mais il n'est pas précisé de quelle formation il s'agit.

Avoir un nombre plus élevé de données et couvrir une zone plus large permet d'étudier les variations des compositions chimiques de l'aquifère et de pouvoir ainsi replacer la masse d'eau souterraine de l'Yprésien (Région des collines) (BR04) dans son contexte hydrogéologique et hydrochimique. Avoir un nombre plus élevé de données permettra également d'effectuer des statistiques plus robustes pour la détermination des concentrations de référence. Dans le reste du rapport, quand il sera question de l'ensemble du jeu de données de l'Yprésien, il s'agira des données fournies par Bruxelles environnement pour la masse d'eau BR04 et des stations de prélèvement sélectionnées dans le l'Yprésien en Wallonie et en Flandre.

Les paramètres mesurés en Wallonie et en Flandre ne sont pas forcément les même que ceux mesurés en Région de Bruxelles-Capitale. En Flandre, les paramètres mesurés sont la température, le pH, l'Eh, la conductivité électrique et l'oxygène dissous, les éléments majeurs, quelques éléments

mineurs (NH₄, F, NO₂, PO₄), les métaux mesurés en fraction totale et ou dissoute. Tous les paramètres n'ont pas forcément été mesurés pour chaque analyse. En Région wallonne, les mêmes paramètres sont mesurés qu'en Flandre. Les métaux sont mesurés en concentration totale à l'exception du fer. En Wallonie, des données complémentaires sont disponibles concernant les concentrations en polluants (pesticides, micropolluants organiques, cyanures ...).

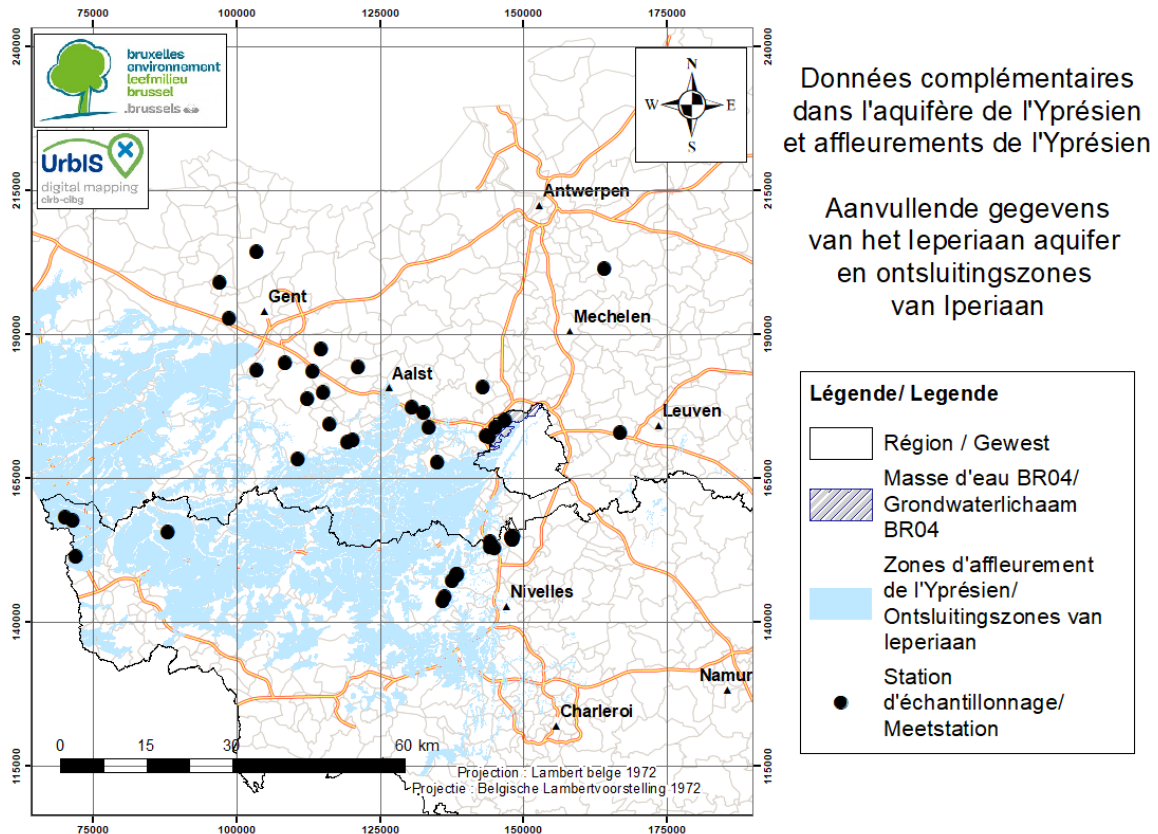


Figure 5-6 : Données complémentaires dans l'aquifère de l'Yprésien en Wallonie et en Flandre

5.1.3. Vérification de la qualité des données

5.1.3.1. Correspondance avec la masse d'eau souterraine étudiée

La première étape pour vérifier les données est de vérifier si l'aquifère dans lequel le piézomètre est crépiné, correspond bien à la masse d'eau souterraine qui est étudiée. La station 312 est renseigné comme appartenant à la masse d'eau BR04, pourtant il n'est pas située à l'intérieur de celle-ci (Figure 5-4) et il n'est pas crépiné dans l'aquifère de Tielt (Liétar A., communication personnelle, 12 juin 2018). Cette station sera donc exclue. Pour les stations situées en Région wallonne, il est uniquement précisé qu'il s'agit de l'aquifère Yprésien mais il n'est pas précisé s'il s'agit de la Formation de Tielt. Ces données seront conservées pour la suite de l'analyse hydrochimique pour étudier l'évolution spatiale des concentrations. Mais elles ne seront a priori pas utilisées pour le calcul final des concentrations de référence.

5.1.3.2. Limite de quantification des éléments mineurs et des éléments en trace

Paramètres	BR04		RW Yprésien		RW Yprésien		valeurs LQ
	Nb analyses	% > LQ	Nb analyses	% > LQ	Nb analyses	% > LQ	
Aluminium (Al) dissous (µg/l)	0	0	5	0.0	107	19.63	10, 1, 0.1
Aluminium total (Al) (µg/l)	8	100	55	25.5			
Ammonium (mg/l)	8	87.5	119	40.3	385	39.48	0.1, 0.065, 0.06, 0.05, 0.03, 0.02
Arsenic total (As) (µg/l)	8	37.5	86	54.7	248	38.71	5, 1.5, 1, 0.5
Arsenic (dissous) (µg/l)			8	50.0			
Baryum total (Ba) (µg/l)	8	100	66	56.1			1
Bicarbonate (mg HCO ₃ -/l)	8	100	3	100.0	278	91.37	
Bore total (B) (µg/l)	8	100	66	77.3	108	52.78	60, 50, 26, 10, 5, 0.01
Bromure (Br-) (µg/l)	2	100	1	100.0			5
Cadmium (Cd) dissous (µg/l)	8	0	8	12.5	248	3.63	0.4, 0.3, 0.1, 0.01
Cadmium total (Cd) (µg/l)	8	12.5	86	22.1			
Calcium (Ca) (mg/l)	8	100	48	100.0	273	100.00	2
Carbone organique total non purgeable (NPOC) (mg/l)	6	100	123	90.2	273	90.11	
Chlorure (mg/l)	8	100	110	100.0	277	98.56	
Chrome total (Cr) (µg/l)	8	25	86	24.4	242	19.01	2, 0.5, 0, 01
Cobalt total (Co) (µg/l)	8	50	31	22.6	164	20.12	2, 0.1, 0.02
Cuivre total (Cu) (µg/l)	8	50	86	51.2	242	11.57	2, 1, 0.01
Fer total (Fe) (µg/l)	8	100	19	89.5	273	79.49	50, 10, 5, 0.01
Fer dissous (Fe) (µg/l)			71	70.4	115	53.91	
Fluorure (F-) (µg/l)	8	100	93	92.5	164	64.02	
Magnésium (Mg) (mg/l)	8	100	64	100.0	273	100.00	
Manganèse total (Mn) (µg/l)	8	100	88	85.2	272	79.04	20, 1, 0.5, 0.01
Mercure (Hg) dissous (µg/l)	8	0	5	0.0	228	0.44	0.05, 0.03, 0.02
Mercure total (Hg) (µg/l)	8	0	81	13.6			
Nickel (Ni) dissous (µg/l)	8	0	8	62.5	247	45.75	5, 2, 1
Nickel total (Ni) (µg/l)	8	25	103	54.4			
Nitrate (mg/l)	8	0	93	100.0	385	77.92	2, 1, 0.9, 0.2, 0.1, 0.09, 0.05
Nitrite (mg/l)	8	25	86	59.3	389	28.02	30, 0.07, 0.05, 0.03, 0.02, 0.0046
Orthophosphates (mg/l de P)	8	87.5	86	86.0	369	56.91	0.02, 0.0066
Phosphate (PO ₄) ³⁻ (µg/l)	0	0	0	0.0	4	75.00	150
Phosphore total (mg P/l)	8	50	73	79.5			0.1, 0.5
Plomb (Pb) dissous (µg/l)	8	0	8	37.5	242	10.33	5, 3, 0.1, 0.005
Plomb total (Pb) (µg/l)	8	100	102	32.4			
Potassium (K) (mg/l)	8	100	105	99.0	273	100.00	
Silice (SiO ₂) (mg/l)	0	0	29	100.0			
Sodium (Na) (mg/l)	8	100	65	100.0	273	100.00	
Strontium (Sr) (mg/l)	6	100	34	100.0			
Sulfate (mg/l)	8	100	94	100.0	275	98.91	2
Zinc total (Zn) (µg/l)	8	100	102	88.2	248	56.85	2

Tableau 5-2 : Limite de quantification des principaux éléments mineurs et en trace de l'aquifère de l'Yprésien (Nb = nombre, LQ = limite de quantification), en rouge les éléments pour lequel le pourcentage de quantification est inférieur à 25% ou pour lesquels il n'y a pas de mesures.

Les limites de quantification des principaux éléments mineurs et en traces sont présentées dans le Tableau 5-2. Pour chaque élément, le nombre total d'analyses est indiqué ainsi que le pourcentage de quantifications et la ou les valeurs de limites de quantification. Un même élément peut avoir

plusieurs limites de quantification en fonction de la méthode analytique utilisé. De manière générale les limites de quantification deviennent de plus en plus basses avec le temps sur la période concernée par l'étude en fonction de l'amélioration de la précision des méthodes analytiques. Il arrive aussi que la limite de quantification varie à cause d'un changement de laboratoire (et donc de méthode analytique).

Pour la Région de Bruxelles-Capitale, les données qui sont présentées sont celles des échantillons prélevés à partir de 2006. Le programme de surveillance a officiellement commencé en 2004 mais c'est à partir de 2006 qu'il est estimé être représentatif.

Les valeurs inférieures à la limite de quantification seront traitées comme recommandé par le projet BRIDGE (Müller, 2006). La valeur de concentration utilisée sera la limite de quantification divisée par 2. Les valeurs de limite de quantification qui sont égales ou supérieures aux normes seront exclues de l'analyse. Les normes considérées sont celles déterminées pour les eaux souterraines de la Région de Bruxelles-Capitale (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles Capitale relatif à la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration, 2010 et sa révision de 2016) et celles de la directive cadre européenne "Eau potable" (CE, 1998) transposée dans l'Arrêté du 24 janvier 2002 relatif à la qualité de l'eau distribuée par réseau (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale, 2002).

Certains éléments qui sont repris dans la liste minimale pour lesquels il faut déterminer une concentration de référence d'après la directive 2006/118/CE (CE, 2006), présentent un pourcentage de quantification très faible. Il y a notamment le cadmium et le mercure qui sont rarement supérieurs aux limites de quantification dans les trois Régions. Pour ces paramètres il ne sera pas possible de calculer directement la concentration de référence. En outre, certains paramètres ne sont pas mesurés de la même manière dans les différentes régions. Pour les métaux, la concentration est soit en fraction totale ou en fraction dissoute. Il est donc impossible de comparer ces concentrations en métaux mesurés dans les différentes Régions. Concernant le phosphore, en Région de Bruxelles-Capitale et en Région wallonne les orthophosphates et le phosphore total (et dans une moindre mesure les phosphates) sont mesurés tandis qu'en Région flamande, il n'y a pas de données de phosphore total.

5.1.3.2. *Présence de polluants*

Pour déterminer les concentrations de référence, il faut normalement écarter du jeu de données les points qui sont impactés par des contaminations anthropiques. Dans ce travail, les sites impactés ne seront pas écartés de manière systématique. Ils seront conservés pour la suite de l'analyse hydrochimique pour évaluer si la contamination a un impact significatif ou non sur la minéralisation et ainsi déterminer s'ils seront utilisés ou non pour le calcul des concentrations de référence.

Le Tableau 5-3, reprend pour les principaux polluants qui sont quantifiés dans l'aquifère de l'Yprésien, le nombre d'analyses et le pourcentage de quantification. En Région de Bruxelles-Capitale, il y a peu de polluants qui sont quantifiés, mais il y a également très peu de données disponibles (8). Le point YRCO2_cerisier (P51), pour lequel une seule analyse est disponible, présente une concentration en BAM supérieure à la norme et également une faible concentration en cyanure. En Région wallonne, il y a plus de polluants qui sont quantifiés. Il s'agit principalement de pesticides. En Région flamande, il y a moins de données concernant les polluants que dans les autres régions,

néanmoins de l'atrazine et de l'atrazine déséthyl sont parfois supérieurs aux limites de quantification.

Paramètres	BR04		RW Yprésien		RF Yprésien	
	Nb analyses	% > LQ	Nb analyses	% > LQ	Nb analyses	% > LQ
1,1,1-Trichloroéthane (µg/l)	8	0	28	0.0		
1,1,2-Trichloroéthane (µg/l)	8	0	24	0.0		
2,6-Dichlorobenzamide (BAM) (µg/l)	8	12.5	46	17.4	28	7.1
Atrazine (µg/l)	8	0	53	56.6	32	37.5
Atrazine déséthyl (µg/l)	7	0	53	47.2	32	46.9
Atrazine desisopropyl (µg/l)	7	0	53	49.1	6	0.0
Bentazone (µg/l)	8	0	51	72.5	32	3.1
Benzène (µg/l)	7	0	28	0.0		
Cyanures totaux (µg/l)	8	12.5	84	7.1	0	0.0
Diuron (µg/l)	8	0	53	15.1	32	0.0
Glyphosate (µg/l)	0	0	2	0.0	4	0.0
Huiles minérales (totales) (mg/l)	0	0	31	41.9		
Naphtalène (µg/l)	8	0	0	0.0		
Simazine (µg/l)	8	0	53	3.8	32	0.0
Tétrachloroéthylène (C2Cl4) (µg/l)	7	0	28	7.1	1	100.0
Toluène (µg/l)	8	0	25	4.0		
Trichloroéthylène (C2HCl3) (µg/l)	8	0	28	7.1	1	100.0

Tableau 5-3 : Pourcentage d'analyses supérieures à la limite de quantification pour certains polluants de l'aquifère de l'Yprésien (Nb = nombre, LQ = limite de quantification), en orange : les polluants pour lesquels le pourcentage de quantification est supérieur à 10%.

Pour identifier les sites dans lesquels des polluants ont été quantifiés, des cartes avec les concentrations maximales quantifiées par polluant pour chaque station ont été réalisées (Figures 5-7 à 5-14). Sur ces cartes, il est possible de constater qu'il y a beaucoup de sites pour lesquels il y a peu ou pas d'informations sur la présence de polluants. Il est donc difficile de savoir avec précision quelles sont les zones qui sont impactées et celles qui ne le sont pas. Il semble néanmoins que des polluants sont présents en Région wallonne et en Flandre.

En Région wallonne, la partie ouest de l'aquifère semble être fortement impacté par les nitrates et les pesticides. Pour la partie est, la concentration en nitrate est moins élevée. Par contre localement, du cyanure et des huiles minérales sont détectés à des concentrations supérieures aux limites de quantification. Pour les autres polluants aucune donnée n'est disponible.

En Région flamande, à l'exception des concentrations en nitrate et quelques pesticides pour certains sites, peu d'informations sont disponibles sur la présence de polluants. Sur base des concentrations en nitrate, il est tout de même possible de voir une évolution entre le sud-ouest et le nord-est. La concentration en nitrate est plus élevée dans le sud, à proximité des zones d'affleurement tandis que dans le nord où la nappe est captive les concentrations sont très faibles.

En Région de Bruxelles Capitale les concentrations en nitrates sont très faibles et des polluants sont quantifiés uniquement dans le site YRCO2_cerisier (P51).

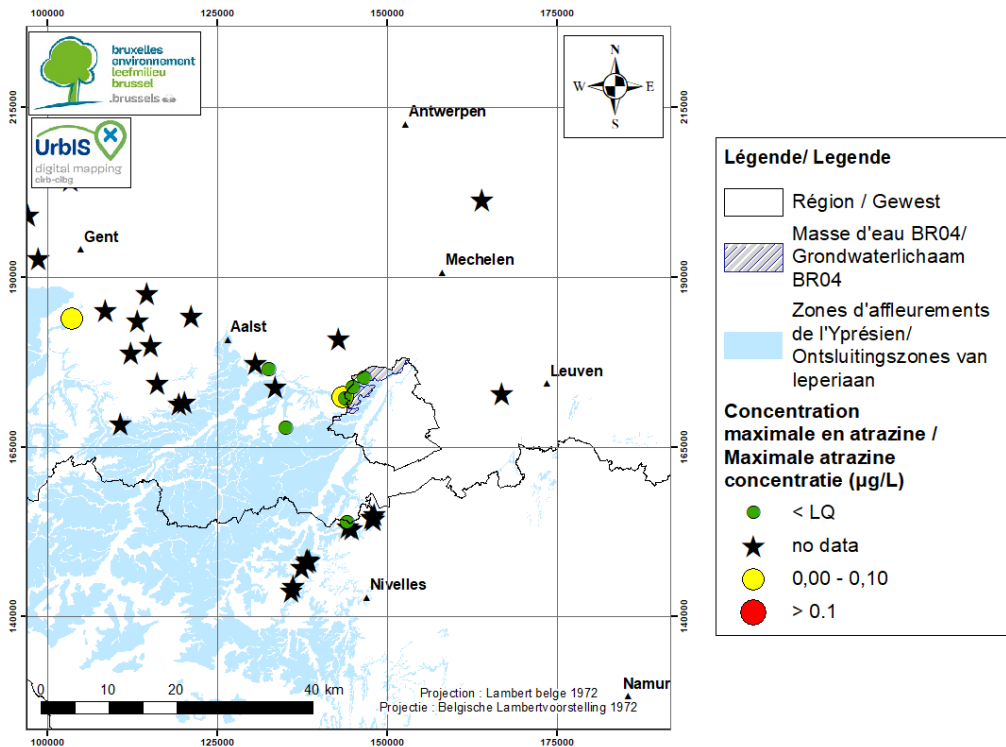


Figure 5-7: Concentration maximale en atrazine dans l'aquifère de l'Yprésien

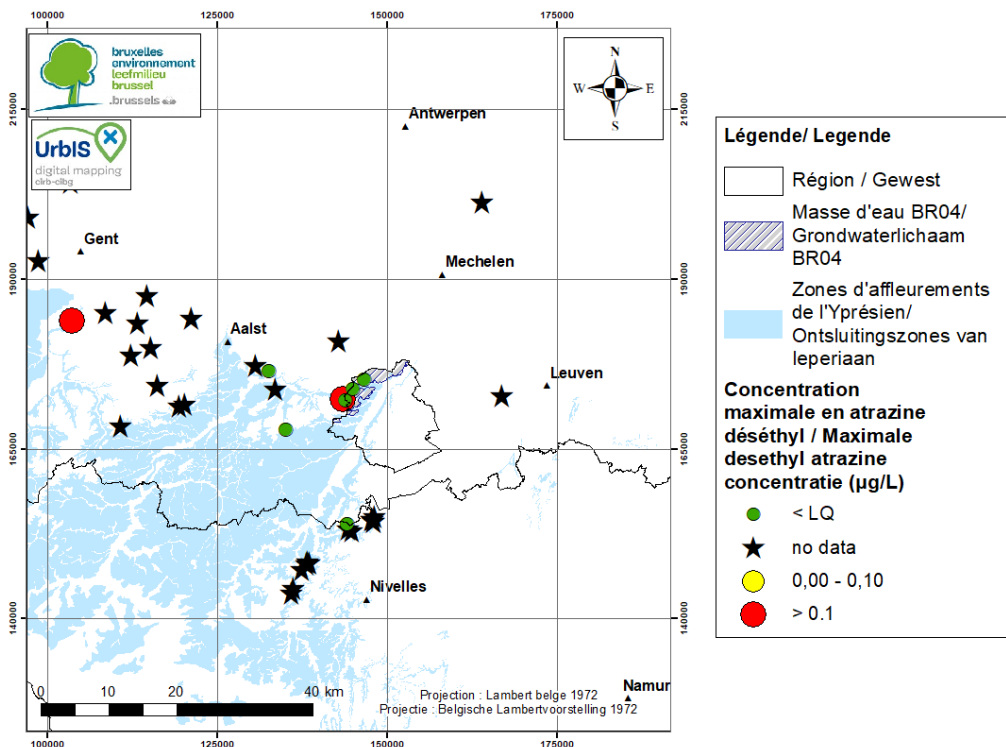


Figure 5-8 : Concentration maximale en atrazine déséthyl dans l'aquifère de l'Yprésien

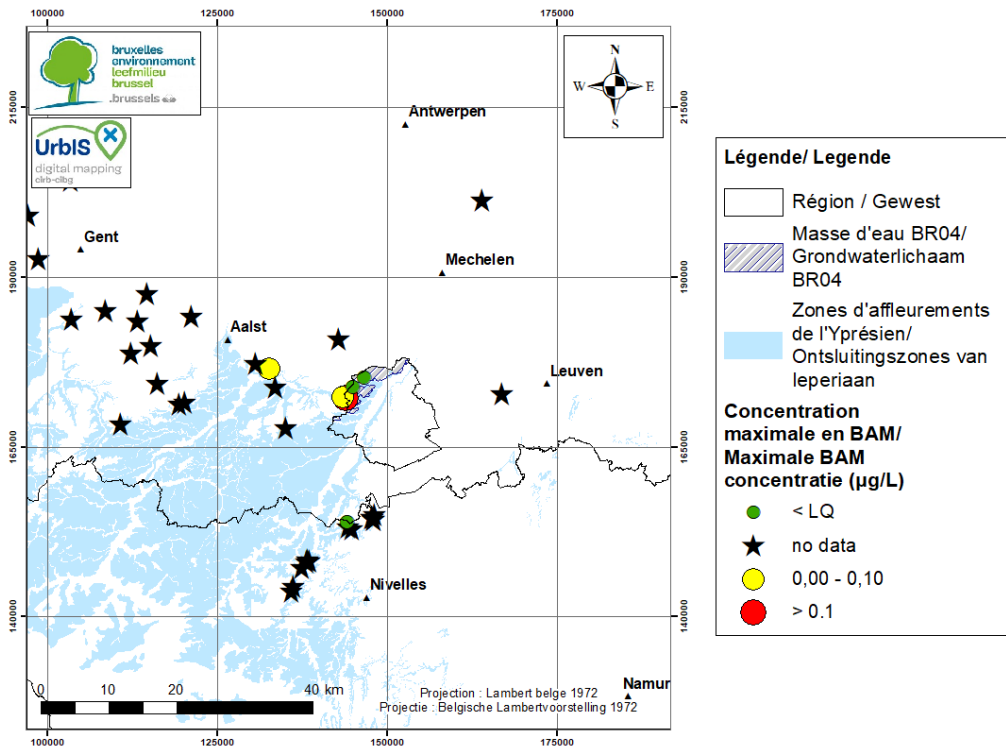


Figure 5-9 : Concentration maximale en BAM (2,6-dichlorobenzamide) dans l'aquifère de l'Yprésien

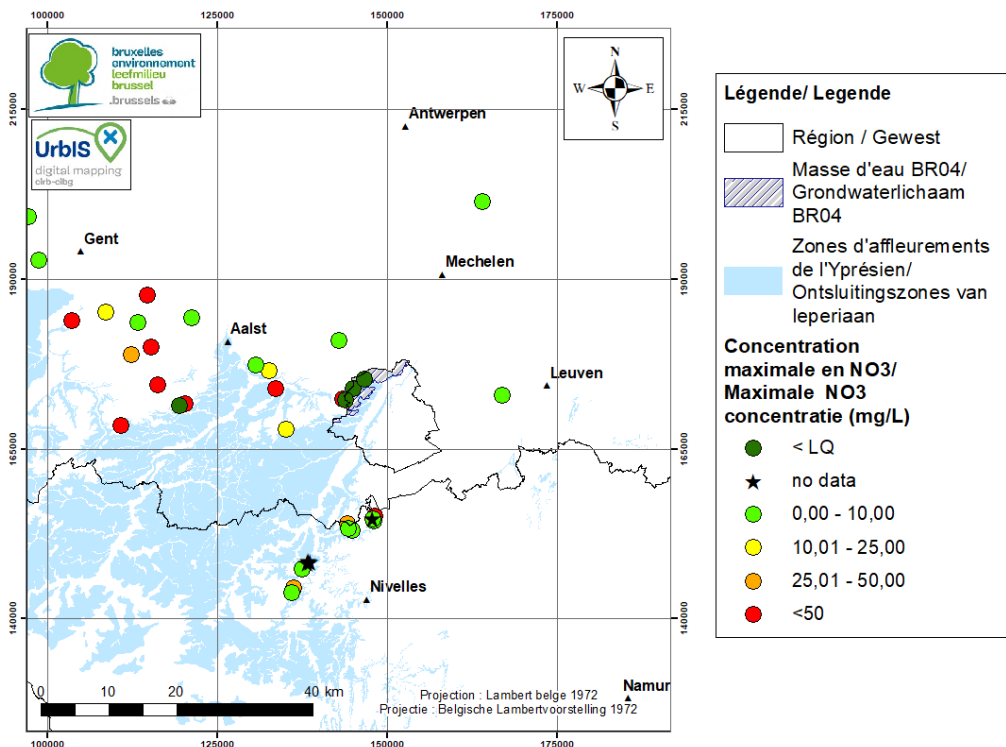


Figure 5-10 : Concentration maximale en nitrate dans l'aquifère de l'Yprésien

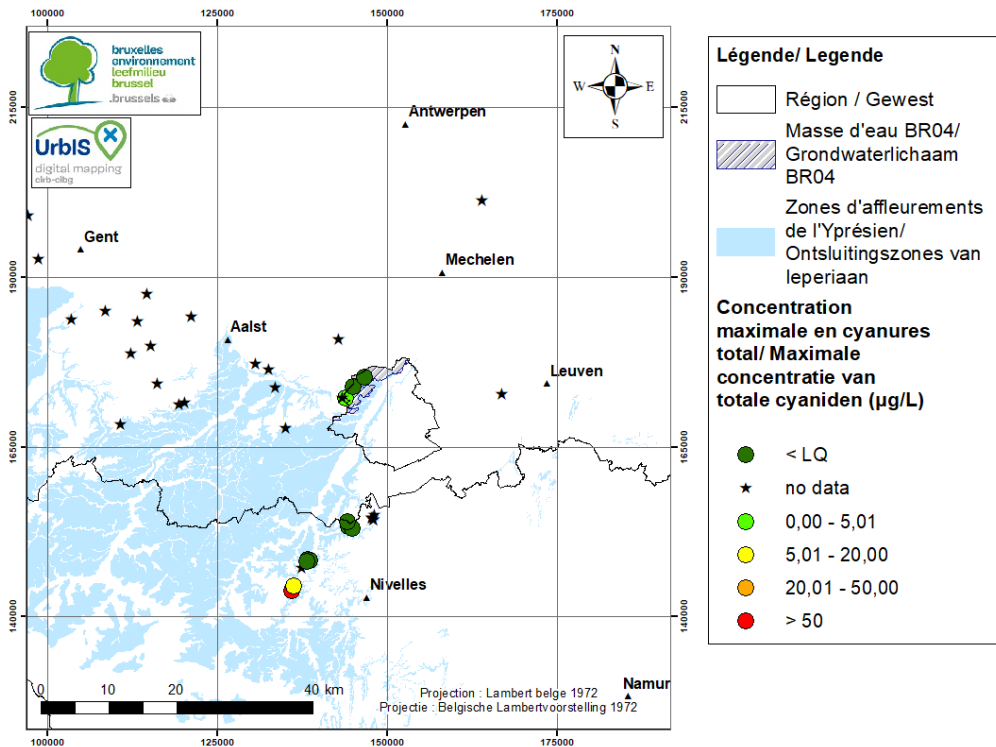


Figure 5-11 : Concentration maximale en cyanures totaux dans l'aquifère de l'Yprésien

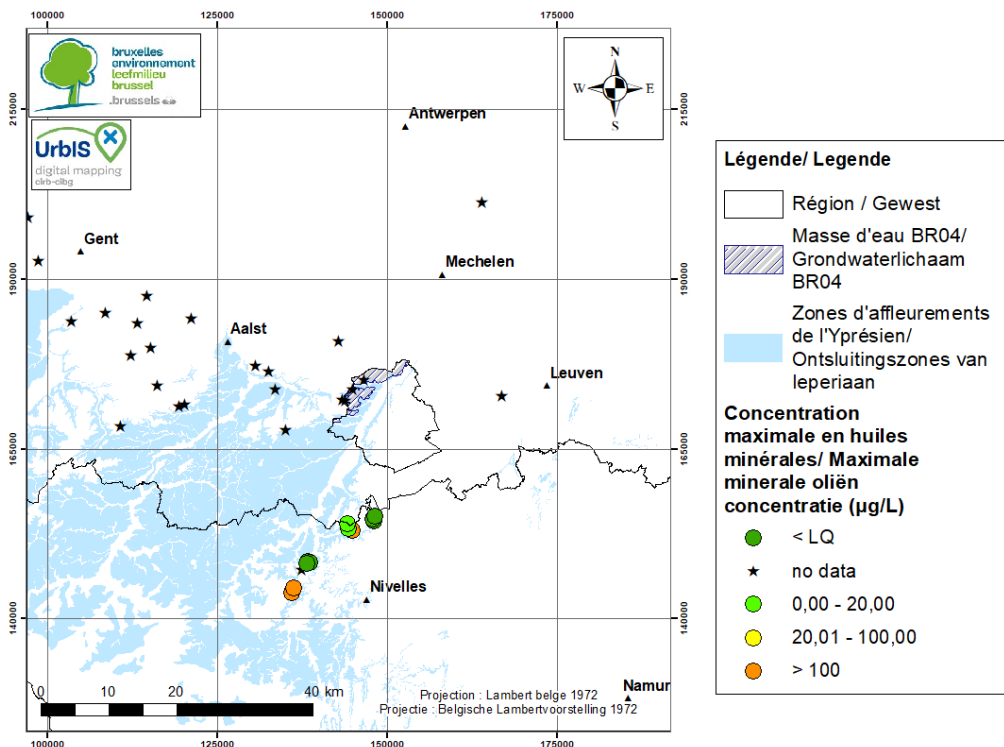


Figure 5-12 : Concentration maximale en huiles minérales dans l'aquifère de l'Yprésien

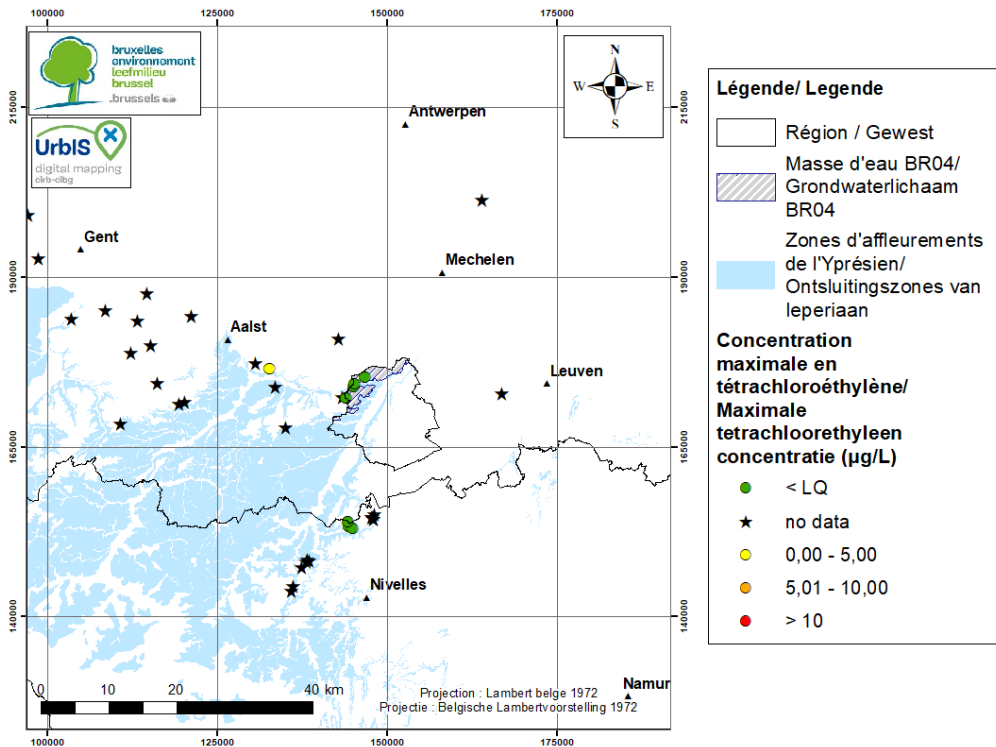


Figure 5-13 : Concentration maximale en tétrachloroéthylène dans l'aquifère de l'Yprésien

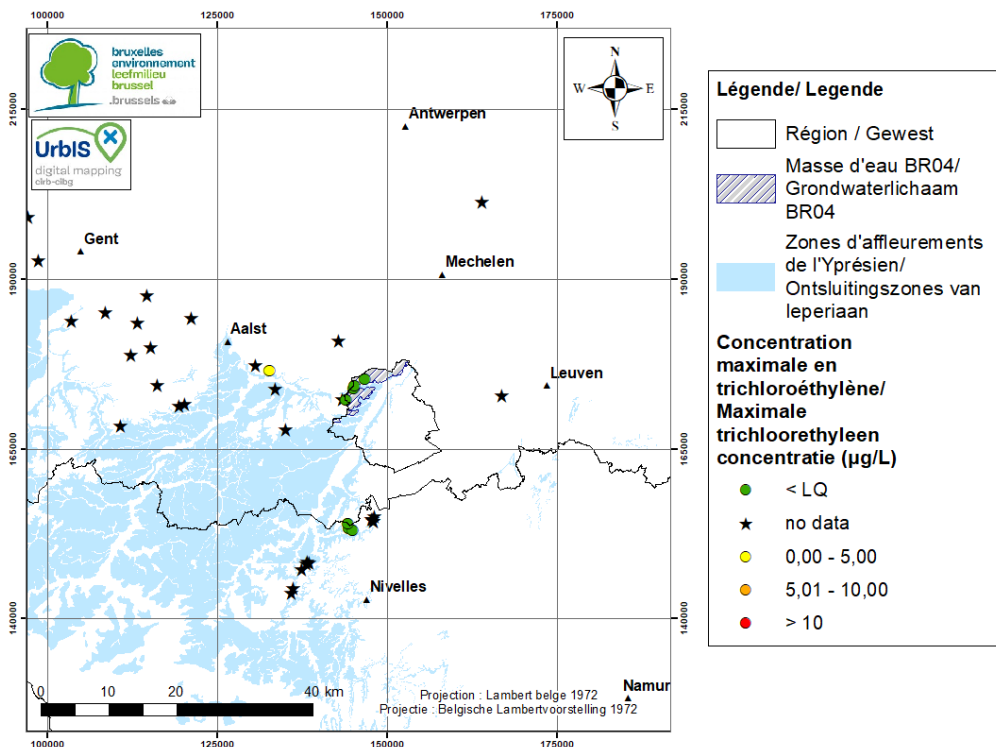


Figure 5-14 : Concentration maximale en trichloroéthylène dans l'aquifère de l'Yprésien

5.1.3.3. Balance ionique

La balance ionique a été calculée pour chaque échantillon (Tableau 5-4). Un certain nombre d'échantillons présentent des balances ioniques supérieures à 10 % ou inférieures à -10 % principalement en Région flamande et en Région wallonne. Ces balances ioniques qui sortent de

l'intervalle de confiance sont quasi exclusivement liées à des analyses incomplètes, l'ensemble des éléments majeurs n'ont pas été analysés à chaque échantillonnage. Ces analyses incomplètes n'ont pas été systématiquement exclues de l'analyse. Pour vérifier la qualité des données, la balance ionique est ensuite recalculée à partir de la médiane des concentrations de chaque élément pour chaque station. Pour la région de Bruxelles-Capitale, La balance ionique 'médiane' est comprise entre -10% et 10% pour chaque station d'échantillonnage (3). Ce n'est pas le cas des Régions flamande et wallonne, pour certaines stations, l'ensemble des éléments majeurs n'ont même pas été mesurés une seule fois. C'est le cas pour la moitié des sites de prélèvement en Wallonie. Comme il s'agit de données complémentaires et qu'il y a un nombre relativement important de stations en Wallonie et en Flandre pour l'aquifère de l'Yprésien, il est proposé de sélectionner uniquement celles avec une balance ionique 'médiane' dans l'intervalle de confiance. Les 10 stations en Région wallonne et 20 stations en Région flamande sélectionnées sont localisées sur la carte de la Figure 5-15. Les stations sélectionnées sont mises en évidence dans le Tableau 0-5 en annexe.

	Région de Bruxelles-Capitale	Région wallonne	Région flamande
Nombre d'analyses	9	150	393
Pourcentage des analyses avec $-10\% < BI < 10\%$	89	34	65
Nombre de stations d'échantillonnage	3	19	22
Pourcentage des stations d'échantillonnage avec $-10\% < BI \text{ (médiane)} < 10\%$	100	53	91
Nombre des stations d'échantillonnage avec $-10\% < BI \text{ (médiane)} < 10\%$	3	10	20

Tableau 5-4 : Calcul de la balance ionique des échantillons de l'Yprésien (Nb = nombre, BI = balance ionique).

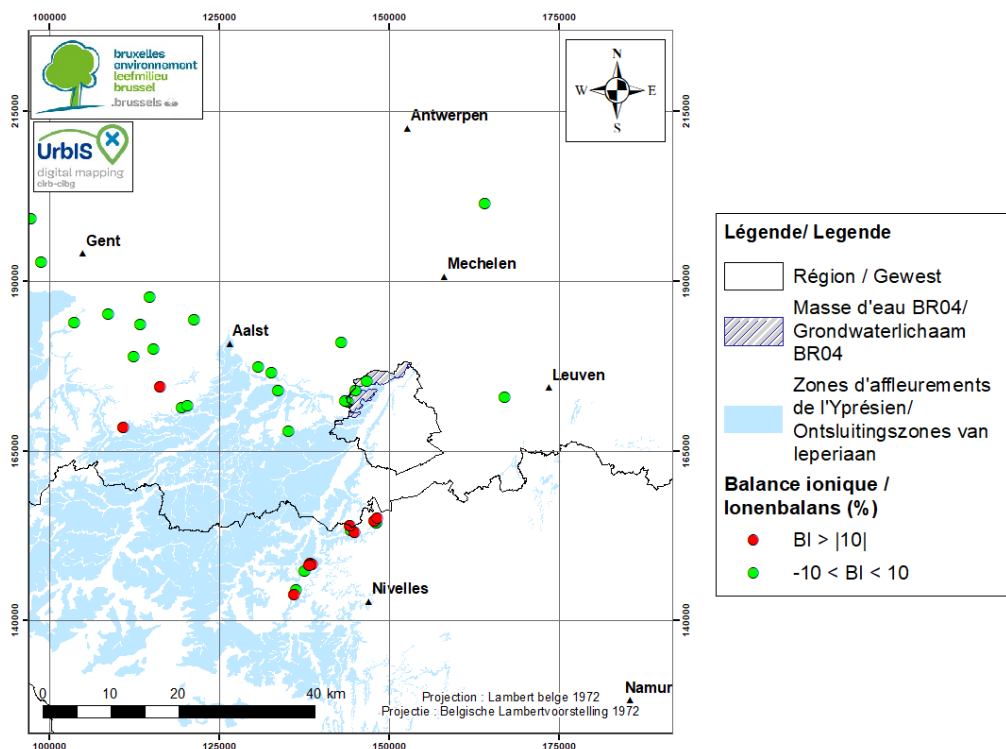


Figure 5-15 : Erreur sur la balance ionique de la médiane des échantillons de l'aquifère de l'Yprésien

5.2. Etude des processus chimiques influençant la composition géochimique des eaux souterraines

5.2.1. Faciès hydrochimiques : diagramme de Piper

Les échantillons de l'aquifère de l'Yprésien sont représentés dans un diagramme de Piper à la Figure 5-16. Dans le cas où il aurait eu plusieurs échantillonnages, c'est la médiane des concentrations qui est utilisée. Les échantillons de l'aquifère de l'Yprésien appartiennent principalement aux faciès bicarbonaté calcique et chloruré calcique mais quelques échantillons appartiennent également aux faciès bicarbonaté sodique et potassique et chloruré sodique et potassique.

Au sein des faciès bicarbonatés calcique et chloruré calcique, 2 pôles se distinguent : un avec une proportion faible en SO_4 , Cl et NO_3 et un avec une proportion élevée en ces éléments. Le premier groupe rassemble des eaux « douces » qui ne sont a priori pas contaminées. Le deuxième groupe rassemble plutôt des eaux avec une proportion importante en nitrate, chlorure ou sulfate. Cette position dans le diagramme de Piper peut-être liée à une intrusion d'eau marine ou une contamination anthropique. Dans cette présente étude, au vu des fortes concentrations en nitrates et de la position des sites, il s'agit plutôt d'une contamination. La majorité des échantillons de l'aquifère de l'Yprésien sont situés plutôt dans le deuxième pôle.

Le diagramme de Piper montre qu'il y a une évolution depuis les eaux douces (bicarbonatées calciques) vers les eaux bicarbonatées sodiques et potassiques et les eaux chlorurées sodiques et potassiques. Dans le diagramme des cations, il y a une augmentation progressive des proportions de sodium et potassium et une diminution de la proportion en calcium. D'après Appelo et Postma (2005), une évolution des eaux douces (bicarbonatées calcique et magnésienne) vers des eaux bicarbonatées sodique et potassique voir chlorurées sodique et potassique reflète un phénomène naturel de rafraîchissement (repoussée des eaux salées par des eaux douces).

Les différents faciès des échantillons sont représentés spatialement à la Figure 5-17. Dans le sud de la zone, à proximité des zones d'affleurements les eaux sont de type bicarbonaté calcique ou chloruré calcique dans le cas d'une eau fortement impactée par une contamination anthropique. En Région de Bruxelles-Capitale, les sites de prélèvement de l'Yprésien sont de type bicarbonaté calcique. Plus au Nord, en Région flamande, là où la nappe devient captive. Les eaux évoluent vers des faciès bicarbonatés sodique et potassique et des faciès chlorurés sodique et potassique. Les eaux s'écoulent globalement du sud vers le nord. Les eaux jeunes sont donc bicarbonatées calciques ou chlorurées sodiques si elles polluées et les eaux plus anciennes sont de type bicarbonaté sodique et potassique ou chloruré sodique et potassique. La zone de transition entre ces eaux jeunes et anciennes ne se situe pas dans la Région de Bruxelles Capitale mais à proximité (moins de 10 km).

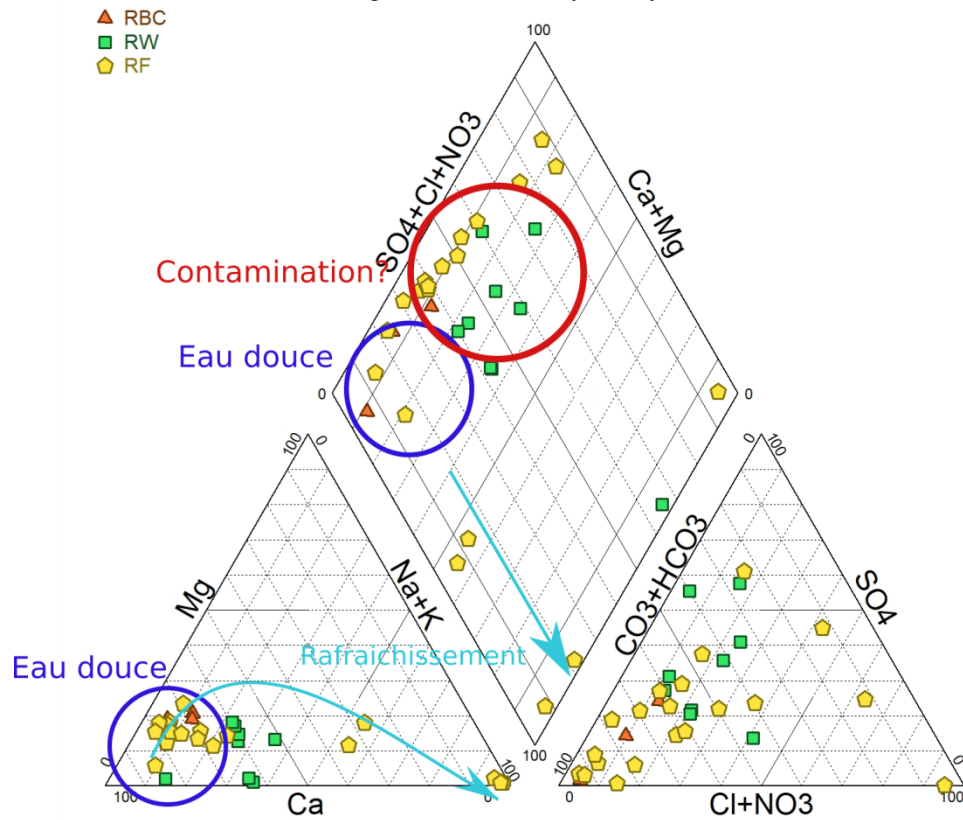


Figure 5-16 : Représentation des échantillons de l'aquifère de l'Yprésien (médiane) dans un diagramme de Piper

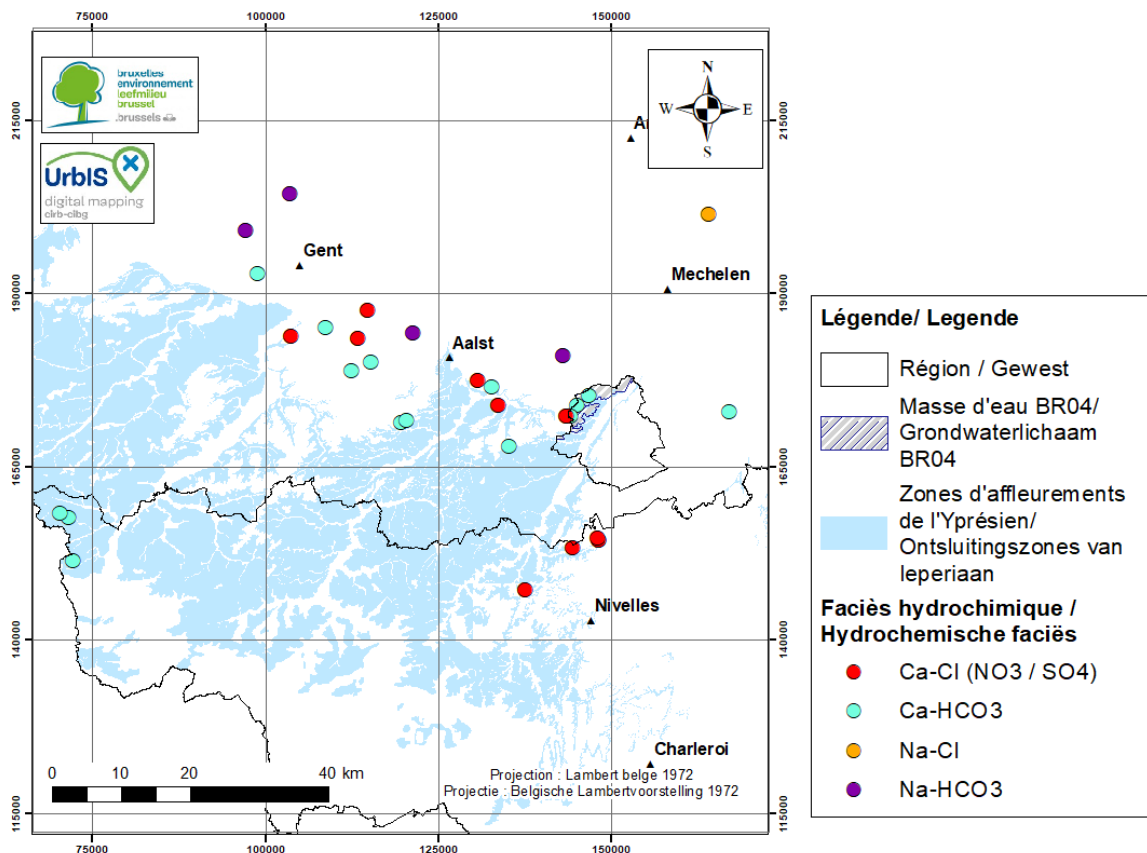


Figure 5-17 : Répartition spatiale des types de faciès hydrochimiques de l'aquifère de l'Yprésien

5.2.2. Variations spatiales des paramètres

Les Figures 5-18 à 5-38 présentent les distributions spatiales des principaux paramètres physico-chimiques, des éléments majeurs et de certains éléments mineurs, à savoir la conductivité électrique de l'eau, le pH, et les concentrations en O₂ dissous, Ca, Cl, HCO₃, Mg, Na, K, SO₄, NO₃, NH₄, Fe, Mn, F, As, Zn, B, Pb, Cu, Ni. Il s'agit de la médiane de chaque élément par station d'échantillonnage.

Avant de décrire les variations spatiales des différents éléments, il faut noter que les stations en Région wallonne sont relativement éloignées des autres. Il n'est donc pas évident de décrire l'évolution spatiale des concentrations parce qu'idéalement il faudrait distribution homogène des stations d'échantillonnage. Ici, il y a tout de même une grande zone en région wallonne et au sud de la Région flamande sans stations d'échantillonnage.

La conductivité électrique des eaux souterraines est très variable en Région wallonne, elle est moyenne à élevée en Région flamande et bruxelloise et semble augmenter légèrement vers le Nord. Les valeurs de pH sont plutôt neutres, voire acides au sud et deviennent progressivement basiques vers le nord-est (jusqu'à un pH de 9). Les valeurs de concentrations en O₂ dissous sont généralement faibles (< 1mg/L) à l'exception de l'ouest de la Région wallonne et en région de Bruxelles-Capitale (jusqu'à 10.8 mg/L). En Région wallonne la concentration en Ca est variable mais pour le reste de la zone les concentrations diminuent du sud-ouest vers le nord-est. Les valeurs de concentrations en Cl sont faibles à moyennes dans le sud de la zone (0-100 mg/L) et deviennent plus élevée pour les quelques point au nord de la zone (> 250 mg/L). Les valeurs de concentration en HCO₃ sont généralement moyennes ou faibles (0 à 500 mg/L) à l'exception de quelques points au nord de la zone où la concentration est plus élevée. Les valeurs de concentrations en Mg sont variables en Région wallonne, moyennes à élevées dans la partie centrale (entre 5 et 35 mg/L) et semblent diminuer vers le Nord. Les valeurs de Na sont variables en Région wallonne, faibles dans la partie centrale (< 25 mg/L) puis augmentent vers le nord (> 250 mg/L). Pour le K, à l'exception de l'ouest de la Région wallonne où les concentrations sont élevées, il y a une augmentation du sud-ouest vers le nord-est. Les valeurs de concentration en SO₄ sont assez variables mais il semble y avoir une légère diminution vers le nord-est. Les valeurs de concentrations en NO₃ sont majoritairement inférieures à 10mg/L sauf pour certaines stations en Région wallonne et 6 stations en Région flamande, dans la partie centrale de la zone. 6 points ont concentrations en NO₃ sont supérieures aux normes de potabilité. La concentration en NH₄ est variables en Région wallonne mais pour le reste de la zone les valeurs sont faibles au sud-ouest et augmentent vers le nord-est.

La concentration en Fe est faible en Région wallonne, faible à très élevé dans la partie centrale et moyenne vers le nord. La distribution du Mn est assez semblable à celle du Fe sauf en Région wallonne où les valeurs sont plus variables. La concentration en As est relativement faible sur l'ensemble de la zone à l'exception de quelques points au nord où la concentration semble un peu plus élevée. La concentration en F augmente du sud vers le nord sauf à l'ouest de la région wallonne où les concentrations sont également élevées. La concentration en Zn est généralement faible (< 20 µg/L) à l'exception de quelques sites épars dans les trois régions, comme par exemple, le site P48 en Région de Bruxelles-capitale qui a une concentration de 1441 µg/L. La concentration en Pb total est faible sur toute la zone sauf au site P48 en Région de Bruxelles-Capitale qui présente une concentration élevée (21.7 µg/L). La concentration en B augmente du sud (< 50 µg/L) vers le nord (>1000 µg/L) à l'exception de l'ouest de la Région wallonne où les concentrations sont moyennes (entre 50-200 µg/L). La concentration en Cu est très faible sur l'ensemble de la zone (< 10 µg/L) à

l'exception de l'ouest de la Région wallonne. La concentration en Ni est également très faible ($< 10 \mu\text{g/L}$) à l'exception d'un site en Région flamande ($> 20 \mu\text{g/L}$).

Pour de nombreux paramètres, on constate qu'il y a une grande différence entre le Sud et le Nord de l'aquifère de l'Yprésien, la Région de Bruxelles-Capitale se situe à proximité de la limite entre ces deux zones. La répartition spatiale des faciès, établis par le diagramme de Piper, avait déjà permis de mettre en évidence une différence dans la minéralisation entre le Nord et le Sud. Les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes du Sud, ont des concentrations plus élevées en Ca, Mg, un pH relativement neutre, une concentration plus faible en Na, K, Cl, B et F. Pour les eaux bicarbonatées sodiques et potassiques et les eaux chlorurées sodiques et potassiques du Nord, le pH est basique et c'est l'inverse pour les concentrations. Ces évolutions conjointes du Ca, Mg, Na, K sont typiques d'un phénomène de chromatographie ionique associés aux échanges cationiques qui se produisent lors du retrait des eaux marines d'un aquifère (Appelo et Potsma 2005). Au Sud, on observe donc vraisemblablement des eaux de recharge assez récentes et au Nord des eaux marines plus anciennes.

Les sites de la Région wallonne ne se retrouvent pas vraiment dans le schéma décrits ci-dessus et en particulier ceux de l'ouest de la Région wallonne. Cela est peut-être du au fait qu'ils sont éloignés des autres sites de prélèvement et qu'ils ne se situent peut-être pas exactement dans les mêmes formations. Les sites de la Régions wallonnes seront décrits pour la suite de l'analyse hydrochimique mais ils ne seront probablement pas sélectionnés pour le calcul des concentrations de référence.

En plus de ce processus de rafraîchissement, les réactions d'oxydoréduction influencent également la minéralisation des eaux souterraines. Les concentrations en O_2 dissous sont généralement assez faibles sauf en Région de Bruxelles-Capitale et à l'ouest de la Région Wallonne. Comme cela a déjà été discuté dans le précédent chapitre, il semble que les mesures en oxygène dissous soit assez peu fiables en Région de Bruxelles-Capitale (purge insuffisamment longue ? Non-contrôle des échanges avec l'atmosphère ? Calibration de la sonde ?). La concentration en NO_3 est faible à moyenne en Région wallonne, dans la partie centrale les valeurs peuvent être faibles ou très élevées et les valeurs sont faibles au nord. Dans la partie centrale, les concentrations en Fe et en Mn sont très élevées pour les sites où il n'y a pas de nitrates. La concentration en NH_4 est plus élevée vers le nord-ouest, ce qui indique des conditions réductrices. Dans la partie sud et centrale de la zone il semble que les conditions soient oxydantes à suboxiques, la région bruxelloise semble être en zone suboxique. La distinction entre ces deux zones n'est pas claire, des variations assez locales semblent exister. Dans le nord de la zone les conditions sont réductrices.

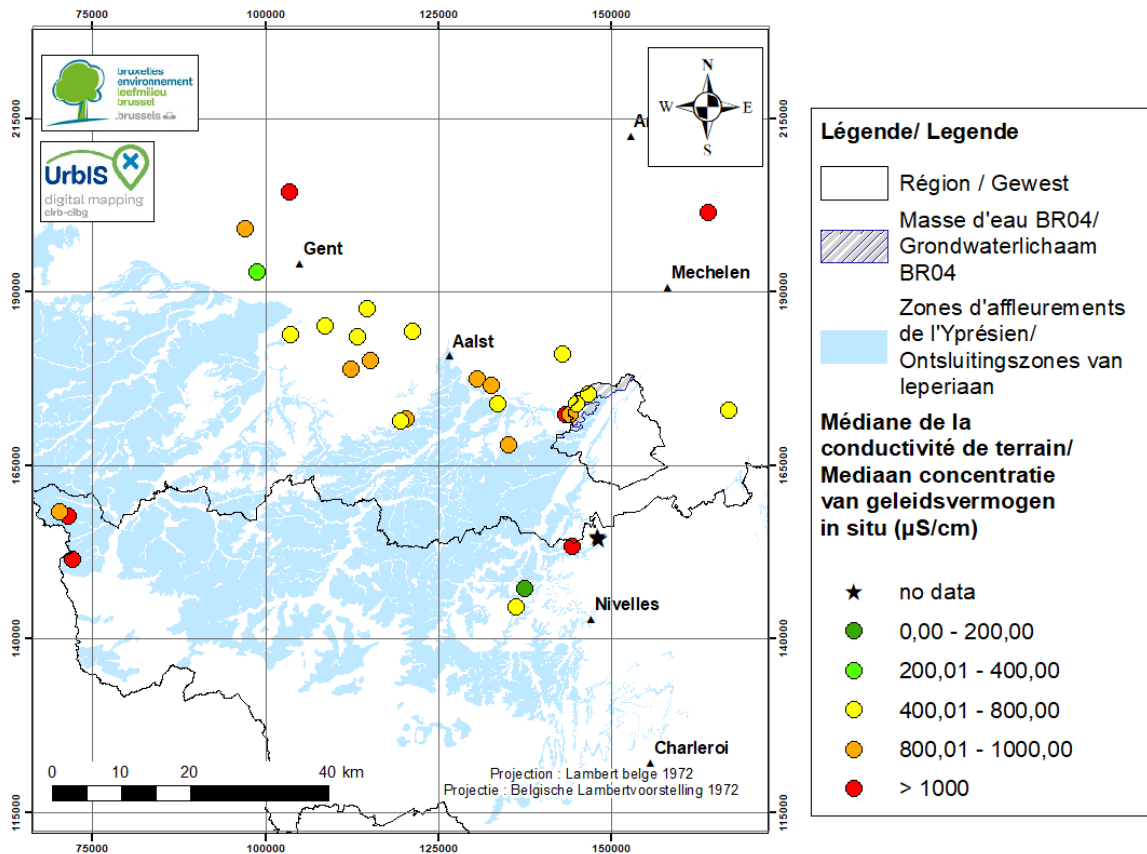


Figure 5-18 : Répartition spatiale de la conductivité de terrain ($\mu\text{S}/\text{cm}$) dans l'aquifère de l'Yprésien

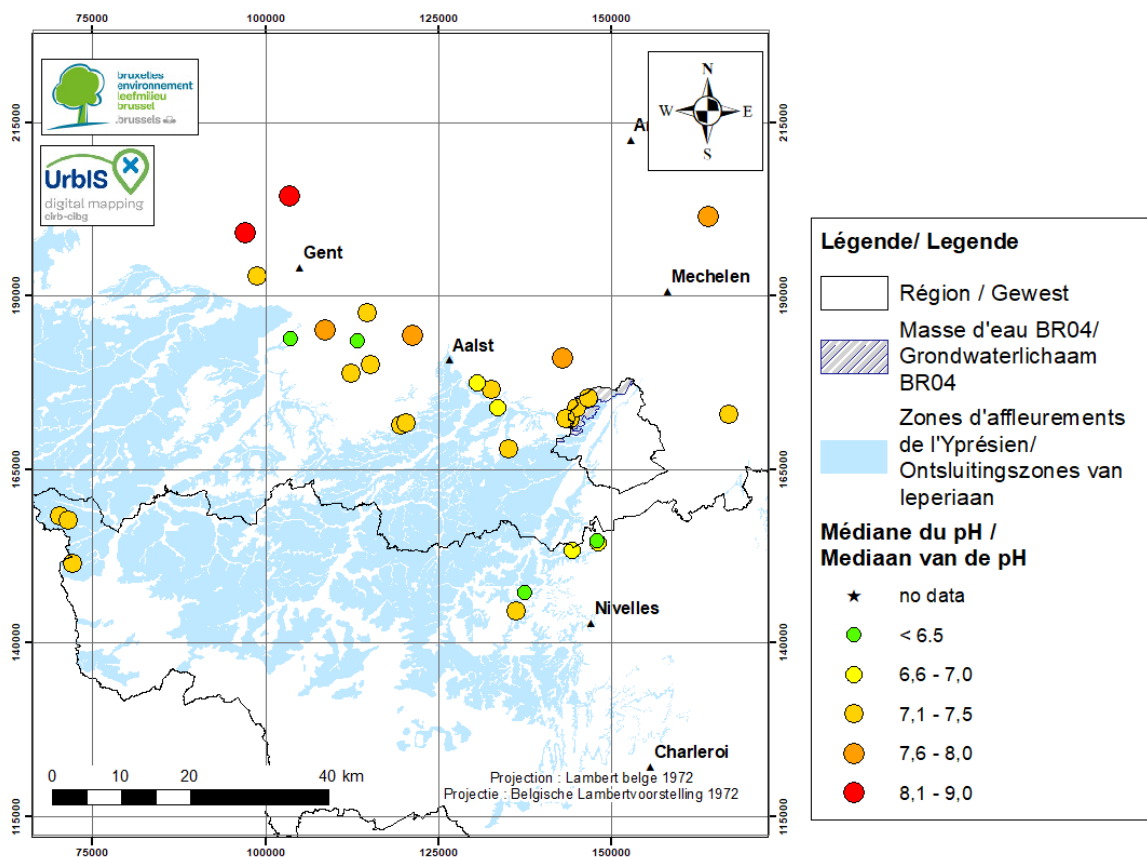


Figure 5-19 : Répartition spatiale du pH dans l'aquifère de l'Yprésien

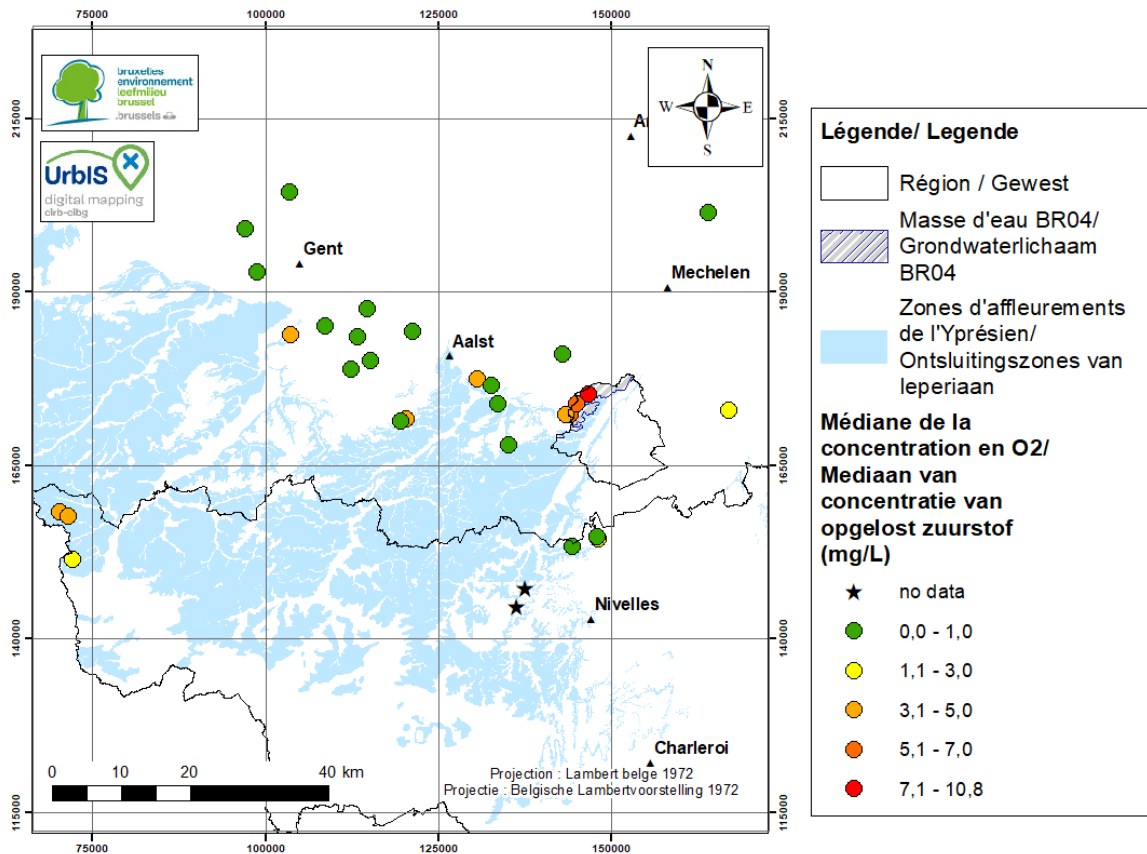


Figure 5-20 : Répartition spatiale de la concentration en O2 dissous dans l'aquifère de l'Yprésien

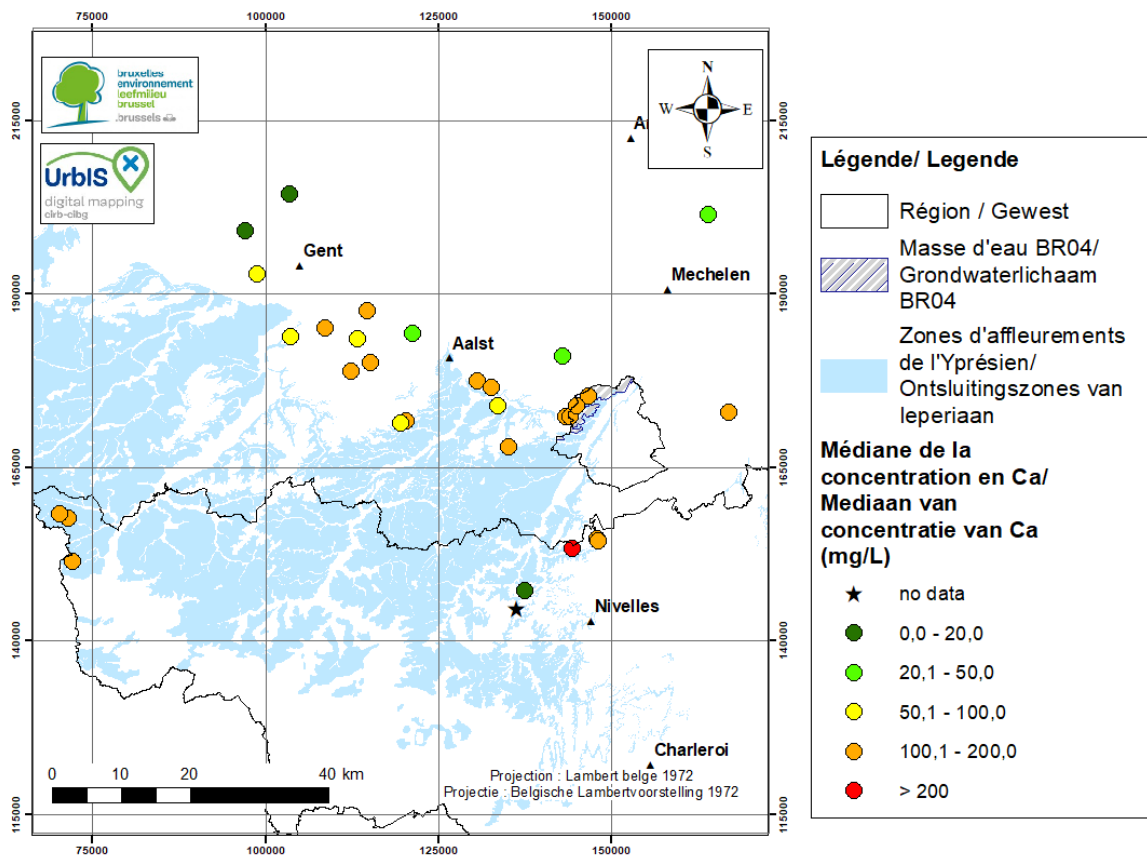


Figure 5-21 : Répartition spatiale de la concentration en Ca dans l'aquifère de l'Yprésien

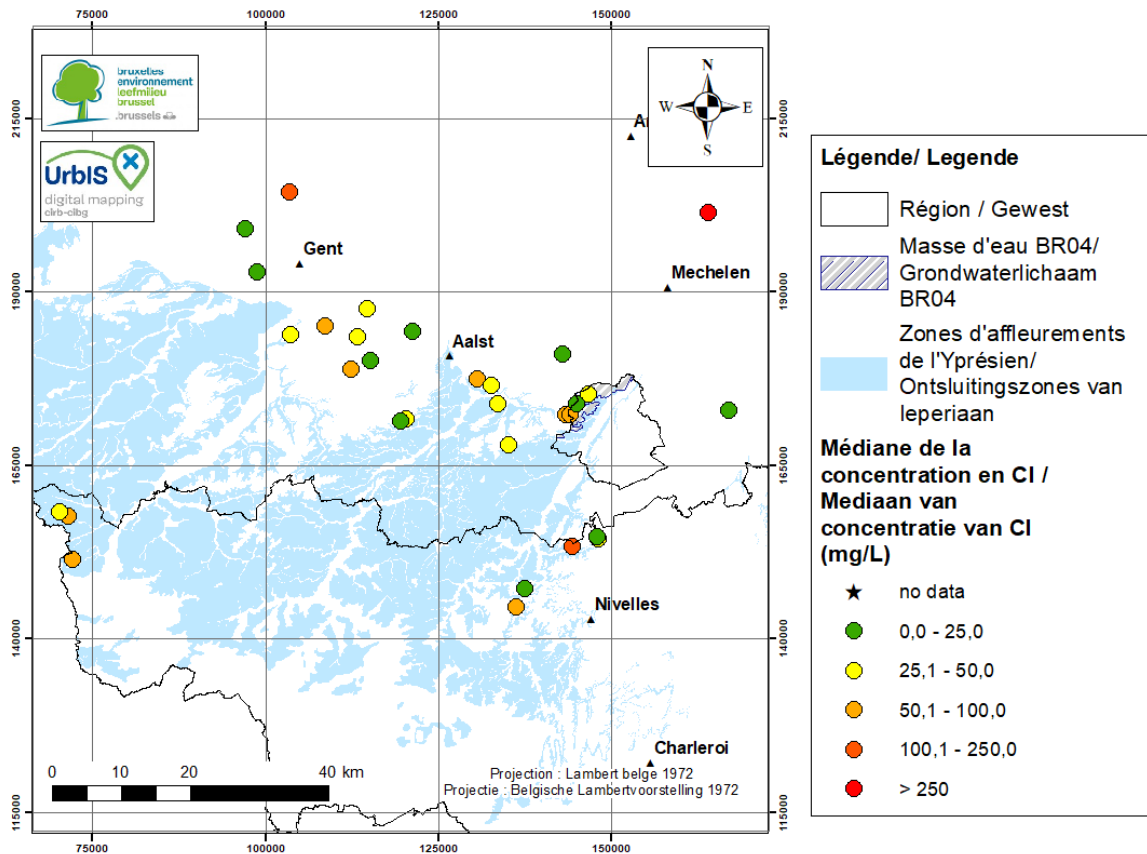


Figure 5-22 : Répartition spatiale de la concentration en Cl dans l'aquifère de l'Yprésien

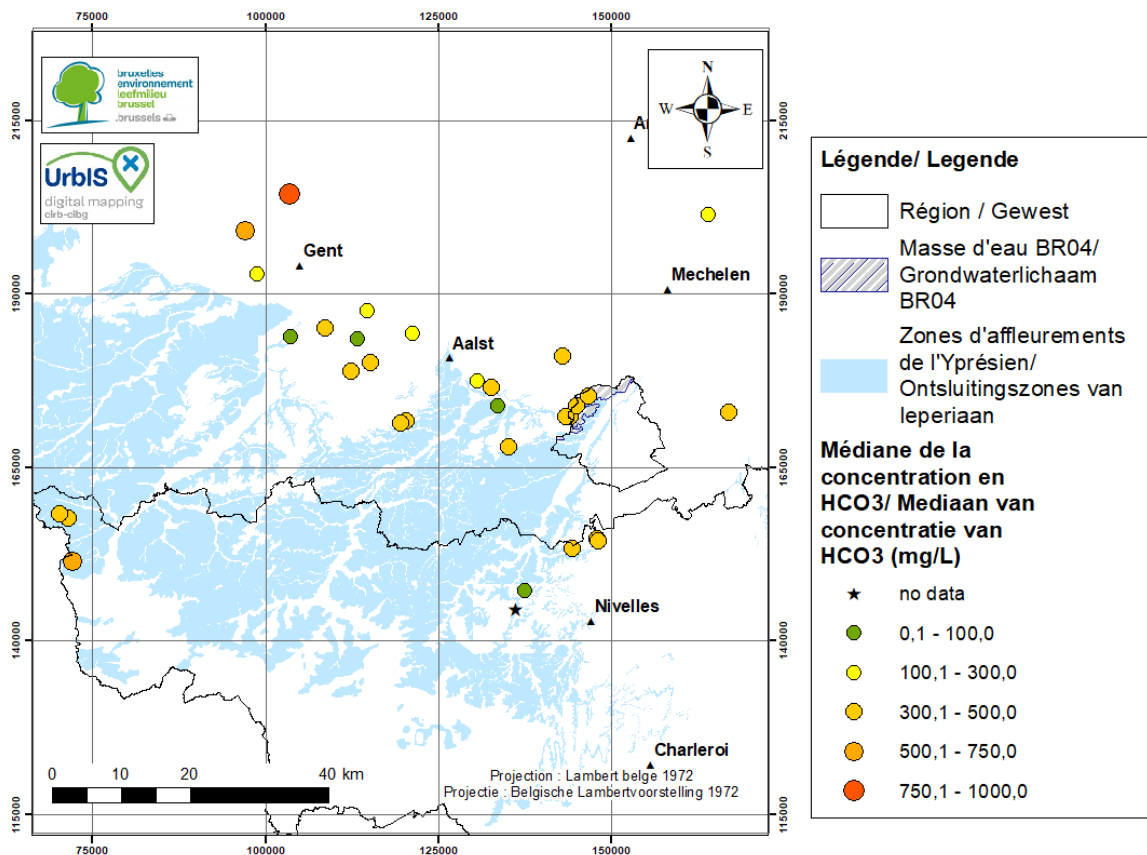


Figure 5-23 : Répartition spatiale de la concentration en HCO3 dans l'aquifère de l'Yprésien

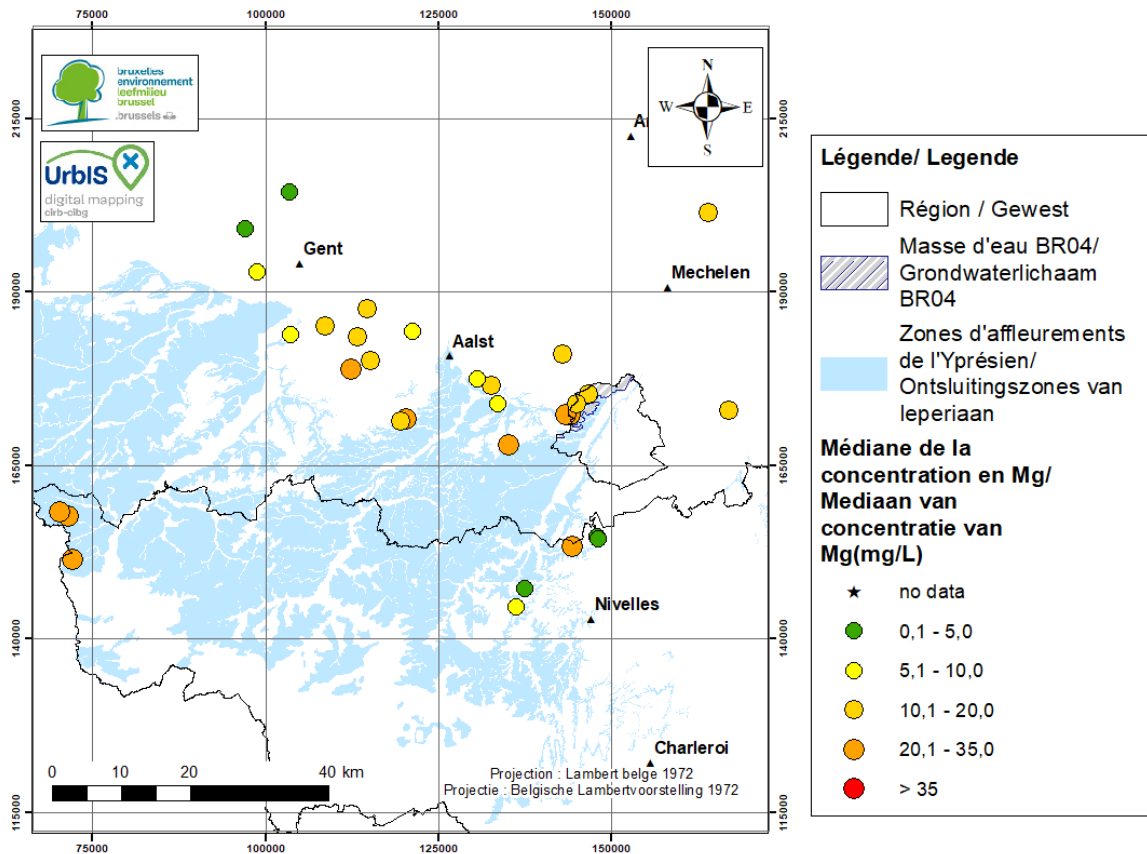


Figure 5-24 : Répartition spatiale de la concentration en Mg dans l'aquifère de l'Yprésien

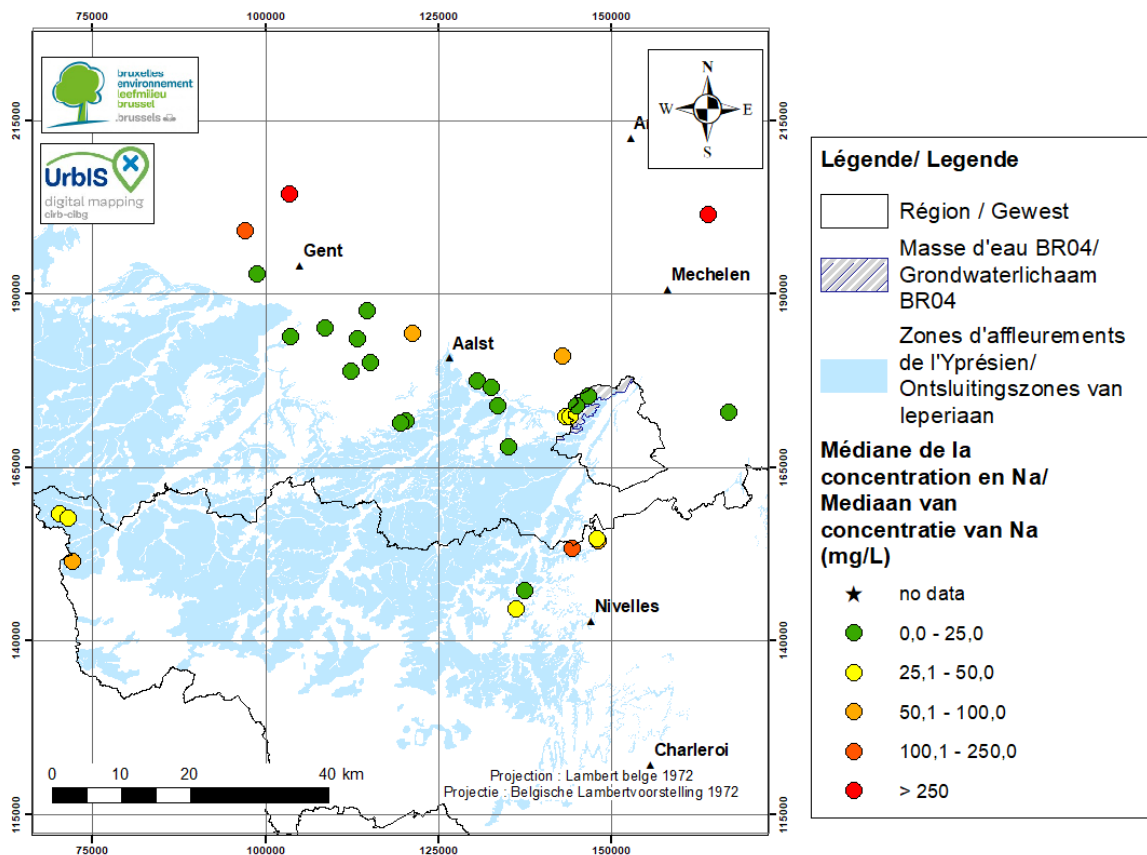


Figure 5-25 : Répartition spatiale de la concentration en Na dans l'aquifère de l'Yprésien

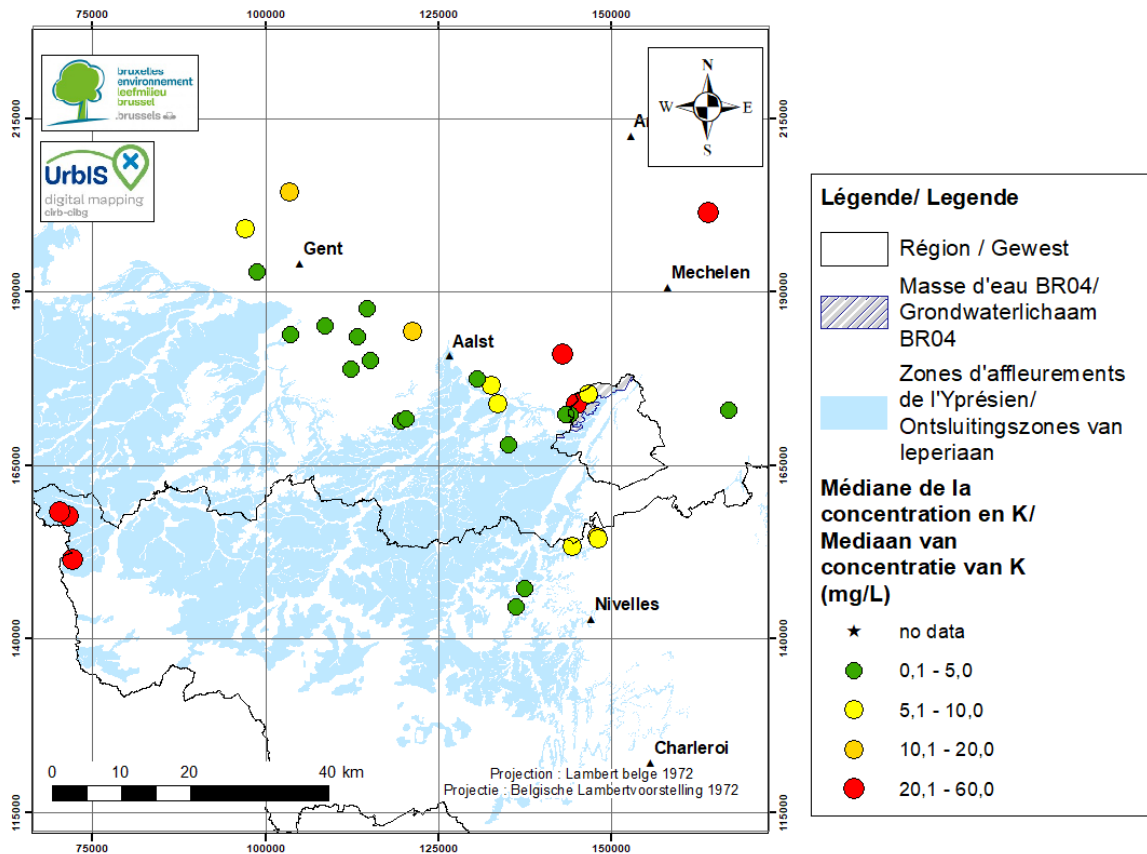


Figure 5-26 ; Répartition spatiale de la concentration en K dans l'aquifère de l'Yprésien

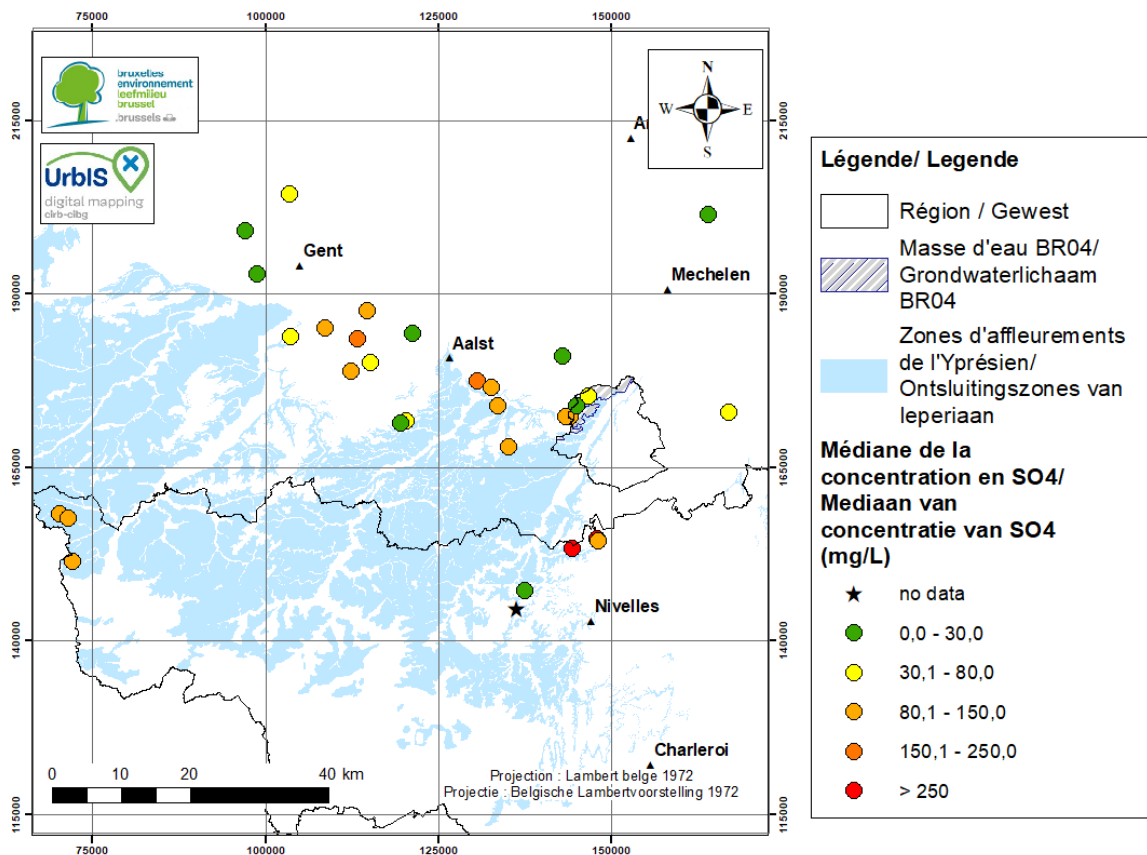


Figure 5-27 : Répartition spatiale de la concentration en SO4 dans l'aquifère de l'Yprésien

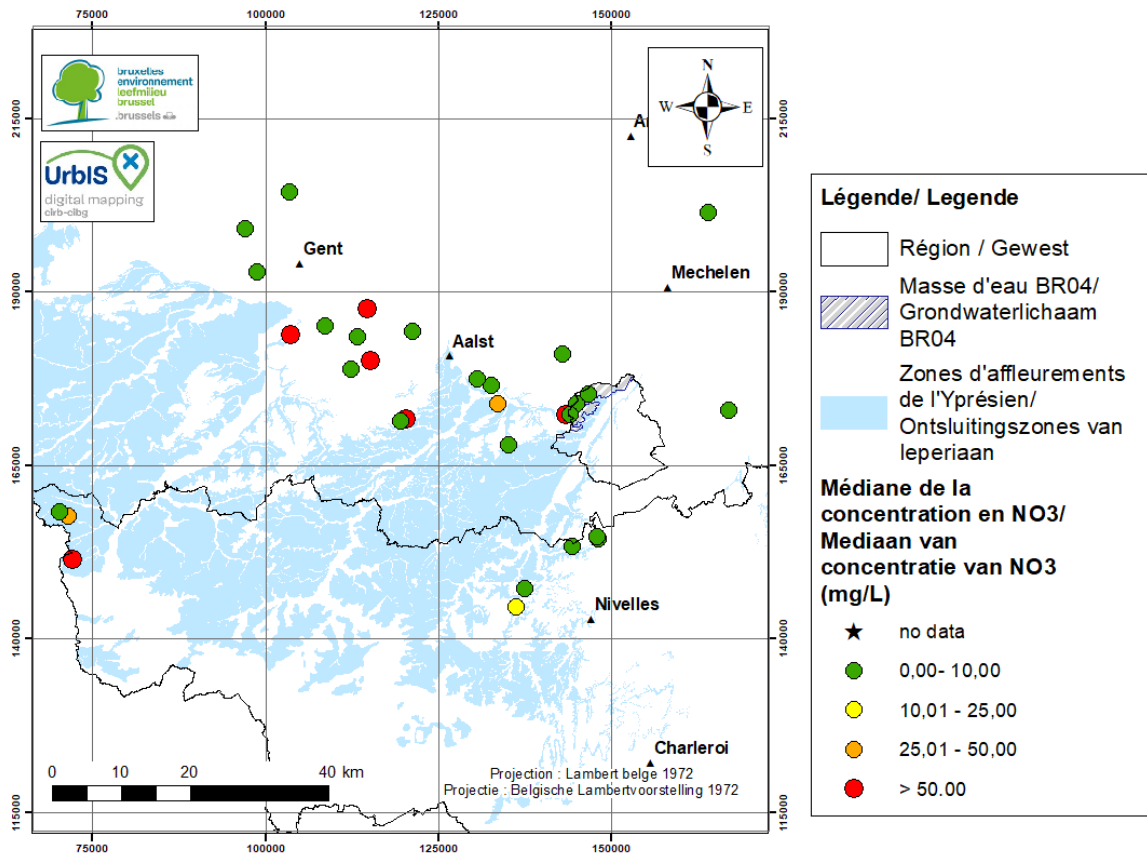


Figure 5-28 : Répartition spatiale de la concentration en NO3 dans l'aquifère de l'Yprésien

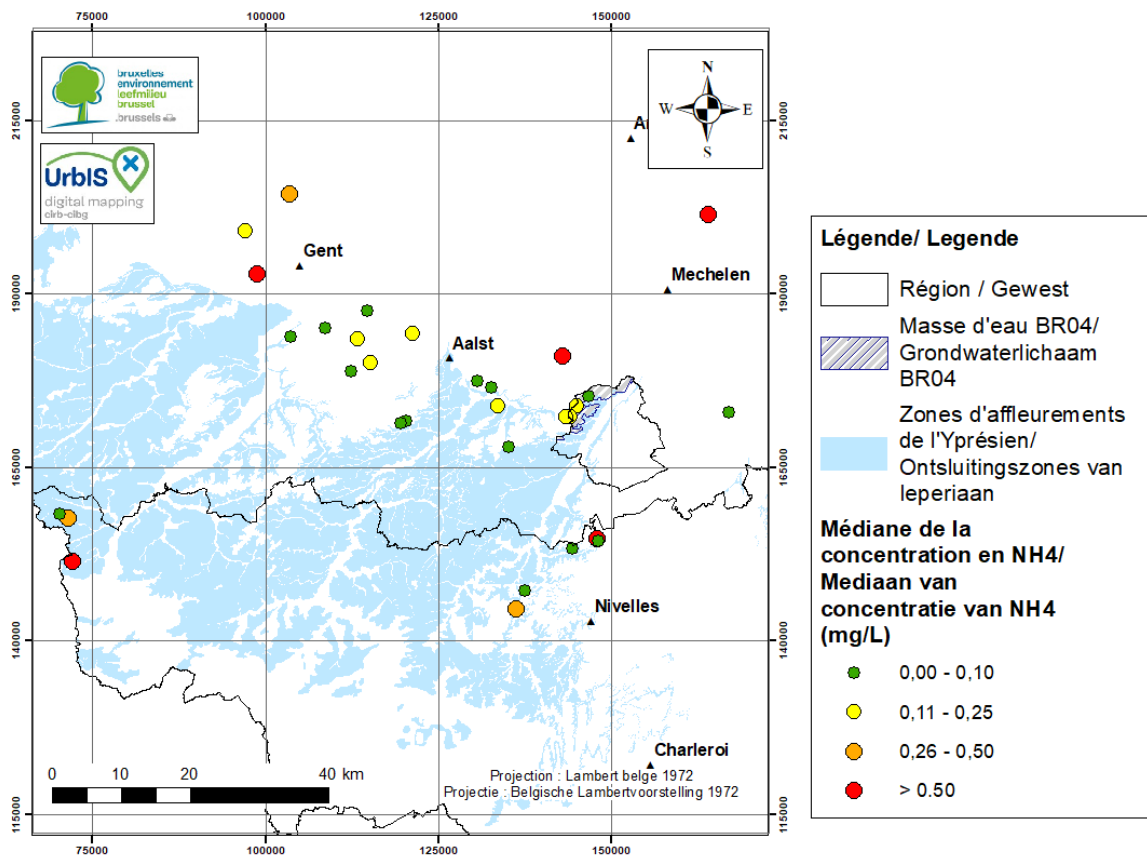


Figure 5-29 : Répartition spatiale de la concentration en NH4 dans l'aquifère de l'Yprésien

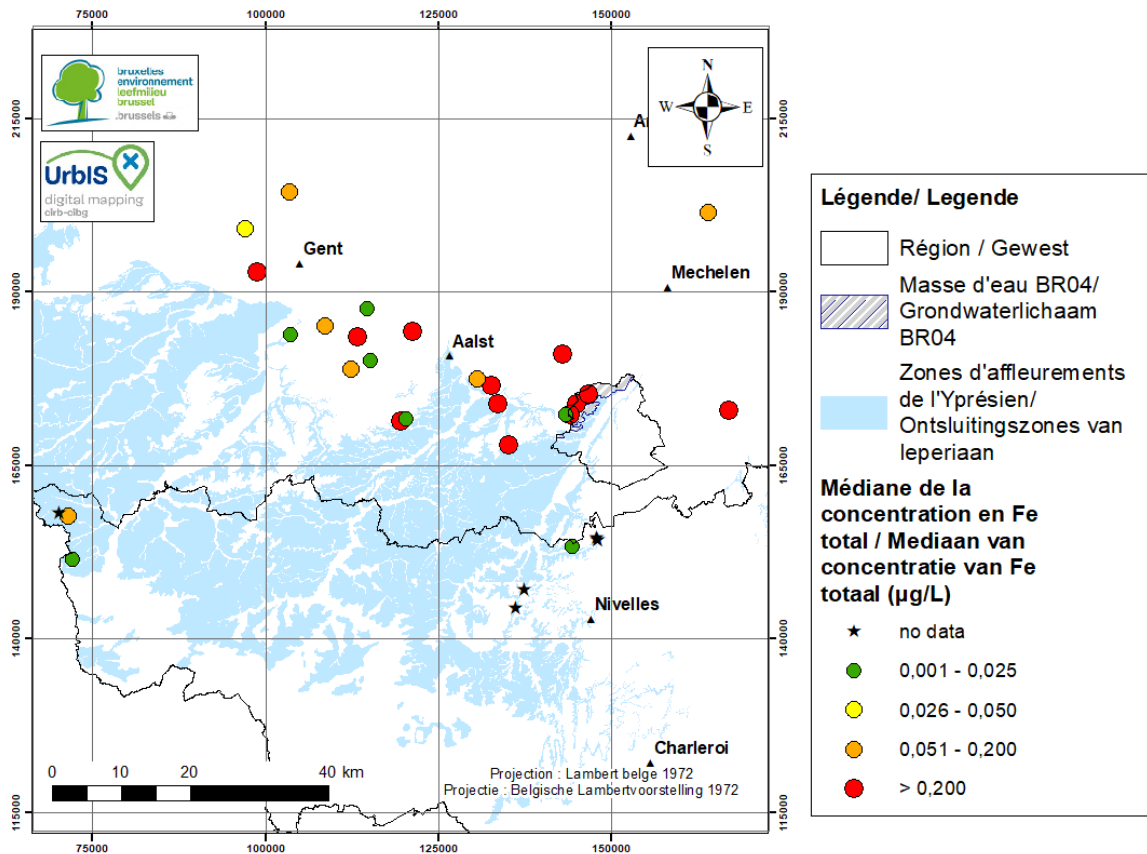


Figure 5-30 : Répartition spatiale de la concentration en Fe dans l'aquifère de l'Yprésien

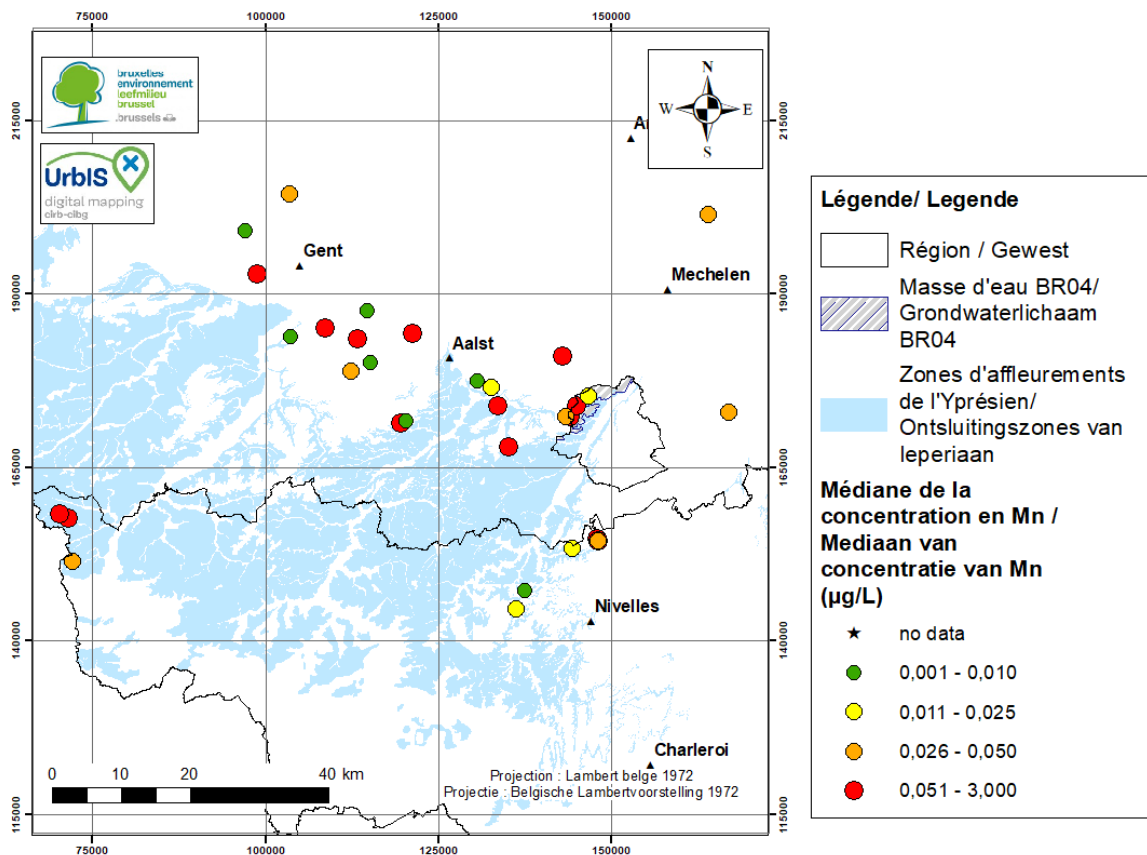


Figure 5-31 : Répartition spatiale de la concentration en Mn dans l'aquifère de l'Yprésien

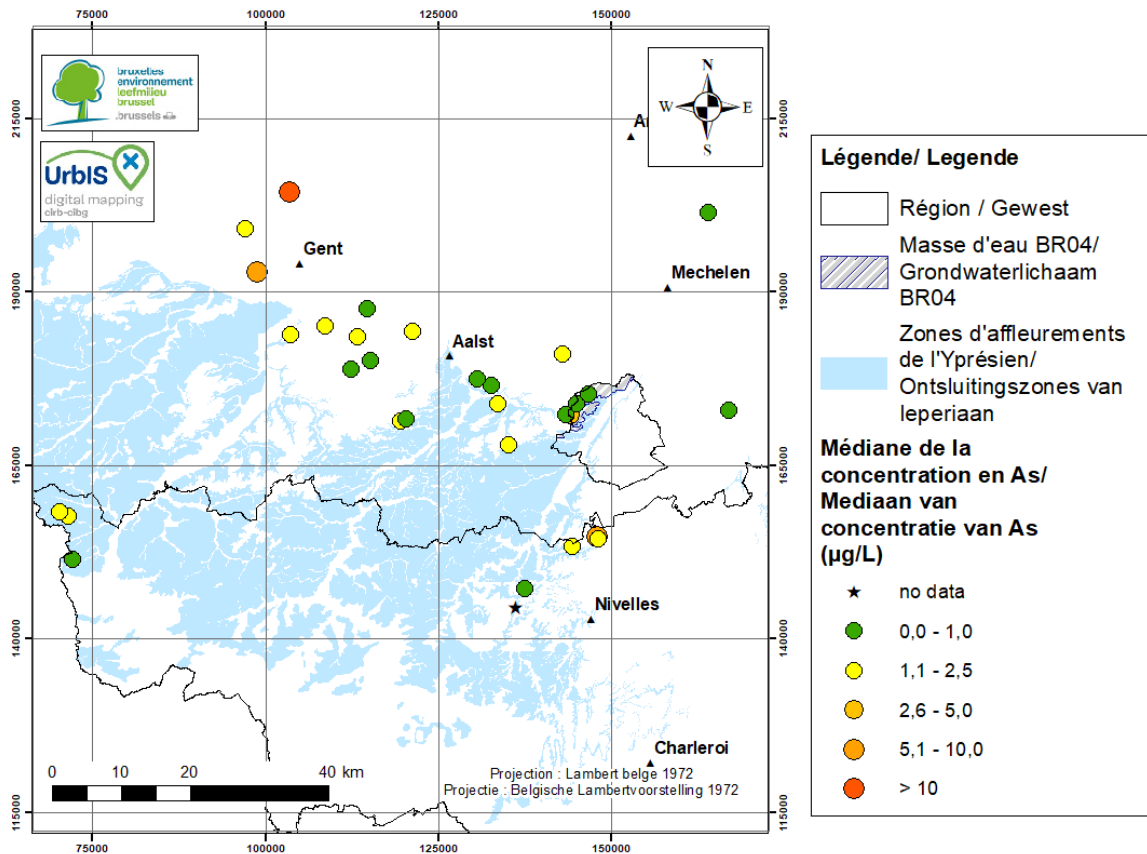


Figure 5-32 : Répartition spatiale de la concentration en As dans l'aquifère de l'Yprésien

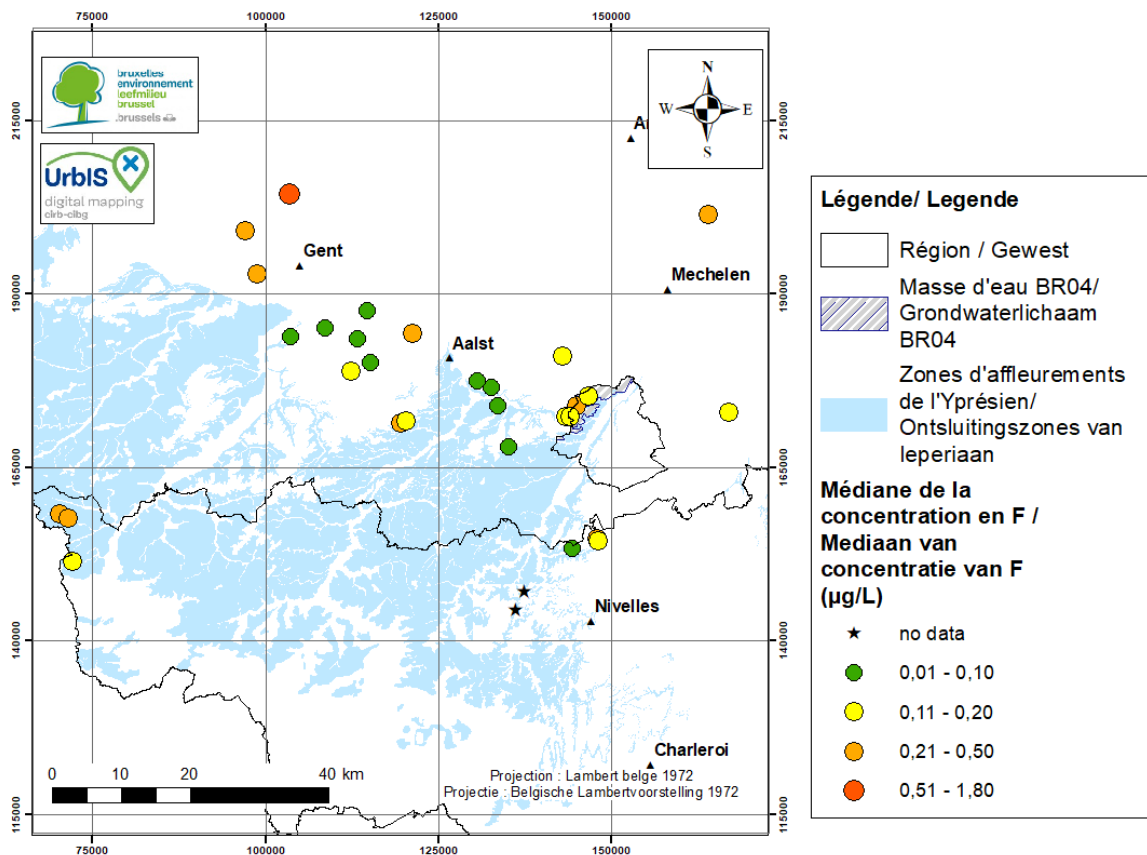


Figure 5-33 : Répartition spatiale de la concentration en F dans l'aquifère de l'Yprésien

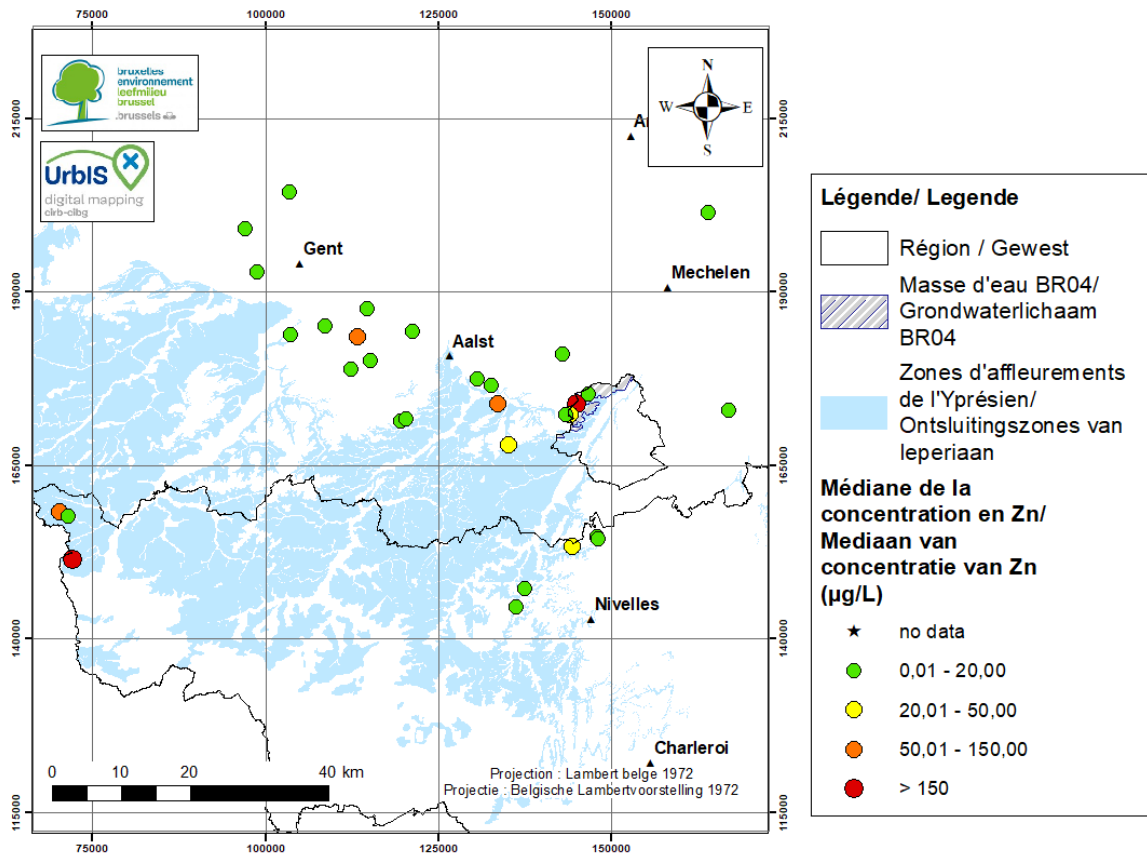


Figure 5-34 : Répartition spatiale de la concentration en Zn dans l'aquifère de l'Yprésien

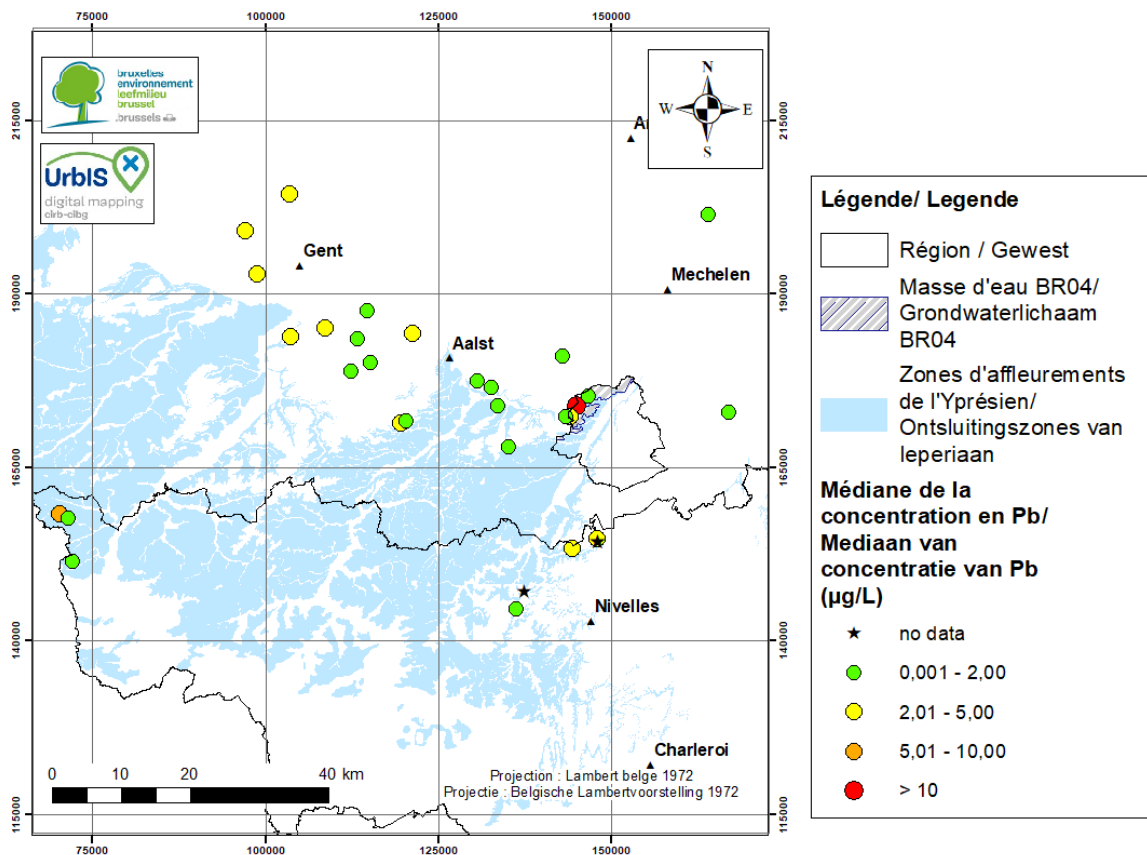


Figure 5-35 : Répartition spatiale de la concentration en Pb dans l'aquifère de l'Yprésien

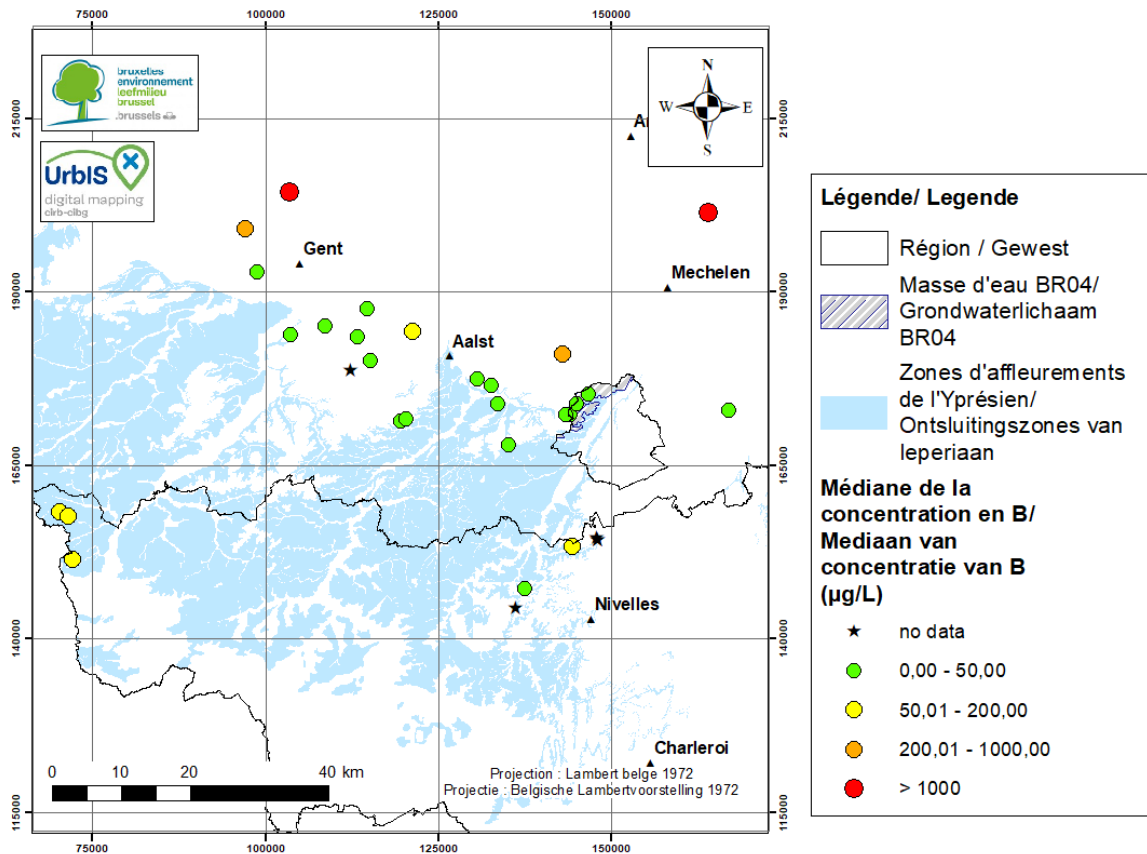


Figure 5-36 : Répartition spatiale de la concentration en B dans l'aquifère de l'Yprésien

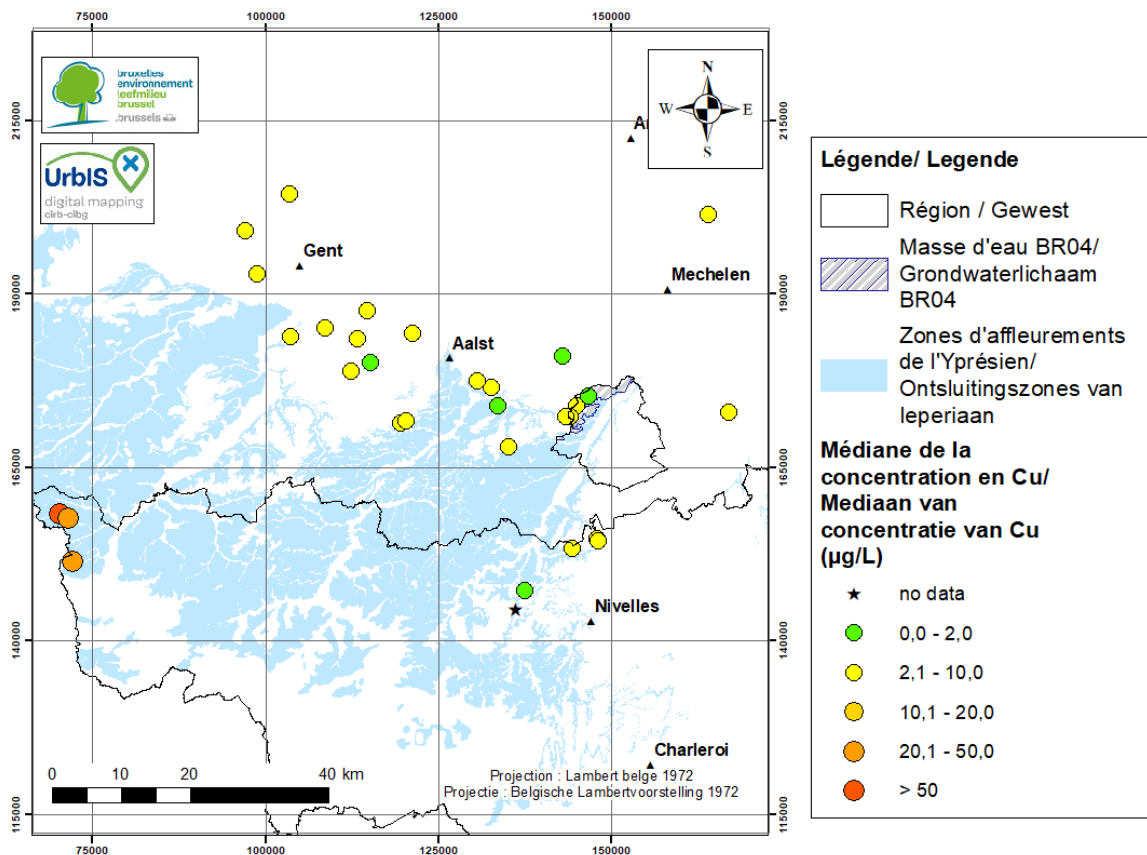


Figure 5-37 : Répartition spatiale de la concentration en Cu dans l'aquifère de l'Yprésien

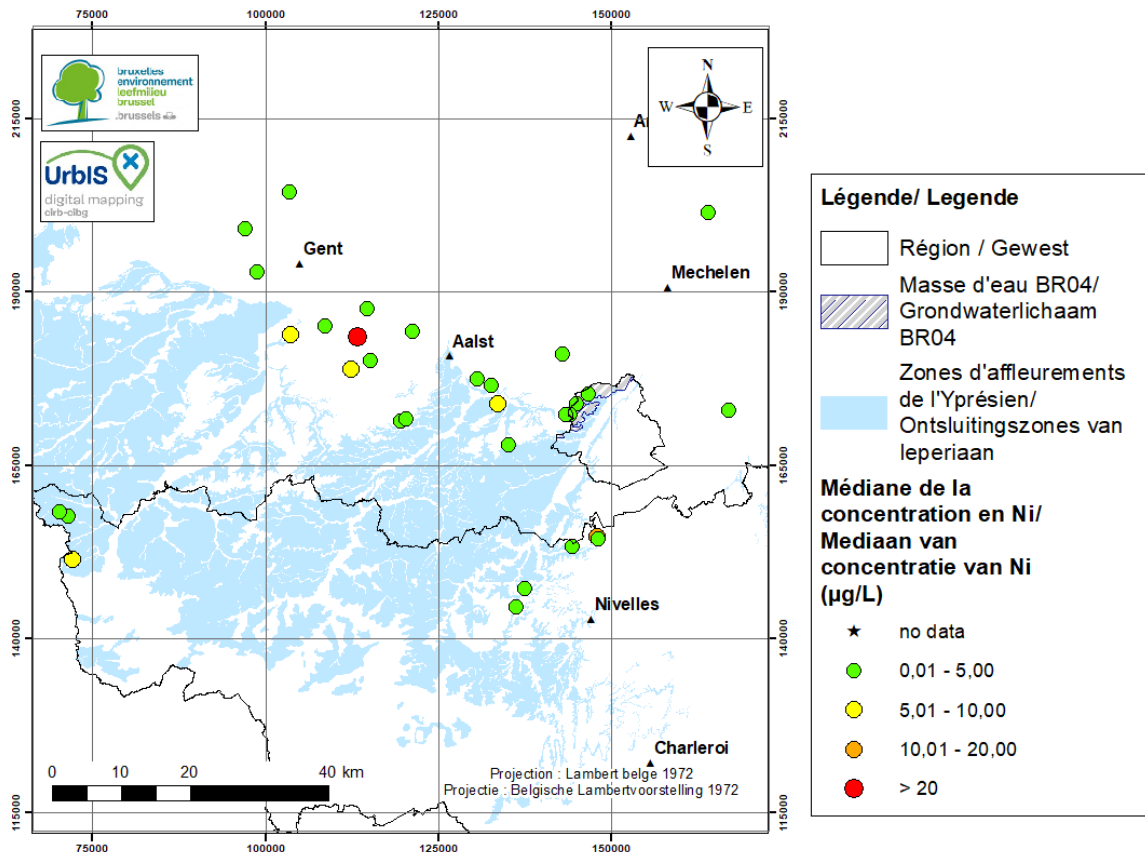


Figure 5-38 : Répartition spatiale de la concentration en Ni dans l'aquifère de l'Yprésien

5.2.3. Analyse des variations temporelles des concentrations en éléments chimiques

Les évolutions temporelles des principaux paramètres physico-chimiques étudiés et des concentrations de certains éléments majeurs et mineurs sont représentées aux Figures 5-39 à 5-49 pour la masse d'eau souterraine BR04 en Région de Bruxelles-Capitale. Les paramètres représentés sont la conductivité, le pH et les concentrations en O₂dissous, Ca, HCO₃, SO₄, Cl, Na, NO₃, Fe, Zn.

Pour utiliser les médianes pour le calcul des concentrations de références, il est préférable que les concentrations soient relativement stables. Pour la masse d'eau BR04 en Région de Bruxelles-Capitale, il y a seulement trois stations dont deux pour lesquelles il y a uniquement une mesure. Pour ces points il n'est donc pas possible d'analyser les variations temporelles des concentrations. Pour le puits P34, il y a eu 6 échantillonnages et paramètres physico-chimiques et les concentrations semblent stables au cours du temps.

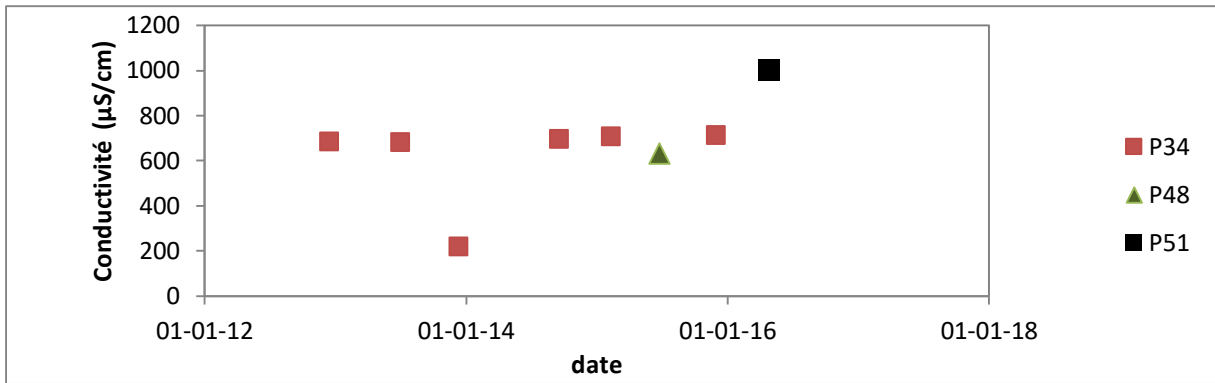


Figure 5-39 : Evolution de la conductivité de terrain dans la masse d'eau BR04

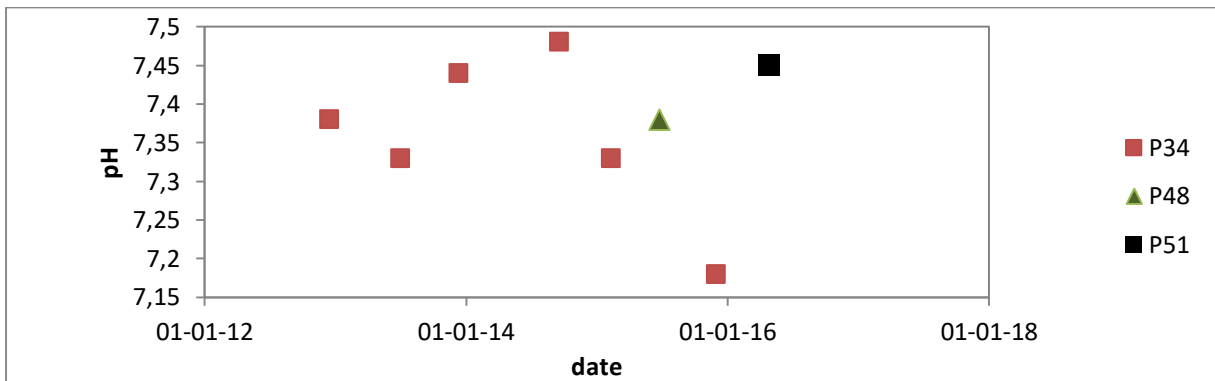


Figure 5-40 : Evolution du pH dans la masse d'eau BR04

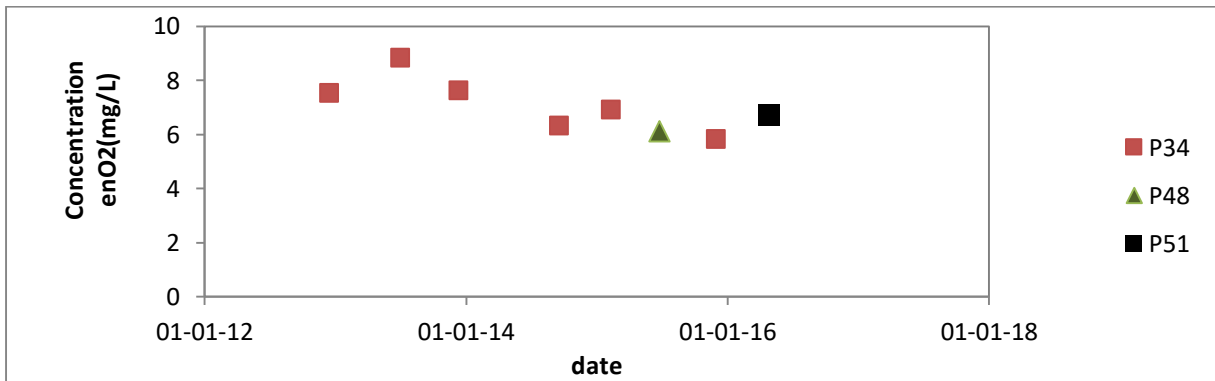


Figure 5-41 : Evolution de la concentration en O2 dans la masse d'eau BR04

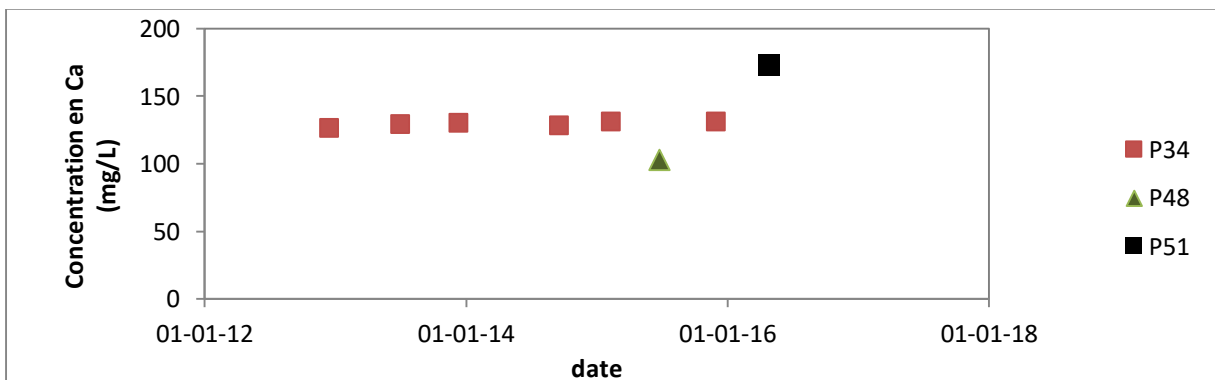


Figure 5-42 : Evolution de la concentration en Ca dans la masse d'eau BR04

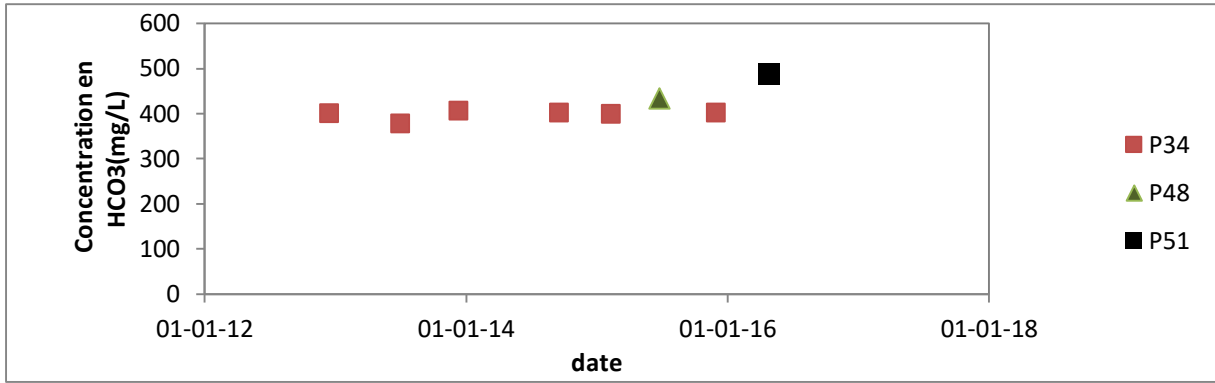


Figure 5-43 : Evolution de la concentration en HCO3 dans la masse d'eau BR04

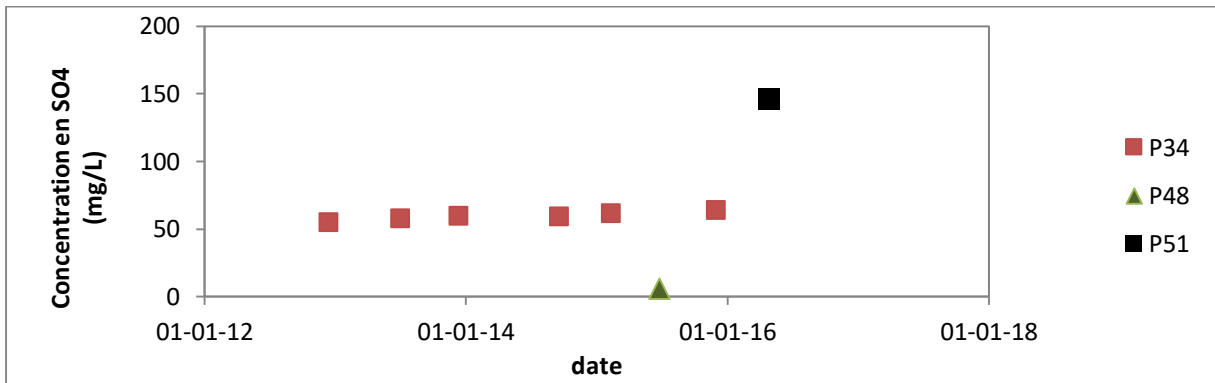


Figure 5-44 : Evolution de la concentration en SO4 dans la masse d'eau BR04

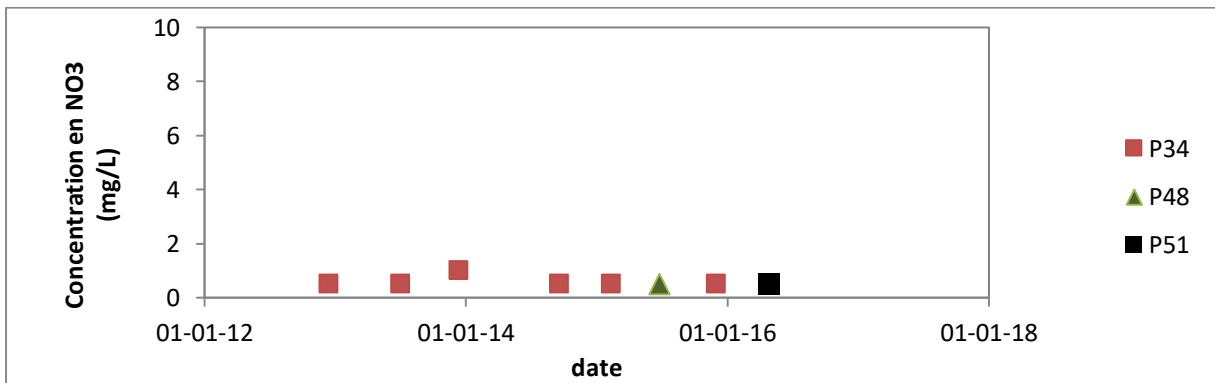


Figure 5-45 : Evolution de la concentration en NO3 dans la masse d'eau BR04

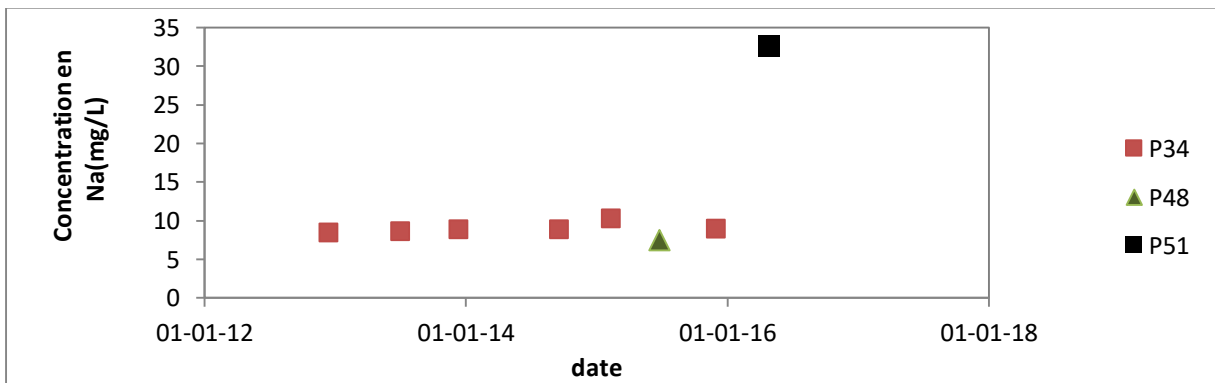


Figure 5-46 : Evolution de la concentration en Na dans la masse d'eau BR04

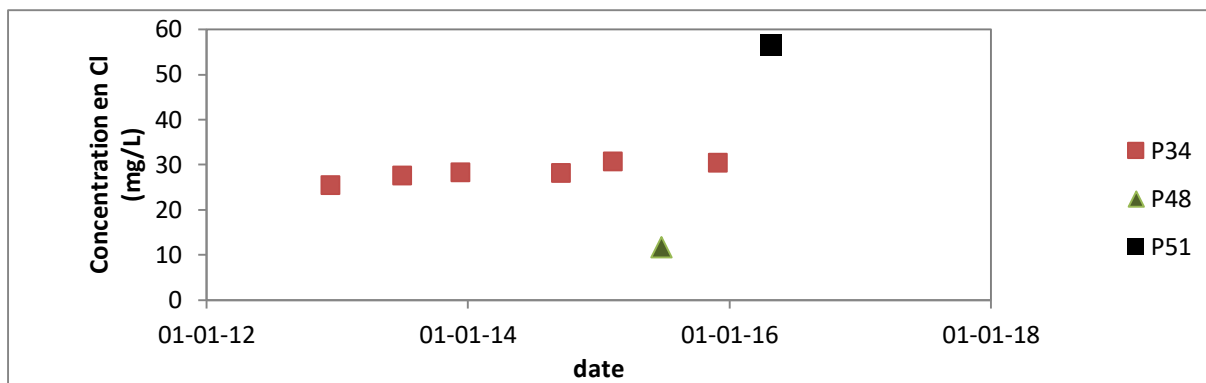


Figure 5-47 : Evolution de la concentration en Cl dans la masse d'eau BR04

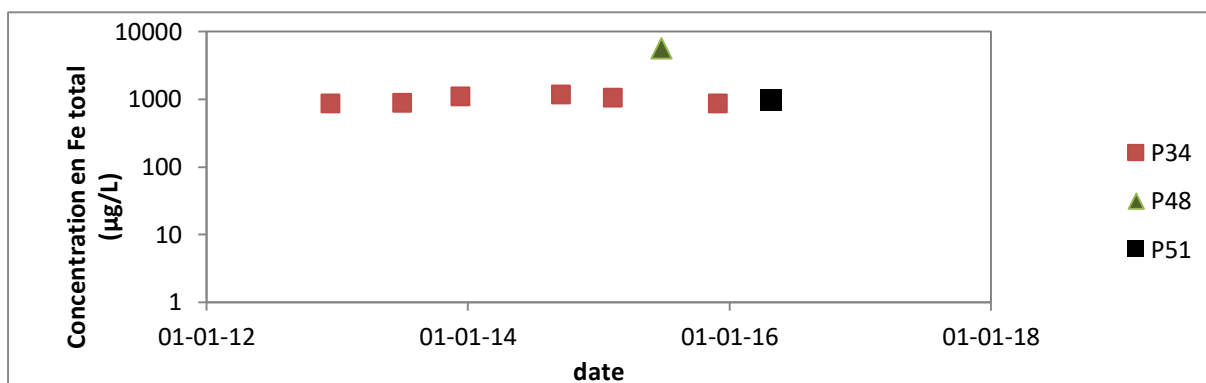


Figure 5-48 : Evolution de la concentration en Fe dans la masse d'eau BR04

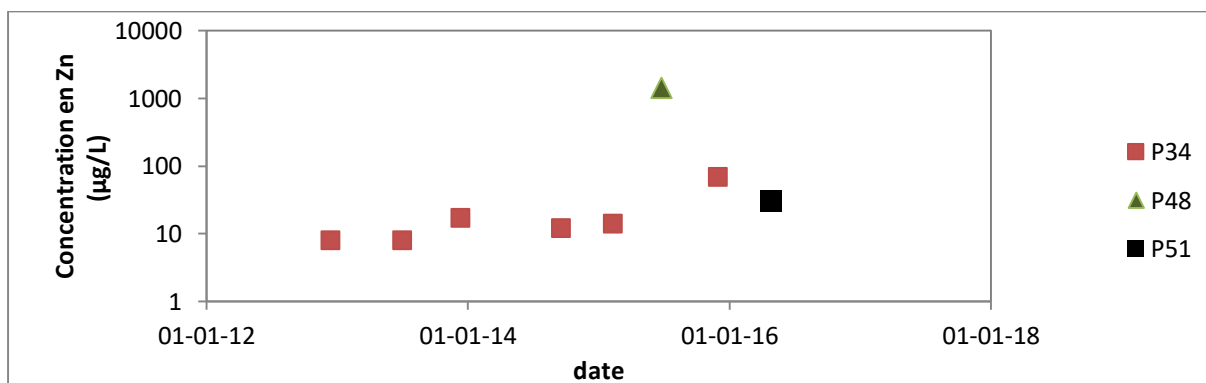


Figure 5-49 : Evolution de la concentration en Zn dans la masse d'eau BR04

5.2.4. Origine de la salinité des eaux souterraines

Dans le diagramme Na Vs Cl, (Figure 5-50), certains points présentent des rapports Na/Cl supérieurs à 0.86. Ceci traduit vraisemblablement l'enrichissement de l'eau en sodium associé aux échanges cationiques Na-Ca, lors du phénomène de rafraichissement. Les cations de Na fixés sur les sites d'adsorption des matériaux géologiques constitutifs du sous-sol sont libérés dans l'eau au détriment des ions Ca qui les y remplacent. La distribution spatiale du rapport Na/Cl est également représentée à la Figure 5-51. Pour les sites en vert et en orange sur la carte, l'origine du chlore peut provenir d'une ancienne eau marine et/ou d'une dissolution de la halite.

Il y a également un certain nombre de point avec un rapport Na/Cl inférieur à celui de l'eau de mer (0.86). Ceci indique que pour ces points, l'origine du Cl ne provient pas d'une ancienne eau marine ou

de dissolution de la halite et est peut-être anthropique (pollution). Ces points (en jaune sur la carte) sont principalement situés en Région flamande. Le site P34 situé en Région de Bruxelles-Capitale présente également un rapport Na/Cl inférieur à 0.86. Pourtant ce site a une concentration en Cl assez faible (28.15 mg/L) et il n'y a pas de polluants qui y sont détectés.

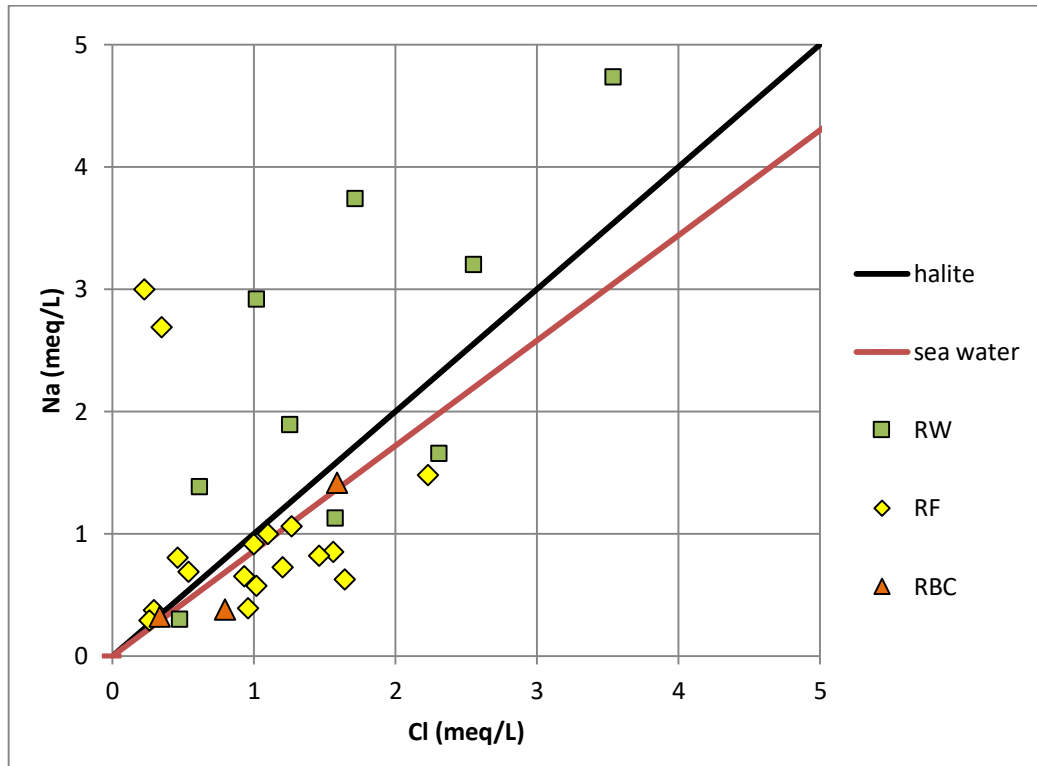


Figure 5-50 : Concentration en Na (meq/L) par rapport à la concentration en Cl (meq/L)

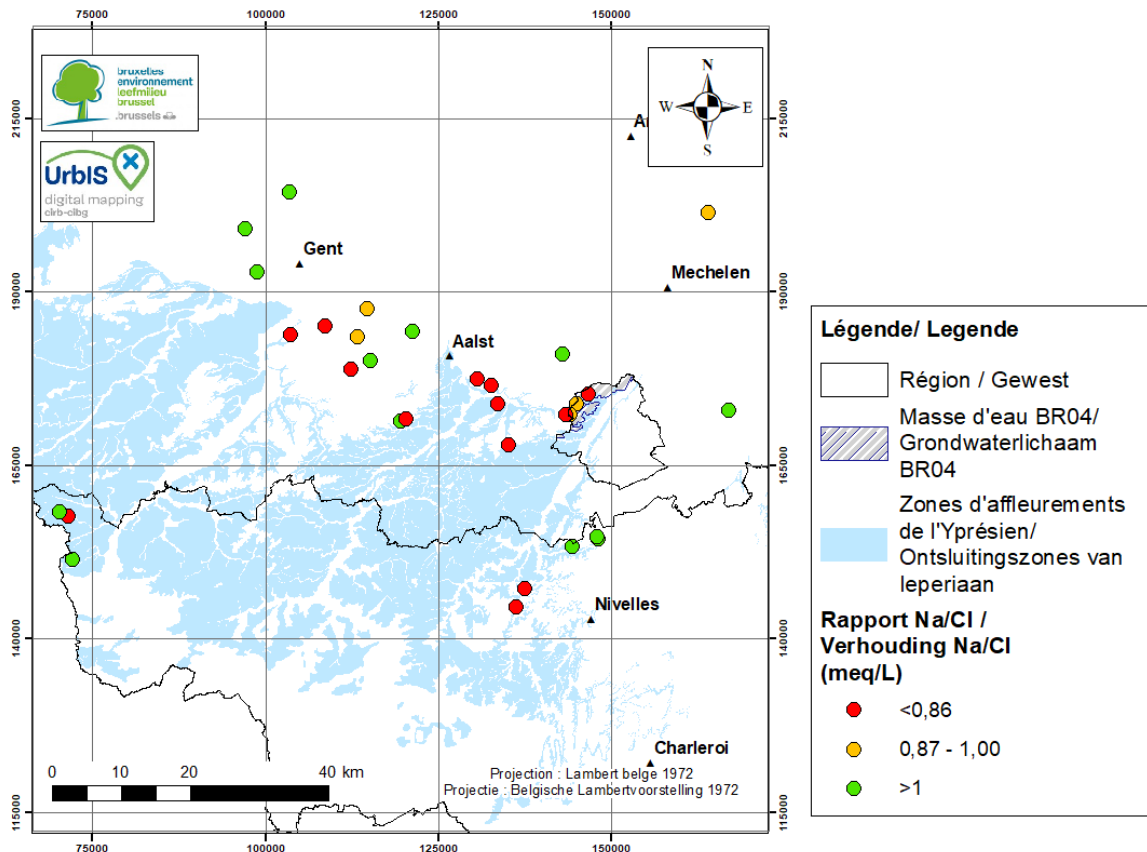


Figure 5-51 : Répartition spatiale du rapport Na/Cl (concentration en meq/L) de l'aquifère de l'Yprésien

Les indices de saturation de la calcite, du gypse et de la halite (Figures 5-52, 5-53, 5-54) ont été calculés via le module PHREEQC (Parkurst and Appelo 1999) implémenté dans le programme « DIAGRAMMES » (Simler, 2013) de l'Université d'Avignon. Les résultats montrent que les eaux souterraines de l'Yprésien sont sous-saturées par rapport au gypse et à la halite. Il semble donc que ces deux minéraux ne contrôlent pas ici la salinité des eaux souterraines. Le chlore ne semble donc pas provenir de dissolution d'évaporites. A contrario, les indices de saturation de la calcite avoisinent 0, certains points étant même légèrement sursaturés. La calcite est donc réactive au sein du milieu aquifère et elle influence la minéralisation de l'eau en y contrôlant la concentration en calcium.

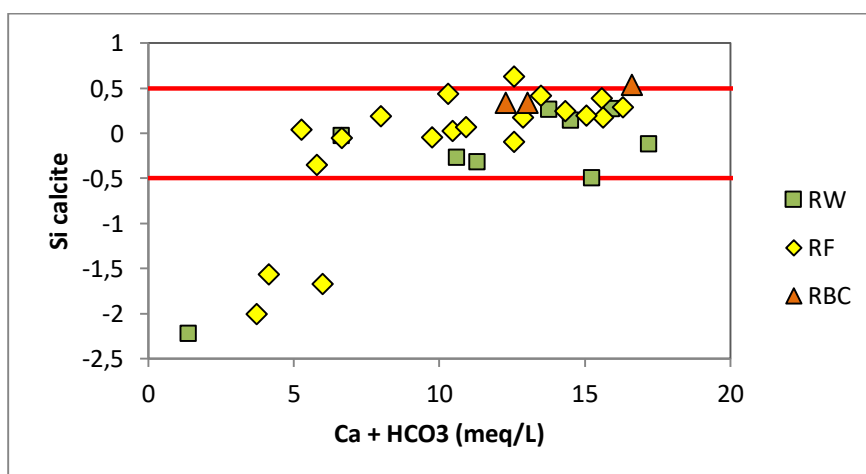


Figure 5-52 : Indice de saturation (SI) de la calcite en fonction des éléments chimiques susceptibles d'être contrôlés par ces minéraux

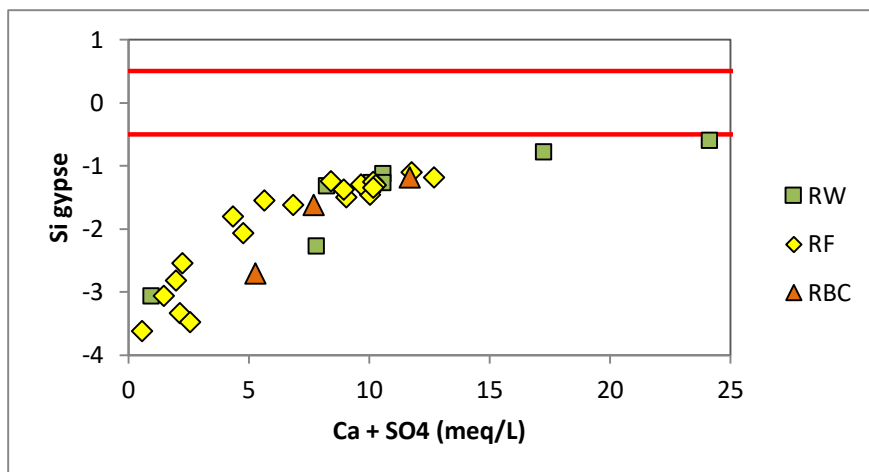


Figure 5-53 : Indice de saturation (SI) du gypse en fonction des éléments chimiques susceptibles d'être contrôlés par ces minéraux

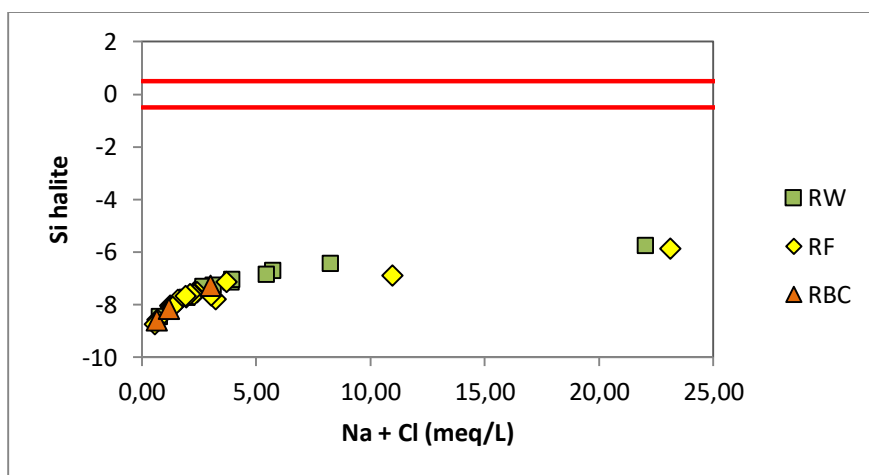


Figure 5-54 : Indice de saturation (SI) de la halite en fonction des éléments chimiques susceptibles d'être contrôlés par ces minéraux

5.2.5. Statistiques descriptives

5.2.5.1. Principaux paramètres

Les principaux paramètres de statistique descriptive sont repris dans le Tableau 5-5. Ils ont été calculés pour les stations d'échantillonnage sélectionnées de la masse d'eau souterraine BR04 et celles qui ont été sélectionnées en Région wallonne et en Région flamande (chapitre 5.1). Les paramètres statistiques repris sont : le minimum, le maximum, la moyenne, la médiane, le percentile 25 (P25), le percentile 75 (P75), le percentile 90 (P90). Ils ont été calculés sur base de la médiane des valeurs disponibles pour les paramètres de terrain (conductivité électrique, pH, O₂ dissous) et des concentrations en éléments majeurs et mineurs de chaque station d'échantillonnage. Le nombre de stations d'échantillonnage où chaque paramètre est mesuré est également mentionné.

Paramètre	Nb. stations	Min	P25	Moyenne	Médiane	P75	P90	Max
Al (mg)	29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
As total (µg/l)	32	0.0	1.0	2.4	1.4	2.5	4.2	16.2
B total (µg/l)	28	8.0	24.8	295.1	40.5	96.8	952.0	2398.3
Br (mg)	2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Ca (mg)	32	4.3	59.5	110.8	128.3	153.9	172.6	225.0
Cd total (µg/l)	32	0.0	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.6
Cl (mg)	33	7.9	19.7	117.7	39.0	58.2	106.4	2377.5
Cu total (µg/l)	32	0.0	2.5	8.0	2.5	3.3	8.6	116.5
EC terrain (µs/cm)	30	144.0	590.6	1016.8	815.0	997.0	1289.9	6691.5
F (mg)	32	0.0	0.1	0.3	0.1	0.2	0.4	3.7
Fer dissous (mg)	30	0.0	0.0	0.4	0.0	0.1	0.2	6.3
Fer total (mg)	27	0.0	0.0	0.6	0.1	0.6	1.6	5.7
HCO3 (mg)	32	36.0	284.1	344.2	357.0	412.2	481.3	932.4
Hg total (µg/l)	28	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3
K (mg)	33	0.8	2.1	10.5	5.2	11.0	27.8	57.5
Mg (mg)	33	1.2	6.7	14.0	14.0	21.8	25.8	28.9
Mn ((mg)	33	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.3	2.5
Na (mg)	33	6.8	15.1	106.2	24.5	67.1	213.2	1480.0
NH4 (mg)	33	0.0	0.1	0.3	0.1	0.2	0.6	1.8
Ni total (µg/l)	33	0.8	2.0	3.8	2.5	4.0	5.8	22.9
NO2 (mg)	29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
NO3 (mg)	33	0.1	0.2	24.0	1.7	17.6	93.4	144.0
O2 (mg)	31	0.1	0.5	2.1	0.8	3.9	5.0	7.2
Orthophosphates (mg/l de P)	29	0.0	0.1	0.3	0.2	0.3	0.5	3.1
Pb (µg/l)	33	0.0	1.0	2.2	1.0	2.5	2.5	21.7
pH	33	6.1	7.0	7.2	7.2	7.4	7.9	8.8
Phosphore (mg)	10	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4
PO4 (mg)	6	0.0	0.0	0.8	0.1	0.3	2.2	4.0
SO4 (mg)	32	1.4	49.2	121.7	104.5	142.6	202.8	619.0
Sr (mg)	7	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7
T°C	32	8.1	11.6	12.2	12.0	12.6	13.7	17.2
TAC	3	32.8	34.2	36.1	35.6	37.7	39.0	39.8
Zn total (µg/l)	33	3.0	5.0	69.0	12.7	18.6	75.0	1441.0

Tableau 5-5: Principaux paramètres statistiques de l'aquifère de l'Yprésien

5.2.5.2. Distribution des paramètres et éléments

Aux Figures 5-55 et 5-56, les histogrammes des paramètres de terrain, des concentrations en éléments majeurs et mineurs sont représentés. Les histogrammes ont également été tracés pour l'ensemble du jeu de données de l'Yprésien (Région de Bruxelles-Capitale, Région wallonne, Région flamande). Les histogrammes permettent de représenter la distribution des données. Les données utilisées sont les médianes des valeurs disponibles à chaque station d'échantillonnage. Sur les graphiques, les teneurs sont regroupées en 10 classes et pour chaque classe, un rectangle est tracé dont la hauteur est fonction de la fréquence de la classe. Il est possible de constater que pour de nombreux éléments, la distribution est asymétrique et l'histogramme est fortement étiré vers la droite.

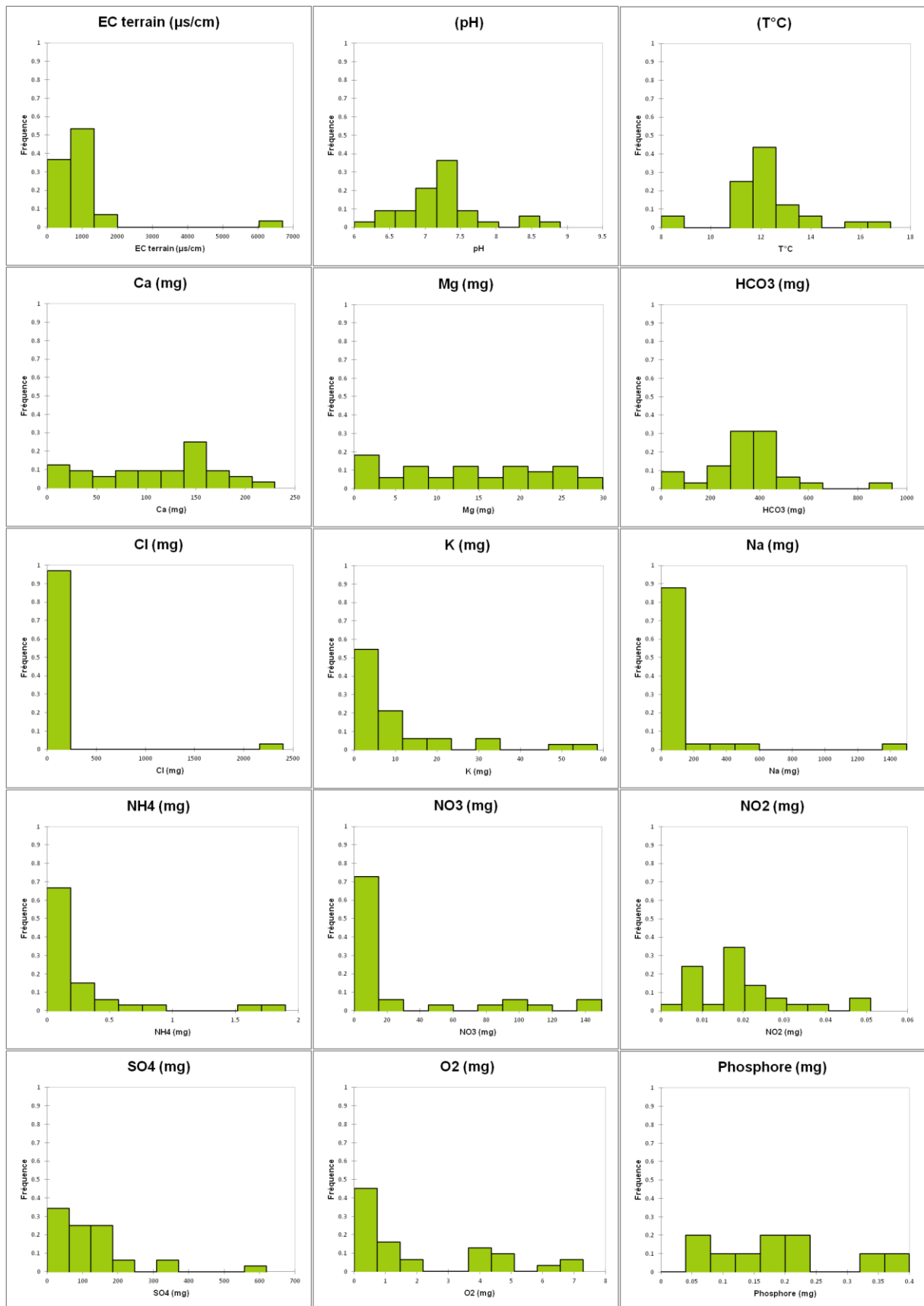


Figure 5-55 : Histogrammes illustrant la distribution des paramètres de terrain, des éléments majeurs et quelques éléments mineurs de l'aquifère de l'Yprésien

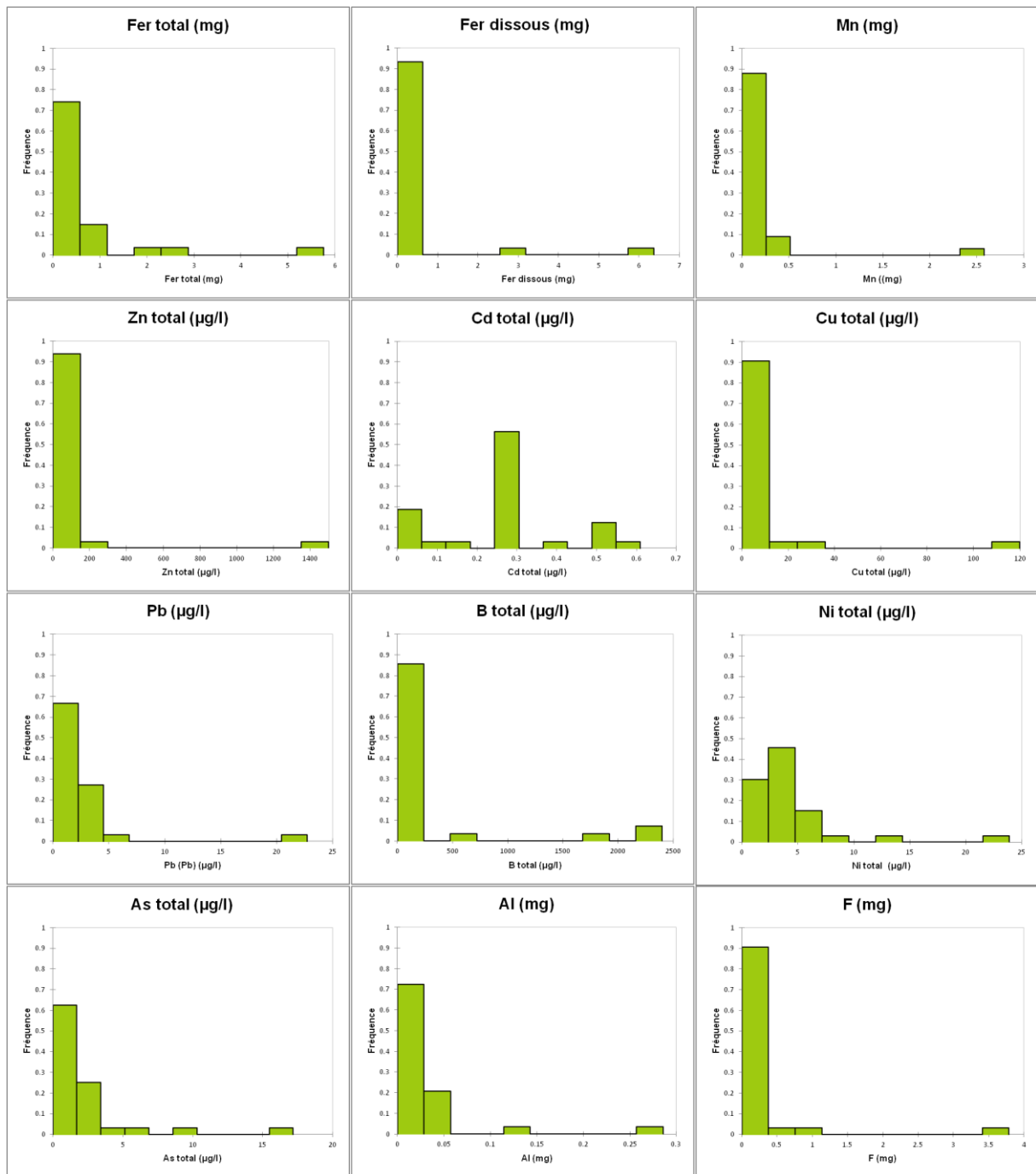


Figure 5-56 : Histogrammes illustrant la distribution des principaux éléments mineurs de l'aquifère de l'Yprésien (pour les métaux, il s'agit de la fraction totale sauf pour le Fe où la fraction dissoute est également représentée).

5.2.6. Corrélation entre les éléments

Pour mettre en évidence les relations existantes entre les variables, des coefficients de corrélation ont été déterminés pour chaque couple de variables. La méthode de Kendall a été utilisée pour le calcul des coefficients de corrélation à cause de la distribution généralement asymétrique des données. La matrice des coefficients de corrélation des principaux polluants avec les paramètres de terrain, les éléments majeurs et entre polluants est présentée au Tableau 5-6. Une deuxième matrice de corrélation avec les principaux polluants et les métaux/ métalloïdes est présentée au Tableau 5-7. Les coefficients de corrélations non significatifs (avec une p-value >0.05) ne sont pas repris dans la matrice. Les coefficients de corrélations supérieurs à 0.25 sont mis évidence en orange, ceux supérieurs à 0.5 sont rouge et les coefficients de corrélation inférieurs à -0.25 sont mis en évidence par un fond vert, ceux inférieurs -0.50 sont en bleu.

Il est possible de constater que de nombreuses variables sont corrélées. Certains polluants sont corrélés avec des éléments majeurs Ca, Cl, Mg. Les polluants sont plutôt présents dans les eaux bicarbonatées calciques ou chlorurées calciques et la plupart des polluants sont corrélés positivement entre eux, donc quand un site est impacté, il y a généralement plusieurs polluants.

Certains polluants sont également corrélés avec des métaux/ métalloïdes. La présence de ces métaux est donc peut être liées à un impact anthropique, c'est le cas du Cd, Zn, Ni, Pb, Cu.

Variables	BAM	Atrazine	Atrazine deséthyl	Atrazine desisopropyl	Bentazone	CN	Huiles minérales	NO3	NO2	Tétrachloro éthylène	Trichloro éthylène
NH4			-0.23		0.34			-0.09	0.18		
HCO3						0.47		-0.13			
Br											
Ca		0.36	0.40					0.27	0.17		
COT			0.23					0.12			
Cl		0.20			0.26			0.16	0.18		
EC					0.21	-0.24		0.14	0.12		
F			-0.30					-0.23			
Mg		0.28	0.22		0.38			0.20	0.14		
NO3		0.58	0.57				0.49	1.00	0.26	0.38	0.42
NO2					0.26			0.26	1.00		
O-PO4					0.29			-0.14			
O2 dissous								0.16	0.12		
pH					-0.31			-0.12			
PO4											
P t		0.33									
K		-0.22	-0.44		0.46	-0.35		-0.26			
Eh								0.19			
Na							-0.66	0.12	0.17		
Sr											
SO4								0.13	0.14		
T°C						-0.26					
Tétrachloroéthylène	0.50		0.50					0.38		1.00	0.94
Trichloroéthylène	0.59		0.57					0.42		0.94	1.00
Atrazine		1.00	0.51					0.58			
Atrazine deséthyl		0.51	1.00	0.51				0.57		0.50	0.57
Atrazine desisopropyl			0.51	1.00							
Bentazone					1.00				0.26		
BAM	1.00					0.59				0.50	0.59
CN	0.59					1.00					
Diuron											
Huiles minérales (totales)							1.00	0.49			
Simazine											

Tableau 5-6 : Coefficients de corrélation entre les principaux paramètres de terrain, les éléments majeurs et les principaux éléments mineurs et les polluants de l'aquifère de l'Yprésien

Variables	BAM	Atrazine	Atrazine desé.	Atrazine desi.	Bentazone	CN	Huiles minérales	NO3	NO2	Tétrachloro éthylène	Trichloro éthylène
Al t								-0.18			
As t					0.44			-0.25			
Ba t		0.40			0.54			0.45		0.39	0.39
B t									0.28		
Cd t											
Cd d										0.72	0.72
Cu t	0.32		-0.23		0.43				0.17		
Fe t		-0.36	-0.39					-0.45	-0.21		
Fe d						0.40		-0.31			
Mn	0.31				0.32			-0.32			
Hg t											
Hg d											
Ni t								0.11			
Ni d								0.82		0.68	0.68
P t		0.33									
Pb t	0.27										
Pb d											
Zn t	0.37										

Tableau 5-7 : Coefficients de corrélation entre les principaux polluants et les éléments mineurs de l'aquifère de l'Yprésien

5.2.7. Valeurs atypiques

Les valeurs atypiques ou aberrantes sont des valeurs qui s'écartent fortement des autres valeurs. Ces valeurs atypiques peuvent permettre de mettre en évidence des sites avec des minéralisations particulières, il peut notamment s'agir de pollutions ponctuelles. Une valeur est considérée comme atypique quand la valeur est supérieure au $P75 + 1.5 \times (P75 - P25)$. Ici la formule a été utilisée avec le logarithme des valeurs parce que certains paramètres ont une distribution asymétrique. Le Tableau 5-8 présente les sites qui présentent des valeurs atypiques et ils sont localisés à la Figure 5-57.

Parmi les sites avec de nombreuses valeurs atypiques, il y a les sites au nord de la zone où la nappe est captive et a une signature d'une ancienne eau marine. Ces sites ne sont pas contaminés mais les valeurs sont considérées comme atypiques parce qu'elles sont fort différentes du reste de l'aquifère. Pour les autres sites présentant des valeurs atypiques il s'agit probablement plutôt d'une contamination anthropique. Il y a notamment 2 sites en région de Bruxelles-Capitale (P48 et P52).

Région	nom	no_code	valeurs atypiques
RBC	387 Jotul Martin	P48	Cd, Pb, Zn
RBC	YRCO2_cerisier	P51	Al, BAM
Rwypr	CAB Pz5 aval 32M	RWY1	Cd
Rwypr	Ceriseraie 20M	RWY2	pH, F, B, Cu
Rwypr	CET ALCONVAL PIEZO PZ2	RWY3	Cd, Cu
Rwypr	CET ALCONVAL PZ1	RWY4	Cd,Cu
Rwypr	CET ALCONVAL PZ4	RWY5	NH4, Mn, As, Cd, Cu, Ni
Rwypr	HERSEAUX LONG BOUT	RWY7	Cu
Rwypr	LA BARBERIE 8M	RWY8	T°C, Cu
Rwypr	Nechin impasse de l'église	RWY10	Cu, Zn, Atrazine déséthyl, Trichloréthylène
Rfypr	1-1102a	RFY1	NH4, T°C, EC, Cl, Na, B
Rfypr	4-0039	RFY3	pH, HCO3, F, As, B
Rfypr	4-0271b	RFY6	pH
Rfypr	422/74/8	RFY10	Trichloréthylène, Tétrachloroéthylène
Rfypr	480/73/7	RFY15	Cd
Rfypr	480/74/1	RFY17	Ni

Tableau 5-8: Stations de l'aquifère de l'Yprésien présentant des valeurs atypiques

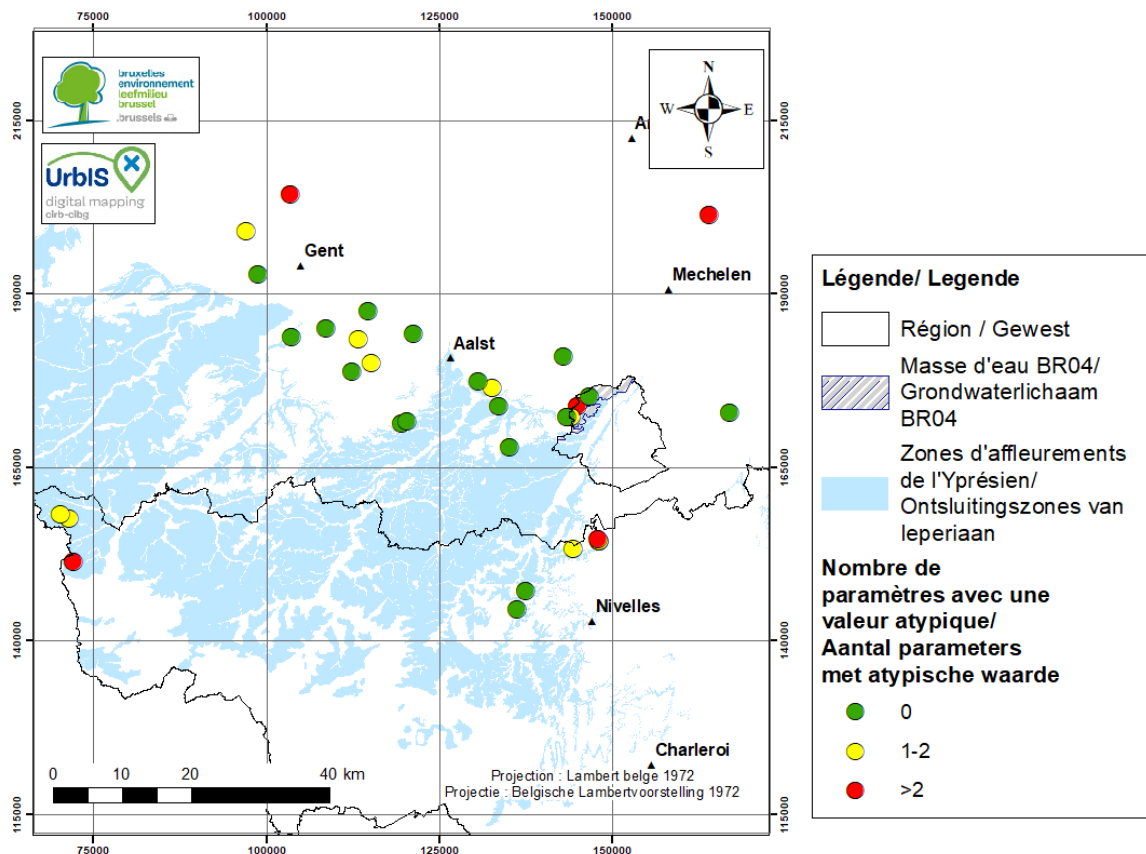


Figure 5-57 : Localisation des stations de l'aquifère de l'Yprésien présentant des valeurs atypiques

5.2.8. Analyse multivariée par la méthode des matrices auto-organisantes

Une analyse multivariée a été réalisée en utilisant la méthode des matrices auto-organisantes (self-organizing maps – SOMs). L'analyse multivariée permet de mettre en évidence les relations entre un nombre élevé de paramètres dans un système hydrogéologique avec une dynamique complexe. Les SOMs permettent aussi de diviser les échantillons en groupes d'eaux ayant des signatures géochimiques semblables.

Dans le cas de la masse d'eau souterraine de l'Yprésien, de nombreux processus géochimiques ont un impact sur la composition des eaux souterraines. Pour l'analyse multivariée, les données seront donc examinées sous 2 angles : (1) les processus influençant la minéralisation globale (interaction eau-roche, processus de rafraîchissement, apports anthropiques éventuels...) et (2) les processus d'oxydo-réduction (liés au confinement de la nappe) qui peuvent notamment influencer les teneurs en métaux.

Pour étudier la minéralisation globale, la technique de statistiques multivariées sera appliquée sur une sélection de 9 paramètres⁷. Il s'agit de certains éléments majeurs Cl, NO₃, SO₄, Ca, K, Na, le B, le F et le rapport Na/Cl (molaire). Ces paramètres ont été choisis pour mettre en évidence l'origine de la salinité (notamment les concentrations élevées en Cl) et identifier d'éventuelles contaminations anthropiques. Le NO₃ est un indicateur de pollution et les paramètres K, Na, SO₄, B ont été

⁷ Les éléments majeurs choisis ne sont pas forcément les mêmes pour les différentes masses d'eau souterraine (Socle, Yprésien et Bruxellien) parce que chaque masse d'eau a ses spécificités et pour chaque masse d'eau plusieurs itérations sont réalisées en réduisant au fur et à mesure le nombre de paramètres. Celle qui est choisie est celle montrant les corrélations les plus intéressantes et qui identifie des groupes d'eau plausibles.

sélectionnés parce qu'ils peuvent être soit naturels, soit d'origine anthropique. Le rapport Na/Cl donne également des indications sur l'origine du Cl. Un rapport Na/Cl (molaire) inférieur à 0.86 correspond généralement à une eau impactée par une pollution (Müller, 2006). Les concentrations en éléments chimiques ont été exprimées sous forme logarithmique à cause de leur distribution asymétrique tandis que le rapport Na/Cl a été utilisé tel quel.

Pour mettre en évidence les processus d'oxydoréduction, les SOMs seront appliquées une seconde fois avec une autre sélection de paramètres. Il s'agit des paramètres impliqués dans les réactions d'oxydoréduction, à savoir NO₃, Mn, pH, NH₄, SO₄, Fe, ainsi que d'autres métaux (As, Pb, Zn) pouvant être influencés par les conditions redox. Les concentrations ont été exprimées en logarithme à cause de leur distribution asymétrique tandis que le pH a été exprimé comme tel.

5.2.8.1. Influence de la minéralisation globale

Les résultats des SOMs, concernant l'influence de la minéralisation globale sur la masse d'eau de l'Yprésien sont représentés à la Figure 5-58. La matrice des composants permet de montrer les relations entre les paramètres. Il est notamment possible de voir que le Na, le B, rapport Na/Cl et le F sont corrélés positivement, que le Ca et le SO₄ sont corrélés positivement et qu'ils sont corrélés négativement au rapport Na/Cl, au B et au F. La matrice U est également présentée à la Figure 5-58 et de cette matrice U, 3 groupes ont été déduits par le logiciel. Le Tableau 5-9 synthétise les principales caractéristiques de ces trois groupes et ceux-ci sont représentés spatialement à la Figure 5-59.

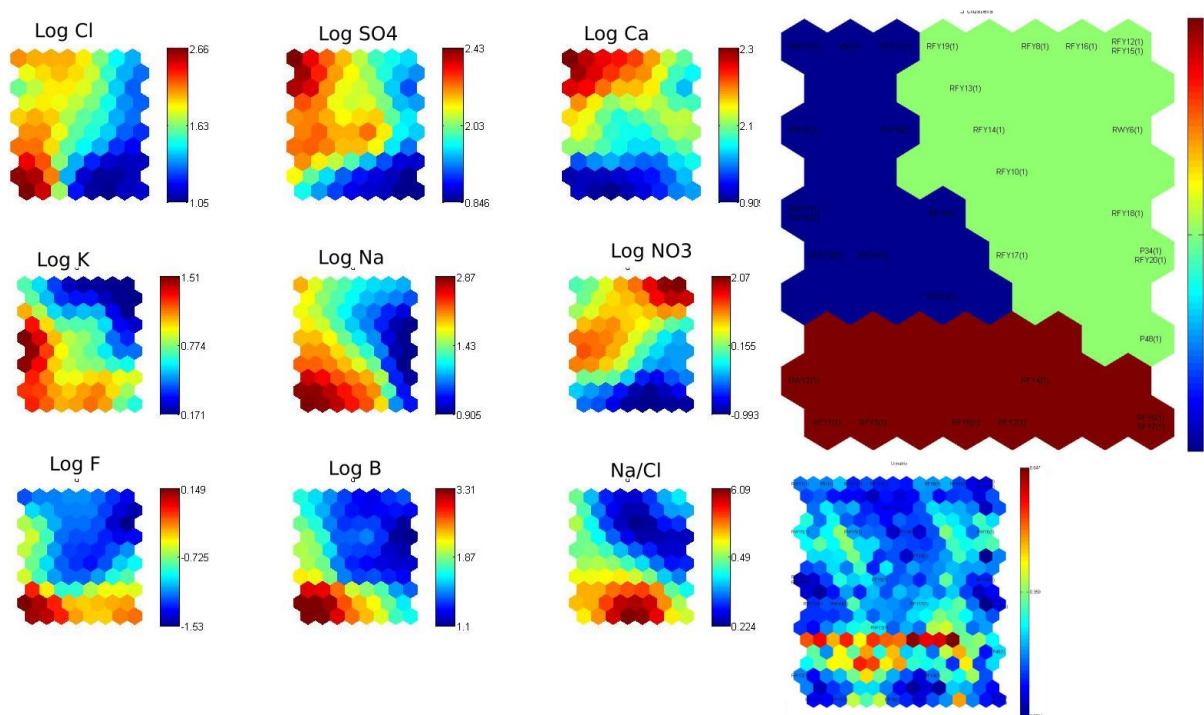


Figure 5-58 : Résultats des SOMs pour la minéralisation globale de l'Yprésien avec la matrice des composants, la matrice U et les groupes d'échantillons semblables définis par les SOMs

Le groupe 1, en bleu, présente des concentrations élevées en SO₄, Ca, Cl, K, Na, des concentrations variables mais qui peuvent être élevées en NO₃, des concentrations moyennes en F, B et un rapport Na/Cl moyen. Les échantillons de ce groupe se retrouvent principalement en Région wallonne, mais il y en a également en Flandre et en région de Bruxelles-Capitale (point P51). Ces échantillons semblent

impactés par une contamination anthropique, valeurs atypiques, présence de nitrate ou autres polluants et cet impact anthropique semble avoir une influence importante sur la minéralisation : concentration élevée en Cl, SO₄,...

Les échantillons du groupe 2, en vert, présentent des concentrations faibles en Cl, K, Na, F, B, une concentration variable en NO₃, SO₄, une concentration élevée en Ca et un rapport faible en Na/Cl. Ces échantillons sont localisés principalement en Région de Bruxelles-Capitale, et en Région flamande. Ce groupe semble aussi impacté par la présence de polluants notamment du nitrate mais cela ne semble avoir un peu moins d'impact sur la minéralisation. Il s'agit d'une recharge récente mais un peu moins impactée par une contamination.

Les échantillons du groupe 3, en brun, présentent des concentrations élevées en Na, K, F, B, un rapport Na/Cl élevé, une concentration variable en Cl et faible NO₃, Ca et SO₄. Les échantillons de ce groupe sont localisés au nord de la zone, au nord-ouest de la Région de Bruxelles-Capitale, dans la partie captive de l'aquifère. Les concentrations élevées Na, K, F, B et le rapport Na/Cl semblent indiquer que la minéralisation est liée à une eau de mer fossile, piégée lors de la sédimentation. Même si la concentration en Cl est variable et indique peut-être que les eaux de ce groupe ne sont pas dans le même stade du processus de rafraîchissement.

Groupe	Cl	SO ₄	Ca	K	Na	NO ₃	F	B	Na/Cl
1 : Recharge récente (contaminée)	+	++	++	+	+	+	+	+	+
2 : Recharge récente	-	X	+	-	--	X	--	--	--
3 : Eau de mer fossile	X	-	--	+	++	--	++	++	++

Tableau 5-9 : Caractéristiques de chacun des trois groupes

- ++ Concentrations les plus élevées du jeu de données
- + Concentrations élevées dans le jeu de données
- concentrations moyens par rapport au jeu de données
- concentrations bas dans le jeu de données
- concentrations les plus bas du jeu de données
- X concentrations variés (des plus élevés aux plus bas)

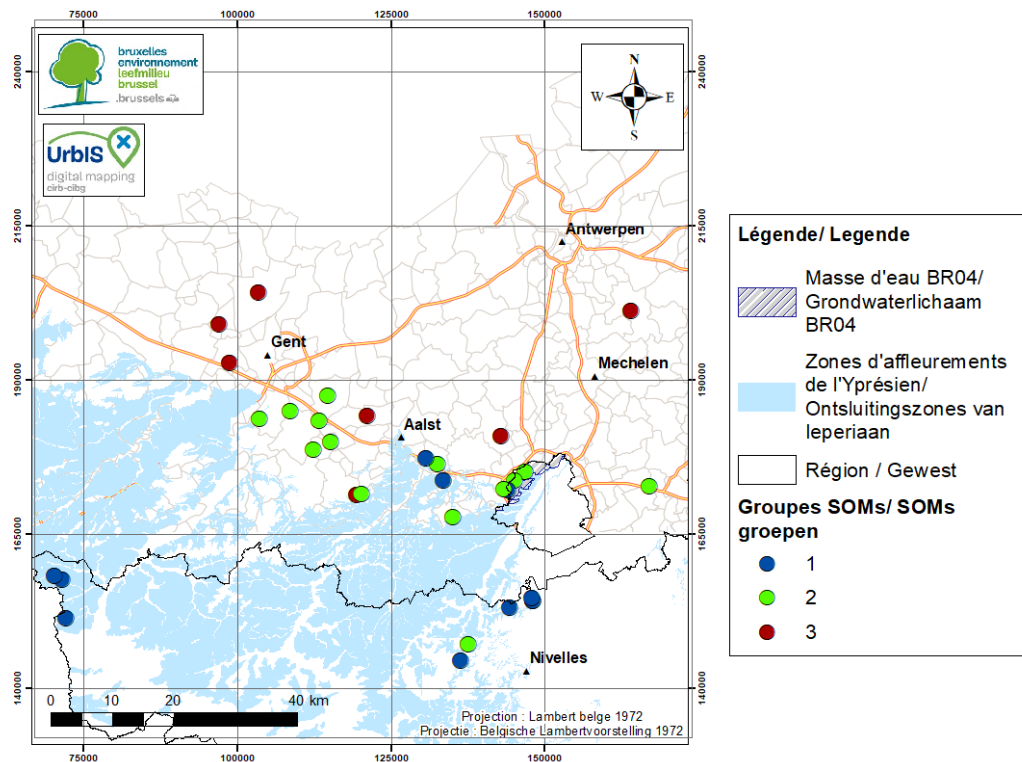


Figure 5-59 : Distribution spatiale des 3 groupes définis grâce à l'analyse multivariée (minéralisation globale)

5.2.8.2. Influence des processus redox

Les résultats de l'analyse statistique multivariée, concernant l'influence des processus d'oxydoréduction sur la masse d'eau de l'Yprésien, sont représentés à la Figure 5-60. Certaines corrélations peuvent être observées, le Mn et le Fe sont corrélés positivement, et corrélés négativement au NO₃, le pH et le B sont corrélés positivement et corrélés négativement au SO₄. La matrice U est également présentée à la Figure 5-60 et de cette matrice U, 3 groupes ont été déduits par le logiciel. Le Tableau 5-10 synthétise les principales caractéristiques de ces trois groupes et ceux-ci sont représentés spatialement à la Figure 5-61.

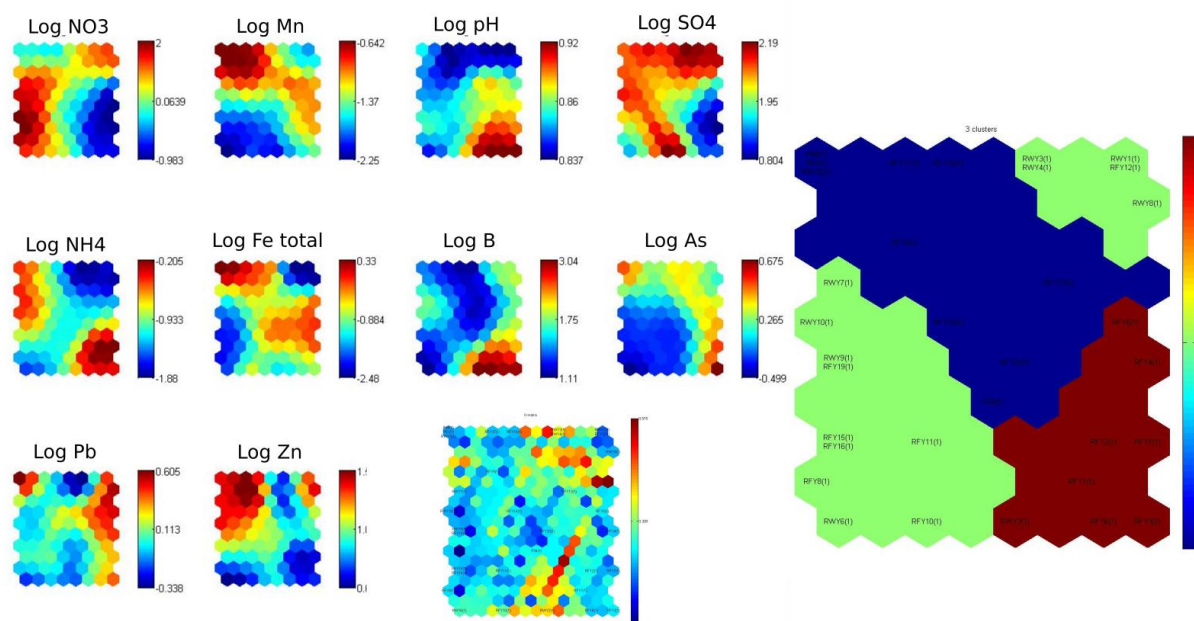


Figure 5-60: Résultats des SOMS pour les processus de l'Yprésien avec la matrice des composants, la matrice U et les groupes d'échantillons semblables définis par les SOMS

Groupe	NO3	Mn	pH	SO4	NH4	Fe total	B	As	Pb	Zn
1 : Zone de transition	X	++	X	+	X	+	-	X	X	X
2 : Zone oxydante	++	-	-	+	-	--	-	-	-	X
3 : Zone fortement réductrice	--	X	++	-	+	+	++	X	X	-

Tableau 5-10 : Caractéristiques de chacun des trois groupes

++ Concentrations les plus élevées du jeu de données

- concentrations bas dans le jeu de données

+ Concentrations élevées dans le jeu de données

-- concentrations les plus bas du jeu de données

O concentrations moyens par rapport au jeu de données

X concentrations variés (des plus élevés aux plus bas)

Les échantillons du groupe 1, en bleu, présentent des concentrations élevées en Mn, Fe et SO₄, une concentration variable mais plutôt faible en NO₃, une concentration faible en B, et des concentrations variables en As, Zn, Pb, NH₄ et un pH variable. Ces échantillons sont situés au centre de la zone d'étude entre les échantillons des groupes 1 et 2. Ils sont situés en Région de Bruxelles-Capitale et en Région flamande principalement. Ce groupe correspond à la zone de transition entre la partie oxydante et la partie réductrice de la nappe, il s'agit de la zone suboxique.

Les échantillons du deuxième groupe, en vert, présentent des concentrations élevées en NO_3 , SO_4 , des concentrations faibles pour les paramètres Mn, NH_4 , Fe, As, B, Pb et un pH faible. Les échantillons de ce groupe se retrouvent dans la partie sud et la partie centrale de la zone d'étude, il s'agit de la zone oxydante de la nappe.

Les échantillons du groupe 3, en brun, présentent des concentrations faibles en NO_3 , Zn et SO_4 des concentrations élevées en NH_4 , Fe, B, un pH élevé et des concentrations variables en Mn, As, Pb. Les points de ce groupe sont localisés dans le nord de la zone, en Région flamande, dans la partie la plus réductrice de la nappe de l'Yprésien.

Les résultats de l'analyse de la minéralisation globale et des processus redox ne sont pas tout à fait les mêmes. Certains points qui avaient été identifiés comme correspondant à la recharge récente font partie de la zone de transition pour les processus redox mais cela reste cohérent parce que l'eau de la recharge récente et contaminée peut avoir subi la dénitrification relativement rapidement et ne plus faire partie de la zone oxydante de la nappe.

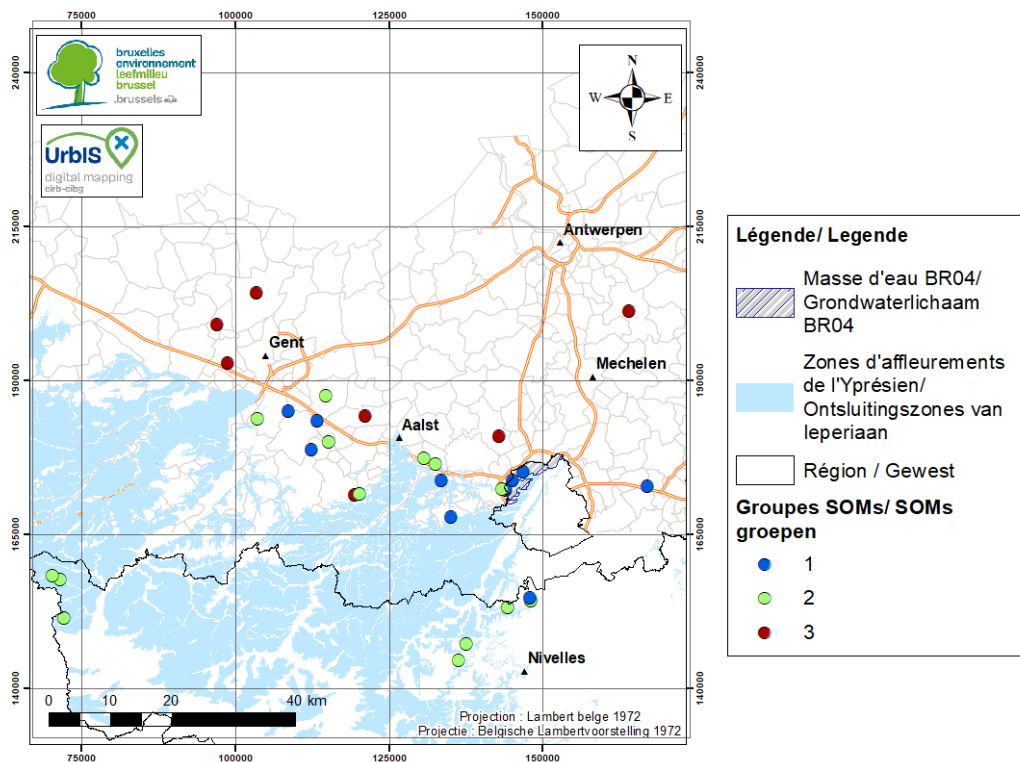


Figure 5-61 : Distribution spatiale des 3 groupes définis grâce à l'analyse multivariée (processus redox)

5.2.9. Modèle conceptuel de l'acquisition de la minéralisation

L'objectif de ce point est de faire une synthèse des observations et des conclusions qui ont été tirées dans ce chapitre pour proposer un modèle conceptuel de l'acquisition de la minéralisation dans la masse d'eau de l'Yprésien. Cette masse d'eau peut être divisée en trois zones différentes.

La première zone, concerne les stations situées principalement en Région wallonne. Elle correspond à la partie oxydante et à la recharge récente de la nappe. Les eaux sont de type bicarbonaté calcique ou chloruré calcique. Dans cette zone, la concentration en Ca est importante. Un des principaux processus qui influence la minéralisation dans cette zone semble être la dissolution de la calcite. Les concentrations en Mg sont également élevées. Par contre les concentrations en Na, K, Cl, SO_4 sont

moyennes à élevées. Des polluants sont parfois quantifiés et la concentration en nitrate peut être supérieure à 10 mg/L. De nombreux sites présentent des valeurs atypiques et certains ont un rapport Na/Cl inférieur à 0.86. Dans cette partie de l'aquifère, des contaminations sont donc présentes et elles semblent affecter la minéralisation. Les stations de la Région wallonne sont relativement éloignées des stations des Régions flamande et bruxelloise. De plus, il est possible que ces stations ne soient pas localisées exactement dans le même aquifère (aquifère de Tielt), ce qui pourrait également expliquer la minéralisation particulière de ces stations.

Plus au nord, en Région flamande et en Région de Bruxelles-Capitale, il y a une deuxième zone correspondant à la recharge récente de la nappe. Elle est située au sud d'Aalst et de Gent. Cette zone comprend également une eau de type bicarbonaté calcique ou chloruré calcique, riche en Ca. La dissolution de la calcite semble donc toujours influencer la minéralisation. Par contre les conditions redox sont variables, oxydante ou suboxique. Pour certains sites il y a des concentrations élevées en nitrate et pour d'autres des concentrations faibles en nitrate et élevées en Fe et Mn. La limite entre ces deux zones n'est pas vraiment définie. Les conditions hydrochimiques peuvent varier localement en fonction de la profondeur du puits, de la présence d'une couche protectrice et de l'apport en nitrate. Cette deuxième zone semble également marquée par une contamination anthropique, certains sites ont des valeurs élevées en NO₃, certains présentent des valeurs atypiques (notamment P51 et P48 en Région de Bruxelles-Capitale) et la majorité des sites présente un rapport Na/Cl inférieur à celui de l'eau de mer. Mais la contamination semble moins impacter la minéralisation que pour les stations situées en Région wallonne.

La troisième zone est située en Flandre, au nord-ouest de la masse d'eau BR04. Il s'agit majoritairement d'eaux de type bicarbonaté sodique et potassique et de type chloruré sodique et potassique. Les concentrations en Cl, Na, F, NH₄ sont importantes. La salinité importante provient d'une eau marine résiduelle. Cette eau marine a subi un phénomène de rafraîchissement au cours duquel il y a eu des échanges cationiques. Les ions Ca présents dans l'eau souterraine ont pris la place des ions Na fixés sur les sites d'adsorption des constituants du sous-sol. Dans cette troisième zone, les conditions sont également plus réductrices. Cela se marque notamment par une concentration en NH₄ élevée.

5.3. Calcul des concentrations de référence

5.3.1. Sélection des échantillons

Les résultats de l'étude des processus hydrochimiques et en particulier, l'analyse statistique multivariée, vont permettre de sélectionner les échantillons qui seront utilisés pour le calcul des concentrations de référence.

Les SOMs ont montré que la masse d'eau souterraine de l'Yprésien (BR04) était dans la partie suboxique de la nappe et qui correspond également à la recharge récente de la nappe. Dans la recharge récente, 2 groupes sont distingués par les SOMs, un groupe dans lequel la minéralisation semble influencée par la contamination et un groupe dans lequel la minéralisation semble moins influencée par une contamination mais où les sites semblent quand même indiquer un apport anthropique.

La masse d'eau BR04 a une très faible superficie et compte seulement trois sites d'échantillonnage. Parmi ces trois sites, le point P51 fait du groupe 1 défini par les SOMs, où la minéralisation semble

influencée par la contamination. Les sites P51 et P48 présentent plusieurs valeurs atypiques et le site P34 a un rapport Na/Cl inférieur à 0.86 ce qui indique probablement une contamination. Il semble donc que l'ensemble des sites de la masse d'eau soit impacté par une contamination anthropique. Il n'est donc pas possible de déterminer des concentrations de référence, qui sont les concentrations naturelles. Pour la masse d'eau BR04, il s'agira clairement des concentrations de fond. Pour les déterminer les paramètres présentant des valeurs atypiques seront exclus du jeu de donnée.

Pour pouvoir effectuer un traitement statistique plus robuste il est plus adéquat de se baser sur un jeu de données plus grand. Les données concernant la nappe de l'Yprésien provenant de la Région flamande seront donc également utilisées mais seulement celles des sites d'échantillonnage situés à proximité de la Région de Bruxelles-Capitale. Pour ce faire, un buffer de 10 km a été tracé autour de la masse d'eau BR04 (Figure 5-62 et Figure 5-63). Dans le buffer de 10 km, il y a des sites appartenant au trois groupes définis par les SOMs : recharge récente contaminée, recharge récente (moins impactée par une contamination) et eau de mer fossile. Pour déterminer les concentrations de référence deux sélections seront testées : utiliser tous les sites inclus dans le buffer et n'utiliser que les sites appartenant au deuxième groupe. Les résultats seront discutés dans le point suivant.

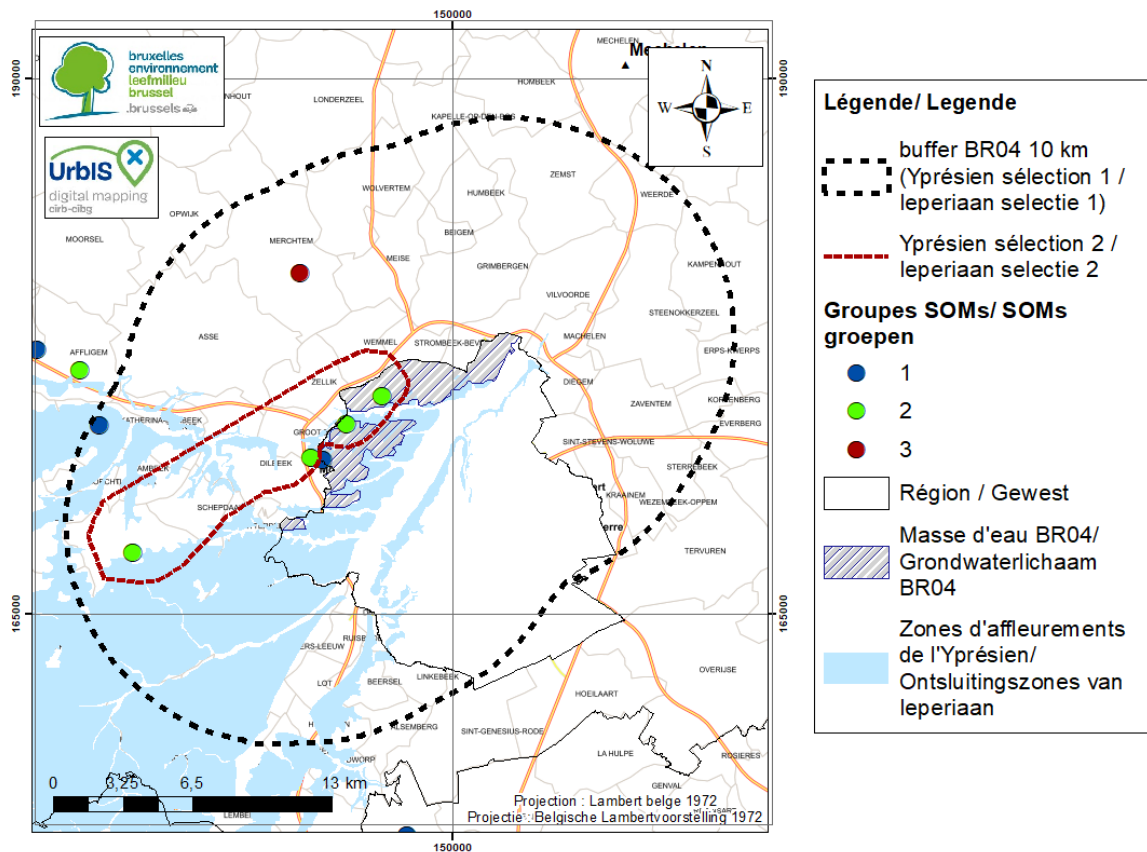


Figure 5-62 : Buffer de 10 km autour de la masse d'eau BR04 avec le résultat des SOMs pour la minéralisation globale

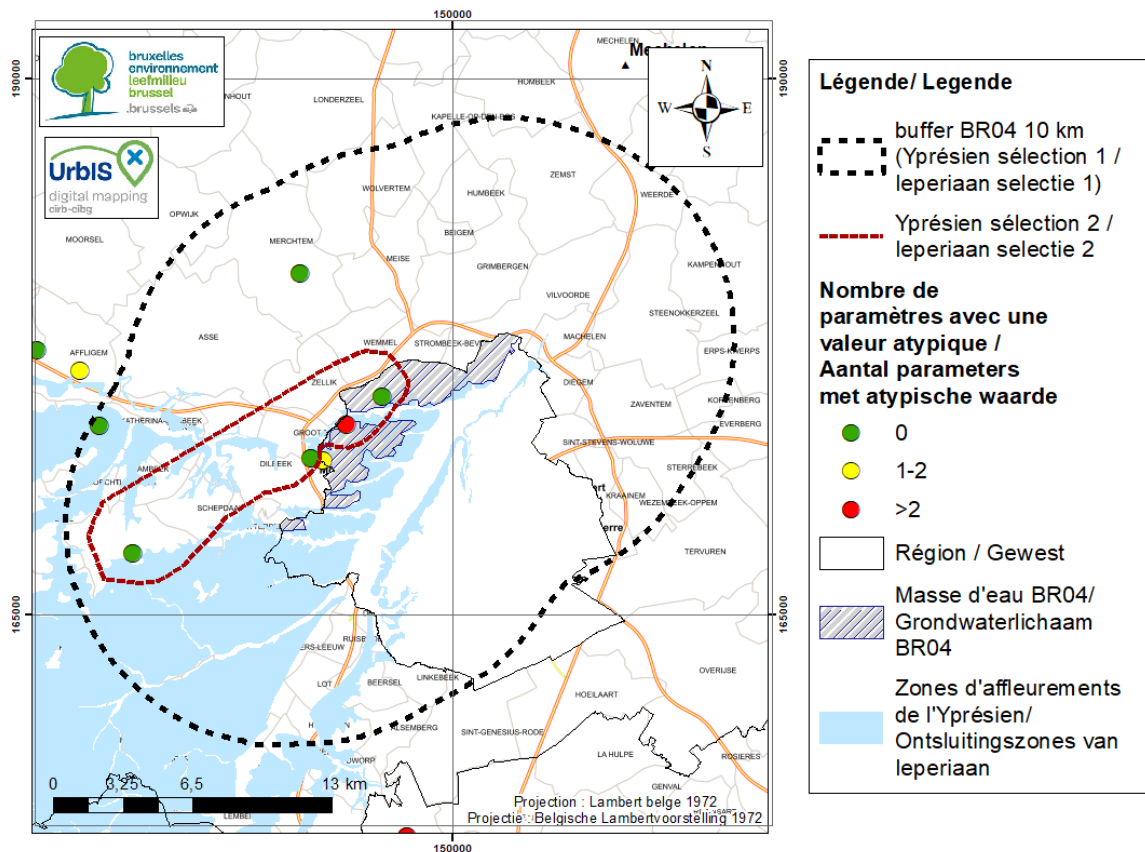


Figure 5-63 : Buffer de 10 km autour de la masse d'eau BR04 avec le nombre de valeur atypique par site

5.3.2. Proposition de concentration de référence

Pour les stations qui ont été sélectionnées dans le point précédent, les principaux paramètres statistiques sont calculés (Tableau 5-11). La sélection 1 inclut l'ensemble des sites dans le buffer de 10 km autour de la masse d'eau BR04 et la sélection 2 inclut les sites de la recharge récente (peu impactée) dans le buffer de 10 km. Les paramètres calculés sont : la moyenne, la médiane (P50), le P25, le P75 et le P90. Le nombre de stations d'échantillonnage est mentionné ainsi que le pourcentage de quantification de chaque valeur. Les paramètres statistiques ont été calculés sur base des médianes de chaque station d'échantillonnage. Lorsqu'un paramètre est en dessous de la limite de quantification, il est estimé en divisant la limite de quantification par 2. Pour les métaux les concentrations de référence seront déterminées pour la fraction totale parce que les valeurs seuils ont été fixées sur la fraction totale pour la masse d'eau souterraine BR04 (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles Capitale relatif à la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration, 2010 et sa révision de 2016).

Pour estimer les concentrations de fond, la médiane représente la valeur habituellement rencontrée et le P90, la valeur limite de la concentration de fond. Il est possible de constater que pour les deux sélections, les percentiles 90 ont le même ordre de grandeur et que les résultats restent inférieurs aux valeurs seuils fixées par la Région de Bruxelles-Capitale. Il faut aussi noter que dans les deux sélections, les concentrations en NO_3 sont élevées. Même la sélection la plus restrictive n'est pas exempte de contamination. Il s'agit donc de concentration de fond (qui prennent en compte la pollution diffuse dans l'aquifère) plutôt que de concentrations de référence.

Les 2 sélections peuvent donc être utilisées pour déterminer les concentrations de fond même s'il est préférable d'utiliser la première qui comporte un nombre plus élevé de stations d'échantillonnage. Dans un premier temps, les résultats seront présentés en tenant compte de la sélection 1 mais la décision finale reviendra au pouvoir adjudicateur.

Pour certains paramètres le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de quantification est très faible (mis en évidence en rouge dans le Tableau 5-11). Pour ces paramètres il n'est pas recommandé d'utiliser le P90. Les concentrations de fond seront calculées en se basant sur la limite de quantification et sur les résultats pour des aquifères semblables (Müller, 2006). L'aquifère semblable considéré est la masse d'eau CVS_0800_GWL_3 en Flandre. La concentration de fond pour ces paramètres généralement inférieurs aux limites de quantification, sera fixée égale à la limite de quantification la plus grande. Ce qui est généralement du même ordre de grandeur que les valeurs de concentration de référence définies en Région flamande.

Les concentrations de fond proposées pour la masse d'eau BR04 sont présentées dans le Tableau 5-12 et sont comparées aux valeurs de la Région flamande. Les valeurs proposées sont généralement du même ordre de grandeur que les concentrations de référence de la Région flamande.

Pour la masse d'eau de l'Yprésien, il n'a pas été possible de déterminer des concentrations de référence naturelles les valeurs proposées sont des concentrations de fond qui prennent en compte la pollution diffuse dans l'aquifère. Il n'est donc pas conseillé de majorer les valeurs critères par ces concentrations de fond parce qu'il n'est pas garanti qu'elles soient exemptes d'apport anthropique. Même si les concentrations sont du même ordre de grandeur que les concentrations de référence de la Région flamande et qu'à l'exception du nitrate, il n'y a pas de dépassement des valeurs critères.

Paramètres	Sélection 1										Sélection 2							
	NB	% >LQ	Valeur LQ	Min	P25	moy.	P50	P75	P90	max	NB	Min	P25	moy.	P50	P75	P90	max
Al (mg/L)	6	54	0.04, 0.02, 0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.08	0.14	4	0.01	0.01	0.04	0.01	0.04	0.10	0.14
As total (µg/l)	7	42	5, 2, 1, 0.65, 0.5, 0.33	0.50	1.00	1.75	1.50	1.93	3.06	4.40	4	0.50	0.88	1.17	1.00	1.29	1.81	2.16
B total (µg/l)	7	66	30, 20, 10	13	28	55	28.5	34.5	110	218	4	13	24	25	28	29	30	31
Ca (mg/L)	7	100		35	87	124	129.5	166.5	182.6	197.	4	103.	123	147.4	144.8	169.3	185.9	197.0
Cd total (µg/l)	6	6	1, 0.8, 0.5, 0.4, 0.2, 0.1, 0.05, 0.03	0.05	0.07	0.16	0.19	0.25	0.25	0.25	3	0.05	0.15	0.18	0.25	0.25	0.25	0.25
Cl (mg/L)	7	100		7.9	20	37.4	34	50.6	65.4	79	4	11.8	24.1	38.2	31.1	45.3	65.5	79
Cu total (µg/l)	7	20	5, 4, 3.5, 2, 0.4	1.00	1.50	2.29	2.50	2.75	3.40	4.00	4	1.00	2.13	2.50	2.50	2.88	3.55	4.00
EC (µs/cm)	7	100		540	623	780	688	91	1060	1150	4	631	674	826	761	913	1055	1150
F (mg/L)	7	71	0.2, 0.1	0.10	0.12	0.15	0.15	0.18	0.20	0.21	4	0.10	0.14	0.16	0.17	0.20	0.21	0.21
Fer (total) (mg/L)	7	78	0.02	0.01	0.38	1.25	0.44	0.95	2.84	5.66	4	0.01	0.26	1.74	0.65	2.13	4.25	5.66
HCO3 (mg/L)	7	88		36	387.3	366	400	432	455	486	4	394	398.6	414.7	415	43	433	434.6
Hg total (µg/l)	7	2	0.5, 0.3, 0.2, 0.1, 0.05, 0.01	0.03	0.03	0.07	0.10	0.10	0.11	0.13	4	0.03	0.03	0.06	0.06	0.10	0.10	0.10
K (mg/L)	7	100		0.8	2.7	8.8	5.2	14.7	20.6	20.9	4.0	0.8	1.7	7.1	3.6	9.0	15.8	20.4
Mg (mg/L)	7	100		9.8	16.5	19.7	19.9	23.3	26.1	28.9	4.0	19.0	19.6	21.4	21.1	22.9	23.7	24.2
Mn (mg/L)	7	98	0.01	0.02	0.04	0.14	0.08	0.25	0.30	0.33	4	0.02	0.03	0.08	0.04	0.10	0.16	0.21
Na (mg/L)	7	100		7.5	9.0	26.5	24.5	33.4	48.1	69.0	4.0	7.5	8.5	14.9	9.0	15.4	26.6	34.1
NH4 (mg/L)	7	51	0.26, 0.19, 0.16, 0.1, 0.08, 0.07, 0.05, 0.01	0.08	0.11	0.20	0.13	0.17	0.38	0.64	4	0.08	0.08	0.12	0.11	0.15	0.18	0.20
Ni total (µg/l)	7	48	10, 5, 4, 2, 1.9, 1.3, 1	1.00	2.50	3.36	2.50	3.50	5.60	8.00	4	1.00	2.13	2.50	2.50	2.88	3.55	4.00
NO2 (mg/L)	7	28	0.07, 0.03, 0.02, 0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	4	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
NO3 (mg/L)	7	65	2, 1.19, 1, 0.44, 0.2, 0.18, 0.1	0.1	0.4	20.1	0.5	23.0	64.5	93.1	4.0	0.2	0.4	23.6	0.5	23.6	65.3	93.1
O2 (mg/L)	7	94	0.2	0.1	0.9	3.7	3.7	6.4	6.9	7.2	4.0	0.8	3.0	4.4	4.9	6.4	6.9	7.2
Orthophosphates (mg/l de P)	7	73	0.31, 0.1, 0.09, 0.03, 0.0066	0.02	0.04	0.16	0.13	0.26	0.37	0.37	4	0.02	0.04	0.09	0.09	0.14	0.15	0.16
Pb total (µg/l)	6	30	5, 4, 2, 1, 0.57, 0.5	0.55	1.00	1.13	1.00	1.01	1.61	2.20	3	0.55	0.78	0.85	1.00	1.01	1.01	1.01
pH	7	100		6.7	7.1	7.3	7.4	7.4	7.6	7.7	4.0	7.1	7.2	7.3	7.3	7.4	7.4	7.4
Phosphore total (mg/l de P)	3	50	0.1	0.05	0.06	0.11	0.08	0.14	0.18	0.20	2	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08
SO4 (mg/L)	7	100		5.7	35	80.5	101.	120.5	140.5	145.8	4	5.7	45.7	76.4	81.5	112.3	127.1	137.0
Zn total (µg/l)	6	83	20, 10, 5	3.8	14.4	29	23.1	29.4	55.5	81	3	13	15.8	19.7	18.6	23.1	25.8	27.6

Tableau 5-11 : Paramètres statistiques calculés pour estimer la concentration type de la masse d'eau de l'Yprésien BR04 sur base des médianes des stations, en rouge : les paramètres avec le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de quantification très faible (<25%)

Pays/ Régions		Région flamande	Région de Bruxelles-Capitale
Masse d'eau		Sables yprésiens (région des collines) CVS_0800_GWL_3	BR04 : Yprésien (région des collines)
Paramètres	unité		
Al dissous	mg/L	0.12	
Al total	mg/L		0.08
As dissous	µg/L	6	
As total	µg/L		3.06
B dissous	µg/L	67	
B total	µg/L		110.1
Ca	mg/L	200	182.6
Cd dissous	µg/L	*	
Cd total	µg/L		1
Cl	mg/L	87	65.4
Cu dissous	µg/L	5	
Cu total	µg/L		5
EC	µs/cm	1100	1060
F	mg/L	0.3	0.20
Fe dissous	µg/L	5500	
Fe total	µg/L		2840
HCO3	mg/L		455
Hg total	µg/l		
Hg dissous	µg/l	*	0.5
K	mg/L	10	20.6
Mg	mg/L	27	26.1
Mn dissous	µg/L	1000	
Mn total	µg/L		300
Na	mg/L	54	48.1
NH4	mg/L	0.58	0.38
Ni dissous	µg/L	15	
Ni total	µg/L		5.60
NO2 (mg/L)	mg/L	0.07	0.02
NO3	mg/L	*	64.5
Orthophosphates	mg/l de P	0.52	0.37
Pb dissous	µg/L	*	
Pb total	µg/L		1.61
pH		5.7-7.6	7.55
Phosphore total	mg/l de P		0.18
SO4	mg/L	190	140.52
Zn dissous	µg/L	110	
Zn total	µg/L		55.50

Tableau 5-12 : Concentrations de référence de l'Yprésien en Flandre (VMM, 2016) comparées aux valeurs proposées (concentrations de fond) pour la masse d'eau BR04 (en rouge : les paramètres avec le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de quantification).

6. Analyse des données et résultats pour la masse d'eau des Sables du Bruxellien (BR05)

6.1. Présentation et vérifications de la qualité des données

6.1.1. Présentation de la masse d'eau souterraine des Sables du Bruxellien (BR05)

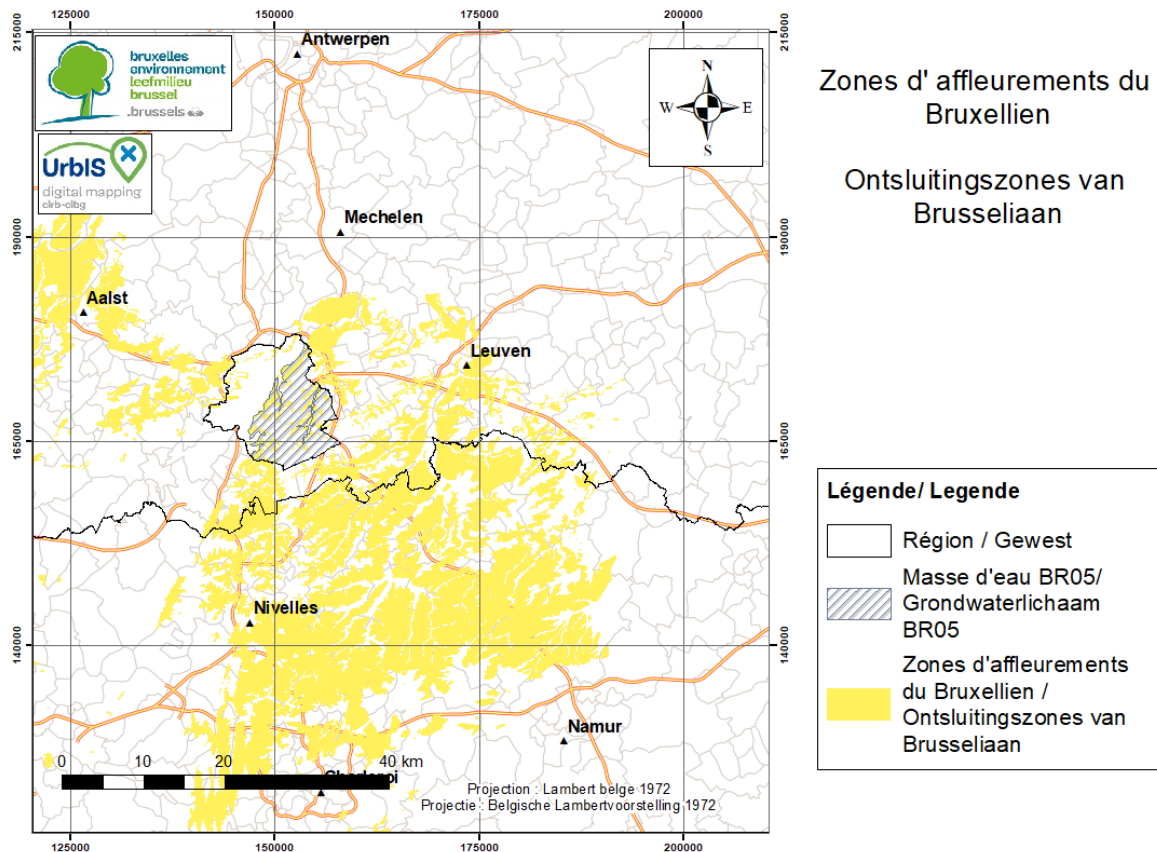


Figure 6-1 : Localisation de la masse d'eau BR05 (Bruxelles Environnement, 2010) et des affleurements du Bruxellien et du Lédo-Panisélien (Service Géologique de Belgique, 2003)

La masse d'eau du Bruxellien n'est pas présente sur l'entièreté de la région de Bruxelles-Capitale. Elle est présente dans le sud-est de la Région et délimitée au nord-est par la vallée de la Senne. Elle a une superficie de 89km² (Figure 6-1). Cette masse d'eau est située dans l'aquifère des sables du Bruxellien également appelé aquifère du Bruxellien/Lédo-Panisélien qui comprend les formations sableuses de Maldegem, de Lede, de Bruxelles et de Tielt.

Cette masse d'eau souterraine du Bruxellien (BR05) délimitée en Région de Bruxelles-Capitale présente des échanges par-delà les frontières administratives régionales et fait partie de l'aquifère transfrontalier des sables Bruxellien (id 10). Les aquifères transfrontaliers sont présentés à la Figure 6-2. et dans tableau de correspondance en annexe entre les masses d'eau souterraine transfrontalières et les aquifères transfrontaliers issus d'une coordination entre les différents partenaires du District de l'Escaut (Tableau 0-3).

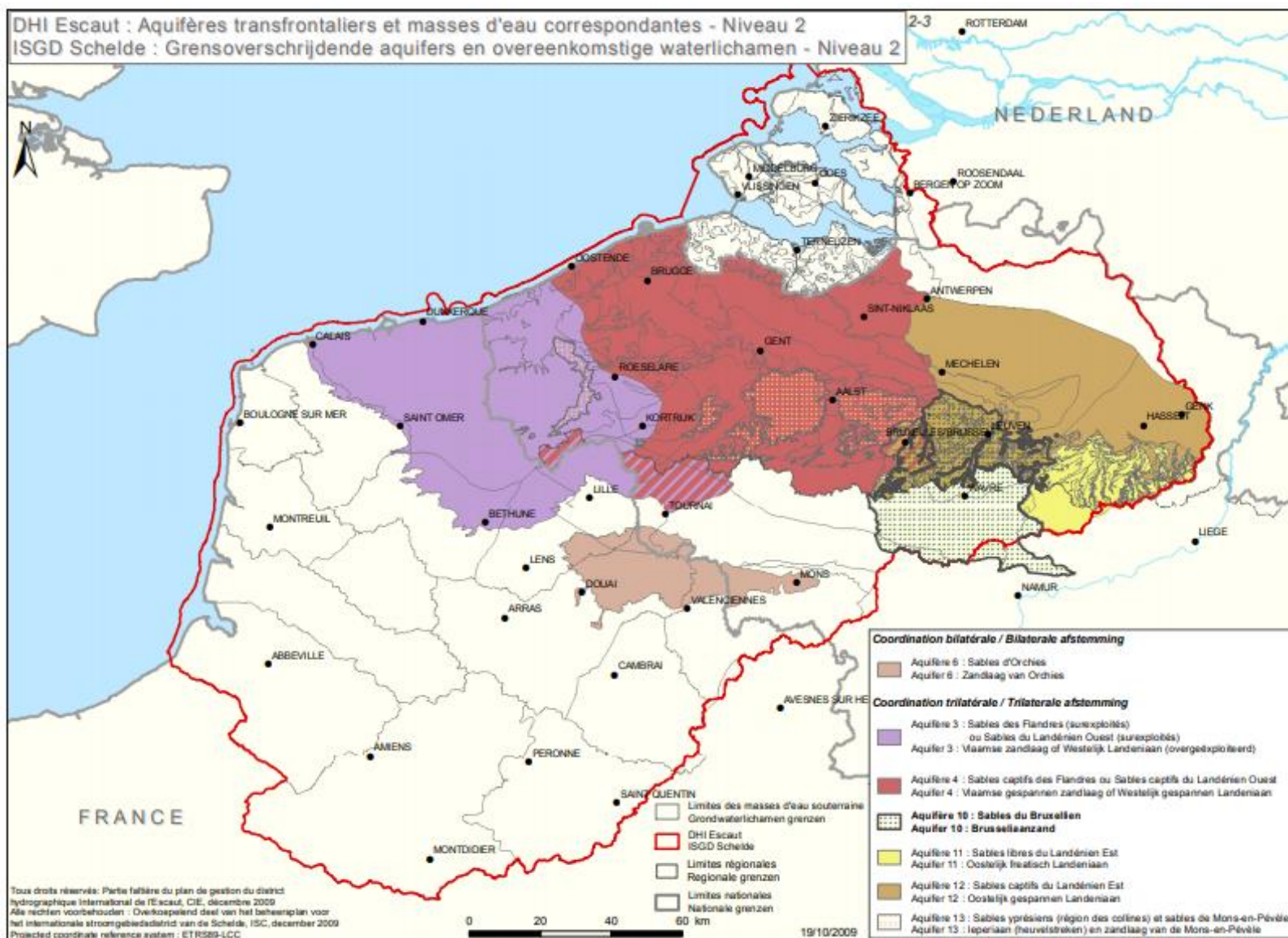


Figure 6-2 : Aquifères transfrontaliers du Paléocène et de l'Eocène du bassin de l'Escaut (CIE, 2009)

L'aquifère du Bruxellien en plus d'être présent en Région de Bruxelles-Capitale est également présent en Flandre et en Wallonie, à l'est de la Région de Bruxelles-Capitale. Cet aquifère est principalement libre (voir zones d'affleurement Figure 6-1) même s'il peut être très localement captif. En Région de Bruxelles-Capitale, la masse d'eau BR05 est recouverte à quelques endroits par l'aquiclude des argiles de Ursel et Asse et de l'aquifère sableux perché. L'ensemble de la masse d'eau est également recouvert par des dépôts quaternaires (limons).

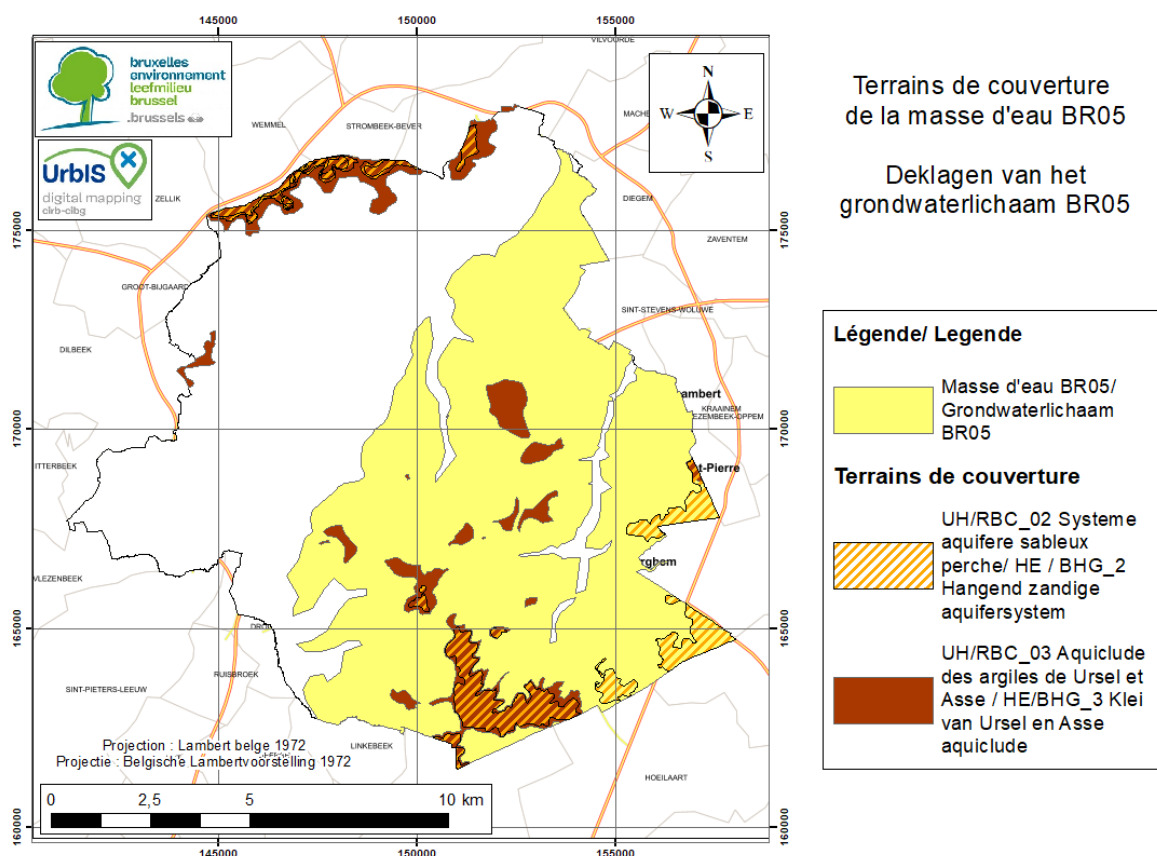


Figure 6-3 : Terrains de couvertures de la masse d'eau souterraine BR05 en Région de Bruxelles-Capitale (Bruxelles Environnement, 2019)

6.1.2. Présentation des données

6.1.2.1. Données de la Région de Bruxelles-Capitale

Les données sur lesquelles se base l'étude ont été fournies par Bruxelles Environnement. Elles proviennent des sites d'échantillonnage déclarés dans les programmes de surveillance, liés à la directive cadre eau, et de sites exploratoires de la qualité des nappes qui ne sont de ce fait pas analysés de façon récurrente. Les points de prélèvements du Bruxellien pour lesquels des données hydrochimiques sont disponibles, sont décrits dans le Tableau 6-1. Leur répartition spatiale est illustrée à la Figure 6-4. Contrairement aux autres masses d'eau de la Région de Bruxelles-Capitale, il y a beaucoup de sites de prélèvement (51 sites). Le type d'ouvrage est également assez varié, comprend des puits, des piézomètres, une galerie drainante et des sources. La profondeur des ouvrages varie entre 0 m (pour les sources) à 71 m. L'environnement autour des stations de prélèvement est principalement urbain mais plus d'une dizaine de stations de prélèvement sont situées dans des zones vertes (Forêt de Soignes).

Point de prélèvement	Code	Type d'ouvrage	Période de suivi		Nbre de mesures	X Lambert belge 72 (m)	Y Lambert belge 72 (m)	Prof. (m)
B12 Hof-ter-Musschen	P39	piézomètre	2012	2017	8	155539	171381	33
Blanchisserie Ste Catherine	P28	puits	2010	2011	2	154375	170900	21
Brussels Droh me! Golf Club	P50	puits	2015	2016	2			50
Car Wash Kennedy	P14	puits	2005	2014	19	153200	174533	30
Cerisiers	P31	puits	2011	2017	14	153588	170440	15
Collège St Pierre	So1	galerie drainante	2004	2010	11	147956	166151	1.15
Fond Roy	P29	puits	2011	2017	12	149845	164128	33
Fontaine de l'Amour	So35	source	2012	2013	5	151453	172310	
Institut Don Bosco	P19	puits	2005	2005	1	153950	169740	
La Cambre : Totalité puits	Cambre	réservoir	1997	2015	195			
Lavoir Aquamatic	315	puits	2006	2017	23	151665	166780	37.75
Lavoir Casernes	P12	puits	2004	2016	25	151491	168553	31
Lavoir Cimetièere Evere	P6	puits	2004	2015	29	153374	172605	45
Lavoir Colas Roodebeek	P10	puits	2004	2017	21	153975	170890	47
Lavoir DDC Mahaut	381	puits	2004	2017	13	152290	166510	60
Lavoir DPF Roodebeek	P9	puits	2006	2010	10	153303	171045	39.5
Lavoir Nivelles	P11	puits	2004	2017	26	153100	168434	40
Lavoir Sleenckx	P17	puits	2004	2015	3	150884	173797	35
Lavoir Ste Alix	P7	puits	2004	2015	23	156478	168600	46
Lavoir Tilleul	P13	puits	2006	2017	20	151986	173041	35
Lavoir Wappers	P8	puits	2006	2015	23	151845	170473	35
Mahaut_piezo	381_piezo	piézomètre	2009	2012	13	152298	166483	33.2
Piézo STIB_XII-028	P44	piézomètre	2017	2017	1	150273	168139	20
Puits filtrant C1	C1	puits	1997	2016	194			49.91
Puits filtrant C2	C2	puits	1997	2016	145			53.28
Puits filtrant C4	C4	puits	1997	2014	120			61.02
Puits filtrant C5	C5	puits	1997	2016	180			55.75
Puits filtrant C7	C7	puits	1997	2016	124			49.5
Puits filtrant C8	C8	puits	1997	2016	86			36.33
Puits filtrant C9	C9	puits	1997	2016	142			38.12
Puits S4	SS4	piézomètre	2013	2016	7	152693	163885	20
Puits T22	ST22	piézomètre	2013	2017	7			35
Puits T25	ST25	piézomètre	2011	2017	5	154103	163911	33
Puits T27	ST27	piézomètre	2011	2016	8	155152	163387	71
Puits T31	ST31	piézomètre	2005	2011	7	155456	166007	22.5
Puits T33	ST33	piézomètre	2010	2016	8	155949	164456	66.8
Puits T36 Clinique Fond Roy	ST36	piézomètre	2005	2010	6	149724	164288	19.5
Source Axa	So42	source	2017	2017	1	154238	165862	
Source Defré	ST32	source	2010	2015	15	148858	165967	
Source du Sylvain	So30	source	2011	2017	11	156264	166643	

Source Empereur	So37	source	2012	2017	6	156024	166566	
Source Félix Haps	So39	source	2012	2017	2	151223	169346	
Source Fond Roy	So36	source	2004	2017	28	149675	164229	
Source Jardin Jean Massart	So40	source	2013	2016	6	154725	167024	
Source Kinsendael	So33	source	2012	2017	9	148107	163909	
Source stade Falon	So34	source	2012	2013	6	155681	170324	
Source Trois Fontaines	So31	source	2004	2017	27	155471	166204	
Source Vuylbeek	So38	source	2012	2017	8	152951	164061	
ST19-388	ST19	piézomètre	2013	2016	6	151028	162012	53
Usine Cambre après stérilisation	Soignes	galerie drainante	1997	2016	256			
Wellington	P30	puits	2011	2011	3	150882	162291	58.5
	SS10	piézomètre	2017	2017	1	155739	165132	45

Tableau 6-1 : Données relatives aux points de prélèvement de la masse d'eau souterraine du Bruxellien pour lesquels des données hydrochimiques sont disponibles (les coordonnées des sites en zone de captage ne sont pas indiquées)

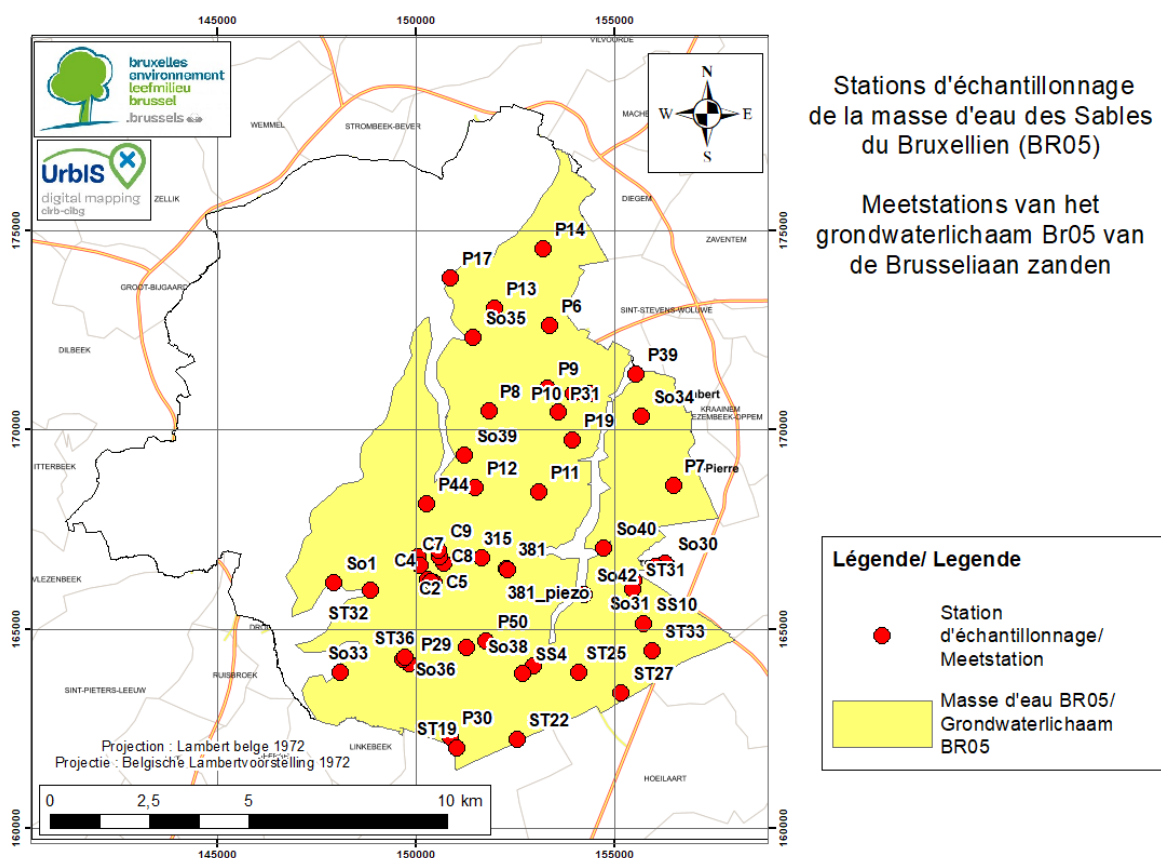


Figure 6-4 : Points de prélèvement de la masse d'eau du Bruxellien pour lesquels des données hydrochimiques sont disponibles

Le programme de surveillance de l'état chimique mis en œuvre dans le cadre de la directive Cadre Eau a été progressivement mis en place à partir de 2004. Pour 10 sites de prélèvement, des données sont disponibles à partir de 2004 tandis que pour les autres stations, le suivi a généralement été mis en place plus tard à l'exception de 9 puits liés à la prise d'eau dans le Bois de la Cambre/ Forêt de Soigne pour lesquels des données sont disponibles depuis 1997. Il y a également des sites de prélèvement pour lequel le suivi a été arrêté pour diverses raisons (puits rebouché, arrêt de l'exploitation,...). Le nombre de campagnes d'échantillonnage est très variable en fonction des

stations de prélèvement: d'un seul échantillonnage pour certaines stations (4) à 256 pour la galerie drainante de la Forêt de Soignes.

Les paramètres qui ont généralement été mesurés sont la teneur en oxygène dissous, la température, le pH et la conductivité électrique, les éléments majeurs, les éléments mineurs (notamment B et F), ainsi qu'une centaine de substances polluantes (pesticides, micropolluants organiques, cyanures, métaux lourds, ...). L'ensemble de ces paramètres n'a cependant pas été analysé pour chaque échantillon prélevé. Les concentrations en métaux ont généralement été mesurées en « concentration totale » (sans filtration préalable de l'échantillon sur le terrain). Seuls Ni, Hg, Pb, Cd ont également été mesurés en « concentration dissoute » (avec filtration préalable).

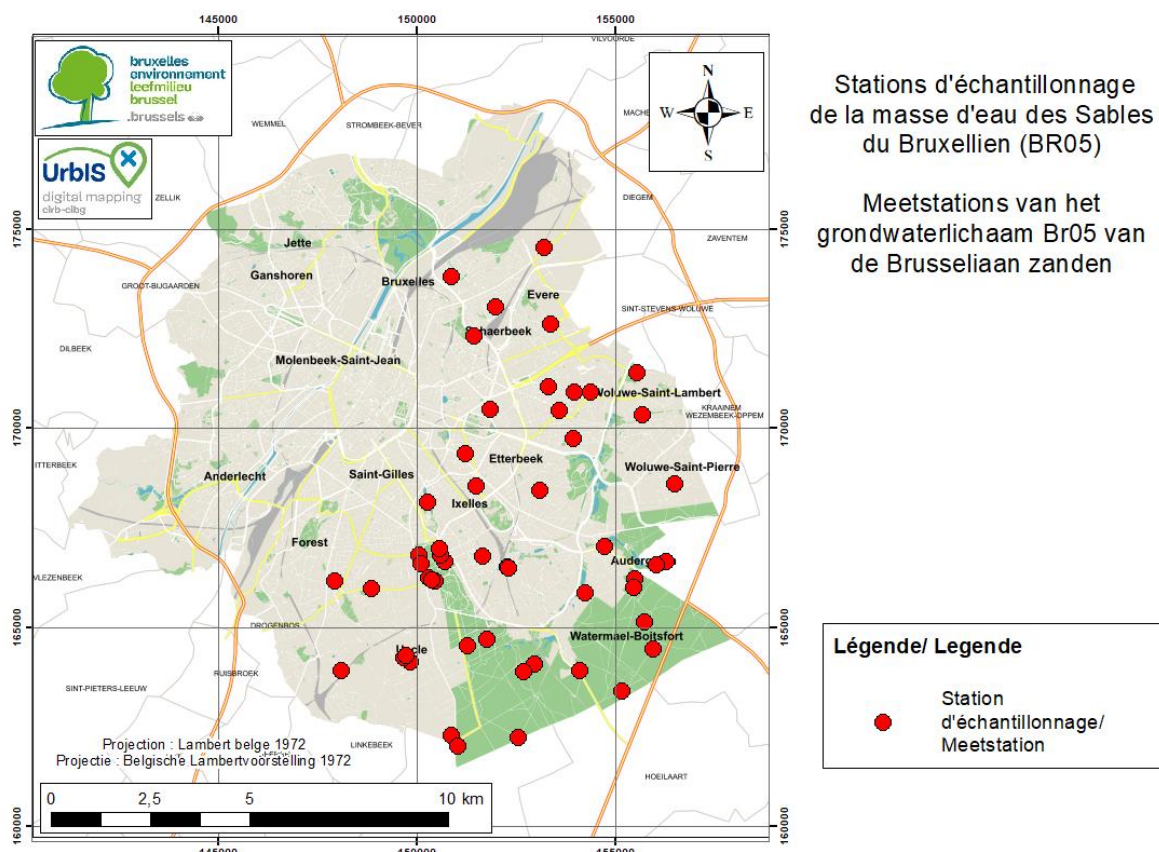


Figure 6-5 : Occupation du sol aux alentours des stations de prélèvement de la masse d'eau souterraine du Bruxellien (BR05).

6.1.2.2. Données complémentaires

Afin d'élargir le jeu de données, des données complémentaires ont également été recherchées pour le même aquifère en Flandre et en Wallonie, autour de la Région de Bruxelles-Capitale. Les données de la Région flamande proviennent de la DOV et les données de la Région wallonne proviennent de la base de données Calypso du SPW. 121 stations d'échantillonnage ont été sélectionnées en Wallonie et 61 en Flandre. La localisation de ces stations est présentée à la Figure 6-6. Une liste de ces stations complémentaires est également présentée en annexe (Tableau 0-6). La majorité des sites de prélèvement sont situées dans la partie libre de l'aquifère des sables du Bruxellien, mais en Flandre, des données proviennent également de la partie captive de l'aquifère (au nord).

Avoir un nombre plus élevé de données et couvrir une zone plus large permet d'étudier les variations des compositions chimiques de l'aquifère et de pouvoir ainsi replacer la masse d'eau souterraine du Bruxellien (BR05) dans son contexte hydrogéologique et hydrochimique. Avoir un nombre plus élevé de données permettra également d'effectuer des statistiques plus robustes pour la détermination des concentrations de référence. Dans le reste du rapport, quand il sera question de l'ensemble du jeu de données du Bruxellien, il s'agira des données fournies par Bruxelles Environnement pour la masse d'eau BR05 et des stations de prélèvement sélectionnées dans les Sables du Bruxellien en Wallonie et en Flandre.

Les paramètres mesurés en Wallonie et en Flandre ne sont pas forcément les mêmes que ceux mesurés en Région de Bruxelles-Capitale. En Flandre, les paramètres mesurés sont la température, le pH, l'Eh, la conductivité électrique et l'oxygène dissous, les éléments majeurs, quelques éléments mineurs (NH₄, F, NO₂, PO₄), les métaux mesurés en fraction totale et ou dissoute. Tous les paramètres n'ont pas forcément été mesurés pour chaque analyse. En Région wallonne, les mêmes paramètres qu'en Flandre sont mesurés. Les métaux sont mesurés en concentration totale à l'exception du fer qui est mesuré en concentration dissoute. En Wallonie, plus de données complémentaires concernant les concentrations en polluants sont disponibles (pesticides, micropolluants organiques, cyanures ...).

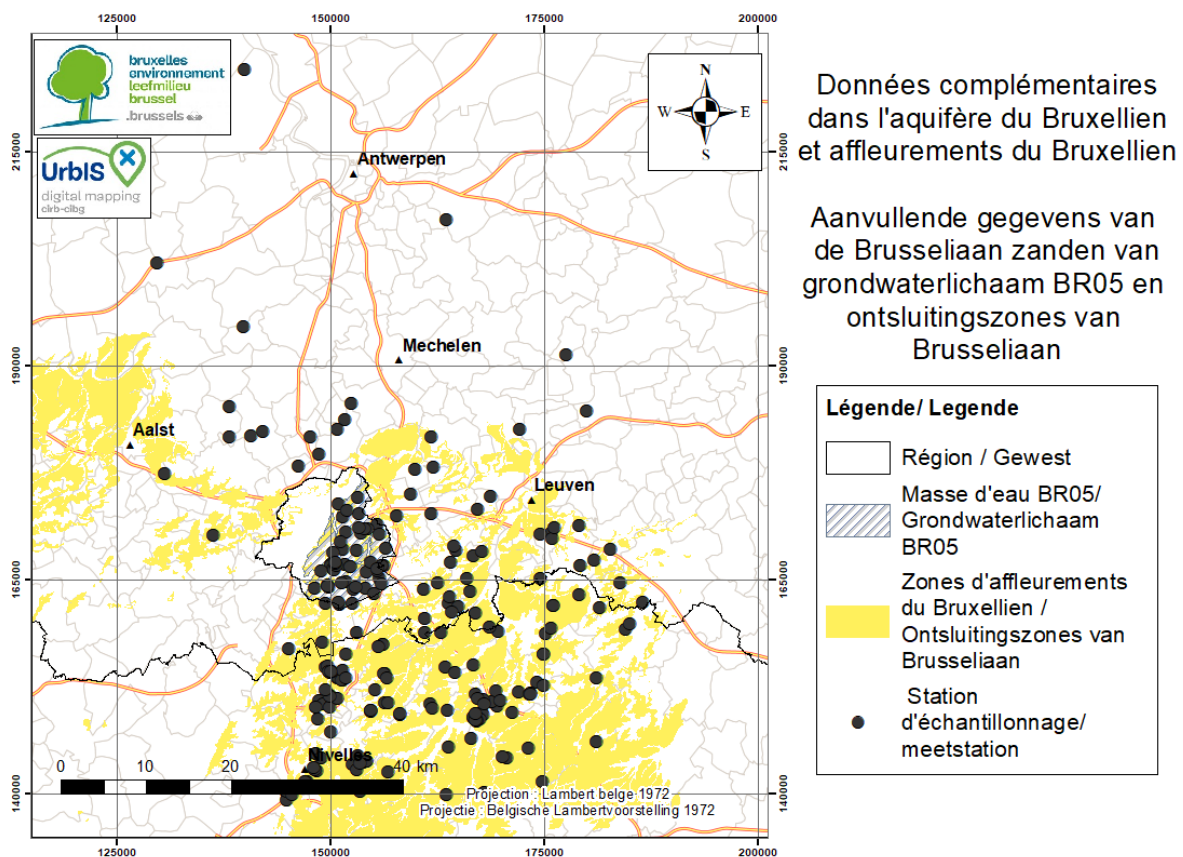


Figure 6-6 : Données complémentaires dans l'aquifère du Bruxellien en Wallonie et en Flandre

6.1.3. Vérification de la qualité des données

6.1.3.1. Correspondance avec la masse d'eau souterraine étudiée

La première étape pour vérifier les données est de vérifier si l'aquifère dans lequel le piézomètre est crépiné, correspond bien à la masse d'eau souterraine qui est étudiée. Le point Collège St Pierre (So1) sera ainsi exclu du jeu de donnée car ce point comprend un mélange d'eau souterraine et d'eau de surface (Liétar A., communication personnelle, 12 juin 2018).

6.1.3.2. Limite de quantification des éléments mineurs et des éléments en trace

Les limites de quantification des principaux éléments mineurs et en traces sont présentées dans le Tableau 6-2. Pour chaque élément, le nombre total d'analyses est indiqué ainsi que le pourcentage de quantifications et la ou les valeurs de limites de quantification. Un même élément peut avoir plusieurs limites de quantification en fonction de la méthode analytique utilisée. De manière générale, les limites de quantification deviennent de plus en plus basses avec le temps au cours de la période concernée par l'étude en fonction de la précision des méthodes analytiques. Il arrive aussi que la limite de quantification varie à cause d'un changement de laboratoire (et donc de méthode analytique).

Paramètres	BR05		RW Bruxellien		RF Bruxellien		valeurs LQ
	Nb analyses	% > LQ	Nb analyses	% > LQ	Nb analyses	% > LQ	
Aluminium (Al) dissous (µg/l)	0	0.0	0	0.0	477	43.61	10, 1, 0.1
Aluminium total (Al) (µg/l)	113	59.3	859	62.6			
Ammonium (mg/l)	1244	8.2	1085	21.8	1080	44.72	0.1, 0.065, 0.06, 0.05, 0.03, 0.02
Arsenic total (As) (µg/l)	346	17.9	880	60.5	810	29.26	5, 1.5, 1, 0.5
Arsenic (dissous) (µg/l)			0	0.0			
Baryum total (Ba) (µg/l)	112	100.0	719	99.9			1
Bicarbonate (mg HCO3-/l)	100	100.0	67	100.0	907	93.16	
Bore total (B) (µg/l)	366	95.9	797	91.8	328	32.93	60, 50, 26, 10, 5, 0.01
Bromure (Br-) (µg/l)	56	98.2	355	86.8			5
Cadmium (Cd) dissous (µg/l)	319	6.6	0	0.0	811	6.78	0.4, 0.3, 0.1, 0.01
Cadmium total (Cd) (µg/l)	346	10.7	907	18.1			
Calcium (Ca) (mg/l)	286	99.3	908	99.9	893	100.00	2
Carbone organique total non purgeable (NPOC) (mg/l)	135	100.0	745	94.5	879	91.47	
Chlorure (mg/l)	359	100.0	1027	100.0	901	99.33	
Chrome total (Cr) (µg/l)	112	41.1	915	76.3	714	28.29	2, 0.5, 0, 01
Cobalt total (Co) (µg/l)	112	28.6	196	29.1	494	9.51	2, 0.1, 0.02
Cuivre total (Cu) (µg/l)	112	47.3	867	65.6	716	11.45	2, 1, 0.01
Fer total (Fe) (µg/l)	296	72.3	28	50.0	891	65.54	50, 10, 5, 0.01
Fer dissous (Fe) (µg/l)			826	58.5	392	56.63	
Fluorure (F-) (µg/l)	137	100.0	938	97.0	484	70.04	
Magnésium (Mg) (mg/l)	123	100.0	897	99.9	897	100.00	
Manganèse total (Mn) (µg/l)	295	52.2	868	52.5	886	49.32	20, 1, 0.5, 0.01
Mercure (Hg) dissous (µg/l)	319	0.0	0	0.0	665	1.05	0.05, 0.03, 0.02
Mercure total (Hg) (µg/l)	346	2.0	748	8.8			
Nickel (Ni) dissous (µg/l)	319	48.3	0	0.0	808	48.39	5, 2, 1
Nickel total (Ni) (µg/l)	338	51.8	914	58.9			
Nitrate (mg/l)	1335	98.1	1100	99.8	1080	86.02	2, 1, 0.9, 0.2, 0.1, 0.09, 0.05
Nitrite (mg/l)	1282	3.7	1085	12.0	1085	32.35	30, 0.07, 0.05, 0.03,

							0.02, 0.0046
Orthophosphates (mg/l de P)	290	97.9	776	73.2	1019	64.08	0.02, 0.0066
Phosphate (PO ₄) ³⁻ (µg/l)	20	65.0	13	69.2	15	60.00	150
Phosphore total (mg P/l)	372	30.1	584	52.7			0.1, 0.5
Plomb (Pb) dissous (µg/l)	319	34.2	0	0.0	714	12.32	5, 3, 0.1, 0.005
Plomb total (Pb) (µg/l)	346	67.6	915	45.6			6, 5, 0.1
Potassium (K) (mg/l)	123	100.0	950	98.1	896	97.43	
Silice (SiO ₂) (mg/l)	0	0.0	633	100.0			
Sodium (Na) (mg/l)	123	100.0	898	100.0	895	100.00	
Strontium (Sr) (mg/l)	106	100.0	513	100.0			
Sulfate (mg/l)	335	100.0	974	100.0	900	99.44	2
Zinc total (Zn) (µg/l)	116	83.6	932	85.1	809	61.56	2

Tableau 6-2 : Limite de quantification des principaux éléments mineurs et en trace de l'aquifère du Bruxellien (Nb = nombre, LQ = limite de quantification)

Pour la Région de Bruxelles-Capitale, les données qui sont présentées sont celles des échantillons prélevés à partir de 2006. Le programme de surveillance a officiellement commencé en 2004 mais c'est à partir de 2006 qu'il est estimé être représentatif.

Les valeurs inférieures à la limite de quantification seront traitées comme recommandé par le projet BRIDGE (Müller, 2006). La valeur de concentration utilisée sera la limite de quantification divisée par 2. Les valeurs de limite de quantification qui sont égales ou supérieures aux normes seront exclues de l'analyse. Les normes considérées sont celles déterminées pour les eaux souterraines de la Région de Bruxelles-Capitale (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles Capitale relatif à la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration, 2010 et sa révision de 2016) et celles de la directive cadre européenne "Eau potable" (CE, 1998) transposée dans l'Arrêté du 24 janvier 2002 relatif à la qualité de l'eau distribuée par réseau (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale, 2002).

Le cadmium, le mercure, l'ammonium et le nitrite qui sont repris dans la liste minimale pour lesquels il faut déterminer une concentration de référence d'après la directive 2006/118/CE (CE, 2006), présentent un pourcentage de quantification très faible. Pour ces paramètres il ne sera pas possible de calculer directement la concentration de référence.

En outre, certains paramètres ne sont pas mesurés de la même manière dans les différentes régions. Pour les métaux, la concentration mesurée est soit la fraction totale soit la fraction dissoute dans les différentes Régions. Il est donc compliqué de comparer ces concentrations en métaux mesurées dans les différentes Régions. Concernant le phosphore, en Région de Bruxelles-Capitale et en Région wallonne, les orthophosphates et le phosphore total (et dans une moindre mesure les phosphates) sont mesurés tandis qu'en Région flamande, il n'y a pas de données de phosphore total.

6.1.3.3. Présence de polluants

Pour déterminer les concentrations de référence, il faut normalement écarter du jeu de données les points qui sont impactés par des contaminations anthropiques. Dans ce travail, les sites impactés ne seront pas écartés de manière systématique. Ils seront conservés pour la suite de l'analyse hydrochimique pour évaluer si la contamination a un impact significatif ou non sur la minéralisation et aussi déterminer s'ils seront utilisés ou non pour le calcul des concentrations de référence.

Le Tableau 6-3, reprend pour les principaux polluants qui sont quantifiés dans l'aquifère du Bruxellien, le nombre d'analyses réalisées et le pourcentage de quantification. Les polluants sont

régulièrement en concentration supérieure aux limites de quantification dans les trois Régions. Il y a principalement des pesticides notamment l'atrazine ainsi que le 2,6 dichlorobenzamide (BAM). Il y a également des solvants chlorés comme le trichloréthylène et le tétrachloroéthylène en Région de Bruxelles-Capitale et en Région Wallonne. Par contre en Flandre il n'y a pas d'information concernant les solvants chlorés.

Paramètres	BR05		RW Bruxellien		RF Bruxellien	
	Nb analyses	% > LQ	Nb analyses	% > LQ	Nb analyses	% > LQ
1,1,1-Trichloroéthane (µg/l)	146	6.8	710	18.9		
1,1,2-Trichloroéthane (µg/l)	113	2.7	678	6.3		
2,6-Dichlorobenzamide (BAM) (µg/l)	588	70.9	837	79.9	50	46.0
Atrazine (µg/l)	636	46.9	1286	85.7	59	30.5
Atrazine déséthyl (µg/l)	631	47.5	1149	93.7	56	55.4
Atrazine desisopropyl (µg/l)	616	57.6	1117	33.9	13	15.4
Bentazone (µg/l)	121	0.0	1097	50.8	56	3.6
Benzène (µg/l)	146	0.7	856	1.6		
Cyanures totaux (µg/l)	89	7.9	629	13.0	56	41.1
Diuron (µg/l)	631	38.5	1281	44.9	56	7.1
Glyphosate (µg/l)	149	6.0	21	0.0	11	0.0
Huiles minérales (totales) (mg/l)	25	0.0	275	41.8		
Naphtalène (µg/l)	118	0.0	420	0.0		
Simazine (µg/l)	635	53.7	1282	42.2	56	25.0
Tétrachloroéthylène (C ₂ Cl ₄) (µg/l)	346	42.8	858	13.5	2	0.0
Toluène (µg/l)	146	3.4	660	12.6		
Trichloroéthylène (C ₂ HCl ₃) (µg/l)	358	34.9	857	24.2	2	0.0

Tableau 6-3 : Pourcentage d'analyses supérieures à la limite de quantification pour certains polluants de l'aquifère du Bruxellien (Nb = nombre, LQ = limite de quantification)

Pour identifier les sites dans lesquels des polluants ont été quantifiés, des cartes avec les concentrations maximales quantifiées par polluant pour chaque station ont été réalisées (Figures 6-7 à 6-14). En Région wallonne, il semble que l'ensemble de la nappe présente des concentrations élevées en nitrate et en pesticides avec plusieurs sites dont les concentrations sont supérieures aux normes. En Région de Bruxelles-Capitale, les polluants sont surtout quantifiés dans la moitié ouest de la masse d'eau BR05. Les polluants présents sont : le nitrate, certains pesticides (atrazine et ses produits de dégradation ainsi que le 2.6 dichlorobenzamide), le trichloréthylène et tétrachloroéthylène. Dans la Région flamande, encore une fois il y a moins d'informations sur les polluants à l'exception de la concentration en nitrate. Celle-ci est généralement élevée dans le sud de la région et faible dans la partie captive située au nord.

L'origine de la pollution n'est vraisemblablement pas la même dans les différentes Régions. Dans les Régions flamande et wallonne, il s'agit plutôt d'une pollution liée aux pratiques agricoles. En Région de Bruxelles-Capitale les fortes concentrations en nitrates seraient plutôt liées aux eaux usées (De Coster & Vanclooster, 2013). Les pesticides qui sont retrouvés à Bruxelles sont principalement à usage non agricole, privé ou public et il s'agit de substances interdites depuis plusieurs années. Leur présence dans les eaux souterraines serait liée à une pollution historique suite à un usage passé ou de l'usage prohibé d'anciens stocks de produits phytosanitaires disponibles (Bruxelles Environnement, 2017). A Bruxelles, l'aquifère des sables Bruxellien est également contaminé par des solvants chlorés (tétrachloroéthylène). Ce type de produit a des usages multiples : nettoyage à sec, peinture et pour le décapage des surfaces métalliques. A cause du manque de données de

monitoring anciennes, il est difficile de déterminer si les pollutions sont récentes ou bien anciennes (Bruxelles Environnement, 2017).

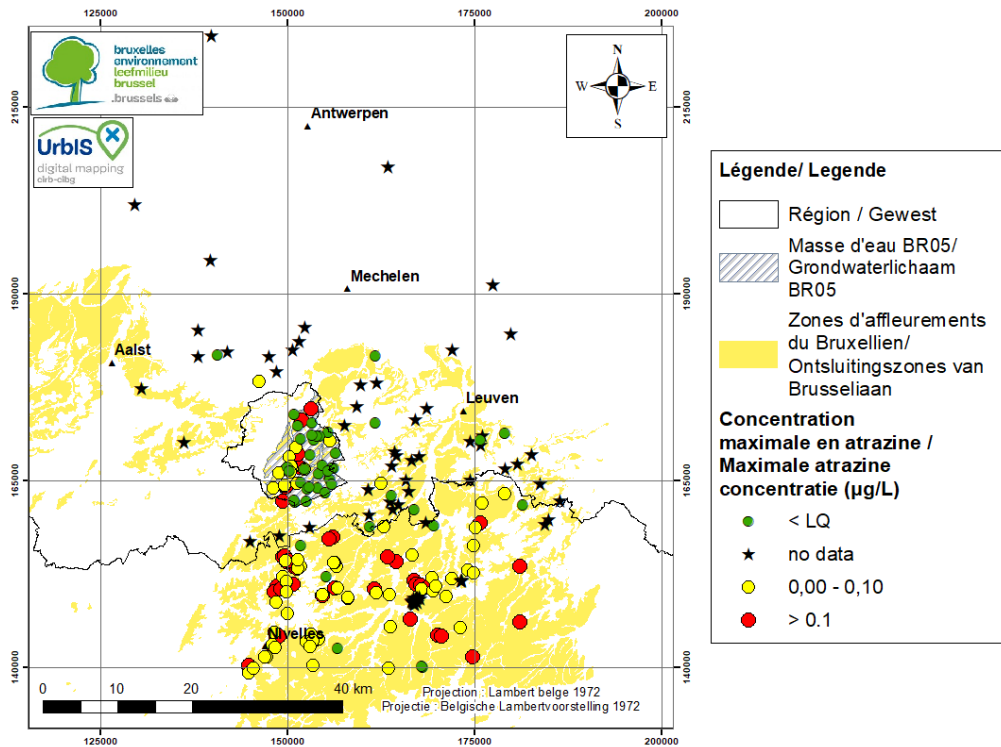


Figure 6-7 : Concentration maximale en atrazine dans l'aquifère du Bruxellien

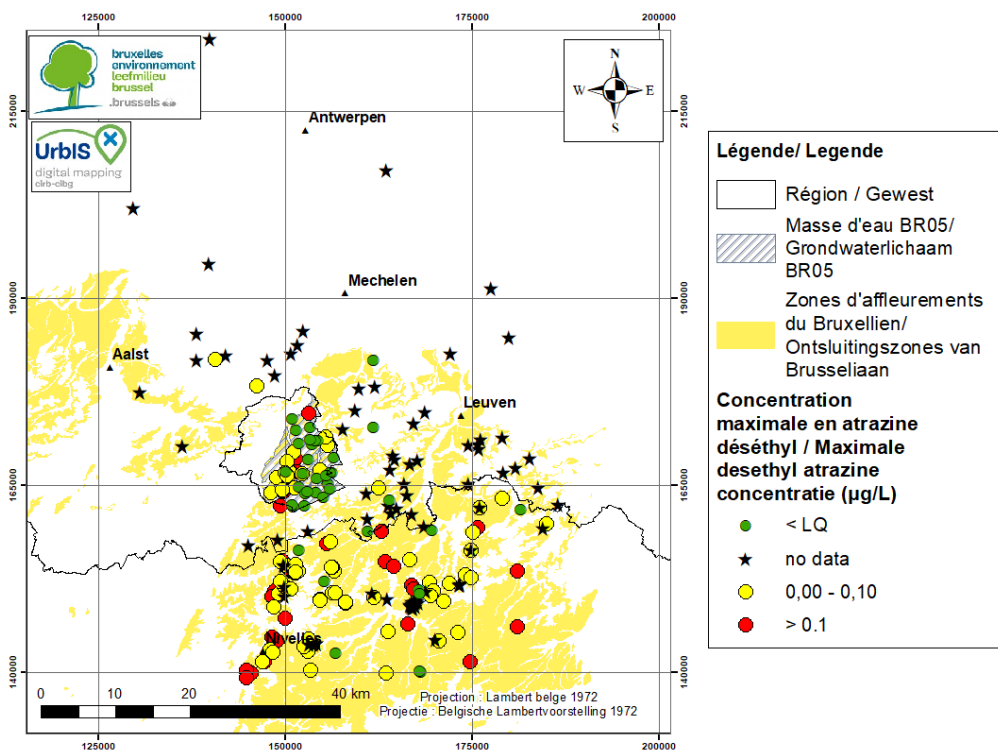


Figure 6-8 : Concentration maximale en atrazine déséthyl dans l'aquifère du Bruxellien

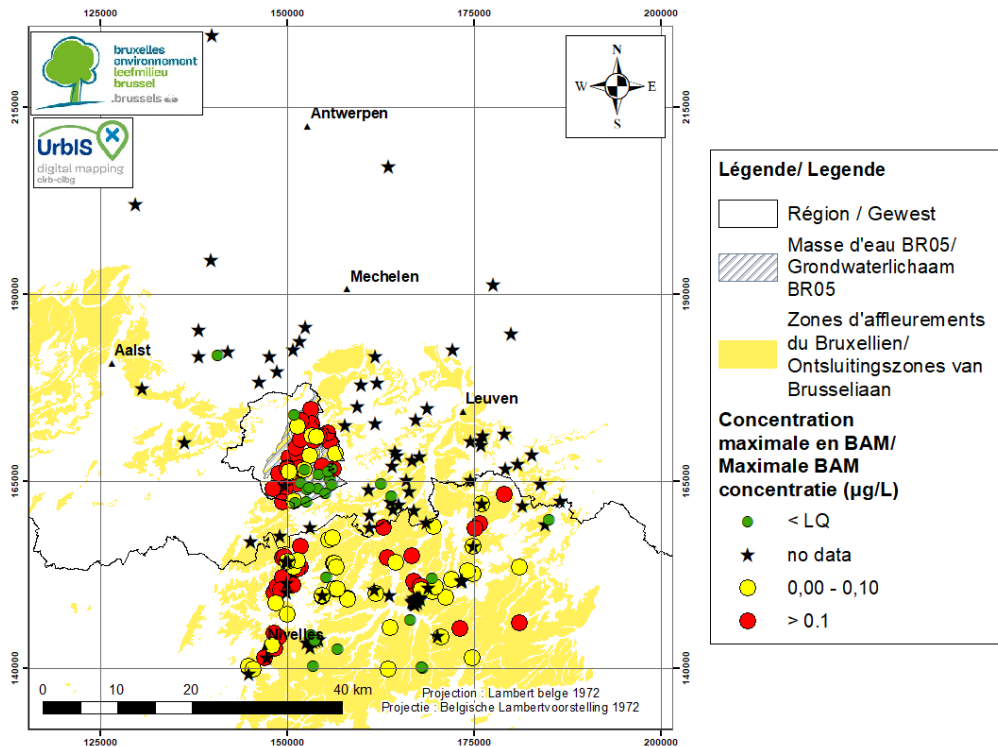


Figure 6-9 : Concentration maximale en BAM (2,6-dichlorobenzamide) dans l'aquifère du Bruxellien

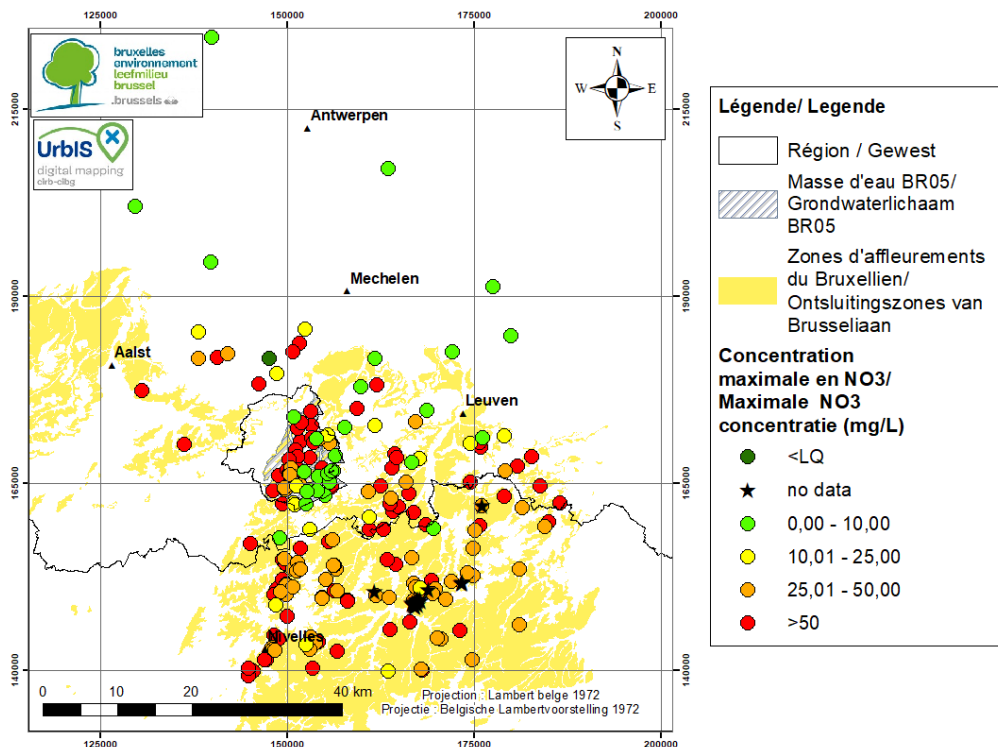


Figure 6-10 : Concentration maximale en nitrate dans l'aquifère du Bruxellien

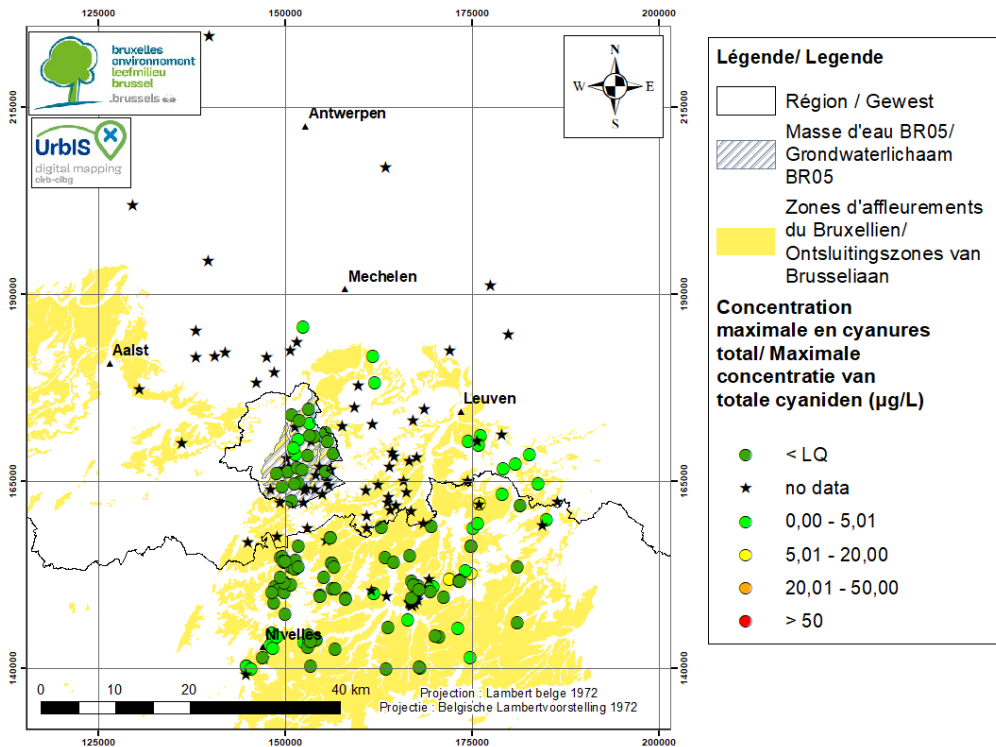


Figure 6-11 : Concentration maximale en cyanures totaux dans l'aquifère du Bruxellien

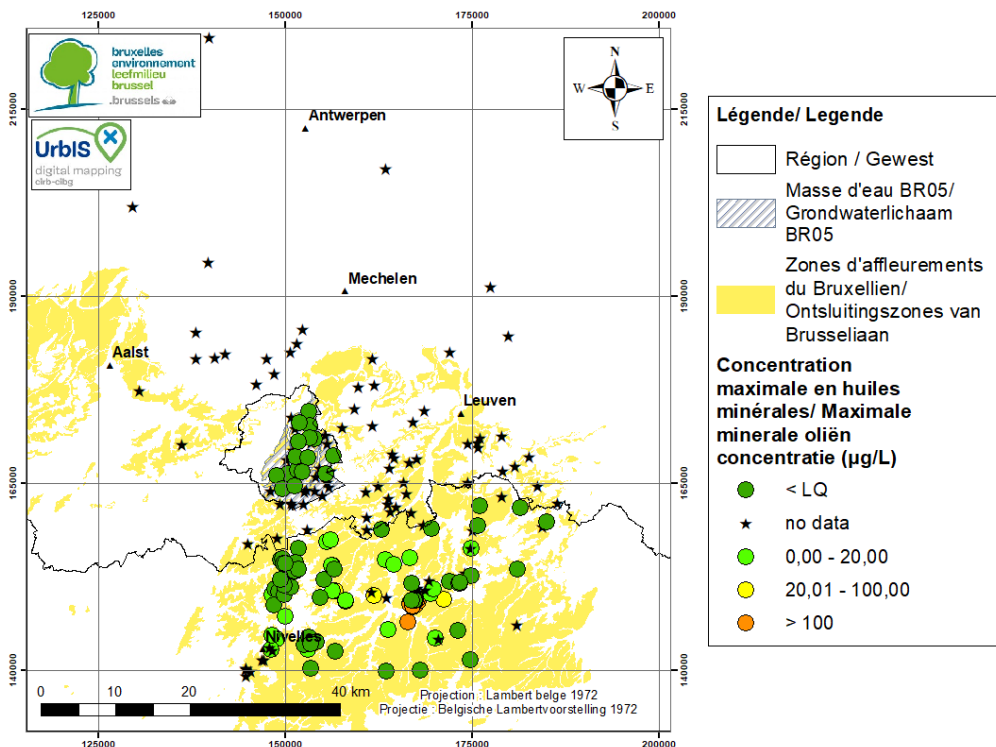


Figure 6-12 : Concentration maximale en huiles minérales dans l'aquifère du Bruxellien

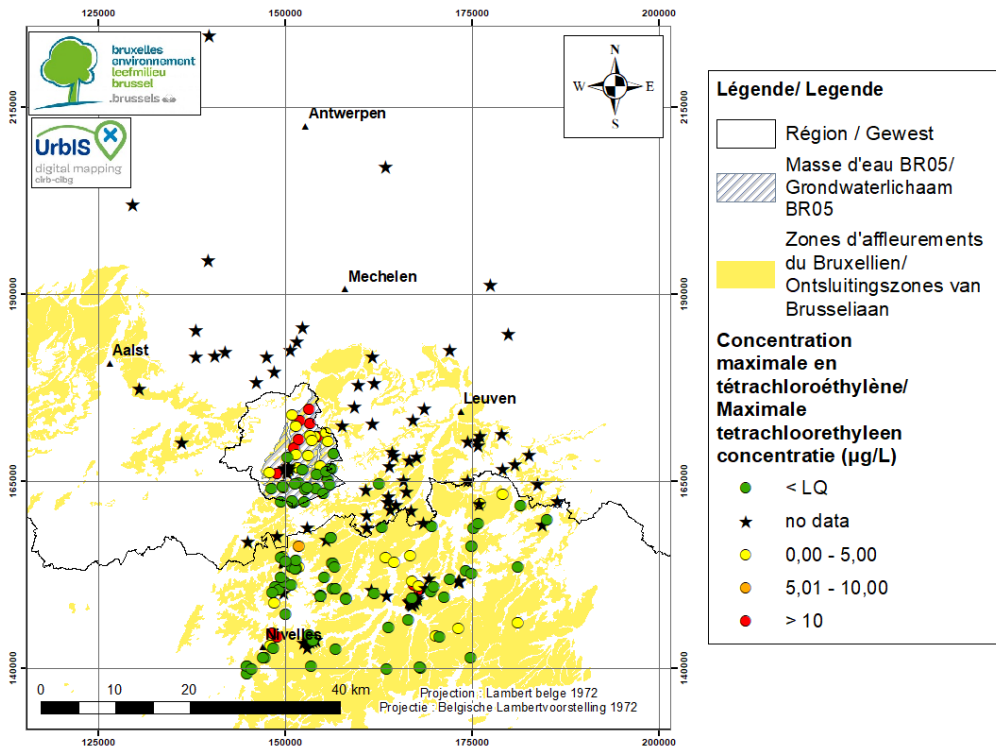


Figure 6-13 : Concentration maximale en tétrachloroéthylène dans l'aquifère du Bruxellien

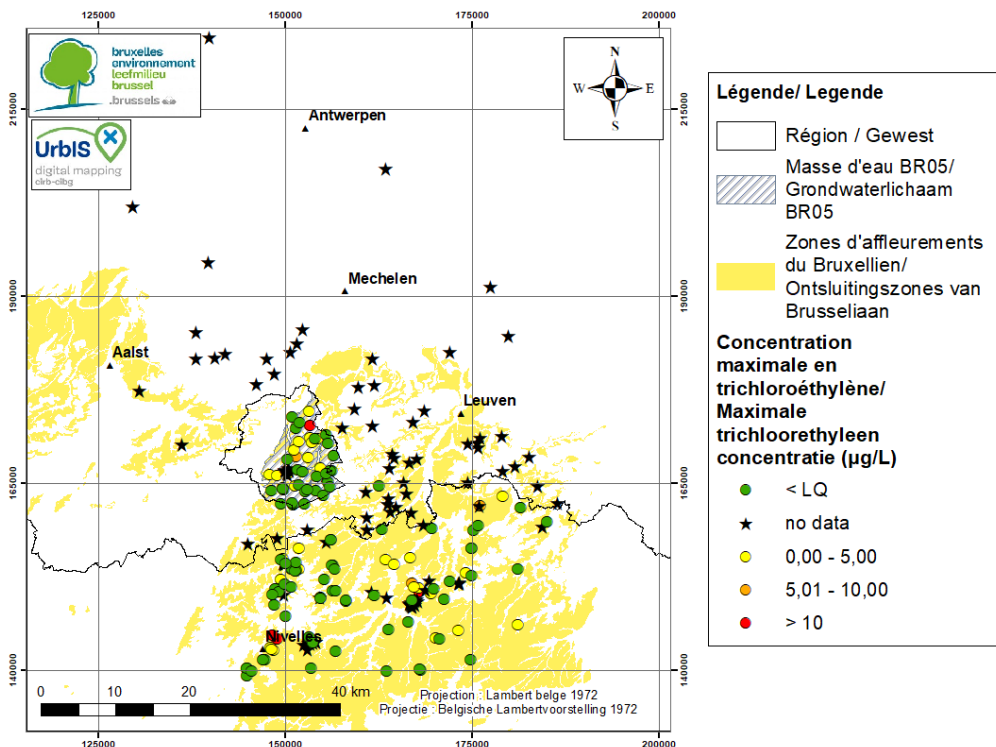


Figure 6-14 : Concentration maximale en trichloroéthylène dans l'aquifère du Bruxellien

6.1.3.4. Balance ionique

La balance ionique a été calculée pour chaque échantillon (Tableau 6-4). Un certain nombre d'échantillons présentent des balances ioniques supérieures à 10 % ou inférieures à -10 %. Ces balances ioniques qui sortent de l'intervalle de confiance sont quasi exclusivement liées à des

analyses incomplètes, l'ensemble des éléments majeurs n'a pas été analysé. Ces analyses incomplètes n'ont pas été systématiquement exclues de l'analyse. Pour vérifier la qualité des données, la balance ionique est ensuite recalculée à partir de la médiane des concentrations de chaque élément pour chaque station. Pour la Région de Bruxelles-Capitale, moins de la moitié (46%) des stations d'échantillonnage ont une balance ionique 'médiane' comprise entre -10% et 10% étant donné que ces sites de surveillance font partie de la surveillance opérationnelle de la masse d'eau qui a pour objectif de ne suivre que les paramètres polluants présentant un risque qualitatif pour la masse d'eau. Pour ces stations, l'ensemble des éléments majeurs n'a même pas été mesuré une seule fois. En Région wallonne seulement 34% des sites ont une balance ionique 'médiane' dans l'intervalle de confiance et 92% des sites en Région flamande. La localisation des sites avec leur balance ionique est représentée à la Figure 6-15. Celles en vert ont une balance ionique dans l'intervalle de confiance et celle en rouge non.

Pour les données de Flandre et de Wallonie, comme il s'agit de données complémentaires et qu'il y a un nombre relativement important de stations dans l'aquifère du Bruxellien, il est proposé de sélectionner uniquement ceux avec une balance ionique dans l'intervalle de confiance : c'est-à-dire 41 stations en Région wallonne et 56 stations en Région flamande. Par contre les données de la Région de Bruxelles-Capitale seront conservées pour la suite de l'étude, parce qu'elles sont situées dans la zone étudiée et en plus, il s'agit des sites qui semblent le moins impactés par des contaminations anthropiques (Forêt de Soigne).

	Région de Bruxelles-Capitale	Région wallonne	Région flamande
Nombre d'analyses	1410	1724	1107
Pourcentage des analyses avec $-10\% < BI < 10\%$	7	36	76
Nombre de stations d'échantillonnage	50	121	61
Pourcentage des stations d'échantillonnage avec $-10\% < BI \text{ (médiane)} < 10\%$	46	34	92
Nombre des stations d'échantillonnage avec $-10\% < BI \text{ (médiane)} < 10\%$	23	41	56

Tableau 6-4 : Calcul de la balance ionique des échantillons de l'aquifère du Bruxellien (Nb = nombre, BI = balance ionique)

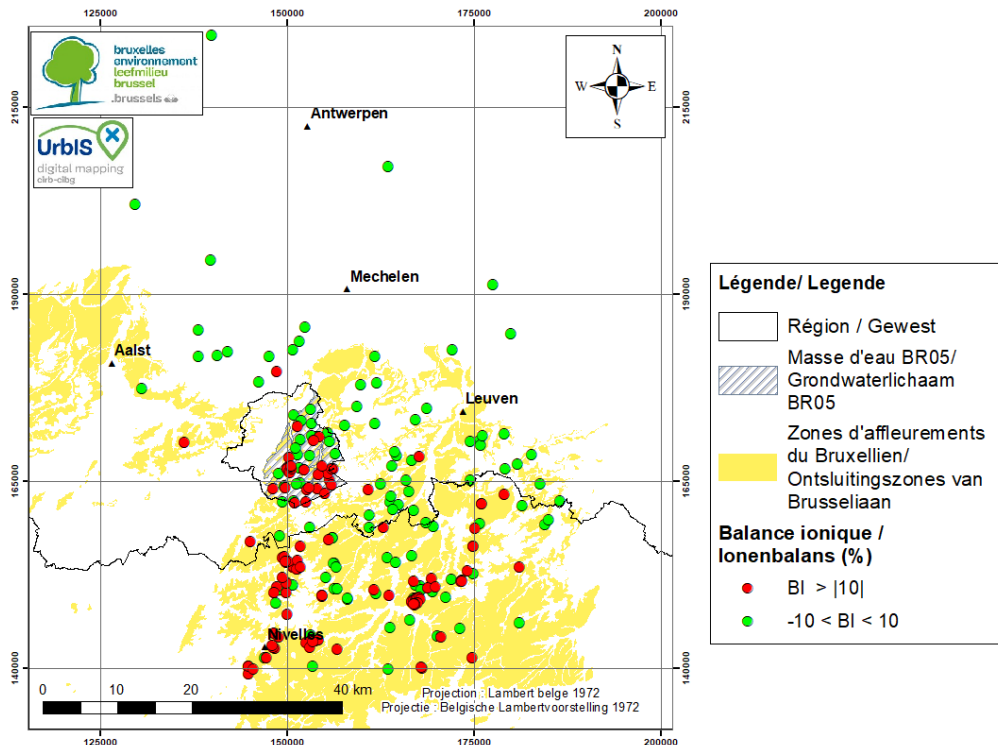


Figure 6-15 : Erreur sur la balance ionique de la médiane des échantillons de l'aquifère du Bruxellien

6.2. Etude des processus chimiques influençant la composition géochimique des eaux souterraines

6.2.1. Faciès hydrochimiques : diagramme de Piper

Les échantillons de l'aquifère du Bruxellien sont représentés dans un diagramme de Piper à la Figure 6-16. Dans le cas où il aurait eu plusieurs échantillonnages, c'est la médiane des concentrations qui est utilisée. Les échantillons de l'aquifère du Bruxellien appartiennent principalement aux faciès bicarbonaté calcique et chloruré calcique mais quelques échantillons appartiennent également aux faciès bicarbonaté sodique et potassique et chloruré sodique et potassique.

Au sein des faciès bicarbonatés calcique et chloruré calcique, il est possible de constater une certaine gradation. A priori les eaux avec une faible proportion en SO_4 , Cl et NO_3 ne semblent pas trop impactées par une contamination anthropique contrairement aux eaux avec une proportion plus importante de SO_4 , Cl et NO_3 . Cette position dans le diagramme de Piper pourrait également être liée à une intrusion d'eau marine mais au vu des fortes concentrations en nitrates et de la position des sites, il s'agit plutôt d'une contamination. La limite entre les faciès bicarbonatés calcique et chloruré calcique ne signifie pas qu'uniquement les eaux chlorurées calciques sont impactées par une contamination anthropique. Les eaux bicarbonatées calciques avec une proportion élevée en SO_4 , Cl et NO_3 sont probablement impactées aussi. Uniquement sur base du diagramme de Piper, il n'est donc pas possible de déterminer les eaux qui sont impactées et celles qui ne le sont pas.

Le diagramme de Piper montre qu'il y a une évolution depuis les eaux douces (bicarbonatées calciques) vers les eaux bicarbonatées sodiques et potassiques et les eaux chlorurées sodiques et potassiques. Dans le diagramme des cations, il y a une augmentation des proportions de sodium et potassium et une diminution de la proportion en calcium (même s'il y a ce phénomène est beaucoup

moins évident que pour l'aquifère du Socle). D'après Appelo et Postma (2005), une évolution des eaux douces (bicarbonatées calcique et magnésienne) vers des eaux bicarbonatées sodique et potassique voir chlorurées sodique et potassique reflète un phénomène naturel de rafraîchissement (repoussée des eaux salées par des eaux douces).

Les différents faciès des échantillons sont représentés spatialement à la Figure 6-17. La majorité des sites de prélèvement sont de type bicarbonaté calcique ou chloruré calcique dans le cas d'une eau fortement impactée par une contamination anthropique. L'aquifère du Bruxellien est principalement un aquifère libre. Il est donc logique de trouver des eaux de type bicarbonaté calcique ou chloruré calcique qui correspondent à des eaux jeunes. Plus au Nord, en Région flamande, là où la nappe devient captive, les eaux évoluent vers des faciès bicarbonatés sodique et potassique et des faciès chlorurés sodique et potassique. Contrairement aux autres aquifères (Socle et Yprésien) cela concerne seulement quelques sites et la zone de transition entre ces eaux jeunes et anciennes est plus éloignées de la Région de Bruxelles-capitale vers le Nord (>20km).

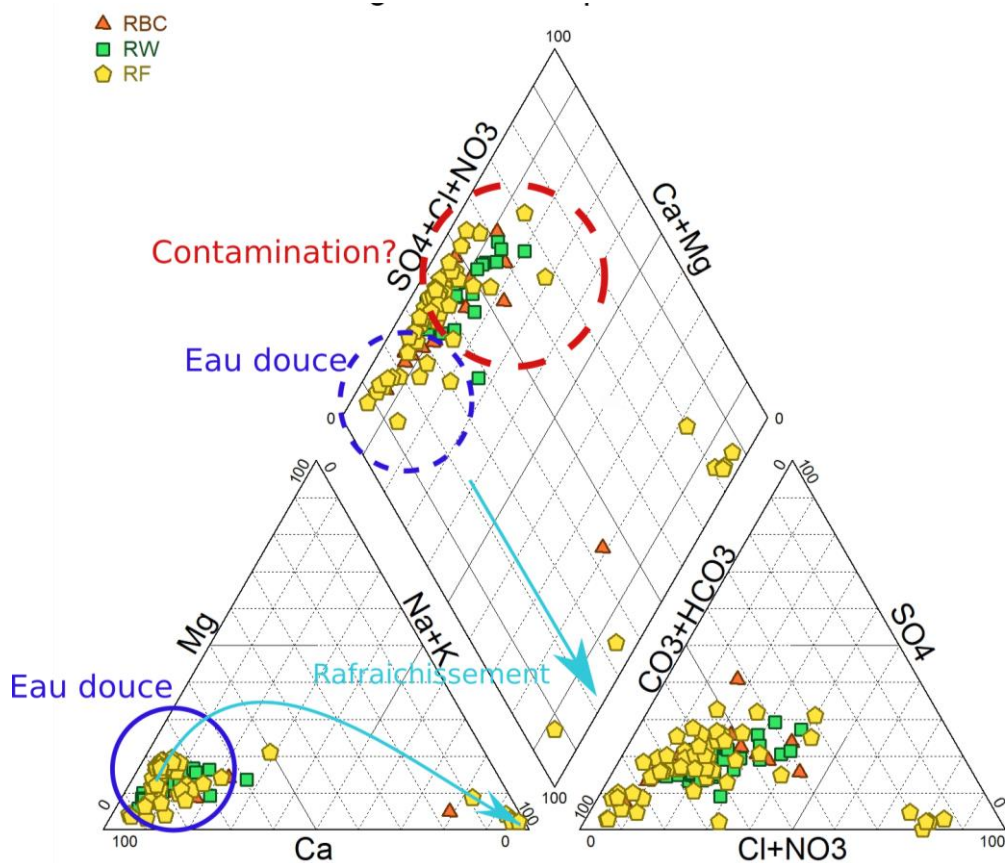


Figure 6-16 : Représentation des échantillons de l'aquifère du Bruxellien (médiane) dans un diagramme de Piper

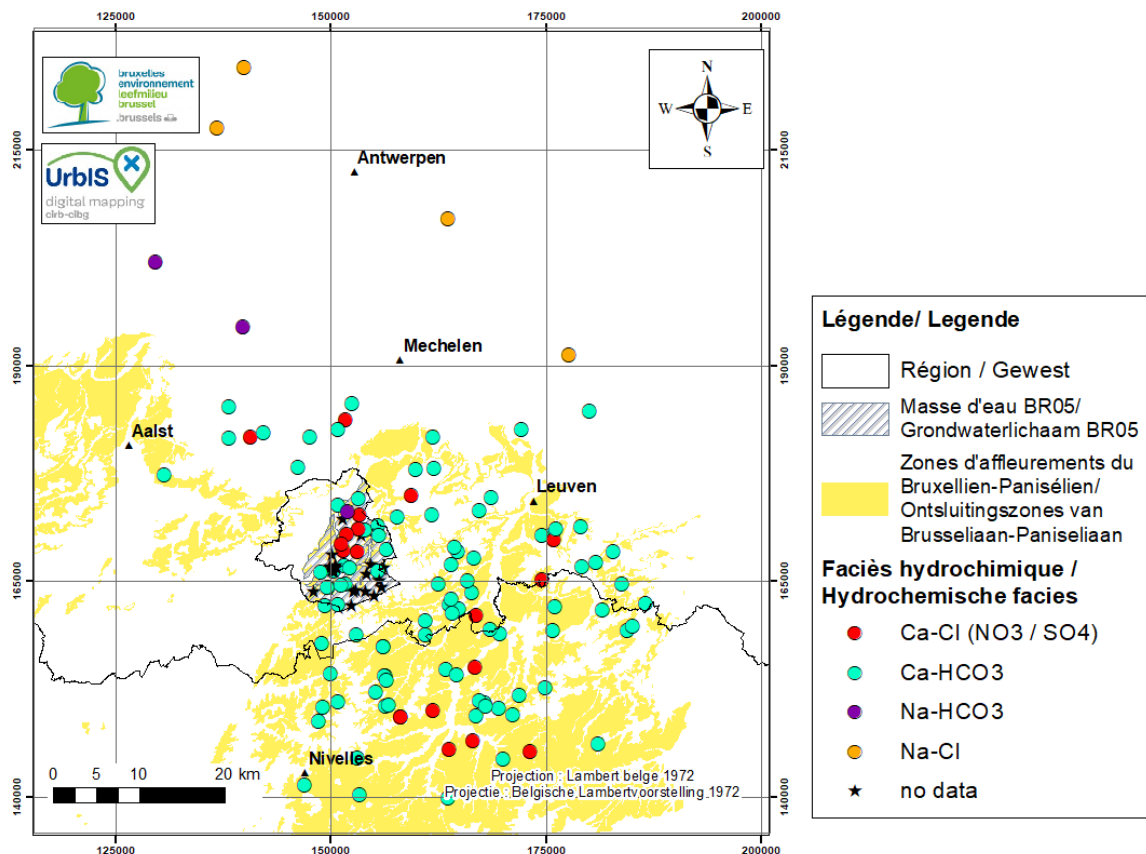


Figure 6-17 : Répartition spatiale des types de faciès hydrochimiques de l'aquifère du Bruxellien, no data signifie que l'ensemble des éléments majeurs n'a pas été mesuré pour le site et qu'il n'est possible de le situer dans le diagramme de Piper.

6.2.2. Variations spatiales des paramètres

Les Figures 6-18 à 6-38 présentent les distributions spatiales des principaux paramètres physico-chimiques, des éléments majeurs et de certains éléments mineurs, à savoir la conductivité électrique de l'eau, le pH, et les concentrations en O₂ dissous, Ca, Cl, HCO₃, Mg, Na, K, SO₄, NO₃, NH₄, Fe, Mn, F, As, Zn, B, Pb, Cu, Ni.

La conductivité électrique moyenne varie principalement entre 400 et 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la partie libre de l'aquifère du Bruxellien. La partie ouest de la masse d'eau BR05 en région de Bruxelles-Capitale présente une conductivité plus élevée que 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, c'est également le cas de la partie nord de l'aquifère qui est captive. Le pH est neutre dans la majeure partie de l'aquifère sauf au nord où le pH devient basique. Les valeurs de concentrations en O₂ dissous sont élevées dans le sud de l'aquifère et diminuent vers le nord. Les valeurs de concentrations en Ca sont généralement élevées au sud (entre 100 et 200 mg/L) et faibles dans la partie captive (< 50 mg/L). Les concentrations en Cl varient entre 25 et 100 mg/L dans la partie libre de l'aquifère sauf dans la partie sud de Bruxelles (forêt de Soignes) et certains sites dans la partie nord de la zone libre où les concentrations sont inférieures à 25 mg/L. Dans la partie nord de l'aquifère (zone captive), les concentrations en Cl sont supérieures à 100 mg/L. Les valeurs de concentrations en HCO₃ sont généralement moyennes ou faibles sauf à l'extrémité nord de la zone. Les valeurs de concentrations en Mg sont variables sur l'ensemble de la zone (entre 0 et 35 mg/L). Les valeurs de concentrations en Na sont globalement faibles (<25 mg/L) dans la partie libre de l'aquifère sauf à l'ouest de la masse d'eau BR05 en Région de Bruxelles Capitale où les valeurs sont moyennes à élevées et dans la partie captive où les valeurs sont élevées (> 100 mg/L). Les valeurs de concentrations en K sont faibles au sud (< 5mg/L) et

deviennent élevées dans la partie captive (> 12 mg/L). Les valeurs de concentrations en SO_4 sont variables dans la partie libre de l'aquifère (entre 0 et 150 mg/L). En région de Bruxelles-Capitale, les sites qui présentent des valeurs élevées en sulfate (> 80 mg/L) sont situés à l'ouest de la masse d'eau là où les sites ont déjà été identifiés comme contaminés. Dans la partie captive, la concentration en sulfate est plus faible. Les valeurs de concentrations en NO_3 sont généralement élevées dans la partie libre de l'aquifère et même souvent supérieures aux normes de potabilité (> 50 mg/l) sauf dans la partie sud de la région de Bruxelles-Capitale, et la partie nord de l'aquifère. Les valeurs de concentrations en NH_4 sont majoritairement faibles (< 0.1 mg/L) dans la partie libre et élevées dans la partie captive (> 0.25 mg/L). Les valeurs de concentrations en Fe et Mn sont assez variables mais une augmentation des concentrations semble observée vers le nord. Les concentrations en F sont plus élevées au nord (> 0.5 mg/L) qu'au sud (< 0.5 mg/L). La concentration en As est faible sur toute la zone. La concentration en Zn est généralement faible (< 20 $\mu\text{g/L}$) à l'exception de la partie ouest de l'aquifère en Région de Bruxelles-capitale et quelques sites en région wallonne. La concentration en B est généralement faible dans la partie libre (> 50 $\mu\text{g/L}$) sauf certains sites en Région de Bruxelles-Capitale. Dans la partie captive de l'aquifère, les valeurs de B sont élevées. La concentration en Pb semble légèrement augmenter du sud vers le nord et il y a également quelques sites épars, dont certains en Région de Bruxelles-Capitale, avec des valeurs élevées. Les concentrations en Cu et Ni sont relativement faibles sur l'ensemble de la zone mais il y a quelques sites épars notamment à Bruxelles, avec des valeurs plus élevées.

Pour de nombreux paramètres, y a une grande différence entre le sud et le nord de l'aquifère, entre la partie libre et captive. La région de Bruxelles-Capitale se situe dans la partie libre de l'aquifère. La répartition spatiale des faciès, établis par le diagramme de Piper, avait déjà permis de mettre en évidence une différence de minéralisation entre le Nord et le Sud de l'aquifère. Les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes du Sud, ont des concentrations plus élevées en Ca, un pH relativement neutre, une concentration plus faible en Na, K, Cl, B et F. Pour les eaux bicarbonatées sodiques et potassiques et les eaux chlorurées sodiques et potassiques au Nord, le pH est basique et un comportement inverse pour les concentrations en Na, K, Cl, B et F est observé. Ces évolutions conjointes du Ca, Na, K sont typiques d'un phénomène de chromatographie ionique associés aux échanges cationiques qui se produisent lors du retrait des eaux marines d'un aquifère (Appelo et Postma 2005). Au sud, on observe donc vraisemblablement des eaux de recharge assez récentes et au Nord des eaux marines plus anciennes.

En plus de ce processus de rafraîchissement, les réactions d'oxydoréduction influencent également la minéralisation des eaux souterraines. Dans la partie libre, les concentrations en O_2 dissous sont généralement élevées et elles diminuent progressivement vers le Nord, suivant l'écoulement souterrain. Les concentrations en O_2 dans l'aquifère du Bruxellien sont plausibles mais cela a déjà été discuté pour les autres aquifères, il est probable que les mesures réalisées en ne soient pas toujours fiables (purge insuffisamment longue ? Non-contrôle des échanges avec l'atmosphère ? Calibration de la sonde ?).

La concentration en NO_3 est généralement élevée dans la partie libre de l'aquifère à l'exception e zones avec moins de pressions anthropiques comme la forêt de Soignes. Et la concentration en nitrate diminue vers le nord de la zone (dans la partie captive). La concentration en NH_4 faible dans la partie libre et élevée dans la partie captive. Les teneurs en Fe et en Mn sont assez variables mais semblent plus élevées à la zone de transition entre la partie libre et la partie captive. Les

concentrations en métaux sont généralement assez faibles sur l'ensemble de la zone, les concentrations élevées ne semblent pas liées à l'évolution des conditions redox à l'exception du plomb dont les concentrations sont un peu plus élevées en zone captive.

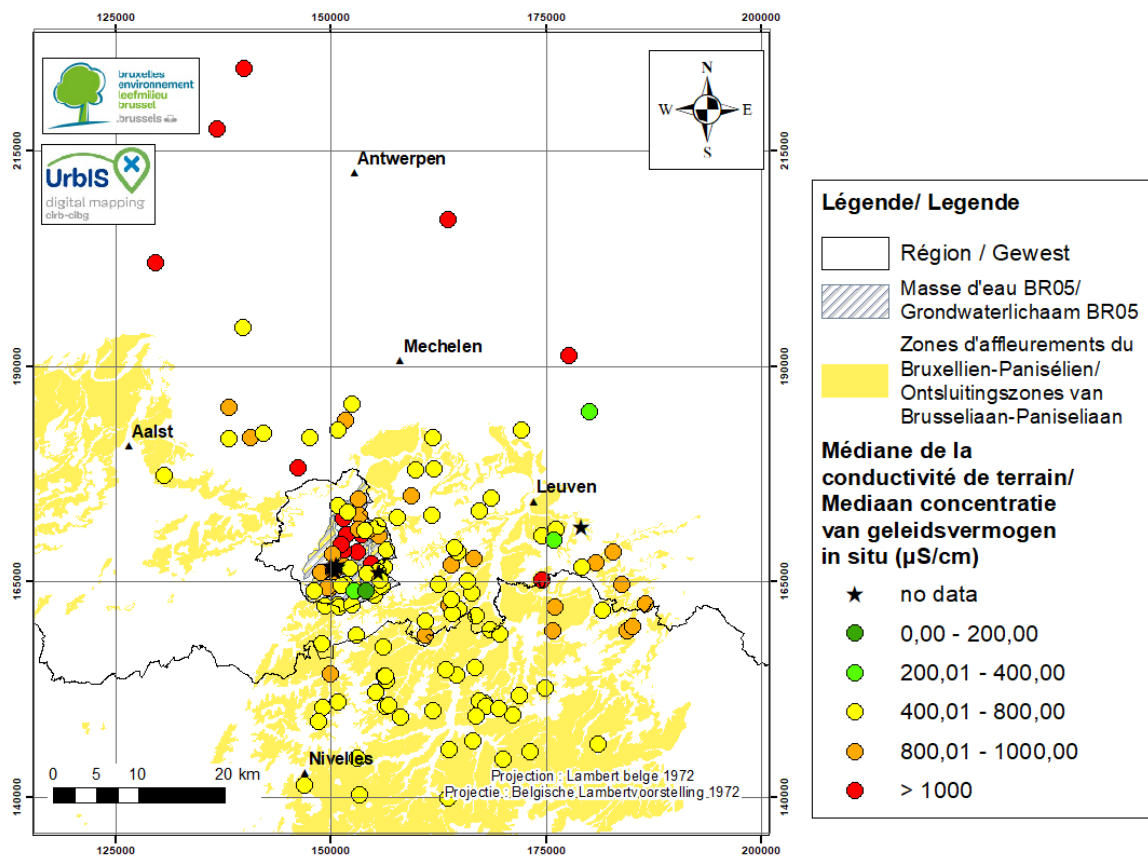


Figure 6-18 : Répartition spatiale de la conductivité de terrain (µS/cm) dans l'aquifère du Bruxellien

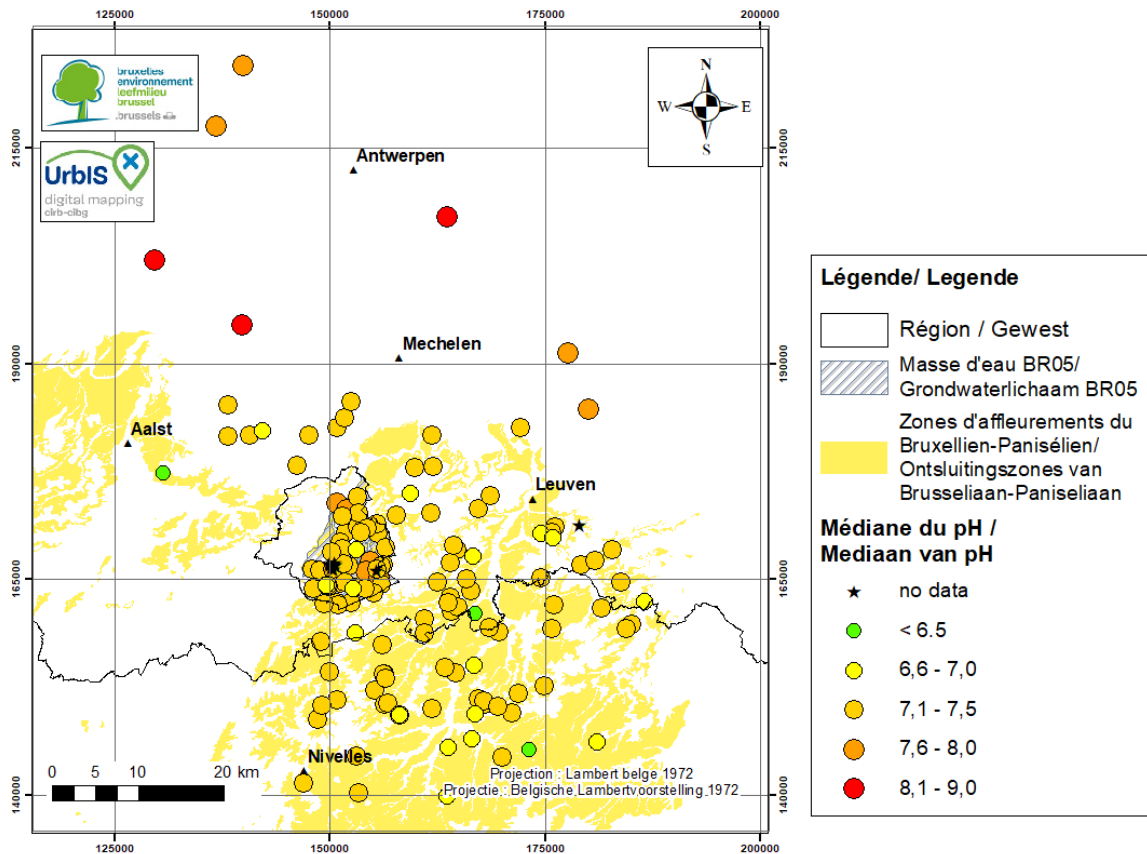


Figure 6-19 : Répartition spatiale du pH dans l'aquifère du Bruxellien

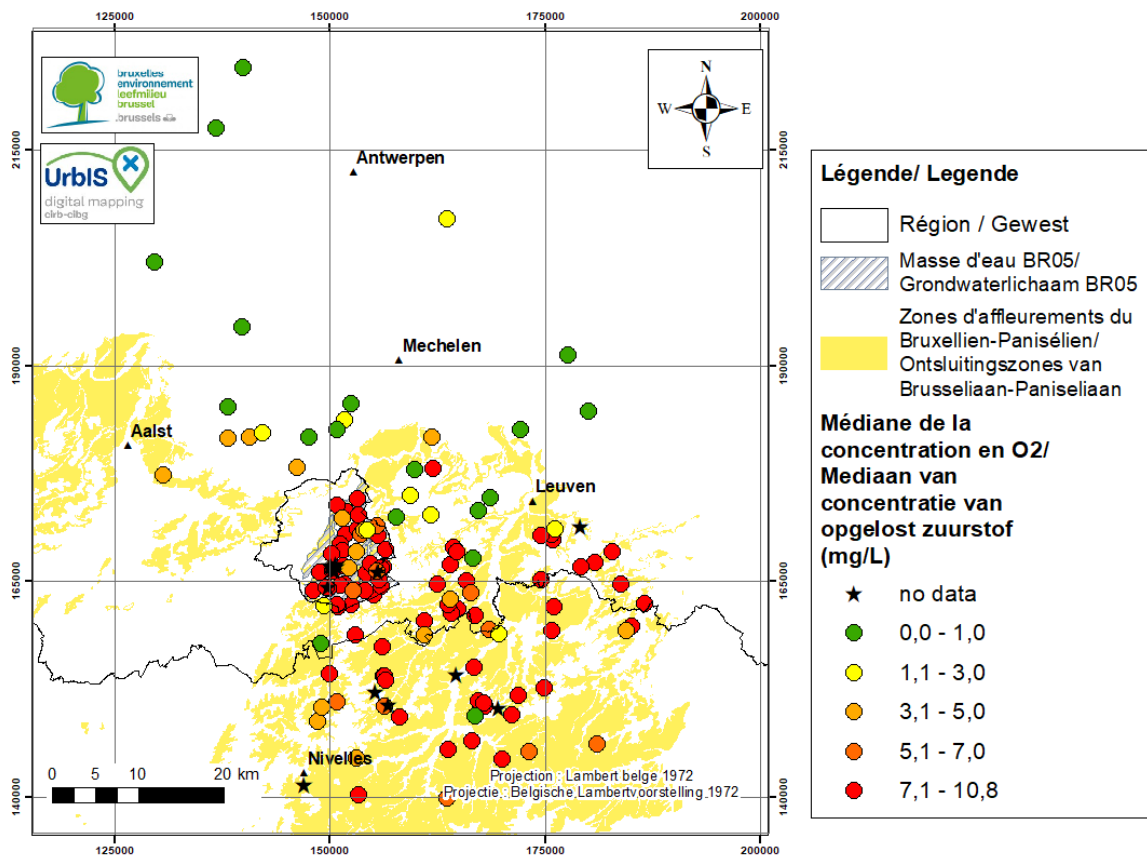


Figure 6-20 : Répartition spatiale de la concentration en O2 dissous dans l'aquifère du Bruxellien

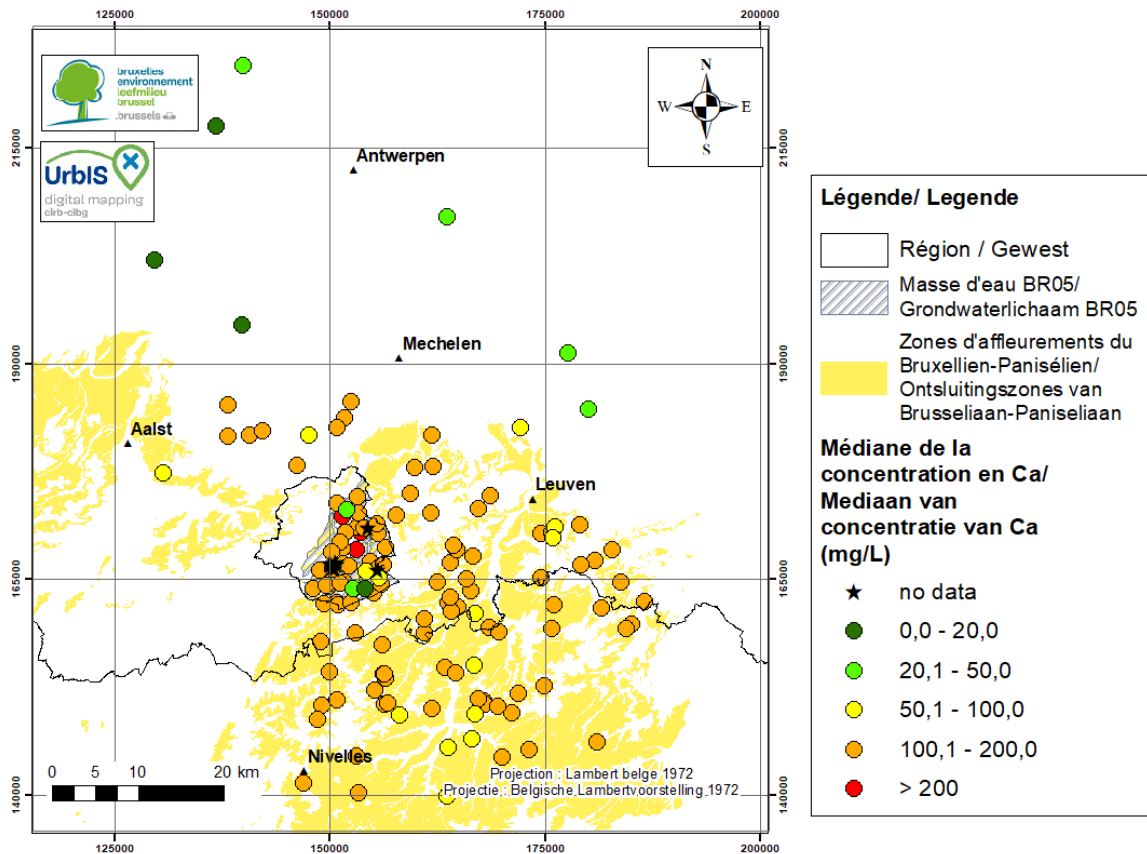


Figure 6-21 : Répartition spatiale de la concentration en Ca dans l'aquifère du Bruxellien

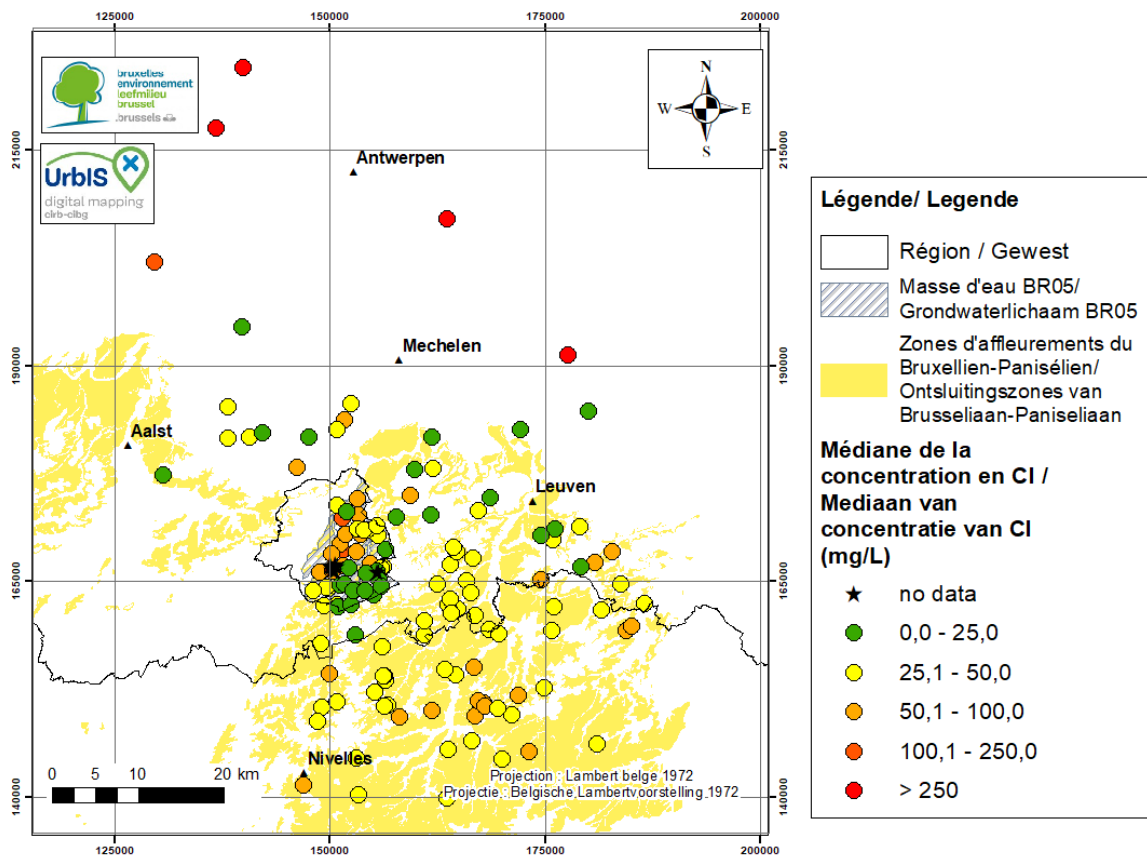


Figure 6-22 : Répartition spatiale de la concentration en Cl dans l'aquifère du Bruxellien

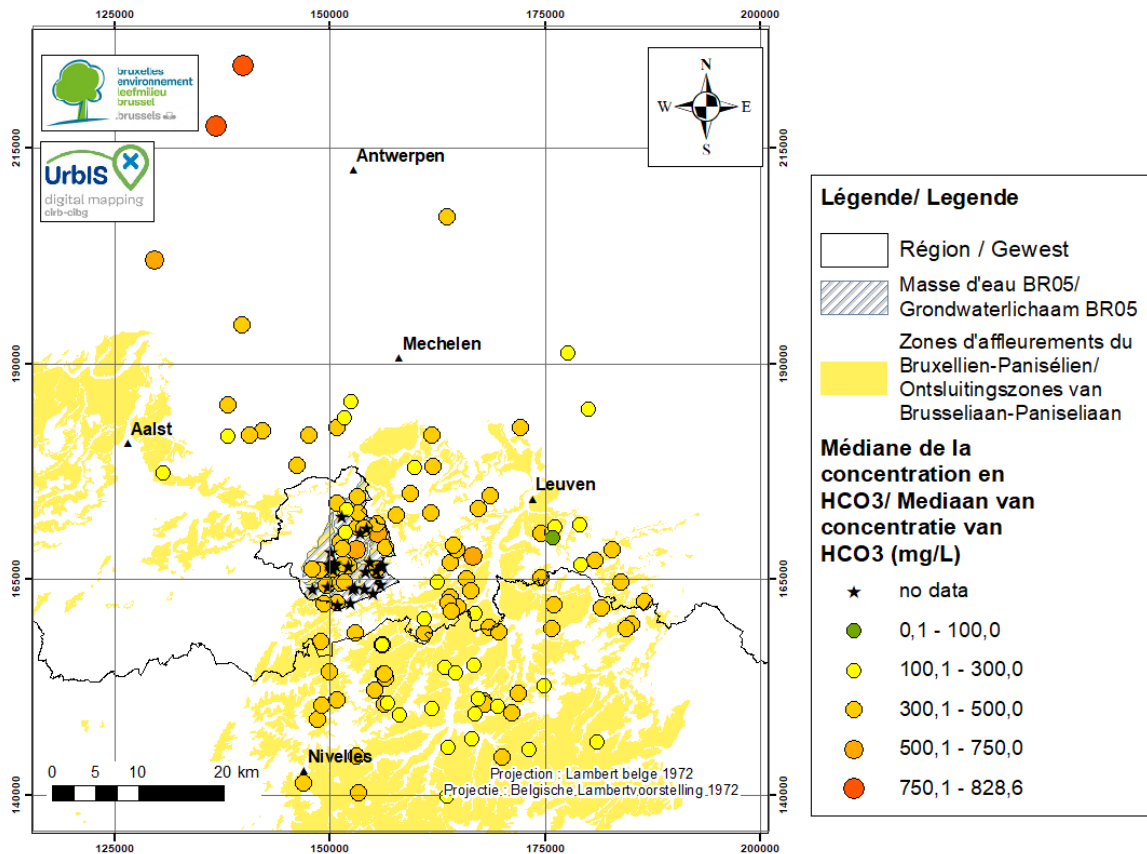


Figure 6-23 : Répartition spatiale de la concentration en HCO₃ dans l'aquifère du Bruxellien

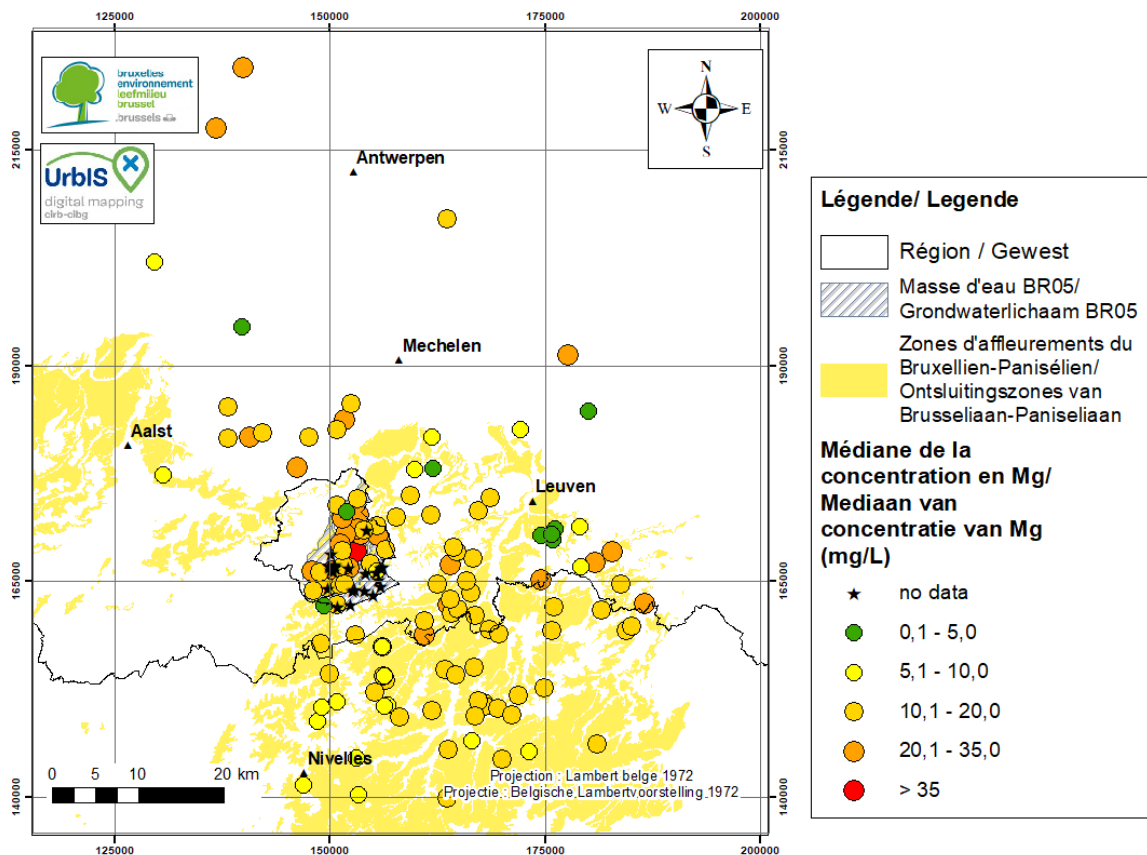


Figure 6-24 : Répartition spatiale de la concentration en Mg dans l'aquifère du Bruxellien

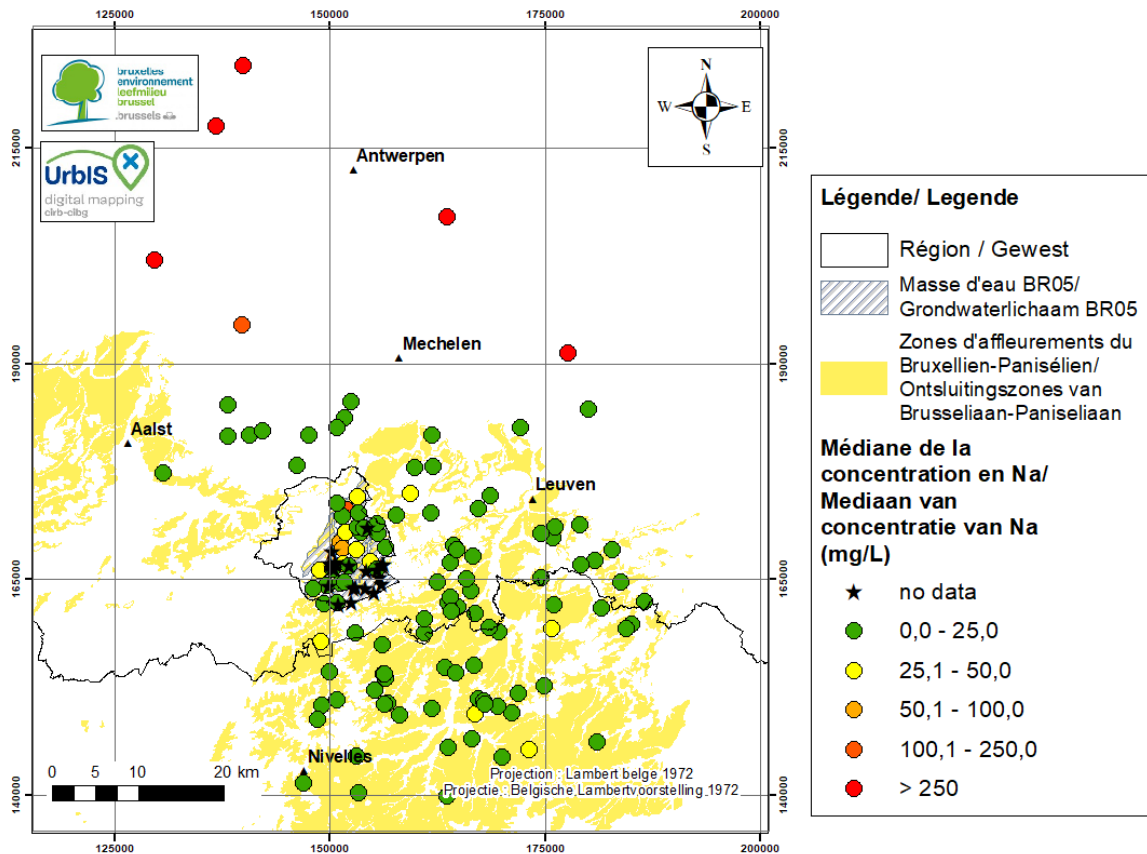


Figure 6-25 : Répartition spatiale de la concentration en Na dans l'aquifère du Bruxellien

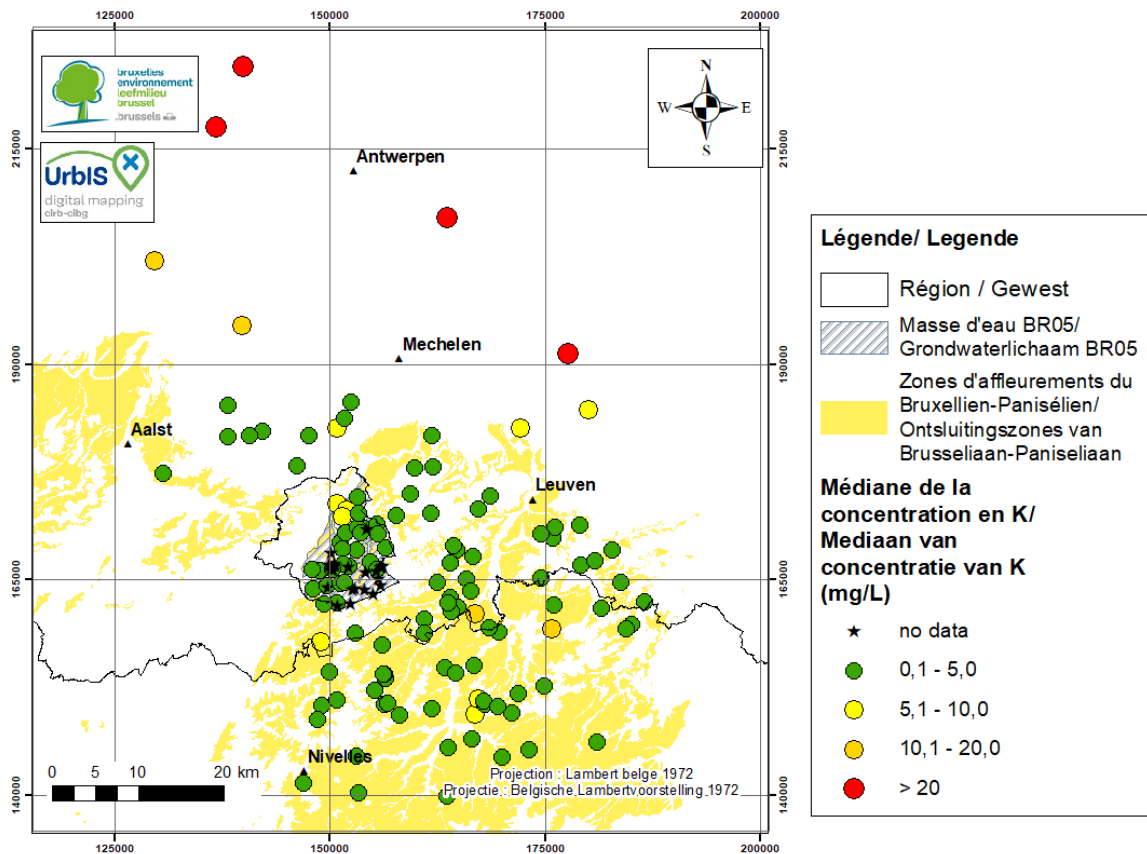


Figure 6-26 : Répartition spatiale de la concentration en K dans l'aquifère du Bruxellien

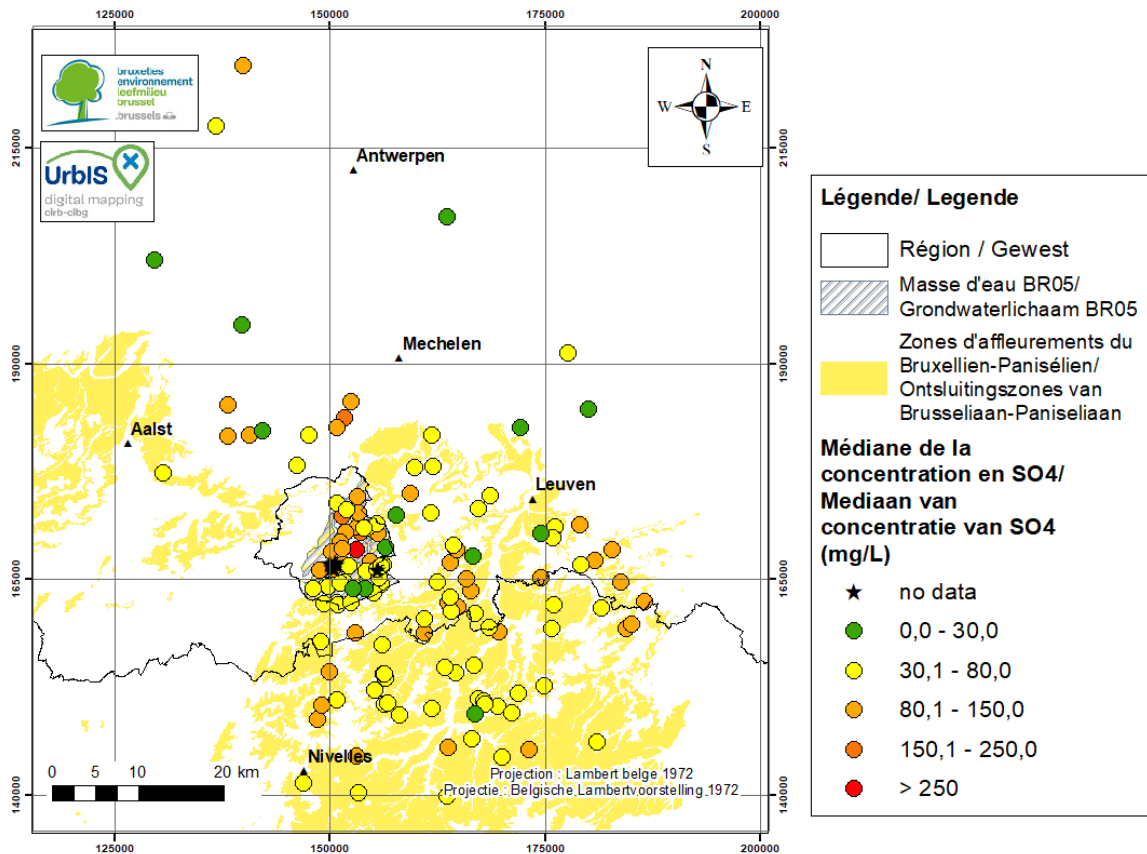


Figure 6-27 : Répartition spatiale de la concentration en SO4 dans l'aquifère du Bruxellien

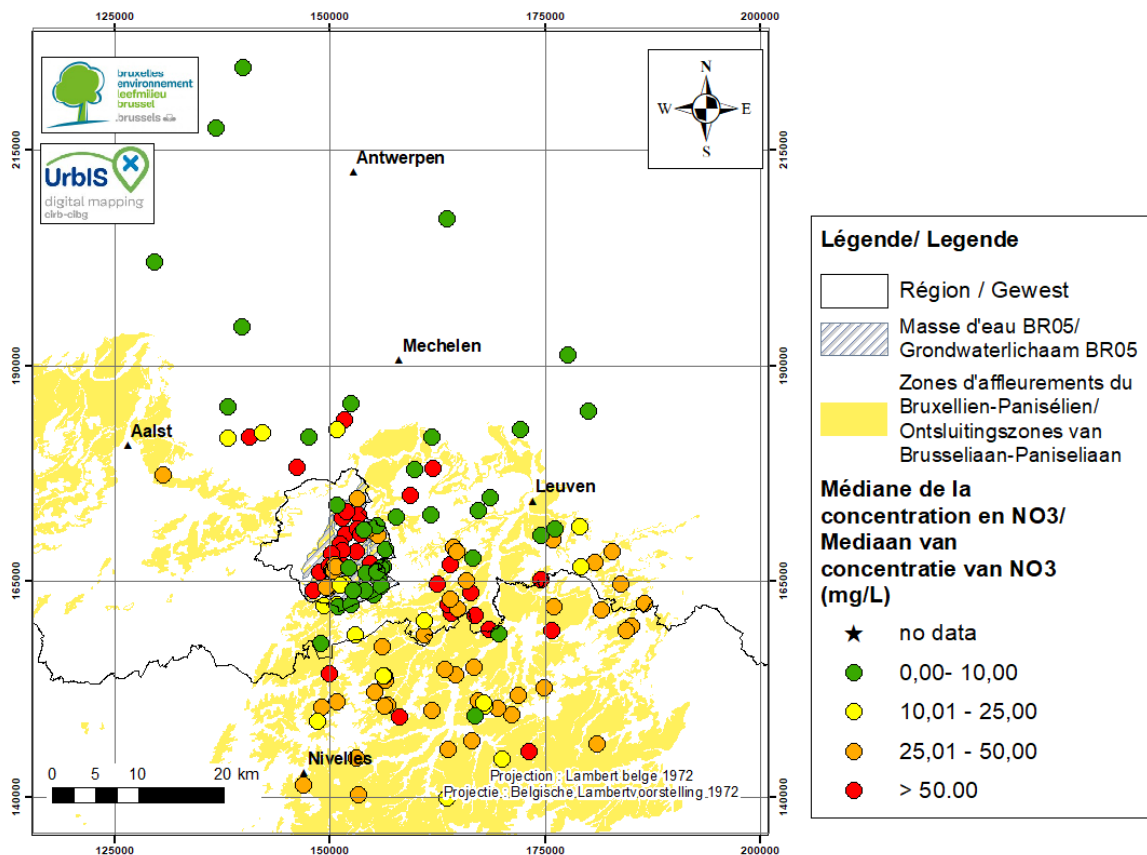


Figure 6-28 : Répartition spatiale de la concentration en NO3 dans l'aquifère du Bruxellien

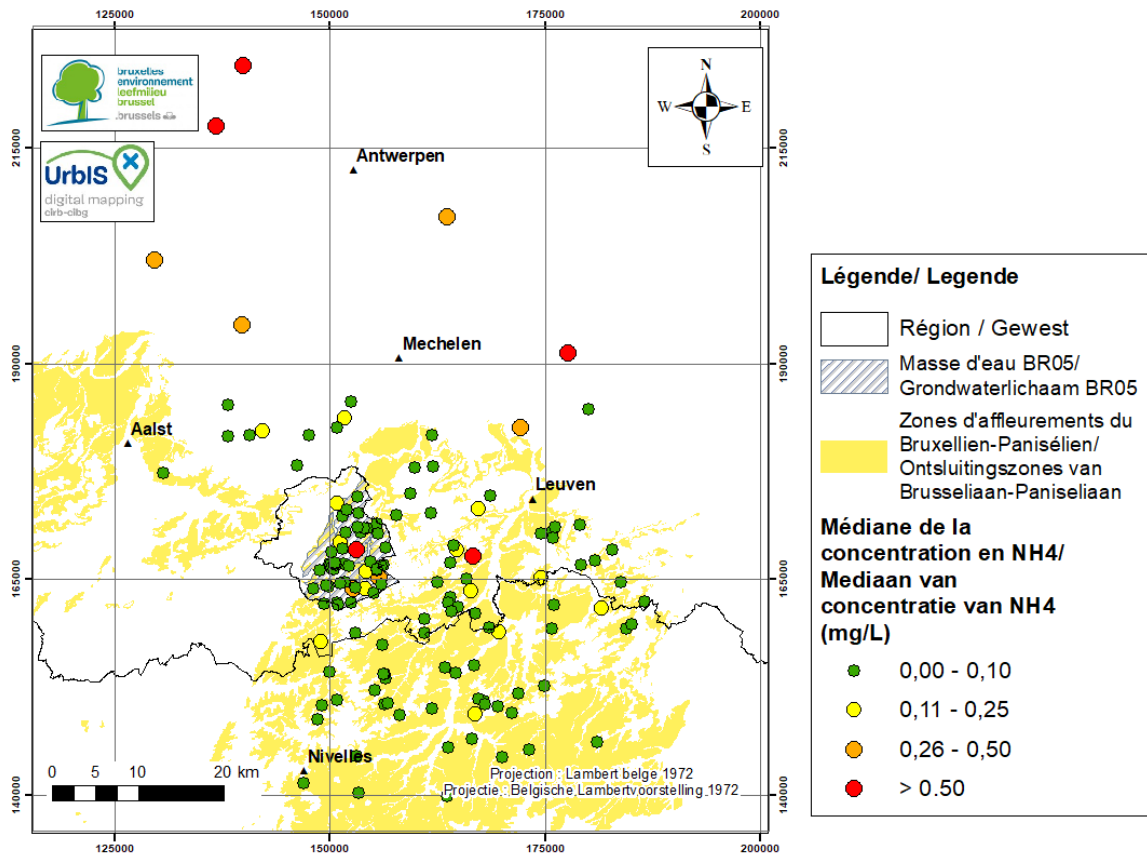


Figure 6-29 : Répartition spatiale de la concentration en NH4 dans l'aquifère du Bruxellien

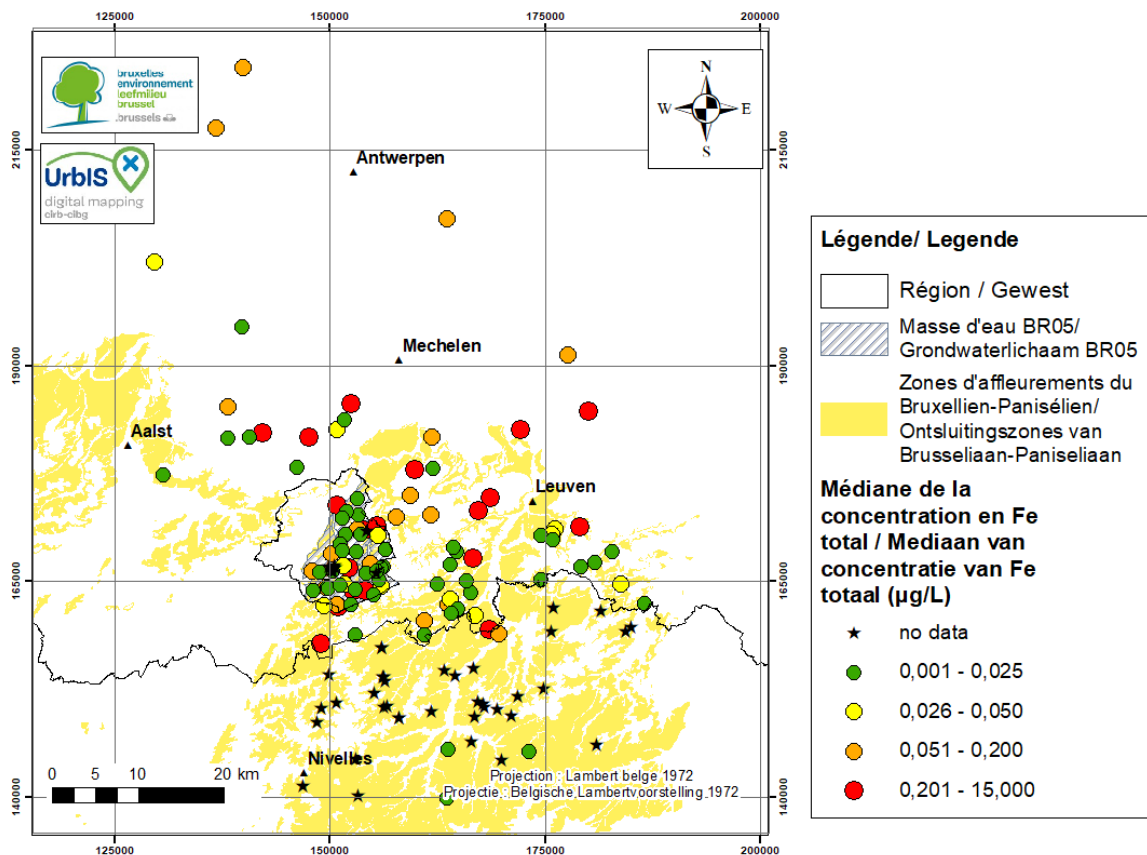


Figure 6-30 : Répartition spatiale de la concentration en Fe total dans l'aquifère du Bruxellien

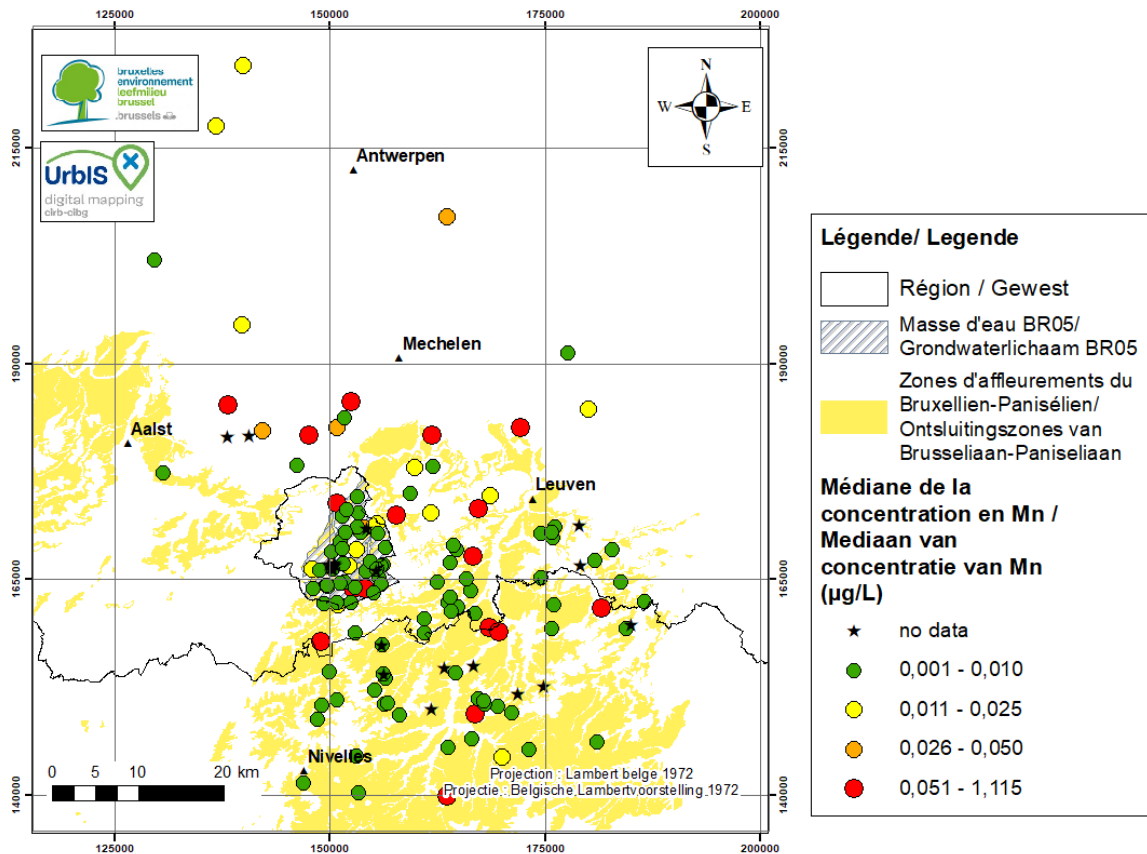


Figure 6-31 : Répartition spatiale de la concentration en Mn dans l'aquifère du Bruxellien

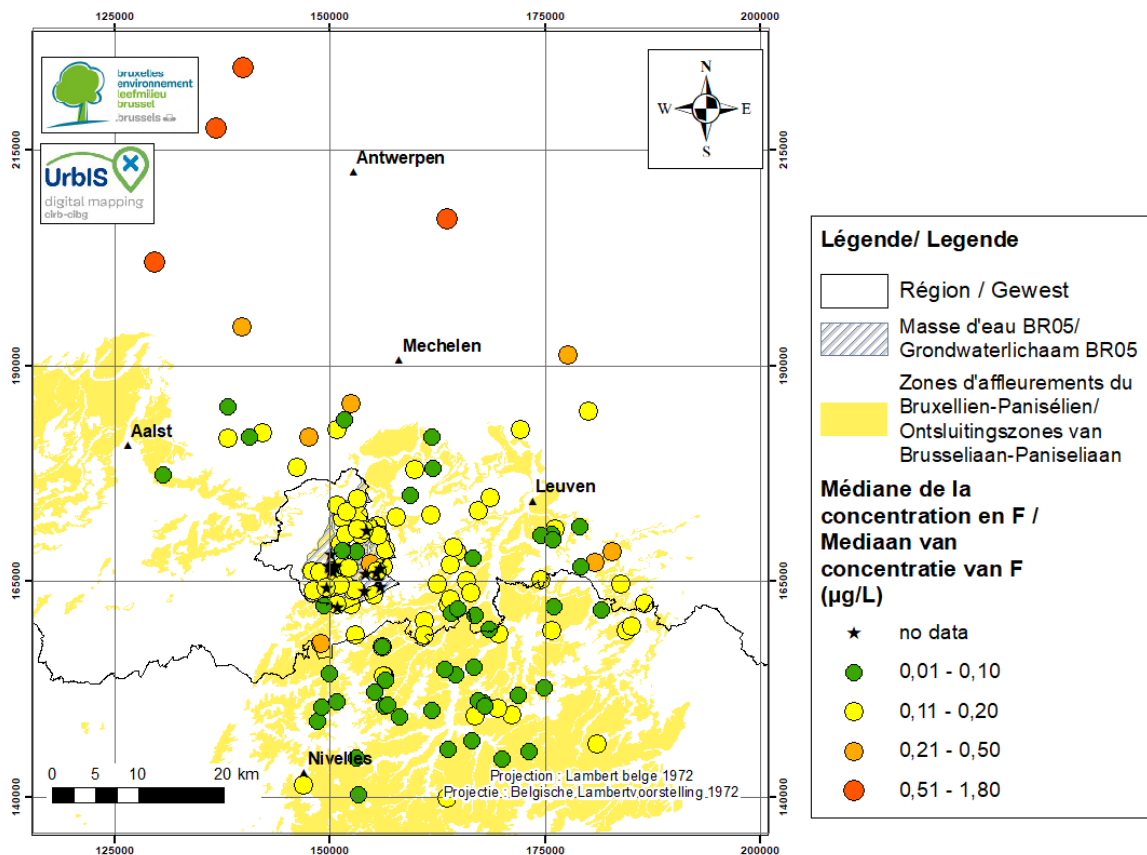


Figure 6-32 : Répartition spatiale de la concentration en F dans l'aquifère du Bruxellien

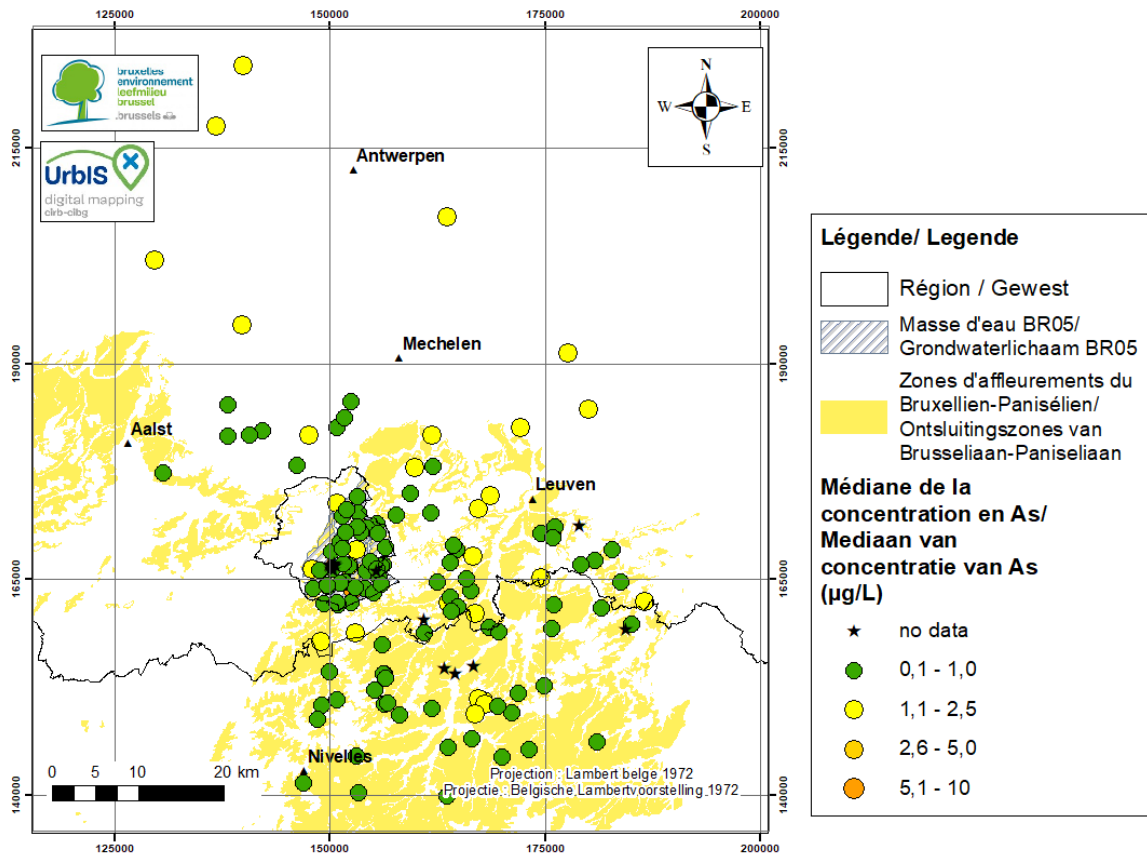


Figure 6-33 : Répartition spatiale de la concentration en As dans l'aquifère du Bruxellien

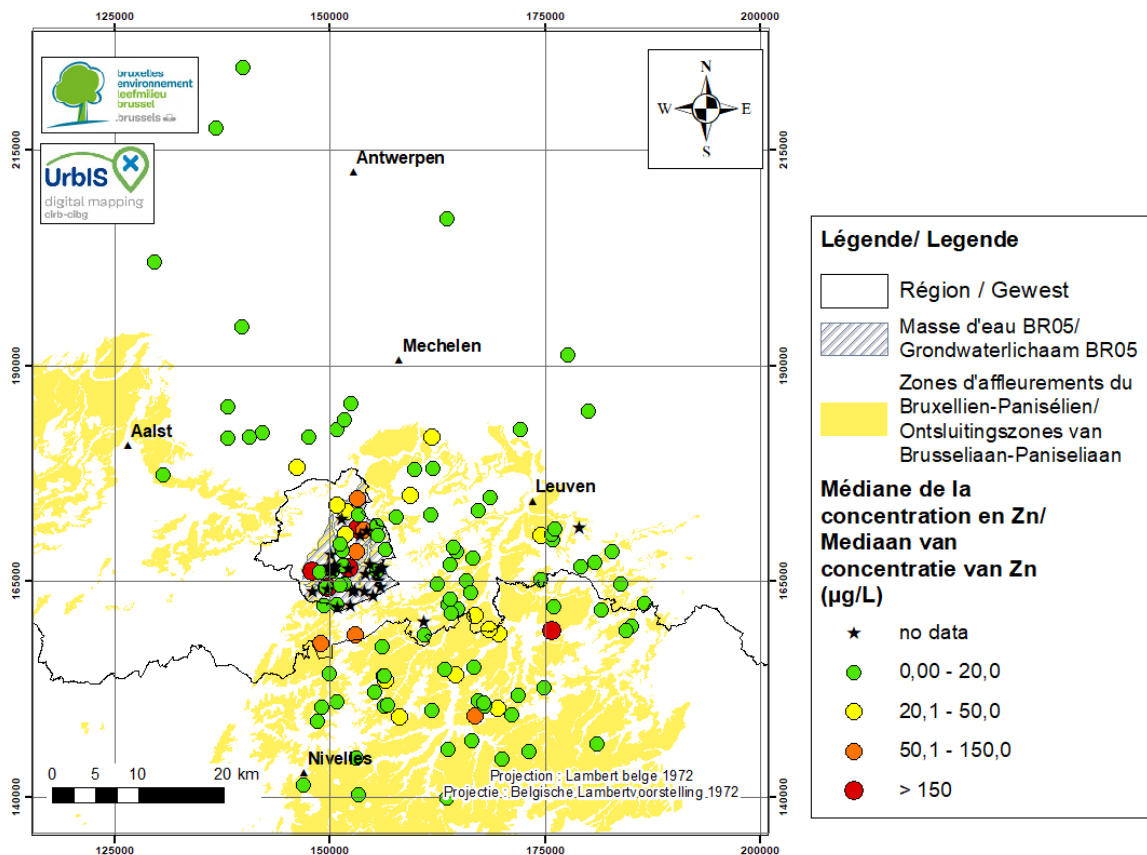


Figure 6-34 : Répartition spatiale de la concentration en Zn dans l'aquifère du Bruxellien

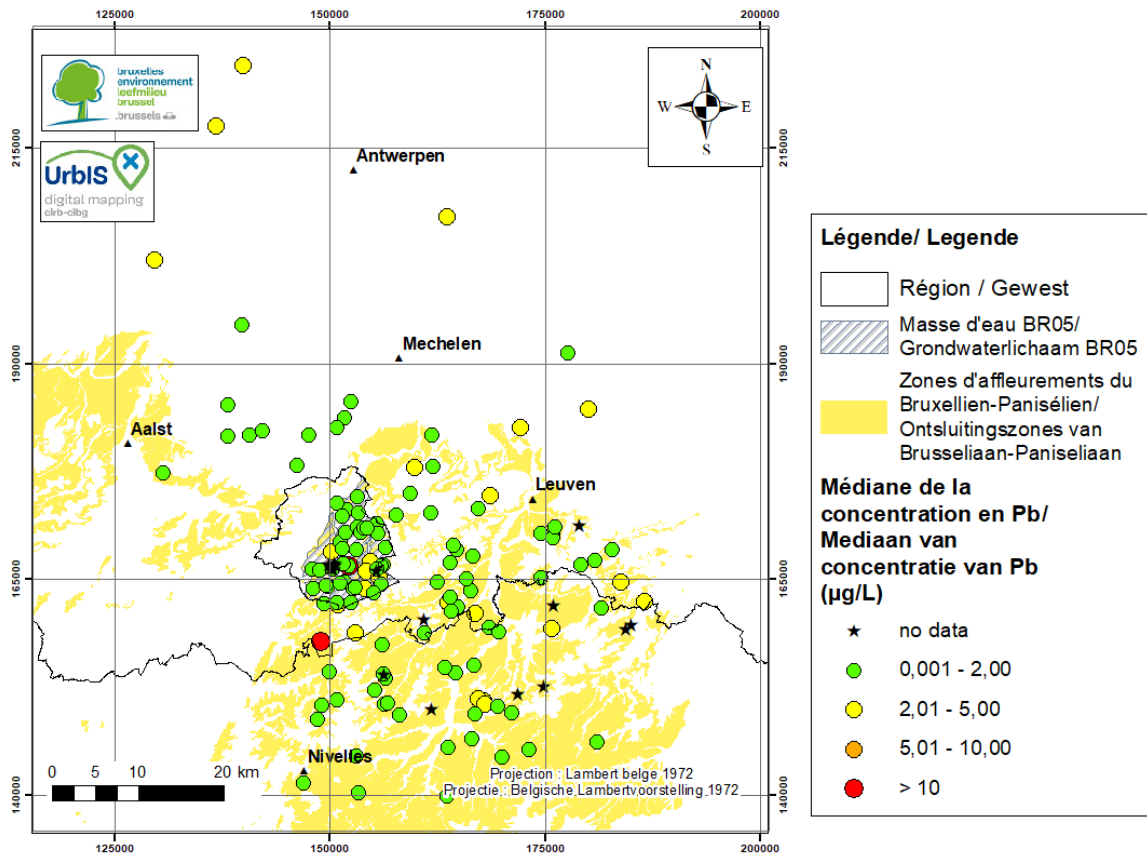


Figure 6-35 : Répartition spatiale de la concentration en Pb dans l'aquifère du Bruxellien

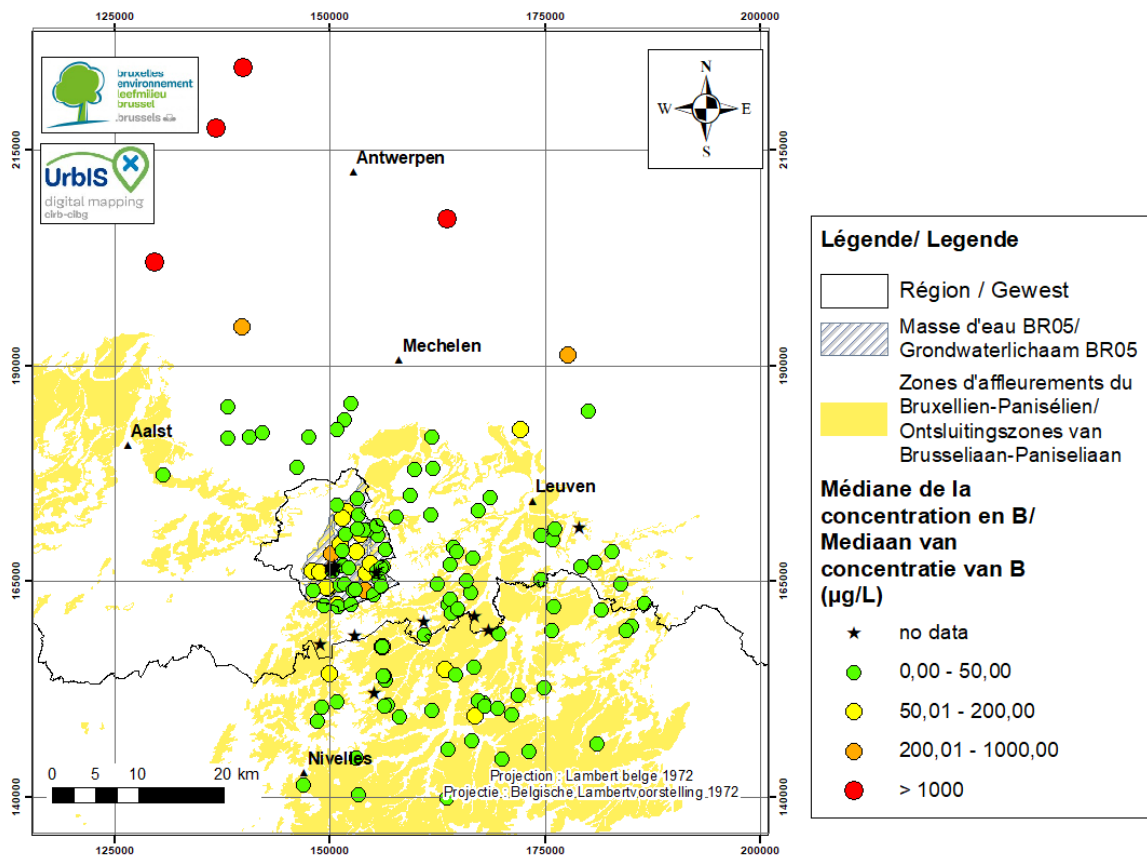


Figure 6-36 : Répartition spatiale de la concentration en B dans l'aquifère du Bruxellien

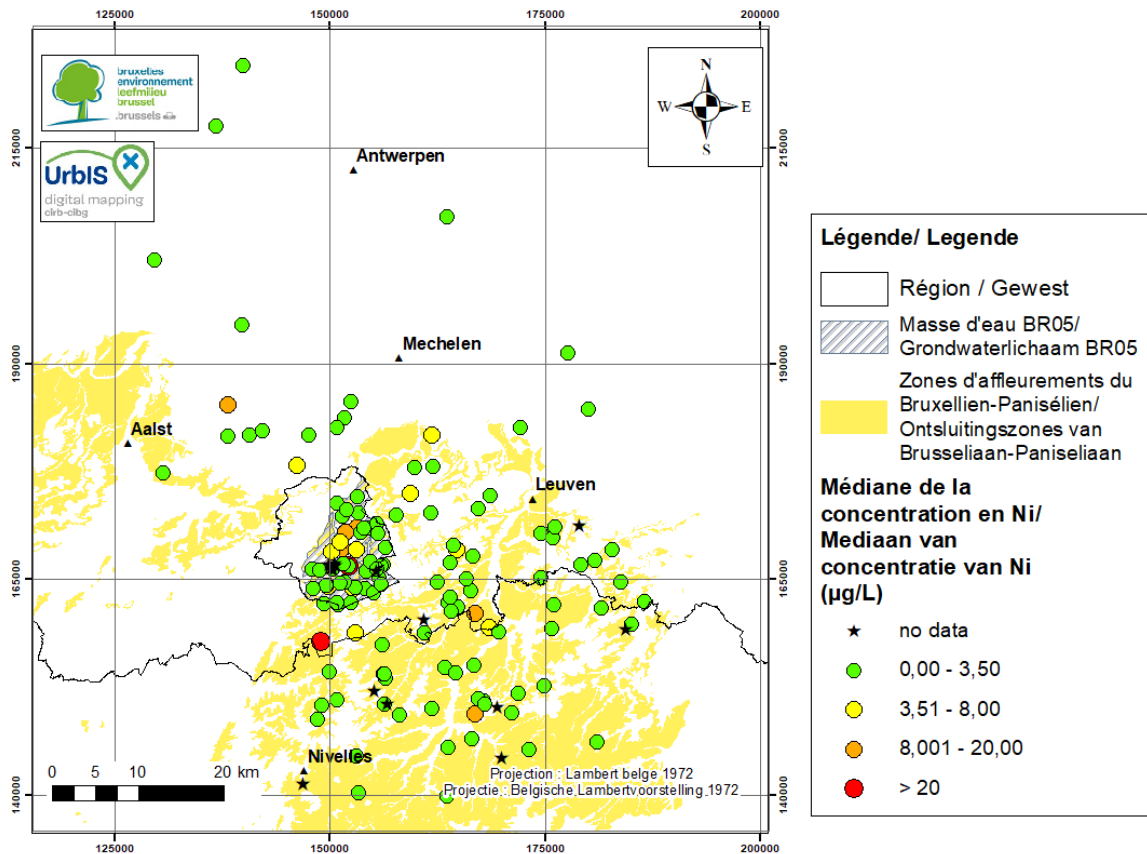


Figure 6-37 : Répartition spatiale de la concentration en Ni dans l'aquifère du Bruxellien

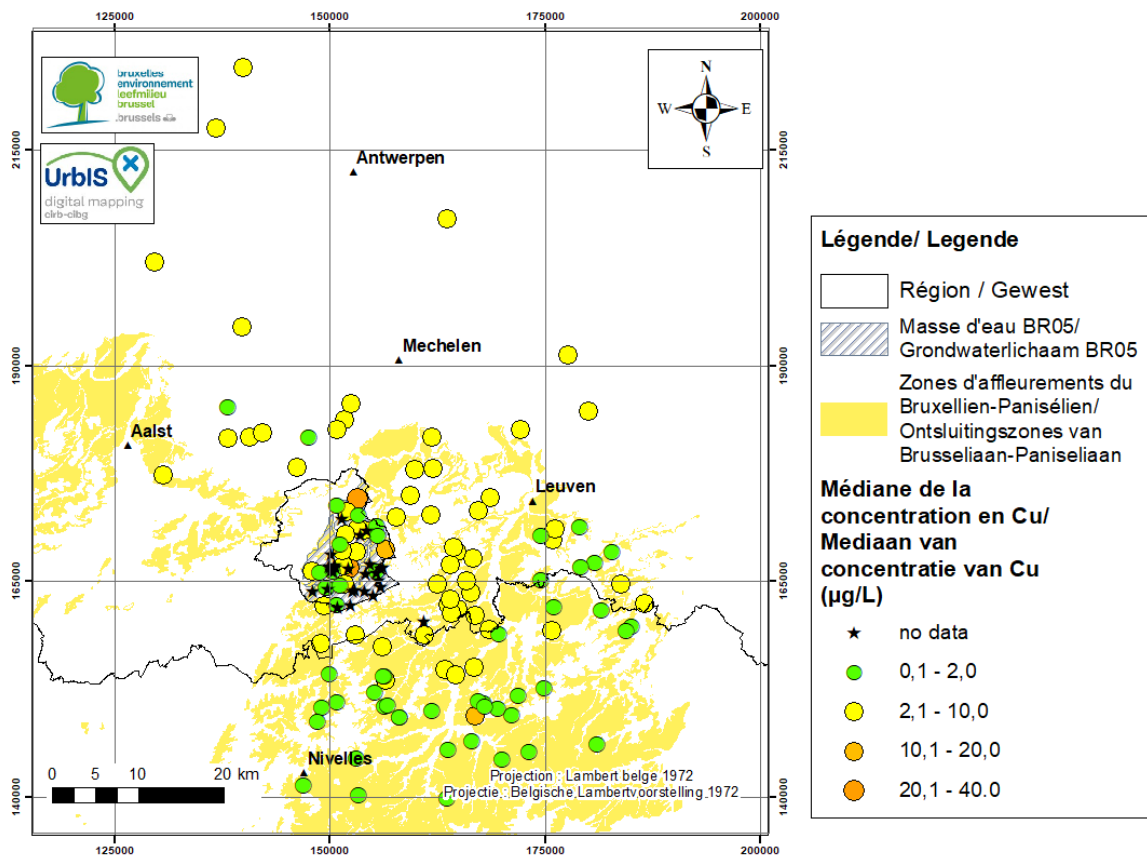


Figure 6-38 : Répartition spatiale de la concentration en Cu dans l'aquifère du Bruxellien

6.2.3. Analyse des variations temporelles des concentrations en éléments chimiques

Les évolutions au cours des temps de certains paramètres Cl, Ca, SO₄, NO₃ et certains polluants atrazine, BAM, tétrachloroéthylène, sont représentées aux Figures 6-39 à 6-45 pour la masse d'eau souterraine BR05 en Région de Bruxelles-Capitale.

Pour utiliser les médianes pour le calcul des concentrations de références, il est préférable de vérifier que les concentrations soient relativement stables au cours du temps. Pour la masse d'eau BR05 en Région de Bruxelles-Capitale, il y a beaucoup de données contrairement aux autres aquifères et pour certains sites, des données sont disponibles depuis 1996. Les concentrations en Cl, Ca, SO₄, NO₃ semblent généralement stables pour la majorité des sites. Pour les concentrations en nitrates il est possible de constater qu'en 1996, certains sites présentaient déjà des concentrations élevées en NO₃ et que depuis les concentrations sont relativement stables. Concernant l'atrazine, pour les sites qui présentent des concentrations élevées, une tendance à la baisse semble observée depuis 2006. Pour le BAM, les concentrations sont relativement stables entre 2006 et 2017. Pour le tétrachloroéthylène par contre pour les sites P28, P14, P6, P13, P8, ST32, So39 où ce polluant est quantifié et supérieur à la norme en eau potable, les concentrations semblent généralement augmenter depuis 2006.

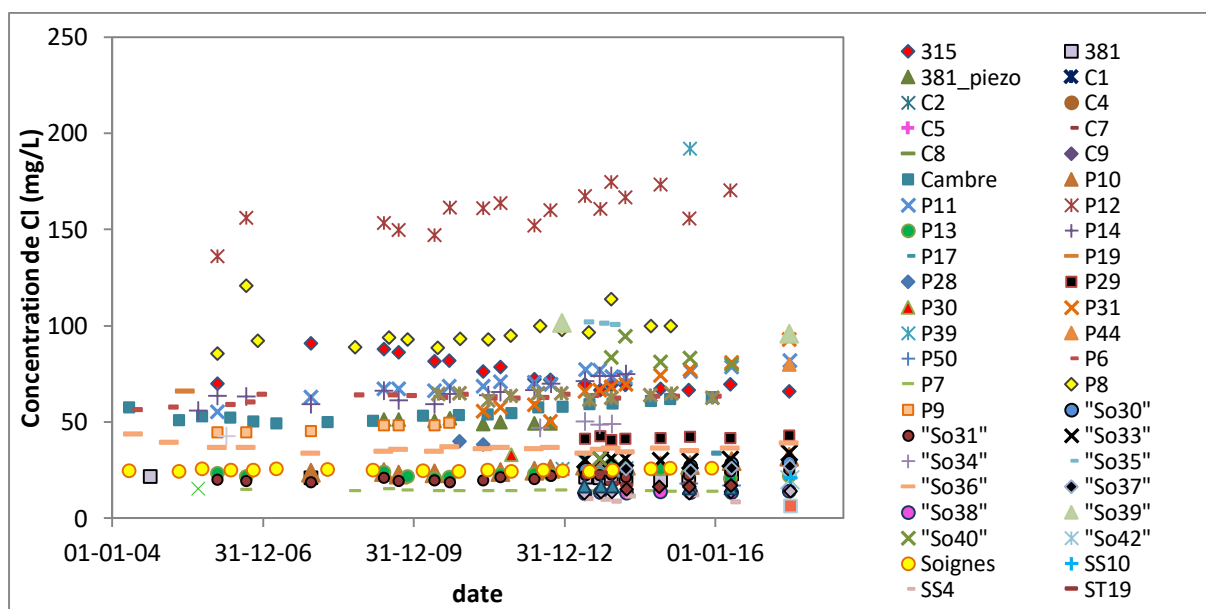


Figure 6-39 : Evolution de la concentration en Cl dans la masse d'eau BR05

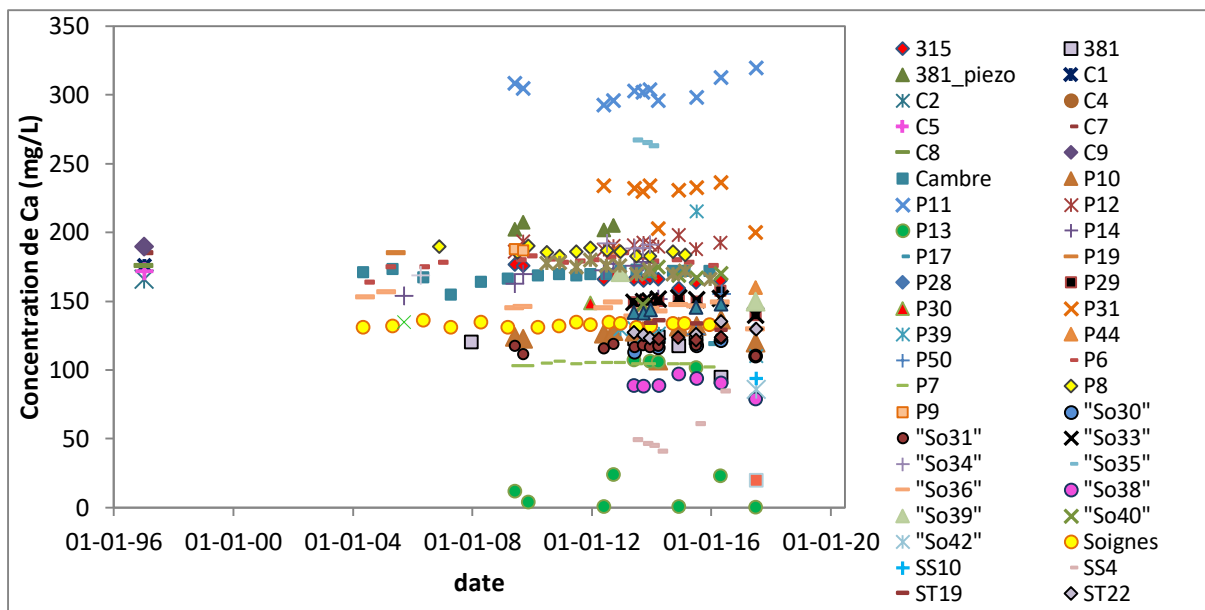


Figure 6-40 : Evolution de la concentration en Ca dans la masse d'eau BR05

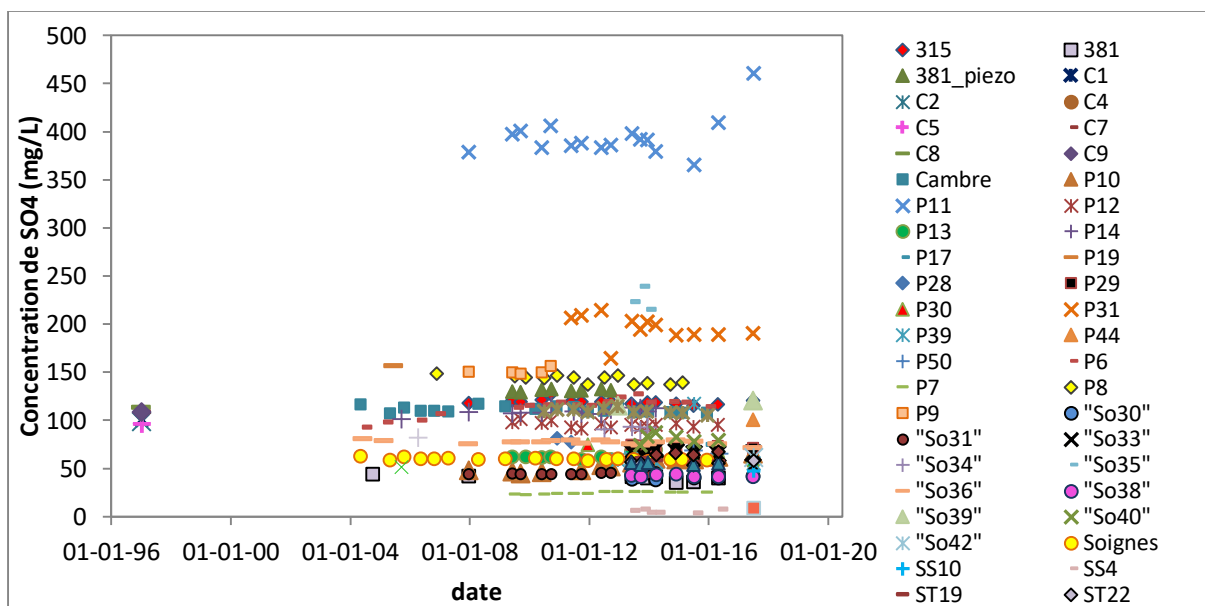


Figure 6-41 : Evolution de la concentration en SO4 dans la masse d'eau BR05

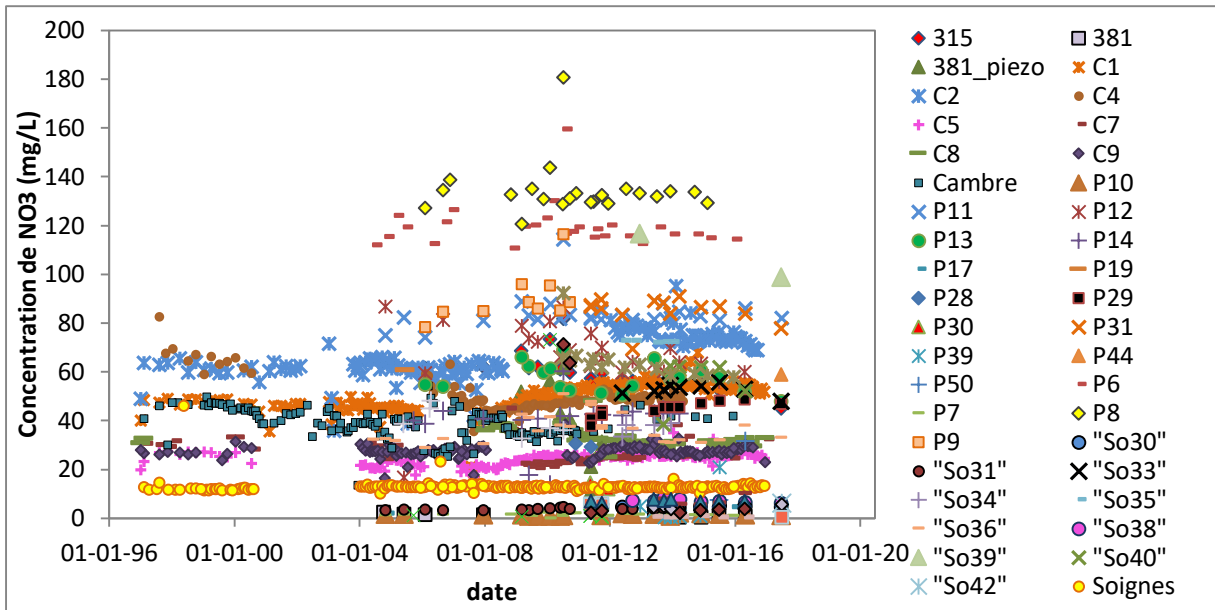


Figure 6-42 : Evolution de la concentration en NO3 dans la masse d'eau BR05

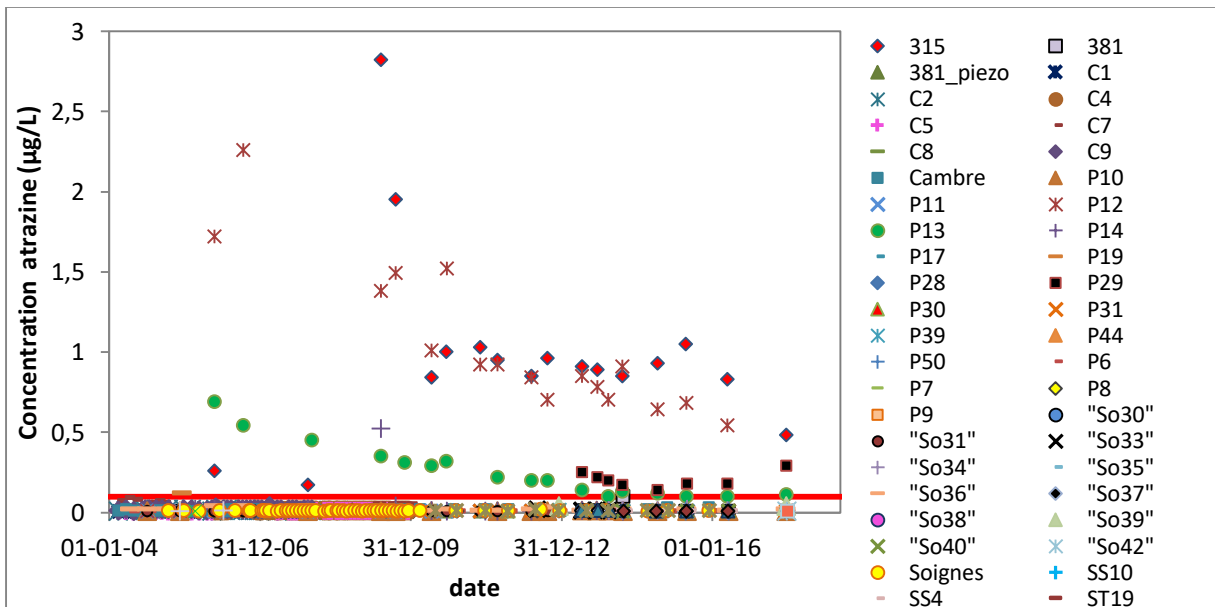


Figure 6-43 : Evolution de la concentration en atrazine dans la masse d'eau BR05

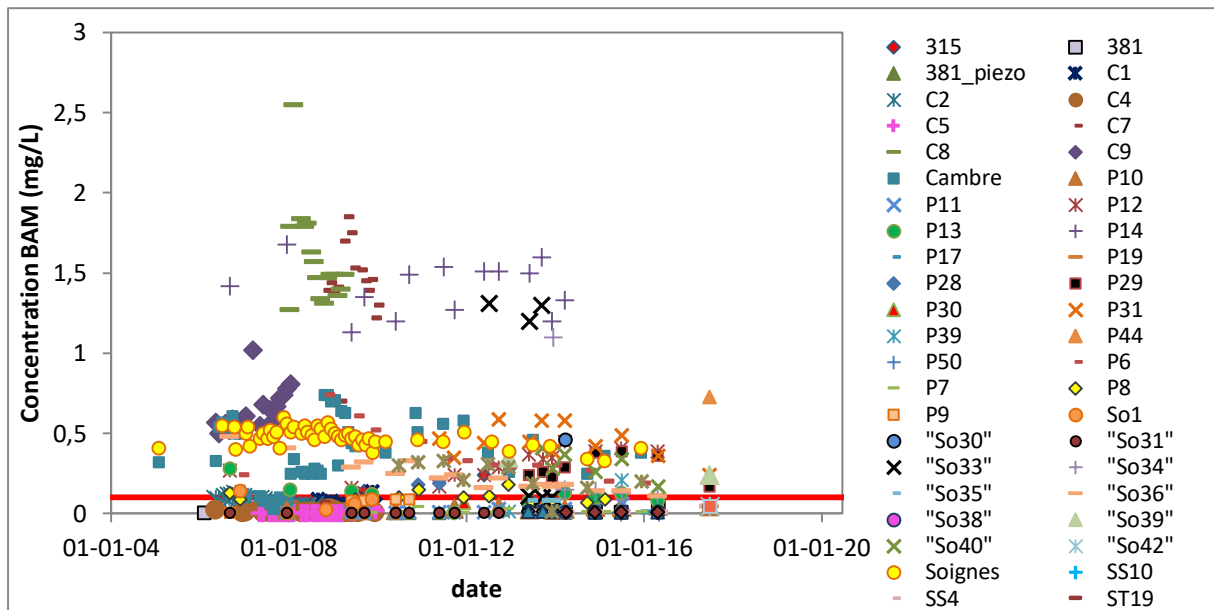


Figure 6-44 : Evolution de la concentration en BAM dans la masse d'eau BR05

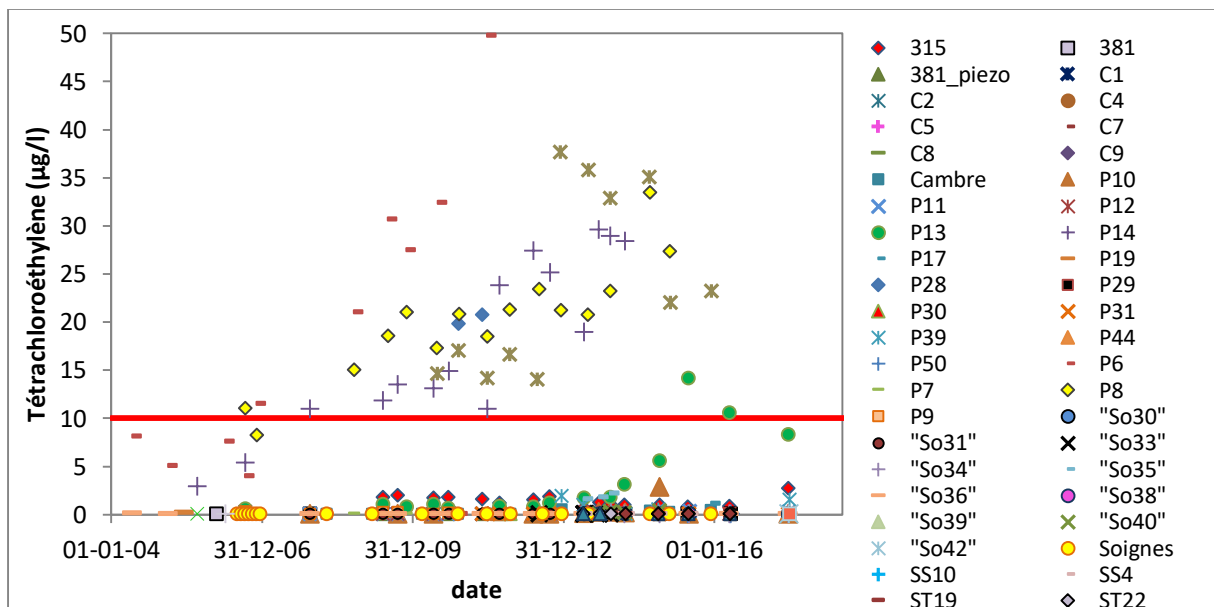


Figure 6-45 : Evolution de la concentration en tétrachloroéthylène dans la masse d'eau BR05

6.2.4. Origine de la salinité des eaux souterraines

Dans le diagramme Na vs Cl (Figure 6-46), certains points présentent des rapports Na/Cl supérieurs à 0.86. Ceci traduit vraisemblablement l'enrichissement de l'eau en sodium associé aux échanges cationiques Na-Ca, lors du phénomène de rafraîchissement. Les cations de Na fixés sur les sites d'adsorption des matériaux géologiques constitutifs du sous-sol sont libérés dans l'eau au détriment des ions Ca qui les y remplacent. La distribution spatiale du rapport Na/Cl est également représenté à la Figure 6-47. Pour les sites en vert et en orange sur la carte l'origine du chlore peut provenir d'une ancienne eau marine ou d'une dissolution de l'halite. Il s'agit de quelques points en Région de Bruxelles-Capitale et en Région flamande (principalement au nord).

La majorité des points présentent tout de même un rapport Na/Cl inférieur à celui de l'eau de mer (0.86). Ceci indique pour ces points, l'origine du Cl ne provient pas d'une ancienne eau marine ou de

dissolution de halite et est peut-être anthropique (pollution). Il y a également des sites en Région de Bruxelles-Capitale pour lesquelles, la concentration en Na n'a pas été mesurée.

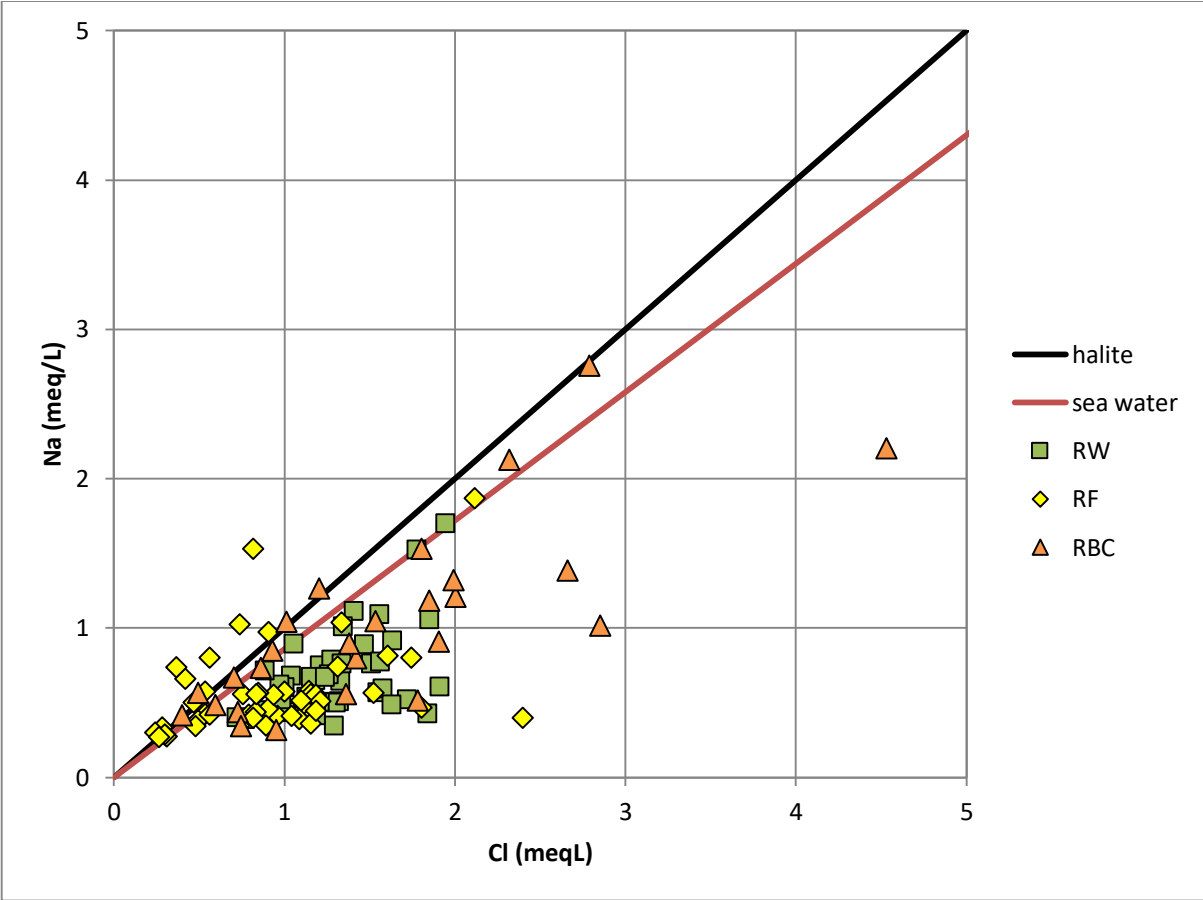


Figure 6-46 : Concentration en Na (meq/L) par rapport à la concentration en Cl (meq/L)

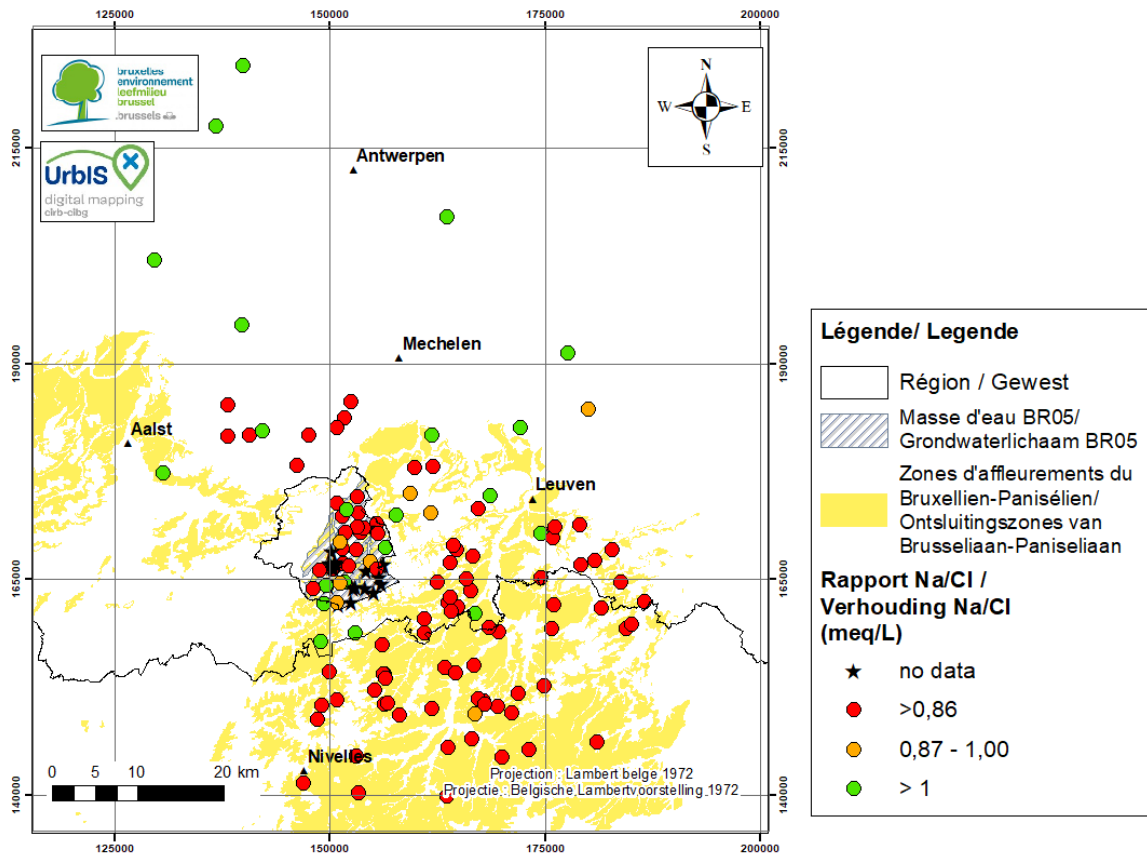


Figure 6-47 : Représentation spatiale du rapport Na/Cl (concentration en meq/L) pour l'aquifère du Bruxellien

Les indices de saturation de la calcite, du gypse et de la halite (Figures 6-48, 6-49, 6-50) ont été calculés via le module PHREEQC (Parkurst and Appelo 1999) implémenté dans le programme «DIAGRAMMES» (Simler, 2013) de l'Université d'Avignon. Les résultats montrent que les eaux souterraines du Bruxellien sont sous-saturées par rapport au gypse et à la halite. Il semble donc que ces deux minéraux ne contrôlent pas ici la salinité des eaux souterraines. Le chlore ne semble donc pas provenir de dissolution d'évaporites. A contrario, les indices de saturation de la calcite avoisinent 0, certains points étant même légèrement sursaturés. La calcite est donc réactive au sein du milieu aquifère et elle influence la minéralisation de l'eau en y contrôlant la concentration en calcium.

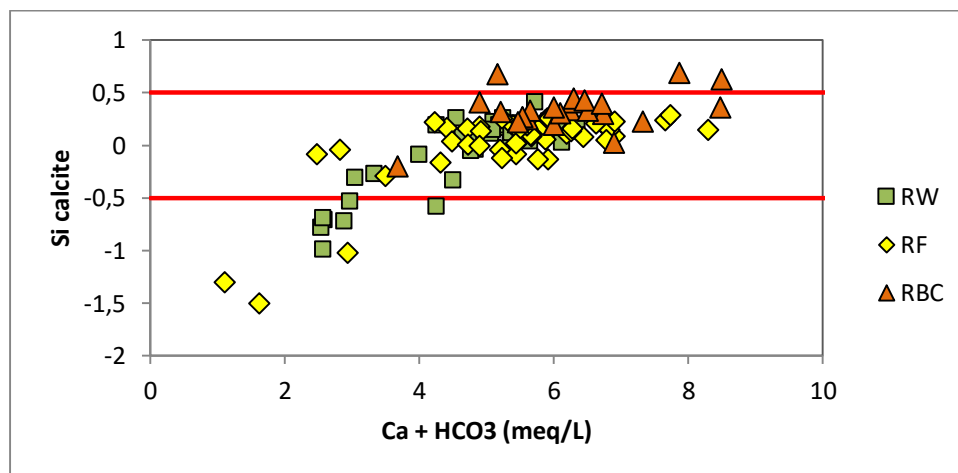


Figure 6-48 : Indice de saturation (SI) de la calcite en fonction des éléments chimiques susceptibles d'être contrôlés par ces minéraux

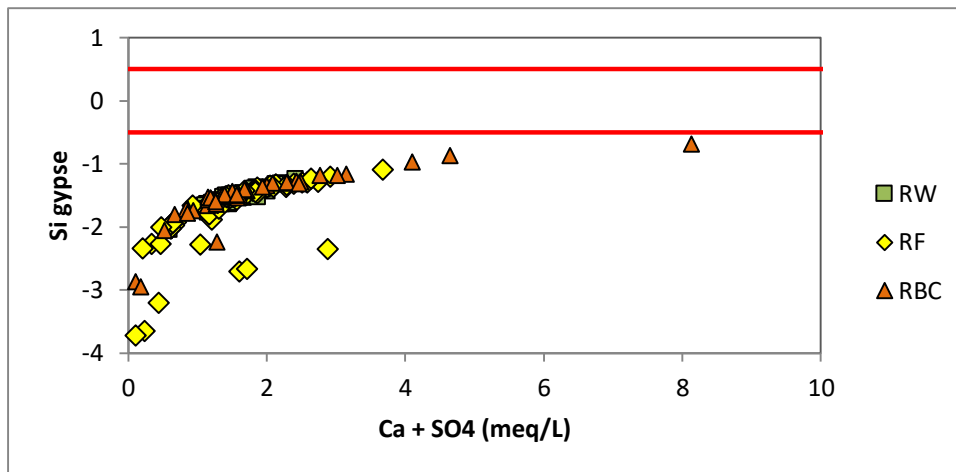


Figure 6-49 : Indice de saturation (SI) du gypse en fonction des éléments chimiques susceptibles d'être contrôlés par ces minéraux

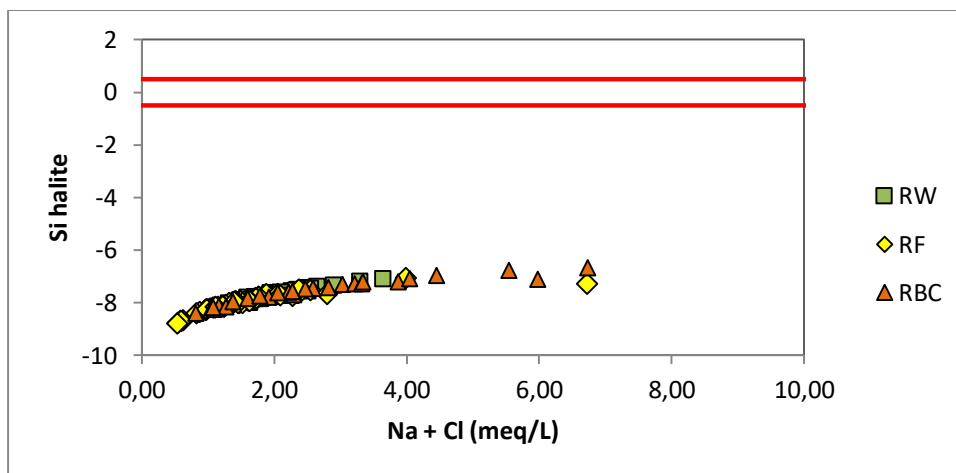


Figure 6-50 : Indice de saturation (SI) de la halite en fonction des éléments chimiques susceptibles d'être contrôlés par ces minéraux

6.2.5. Statistiques descriptives

6.2.5.1. Principaux paramètres

Les principaux paramètres de statistique descriptive sont repris dans le Tableau 6-5. Ils ont été calculés pour l'ensemble des stations d'échantillonnage de la masse d'eau souterraine BR05 et celles qui ont été sélectionnées en Région wallonne et en Région flamande (chapitre 6.1). Les paramètres statistiques repris sont : le minimum, le maximum, la moyenne, la médiane, le percentile 25 (P25), le percentile 75 (P75), le percentile 90 (P90). Ils ont été calculés sur base de la médiane des valeurs disponibles pour les paramètres de terrain (conductivité électrique, pH, O₂ dissous) et des concentrations en éléments majeurs et mineurs de chaque station d'échantillonnage. Le nombre de stations d'échantillonnage où chaque paramètre est mesuré est également mentionné.

Paramètre	Nb. stations	Min	P25	Moyenne	Médiane	P75	P90	Max
Al (mg)	118	0.00	0.00	0.10	0.01	0.01	0.03	8.87
As total (µg/l)	137	0.00	0.50	1.06	0.58	1.05	2.50	11.00
B total (µg/l)	134	0.00	14.56	210.65	20.00	50.00	102.33	6174.86
Br (mg)	55	0.00	0.06	0.09	0.08	0.10	0.17	0.25
Ca (mg)	139	5.10	111.38	130.48	133.00	159.50	176.40	303.00
Cd total (µg/l)	138	0.00	0.05	0.12	0.06	0.25	0.25	0.60
Cl (mg)	140	6.60	26.70	105.78	40.33	55.10	71.40	3113.42
Cu total (µg/l)	120	0.00	1.00	2.79	2.50	2.50	4.00	39.73
EC terrain (µs/cm)	139	115.10	628.50	950.42	726.00	874.25	1023.78	10375.00
F (mg)	131	0.03	0.10	0.17	0.12	0.15	0.20	1.80
Fer dissous (mg)	94	0.00	0.00	0.22	0.02	0.05	0.09	12.75
Fer total (mg)	102	0.00	0.01	0.56	0.03	0.14	1.09	15.00
HCO3 (mg)	121	71.00	297.30	342.48	337.94	381.00	420.23	828.63
Hg total (µg/l)	137	0.00	0.02	0.07	0.03	0.10	0.25	0.29
K (mg)	125	0.48	1.02	3.80	1.55	2.60	7.40	41.50
Mg (mg)	125	2.75	10.30	14.86	14.60	19.30	22.87	37.54
Mn ((mg)	138	0.00	0.00	0.04	0.01	0.01	0.07	1.12
Na (mg)	125	6.23	10.40	75.30	13.55	22.30	41.02	2298.65
NH4 (mg)	148	0.00	0.03	0.13	0.03	0.08	0.15	2.79
Ni total (µg/l)	138	0.00	1.00	3.52	2.20	2.50	4.00	81.85
NO2 (mg)	146	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.18
NO3 (mg)	148	0.10	6.14	34.96	31.65	48.56	72.43	160.00
O2 (mg)	133	0.10	3.97	6.48	7.69	9.30	10.19	12.80
Orthophosphates (mg/l de P)	138	0.00	0.05	0.15	0.08	0.14	0.25	2.55
Pb (µg/l)	138	0.00	0.18	2.06	0.90	1.44	2.50	138.00
pH	139	6.43	7.10	7.23	7.21	7.32	7.48	8.55
Phosphore (mg)	82	0.00	0.05	0.14	0.05	0.12	0.20	1.85
PO4 (mg)	64	0.00	0.03	0.18	0.06	0.12	0.39	2.55
SO4 (mg)	140	4.29	56.53	77.86	71.58	92.38	118.91	389.50
Sr (mg)	64	0.03	0.31	0.44	0.45	0.56	0.66	1.01
T°C	137	9.80	11.00	12.00	11.70	12.55	14.18	17.10
TAC	23	18.45	27.80	30.90	31.10	32.90	38.25	42.30
Zn total (µg/l)	119	1.00	5.00	24.26	9.95	16.88	48.17	415.50

Tableau 6-5 : Principaux paramètres statistiques de l'aquifère du Bruxellien

6.2.5.2. Distribution des paramètres et éléments

Aux Figures 6-51 et 6-52, les histogrammes des paramètres de terrain, des concentrations en éléments majeurs et mineurs sont représentés. Les histogrammes ont également été tracés pour l'ensemble du jeu de données du Bruxellien (Région de Bruxelles-Capitale, Région wallonne, Région flamande). Les histogrammes permettent de représenter la distribution des données. Les données utilisées sont les médianes des valeurs disponibles à chaque station d'échantillonnage. Sur les graphiques, les teneurs sont regroupées en 12 classes. Pour chaque classe, un rectangle est tracé dont la hauteur est fonction de la fréquence de la classe. Il est possible de constater que pour de nombreux éléments, la distribution est asymétrique et l'histogramme est fortement étiré vers la droite.

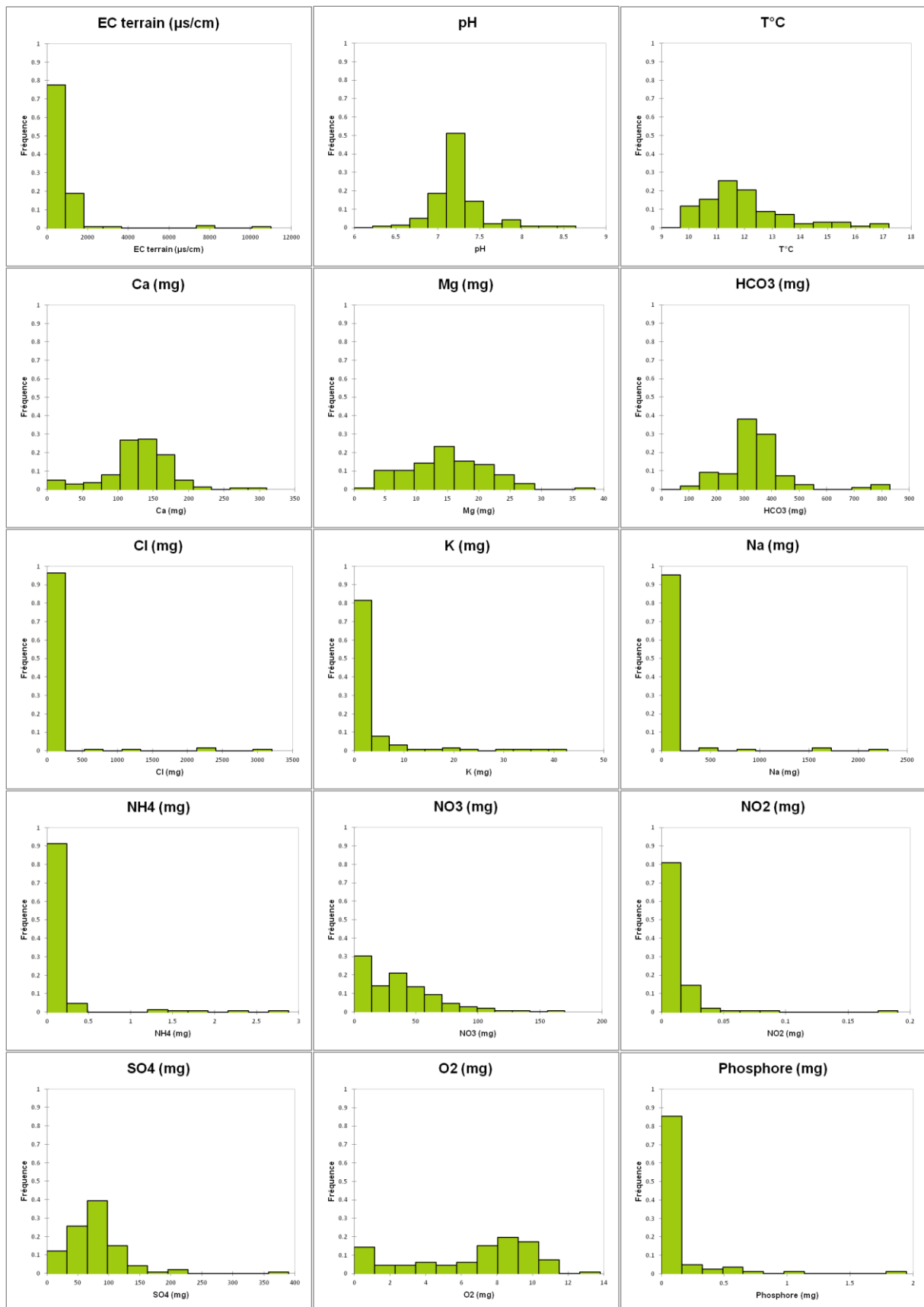


Figure 6-51 : Histogrammes illustrant la distribution des paramètres de terrain, des éléments majeurs et quelques éléments mineurs de l'aquifère du Bruxellien

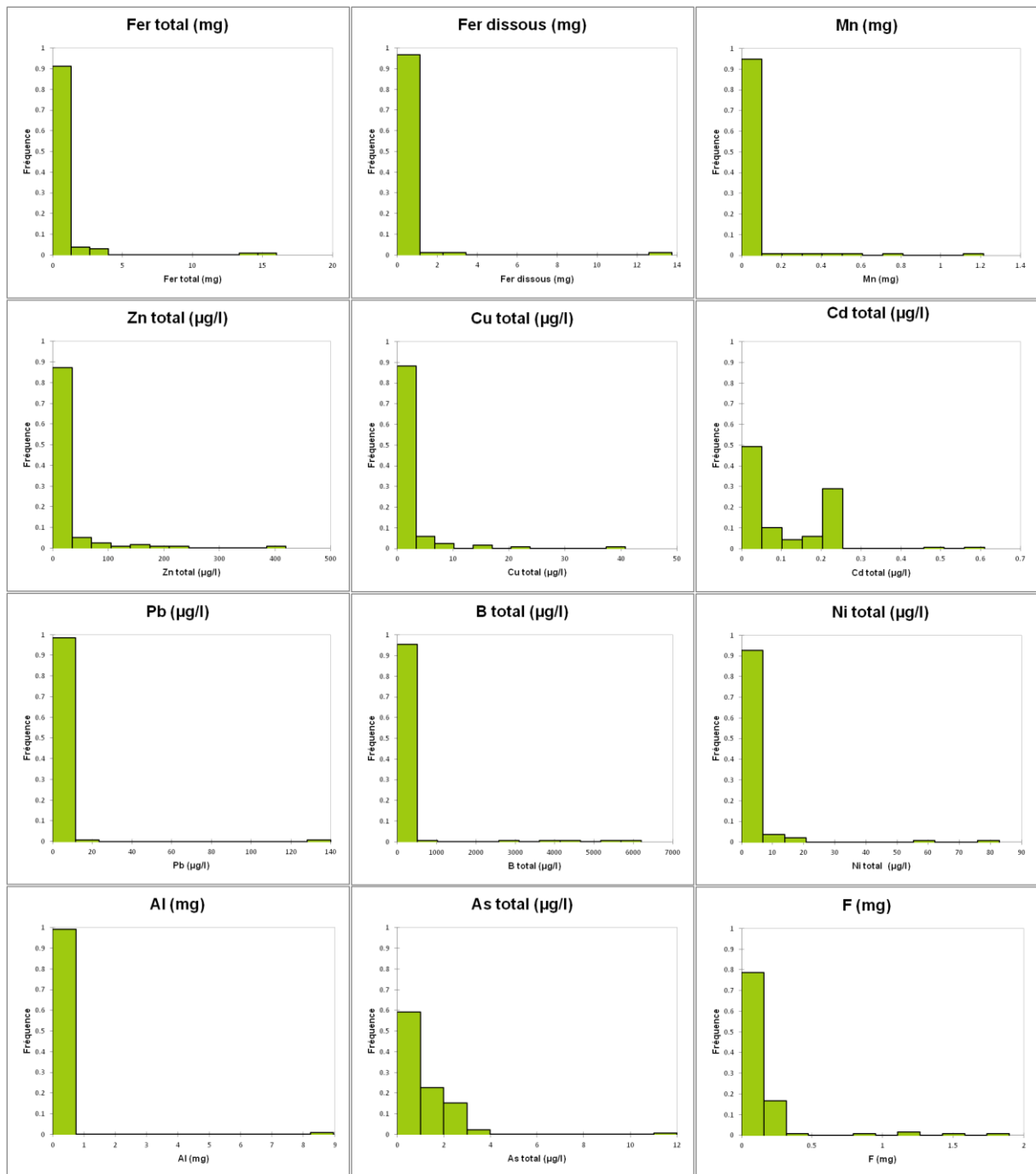


Figure 6-52 : Histogrammes illustrant la distribution des principaux éléments mineurs de l'aquifère du Bruxellien (pour les métaux, il s'agit de la fraction totale sauf pour le Fe où la fraction dissoute est également représentée).

6.2.6. Corrélation entre les éléments

Pour mettre en évidence les relations existantes entre les variables, des coefficients de corrélation ont été déterminés pour chaque couple de variables. La méthode de Kendall a été utilisée pour le calcul des coefficients de corrélation à cause de la distribution généralement asymétrique des données. La matrice des coefficients de corrélation des principaux polluants avec les paramètres de terrain et les éléments majeurs est présentée au Tableau 6-6. Une deuxième matrice de corrélation entre les principaux polluants et les métaux/ métalloïdes est présentée au Tableau 6-7. Les coefficients de corrélations non significatifs (avec une p-value >0.05) ne sont pas repris dans la matrice. Les coefficients de corrélations supérieurs à 0.25 sont mis évidence en orange, ceux supérieurs à 0.5 sont rouge et les coefficients de corrélation inférieurs à -0.25 sont mis en évidence par un fond vert, ceux inférieurs -0.50 sont en bleu.

Il est possible de constater que de nombreuses variables sont corrélées. Certains polluants (BAM, atrazine désisopropyl, tétrachloroéthylène, NO_3) sont corrélés avec des éléments majeurs : HCO_3 , Na, Cl, SO_4 , Na et la conductivité électrique. Les sites qui sont impactés par ces polluants semblent être hyper minéralisés. Ce n'est pas le cas des huiles minérales qui sont corrélés négativement aux éléments majeurs et aux autres polluants. La plupart des polluants sont généralement corrélés négativement au NH_4 et au pH à l'exception du cyanure et du NO_2 . La plupart des polluants sont corrélés positivement entre eux, ce qui signifie que quand un site est impacté, il y a généralement plusieurs polluants.

Certains polluants sont également corrélés avec des métaux/ métalloïdes. Plusieurs polluants sont corrélés positivement au B et au Ni dissous. La plupart des polluants sont également corrélés négativement au Fe et au Mn à l'exception des huiles minérales, du NO_2 et du toluène.

Variabes	BAM	Atrazine	Atrazine deséthyl	Atrazine desisopropyl	Bentazone	CN	Diuron	Huiles minérales (totales)=	NO3	NO2	Simazine	Tétrachloroéthylène	Toluène
NH4	-0.19	-0.17	-0.06	-0.19		0.32	-0.15		-0.11	0.29	-0.19		
Ba t			0.10		0.09	0.20	0.08					-0.09	0.09
HCO3	0.30			0.30	-0.15		0.20	-0.41	-0.12	0.06	0.39		-0.29
Br	0.27			0.27					0.34			0.37	
Ca	0.29	-0.10	-0.13	0.24	-0.11	0.14		-0.36	0.31		0.14	0.30	-0.10
COT				0.13				-0.14		0.09		0.16	-0.17
COD		-0.85											
Cl	0.32	0.13	0.13	0.19	0.09	0.12	0.19		0.36		0.08	0.32	
EC	0.34			0.26		0.17	0.10	-0.34	0.30		0.14	0.32	
F	0.08	-0.16	-0.23						-0.19			0.17	
Mg	0.24	-0.22	-0.23	0.18	-0.11	0.18		-0.17	0.21			0.37	
O-PO4	0.12			0.11	-0.13	0.20			-0.04				-0.15
O2		0.09	0.16	0.06	0.14		0.12		0.28	-0.09			
pH	-0.09	-0.15	-0.14		-0.18				-0.11	-0.09		0.16	
P t				-0.12	0.12			0.36		0.18			0.25
K		0.14	0.13	0.18	0.09		0.13		-0.09		0.09	0.13	
Na	0.31	0.28	0.23	0.37	0.11		0.22		0.20		0.26	0.22	
SO4	0.32			0.22		0.14	0.09	-0.21	0.37	0.06	0.11	0.34	
T °	0.20	0.09		0.20	-0.13		0.11			0.09	0.14	0.35	
BAM	1.00	0.28	0.13	0.36		-0.09	0.25	-0.32	0.12		0.32	0.30	-0.12
Atrazine	0.28	1.00	0.67	0.37	0.22	-0.22	0.41		0.12		0.40		
Atrazine deséthyl	0.13	0.67	1.00	0.26	0.26		0.29		0.21		0.27		
Atrazine desisopropyl	0.36	0.37	0.26	1.00		-0.12	0.37	-0.33	0.13		0.68	0.26	
Bentazone		0.22	0.26		1.00	-0.09	0.15		0.20	0.16		-0.13	0.14
CN	-0.09	-0.22		-0.12	-0.09	1.00	-0.11				-0.17		
Diuron	0.25	0.41	0.29	0.37	0.15	-0.11	1.00		0.12		0.41	0.20	
Huiles minérales	-0.32			-0.33				1.00		0.20		-0.19	0.18
NO3	0.12	0.12	0.21	0.13	0.20		0.12		1.00		0.05	0.30	
NO2					0.16			0.20		1.00			
Simazine	0.32	0.40	0.27	0.68		-0.17	0.41		0.05		1.00	0.19	
Tétrachloroéthylène	0.30			0.26	-0.13		0.20	-0.19	0.30		0.19	1.00	
Toluène	-0.12				0.14			0.18					1.00
Trichloroéthylène	0.32		-0.13	0.20	-0.15	0.12	0.12	-0.22	0.35	0.09		0.53	

Tableau 6-6 : Coefficients de corrélation entre les principaux paramètres de terrain, les éléments majeurs et les principaux éléments mineurs et les polluants de l'aquifère du Bruxellien

Variables	BAM	Atrazine	Atrazine deséthyl	Atrazine desisopropyl	Bentazone	CN	Diuron	Huiles minérales (totales)=	NO3	NO2	Simazine	Tétrachloro éthylène	Toluène	Trichloro éthylène
Al t	-0.08	-0.19		-0.09		0.31	-0.10	0.15	0.09	-0.07	-0.19		0.11	
As t	-0.13			-0.16	0.11	0.09	-0.07	0.20	-0.11	0.10	-0.10	-0.11		
B t	0.33	0.23	0.16	0.40	-0.07	-0.08	0.29		0.06		0.35	0.23		0.15
Cd t		0.15	0.12		0.11		0.10	0.15				-0.10		
Cu t		0.11	0.07		0.15	-0.16	0.08		0.10					-0.08
Fe t	-0.09	-0.14					-0.10		-0.27					-0.11
Fe d	-0.25		-0.08				-0.10	0.23	-0.12	0.25			0.14	
Mn	-0.06		-0.11			-0.09	-0.10	0.13	-0.29	0.18			0.09	
Hg t														
Ni t	0.11			0.07	-0.08	0.16			0.15	0.16		0.11		0.23
Ni d	0.20			0.13		0.28	0.10		0.37	0.22		0.16		0.41
Pb t	0.08			0.16		-0.20	0.07	0.29	0.11		0.10	0.12		0.09
Pb d			0.15	0.18			0.15		0.20	0.14		0.17		0.31
Zn t	0.08	0.16		0.14	0.11	-0.15	0.14		0.08			0.09		0.07

Tableau 6-7 : Coefficients de corrélation entre les principaux polluants et les métaux de l'aquifère du Bruxellien

6.2.7. Valeurs atypiques

Les valeurs atypiques ou aberrantes sont des valeurs qui s'écartent fortement des autres valeurs. Ces valeurs atypiques peuvent permettre de mettre en évidence des sites avec des minéralisations particulières, pouvant notamment être associées à des pollutions ponctuelles. Une valeur est considérée comme atypique quand la valeur est supérieure au $P75 + 1.5 \times (P75 - P25)$. Ici la formule a été utilisée avec le logarithme des valeurs parce que certains paramètres ont une distribution asymétrique.

Le Tableau 6-8 présente les sites qui présentent des valeurs atypiques et ils sont localisés à la Figure 6-53. Tous les sites au nord de la zone où la nappe est captive et a une signature d'une ancienne eau marine présentent des valeurs atypiques. Ces sites ne sont pas contaminés mais les valeurs sont considérées comme atypiques parce qu'elles sont fort différentes du reste de l'aquifère. Les autres sites avec des valeurs atypiques sont majoritairement situés dans la partie ouest de la masse d'eau BR05 en Région de Bruxelles-Capitale et de manière éparse dans les autres régions. Concernant ces sites il s'agit plutôt de contamination ponctuelle, parce que la majorité de l'aquifère libre des sables du Bruxellien est pollué notamment au nitrate. Ces points là sont mis en évidence par leur minéralisation particulière. La partie ouest de la masse d'eau BR05 a déjà été mise en évidence car elle semblait fort impactée par la pollution.

Région	no_code	Nom	Valeurs atypiques
RBC	P14	Car Wash Kennedy	Cu, Zn
RBC	P31	Cerisiers	SO4
RBC	So35	Fontaine de l'Amour	SO4
RBC	315	Lavoir Aquamatic	Atrazine
RBC	P12	Lavoir Casernes	Ni, Atrazine
RBC	P6	Lavoir Cimetière Evere	tétra + trichloréthylène
RBC	P9	Lavoir DPF Roodebeek	Al, T°, Ni, Zn
RBC	P11	Lavoir Nivelles	NH4, EC, SO4, Ca
RBC	P17	Lavoir Sleenckx	pH
RBC	P7	Lavoir Ste Alix	Cu
RBC	P13	Lavoir Tilleul	T°, pH, Na
RBC	P8	Lavoir Wappers	Ni
RBC	381_piezo	Mahaut_piezo	Al, Cu, Ni, O-PO4, Zn
RBC	P44	Piézo STIB_XII-028	T°
RBC	SS4	Puits S4	Fe t, Mn, As
RBC	ST36	Puits T36 Clinique Fond Roy	Zn
RBC	So42	Source Axa	pH
RBC	So39	Source Félix Haps	Na, tétra + trichloréthylène
RBC	So40	Source Jardin Jean Massart	pH
RBC	P30	Wellington	Al
RW	3275001	BORD DE L'ETANG	Al
RW	3269002	FERME DE BEAUSART 28M	K, O-PO4, Zn
RW	3279002	FOND DU FAUX VIVIERS	O-PO4
RW	4064001	PERBAIS P Galerie HS98	Atrazine
RW	4018006	PROFONDVAL CARMEL	T°, Mn, Cu, Ni
RW	4019002	Terre Le Rodeux Haye P1	tétra + trichloréthylène
RF	1-1106	1-1106	NH4, pH, EC, Cl, K, Na, B
RF	1-1110b	1-1110b	pH, K, Na, F, B
RF	1-1113	1-1113	pH, EC, Cl, K, Na, F, B, O-PO4
RF	2-0011	2-0011	K, Ni
RF	2-0085	2-0085	pH

RF	4-0265b	4-0265b	NH ₄ , pH, EC, Cl, HCO ₃ , K, Na, F, B, O-PO ₄
RF	4-0267	4-0267	NH ₄ , T°, pH, EC, Cl, HCO ₃ , K, Na, F, B
RF	4-0268b	4-0268b	NH ₄ , Al, T°, EC, Cl, HCO ₃ , K, Na, F, B
RF	4-0269	4-0269	NH ₄ , T°, pH, EC, Cl, HCO ₃ , K, Na, F, B
RF	433/73/6	433/73/6	Ni
RF	700/73/1	700/73/1	Al, As, Ni, Pb
RF	704/73/6	704/73/6	Al
RF	711/71/1	711/71/1	NH ₄ , Fe t, Mn, As
RF	713/63/2	713/63/2	Mn, As

Tableau 6-8: Stations de l'aquifère du Bruxellien présentant des valeurs atypiques

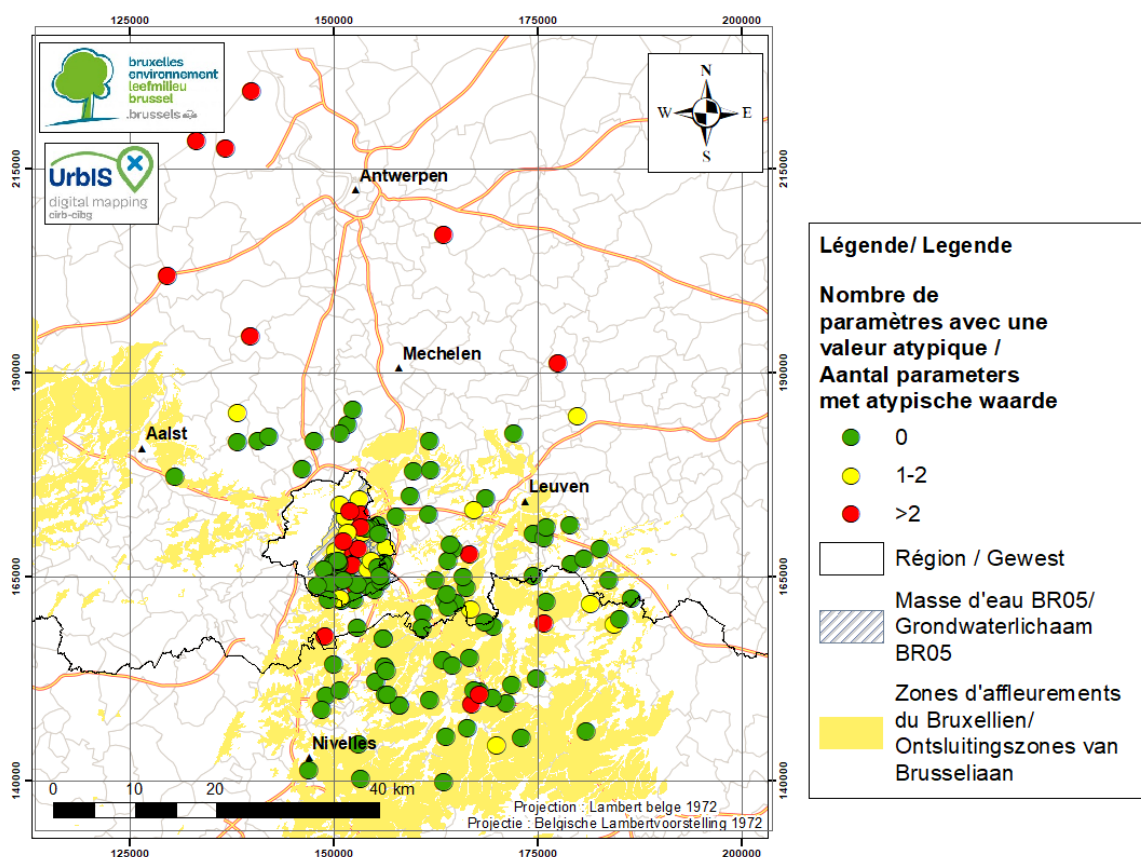


Figure 6-53 : localisation des stations (en jaune et orange) de l'aquifère du Bruxellien présentant des valeurs atypiques

6.2.8. Analyse multivariée par la méthode des matrices auto-organisantes

Une analyse multivariée a été réalisée en utilisant la méthode des matrices auto-organisantes (self-organizing maps – SOMs). L'analyse multivariée permet de mettre en évidence les relations entre un nombre élevé de paramètres dans un système hydrogéologique avec une dynamique complexe. Les SOMs permettent aussi de diviser les échantillons en groupes d'eaux ayant des signatures géochimiques semblables.

Dans le cas de la masse d'eau souterraine du Bruxellien, de nombreux processus géochimiques ont un impact sur la composition des eaux souterraines. Pour l'analyse multivariée, les données seront donc examinées sous 2 angles : (1) les processus influençant la minéralisation globale (interaction eau-roche, processus de rafraîchissement, apports anthropiques éventuels...) et (2) les processus d'oxydo-réduction (liés au confinement de la nappe) qui peuvent notamment influencer les teneurs en métaux.

Pour étudier la minéralisation globale, la technique de statistiques multivariées sera appliquée sur une sélection de 13 paramètres⁸. Il s'agit de certains éléments majeurs (Cl, NO₃, SO₄, Ca, Mg, K, Na,) le B, le F et le rapport Na/Cl (molaire) et certains polluants. Ces paramètres ont été choisis pour mettre en évidence l'origine de la salinité (notamment les concentrations élevées en Cl) et identifier d'éventuelles contaminations anthropiques. Le NO₃ est un indicateur de pollution et les paramètres : K, Na, SO₄, B ont été sélectionnés parce qu'ils peuvent être soit naturels, soit d'origine anthropique. Le rapport Na/Cl donne également des indications sur l'origine du Cl. Un rapport Na/Cl (molaire) inférieur à 0.86 correspond généralement à une eau impactée par une pollution (Müller, 2006). L'atrazine, le BAM et la somme des tétrachloroéthylène et trichloréthylène ont également été ajoutés à l'analyse multivariée parce que ces paramètres sont problématiques pour la masse d'eau du Bruxellien en Région de Bruxelles-Capitale qui a été classée en état chimique médiocre pour ces polluants. Les concentrations en éléments chimiques ont été exprimées sous forme logarithmique à cause de leur distribution asymétrique tandis que le rapport Na/Cl a été utilisé tel quel.

Pour mettre en évidence les processus d'oxydo-réduction, les SOMs seront appliquées une seconde fois avec une autre sélection de paramètres. Il s'agit des paramètres impliqués dans les réactions d'oxydoréduction, à savoir les NO₃, Mn, pH, NH₄, SO₄, Fe, ainsi que d'autres métaux (Al, As, Cu, Ni, Pb, Zn) pouvant être influencés par les conditions redox. Les concentrations ont été exprimées en logarithme à cause de leur distribution asymétrique tandis que le pH a été exprimé comme tel.

6.2.8.1. Influence de la minéralisation globale

Les résultats des SOMs, concernant l'influence de la minéralisation globale sur la masse d'eau du Bruxellien sont représentés à la Figure 6-54. La matrice des composants permet de montrer les relations entre les paramètres. Il est notamment possible de voir que le NO₃, Cl, Ca, SO₄, sont corrélés positivement et corrélés négativement au rapport Na/Cl, le Na et le B sont corrélés positivement. La matrice U est également présentée à la Figure 6-54 et de cette matrice U, 5 groupes ont été déduits par le logiciel. Le Tableau 6-9 synthétise les principales caractéristiques de ces cinq groupes et ceux-ci sont représentés spatialement à la Figure 6-55.

Les groupes 1, 2 et 3, en bleu foncé, bleu clair et vert, présentent des concentrations élevées en NO₃, SO₄, Ca, Cl, un rapport Na/Cl faible et des concentrations variables en Mg, K, Na, F, B. Ces 3 groupes concernent la recharge récente qui est contaminée. Des différences existent néanmoins entre ces groupes. Dans le groupe 2 par exemple, il n'y a pas de tétrachloroéthylène et trichloréthylène et peu d'atrazine et BAM. Les échantillons appartenant à ces 3 groupes sont situés en Région wallonne, au sud de la Région flamande et à l'ouest de la masse d'eau BR05.

Les échantillons du groupe 4, en orange, présentent des concentrations élevées en Cl, Na, K, F, B, un rapport Na/Cl élevé, une concentration faible NO₃, Ca et SO₄, et polluants. Les échantillons de ce groupe sont localisés au nord de la zone, dans la partie captive de l'aquifère. La salinité est élevée suite à la présence d'eau de mer fossile, piégée lors de la sédimentation.

Les échantillons du groupe 5, en brun, présentent des concentrations faibles en Cl, Na, B, NO₃, SO₄, Ca et un rapport élevé en Na/Cl et des concentrations faibles en polluants. Les échantillons de ce

⁸ Les éléments majeurs choisis ne sont pas forcément les mêmes pour les différentes masses d'eau souterraine (Socle, Yprésien et Bruxellien) parce que chaque masse d'eau a ses spécificités et pour chaque masse d'eau plusieurs itérations sont réalisées en réduisant au fur et à mesure le nombre de paramètres. Celle qui est choisie est celle montrant les corrélations les plus intéressantes et qui identifie des groupes d'eau plausibles.

groupe sont situés au sud de la Région de Bruxelles-Capitale (Forêt de Soignes) et en Région flamande à l'est et au nord de la Région de Bruxelles-Capitale. Ce groupe correspond à la recharge récente du Bruxellien mais qui n'est pas ou peu impactée par des contaminations anthropiques.

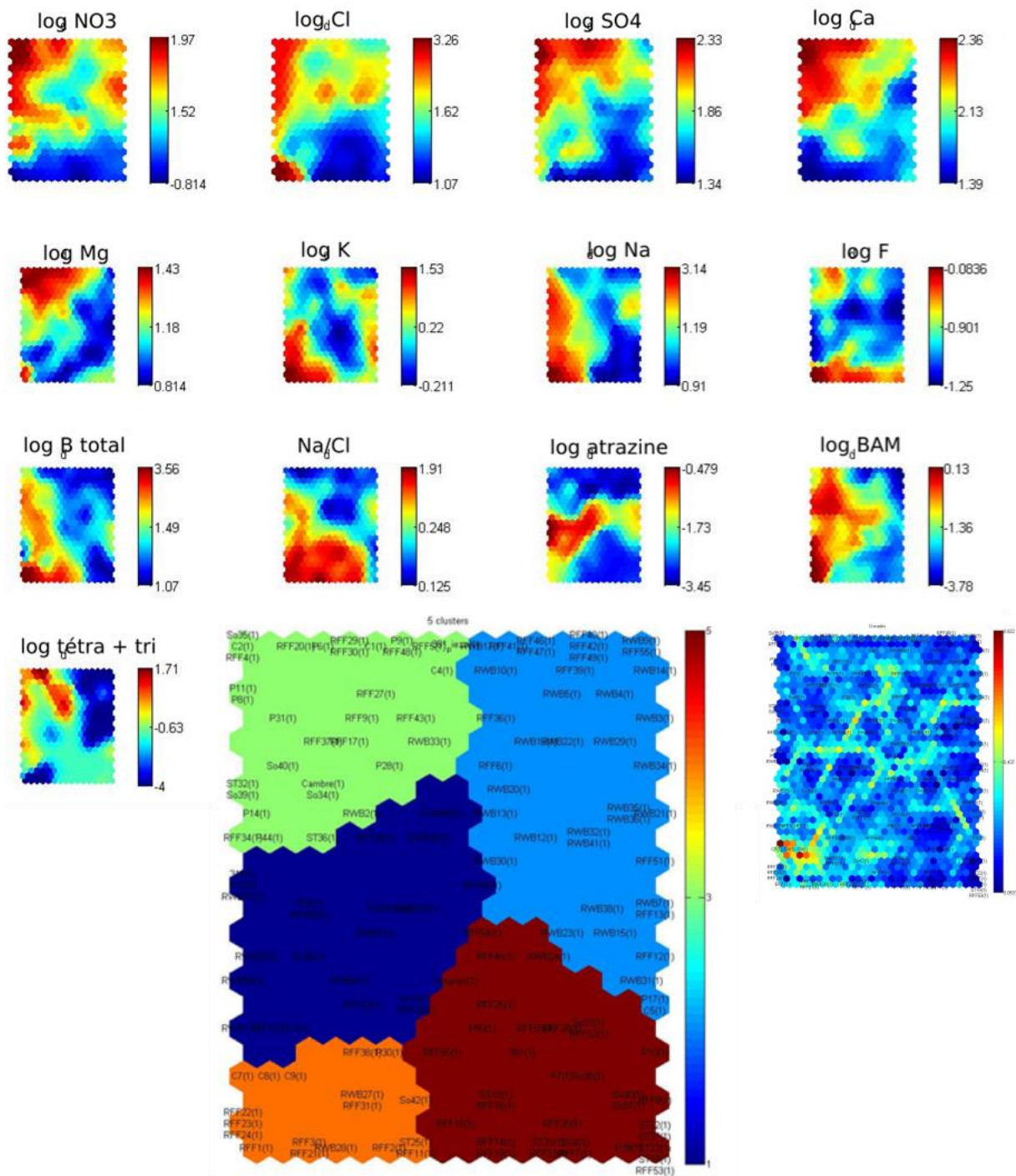


Figure 6-54 : Résultats des SOMs pour la minéralisation globale du Bruxellien avec la matrice des composants, la matrice U et les groupes d'échantillons semblables définis par les SOMs

Groupe	NO3	Cl	SO4	Ca	Mg	K	Na	F	B	Na/Cl	atrazine	BAM	tétra+tri
1 : recharge récente contaminée A	+	+	O	O	O	X	+	-	X	X	++	++	O
2 : recharge récente contaminée B	++	+	X	X	-	X	X	-	-	-	X	X	-
3 : recharge récente contaminée C	++	++	++	++	++	-	X	X	X	X	-	++	+
4 : Eau de mer fossile	--	++	-	--	X	++	++	++	++	++	-	X	-
5 : recharge récente non contaminée	--	--	--	-	-	X	--	X	-	++	-	-	-

Tableau 6-9 : Caractéristiques de chacun des 5 groupes

++ Concentrations les plus élevées du jeu de données

- concentrations bas dans le jeu de données

+ Concentrations élevées dans le jeu de données

-- concentrations les plus bas du jeu de données

O concentrations moyens par rapport au jeu de données

X concentrations variés (des plus élevés aux plus bas)

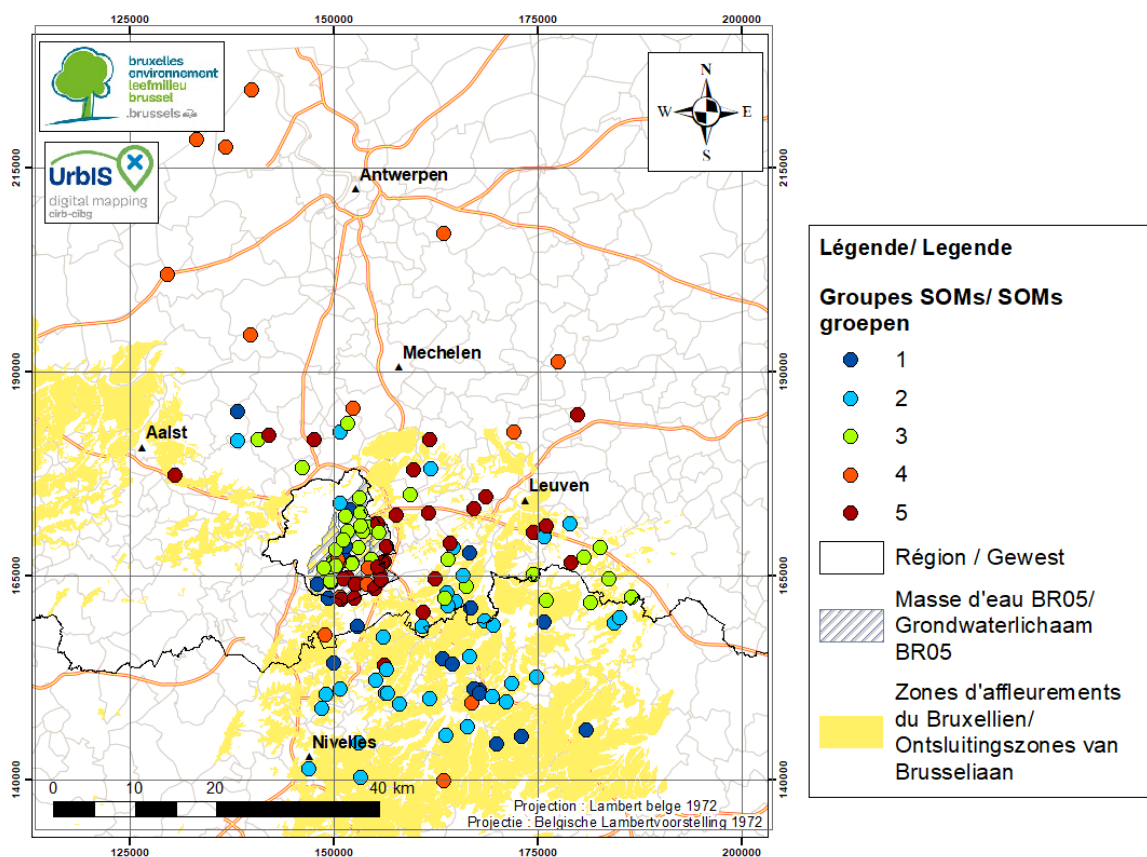


Figure 6-55 : Distribution spatiale des 5 groupes définis grâce à l'analyse multivariée (minéralisation globale)

6.2.8.2. Processus redox

Les résultats de l'analyse statistique multivariée, concernant l'influence des processus d'oxydoréduction sur la masse d'eau du Bruxellien, sont représentés à la Figure 6-56. Certaines corrélations peuvent être observées, le Mn et le Fe sont corrélés positivement, et corrélés

négativement au NO_3 . Une corrélation positive entre le NH_4 et certains métaux (Cu, Ni, Pb) est également observée. La matrice U est également présentée à la Figure 6-56 et de cette matrice U, 3 groupes ont été déduits par le logiciel. Le Tableau 6-10 synthétise les principales caractéristiques de ces trois groupes et ceux-ci sont représentés spatialement à la Figure 6-57.

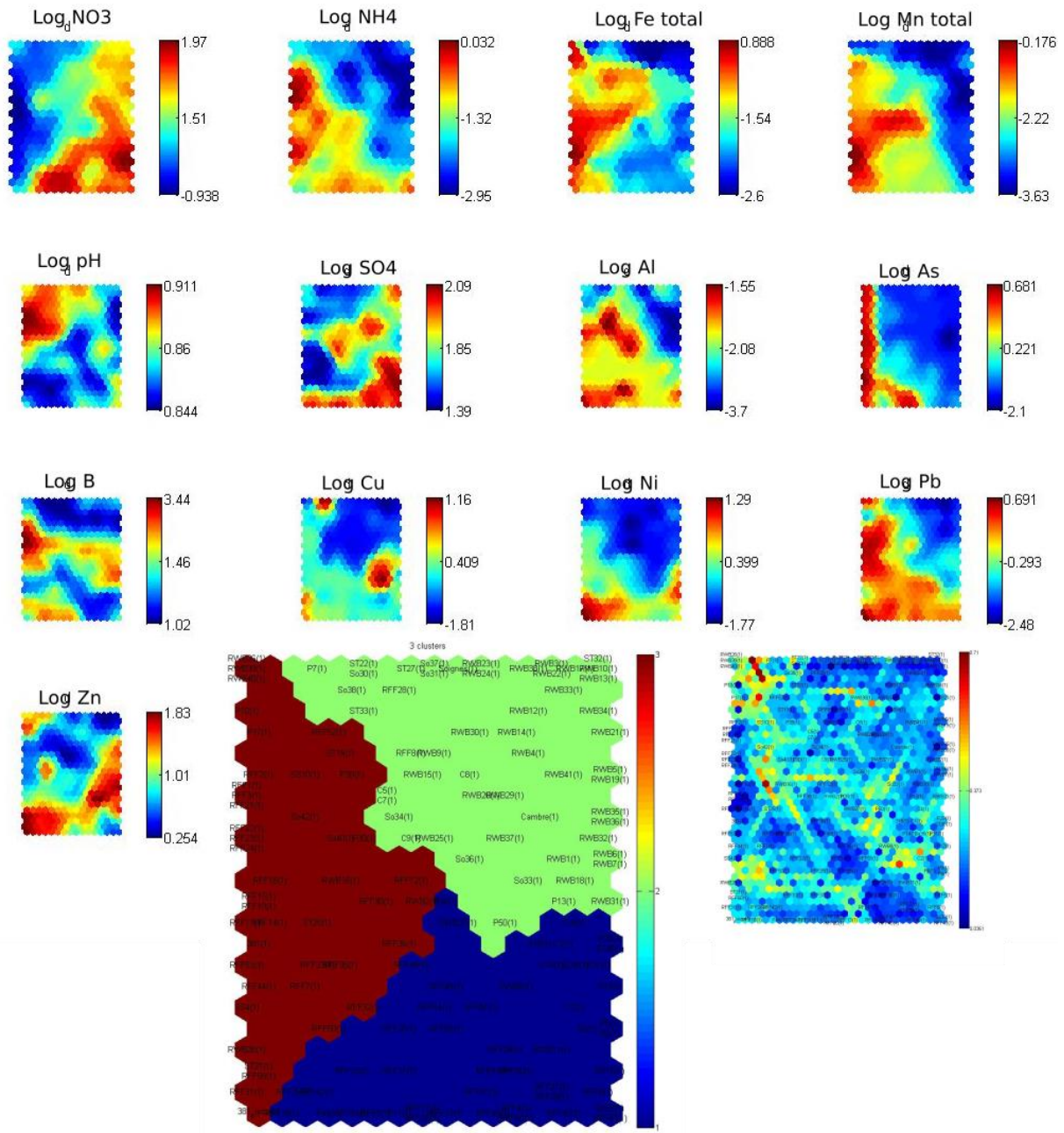


Figure 6-56 : Résultats des SOMs pour les processus redox du Bruxellien avec la matrice des composants, la matrice U et les groupes d'échantillons semblables définis par les SOMs

Groupe	NO3	NH4	Fe total	Mn	pH	SO4	Al	As	B	Cu	Ni	Pb	Zn
1 : Zone de transition	++	X	--	O	-	+	+	X	-	X	+	+	+
2 : Zone oxydante	+	-	X	-	-	X	-	-	X	-	-	-	X
3 : Zone suboxique	--	+	+	++	+	-	+	X	+	O	X	+	X

Tableau 6-10 : Caractéristiques de chacun des 3 groupes

++ Concentrations les plus élevées du jeu de données

+ Concentrations élevées dans le jeu de données

O concentrations moyens par rapport au jeu de données

- concentrations bas dans le jeu de données

-- concentrations les plus bas du jeu de données

X concentrations variés (des plus élevés aux plus bas)

Les échantillons du groupe 1, en bleu, présentent des concentrations élevées en NO₃, SO₄, Al, Ni, Pb, Zn, une concentration variable en NH₄, As, une concentration faible en Fe, B et un pH faible. Ce groupe se situe dans le centre de la zone entre les groupes 2 et 3, il s'agit d'une zone de transition. La concentration en nitrate est encore élevée mais il peut y avoir du NH₄ et du Mn en quantité significative, il peut également y avoir certains métaux comme le Ni, le Pb et le Zn même si ces métaux peuvent être d'origine anthropique. Il s'agit d'une zone entre la zone oxydante et la zone suboxydante.

Les échantillons du deuxième groupe, en vert, présentent des concentrations élevées en NO₃, des concentrations faibles pour les paramètres Mn, NH₄, Al, As, Cu, Ni, Pb et un pH faible, des concentrations variables en Fe, SO₄, B et Zn. Les échantillons de ce groupe se retrouvent dans la partie sud et la partie centrale de la zone d'étude, il s'agit de la zone oxydante de la nappe.

Les échantillons du groupe 3, en brun, présentent des concentrations faibles en NO₃ et SO₄ des concentrations élevées en NH₄, Fe, Mn, B, Pb, Al un pH élevé et des concentrations variables, As, Ni, Zn. Les points de ce groupe sont localisés principalement dans le nord de la zone, et en partie dans le sud de la Région de Bruxelles-Capitale. Ce groupe correspond à la zone suboxydante de la nappe.

Les résultats de l'analyse de la minéralisation globale et des processus redox ne sont pas tout à fait les mêmes. Certains points qui avaient été identifiés comme correspondant à la recharge récente font partie de la zone de transition pour les processus redox mais cela reste cohérent parce que l'eau de la recharge récente et contaminée peut avoir subi la dénitrification relativement rapidement et ne plus faire partie de la zone oxydante de la nappe.

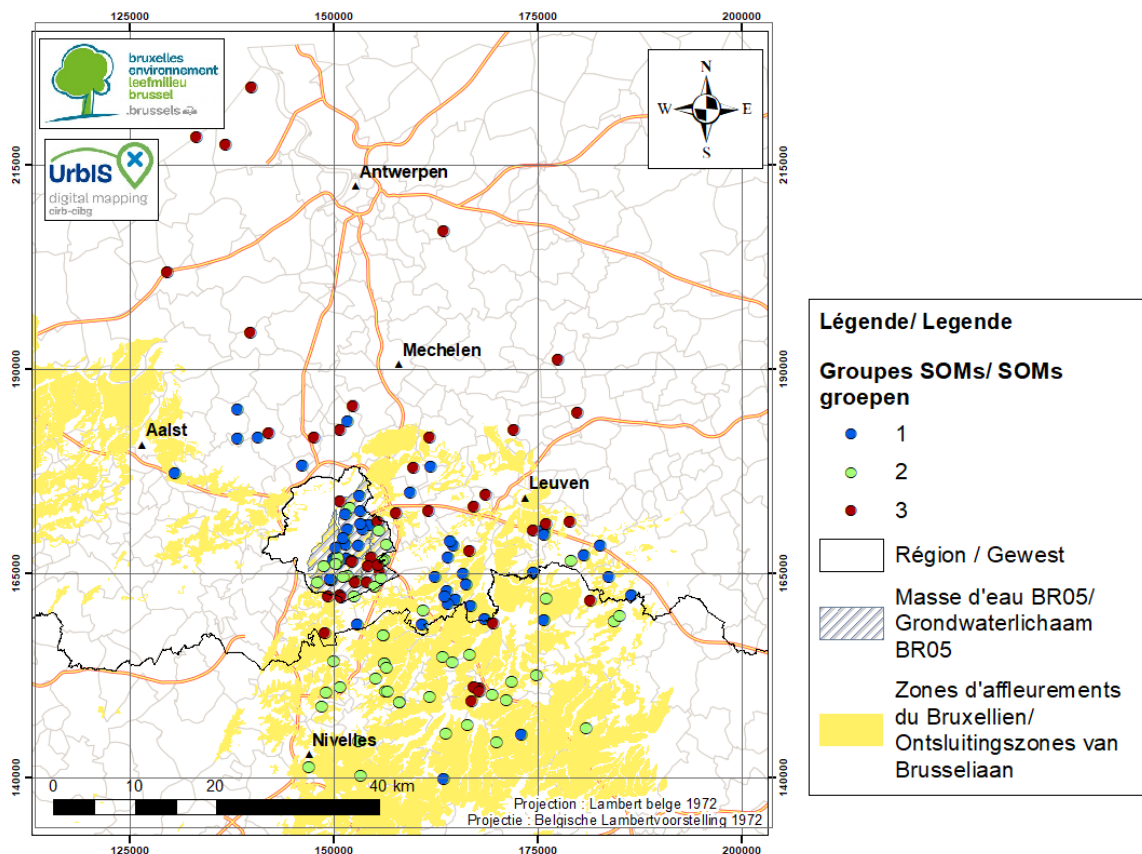


Figure 6-57 : Distribution spatiale des 3 groupes définis grâce à l'analyse multivariée (processus redox)

6.2.9. Modèle conceptuel de l'acquisition de la minéralisation

La synthèse des observations et des conclusions tirées dans ce chapitre permet de proposer un modèle conceptuel de l'acquisition de la minéralisation dans la masse d'eau de du Bruxellien.

Dans l'aquifère du Bruxellien, deux parties principales peuvent être identifiées : la zone libre et la zone captive. La zone libre couvre la majeure partie de l'aquifère et la partie captive concerne quelques sites en Région flamande au nord de la zone d'affleurement.

Dans la partie libre, les eaux sont de type bicarbonaté calcique ou chloruré calcique. Dans cette zone, la concentration en Ca est importante. Un des principaux processus qui influence la minéralisation dans cette zone, semble être la dissolution de la calcite. Les conditions redox sont généralement oxydantes ou à la transition entre oxydantes ou suboxiques. Il y a également quelques sites avec des conditions suboxiques. Les conditions redox évoluent globalement du sud vers le nord mais la limite entre ces zones n'est pas toujours bien définie parce que cela peut varier localement en fonction de la profondeur du puits, de la présence d'une couche protectrice et de l'apport en nitrate. La partie libre de la nappe est de manière générale, fort impactée par des contaminations anthropiques : présence de polluants, valeurs atypiques, rapport Na/Cl inférieur à 0.86. La pollution n'est pas homogène sur la zone libre de l'aquifère. En Région wallonne et en Région flamande, il semble s'agir principalement d'une contamination diffuse probablement liée à l'agriculture qui se marque par des concentrations en pesticides et en nitrates importantes. Dans ces zones, il peut y avoir également quelques pollutions ponctuelles (mise en évidence par des valeurs atypiques). La partie ouest de la

masse d'eau BR05 en Région de Bruxelles-Capitale, présente également des concentrations élevées en nitrates associées principalement à des fuites dans le réseau d'égouttage (De Coster & Vanclooster, 2013). Cette zone est également marquée par des sites avec des concentrations en tétrachloroéthylène et de nombreuses valeurs atypiques. Cette zone de la masse d'eau est soumise à de nombreuses pressions anthropiques liées à des activités industrielles et urbaines et il semble que la nappe soit impactée par de nombreuses pollutions ponctuelles.

Dans la partie libre de la nappe, certains sites ont tout de même été identifiés comme peu ou pas contaminés. Il s'agit de la forêt de Soignes en Région de Bruxelles-Capitale et de quelques sites en Flandre, au nord de la zone libre. Pour ces sites, les pressions anthropiques sont moins importantes ou la nappe est peut-être localement protégée par des couches sus-jacentes.

La zone captive est située en Flandre, au nord de la zone d'étude. Il s'agit majoritairement d'eaux de type bicarbonaté sodique et potassique et de type chloruré sodique et potassique. Les concentrations en Cl, Na, F, NH₄ sont importantes. La salinité importante provient d'une eau marine résiduelle. Cette eau marine a subi un phénomène de rafraîchissement au cours duquel il y a eu des échanges cationiques. Les ions Ca présents dans l'eau souterraine ont pris la place des ions Na fixés sur les sites d'adsorption des constituants du sous-sol. Dans cette troisième zone, les conditions sont également plus réductrices. Cela se marque notamment par des concentrations en Fe, Mn et NH₄ élevées.

6.3. Calcul des concentrations de référence

6.3.1. Sélection des échantillons

Les résultats de l'étude des processus hydrochimiques et en particulier, l'analyse statistique multivariée, vont permettre de sélectionner les échantillons qui seront utilisés pour le calcul des concentrations de référence.

Les SOMs ont montré que la masse d'eau souterraine du Bruxellien était majoritairement dans la partie oxisque ou à la transition entre la partie oxisque et suboxisquique. Il y a également des sites où les conditions sont suboxisquiques notamment au sud de la Région de Bruxelles-Capitale. La limite entre ces trois zones n'est pas toujours claire avec une évolution du sud vers le nord en suivant le sens d'écoulement parce que les conditions redox dépendent aussi de la profondeur du puits et si la nappe est localement captive ou pas. Concernant la minéralisation de la nappe, les SOMs ont montré que la majorité des sites sont contaminés, mais des sites non impactés sont également trouvés au sud de la région Bruxelles-Capitale. Des sites où la minéralisation est liée à une ancienne eau marine sont observés dans le nord de la zone.

L'étude des valeurs atypiques a aussi montré que la partie centrale de la masse d'eau BR05 présente de nombreuses valeurs atypiques. Dans cette zone, il semble donc qu'il y ait des pollutions ponctuelles.

Pour calculer les concentrations de référence, les sites qui sont identifiés comme contaminés seront exclus. Le calcul des concentrations de référence se basera sur le groupe 5 des SOMs qui correspond à la recharge récente non contaminée (Figure 6-58). Deux approches seront testées : calculer les concentrations de référence avec les sites non impactés de la masse d'eau BR05 et les calculer en prenant également en compte les stations non impactées situées dans un buffer de 10 km autour de

la masse d'eau BR05. Dans ces deux sélections, les paramètres présentant des valeurs atypiques ont été écartés.

Une troisième sélection sera également testée. Celle-ci inclura l'ensemble des sites de la masse d'eau BR05 mais en excluant les paramètres présentant des valeurs atypiques et les sites présentant plus de deux valeurs atypiques (Figure 6-59).

La première sélection comprend 26 sites, la deuxième 17 et la troisième 42 (Figure 6-60, Figure 6-61 et Figure 6-62). Les deux premières sélections vont permettre a priori permettre de calculer des concentrations de référence et la troisième des concentrations de fond (qui incluent également la pollution diffuse).

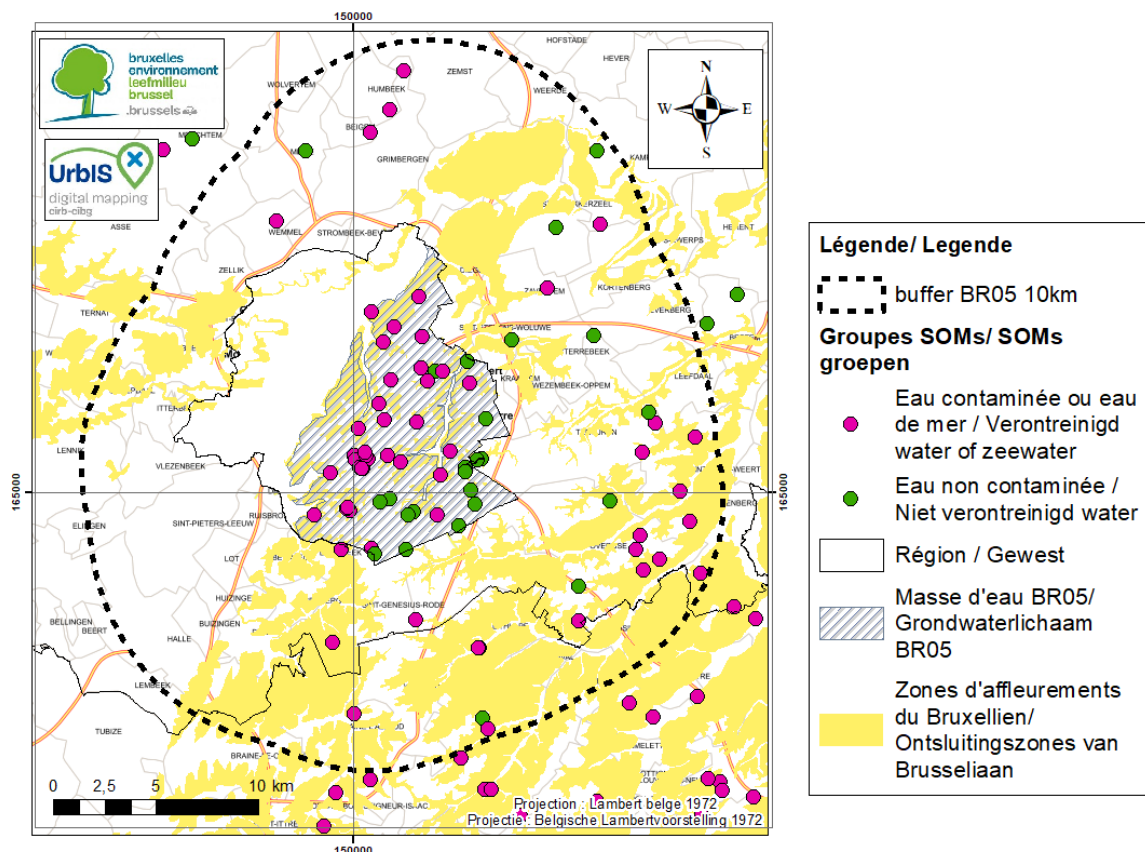


Figure 6-58 : Buffer de 10 km autour de la masse d'eau BR05 avec le résultat des SOMs pour la minéralisation globale

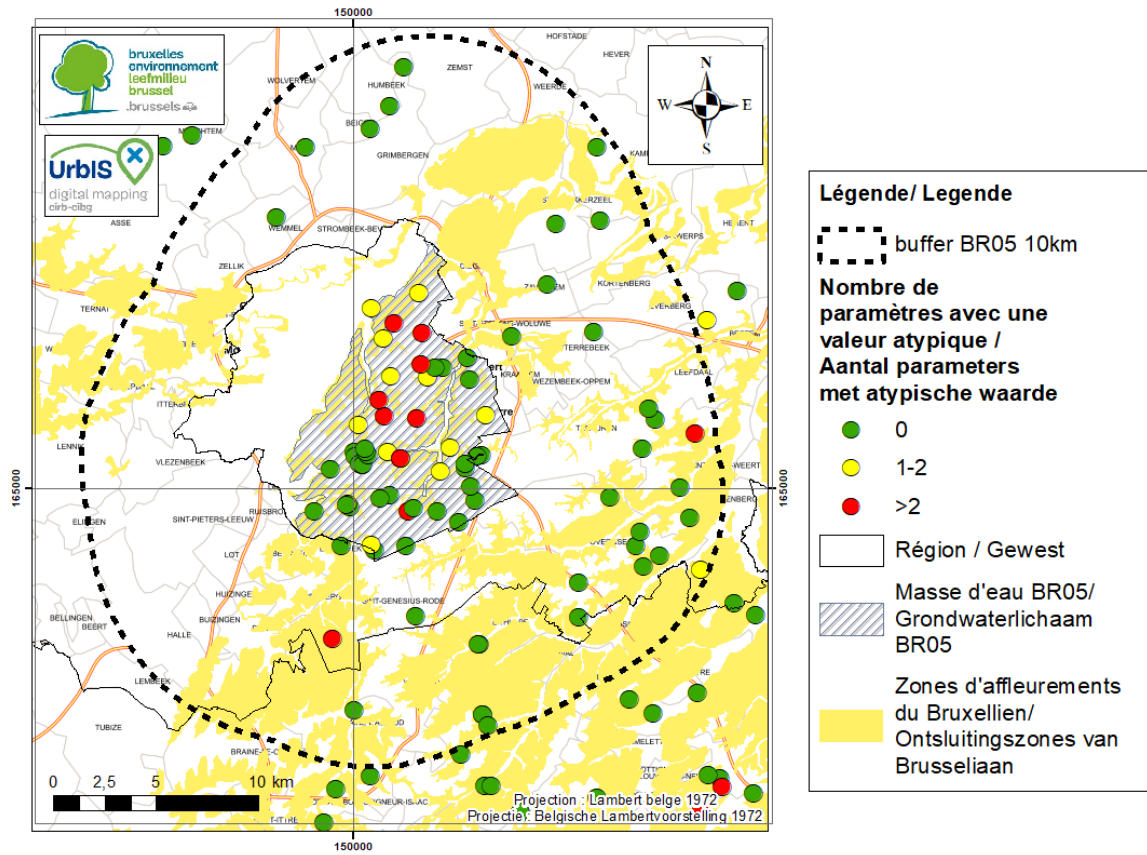


Figure 6-59 : Buffer de 10 km autour de la masse d'eau BR05 avec le nombre de valeurs atypiques par site

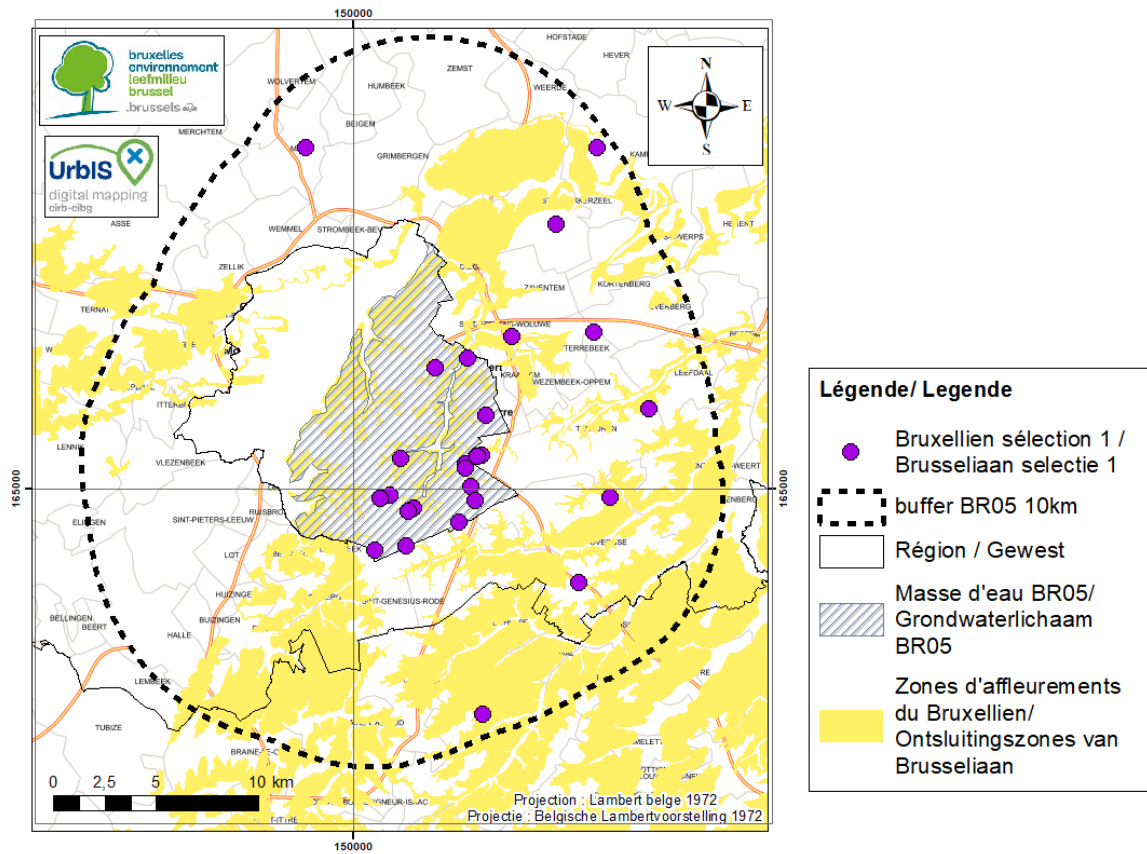


Figure 6-60 : Sélection 1 des sites pour le calcul des concentrations de référence du Bruxellien

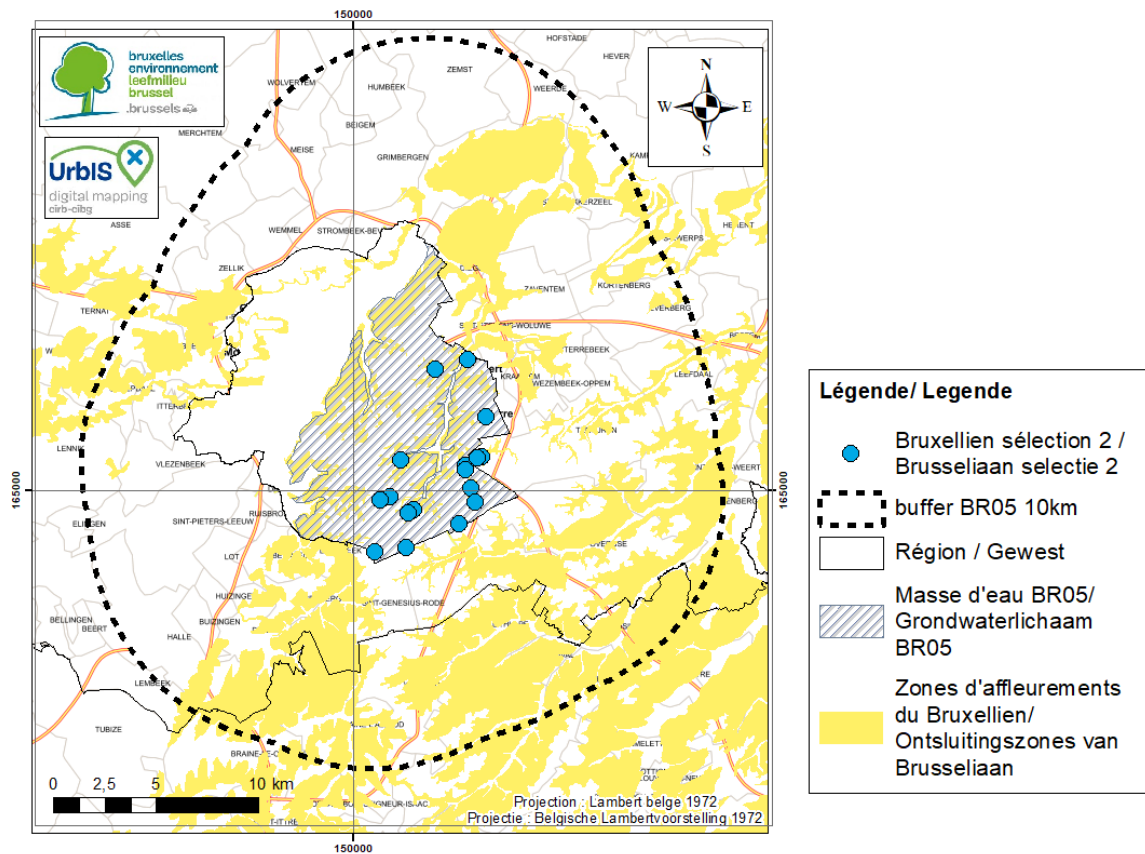


Figure 6-61 : Sélection 2 des sites pour le calcul des concentrations de référence du Bruxellien

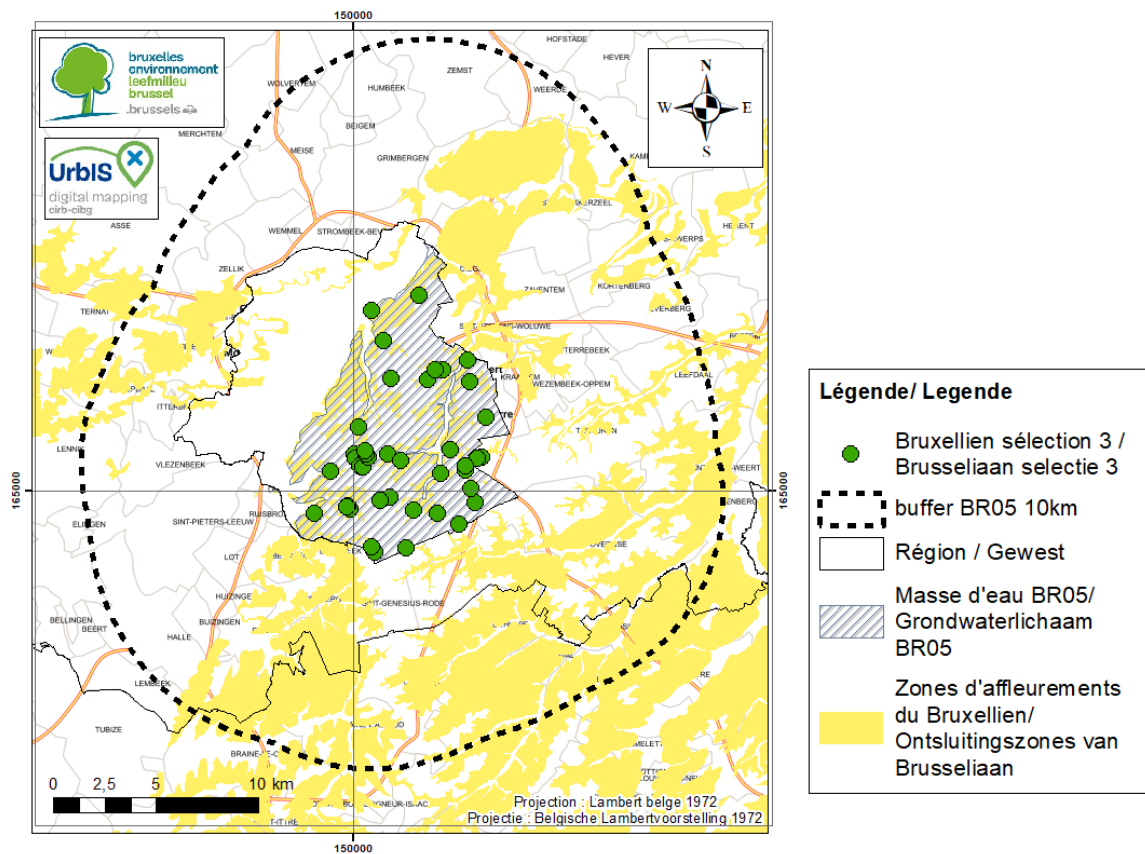


Figure 6-62 : Sélection 3 des sites pour le calcul des concentrations de référence du Bruxellien

6.3.2. Proposition de concentration de référence

Pour les stations qui ont été sélectionnées (3 types de sélection) dans le point précédent, les principaux paramètres statistiques sont calculés (Tableau 6-11 et Tableau 6-12). Il s'agit de : la moyenne, la médiane (P50), le P25, le P75 et le P90. Le nombre de stations d'échantillonnage est mentionné ainsi que le pourcentage de quantification de chaque valeur. Les paramètres statistiques ont été calculés sur base des médianes de chaque station d'échantillonnage. Lorsqu'un paramètre est en dessous de la limite de quantification, il est estimé en divisant la limite de quantification par 2. Pour les métaux les concentrations de référence seront déterminées pour la fraction totale à l'exception du plomb, du mercure et du cadmium parce que les valeurs seuils ont été fixées sur la fraction dissoute pour ces métaux pour la masse d'eau souterraine BR05 (Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles Capitale relatif à la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration, 2010 et sa révision de 2016).

Pour estimer les concentrations de référence, la médiane représente la valeur habituellement rencontrée et le P90, la valeur limite de la concentration de référence. Il est généralement recommandé d'utiliser le P90 pour fixer une valeur de concentration de référence (Müller, 2006). Pour les deux premières sélections, la majorité des paramètres ont le même ordre de grandeur de P90. La différence majeure entre ces deux sélections est la concentration en nitrate qui est inférieure à 10 mg/L pour la sélection des sites « non impactés » de la masse d'eau BR05 et de l'ordre de 20 mg/L en considérant les sites « non impactés » du buffer. Contrairement aux autres masses d'eau bruxelloise, la masse d'eau BR05 comprend de nombreuses stations d'échantillonnage. Il n'est pas obligatoire de rajouter des stations supplémentaires pour calculer des concentrations de référence. Il est donc préférable de se baser sur la sélection 2 où les concentrations en nitrates sont moins élevées. Dans un premier temps, les résultats des concentrations de référence seront présentés en tenant compte de la sélection 2 mais la décision finale reviendra au pouvoir adjudicateur.

Pour la sélection 3, qui correspond aux concentrations de fond, il est possible de constater qu'il y a un peu plus de différence qu'avec les deux premières sélections. Les concentrations sont généralement plus élevées notamment en Cl, Na, B, SO₄, et bien sûr en NO₃. Cependant les concentrations de fond définies par le percentile 90 sont tous de même inférieures aux valeurs seuils de la Région de Bruxelles-Capitale.

Pour certains paramètres, le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de quantification est très faible (mis en évidence en rouge dans les Tableau 6-11 et Tableau 6-12). Pour ces paramètres il n'est pas recommandé d'utiliser le P90. Les concentrations de référence seront fixées en se basant sur la limite de quantification et sur les résultats pour des aquifères semblables (Müller, 2006). Les aquifères semblables considérés sont : la masse d'eau BLKS_0600_GWL_1 en Flandre et la masse d'eau BERWE051 en Wallonie. Pour certains paramètres (As, Cd, Hg, Ni, NO₂), la concentration de référence sera fixée égale à la limite de quantification la plus grande, ce qui est généralement du même ordre de grandeur que les valeurs de concentration de référence définies en Région flamande et en Région wallonne. Pour les paramètres NH₄ et phosphore total, les percentiles 90 qui sont calculés sont supérieurs aux valeurs de limite de quantification les plus élevés. Il est suggéré de fixer quand même la concentration de référence sur base du percentile 90 même si le pourcentage de quantification est faible parce que les valeurs obtenues sont cohérentes avec les valeurs fixées en Wallonie et en Flandre. Pour le plomb, les valeurs de quantification ont des ordres de grandeurs assez différents entre 0.1 et 5 µg/L. Si la valeur est fixée à la limite de quantification la plus grande.

paramètres	Sélection 1										Sélection 2									
	NB	% > LQ	Valeur LQ	min	P25	moy.	P50	P75	P90	max	NB	% > LQ	Valeur LQ	min	P25	moy.	P50	P75	P90	max
Al (mg/L)	15	40	0.05, 0.04, 0.02, 0.01, 0.001	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	6	53	0.01, 0.001	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
As total (µg/l)	23	26	5, 2, 1.5, 1, 0.65, 0.5, 0.33	0.50	0.50	0.93	0.50	1.00	2.34	2.50	15	21	1.5, 1	0.50	0.50	0.67	0.50	0.63	1.03	1.70
B total (µg/l)	24	76	100, 60, 50, 30, 26, 10	8	11	19	15	20	42	50	16	93	60, 50, 26, 10	8	11	14	12	18	21	30
Br (mg/L)	12	93		0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	11	100		0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08
Ca (mg/L)	25	100		48	111	118	122	128	142	162	16	100		48	113	117	124	129	137	144
Cd dissous (µg/l)	16	5	0.4, 0.3, 0.1	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.08	0.20	16	5	0.4, 0.3, 0.1	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.08	0.20
Cl (mg/L)	25.0	98.1		8.6	16.5	19.9	19.0	25.8	27.0	29.7	16.0	100.0		10.0	15.9	19.6	19.7	25.2	26.1	27.2
Cu total (µg/l)	13	21	5, 4, 3.5, 3, 2, 1, 0.4	1.00	1.00	2.45	2.50	2.50	4.50	6.06	5	47	2, 1	1.00	1.00	2.81	1.00	5.00	5.64	6.06
EC (µs/cm)	25	100		308	581	615	631	680	715	742	16	100		308	571	602	650	667	689	728
F (mg/L)	21	83		0.08	0.12	0.15	0.14	0.16	0.18	0.31	12	100		0.10	0.12	0.14	0.14	0.16	0.17	0.19
Fer (total) (mg/L)	23	73	0.05, 0.02, 0.01, 0.005	0.00	0.01	0.30	0.03	0.22	1.15	2.22	15	69	0.05, 0.005	0.00	0.01	0.37	0.02	0.20	1.45	2.22
HCO3 (mg/L)	15	97		273	333	351	365	380	388	420	6	100		333	344	363	368	377	386	392.30
K (mg/L)	15	98		0.52	0.90	1.46	1.10	1.63	2.12	4.90	6	100		0.70	0.91	1.84	1.17	2.00	3.55	4.90
Hg dissous (µg/l)	16	0	0.05, 0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	16	0	0.05, 0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Mg (mg/L)	15	100		6	10	13	14	15	16	18	6	100		8	11	13	14	15	15	15
Mn (mg/L)	24	56	0.02, 0.01, 0.001, 0.0005	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.06	0.29	15	48	0.02, 0.001, 0.0005	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.05
Na (mg/L)	15	100		7	9	10	10	13	13	15	6	100		8	10	11	11	13	14	15
NH4 (mg/L)	26	22	0.26, 0.19, 0.16, 0.1, 0.08, 0.07, 0.065, 0.06, 0.01	0.00	0.03	0.07	0.03	0.06	0.09	0.39	17	15	0.1, 0.065, 0.06, 0.05	0.03	0.03	0.07	0.03	0.05	0.19	0.39
Ni total (Ni) (µg/l)	24	36	10, 5, 4, 2, 1.9, 1.3, 1	1.00	1.00	1.88	1.87	2.50	3.32	4.00	16	24	5, 2, 1	1.00	1.00	1.61	1.00	2.00	3.00	4.00
NO3 (mg/L)	26.0	83.3	2, 1.19, 1, 0.9, 0.44, 0.2, 0.18; 0.1, 0.09	0.1	1.1	9.1	4.1	7.0	21.1	57.9	17.0	92.1	2, 1, 0.09	0.5	1.5	5.1	4.4	6.2	9.4	19.6
NO2 (mg/L)	26	10	0.07, 0.03, 0.02, 0.01, 0.0046	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	17	2	0.03, 0.02, 0.0046	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04
Orthophosphates (mg/l de P)	25	68	0.31, 0.12, 0.1, 0.09, 0.06, 0.05, 0.03, 0.02, 0.0066	0.01	0.03	0.05	0.04	0.05	0.12	0.21	16	96	0.02, 0.0066	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05	0.06
Pb dissous (µg/l)	16	19	5, 3, 0.1	0.05	0.05	0.26	0.05	0.06	0.46	2.50	16	19	5, 3, 0.1	0.05	0.05	0.26	0.05	0.06	0.46	2.50
pH	25	100		6.90	7.23	7.30	7.32	7.36	7.39	7.57	16	100		6.90	7.30	7.33	7.35	7.38	7.42	7.57
Phosphore total (mg/l de P)	18	22	0.23, 0.1, 0.05	0.05	0.05	0.10	0.05	0.07	0.15	0.60	17	22	0.1, 0.05	0.05	0.05	0.10	0.05	0.05	0.16	0.60
SO4 (mg/L)	25.0	99.2		5.0	40.0	48.6	55.0	58.1	66.1	80.0	16.0	100.0		5.0	40.8	46.4	50.5	56.3	62.2	66.8
Zn total (µg/l)	14	58	20, 10, 8.8, 5.3, 5, 2	1.00	4.41	14.90	9.43	11.38	36.68	73.01	6	71	2	1.00	3.30	17.87	7.61	14.00	44.00	73.01

Tableau 6-11 : Paramètres statistiques calculés pour estimer la concentration de référence type de la masse d'eau du Bruxellien BR05 sur base des médianes des stations, en rouge : les paramètres avec le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de quantification très faible (<25%) (Partie 1)

paramètres	Sélection 3									
	NB	% > LQ	Valeur LQ	min	P25	moy.	P50	P75	P90	max
Al (mg/L)	16	62	0.01, 0.001	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.05
As total (µg/l)	34	10	5, 1.5, 1, 0.5	0.25	0.50	0.62	0.50	0.50	0.87	1.70
B total (µg/l)	34	97	60, 50	8	13	55	30	59	124	290
Br (mg/L)	22	100		0.04	0.06	0.09	0.08	0.10	0.14	0.22
Ca (mg/L)	33	100		20	122	142	141	169	184	266
Cd dissous (µg/l)	33	1	0.4, 0.3, 0.1	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05	0.18	0.20
Cl (mg/L)	34.0	100.0		6.6	20.3	38.7	28.9	53.1	77.3	101.2
Cu total (µg/l)	14	37	2, 1	0.50	1.00	2.31	1.00	2.50	5.74	8.78
EC (µs/cm)	34	100		115	648	757	721	919	1002	1202
F (mg/L)	25	100		0.10	0.12	0.14	0.13	0.15	0.17	0.21
Fer (total) (mg/L)	33	72	0.05, 0.01, 0.005	0.00	0.01	0.27	0.02	0.08	1.23	2.22
HCO3 (mg/L)	16	100		297	340	381.5	380	409	433	516
K (mg/L)	20	100		0.70	1.28	2.48	1.50	2.80	5.01	9.50
Hg dissous (µg/l)	33	0	0.05, 0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
Mg (mg/L)	20	100		8	14	17	16	20	23	27
Mn (mg/L)	33	53	0.02, 0.001, 0.0005	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.11
Na (mg/L)	20	100		7	13	21	21	27	32	49
NH4 (mg/L)	42	6	0.1, 0.065, 0.06, 0.05, 0.03, 0.02	0.03	0.03	0.05	0.03	0.05	0.10	0.37
Ni total (Ni) (µg/l)	33	40	5, 2, 1	1.00	1.00	1.84	1.00	2.00	3.00	8.05
NO3 (mg/L)	42.0	98.3	2, 1, 0.09	0.9	5.0	29.8	25.3	47.5	62.7	132.6
NO2 (mg/L)	41	1	0.07, 0.05, 0.03, 0.02, 0.0046	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04
Orthophosphates (mg/l de P)	33	98	0.02, 0.0066	0.02	0.03	0.05	0.04	0.06	0.09	0.16
Pb dissous (µg/l)	33	28	5, 3, 0.1	0.05	0.05	0.39	0.05	0.10	2.17	2.50
pH	31	100		6.98	7.19	7.27	7.31	7.37	7.40	7.57
Phosphore total (mg/l de P)	35	26	0.1, 0.05	0.02	0.05	0.12	0.05	0.08	0.20	0.70
SO4 (mg/L)	32.0	100.0		8.4	52.3	68.5	65.8	80.8	109.1	143.9
Zn total (µg/l)	14	79	2	1.00	3.30	15.12	10.00	16.80	29.75	73.01

Tableau 6-12 : Paramètres statistiques calculés pour estimer la concentration de référence type de la masse d'eau du Bruxellien BR05 sur base des médianes des stations, en rouge : les paramètres avec le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de quantification très faible (<25%) (Partie 2)

La valeur sera plus élevée que la concentration de fond qui a été calculée 2.17 µg/L et plus élevée que les valeurs de référence fixées en Wallonie et en Flandre (0.71 en Wallonie et non fixée en Flandre car inférieur à la limite de quantification). Il est donc proposé de fixer la concentration de référence identique à celle de la Wallonie.

Les concentrations de référence proposées pour la masse d'eau BR05 sont présentées dans le Tableau 6-13 et sont comparées aux valeurs de la Région flamande et de la Région wallonne. Les valeurs proposées pour la masse d'eau BR05 sont du même ordre de grandeur que celles proposées en Wallonie et en Flandre.

Paramètres	unité	Région flamande	Région wallonne	Région de Bruxelles-Capitale
		BLKS_0600_GWL_1	BERWE051	Concentration de référence
Al dissous	mg/L	0.12		0.02
Al total	mg/L			
As dissous	µg/L	*	0.59	1.5
As total	µg/L			
B dissous	µg/L	39	37.30	20.5
B total	µg/L			
Ca	mg/L	160		137.3
Cd dissous	µg/L	*	0.09	0.4
Cd total	µg/L			
Cl	mg/L	55	61.07	26.13
Cu dissous	µg/L	*	2.85	5.64
Cu total	µg/L			
EC	µs/cm	840		689
F	mg/L	0.2		0.17
Fe dissous	µg/L	4400	22	1455
Fe total	µg/L			
HCO3	mg/L			386
Hg dissous	µg/l	*	0.04	0.05
Hg total	µg/l			
K	mg/L	4.1		3.55
Mg	mg/L	18		15.2
Mn dissous	µg/L	520	5	22
Mn total	µg/L			
Na	mg/L	18		14.15
NH4	mg/L	0.66	0.03	0.19
Ni dissous	µg/L	6	1.83	5
Ni total	µg/L			
NO2 (mg/L)	mg/L	*	0.01	0.03
NO3	mg/L			
Orthophosphates	mg/l de P	0.39		0.05
Pb dissous	µg/L	*	0.71	0.46
Pb total	µg/L			
pH		6.9 - 7.5		7.42
Phosphore total	mg/l de P		0.19	0.16
SO4	mg/L	150	91.69	62.18
Zn dissous	µg/L	30	24.00	44.00
Zn total	µg/L			

Tableau 6-13 : Concentrations de référence du Bruxellien en Flandre et en Wallonie (SPW-DGO3-DEE, 2016 et VMM, 2016) comparées aux valeurs proposées pour la masse d'eau BR05 (en rouge : les paramètres avec le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de quantification très faible ; * : concentration de référence non déterminée car mesures < limite de quantification)

7. Recommandations

Suite à l'analyse et au traitement des données disponibles, des recommandations sont émises en vue d'améliorer la connaissance des conditions hydrochimiques qui prévalent au sein des masses d'eaux souterraines étudiées, l'identification des éléments chimiques susceptibles d'y être naturellement présents et l'estimation des concentrations de référence.

7.1. Recommandations relatives aux programmes d'échantillonnage des masses d'eau souterraine

La première recommandation concerne l'analyse systématique des éléments majeurs et des éléments mineurs. Ceux-ci sont très importants pour vérifier la qualité des données en calculant la balance ionique. Ils sont également très importants pour comprendre la minéralisation des eaux échantillonnées, pour pouvoir ainsi les situer dans le diagramme de piper, calculer des rapports ioniques (Na/Cl) C'est pourquoi il est recommandé d'analyser les éléments majeurs et les éléments mineurs à chaque échantillonnage. Les éléments pour lequel il serait le plus intéressant et urgent de refaire une campagne d'échantillonnage complète sont les sites de la masses d'eau BR05 identifiés comme non contaminés (principalement situés dans la forêt de Soignes). Il s'agit des stations: 381, SS4, ST22, ST27, ST31, ST33, So30, So37, So38, ST19, SS10. C'est en partie sur base de ces stations d'échantillonnage que les concentrations de référence ont été calculées. Il serait dès lors très pertinent d'avoir des jeux de données complets.

Il serait également intéressant suivre de manière régulière les sites qui sont identifiées comme contaminés. Pour la masse d'eau BR02, il y a le site P23. Pour la masse d'eau BR04, l'ensemble des sites sont impactés, en particulier les stations P48 et P51 pour lesquelles uniquement un échantillonnage a été réalisé, il serait donc nécessaire de faire un suivi détaillé pour voir s'il s'agit d'une pollution ponctuelle dans le temps où si la pollution est encore présente. Pour la masse BR05, la majorité des stations semble contaminée mais il serait intéressant de faire un suivi détaillé des sites P28, P14, P6, P13, P8, ST32, So39 parce que les concentrations en tétrachloroéthylène sont supérieures aux normes et sont en augmentation. La majorité de ces sites sont situées dans des lavoirs, blanchisseries et car-wash où il est probable que la pollution soit liée à ces activités mais deux sources sont également impactées. Il pourrait être intéressant de lister les activités aux alentours pour avoir une idée de l'origine de la pollution.

Dans le rapport, il a été montré que les concentrations en oxygène étaient souvent anormalement élevées dans la masse d'eau BR02 qui est supposées être captive. Il est recommandé de revoir les méthodes d'échantillonnages et de s'assurer qu'elles suivent bien le Code de bonnes pratiques n°3 : *Code de bonnes pratiques pour la prise d'échantillon de sol, d'eau souterraine, de sédiment et d'air du sol, ainsi que la préservation (conservation et récipients) des échantillons prélevés* (IBGE, 2016). Il faut notamment veiller à ce que la purge soit réalisée correctement, que les capteurs des sondes soient calibrés fréquemment et que les mesures soient réalisées dans une cellule de passage à flux continu. Il est également suggéré de mesurer le potentiel redox. Cette mesure n'est pas obligatoire d'après la directive cadre eau (DCE 2000/60/CE) mais elle peut fournir des informations complémentaires sur les conditions d'oxydoréduction dans la nappe.

Concernant l'analyse des métaux en Région bruxellois la majorité des mesures concerne la fraction totale, il pourrait également être intéressant de mesurer la fraction dissoute notamment du Fe, Mn, Zn, As. Cela permettrait de savoir si les concentrations élevées sont dues au fer dissous ou à la

présence de particules (colloïdes/complexes). Cela permettrait également de comparer les données entre les différentes régions, notamment pour le Fe qui est mesuré principalement en fraction dissoute dans les autres régions.

Une autre recommandation concerne les limites de quantifications. Pour certains métaux (Pb, As, Cd, Ni) les limites de quantifications sont parfois élevées même pour des échantillonnages récents. Des limites de quantifications trop élevées ne permettent pas de calculer des concentrations de référence de manière précise. Dans la directive cadre européenne "Eau potable" (CE, 1998) il est recommandé que la limite de quantification soit inférieure ou égale à 10% de la valeur paramétrique (norme) (CE, 1998).

7.2. Recommandations relatives à la représentativité spatiale et temporelle des jeux de données

Le nombre de stations d'échantillonnage dans les masses d'eau BR02 et BR04 n'est pas très élevé. Ceci ne permet pas de faire des statistiques très robustes sur ces jeux de données. Dans la masse d'eau BR02, il y a 5 stations d'échantillonnage et seulement 3 ont pu être utilisées pour le calcul des concentrations de référence. Dans la masse d'eau BR04, il y a uniquement 3 stations d'échantillonnage. Malgré le nombre peu élevé de stations d'échantillonnage, il n'est pas recommandé de forer de nouveaux puits d'échantillonnage, parce que la superficie des masses d'eau BR02 et BR04 est relativement réduite : 51 km² et 21 km². Pour de futurs traitements statistiques sur ces masses d'eau souterraine, il est plutôt recommandé d'utiliser les puits des régions voisines (Région flamande et Région wallonne), par exemple en utilisant les points qui ont été sélectionnés dans le cadre de ce travail. Cependant, si pour d'autres études, il s'avérait nécessaire de forer d'autres puits dans les masses d'eau BR02 et BR04, certains emplacements seraient plus judicieux que d'autres. Pour la masse BR02, la répartition des stations d'échantillonnage n'est pas très homogène, il n'y a pas de puits dans sud-est de la masse d'eau. Pour la masse d'eau BR04, il pourrait être intéressant de placer une station d'échantillonnage dans le nord de la zone là où les sables yprésiens sont recouverts d'unités plus argileuses (l'aquiclude des argiles de Gent et l'aquiclude des argiles de Ursel et Assé). Ce ne semble pas le cas pour les stations actuelles de la masse d'eau BR04 et ce qui explique peut-être pourquoi elles ne sont marquées par des impacts anthropiques.

Il n'est donc pas nécessairement recommandé de forer de nouvelles stations d'échantillonnage mais par contre il est fortement recommandé de faire un suivi plus régulier des stations existantes comme cela a déjà été mentionné dans le point précédent. Avoir plus de données permet de faire des statistiques plus robuste (calcul de la médiane, calcul des tendances, ...).

8. Conclusion

Depuis la mise en place de la directive cadre eau (DCE 2000/60/CE) et de sa directive fille (2006/118/CE), il est nécessaire pour chaque état membre de l'Union européenne de déterminer l'état qualitatif des masses d'eau. Pour se faire, il faut fixer des valeurs seuil pour les polluants et indicateurs de pollution doivent être fixées. Un dépassement de ces valeurs est susceptible d'indiquer des eaux souterraines qui ne sont pas en bon état. Lorsque les polluants sont présents naturellement, il faut déterminer les concentrations de référence, c'est-à-dire la concentration en éléments naturellement présents dans le milieu sans modification anthropique. Certains états membres déterminent aussi les concentrations de fond qui caractérisent la concentration ambiante d'un polluant dans le sol en vue de caractériser le bruit de fond d'une pollution régionale diffuse.

L'objectif de ce présent rapport et de la convention entre Bruxelles Environnement et le Groupe d'Hydrogéologie et de Géologie de l'Environnement de l'Université de Liège (HGE-ULg) était de caractériser la concentration de référence de certains paramètres chimiques présents naturellement dans les masses d'eau souterraines du Socle en zone d'alimentation (BR02), de l'Yprésien (région des collines) (BR04) et du Bruxellien (BR05) en Région de Bruxelles-Capitale.

La première partie de ce rapport fait état des recherches bibliographiques qui ont été menées. Des aquifères européens avec des contextes hydrogéologiques semblables aux 3 masses d'eau étudiées ont été identifiés. Les teneurs en éléments majeurs et mineurs habituellement rencontrées dans ces aquifères, ont été compilées sous forme de tableaux. Cette recherche a permis d'avoir une première idée sur les teneurs en éléments majeurs et mineurs qui étaient attendues à Bruxelles. Elle a permis de montrer que les éléments avaient généralement des ordres de grandeur similaires mais qu'il y avait tout de même des différences entre les aquifères. Cela est dû au fait que même si les aquifères présentent la même lithologie, de nombreux autres processus peuvent influencer la minéralisation de l'eau souterraine, ce qui amène des signatures géochimiques différentes pour chaque aquifère. Il est donc intéressant de comprendre les processus affectant chaque masse d'eau et de déterminer des concentrations de référence (ou de fond) propres à chaque masse d'eau souterraine.

La suite de la recherche bibliographique a consisté à détailler les méthodes utilisées pour déterminer les concentrations de référence et les valeurs seuils. Les approches de référence sont celles décrites dans les projets européens FP6 BRIDGE (Müller, 2006) et BaSeLiNe (Edmunds and Shand, 2008) et dans la note de guidance 18 (European Commission, 2009). Les méthodologies qui sont suivies en Région wallonne et en Flandre sont également détaillées. La Région flamande applique les recommandations du projet Bridge et la Région wallonne suit plutôt celles de la note de guidance qui est plus souple pour le calcul des valeurs seuils mais qui permet d'avoir des valeurs plus uniformes et donc plus facile à appliquer. Pour les concentrations de référence en Flandre, il s'agit des concentrations a priori naturelles (toute contamination est écartée) tandis qu'en Région wallonne il s'agit plutôt de concentrations de fond qui prennent également en compte la pollution diffuse.

Le rapport comprend ensuite une partie décrivant la méthodologie qui a été appliquée dans ce travail pour comprendre les processus géochimiques affectant la minéralisation et la méthodologie pour calculer les concentrations de référence. L'ensemble des outils qui ont été utilisés dans ce travail ont également été décrits dans cette partie.

Peu de données sont disponibles pour les masses d'eau BR02 et BR04 (5 et 4) contrairement à la masse d'eau BR05 (51). Des données supplémentaires provenant des masses d'eau souterraine

voisines en Région wallonne et en Région flamande) ont également été ajoutées afin d'élargir le jeu de données. Cela a permis d'effectuer des statistiques plus robustes et de replacer les masses d'eau souterraine étudiées dans leur contexte hydrogéologique et hydrochimique régional.

La qualité des données a ensuite été examinée. L'appartenance de chaque station à la masse d'eau souterraine désignée a été vérifiée. Les balances ioniques ont été calculées, les limites de quantification ont été analysées pour chaque région, la présence de polluants a été mise en évidence. Certaines données ont été exclues de l'analyse : les données n'appartenant pas aux masses d'eau étudiées et les données avec des limites de quantification égales ou supérieures aux normes de la directive 98/83/CE. Les échantillons contaminés n'ont pas été écartés dans un premier temps pour comprendre l'origine de la pollution et l'impact de la contamination sur la minéralisation. Les données complémentaires (Région wallonne et Région flamande) qui ne présentaient pas un jeu de données complet (pour les éléments majeurs) ont été écartées de l'analyse.

Après avoir examiné la qualité des données et exclu certains échantillons, les médianes des concentrations en éléments majeurs et mineurs de chaque station d'échantillonnage ont été calculées. Cela permet notamment d'attribuer le même poids à chaque station d'échantillonnage lors d'une analyse statistique.

Pour comprendre les processus chimiques influençant la composition géochimique des eaux souterraines de chaque masse d'eau, plusieurs outils ont été utilisés. Les échantillons ont été replacés sur un diagramme de Piper et la répartition spatiale des éléments majeurs et mineurs a été étudiée. L'évolution des paramètres au cours du temps a été examinée. L'origine de salinité a été étudiée au moyen du rapport Na/Cl et des indices de saturations de la calcite, la halite et le gypse. Une analyse statistique descriptive a été réalisée pour étudier notamment la distribution des éléments. Les valeurs atypiques ont été mises en évidence, les corrélations entre les éléments ont été étudiées et une analyse multivariée a été réalisée.

Sur base de l'analyse de la qualité des données et de l'analyse des processus géochimiques, plusieurs stations d'échantillonnages ont été sélectionnées pour le calcul des concentrations de référence/fond de chaque masse d'eau. Pour déterminer les concentrations de référence la médiane représente la valeur habituellement rencontrée dans la masse d'eau et le P90 la concentration de référence. Lorsque que les valeurs étaient trop largement inférieures à la limite de quantification, la concentration de référence a été estimée sur base de la valeur limite de quantification et des valeurs de référence des masses d'eau en Wallonie et en Flandre.

Dans l'aquifère du Socle, l'ensemble des analyses a permis de mettre en évidence trois zones différentes. La zone de recharge actuelle, située au sud, principalement en Région wallonne, là où le Socle affleure. Les eaux sont de type bicarbonaté calcique ou chloruré calcique. Les conditions sont oxiques à suboxique et la nappe est impactée par des contaminations anthropiques. Plus au nord, il y a ensuite la zone de transition. L'eau semble plus ancienne, elle est toujours bicarbonatée calcique, les conditions sont oxiques à suboxiques et l'eau ne semble pas (ou moins) contaminée sauf ponctuellement (P23). La troisième zone est située au nord-ouest de la masse d'eau BR02. Il s'agit d'une eau marine résiduelle qui aurait subi un processus de rafraîchissement. Dans cette zone, les conditions sont réductrices.

Pour le calcul des concentrations de référence de la masse d'eau du Socle en zone d'alimentation (BR02), 3 stations d'échantillonnage ont été sélectionnées en Région de Bruxelles-Capitale, complétées par 5 stations d'échantillonnage supplémentaires situées en Région flamande. Les stations sélectionnées ne présentent pas ou très peu de contamination et celles-ci ne semblent pas influencer pas la minéralisation. Il s'agit donc a priori des concentrations naturelles même s'il n'est pas totalement exclu que la concentration en certains éléments puisse être légèrement impactée par les activités anthropiques

Dans l'aquifère de l'Yprésien, trois zones ont également été mises en évidence. Les sites de la Région wallonne qui correspondent à la recharge actuelle et contaminé de la nappe et où les conditions sont oxydantes. Ces sites sont éloignés de ceux des Régions flamande et bruxelloise et il possible qu'il ne s'agisse pas exactement du même aquifère (aquifère de Tielt) que pour les autres stations. Il y a ensuite une deuxième zone située en Région flamande et bruxelloise. Il s'agit également de la recharge récente, et la nappe semble également contaminée mais la pollution affecte moins la minéralisation que dans la première zone. Les conditions redox sont variables oxyque ou suboxyque. La troisième zone concerne les stations au nord de l'aquifère, en Région flamande. Il s'agit d'une eau marine résiduelle qui aurait subi un processus de rafraîchissement. Dans cette zone, les conditions sont réductrices.

Pour le calcul des concentrations de référence de la masse d'eau de l'Yprésien (Région des collines) (BR04), 3 stations d'échantillonnage ont été sélectionnées en région de Bruxelles-Capitale et 4 stations d'échantillonnage supplémentaires provenant de la Région flamande ont été ajoutées. Pour cette masse d'eau, il n'a pas été possible de sélectionner des sites non impactés par une contamination anthropique. Les trois sites en Région de Bruxelles-Capitale sont impactés et ceux de la Région flamande à proximité le sont également. Pour cette masse d'eau, uniquement les paramètres présentant des valeurs atypiques ont été écartés. Les percentiles qui ont été calculé pour cette masse d'eau correspondent donc clairement à des concentrations de fond.

Dans l'aquifère du Bruxellien, deux parties principales peuvent être identifiées : la zone libre et la zone captive. La zone libre couvre la majeure partie de l'aquifère et la partie captive concerne quelques sites en Région flamande au nord de la zone d'affleurement. Dans la partie libre, les eaux sont de type bicarbonaté calcique ou chloruré calcique et proviennent de la recharge récente tandis que dans la partie captive, il s'agit d'eau marine résiduelle qui aurait subi un processus de rafraîchissement. Les conditions sont réductrices dans la partie captive et principalement oxydantes dans la zone libre même s'il peut y avoir localement des variations. La partie libre de la nappe semble fort impactée par des contaminations anthropiques. En Région wallonne et flamande il s'agit d'une pollution diffuse qui engendre des concentrations en nitrates et en pesticides importantes tandis qu'en Région bruxelloise, la pollution au nitrate semble être principalement liée aux fuites dans le réseau d'égouttage. La nappe est également impactée par de nombreuses pollutions ponctuelles. Certaines zones de la nappe libre ont néanmoins été identifiées comme peu ou pas contaminés (forêt de Soignes et certains sites au nord de la zone libre en Région flamande).

Pour le calcul des concentrations de référence de la masse d'eau des sables du Bruxellien (BR05), 17 stations ont été sélectionnées en Région de Bruxelles--Capitale. Les stations sélectionnées ne présentent pas ou très peu de contamination et celles-ci ne semblent pas influencer par la minéralisation. Il s'agit donc a priori des concentrations naturelles même s'il n'est pas totalement

exclu que la concentration en certains éléments puisse être légèrement impactée par les activités anthropiques.

Suite à l'analyse des données disponibles, des recommandations ont également été émises en vue d'améliorer l'estimation des concentrations de référence. Il est notamment recommandé d'analyser l'ensemble des éléments majeurs et mineurs à chaque fois, de refaire une campagne pour les sites de la forêt de Soignes dans la masse d'eau BR05 et de suivre régulièrement les stations qui ont été identifiées comme contaminées. Il est aussi vivement conseillé d'être très rigoureux lors de l'échantillonnage et de veiller à respecter le code de bonnes pratiques (IBGE, 2016). Il est également suggéré d'acquérir des données supplémentaires comme la mesure sur le fer dissous et le potentiel d'oxydoréduction de terrain.

9. Bibliographie

Appelo C A.J. and Postma D., 2005. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, second ed. Balkema, Rotterdam, pp 649.

Bruxelles Environnement. 2010 : annexe I de l'Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 10 juin 2010 relatif à la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration.

Buffel P. & Matthijs J. 2001. *Brussel-Nijvel*, Geologische kaart van België, kaartblad 31-39, 1:50 000. Belgische Geologische Dienst en Afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie, Brussel (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap). Bruxelles Environnement. 2017. Plan de Gestion de l'eau de la Région de Bruxelles-Capitale 2016-2021. Bruxelles Environnement, Bruxelles, 497p.

CE (Commission européenne). 1998. Directive 98/83/CE du conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, Journal officiel des Communautés européenne.

CE (Commission européenne). 2006. Directive 2006/118/CE du Parlement européen et du conseil du 12 décembre 2006 sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration, Journal officiel des Communautés européenne.

CE (Commission européenne). 2014. Directive 2014/80/UE de la commission du 20 juin 2014 modifiant l'annexe II de la directive 2006/118/CE du Parlement européen et du Conseil sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration, Journal officiel des Communautés européenne.

Chery L. (2006) *Guide technique. Qualité naturelle des eaux souterraines. Méthode de caractérisation des états de référence des aquifères français*. BRGM Editions, 248p.

CIE (Commission Internationale de l'Escaut). 2009. *DHI Escaut : Aquifères transfrontaliers et masses d'eau correspondantes : Niveau II*. Partie faîtière du plan de gestion du district hydrographique international de l'Escaut. http://www.isc-cie.org/images/Documents/2_3_MESO_Aquiferes_Transfrontaliers_niv2_121109.pdf

CIE (Commission Internationale de l'Escaut). 2009. *DHI Escaut : Aquifères transfrontaliers et masses d'eau correspondantes : Niveau III*. Partie faîtière du plan de gestion du district hydrographique international de l'Escaut. https://www.isc-cie.org/images/Documents/2_4_MESO_Aquiferes_Transfrontaliers_niv3_121109.pdf

De Coster A., Vanclooster M., Etude relative à la pollution de la masse d'eau du Bruxellien par les nitrates dans la région de Bruxelles-Capitale : Etat des lieux et essai d'identification des sources de pollution, Earth and Life Institute UCL, mars 2013

Petit S., Vanclooster M., Bogaert P., Caractérisation de la pollution par les nitrates dans la masse d'eau des Sables du Bruxellien/Yprésien en Région de Bruxelles-Capitale, Earth and Life Institute UCL, mars 2018

Edmunds W.M, Shand P. 2008. *Natural Groundwater Quality*. Blackwell Publishing, Ltd, 469p.

European Commission. 2009. Common implementation Strategy for the water Framework Directive (2000/60/EC) – Guidance Document N°18 on Groundwater Status compliance and Trend Assessment - Technical report-2009-026, 82 p.

Gouvernement Wallon. 2016. 25 février 2016 - Arrêté du Gouvernement wallon modifiant le Livre II du Code de l'Environnement, contenant le Code de l'Eau, et relatif aux valeurs seuils appliquées pour l'évaluation de la qualité des masses d'eau souterraine (M.B. 07.03.2016).

Kohonen T., 2001. *Self-Organizing Maps*. Springer Series in Information Sciences, 30.

Müller D. 2006. D18: final proposal for a methodology to setup groundwater threshold values in Europe, BRIDGE : Background cRiteria for the IDentification of Groundwater thrEsholds, 63p.

Neumann I., Cobbing J., Tooth A.F., Shand P. 2004. *Baseline report series. 15, the Palaeogene of the Wessex Basin*. Environment Agency, 49p. (CR/04/254N)

Parkhurst D. L. and Appelo C. A. J. 1999. *User's guide to PHREEQC (version 2) - a computer program for speciation, reaction-path, 1D-transport, and inverse geochemical calculations*. USGS. Water Resour. Inv. Rep. 99-4259: 312.

Peeters L., Baçao F., Lobo V., Dassargues A., 2007, *Exploratory data analysis and clustering of multivariate spatial hydrogeological data by means of GEO3DSOM, a variant of Kohonen's Self-Organizing Map*, Hydrology Earth System Science, 11, 1309–1320.

Piper A.-M.1944. A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water. Analyses, Trans. Amer. Geophysical Union, Vol. 25, pp. 914-923.

Région de Bruxelles-Capitale 10 juin 2010. Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale relatif à la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration.

Région de Bruxelles-Capitale. 24 janvier 2002. Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale relatif à la qualité de l'eau distribuée par réseau.

Région de Bruxelles-Capitale. 26 mai 2016. Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale modifiant l'arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 10 juin 2010 relatif à la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration.

Service Géologique de Belgique. 2003. SIG-CARTES GEOLOGIQUE du SGB (version 1.2). N° de contrat : 2003/CDCartgeol/05.

Service Géologique de Belgique. 2015. Etude hydrogéologique de la masse d'eau souterraine des sables du Landénien : Phase 1 : Modélisation géologique. Bruxelles : Bruxelles Environnement / Leefmilieu Brussel, 61p.

Shand P., Edmunds W. M., Lawrence, A. R., Smedley, P. L. and Burke, S. 2007. *The natural (baseline) quality of groundwater in England and Wales*. British Geological Survey Research (Report No. RR/07/06), 72p.

Shand P., Ander E.L., Griffiths K., Doherty P., Lawrence A.R. 2004. *Baseline report series. 11, the Bridport sands of Dorset and Somerset*. Environment Agency, 50p. (CR/04/166N)

Shand P., Ander E.L., Griffiths K., Doherty P., Lawrence A.R. 2004. *Baseline report series. 11, the Bridport sands of Dorset and Somerset*. Environment Agency, 50p. (CR/04/166N)

Shand P., Tyler-Whittle R., Besien T., Peach D., Lawrence A.R., Lewis H.O. 2003. *Baseline report series. 6, the Chalk of the Colne and Lee River catchments*. Environment Agency, 55p. (CR/03/069N)

Simler R. 2013. Logiciel DIAGRAMMES. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, Université d'Avignon. URL : <http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>

SPW-DGO3-DEE. 2016. Document général. Deuxièmes plans de gestion des bassins hydrographiques wallons (2016-2021). SPW|Editions, Jambes, 213p

Thomas C., Brouyère S. & Orban P. 2018. *Caractérisation de la concentration de référence de certains paramètres chimiques présents naturellement dans les masses d'eau souterraine captives du Socle et du Crétacé (BR01) et du Landénien (BR03) en Région de Bruxelles-Capital : Rapport final*. Convention Université de Liège- Bruxelles Environnement. Études Bruxelles Environnement / Leefmilieu Brussel Studies, 202 p.

Ullsh A., Herrmann L., 2005, *The architecture of emergent self-organizing maps to reduce projection errors*, ESSANN2005 13th Eur. Symp. Artif. Neural Networks, Bruges, Belgium 1–6.

Uyttendaele D. 2016. *Wijziging VLAREM II inzake grondwater : Besluit van de Vlaamse Regering tot wijziging van het besluit van de Vlaamse Regering van 1 juni 1995 houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne, wat betreft de wijziging van de achtergrondniveaus, drempelwaarden en milieukwantiteitscriteri*. Minaraa, 16 p. URL : <https://docplayer.nl/30914789-Wijziging-vlareem-ii-inzake-grondwater.html>

Vesanto J., Himberg J., Alhoniemi E., Pearhankangas J., 1999, *Self-organizing map in Matlab: the SOM Toolbox*, Proceedings of the Matlab DSP Conference, pp. 35-40, Espoo, Finland

VVM. 2016. Révision de l'annexe « Milieukwaliteitsnormen en milieukwantiteitscriteria voor grondwater », VlareM II : Besluit van de Vlaamse regering van 1 juni 1995 houdende algemene en

sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne. Alhoniemi E., Himberg J., Parhankangas J. and Vesanto J. 2000-2005. *SOM Toolbox*

VVM. 2016. Révision de l'annexe « Milieukwaliteitsnormen en milieukwantiteitscriteria voor grondwater », Vlarem II : Besluit van de Vlaamse regering van 1 juni 1995 houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne

Zwahlen, F. (Ed.) (2004) Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers. Final Report (COST Action 620) European Commission, Brussels.

Annexe

A.1. Concentration de référence en Wallonie et en Flandre

Concentrations de référence (fonds géochimiques) des masses d'eau souterraine		CV ->	Strontium	Chlorure	Sulfate	Fer	Mangan	Cuivre	Zinc	Arsenic	Cadmium	Chrome	Mercur	Nickel	Plomb	Antimoine	Sélénium	Nitrate	Nitrite	Ammon	Phosphore	Bore	C.O.T	Oxyd	
masse	Libellé_Aquifère	Sites	2209	2201	2202	3501	3502	3503	3504	3601	3602	3603	3604	3605	3606	3607	3608	3001	3002	0,5	1,15	3505	4002	4001	
E060	CALCAIRE CARBONIFERE DU TOURNAISIS	14	2724,95	74,70	266,24	4134,31	236,42	5,02	57,53	0,76	0,10	0,93	0,63	0,04	9,74	2,15	0,29	0,69	7,96	0,01	1,36	0,07	433,14	1,86	1,50
E013	CALCAIRES DU BASSIN DE NAMUR (Tournaisis excepté)	73	1036,57	42,50	171,18	2150,89	152,83	3,04	49,78	1,21	0,13	0,85	0,05	4,82	0,76	0,48	2,94	10,80	0,02	0,10	0,13	44,40	1,63	1,18	
MO11	CALCAIRES DU BASSIN DE NAMUR (Tournaisis excepté)	59	504,08	58,17	138,50	553,95	237,07	3,18	124,95	1,06	0,28	1,53	0,04	4,33	1,41	0,41	2,76	47,94	0,01	0,08	0,08	52,48	1,98	1,14	
MO12	CALCAIRES DU BASSIN DE NAMUR (Tournaisis excepté)	17	283,97	97,80	85,27	167,36	169,42	8,25	148,39	1,47	0,22	2,24	0,04	4,06	2,43	0,43	3,02	99,69	0,02	0,32	0,12	43,55	1,59	2,47	
MO12	MASSIF SCHISTO-GRESEUX DES BASSINS DE NAM,DIN,VEDRE	11	379,63	68,30	72,29	172,09	542,49	6,47	55,29	1,22	0,11	0,93	0,05	3,73	1,03	0,33	0,93	96,38	0,01	0,07	0,05	42,98	2,17		
MO21	CALCAIRES DU BASSIN DE DINANT	114	226,28	39,30	51,08	26,42	10,32	5,59	28,35	0,55	0,12	1,61	0,04	3,37	1,13	0,41	1,30	43,14	0,01	0,03	0,13	19,48	2,99	1,03	
MO21	MASSIF SCHISTO-GRESEUX DES BASSINS DE NAM,DIN,VEDRE	39	216,04	46,63	55,83	75,99	38,50	17,07	43,70	0,47	0,09	1,26	0,03	4,51	1,39	0,45	0,79	59,68	0,02	0,04	0,14	13,21	1,92	1,57	
MO22	CALCAIRES DU BASSIN DE DINANT	12	218,76	35,06	60,32	25,55	13,24	5,22	39,09	0,72	0,11	1,09	0,03	2,64	0,80	0,30	0,91	53,25	0,01	0,03	0,20	36,73	1,29	1,59	
MO22	MASSIF SCHISTO-GRESEUX DES BASSINS DE NAM,DIN,VEDRE	9	446,72	42,00	42,36	283,73	1746,21	26,83	48,12	1,02	0,07	0,81	0,04	2,38	0,61	0,24	0,69	51,66	0,01	0,08	0,14	40,93	2,44	1,04	
MO23	CALCAIRES DU BASSIN DE DINANT	34	447,28	33,88	49,41	65,06	40,93	8,50	51,05	0,63	0,32	1,28	0,05	3,78	3,29	0,37	0,57	59,23	0,01	0,02	0,11	23,99	1,75	1,90	
MO23	MASSIF SCHISTO-GRESEUX DE L'ARDENNE	10	398,65	35,57	44,76	38,28	12,04	13,51	40,28	0,38	0,14	0,74	0,04	1,97	1,20	0,46	0,46	52,84	0,01	0,02	0,05	18,99	1,92	2,35	
MO23	MASSIF SCHISTO-GRESEUX DES BASSINS DE NAM,DIN,VEDRE	26	1688,00	57,14	79,17	36,46	100,57	15,32	98,76	0,56	0,13	0,73	0,04	1,66	0,90	0,29	0,40	58,92	0,01	0,08	0,04	104,07	1,98	0,29	
M141	CALCAIRES DU MASSIF DE LA VESDRE (GUEULE)	6	6,125,93	27,44	89,61	1178,69	596,03	5,18	319,24	0,65	0,78	0,62	0,04	24,35	0,98	0,24	0,76	38,31	0,01	0,04	0,01	41,22	1,49	1,59	
M141	MASSIF SCHISTO-GRESEUX DES BASSINS DE NAM,DIN,VEDRE	5	168,49	15,43	67,00	149,23	255,43	76,87	131,20	0,26	0,72	0,55	0,03	34,64	2,44	0,22	0,38	64,33	0,01	0,02	0,03	33,00	0,78	0,95	
M142	CALCAIRES DU MASSIF DE LA VESDRE	5	366,07	30,80	46,29	178,77	63,12	5,82	218,93	0,31	0,46	1,20	0,03	1,74	0,53	0,25	1,63	153,94	0,01	0,03	0,02	59,55	2,05	1,45	
M142	MASSIF SCHISTO-GRESEUX DES BASSINS DE NAM,DIN,VEDRE	8	181,67	33,39	77,52	142,76	118,28	16,07	89,44	0,31	0,23	0,73	0,03	2,57	1,12	0,30	0,66	95,20	0,01	0,01	0,04	17,91	1,49	1,36	
E017	CARBONIFERE INDIFFERENCIE	2	640,08	64,65	162,98	5,00	4,68	9,60	97,56	2,65	0,06	18,57	0,00	0,50	0,25	0,25	30,31	87,81	0,63	0,01		180,42	1,32		
E030	CRAIES DU BASSIN DE MONS	46	1294,30	65,98	206,04	176,98	12,73	2,83	64,79	1,03	0,08	2,11	0,04	6,50	5,54	0,32	7,21	89,60	0,03	0,11	0,19	183,80	1,90	1,05	
E030	MASSIF SCHISTO-GRESEUX DES BASSINS DE NAM,DIN,VEDRE	6	323,29	89,65	116,03	347,19	161,92	10,58	20,84	0,42	0,06	0,66	0,04	2,28	0,51	0,23	1,66	253,00	0,01	0,03	0,03	45,72	1,28	1,13	
E031	CRAIES DU BASSIN DE MONS	4	3324,30	83,72	257,41	917,87	28,03	3,93	59,69	0,90	0,08	1,75	0,03	4,07	0,52	0,23	4,43	167,52	0,01	0,27	0,10	116,37	1,43	1,38	
E031	SABLES DU LANDENIEN ET DE L'YPRESIEN	5	1653,69	115,28	286,50	3764,47	145,07	10,76	37,86	2,42	0,14	1,70	0,03	5,31	3,33	0,51	1,55	164,06	0,04	0,60	1,36	83,70	4,40	5,31	
MO40	CRAIES DE HESBAYE	32	367,99	66,21	82,46	50,90	9,20	12,59	44,22	0,57	0,09	2,78	0,03	2,45	0,80	0,25	1,58	98,60	0,01	0,03	0,26	55,76	1,85	2,17	
MO41	CRAIES DE HESBAYE	5	329,13	70,40	74,77	46,24	16,97	25,96	81,50	0,64	0,08	3,91	0,03	1,62	1,13	0,28	2,52	46,98	0,02	0,03	0,29	36,42	1,43	1,02	
M151	CRETACE DU PAYS DE HERVE	11	371,21	34,00	56,29	13,28	4,73	13,48	87,71	0,77	0,11	1,65	0,03	3,59	1,68	0,40	0,83	58,26	0,01	0,02	0,88	31,84	1,43	1,41	
E032	CRAIES DU BASSIN DE MONS	2	552,40	53,98	119,79	3,03	5,45	15,78		0,68	0,02	3,00	0,03	2,91	1,64	0,36	1,53	58,40	0,01	0,01	0,29	47,09	0,83	1,22	
E032	QUATERNAIRE INDIFFERENCIE (HOLOCENE + PLEISTOCENE)	2	391,76	64,20	139,59	1,00	4,30	1,13	21,15	1,36	0,19	2,56	0,06	4,58	0,59	0,72	2,30	75,94	0,01	0,02	1,77	82,52	1,15	1,19	
E051	SABLES BRUXELIENS	80	647,14	61,07	91,69	22,41	4,58	2,85	24,00	0,59	0,09	2,57	0,04	1,83	0,71	0,28	1,08	65,55	0,01	0,03	0,19	37,30	1,17	0,75	
MO52	SABLES BRUXELIENS	12	656,07	72,14	102,44	48,46	2,57	1,63	24,23	0,71	0,18	4,64	0,03	6,99	0,60	0,32	2,58	57,32	0,01	0,01	0,17	97,44	1,86	0,71	
E053	SABLES DU LANDENIEN ET DE L'YPRESIEN	11	583,73	79,89	122,39	24,29	3,44	5,89	51,61	0,58	0,12	2,84	0,04	2,39	0,73	0,26	5,86	60,80	0,01	0,06	0,37	19,05	1,41	1,43	
E061	SABLES DU LANDENIEN ET DE L'YPRESIEN	7	760,22	107,87	229,24	446,35	549,36	99,50	406,25	2,19	0,07	0,76	0,04	6,03	2,97	0,46	1,26	152,20	0,04	0,96	0,69	675,10	3,03	2,42	
E061	THALWEGS OU TOURBES DE L'ESCAUT ET AFFLUENTS	2	589,51	97,06	214,91	21,71	3147,62	16,69	58,86	1,44	0,10	3,69	0,03	8,11	0,44	0,30	2,14	137,72	0,34	0,02	0,63	288,59	1,69	1,83	
E080	CRAIES CAPTIVES DU BRABANT (MAASTRICHTIEN)	17	645,92	47,28	92,96	1735,76	151,44	5,17	50,94	1,14	0,07	1,01	0,12	2,81	0,49	0,33	3,59	46,25	0,01	0,11	0,17	70,93	1,95	1,34	
E080	CRAIES DE HESBAYE	4	388,83	69,55	86,38	573,34	86,07	4,45	75,06	0,72	0,07	2,05	0,03	2,71	0,71	0,17	4,76	117,47	0,05	0,05	0,21	10,66	1,07	0,77	
E160	CAMBRO-SILURIEN DU MASSIF DU BRABANT	21	1917,12	167,45	410,44	2887,28	833,09	6,40	89,23	3,09	0,20	3,56	0,04	13,38	1,04	0,30	0,60	14,16	0,02	0,16	0,10	85,93	1,90	1,72	
Agrégé	Cambro-Silurien Ardenne - profond (M200-M300)	13	60,88	15,40	15,80	2377,32	360,27	6,09	66,94	2,95	0,32	0,78	0,03	12,44	0,67	0,44	0,43								
MO71	THALWEGS ET TERRASSES DE MEUSE ET AFFLUENTS	13	208,08	40,00	56,86	17,92	6,44	2,26	10,47	0,54	0,07	0,93	0,04	1,22	0,43	0,18	0,83	20,72	0,01	0,04	0,05	72,28	1,60	1,62	
MO72	THALWEGS ET TERRASSES DE MEUSE ET AFFLUENTS	24	420,88	66,73	146,00	47,28	200,39	9,19	57,02	1,14	0,09	1,37	0,03	2,76	0,77	0,25	2,30	52,82	0,04	0,30	0,26	119,15	2,12	2,06	
MO15	CARBONIFERE INDIFFERENCIE	4		3315,82	416,85	6861,04	2618,15	0,02	1,85	0,56	0,02	0,07	0,02	0,49	0,21	0,17	0,30	8,11				227,88	17,17		
MO73	THALWEGS ET TERRASSES DE MEUSE ET AFFLUENTS	12	643,81	196,45	511,98	4271,82	4826,81	6,30	186,30	5,17	0,28	2,04	0,03	14,76	4,05	0,90	1,47	51,25	0,04	10,58	2,60	369,60	1,18	1,29	
MO16	CARBONIFERE INDIFFERENCIE	19	1048,52	108,58	515,45	1847,01	1981,69	1,27	54,38	0,90	0,06	1,22		28,29	1,74	0,27	1,23	31,36	0,00	8,17		234,30	0,83		
MO91	TRIAS	4	3737,47	21,19	54,35	536,60	229,38	4,47	68,46	5,20	0,09	1,29	0,06	3,64	2,09	0,63	0,65	37,93	0,01	0,17	0,02	130,16	1,51	0,64	
MO92	SINEMURIEN	45	187,74	21,40	29,50	136,94	13,54	1,36	12,80	0,46	0,15	1,33	0,05	1,95	0,78	0,57	0,61	41,82	0,01	0,02	0,04	23,36	1,15	2,40	
RO92	SINEMURIEN	9	179,42	33,13	34,78	150,66	7,31	2,40	15,84	0,43	0,09	0,79	0,04	1,84	1,73	0,47	0,46	83,86	0,01	0,02	0,05	25,08	1,66	0,96	
MO93	BAJOCIEN ET DOMERIEN	18	892,24	19,83	50,99	1820,13	227,86	1,20	23,52	0,76															

Parameter	pH min	pH max	Al ³⁺	As ^{3+/-} _{3+/5+}	B ³⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	Cr ^{2+/-} _{3+/6+}	Cu ⁺²⁺	Ec	F ⁻	Fe ^{2+/-} ₃₊	K ⁺	Mg ²⁺	Mn ^{2+/-} _{3+/-} _{4+/-}	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Ni ^{2+/-} ₃₊	NO ₂ ⁻	Pb ^{2+/-} ₄₊	PO ₄ ⁻ _{2-/-} ₃₋	SO ₄ ²⁻	Zn ²⁺
GWL / eenheid	(-) Sörensen		mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	mg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l
BLKS_0160_GWL_1M	6,4	7,4	*	18	210	180	79	*	*	970	0,3	17	15	29	1,6	50	2,5	9	*	*	1	130	94
BLKS_0160_GWL_1S	6,4	7,4	*	18	210	180	79	*	*	970	0,3	17	15	29	1,6	50	2,5	9	*	*	1	130	94
BLKS_0400_GWL_1M	6,3	7,4	*	6	43	190	89	*	*	1000	0,3	5,1	6,6	25	1,1	32	*	10	*	*	0,5	190	120
BLKS_0400_GWL_1S	6,3	7,4	*	6	43	190	89	*	*	1000	0,3	5,1	6,6	25	1,1	32	*	10	*	*	0,5	190	120
BLKS_0400_GWL_2M	6,2	8,4	0,08	10	3500	99	220	*	*	1500	2,0	2,1	27	25	0,26	390	1,2	6	*	*	1,8	120	40
BLKS_0400_GWL_2S	6,2	8,4	0,08	10	3500	99	220	*	*	1500	2,0	2,1	27	25	0,26	390	1,2	6	*	*	1,8	120	40
BLKS_0600_GWL_1	6,9	7,5	0,12	*	39	160	55	*	*	840	0,2	4,4	4,1	18	0,52	18	0,66	6	*	*	0,39	150	30
BLKS_0600_GWL_2	7,1	8,4	*	16	4100	93	2200	*	*	6100	1,4	3,1	32	22	0,12	1300	1,7	*	*	*	1,7	51	18
BLKS_0600_GWL_3																							
BLKS_1000_GWL_1S	6,8	7,4	*	*	79	190	83	*	*	1000	0,3	4,0	8,8	28	0,52	25	0,47	7	*	*	0,46	170	32
BLKS_1000_GWL_2S	7	8,3	*	*	450	130	35	*	*	800	0,8	1,7	18	23	0,11	150	0,69	*	*	*	0,83	84	28
BLKS_1100_GWL_1M	7	7,4	0,06	*	*	160	41	*	*	780	*	1,4	4,1	18	0,58	18	*	9	0,07	*	0,32	81	18
BLKS_1100_GWL_1S	7	7,4	0,06	*	*	160	41	*	*	780	*	1,4	4,1	18	0,58	18	*	9	0,07	*	0,32	81	18
BLKS_1100_GWL_2M	7	8,8	*	6	710	120	170	*	*	1100	1,0	1,4	19	27	0,08	180	0,81	*	*	*	0,33	70	26
BLKS_1100_GWL_2S	7	8,8	*	6	710	120	170	*	*	1100	1,0	1,4	19	27	0,08	180	0,81	*	*	*	0,33	70	26
CKS_0200_GWL_1	4,9	7,4	0,20	17	110	140	88	*	*	940	0,6	50	15	17	0,95	47	1,2	23	*	*	2,1	210	210
CKS_0200_GWL_2	5,6	7,7	*	9	170	86	37	*	*	600	0,3	21	18	12	0,51	25	1,2	9	*	*	1,1	99	46
CKS_0220_GWL_1	4,3	6,6	0,88	29	71	73	110	*	*	680	0,5	49	21	20	1,2	47	1,3	97	*	*	0,47	260	310
CKS_0250_GWL_1	5,9	7,2	0,07	8	43	70	68	*	*	490	0,6	20	5	8,3	0,83	31	*	13	*	*	0,78	92	150
CVS_0100_GWL_1	6,2	7,7	*	7	170	220	140	*	*	1400	0,4	7,3	15	35	1,4	110	0,95	19	*	*	0,75	280	120
CVS_0160_GWL_1	6,6	7,7	*	13	76	250	110	*	*	1300	0,4	12	11	23	1,6	65	4,6	10	*	*	1,2	250	60
CVS_0400_GWL_1	7,1	8,4	*	11	6600	75	380	*	5	2300	1,3	2,9	35	35	0,43	530	1,4	*	*	*	2,3	210	21
CVS_0600_GWL_1	5	7,6	0,1	7	94	190	130	*	*	1100	0,5	19	11	22	0,83	77	1,5	22	*	*	0,64	290	77
CVS_0600_GWL_2	7	8,6	0,07	11	4600	130	1400	*	6	5400	1,4	3,0	38	34	0,35	1200	1,8	*	*	*	1,4	160	28
CVS_0800_GWL_1	5,4	7,5	*	*	130	160	100	*	*	1000	0,4	16	14	23	0,89	97	1,0	30	*	*	0,95	280	140
CVS_0800_GWL_2	5,5	8,5	*	9	2900	180	490	*	*	3800	0,9	16	22	18	0,55	850	1,1	15	*	*	1,9	340	26
CVS_0800_GWL_3	5,9	7,6	0,12	6	67	200	87	*	5	1100	0,3	5,5	10	27	1,0	54	0,58	15	0,07	*	0,52	190	110
KPS_0120_GWL_1	6,9	7,9	*	15	860	240	190	*	*	1500	0,8	4,3	44	61	0,61	190	3,9	8	*	*	2,8	210	22
KPS_0120_GWL_2	6,9	7,9	*	15	860	240	190	*	*	1500	0,8	4,3	44	61	0,61	190	3,9	8	*	*	2,8	210	22
KPS_0160_GWL_1	6,7	7,8	*	46	3000	440	8500	12	8	24000	0,8	13	170	600	1,6	4800	35	20	*	*	16	400	50

KPS_0160_GWL_2	6,7	7,8	*	46	3000	440	8500	12	8	24000	0,8	13	170	600	1,6	4800	35	20	*	*	16	400	50
KPS_0160_GWL_3	6,7	7,8	*	46	3000	440	8500	12	8	24000	0,8	13	170	600	1,6	4800	35	20	*	*	16	400	50
MS_0100_GWL_1	4,9	7,1	0,13	13	43	83	70	*	*	610	0,4	30	7,7	14	0,82	37	0,81	27	0,09	*	0,63	160	110
MS_0200_GWL_1	4,9	6,9	0,13	12	41	51	64	*	*	480	0,5	20	8,4	10	0,63	29	*	49	0,09	*	0,54	140	200
MS_0200_GWL_2	5,3	7,1	*	14	61	69	68	*	*	550	0,3	20	6,3	15	0,93	33	0,61	19	0,10	*	0,61	97	170
SS_1000_GWL_1	7,2	8,8	*	18	3800	69	480	*	7	3500	6,4	1,6	24	17	0,4	860	0,82	8	*	*	2,2	370	32
SS_1000_GWL_2	7,2	8,8	*	18	3800	69	480	*	7	3500	6,4	1,6	24	17	0,4	860	0,82	8	*	*	2,2	370	32
SS_1300_GWL_1	7,3	9,3	*	8	1400	78	84	17	*	1100	4,7	1,5	19	33	0,07	240	0,86	*	*	*	0,41	120	23
SS_1300_GWL_2	7,1	8,3	*	6	660	110	57	*	*	750	1,7	1,1	22	27	0,09	88	0,52	*	*	*	0,31	71	17
SS_1300_GWL_3	7,7	9,8	0,10	20	3600	62	650	*	6	3800	6,9	1,1	24	11	0,11	920	1,3	8	*	*	1,1	420	27
SS_1300_GWL_4	7,7	9,8	0,10	20	3600	62	650	*	6	3800	6,9	1,1	24	11	0,11	920	1,3	8	*	*	1,1	420	27
SS_1300_GWL_5	7,7	9,8	0,10	20	3600	62	650	*	6	3800	6,9	1,1	24	11	0,11	920	1,3	8	*	*	1,1	420	27

Tableau 0-2 : Concentrations de référence en Région flamande (VMM, 2016)

A.2. Tableau de correspondance des masses d'eau et aquifères transfrontaliers du district de l'Escaut

Nom du système l'aquifère	Aquifère système ID	F	NL	Bx	VL	W
Craies de la Deûle	1	FRA003				BE_Escaut_RWE032
Craies de Valenciennes-Mons	2	FRA007				BE_Escaut_RWE030
Sables des Flandres (surexploités) ou Sables du Landénien Ouest (surexploités)	3	FRA014			BEVL061	BE_Escaut_RWE061
Sables captifs des Flandres ou Sables captifs du Landénien Ouest	4			BR03	SS1000_gwl_2 ou BEVL062	BE_Escaut_RWE061
Calcaires carbonifères de l'Escaut	5	FRA015			BEVL063	BE_Escaut_RWE060
Sables d'Orchies	6	FRA018				BE_Escaut_RWE031
Socle du Massif de Brabant et Craies (zone d'alimentation)	7			BR02	SS_1300_gwl_2 ou BEVL064	BE_Escaut_RWE160
Socle du Massif du Brabant et Craies Ouest (zone captive)	8			BR01	SS_1300_gwl_4 ou BEVL066	BE_Escaut_RWE160
Socle du Massif du Brabant et Craies Est (zone captive)	9			BR01	Blks_1100_gwl_2s ou BEVL015	BE_Escaut_RWE080
Sables du Bruxellien	10			BR05	BEVL007	BE_Escaut_RWE051
Sables libres du Landénien Est	11				BEVL010	BE_Escaut_RWE053
Sables captifs du Landénien Est	12			BR03	BLKS_1000_gwl_2s ou BEVL011	
Sables ypresiens (région des collines) et sables de Mons-en-Pévèle	13			BR04	BEVL028	
Couverture quarternaire au-dessus des argiles paléogènes	14				BEVL021	BE_Escaut_RWE061
Dépôts alluviaux pléistocènes	15		NLGWSC0002		BEVL022	BE_Escaut_RWE061
Sables oligocènes	16		NLGWSC0005		BEVL023	
Sables centraux de Campine	17		NLGWSC0003		BEVL031	
Dunes et zones de criques côtières	18		NLGWSC0003		BEVL041	
Dunes et zones de criques des Polders de Flandre orientale	19		NLGWSC0003		BEVL042	
Sables quaternaires et éocènes (saumâtres) de la côte	20		NLGWSC0004		BEVL043	
Sables quaternaires et oligocènes (saumâtres) des Polders de la Flandre orientale	21		NLGWSC0004		BEVL044	
Sables quaternaires et plio-miocènes (saumâtres) des Polders de l'Escaut	22		NLGWSC0004		BEVL045	

Tableau 0-3 : Tableau de correspondance des masses d'eau et aquifères transfrontaliers du district de l'Escaut (F = France, NL = Pays-Bas, Bx = Région de Bruxelles-Capitale, VL = Région flamande, W = Région wallonne ; en bleu : les masses d'eau désignées comme masses d'eau destinées à l'alimentation en eau potable)

A.3. Annexe 2 : Liste des stations d'échantillonnage utilisée en Wallonie et en Flandre

A.3.1. Stations d'échantillonnage de l'aquifère du Socle

Région	Point de prélèvement	Code	Période de suivi		Nombre de mesures	X Lambert belge 72 (m)	Y Lambert belge 72 (m)
RW	ANCIENNE SUCRERIE PZ S 91	4068115	2010	2011	3	173562	140008
RW	AUTOROUTE CENTRE PZ3	3837010	2007	2007	1	114435	151190
RW	AUTOROUTE EST PZ2	3837009	2007	2007	1	114870	151275
RW	AUTOROUTE OUEST PZ4	3837011	2007	2007	1	114310	151180
RW	BOIS LOWET	3948006	2006	2015	8	158290	149986
RW	BUISSON AUX LOUPS P2 153M	3975008	2006	2013	3	148825	142088
RW	CAMPAGNE DES VIGNES 40M	4033003	2006	2015	5	184862	157527
RW	CARRIERE LENOIR FRERE	3823003	2006	2015	7	113472	155029
RW	CARRIERE TACQUENIER	3823005	2008	2014	2	112886	155679
RW	CARRIERE VANDELDELDE	3823004	2007	2014	2	113708	156056
RW	CARRIERES DE DONGELBERG I	4035003	1997	2013	26	181840	154080
RW	CARRIERES DE DONGELBERG II	4035002	1996	2000	3	181880	153930
RW	CENTRALE A BETON 60M	3837006	2008	2008	1	114307	150311
RW	CETEM Pz S1	4018028	1998	2001	4	166745	148892
RW	CETEM Pz S2	4019025	1998	2000	2	167363	149284
RW	CETEM Pz S2bis	4018031	2000	2001	2	167341	149277
RW	CETEM Pz S3 72M amont	4019027	1998	2013	7	167730	148870
RW	FP02_MONITO CETRAVAL	3924038	2015	2015	1	138817	154306
RW	HAMEAU AYWIERS	3948004	1993	2015	26	157010	150960
RW	HOVES RUE DE GRATY 84M	3848002	2006	2015	6	125897	150360
RW	Irrigation 60M	4087002	2006	2015	5	187398	138393
RW	LE LONGUE VAL	4071003	2008	2008	1	179895	146800
RW	L'ORNOY (P 25 PUIITS) HS96	4052009	1993	1996	4	166700	146585
RW	L'ORNOY (P 30 PUIITS) HS99	4052008	1995	1996	2	166638	146500
RW	MAZENQUE PZ1	3837008	2007	2007	1	114160	151340
RW	P1 ROUGE BOUTON	3927002	2008	2008	1	138376	148515

RW	PARC DE LA NOIRE EPINE P2	3258002	2015	2015	1	166783	158990
RW	PUITS B rinçage 34M	4731003	2006	2015	7	179600	135980
RW	PUITS DE COEURCQ HS00	3919001	1994	1999	5	137510	150530
RW	PUITS D'HEVILLERS HS06FeMn	4053002	1993	2004	14	168150	145675
RW	PUITS JAUMOTTE LIMAL	4014007	2007	2007	1	164610	154090
RW	Puits Martineau	4014008	2012	2015	4	164624	154078
RW	RABAUBY G1	4068004	1994	2015	88	173610	140005
RW	RUE DE MONS 75M	3955003	2006	2015	10	133363	144240
RW	RUE DU MONT 187M	3058004	2006	2015	6	101245	160527
RW	SART (RUE DE LA CHAPELLE)	4051002	1993	2015	25	163720	145370
RW	SENTIER DONGELBERG	4035004	2007	2015	52	180830	152905
RW	SIDECH TILLY	4057002	2007	2007	1	162934	138279
RW	STE GERTRUDE 1	4054003	1993	2012	23	163150	144190
RW	STE GERTRUDE 2	4054004	2004	2015	7	163270	144210
RW	THOREMBAIS LES BEGUINES 62M	4038002	2006	2013	3	180922	149295
RW	TRY A FOURCHE NOUVEAU 60M	3915002	2004	2015	9	134698	151601
RF	2-0025		1994	2015	12	136044	174228
RF	2-0039		1989	1989	1	131309	162736
RF	2-0047		1994	2015	11	135107	165362
RF	2-0048		1994	2015	11	141520	158950
RF	2-0113		2004	2015	11	186590	162370
RF	2-0415		2011	2015	5	131650	156174
RF	2-0416a		2011	2015	5	141435	165457
RF	2-0417a		2011	2015	5	141375	174618
RF	2-0427a		2011	2015	5	142914	180915
RF	2-0428		2011	2015	5	121594	154145
RF	2-0432a		2012	2015	5	130998	169789
RF	2-0434a		2011	2015	5	140132	169814
RF	2-0435a		2012	2015	5	144289	154712
RF	2-0438a		2013	2015	4	180804	166112

RF	4-0004		2006	2014	9	127107	186013
RF	4-0070		1990	2015	11	116923	180767
RF	4-0083		2006	2015	6	126426	173531
RF	4-0108		2006	2016	7	115793	175005
RF	4-0113		2006	2015	7	128880	214425
RF	4-0115		2006	2015	9	117170	204550
RF	4-0118		2006	2015	10	125310	165800
RF	4-0252		2011	2015	6	123405	165780
RF	4-0253a		2015	2015	1	119505	171401
RF	4-0272a		2014	2015	2	117253	188164

Tableau 0-4 : Récapitulatif des données complémentaires de l'aquifère du Socle sélectionnées en Wallonie et en Flandre ; les stations mise en évidence en bleues sont celles qui sont sélectionnées pour l'analyses hydrochimique (chapitre 4.1.3.4)

A.3.2. Stations d'échantillonnage de l'aquifère de l'Yprésien

Région	Point de prélèvement	Code	Période de suivi		Nombre de mesures	X Lambert belge 72 (m)	Y Lambert belge 72 (m)
RW	CAB Pz5 aval 32M	3926003	1996	2007	14	144287	153186
RW	CAB Pz8 aval 20M	3926004	1996	2007	14	144874	152977
RW	CAB Pz9 amont 40M	3926002	1994	2015	25	144147	154000
RW	Ceriseraie 20M	2875241	2005	2016	15	52985	164675
RW	CET ALCONVAL PIEZO PZ2	3934012	2015	2015	1	148111	154310
RW	CET ALCONVAL PZ1	3934011	2015	2015	1	148116	154298
RW	CET ALCONVAL PZ14	3934017	2015	2015	1	147853	154662
RW	CET ALCONVAL PZ4	3934014	2015	2015	1	147907	154668
RW	CET ALCONVAL PZ5	3931003	2015	2015	1	148214	154985
RW	COQ D'AGACHE 5 M	3733001	2005	2016	36	88100	155725
RW	FONT A L'ERMITE	3953001	2007	2007	1	137550	147225
RW	HERSEAUX LONG BOUT	3713042	2011	2016	17	71580	157670
RW	LA BARBERIE 8M	2958022	2005	2006	2	70324	158246
RW	LE MAROUSER S1	3956007	2002	2006	8	136040	143800
RW	LE MAROUSER S2	3956008	2002	2006	8	136260	144500
RW	Nechin impasse de l'église	3719005	2011	2011	2	72253	151445
RW	ROUGE BOUTON PZ2	3927004	2008	2008	1	138335	148390
RW	ROUGE BOUTON PZ4	3927003	2008	2008	1	138560	148300
RW	ROUGE BOUTON PZ5	3961003	2008	2008	1	138275	148090
RF	1-1102a	1-1102a	2011	2016	6	164062	201339
RF	2-0427b	2-0427b	2012	2015	5	142918	180915
RF	4-0039	4-0039	2006	2015	10	103521	204293
RF	4-0055	4-0055	2006	2015	10	121233	184278
RF	4-0253c	4-0253c	2011	2015	6	119503	171376
RF	4-0271b	4-0271b	2011	2015	6	97162	199115
RF	4-0273b	4-0273b	2011	2015	6	98811	192768
RF	411/74/3	411/74/3	2004	2014	18	110769	168340
RF	420/74/1a	420/74/1a	2005	2016	23	120299	171594
RF	422/74/11	422/74/11	2004	2016	24	133554	173809
RF	422/74/8	422/74/8	2004	2016	25	132617	176389
RF	423/73/2	423/73/2	2004	2016	22	130635	177344
RF	431/74/6	431/74/6	2004	2016	24	116265	174358

RF	471/74/4	471/74/4	2004	2016	15	103640	183824
RF	474/74/7	474/74/7	2004	2016	26	108653	185067
RF	480/73/2	480/73/2	2004	2016	24	112429	178812
RF	480/73/7	480/73/7	2004	2013	19	115271	179990
RF	480/73/9a	480/73/9a	2004	2016	26	114767	187519
RF	480/74/1	480/74/1	2004	2016	26	113374	183524
RF	701/74/1	701/74/1	2005	2016	23	135098	167864
RF	702/74/1	702/74/1	2004	2016	25	143420	172310
RF	713/72/4	713/72/4	2005	2016	24	166913	172899

Tableau 0-5 : Récapitulatif des données complémentaires de l'aquifère de l'Yprésien sélectionnées en Wallonie et en Flandre ; les stations mise en évidence en bleues sont celles qui sont sélectionnées pour l'analyses hydrochimique (chapitre 5.1.3.3)

A.3.3. Stations d'échantillonnage de l'aquifère du Bruxellien

Région	Point de prélèvement	Code	Période de suivi		Nombre de mesures	X Lambert belge 72 (m)	Y Lambert belge 72 (m)
RW	ABEICHE 1	3935004	1995	2007	5	149474	154717
RW	ABEICHE 2	3932002	1995	2015	10	149621	154884
RW	ARQUENNES E1	3969001	1995	2015	53	144883	140138
RW	ARQUENNES E2	3969006	1997	2015	54	144920	140195
RW	ARQUENNES E4 HS00NO3	3969005	1998	2000	14	144890	139200
RW	ARQUENNES G3	3969002	1997	2015	63	144890	140290
RW	ARQUENNES G6	3969008	1998	2015	52	145483	139831
RW	AU CHATEAU D'EAU CE LIMAL	4014005	1996	2015	18	163455	154758
RW	BAISY THY FERME AUDITEUR	3985003	2005	2015	7	156700	142500
RW	BATY DE FONTENY	3976007	1997	2005	3	153244	143659
RW	BEAUVECHAIN BATTERIE	3274001	1997	2015	8	179050	163200
RW	BOIS DE BEAUSART	3268029	2009	2015	7	175190	158690
RW	BOIS DES BOVREES G1 HS01Q	4025002	1995	2014	10	174150	152960
RW	BORD DE L'ETANG	3275001	2006	2006	1	181500	161700
RW	BOUCQUEAU	3936002	1995	2007	5	151481	153225
RW	BOURDON 3	3935008	1995	2007	6	150783	153472
RW	BOURDON 5	3935010	1995	2007	6	150969	153503
RW	Centre Sportif	3933001	1998	2015	12	151860	156240
RW	CETEM Pz 2	4018011	1998	2001	4	166886	148641
RW	CETEM Pz 4	4018014	1998	2001	4	166747	148780
RW	CETEM Pz 6	4018016	1998	2001	4	166734	149000

RW	CETEM Pz 8	4018018	1998	2001	4	166917	149069
RW	CETEM Pz11	4018021	1998	2001	4	167157	149152
RW	CETEM Pz13	4018023	1998	2001	4	167324	149264
RW	CETEM Pz14bis	4019014	1998	2001	4	167412	149316
RW	CETEM Pz14ter	4019029	2000	2001	2	167354	149284
RW	CETEM Pz15	4019015	2000	2001	3	167514	149379
RW	CETEM Pz17	4019017	1998	2001	4	167711	149387
RW	CETEM Pz20	4019020	1998	2001	4	167907	149221
RW	CETEM Pz23	4019023	1998	2001	4	167518	148661
RW	CETEM Pz25	4018025	1998	2001	4	167152	148476
RW	CETEM Pz26	4018026	1998	2001	4	167058	148527
RW	CETEM Pz27	4018027	1998	1998	1	166977	148574
RW	CHAMPTAINE	4025003	1997	2015	48	174920	152600
RW	CORBAIS	4027002	1994	2015	23	171200	149470
RW	CORBAIS P1 LILLY	4019001	2000	2005	6	169502	150194
RW	DREVE DE LA RAMEE P1 T12PES	3941002	1997	2015	14	156127	157434
RW	DREVE DE LA RAMEE P2 T12PES	3941003	1995	2015	19	156105	157424
RW	DRUET	3976003	1997	2005	5	152630	143394
RW	ELBORRE (GALERIE)	3937001	1992	2015	8	148674	150868
RW	EMBOUTEILLAGE	4017004	1994	1999	3	163636	149760
RW	FERME DE BEAUSART 28M	3269002	2005	2015	10	175815	159305
RW	Fichermont	3944008	2001	2001	1	155231	152092
RW	FOND DU FAUX VIVIERS	3279002	1996	1999	2	184450	159220
RW	Fontaine St Georges	4062002	2002	2015	11	173130	145250
RW	Fontaine Ste Ragenufle	4035005	1997	2015	18	181100	153540
RW	GAILLEMARDE Galerie HS97NO3	3941001	1997	2012	2	155580	157100
RW	GRAND PEINE D3 (posD8) HS	3977005	1997	2000	17	147302	141385
RW	GRAND PEINE D9 (posD8) HS	3977007	2003	2008	11	147024	141306
RW	Hameau de Hèze 22,5m	4022003	2007	2015	8	174958	156256
RW	HAMEAU DE HEZE G1 HS97	4022002	1994	1994	1	174970	156250
RW	HAYETTES (JAUGE)	3938001	1992	2015	7	149117	150394
RW	HAZOI	3976002	1997	2005	5	153087	142728
RW	HOUTAIN 2	3979001	1995	2015	14	153430	140230
RW	HUBERMONT (GALERIES MARANSART)	3947003	1993	2015	27	156380	150520

RW	LAI D BURNIAT	4019008	1998	2000	2	168820	150680
RW	Laurensart	3259002	2005	2015	6	169610	158860
RW	LE MARINAL MEL	3279001	1994	2013	28	185070	159800
RW	LE MARTINEAU (rue Charles Jaumotte) HS06PES	4014001	1996	2005	13	164590	154080
RW	LE PISSELET	4016003	2009	2009	1	169370	152030
RW	LEONARD	3935007	2001	2001	1	149940	154070
RW	LES MARRONNIERS P1 T04PES	4072003	1995	2015	18	181048	146071
RW	LILLOIS (JAUGE)	3937002	1992	2014	5	148582	148733
RW	LILLOIS PUI TS P1	3972001	1994	2015	79	150000	147160
RW	L'ORNOY MEL	4052003	1993	2015	25	166480	146430
RW	L'USINE (LA VAU)	3935013	1998	2001	2	150160	154250
RW	MENIL 5	3936006	1995	2007	6	151388	153420
RW	MENIL 6	3935005	1995	2007	9	151280	153190
RW	NICAISE	3935003	2001	2001	1	149790	154280
RW	NOU CLARI SSES FONTAINE MICHAUX	3974008	2012	2015	16	148395	142640
RW	NOUVELLES CLARI SSES P1 T05 PES	3974001	1995	2015	114	148210	142720
RW	OCQUIERE	4024001	1996	2015	32	171960	151780
RW	OHAIN 1	3944002	1993	2015	25	156320	154040
RW	OHAIN 2 CE TP02PES	3944005	1995	2015	15	156300	154040
RW	PARADIS 4	3938005	1995	2015	9	149885	151503
RW	Pas de Chien Alpha	4025019	1998	2001	4	173248	151629
RW	Pas de Chien Bèta	4025020	1998	2001	4	173401	151673
RW	Pas de Chien Gamma	4025021	1998	2000	3	173355	151591
RW	PATURE LAUZELLE P4	4015002	1998	2015	14	166935	151621
RW	Pépinère du Tri	3946001	1998	2000	3	161630	150440
RW	PERBAIS DRAINS MELANGE HS01	4064002	1993	2015	30	170631	144085
RW	PERBAIS P Galerie HS98	4064001	1995	1997	3	170075	144315
RW	PETITES BRUNES	3938003	1992	2001	2	149934	150084
RW	Plaine Sainte Barbe P2	4019009	2005	2013	3	167896	150906
RW	PLANCENOIT	3947006	1996	2015	12	154760	149680
RW	PRE BOULOUF	4057001	2005	2015	4	163600	139820
RW	PROFONDVAL CARMEL	4018006	2008	2015	7	166961	149354
RW	PROMELLES PUI TS	3976005	1997	2014	6	153155	144430
RW	PUI TS (ruisseau des Brous)	3947002	1996	2008	13	154770	149630

RW	PUITS 1	3938002	1992	2015	9	150809	151034
RW	PUITS 2	3936004	1997	2015	10	151470	154415
RW	PUITS DE LA MARACHE	3944009	2007	2015	5	156561	153466
RW	PUITS DE WATERLOO	3936003	1995	2015	21	151768	153525
RW	PUITS VANDAMME	4068014	2006	2015	10	174740	141430
RW	RAMAIX G1 BAULERS MEL	3974010	1994	2015	84	148350	144600
RW	RUE DU MANIL	4012005	1996	2015	22	166750	155060
RW	RUE VERTE VOIE P0 +batterie	3266012	1997	2015	33	176073	161997
RW	RUE VERTE VOIE P7	3266001	1999	2000	2	176087	161975
RW	SADIN (JAUGE)	3938004	1992	2001	2	149949	151346
RW	Saint-Gery11	4059001	2005	2015	10	168080	139960
RW	SART MESSIRE GUILLAUME HS03NO3	4051003	1993	2015	22	163800	145450
RW	SAUVAGEMONT 1 MEL	3948003	1993	2015	24	158160	149220
RW	SAUVAGEMONT 3 MEL	3948001	1993	2015	24	158160	149270
RW	SCOLASSE	3935002	2001	2015	5	150010	154200
RW	SOIERIE GALERIE HS09	3948002	1993	2008	18	156740	150560
RW	SOURCE "E"	3984004	1995	2005	3	154175	143784
RW	SOURCE 1 HS96PES	3947001	1995	2000	6	154670	149750
RW	SOURCE CAFFIERE	3976004	2000	2015	7	153683	143679
RW	SOURCE D'	3976009	2000	2005	2	153857	143685
RW	SOURCE DE LA CRESSONNIERE G2	3975002	1994	2015	85	148900	144150
RW	SOURCE E'	3984003	2000	2005	2	154211	143800
RW	SOURCE FONTENY	3976008	1997	2005	4	153467	143465
RW	Source Terfosse	3257002	2006	2015	10	162930	158800
RW	Source THEYS	3937003	2003	2015	6	148330	150110
RW	ST GERY R DE CORSAL	4059006	2011	2015	5	167973	140075
RW	ST PIERRE 1	3935009	1995	2015	9	149472	152154
RW	Terre Hocaille P3	4018003	2005	2013	3	167269	151084
RW	Terre Le Rodeux Haye P1	4019002	2005	2013	3	167989	150494
RW	TRY CEROUX MOUSTY	3949001	1993	2015	26	161870	149940
RW	VIEILLES CLARISSES HS00NO3	3974009	1995	2011	67	148090	143030
RW	VIEUX SART P1	4019006	1994	2014	22	169910	150890
RF	1-1106		2011	2016	6	177627	191232
RF	1-1110b		2011	2016	6	139844	194459
RF	1-1113		2011	2016	6	163620	206993

RF	112/21/2		2004	2013	19	151754	183632
RF	113/73/2		2004	2016	26	140730	181713
RF	113/73/4		2004	2016	25	138218	181576
RF	113/73/6		2004	2016	25	142166	182241
RF	2_0006		1994	2004	2	160980	160420
RF	2-0009		1994	2015	17	163749	162234
RF	2-0011		1994	2009	6	166910	161060
RF	2-0018		1994	2015	11	172172	182570
RF	2-0032		1994	1994	1	179030	171310
RF	2-0050		1994	2015	12	175803	170384
RF	2-0073		1994	2015	12	168703	174665
RF	2-0085		2006	2015	10	180003	184659
RF	2-0109		2006	2015	10	159858	177887
RF	2-0113		2004	2015	10	186590	162370
RF	2-0114		2004	2010	4	153030	158805
RF	2-0418b		2011	2015	5	147660	181650
RF	2-0429b		2011	2015	5	174590	165125
RF	4-0265b		2011	2015	6	129675	201954
RF	4-0267		2011	2015	6	136890	217532
RF	4-0268b		2011	2015	6	139952	224556
RF	4-0269		2011	2015	6	133230	218448
RF	422/73/5		2004	2016	25	136340	170108
RF	423/73/2		2004	2016	20	130635	177344
RF	433/73/6		2004	2016	23	138221	185141
RF	622/71/7		2004	2016	30	183831	164618
RF	640/71/99		2004	2016	19	179207	166623
RF	640/72/7		2004	2016	24	182785	168467
RF	640/72/99		2004	2016	26	180819	167200
RF	700/71/1		2005	2016	18	145139	156917
RF	700/73/1		2004	2006	3	149008	157710
RF	702/71/1		2004	2016	29	149416	162204
RF	703/71/3		2004	2016	29	157720	172445
RF	703/73/3		2004	2016	24	159437	174959
RF	703/73/5		2004	2016	25	161731	172639
RF	704/21/1		2004	2016	24	150848	182542

RF	704/73/1		2015	2015	1	148616	179650
RF	704/73/6		2004	2016	25	146273	178216
RF	705/21/8		2004	2016	26	152450	185521
RF	710/71/3		2004	2016	18	164952	161769
RF	710/71/4		2004	2016	31	164147	161242
RF	710/71/6		2004	2016	31	160976	158749
RF	710/71/7a		2004	2007	10	168567	159418
RF	710/73/1		2004	2013	17	166383	163593
RF	711/71/1		2004	2016	31	166674	167701
RF	711/71/3		2004	2016	30	162502	164595
RF	711/71/4		2004	2016	28	165911	165047
RF	711/72/1		2005	2016	23	164738	168387
RF	711/73/1		2004	2015	15	160901	163867
RF	711/73/5		2004	2016	24	167779	168190
RF	711/73/7		2004	2016	25	164071	166943
RF	711/73/8		2005	2016	23	163962	162912
RF	712/71/1		2004	2016	27	174485	170294
RF	712/71/2		2004	2016	31	175902	169756
RF	712/71/3		2004	2016	31	176196	171034
RF	713/63/2		2004	2016	24	167253	173208
RF	713/73/9		2004	2016	23	164380	168904
RF	724/73/1		2004	2016	25	162036	178054
RF	724/73/4		2004	2016	26	161851	181637

Tableau 0-6 : Récapitulatif des données complémentaires de l'aquifère du Bruxellien sélectionnées en Wallonie et en Flandre, les stations mise en évidence en bleues sont celles qui sont sélectionnées pour l'analyses hydrochimique (chapitre 6.1.3.4)