



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

Convention IBGE et HGE-ULg

**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**

Rapport final

Coordinateur du projet :

Dr. ir. Serge Brouyère

Partenaires scientifiques :

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

Rédaction : Caroline Thomas, Philippe Orban, Serge Brouyère

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	11
2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	13
2.1. Recherche bibliographique relative aux teneurs en éléments majeurs et mineurs généralement rencontrés dans les aquifères européens et comparaison avec les données géochimiques des 5 masses d'eaux de la Région de Bruxelles-Capitale	13
2.2. Descriptions des processus géochimiques susceptibles d'affecter les masses d'eaux étudiées	23
2.2.1. Apports Atmosphériques	23
2.2.2. Modification de la concentration en oxygène et en CO ₂ dissous	24
2.2.3. Précipitation et dissolution de minéraux	24
2.2.4. Réactions d'oxydo-réduction	25
2.2.5. Echanges ioniques et sorption/désorption	27
2.2.6. Activités anthropiques	27
2.2.7. Processus de drainance	28
2.2.8. Intrusion d'eau salée et rafraîchissement	29
2.2.9. Dissolution d'évaporites	29
3. MATÉRIELS ET MÉTHODES	30
3.1. Détermination des valeurs de référence des masses d'eau souterraines du Socle et du Crétacé (BR01) et du Landénien (BR03)	30
3.2. Méthodologie mise en œuvre pour identifier les processus d'acquisition de la minéralisation des masses d'eau du Socle et du Crétacé et du Landénien	32
3.2.1. Présentation et vérification de la qualité des données	32
3.2.2. Etude des processus chimiques influençant la composition géochimique des eaux souterraines	33
3.3.3. Descriptif des différentes méthodes utilisées	35
4. ANALYSE DES DONNÉES ET RÉSULTATS POUR LA MASSE D'EAU DU LANDÉNIEN (BR03)	41
4.1. Présentation et vérifications de la qualité des données	41
4.1.1. Présentation de la masse d'eau souterraine du Landénien (BR03)	41
4.1.2. Présentation des données	42
4.1.3. Vérification de la qualité des données	46
4.2. Etude des processus chimiques influençant la composition géochimique des eaux souterraines	56
4.2.1. Faciès hydrochimiques : diagramme de Piper	56
4.2.2. Variations spatiales	58
4.2.3. Analyse des variations temporelles des concentrations en éléments chimiques	69
4.2.4. Origine de la salinité des eaux souterraines	79
4.2.5. Statistique descriptive	82
4.2.6. Corrélation entre les éléments	88
4.2.7. Analyse multivariée par la méthode des matrices auto-organisantes	90

4.2.8. Modèle conceptuel de l'acquisition de la minéralisation	95
4.3. Calcul des concentrations de référence	97
4.3.1. Sélection des échantillons	97
4.3.2. Proposition de concentrations de référence.....	100
5. ANALYSE DES DONNÉES ET RÉSULTATS POUR LA MASSE D'EAU DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ (BR01)	106
5.1. Présentation des données	106
5.1.1. Présentation de la masse d'eau souterraine du Socle et du Crétacé (BR01)	106
5.1.2. Présentation des données.....	108
5.1.3. Vérification de la qualité des données	113
5.2 Etude des processus chimiques influençant la composition géochimique des eaux souterraines	126
5.2.1. Faciès hydrochimiques : diagramme de Piper.....	126
5.2.2. Variations spatiales	129
5.2.3. Analyse des variations temporelles des concentrations en éléments chimiques	140
5.2.4. Origine de la salinité des eaux souterraines.....	152
5.2.5. Statistiques descriptives.....	156
5.2.6. Corrélation entre les éléments.....	163
5.2.7. Analyse multivariée par la méthode des matrices auto-organisantes	165
5.2.8. Modèle conceptuel de l'acquisition de la minéralisation.....	172
5.3. Calcul des concentrations de référence	174
5.3.1. Sélection des échantillons	174
5.3.2. Proposition de concentration de référence	176
6. RECOMMANDATIONS.....	183
6.1. Recommandations relatives aux programmes d'échantillonnage des masses d'eau souterraine ...	183
6.2. Recommandation relatives à la représentativité spatiale et temporelle des jeux de données.....	184
6.3. Recommandations relatives à la caractérisation hydrochimique et isotopique des eaux souterraines	185
7. CONCLUSIONS.....	187
8. BIBLIOGRAPHIE.....	192
A. ANNEXES	196
A.1. Annexe : tableau de correspondance des masses d'eau et aquifères transfrontaliers du district de l'Escaut.....	196
A.2. Annexe: présence de polluants en Région de Bruxelles-Capitale.....	197
A.2.1. Landénien.....	197

A.2.2. Socle et Crétacé.....	198
A. 3. Annexe : Variation du niveau piézométrique	199
A.3.1. Landénien.....	199
A.3.2. Socle et Crétacé.....	200
A.4. Méthodologie pour déterminer les concentrations de référence en Région wallonne et en Région flamande.....	201
A.4.1. Région wallonne.....	201
A.4.2. Région flamande	201

LISTE DES FIGURES

FIGURE 2-1 : PRINCIPAUX PROCESSUS AFFECTANT L'ÉVOLUTION DE LA CONCENTRATION DE RÉFÉRENCE DE L'EAU SOUTERRAINE (EDMUNDS AND SHAND, 2008) -----	23
FIGURE 2-2 : SÉQUENCE DES RÉACTIONS D'OXYDO-RÉDUCTION (SHAND ET AL, 2007) -----	26
FIGURE 3-1 : MÉTHODOLOGIE POUR LA DÉTERMINATION DES CONCENTRATIONS DE RÉFÉRENCE PROPOSÉE PAR LE PROJET BRIDGE (MÜLLER, 2006) -----	31
FIGURE 3-2 : DIAGRAMME DE PIPER (SIMLER, 2013) -----	36
FIGURE 3-3 : DISTRIBUTION ET HISTOGRAMME -----	39
FIGURE 3-4 : BOXPLOT -----	39
FIGURE 4-1: AQUIFÈRES TRANSFRONTALIERS DU PALÉOCÈNE ET DE L'EOCÈNE DU BASSIN DE L'ESCAUT (CIE, 2009) -----	41
FIGURE 4-2 : LOCALISATION DE LA MASSE D'EAU BR03 ET DES AFFLEUREMENTS DU LANDÉNIEN (SERVICE GÉOLOGIQUE DE BELGIQUE, 2003) -----	42
FIGURE 4-3: POINTS DE PRÉLÈVEMENT DE LA MASSE D'EAU DU LANDÉNIEN POUR LESQUELS DES DONNÉES HYDROCHIMIQUES SONT DISPONIBLES -----	44
FIGURE 4-4 : DONNÉES COMPLÉMENTAIRES DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN EN WALLONIE ET EN FLANDRE	46
FIGURE 4-5 : AQUIFÈRE SOLlicitÉ PAR LA STATION D'ÉCHANTILLONNAGE -----	47
FIGURE 4-6 : REPRÉSENTATION DES ÉCHANTILLONS DU LANDÉNIEN (MÉDIANE) DANS UN DIAGRAMME DE PIPER -----	57
FIGURE 4-7 : RÉPARTITION SPATIALE DES TYPES DE FACIÈS HYDROCHIMIQUES DANS LE LANDÉNIEN -----	58
FIGURE 4-8 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONDUCTIVITÉ DE TERRAIN DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	60
FIGURE 4-9 : RÉPARTITION SPATIALE DU PH DE TERRAIN DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	60
FIGURE 4-10 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN O ₂ DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	61
FIGURE 4-11 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN CA DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	61
FIGURE 4-12 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN CL DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	62
FIGURE 4-13 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN HCO ₃ DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	62
FIGURE 4-14 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN MG DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	63
FIGURE 4-15 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NA DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	63
FIGURE 4-16 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN K DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	64
FIGURE 4-17 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN SO ₄ DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	64
FIGURE 4-18 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NO ₃ DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	65
FIGURE 4-19 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NH ₄ DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	65
FIGURE 4-20 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN FE DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN (IL S'AGIT DU FE TOTAL EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE MAIS DU FE DISSOUS EN WALLONIE ET EN FLANDRE) -----	66
FIGURE 4-21 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN MN TOTAL DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	66
FIGURE 4-22 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN F DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	67
FIGURE 4-23 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN AS TOTAL DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	67
FIGURE 4-24 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN ZN TOTAL DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	68
FIGURE 4-25 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN PB TOTAL DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN -----	68
FIGURE 4-26 : EVOLUTION DES PARAMÈTRES ET DES CONCENTRATIONS EN ÉLÉMENTS MAJEURS ET MINEURS AU COURS DU TEMPS DE LA MASSE D'EAU BR03 -----	73
FIGURE 4-27: EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN CL POUR LES STATIONS DE LA MASSE D'EAU BR03 OÙ LA PENTE EST SIGNIFICATIVE -----	75

FIGURE 4-28 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN FE POUR LES STATIONS DE LA MASSE D'EAU BR03 OÙ LA PENTE EST SIGNIFICATIVE -----	76
FIGURE 4-29 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN MN POUR LES STATIONS DE LA MASSE D'EAU BR03 OÙ LA PENTE EST SIGNIFICATIVE -----	76
FIGURE 4-30 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE LA STATION P26 ET VARIATION PIÉZOMÉTRIQUE DE LA STATION LA PLUS PROCHE (520_L4)-----	77
FIGURE 4-31 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE LA STATION L6 ET VARIATION PIÉZOMÉTRIQUE DE LA STATION LA PLUS PROCHE (522_L6)-----	77
FIGURE 4-32 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE LA STATION P46 ET VARIATION PIÉZOMÉTRIQUE DE LA STATION LA PLUS PROCHE (523_L8)-----	78
FIGURE 4-33 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE LA STATION P33 ET VARIATION PIÉZOMÉTRIQUE DE LA STATION LA PLUS PROCHE (518_L2)-----	78
FIGURE 4-34 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE LA STATION P5 ET VARIATION PIÉZOMÉTRIQUE DE LA STATION LA PLUS PROCHE (523_L8)-----	79
FIGURE 4-35 : GRAPHE DE LA CONCENTRATION EN NA PAR RAPPORT À LA CONCENTRATION EN CL -----	80
FIGURE 4-36 : RAPPORT BR/CL EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN CL POUR LA MASSE D'EAU DU LANDÉNIEN -----	80
FIGURE 4-37 : INDICE DE SATURATION (SI) DE LA CALCITE, DU GYPSE ET DE LA HALITE EN FONCTION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE CONTRÔLÉS PAR CES MINÉRAUX-----	81
FIGURE 4-38 : DIAGRAMME (NA+K)-CL EN FONCTION DE (CA+MG)-(HCO3+SO4) -----	82
FIGURE 4-39: HISTOGRAMMES ILLUSTRANT LA DISTRIBUTION DES PARAMÈTRES DE TERRAIN ET DES ÉLÉMENTS MAJEURS DU LANDÉNIEN -----	84
FIGURE 4-40 : HISTOGRAMMES ILLUSTRANT LA DISTRIBUTION DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS DU LANDÉNIEN (POUR LES MÉTAUX, IL S'AGIT DE LA FRACTION TOTALE SAUF POUR LE FE OÙ LA FRACTION DISSOUTE EST ÉGALEMENT REPRÉSENTÉE)-----	85
FIGURE 4-41 : BOXPLOTS ILLUSTRANT LA DISTRIBUTION DE QUELQUES PARAMÈTRES ET ÉLÉMENTS MAJEURS DU LANDÉNIEN -----	86
FIGURE 4-42 : BOXPLOTS ILLUSTRANT LA DISTRIBUTION DE QUELQUES ÉLÉMENTS MINEURS DU LANDÉNIEN (POUR LES MÉTAUX, IL S'AGIT DE LA FRACTION TOTALE SAUF POUR LE FE OÙ IL S'AGIT DE LA FRACTION TOTALE EN RBC ET DE LA FRACTION DISSOUTE EN RW ET RF) -----	87
FIGURE 4-43 : RÉSULTATS DES SOMS POUR LA MINÉRALISATION GLOBALE DU LANDÉNIEN : A) MATRICE DES COMPOSANTS, B) MATRICE U, C) GROUPES D'ÉCHANTILLONS SEMBLABLES DÉFINIS PAR LES SOMS--	91
FIGURE 4-44 : DISTRIBUTION SPATIALE DES 3 GROUPES DÉFINIS GRÂCE À L'ANALYSE MULTIVARIÉE (MINÉRALISATION GLOBALE)-----	92
FIGURE 4-45 : RÉSULTATS DES SOMS POUR LES PROCESSUS REDOX DU LANDÉNIEN : A) MATRICE DES COMPOSANTS, B) MATRICE U, C) GROUPES D'ÉCHANTILLONS SEMBLABLES DÉFINIS PAR LES SOMS-----	93
FIGURE 4-46 : DISTRIBUTION SPATIALE DES QUATRE GROUPES DÉFINIS GRÂCE À L'ANALYSE MULTIVARIÉE (PROCESSUS REDOX)-----	95
FIGURE 4-47 : MODÈLE CONCEPTUEL DE L'ACQUISITION DE LA MINÉRALISATION DANS LA MASSE D'EAU DU LANDÉNIEN -----	97
FIGURE 4-48 : SÉLECTION DES ÉCHANTILLONS POUR LA DÉTERMINATION DES CONCENTRATIONS DE RÉFÉRENCE DE LA MASSE D'EAU DU LANDÉNIEN (BR03)-----	99
FIGURE 5-1 : AQUIFÈRES TRANSFRONTALIERS DU PALÉO-MÉSOZOÏQUE DU BASSIN DE L'ESCAUT (CIE, 2009)	106
FIGURE 5-2 : LOCALISATION DES MASSES D'EAU BR01 ET BR02 ET DES AFFLEUREMENTS DU CAMBRIEN, SILURIEN, DÉVONIEN ET DU CRÉTACÉ (SERVICE GÉOLOGIQUE DE BELGIQUE, 2003) -----	108
FIGURE 5-3 : POINTS DE PRÉLÈVEMENT DE LA MASSE D'EAU DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ (BR01) ET DU SOCLE EN ALIMENTATION (BR02) POUR LESQUELS DES DONNÉES HYDROCHIMIQUES SONT DISPONIBLES (LA DÉLIMITATION DES CRAIES PROVIENT DU MODÈLE STRATIGRAPHIQUE RÉALISÉ DANS LE CADRE DU PROJET HYDROLAND).-----	110

FIGURE 5-4 : DONNÉES COMPLÉMENTAIRES DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DANS L'AQUIFÈRE DU CRÉTACÉ, EN WALLONIE ET EN FLANDRE-----	111
FIGURE 5-5 : AQUIFÈRE SOLlicité PAR LA STATION D'ÉCHANTILLONNAGE (LA DÉLIMITATION DES CRAIES PROVIENT DU MODÈLE STRATIGRAPHIQUE RÉALISÉ DANS LE CADRE DU PROJET HYDROLAND).-----	114
FIGURE 5-6 : REPRÉSENTATION DES ÉCHANTILLONS DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ (MÉDIANE) DANS UN DIAGRAMME DE PIPER -----	128
FIGURE 5-7 : RÉPARTITION SPATIALE DES TYPES DE FACIÈS HYDROCHIMIQUES -----	128
FIGURE 5-8 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONDUCTIVITÉ DE TERRAIN DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	131
FIGURE 5-9 : RÉPARTITION SPATIALE DU PH DE TERRAIN DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ -----	131
FIGURE 5-10 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN O2 DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	132
FIGURE 5-11 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN CA DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	132
FIGURE 5-12 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN CL DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	133
FIGURE 5-13 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN HCO3DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	133
FIGURE 5-14 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN MG DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	134
FIGURE 5-15 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NA DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	134
FIGURE 5-16 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN K DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	135
FIGURE 5-17 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN SO4 DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	135
FIGURE 5-18 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NO3 DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	136
FIGURE 5-19 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN NH4 DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	136
FIGURE 5-20 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN FE DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ (IL S'AGIT DU FE TOTAL EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE MAIS DU FE DISSOUS EN WALLONIE ET EN FLANDRE)-----	137
FIGURE 5-21 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN MN TOTAL DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	137
FIGURE 5-22 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN F DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	138
FIGURE 5-23 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN AS TOTAL DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	138
FIGURE 5-24 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN ZN TOTAL DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	139
FIGURE 5-25 : RÉPARTITION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN PB TOTAL DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	139
FIGURE 5-26 : EVOLUTION DES PARAMÈTRES ET DES CONCENTRATIONS EN ÉLÉMENTS MAJEURS ET MINEURS AU COURS DU TEMPS DES MASSES D'EAU BR01 ET BR02 -----	145
FIGURE 5-27 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN FE POUR LES STATIONS DE LA MASSE D'EAU BR01 ET BR02 OÙ LA PENTE EST SIGNIFICATIVE (À L'EXCEPTION DU PUIS P18A PRÉSENTÉ À LA FIGURE 5-30) --	147
FIGURE 5-28 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN MN POUR LES STATIONS DE LA MASSE D'EAU BR01 ET BR02 OÙ LA PENTE EST SIGNIFICATIVE -----	147

FIGURE 5-29: EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITÉ ET DE LA CONCENTRATION EN ÉLÉMENTS MAJEURS DE LA STATION P18A -----	149
FIGURE 5-30 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN ÉLÉMENTS MINEURS DE LA STATION P18A -----	149
FIGURE 5-31 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE LA STATION 325 ET VARIATION PIÉZOMÉTRIQUE DE LA STATION LA PLUS PROCHE (324)-----	150
FIGURE 5-32 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE LA STATION P22 ET VARIATION PIÉZOMÉTRIQUE DE LA STATION LA PLUS PROCHE (368)-----	151
FIGURE 5-33 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE LA STATION P21 ET VARIATION PIÉZOMÉTRIQUE DE LA STATION LA PLUS PROCHE (525)-----	152
FIGURE 5-34 : GRAPHE DE LA CONCENTRATION EN NA PAR RAPPORT À LA CONCENTRATION EN CL POUR LA MASSE D'EAU DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ -----	153
FIGURE 5-35 : RAPPORT BR/CL EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN CL POUR LES MASSES D'EAU DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ -----	154
FIGURE 5-36 : INDICE DE SATURATION (SI) DE LA CALCITE, DU GYPSE ET DE LA HALITE EN FONCTION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE CONTRÔLÉS PAR CES MINÉRAUX-----	155
FIGURE 5-37 : DIAGRAMME (NA+K)-CL EN FONCTION DE (CA+MG)-(HCO ₃ +SO ₄)-----	156
FIGURE 5-38 HISTOGRAMMES ILLUSTRANT LA DISTRIBUTION DES PARAMÈTRES DE TERRAIN ET DES ÉLÉMENTS MAJEURS DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ -----	158
FIGURE 5-39 : HISTOGRAMMES ILLUSTRANT LA DISTRIBUTION DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ (POUR LES MÉTAUX IL S'AGIT DE LA FRACTION TOTALE À L'EXCEPTION DU FE POUR LEQUEL LA FRACTION DISSOUE EST ÉGALEMENT REPRÉSENTÉE)-----	159
FIGURE 5-40 : BOXPLOTS ILLUSTRANT LA DISTRIBUTION DE QUELQUES PARAMÈTRES ET ÉLÉMENTS MAJEURS DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ-----	161
FIGURE 5-41 : BOXPLOTS ILLUSTRANT LA DISTRIBUTION DE QUELQUES ÉLÉMENTS MINEURS DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ (POUR LES MÉTAUX IL S'AGIT DE LA FRACTION TOTALE À L'EXCEPTION DU FE OÙ IL S'AGIT DE LA FRACTION TOTALE EN RBC ET DE LA FRACTION DISSOUE EN RW ET RF)-----	162
FIGURE 5-42 : RÉSULTATS DES SOMS POUR LA MINÉRALISATION GLOBALE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ EN TENANT COMPTE DE LA LITHOLOGIE: A) MATRICE DES COMPOSANTS, B) MATRICE U, C) GROUPES D'ÉCHANTILLONS SEMBLABLES DÉFINIS PAR LES SOMS -----	167
FIGURE 5-43 : RÉSULTATS DES SOMS POUR LA MINÉRALISATION GLOBALE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ SANS TENIR COMPTE DE LA LITHOLOGIE: A) MATRICE DES COMPOSANTS, B) MATRICE U, C) GROUPES D'ÉCHANTILLONS SEMBLABLES DÉFINIS PAR LES SOMS -----	168
FIGURE 5-44 : DISTRIBUTION SPATIALE DES 3 GROUPES DÉFINIS GRÂCE À L'ANALYSE MULTIVARIÉE (MINÉRALISATION GLOBALE) -----	169
FIGURE 5-45 : RÉSULTATS DES SOMS POUR LES PROCESSUS REDOX DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ: A) MATRICE DES COMPOSANTS, B) MATRICE U, C) GROUPES D'ÉCHANTILLONS SEMBLABLES DÉFINIS PAR LES SOMS ----	170
FIGURE 5-46 : DISTRIBUTION SPATIALE DES 3 GROUPES DÉFINIS GRÂCE À L'ANALYSE MULTIVARIÉE (PROCESSUS REDOX) -----	172
FIGURE 5-47 : MODÈLE CONCEPTUEL DE L'ACQUISITION DE LA MINÉRALISATION DANS LA MASSE D'EAU DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ -----	174
FIGURE 5-48 : SÉLECTION DES ÉCHANTILLONS POUR LA DÉTERMINATION DES CONCENTRATIONS DE RÉFÉRENCE DE LA MASSE D'EAU DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ (BR01) -----	176
FIGURE A-1 : TYPES DE POLLUANTS QUANTIFIÉS PAR STATION DE PRÉLÈVEMENT POUR LA MASSE D'EAU DU LANDÉNIEN BR03 (NB : NOMBRE ; HAP : HYDROCARBURE AROMATIQUE POLYCYCLIQUE ; HAM : HYDROCARBURES AROMATIQUE MONOCYCLIQUE) -----	197
FIGURE A-2 : TYPES DE POLLUANTS QUANTIFIÉS PAR PUIXS POUR LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ (BR01) ET DU SOCLE EN ZONE D'ALIMENTATION (BR02) (NB : NOMBRE ; HAP : HYDROCARBURE AROMATIQUE POLYCYCLIQUE ; HAM : HYDROCARBURES AROMATIQUE MONOCYCLIQUE) -----	198

FIGURE A-3 : LOCALISATION DES STATIONS DE MESURES QUANTITATIVES (NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE) DE LA MASSE D'EAU BR03	199
FIGURE A-4 : EVOLUTION DE LA PIÉZOMÉTRIE DANS LA MASSE D'EAU BR03	199
FIGURE A-5 : LOCALISATION DES STATIONS DE MESURES QUANTITATIVES (NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE) DE LA MASSE D'EAU BR01	200
FIGURE A-6 : EVOLUTION DE LA PIÉZOMÉTRIE DANS LA MASSE D'EAU BR01	201

LISTE 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)	13
TABLEAU 2-2 : INFORMATIONS GÉNÉRALES DES ÉTUDES RÉALISÉES SUR DES MASSES D'EAU SIMILAIRES À CELLES DE LA RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE	17
TABLEAU 2-3 : TENEURS HABITUELLES EN ÉLÉMENTS MAJEURS ET MINEURS POUR DES AQUIFÈRES SABLEUX (PARTIE 1)	18
TABLEAU 2-4 : TENEURS HABITUELLES EN ÉLÉMENTS MAJEURS ET MINEURS POUR DES AQUIFÈRES SABLEUX (PARTIE 2)	19
TABLEAU 2-5 : TENEURS HABITUELLES EN ÉLÉMENTS MAJEURS ET MINEURS POUR DES AQUIFÈRES GRÉSEUX ET CRAYEUX	20
TABLEAU 2-6 : TENEURS EN ÉLÉMENTS MAJEURS ET MINEURS DANS LES MASSES D'EAU BR03, BR04 ET BR05	21
TABLEAU 2-7 : TENEURS S EN ÉLÉMENTS MAJEURS ET MINEURS DANS LES MASSES D'EAU BR01 ET BR02	22
TABLEAU 4-1 : DONNÉES RELATIVES AUX POINTS DE PRÉLÈVEMENT DE LA MASSE D'EAU DU LANDÉNIEN POUR LESQUELS DES DONNÉES HYDROCHIMIQUES SONT DISPONIBLES	43
TABLEAU 4-2 : RÉCAPITULATIF DES DONNÉES COMPLÉMENTAIRES DE LA MASSE D'EAU DU LANDÉNIEN SÉLECTIONNÉES EN WALLONIE ET EN FLANDRE.	46
TABLEAU 4-3 : CALCUL DE LA BALANCE IONIQUE DES ÉCHANTILLONS DU LANDÉNIEN (NB = NOMBRE, BI = BALANCE IONIQUE)	48
TABLEAU 4-4 : LIMITE DE QUANTIFICATION DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS ET EN TRACE (NB = NOMBRE, LQ = LIMITE DE QUANTIFICATION)	50
TABLEAU 4-5 : PRINCIPAUX POLLUANTS DANS L'AQUIFÈRE DU LANDÉNIEN (* : PAS DE DONNÉES)	54
TABLEAU 4-6 : ANALYSES ISOTOPIQUES DU C14 DE LA MASSE D'EAU BR03	55
TABLEAU 4-7 : ANALYSES ISOTOPIQUES DU CL36 DE LA MASSE D'EAU BR03	56
TABLEAU 4-8 : PENTE CALCULÉ POUR L'ÉVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN CL DANS LA MASSE D'EAU BR03 PAR LA MÉTHODE DE MANN KENDALL (/ : IMPOSSIBILITÉ DE CALCUL STATISTIQUES)	74
TABLEAU 4-9 : PENTE CALCULÉ POUR L'ÉVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN FE DANS LA MASSE D'EAU BR03 PAR LA MÉTHODE DE MANN KENDALL (/ : IMPOSSIBILITÉ DE CALCUL STATISTIQUES)	75
TABLEAU 4-10 : PENTE CALCULÉ POUR L'ÉVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN MN DANS LA MASSE D'EAU BR03 PAR LA MÉTHODE DE MANN KENDALL (/ : IMPOSSIBILITÉ DE CALCUL STATISTIQUES)	75
TABLEAU 4-11 : PRINCIPAUX PARAMÈTRES STATISTIQUES DU LANDÉNIEN	83
TABLEAU 4-12 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES PRINCIPAUX PARAMÈTRES DE TERRAIN, LES ÉLÉMENTS MAJEURS ET LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS DU LANDÉNIEN	89
TABLEAU 4-13 : CARACTÉRISTIQUES DE CHACUN DES TROIS GROUPES	91
TABLEAU 4-14 : CARACTÉRISTIQUES DE CHACUN DES QUATRE GROUPES	94
TABLEAU 4-15 : PARAMÈTRES STATISTIQUES CALCULÉS POUR ESTIMER LA CONCENTRATION TYPE DE LA MASSE D'EAU DU LANDÉNIEN BR03 SUR BASE DES MÉDIANES DES STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE (EN BLEU PARAMÈTRES DE LA LISTE MINIMALE ET LE FE ET LE MN)	102
TABLEAU 4-16 : CONCENTRATIONS DE RÉFÉRENCE DU LANDÉNIEN EN FLANDRE ET EN WALLONIE (* : POUR LES MÉTAUX IL S'AGIT DES CONCENTRATIONS DISSOUTES POUR LA FLANDRE ET CE N'EST PAS PRÉCISÉ S'IL	

S'AGIT DES CONCENTRATIONS TOTALES OU DISSOUTES EN WALLONIE) (SPW-DGO3-DEE, 2016 ET VMM, 2016)-----	102
TABLEAU 4-17 : VALEURS DE RÉFÉRENCE PROPOSÉES POUR LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE BR03 -----	105
TABLEAU 5-1 : DONNÉES RELATIVES AUX POINTS DE PRÉLÈVEMENT DE LA MASSE D'EAU DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ (BR01) ET DU SOCLE EN ALIMENTATION (BR02) POUR LESQUELS DES DONNÉES HYDROCHIMIQUES SONT DISPONIBLES -----	109
TABLEAU 5-2 : RÉCAPITULATIF DES DONNÉES COMPLÉMENTAIRES DANS LES MASSES D'EAU DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ SÉLECTIONNÉES EN WALLONIE ET EN FLANDRE.-----	113
TABLEAU 5-3 : CALCUL DE LA BALANCE IONIQUE DES ÉCHANTILLONS DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ (NB = NOMBRE, BI = BALANCE IONIQUE)-----	115
TABLEAU 5-4 : LIMITE DE QUANTIFICATION DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS ET EN TRACE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ (NB = NOMBRE, LQ = LIMITE DE QUANTIFICATION)-----	119
TABLEAU 5-5 : PRINCIPAUX POLLUANTS DANS L'AQUIFÈRE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ (* : PAS DE DONNÉES)	124
TABLEAU 5-6 : ANALYSES ISOTOPIQUES DU C14 DES MASSES D'EAU BR01 ET BR02-----	126
TABLEAU 5-7 : ANALYSES ISOTOPIQUES DU C36 DES MASSES D'EAU BR01 ET BR02-----	126
TABLEAU 5-8 : PENTE CALCULÉ POUR L'ÉVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN CL DANS LES MASSES D'EAU BR01 ET BR02 PAR LA MÉTHODE DE MANN KENDALL (/ : IMPOSSIBILITÉ DE CALCUL STATISTIQUES) ----	146
TABLEAU 5-9 : PENTE CALCULÉ POUR L'ÉVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN FE DANS LES MASSES D'EAU BR01 ET BR02 PAR LA MÉTHODE DE MANN KENDALL (/ : IMPOSSIBILITÉ DE CALCUL STATISTIQUES) ----	146
TABLEAU 5-10 : PENTE CALCULÉ POUR L'ÉVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN MN DANS LES MASSES D'EAU BR01 ET BR02 PAR LA MÉTHODE DE MANN KENDALL (/ : IMPOSSIBILITÉ DE CALCUL STATISTIQUES) ----	146
TABLEAU 5-11 : PENTE CALCULÉ POUR L'ÉVOLUTION DE LA CONCENTRATION ÉLÉMENTS MAJEURS ET MINEURS DANS LA STATION P18A PAR LA MÉTHODE DE MANN KENDALL À PARTIR DE 1983 ET À PARTIR DE 2006 -----	148
TABLEAU 5-12 : PRINCIPAUX PARAMÈTRES STATISTIQUES DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ -----	157
TABLEAU 5-13 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES PRINCIPAUX PARAMÈTRES DE TERRAIN, LES ÉLÉMENTS MAJEURS ET LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS MINEURS DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ -----	164
TABLEAU 5-14 : CARACTÉRISTIQUES DE CHACUN DES TROIS GROUPES-----	168
TABLEAU 5-15 : CARACTÉRISTIQUES DE CHACUN DES 3 GROUPES -----	171
TABLEAU 5-16 : PARAMÈTRES STATISTIQUES CALCULÉS POUR ESTIMER LA CONCENTRATION TYPE DE LA MASSE D'EAU DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ BR01 SUR BASE DES MÉDIANES DES STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE (EN BLEU PARAMÈTRES DE LA LISTE MINIMALE ET LE FE ET LE MN) -----	179
TABLEAU 5-17 : CONCENTRATIONS DE RÉFÉRENCE DU SOCLE ET DU CRÉTACÉ EN FLANDRE ET EN WALLONIE (* : POUR LES MÉTAUX IL S'AGIT DES CONCENTRATIONS DISSOUTES POUR LA FLANDRE ET CE N'EST PAS PRÉCISÉ S'IL S'AGIT DES CONCENTRATIONS TOTALES OU DISSOUTES EN WALLONIE) (SPW-DGO3-DEE, 2016 ET VMM, 2016) -----	179
TABLEAU 5-18 : VALEURS DE RÉFÉRENCE PROPOSÉES POUR LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE BR01 -----	183
TABLEAU A-1 : 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) -----	196

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) 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 » pour chaque masse d'eau (initialement à l'échéance 2015).

Pour déterminer l'état 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 lequel les états membres doivent établir des valeurs seuils a été fixée dans la directive fille (2006/118/CE). 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-ULg) 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 captives du Socle et du Crétacé (BR01) et du Landénien (BR03) en Région de Bruxelles-Capitale. 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), 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

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. Par soucis de cohérence, les valeurs de références déterminées dans cette étude seront basées sur le phosphore total également.

seront donc pas déterminée pour ces composants. A la liste minimale s'ajoutent les paramètres à 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, 2014). Les concentrations de référence du fer et du manganèse seront également déterminées parce que ce sont des paramètres non à risque mais significativement présents dans les masses d'eau souterraines BR01 et BR03.

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 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 avec des contextes hydrogéologiques semblables aux masses d'eau souterraines de la Région de Bruxelles-Capitale. Dans cette partie, se trouve également une description brève des principaux processus géochimiques susceptibles d'affecter ces masses d'eau.

La recherche bibliographique a aussi porté sur les recommandations de la directive fille (2006/118/CE et 2014/80/CE) et la méthodologie utilisée dans différentes études européennes pour déterminer les concentrations de référence.

La partie concernant l'analyse des données se divise en deux chapitres, un pour la masse d'eau du Socle et du Crétacé et un pour la masse d'eau du Landénien. Pour chaque masse d'eau, 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. Etude bibliographique

2.1. Recherche bibliographique relative aux teneurs en éléments majeurs et mineurs généralement rencontrées dans les aquifères européens et comparaison avec les données géochimiques des 5 masses d'eaux de la Région de Bruxelles-Capitale

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 dont les analyses ont été investiguées dans le cadre de l'étude sur la période de 2004 à aujourd'hui pour le suivi qualitatif.

Masse d'eau	Lithologie	Contexte hydrogéologique	Nb stations de mesure
BR01 : Socle et Crétacé	Grès, schistes, quartzites et craies	Captif, \pm 100 km mer	9
BR02 : Socle en zone d'alimentation	Grès, schistes, quartzites	Captif, \pm 100 km mer	5
BR03: Sables du Landénien	Sables et argiles	Captif, \pm 100 km mer	15
BR04 : Sables yprésiens (région des collines)	Sables et quelques couches d'argile	Libre (localement captif), \pm 100 km mer	4
BR05: Sables du Bruxellien	Sables	Libre (localement captif), \pm 100 km mer	49

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)

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. Les données de ces aquifères seront également comparées aux données de la Région de Bruxelles-Capitale. 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 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.

En France, l'approche n'a pas été réalisée par masse d'eau mais 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. 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-Unis, 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 3 aquifères du Royaume-Unis 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 concerne des aquifères sableux qui pourraient donc être comparés aux masses d'eau des sables du Landénien (BR03), 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 la craie ou dans des formations schisto-gréseuses. Ces valeurs pourront être comparées aux données géochimiques des masses d'eau du Socle et du Crétacé (BR01) et 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 il y a quand même des différences relativement importantes notamment au niveau du chlore et des métaux.

Il faut aussi noter que pour les métaux la concentration donnée dans les tableaux est soit la concentration totale (en Région de Bruxelles-Capitale) soit la concentration en élément dissout dans l'eau (certains paramètres en Région de Bruxelles-Capitale, en Région Flamande et au Royaume Unis). Il arrive également que cela ne soit pas précisé (Région Wallonne, France,). 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 + 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 géochimie des masses d'eau de la Région de Bruxelles-Capitale est également présentée aux tableaux 2-6 et 2-7. Pour chaque masse d'eau le minimum, le maximum ainsi que certains paramètres statistiques (la moyenne, la médiane, le P25, le P75 et le P90) ont été calculés pour l'ensemble du jeu de données disponibles. Le but de cette première approche est de regarder si les concentrations en Région de Bruxelles-Capitale présentent des ordres de grandeur similaires aux autres aquifères européens. Globalement les valeurs sont dans la même gamme. Il y a néanmoins des différences même si les aquifères présentent une lithologie semblable parce que de nombreux autres processus peuvent influencer la minéralisation de l'eau souterraine. Ces processus seront d'ailleurs décrits dans le point suivant.

Pays/ Rég.	Auteur(s) Date	Données	MESO/ aquifère	Lithologie	Contexte hydrogéologique	Nb stations de mesure
Belgique : Flandre	VMM (Vlaams Milieumaatschappij) (2016)	Les données proviennent des réseaux de mesures du VMM entre 2004 et 2013. Les échantillons avec une influence anthropique ont été retirés. Pour estimer la teneur moyenne des masses d'eau le P90 a été calculé.	Sables du Landénien/ Est Landeniaan Aquifersysteem BLKS_1000_GWL_2S	Sables, argiles	Nappe captive, <100 km mer	/
			Sables du Landénien/ Ouest Landeniaan Aquifersysteem SS_1000_GWL_2	Sables, tufs argileux, marnes	Nappe captive, <100 km mer	/
			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 Est/ Krijt aquifersysteem (gespannen) BLKS_1100_GWL_2S	Craies + (grès, schistes, quartzites)	Nappe captive, <100 km mer	/
			Socle et Crétacé Ouest/ Sokkel+Krijt Aquifersysteem (gespannen deel) SS_1300_GWL_4	Craies, schistes, phyllades, grès	Nappe captive, <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	SPW-DGO3-DEE. (2016).	Pour chaque aquifère principal de chaque masse d'eau, la teneur en éléments majeurs et mineurs a été estimée en calculant les P90 des concentrations pour des sites non impactés par l'activité humaine. Une valeur moyenne des éléments majeurs et mineurs a également été calculée pour chaque aquifère principal pour l'ensemble de la Wallonie.	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, >100 km mer	5
			E061 Sables du Landénien et de l'Yprésien Ouest	Sables, argiles	Nappe semi-captive, >100 km mer	7
			E051 Sables Bruxelliens	Sables	Nappe libre, >100 km mer	80
			E080 Craies captives du Brabant	Craies	Nappe captive, >100 km mer	17
			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, p25 et le p75). Ici seulement les aquifères avec une concentration en nitrate < 10 mg/L sont présentés pour éliminer les aquifères avec des pollutions anthropiques.	/	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
				Craie	Captif <100 km mer	72
				Grès	Captif <100 km mer	1
					Captif >100 km mer	2
Royaume-Unis	British Geological Survey (2002-2005)	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. La composition de l'aquifère est donnée par le min, max, la moyenne, la médiane et le p97.7. Les stations d'échantillonnages avec un impact anthropique sont également incluses dans l'analyse.	The Bridport Sands of Dorset and Somerset	Sables	Libre <100 km mer	52
			The Palaeogene of the Wessex Basin	Sables et argiles	Libre/captif/ semi-captif <100 km mer	27
			The Chalk of the Colne and Lee River Catchments	Craies	Captif <100 km mer	21

Tableau 2-2 : Informations générales des 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 du Landénien Est BLKS_1000_GWL_2S	Sables du Landénien Ouest SS_1000_GWL_2	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	Sables					Sables et argiles				
Contexte		Captif >100 km mer	Captif >100 km mer	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	P90	P90	moyenne	P90	P90	P90	P90	min	max	moyenne	P50	p 97.7	min	max	P50	moyenne	p 97.7
Ca	mg/L	130	69	200	160	131.4					42	165	115	116	156	5.2	128	47	48.8	102
Na	mg/L	150	860	54	18	14.9					73	101	22	16	75	11.4	111	19.2	25.5	105.3
Mg	mg/L	23	17	27	18	10.5					2.2	15	5.9	5	13	1.72	15.7	5.46	7.37	15.1
K	mg/L	18	24	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	0,69	0,82	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	35	480	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	84	370	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														
Al dissous	µg/L			120	120						0.36	1103	29	3	66	<1.0	1152	5	99	728
As total	µg/L						0.58	2.42	2.19	0.59										
As dissous	µg/L		18	6							0.15	12	0.94	0.52	3.74	<0.5	3.1	<0.5	0.61	3.1
B total	µg/L																			
B dissous	µg/L	450	3800	67	39		19.05	83.7	675.1	37.3	<20	573	58	22	372	5	310	26.5	51.2	302
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																			
Cd dissous	µg/L						0.12	0.14	0.07	0.09	<0.05	0.67	0.093	0.08	0.45	<0.05	0.33	<0.05	0.05	0.31
Cr total	µg/L																			
Cr dissous	µg/L						2.84	1.7	0.76	2.57	<0.5	6.7	0.52	<0.5	1.76	<0.5	0.9	<0.5	0.35	0.9
Cu total	µg/L																			
Cu dissous	µg/L		7	5			5.89	10.76	99.5	2.85	<0.04	68.97	2.56	0.5	10.8	0.4	7.8	1.2	1.85	6.79
F	µg/L	800	6400	300	200	100					120	740	290	270	690	<100	3400	<100	454	3147
Fe total	µg/L																			
Fe dissous	µg/L	1700	1600	5500	4400	10	24.29	3764.47	446.35	22.41	<5	887	133	6.5	844	7	11300	680	1970	11100
Mn total	µg/L																			
Mn dissous	µg/L	110	400	1000	520	3	3.44	145.07	549.36	4.58	<2	348	29	1	282	<2	310	50	90	310
Ni total	µg/L																			
Ni dissous	µg/L		8	15	6		2.39	5.31	6.03	1.83	<0.2	72	6.2	6	17	<0.2	26.1	0.6	5.12	23.3
Pb total	µg/L																			
Pb dissous	µg/L						0.73	3.33	2.97	0.71	<0.1	3.6	0.4	0.27	1.58	<0.1	2.9	0.1	0.36	2.09
Zn total	µg/L																			
Zn dissous	µg/L	28	32	110	30		51.61	37.86	406.25	24	<0.5	227	14	2.7	70	2.1	373	18.8	58.9	332

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												Royaume-Unis																														
Masse d'eau		Socle et Crétacé Est BLKS_1100_GWL_25	Socle et Crétacé Ouest SS_1300_GWL_4	Socle et Crétacé en zone d'alimentation SS_1300_GWL_2	E080 Craies captives du Brabant		E160 Cambro-Silurien du Massif du Brabant														The Chalk of the Colne and Lee River Catchments																														
Lithologie		Grès, schistes, quartzites et craies	Grès, schistes, quartzites et craies	Grès, schistes, quartzites	Craies		Grès, schistes, quartzites		Craies						Grès						Craies																														
Contexte		Captif, <100km mer	Captif, <100km mer	Semi-captif, <100km mer	Captif, >100km mer		Semi-Captif, >100km mer		Captif <100 km mer						Captif <100 km mer						Captif <100 km mer																														
Nb stations					17		21		72						1						2					21																									
Paramètres		P90		P90		P90		moyenne		P90		moyenne		P90		min		max		moyenne		P25		P50		P75		Valeur		min		max		moyenne		P25		P50		P75		min		max		P50		moyenne		P97.7	
Ca	mg/L	120	62	110	119.7		101.5		10.6	188	109.7	80.5	115.5	148	70	41.4	44.6	43	41.4	43	44.6	17	204	93.2	88	169																									
Na	mg/L	180	920	88	15.7		16.4		11.6	334	56.4	22.4	35.7	63.6	11.4	50.7	57	53.85	50.7	53.85	57	8	569	83	115	460																									
Mg	mg/L	27	11	27	14.3		13.7		3.4	41.1	19.3	12.2	17.3	26.3	3	18.5	20	19.25	18.5	19.25	20	3.9	113	24	27.8	82.7																									
K	mg/L	19	24	22	3.06		2.51		1.5	26.2	10.7	4.7	9.8	15.6	1.4	3.6	4.4	4	3.6	4	4.4	2	28.5	9.2	10.2	25.1																									
NH4	mg/L	0.81	1.3	0.52	0.05	0.11	0.03	0.16	0.1	1.8	0.3	0.1	0.2	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.004	1.66	0.24	0.408	1.37																									
Cl	mg/L	170	650	57	36.9	47.28	45.3	167.45	11	228	45.9	26.5	38.5	59	19	14.6	19.5	17.05	14.6	17.05	19.5	14	1250	40	119	764																									
HCO3	mg/L				338.2		212.6		282	525.8	409.1	371.5	410	455	207.4	287	292	289.5	287	289.5	292	256	447	323	325	442																									
SO4	mg/L	70	420	71	61.3	92.96	87.6	410.44	12	296	86.4	45	66	125	7.1	35.5	54.7	45.1	35.5	45.1	54.7	5	562	102	155	525																									
SiO2	mg/L				26.5		13.6		7.8	39	24.1	19	24	29	10.5	13.3	13.6	13.45	13.3	13.45	13.6																														
NO3	mg/L				15.8	46.25	15.9	14.16	0.5	9.7	1.8	0.5	0.5	1.3	6.3	1	1	1	1	1	1	<0.01	2.18	0.1	0.265	1.867																									
Al total	µg/L				52		62																																												
Al dissous	µg/L		100																																																
As total	µg/L				1.14		3.09		5	5	5	5	5	5																																					
As dissous	µg/L	6	20	6																																															
B total	µg/L				70.93		85.93		21	390	167.8	43	115	370																																					
B dissous	µg/L	710	3600	660																																															
Ba total	µg/L				115.7		44																																												
Cd total	µg/L					0.07	0.2																																												
Cd dissous	µg/L																																																		
Cr total	µg/L				1.01		3.56																																												
Cr dissous	µg/L																																																		
Cu total	µg/L				5.17		6.4		20	50	20.9	20	20	20		2	4	3	2	3	4																														
Cu dissous	µg/L		6																																																
F	µg/L	1000	6900	1700	130		110		100	3200	800	400	500	1000	370	460	480	470	460	470	480	0.4	37.1	2.05	4.63	27.7																									
Fe total	µg/L	1400	1100	1100	456	1735.76	647	2887.28	20	5400	365.4	50	165	345		34	62	48	34	48	62	9	1280	140	234	1007																									
Fe dissous	µg/L																																																		
Mn total	µg/L				29				20	170	24.9	20	20	20																																					
Mn dissous	µg/L	80	110	90	151.44	402	833.09	20	20	20	20	20	20		5	5	5	5	5	5	5	3	40	6	13.8	37.7																									
Ni total	µg/L				2.81		13.38		5	8	5.4	5	5	5																																					
Ni dissous	µg/L		8																																																
Pb total	µg/L				0.49		1.04		10	33	10.4	10	10	10		5	10	7.5	5	7.5	10																														
Pb dissous	µg/L																																																		
Zn total	µg/L				50.94		89.23		50	120	51.3	50	50	50	35	100	100	100	100	100	100																														
Zn dissous	µg/L	26	27	17																																															

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

Pays/ Région	Belgique : Région Bruxelloise																					
Masse d'eau	Sables du Landénien BR03							Sables yprésiens (région des collines) BR04							Sables du Bruxellien BR05							
Lithologie	Sables et argiles							Sables							Sables							
Contexte	Captif, ± 100km mer							Libre (localement captif), ± 100km mer							Libre (localement captif), ± 100km mer							
Nb stations	13							4							49							
Paramètres	unité	min	max	moyenne	P25	P50	P75	P90	min	max	moyenne	P25	P50	P75	P90	min	max	moyenne	P25	P50	P75	P90
Ca	mg/L	7	160	85.7	77	101.0	105.3	107.4	103	173	146.4	131	148.5	159.8	161.9	<2	312.6	155.05	124.3	151	180	202.7
Na	mg/L	7.2	220.02	52.7	8.3	9.0	124.7	181.98	7.5	32.6	15.3	9.225	16.4	18.3	19.04	7.3	137.3	24.56	12.3	22.6	31.7	36.6
Mg	mg/L	2.2	42.7	18.9	18	19.1	21.7	29.05	19	28.9	23.2	20	23.5	25.2	25.4	1.52	37.78	18.46	14.1	18.6	23.2	26.7
K	mg/L	5.4	28.2	12.3	8.5	9.2	13.1	22.71	1.3	20.4	3.9	1.725	3.0	5.0	5.3	0.7	9.5	2.01	1	1.4	2.155	4.8
NH4	mg/L	<0.05	1.1	0.23	0.12	0.24	0.3	0.37	<0,05	0.23	0.06	0.025	0.03	0.1	0.13	<0.05	2.53	0.086	0.025	0.025	0.025	0.06
Cl	mg/L	8.4	224.6	47.9	11.55	13.0	67.9	155.3	11.8	68.8	46.6	30.3	51.2	58.8	61.4	8.4	192.2	52.0	24.3	49.1	66.9	93.474
HCO3	mg/L	219	502.3	362.6	305.4	402.8	413.6	425.6	345.1	486	374.8	353.7	356.2	399.3	404.8	218.62	516.06	364.1	336.1	359.2	394.6	414.6
SO4	mg/L	9.5	329.6	42.1	15.5	18.0	26.5	123.8	5.7	145.8	100.7	60.8	112.7	131.5	139.5	3	409	100.6	56.0	78.3	115.9	163.2
SiO2	mg/L	14.7	14.7	29.6	30	32	33.5	35														
NO3	mg/L	<0.05	4.3	0.7	0.3	0.50	1.0	1.25	<1	56.3	23.6	0.6	30.47	36.5	39.4	<0,09	203.26	41.8	13.1	38.25	59.2	85.0
Al total	µg/L	<1	28	6.9	1.3	2	5	9.5	<1	275.8	54.1	1.7	5	90.5	182.0	<0,1	273.87	8.2	1	2	5	10.8
Al dissous	µg/L																					
As total	µg/L	<1	<20	1.4	0.5	0.5	0.5	5	<0,5	4.4	0.8	0.5	0.5	0.5	1	<0,5	18.2	0.9	0.5	0.5	0.5	1.7
As dissous	µg/L																					
B total	µg/L	42.79	807	263.0	62.75	125.5	472.3	666.3	10	38	22.3	17.5	22	27.5	30.4	<5	139	37.2	12.68	26.01	56.4	77.4
B dissous	µg/L																					
Ba	µg/L	1.7	46.4	19.6	11.1	15	25.4	35.6	5.6	36.1	12.7	9.9	10.75	12.65	14.45	1	91.88	33.1	13.1	35.8	50.6	59.1
Cd total	µg/L	<0.1	0.2	0.1	0.05	0.05	0.05	0.25	<0,1	0.7	0.1	0.05	0.05	0.05	0.33	<0,1	0.9	0.089	0.05	0.05	0.05	0.2
Cd dissous	µg/L	<0.1	<0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	<0,1	0,1	0.055	0.05	0.05	0.05	0.055	<0,1	1	0.36	0.15	0.2	0.5	0.81
Cr total	µg/L	<0.5	<2	0.7	0.25	1	1	1	<0,5	2.7	1.1	1	1	1	1.69	0.9	8.74	1.4	1	1	1.3	2.245
Cr dissous	µg/L																					
Cu total	µg/L	<1	22	1.5	0.5	1	1	2.2	<2	32	5.6	2	3.5	6.5	10.7	<1	66.62	5.7	1	1	4.8	14.9
Cu dissous	µg/L																					
F	µg/L	39	854	215.7	75.8	99.5	255.3	703.7	115	531	212.7	179.9	197.3	224.3	236.6	53	340	129.4	108.5	125	143	166.4
Fe total	µg/L	3	1081.7	438.8	183.4	416.0	634.8	750.0	<5,0	5664.8	597.4	17.8	29.7	869.9	1085.5	<5	26100	685.5	4.4	16.4	81.1	1374.7
Fe dissous	µg/L																					
Mn total	µg/L	1.5	171.4	73.0	50.325	81	95.0	119.6	7.2	332.6	37.5	17.575	22.1	28.9	38.02	<0.5	1080	25.7	0.5	1.1	4.9	25.54
Mn dissous	µg/L																					
Ni total	µg/L	<1	47	1.5	0.5	1	1	2.5	<1	4	1.4	1	1	1	2.9	<1	113	5.7	1	1	4	12
Ni dissous	µg/L	<1	11	1.0	0.5	1	1	1	<1	1.14	1.0	1	1	1	1	<1	108	5.0	1	1	3.5	10.3
Pb total	µg/L	<0.1	5.3	1.0	0.05	0.2	0.75	2.5	0.2	21.7	1.9	0.4	0.6	1.05	2.44	<0.1	52.14	1.1	0.1	0.2	0.75	2.5
Pb dissous	µg/L	<0.1	1.2	0.1	0.05	0.05	0.05	0.1	<0.1	0.5	0.2	0.05	0.2	0.22	0.4	<0.1	1.5	0.2	0.05	0.05	0.2	0.5
Zn total	µg/L	<2	311	38.0	4	15.0	31.9	77.6	8	3245	428.5	58.5	203.3	364.8	1143.7	<2	5206	75.2	4.6	11	28.2	79.9
Zn dissous	µg/L																					

Tableau 2-6 : Teneurs en éléments majeurs et mineurs dans les masses d'eau BR03, BR04 et BR05

Pays/ Région		Belgique : Région Bruxelloise													
Masse d'eau		Socle et Crétacé BR01							Socle en zone d'alimentation BR02						
Lithologie		Grès, schistes, quartzites et craies							Grès, schistes, quartzites						
Contexte		Captif, ± 100km mer							Captif, ± 100km mer						
Nb stations		9							4						
Paramètres	unité	min	max	moyenne	P25	P50	P75	P90	min	max	moyenne	P25	P50	P75	P90
Ca	mg/L	15	114	38.1	31	35	43.75	51	29	163.6	66.1	55	57	70.3	83.8
Na	mg/L	11.4	335.7	87.2	41	48.2	105	212.3	7	53.7	45.4	37.0	47.7	51.4	52.6
Mg	mg/L	4.2	27.7	17.9	16	17	21.3	24.3	8.5	24.8	21.9	21.8	23.3	24.0	24.3
K	mg/L	1.8	28	15.9	14.5	15.9	17.25	18.8	1.1	30.1	17.5	9.95	14.2	28.7	29.3
NH4	mg/L	<0.05	0.58	0.36	0.2	0.28	0.33	0.43	<0.05	0.53	0.16	0.1	0.13	0.2	0.23
Cl	mg/L	10.8	491.3	129.6	45	97.5	133	313.8	9.2	67.1	30.0	10	22	46.4	56.5
HCO3	mg/L	135.4	440.2	236.0	222.8	228.4	238.5	273.8	149.1	455.2	377.7	321.4	370.8	447	451.2
SO4	mg/L	10.6	133.4	20.8	17.5	18.6	21	25	<2	88.3	18.2	3.2	16.1	23.1	26.6
SiO2	mg/L	8	8	16.8	17	18	19	19							
NO3	mg/L	<0.05	18.1	0.98	0.25	1	1.05	1.25	<0.05	63.2	4.9	0.8	1	1.1	1.9
Al total	µg/L	<1	25	9.7	1.0075	2.845	7.1	10.95	<1	59	6.3	1.35	3.1	5.55	8.8
Al dissous	µg/L														
As total	µg/L	<0.5	3.4	2.8	0.5	1.23	2.5	5	<0.5	<5	0.56	0.5	0.5	0.5	0.5
As dissous	µg/L														
B total	µg/L	19	682	409.9	309	343	530	633.5	35	316	193.3	117.1	151	301	307
B dissous	µg/L														
Ba total	µg/L	13.7	171.2	101.6	84	96.6	129.6	150.8	10.3	151.5	79.6	31.7	68.2	130.7	140.1
Cd total	µg/L	<0.1	0.11	0.24	0.05	0.05	0.09	0.5	<0.1	0.4	0.07	0.05	0.05	0.05	0.08
Cd dissous	µg/L	<0.1	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	<0.1	<0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Cr total	µg/L	<0.5	<2	0.82	0.25	0.8	1	1	<0.5	2.2	0.9	1	1	1	1
Cr dissous	µg/L														
Cu total	µg/L	<1	5	1.1	0.5	1	1	2.06	<1	28	4.0	1	1	4.5	11.4
Cu dissous	µg/L														
F	µg/L	78	361	238.2	204	257	292	313.8	67	240	131.9	93.5	118.9	175.8	196.6
Fe total	µg/L	<5	2080.1	322.5	110.2	156.8	202.7	572.75	<5	6558.9	901.1	234.05	394.9	1033.5	1924.4
Fe dissous	µg/L														
Mn total	µg/L	<1	120.6	66.3	27	36	56.6	85.3	<0.5	462	59.4	19.2	29.7	58.3	129.7
Mn dissous	µg/L														
Ni total	µg/L	<1	9	2.1	0.5	1	2.43	3	<1	7	1.3	1	1	1	2.5
Ni dissous	µg/L	<1	12	1.3	0.5	1	1	2	<1	3	0.96	0.5	1	1	1.09
Pb total	µg/L	<0.1	0.2	1.4	0.185	0.3	1.925	2.75	<0.1	<0.3	0.94	0.13	0.3	1	2.5
Pb dissous	µg/L	<0.1	2.2	0.06	0.05	0.05	0.05	0.085	<0.1	8	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05
Zn total	µg/L	2	804	151.9	8	25.5	133.8	314	<2	516	101.3	22	60	121.7	223.4
Zn dissous	µg/L														

Tableau 2-7 : Teneurs s en éléments majeurs et mineurs dans les masses d'eau BR01 et BR02

2.2. Descriptions des processus géochimiques susceptibles d'affecter les masses d'eaux étudiées

La signature géochimique d'un aquifère est affectée par de nombreux processus qu'il est souvent difficile de distinguer et de quantifier. Pour certains éléments, l'apport d'eau atmosphérique peut notamment être important, puis une fois à la surface du sol, la composition de l'eau évolue suite à des réactions biochimiques dans le sol, puis dans la zone non saturée et enfin dans la zone saturée. Les différents processus pouvant affecter la composition chimique de l'eau sont décrits brièvement dans les points suivants et sont représentés à la figure 2-1.

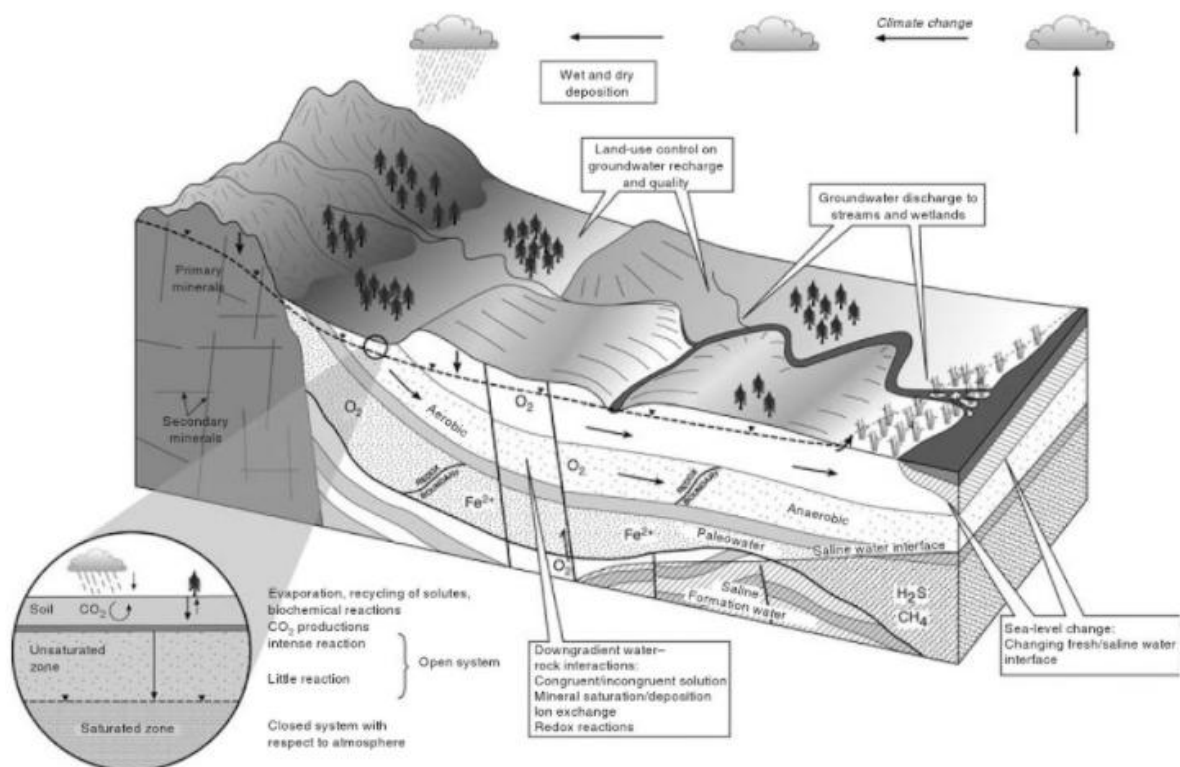


Figure 2-1 : Principaux processus affectant l'évolution de la concentration de référence de l'eau souterraine (Edmunds and Shand, 2008)

2.2.1. Apports Atmosphériques

L'eau de pluie constitue un premier apport en éléments dissous pour étudier l'évolution de la chimie de l'eau souterraine. Il faut aussi noter que certains solutés peuvent provenir de dépôts atmosphériques secs. L'eau de pluie provient principalement des océans et transporte des aérosols principalement composés de Na et Cl et ainsi que d'autres halogènes (I, Br). La chimie de l'eau de pluie varie donc fortement en fonction de la distance à la côte avec des eaux enrichies à proximité de la mer et de plus en plus appauvries dans le continent.

La Région de Bruxelles-Capitale est située à environ 100 km du littoral. A cette distance, les apports via les aérosols peuvent probablement avoir encore un impact sur la teneur en halogènes.

Suite à la dissolution du CO₂ atmosphérique, l'eau de pluie est naturellement acide, avec un pH d'environ 5,6. Elle est également en équilibre avec l'oxygène atmosphérique, avec une concentration en oxygène dissous d'environ 8 à 12 mg/L.

A proximité du sol, l'évapotranspiration peut également jouer un rôle en augmentant la concentration des éléments dissous de l'eau qui servira à la recharge de la nappe.

2.2.2. Modification de la concentration en oxygène et en CO₂ dissous

L'eau de pluie qui s'infiltré dans le sol va subir d'importants changements de pH et de composition chimique. La pression en CO₂ dissous augmente entre 10 et 100 fois par rapport à la pression atmosphérique à cause de la respiration des racines et de la décomposition de la matière organique. L'oxygène va également être consommé par la dégradation de cette même matière organique. L'équation suivante donne un exemple de l'oxydation de la matière organique (ici il s'agit du méthane):

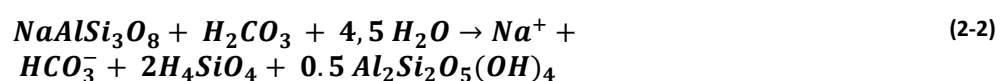


Cette pression élevée en CO₂ est à l'origine d'une eau avec un pH acide qui va contrôler l'altération des minéraux carbonatés. Les réactions d'altération, de sorption et les réactions redox vont également affecter la composition chimique de l'eau. Les principales réactions dans le sol sont : l'altération des silicates, la dissolution des roches carbonatées et les interactions avec la matière organique. Les réactions entre l'eau souterraine et la phase solide se poursuivent ensuite dans la zone non saturée et la zone saturée. La solubilité ainsi que la cinétique de la dissolution des minéraux peuvent être très variables d'un minéral à l'autre. La composition chimique de l'eau souterraine va donc être dominée par des réactions impliquant des minéraux très réactifs, principalement les carbonates et les évaporites lorsque ceux-ci sont présents.

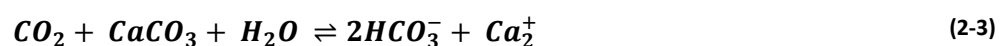
2.2.3. Précipitation et dissolution de minéraux

Les réactions de dissolution et de précipitation sont souvent les réactions chimiques les plus importantes qui contrôlent la minéralisation de l'eau souterraine. Il s'agit principalement des réactions de dissolution des carbonates et d'altération des silicates. Quelques réactions de dissolution sont présentées ci-dessous :

Altération de la roche primaire (albite) qui forme des argiles et libère des solutés :



Dissolution de la calcite :



Ce sont toutes des réactions d'hydrolyse qui consomment du CO₂ (ou du H₂CO₃), ce qui va augmenter le pH des eaux souterraines. Dans le cas de l'altération des silicates, un minéral instable (comme l'albite) formé dans des conditions de hautes pressions et températures (minéral primaire), réagit avec l'acide carbonique pour former un minéral plus stable tel que la kaolinite (minéral secondaire) dans l'équation 2-2. Ce processus libère également des cations, de la silice et des bicarbonates. L'altération des silicates est la principale source de silice dans les eaux souterraines contrairement au quartz ou aux autres formes de la silice qui sont inertes. Les réactions impliquant les minéraux carbonatés sont beaucoup plus rapides que celles liées à l'altération des silicates qui sont généralement lentes et irréversibles.

L'équation de dissolution de la calcite est présentée à l'équation 2-3. La réaction de dissolution de la calcite est complète et continue jusqu'à la saturation et la solubilité de la calcite augmente avec la pression en CO₂. Dans les eaux souterraines la présence de bicarbonate joue le rôle de tampon, la dissolution des minéraux carbonatés permet de neutraliser l'acidité des eaux.

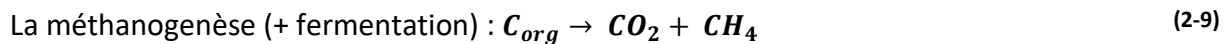
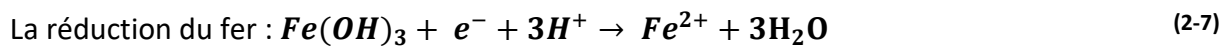
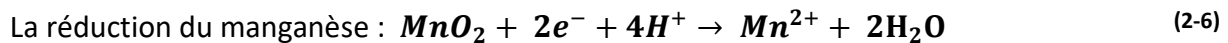
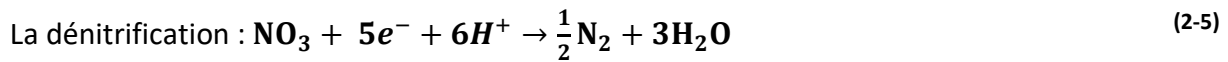
Les masses d'eau souterraine de la Région de Bruxelles-Capitales sont de natures sableuse, crayeuse et schisto-gréseuse. Dans chacune de ces masses d'eau, la concentration en Ca²⁺ peut dépasser la centaine de mg/L. Même dans les formations où il y a très peu de carbonate, la concentration en Ca²⁺ peut être élevée parce que la calcite est très réactive. Dans les formations sableuses bruxelloises, certains bancs de calcaire, mais aussi certains bancs sableux à ciment carbonaté peuvent être à l'origine de teneurs importantes en Ca²⁺.

2.2.4. Réactions d'oxydo-réduction

Les réactions d'oxydo-réduction ont un impact significatif sur la géochimie de l'eau souterraine. Elles affectent la concentration et la spéciation de nombreux éléments : l'oxygène dissous, le carbone organique, le soufre, l'azote, le fer, le manganèse et un certain nombre d'éléments en trace. C'est principalement l'oxydation de la matière organique qui va influencer les réactions d'oxydo-réduction. La matière organique peut être présente naturellement dans le milieu sous forme solide ou dissoute mais peut aussi être amené par une pollution avec des composants organiques.

Les réactions d'oxydo-réduction suivent une séquence type (figure 2-2). Cette séquence commence par la consommation de O₂, puis la réduction du NO₃, la réduction du Mn (IV) et celle du Fe (III). En conditions très réductrices, il peut également y avoir la réduction de SO₄ en S²⁻ et la production de méthane (CH₄) par fermentation et méthanogenèse. Ces réactions sont généralement initiées et accélérées par l'activité microbienne. Les principales équations de réductions intervenant dans le processus d'oxydations de la matière organique sont les suivantes :





En parallèle à ces réactions de réduction la matière organique est dégradée via la réaction d'oxydation :



La dégradation de la matière organique produit du CO_2 , ce qui diminue le pH de l'eau et favorise les réactions d'altération et de dissolution des roches décrites au point précédent.

Dans la zone de recharge, où les aquifères sont libres, les conditions sont généralement oxydantes et au fur et à mesure que l'aquifère devient captif, les conditions deviennent de plus en plus réductrices. Des conditions réductrices sont d'autant plus vite atteintes que la matière organique est présente en grande quantité, ainsi qu'en présence de polluants qui, en se dégradant, consomment les éléments oxydants (O_2 , NO_3 ,...).

Les réactions d'oxydo-réduction contrôlent également la spéciation de certains éléments traces, notamment As(III)/As(V), Cr(III)/Cr(VI), Se(IV)/Se(VI) and U(IV)/U(VI), et donc leur solubilité dans l'eau et leur mobilité. Ces éléments peuvent également être toxiques ou non en fonction de leur spéciation.

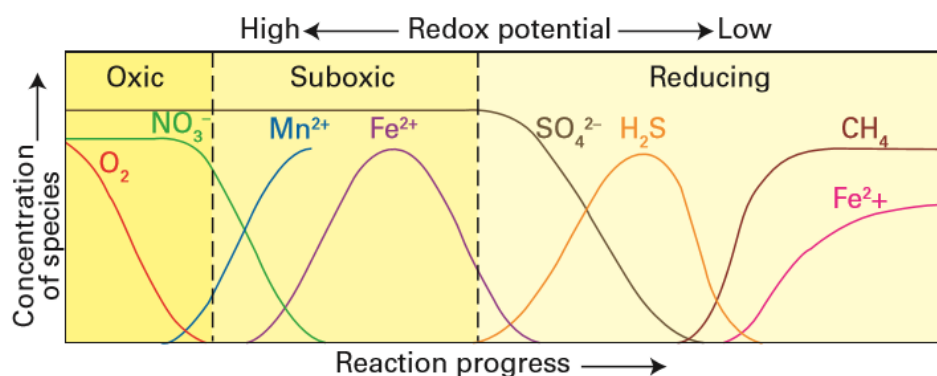


Figure 2-2 : Séquence des réactions d'oxydo-réduction (Shand et al, 2007)

Les masses d'eau souterraines étudiées, celle du Landénien et celle du Socle et du Crétacé, sont captives en Région de Bruxelles-Capitale. Il est donc probable que les conditions soient suboxiques voire réductrices. Les concentrations en oxygène dissous et en nitrate seront donc probablement faibles tandis que les concentrations en fer et manganèse pourront a priori y être assez élevées. Si les conditions sont fortement réductrices, la réduction des sulfates pourrait également être observée.

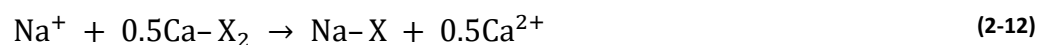
2.2.5. Echanges ioniques et sorption/désorption

Les phénomènes de sorption/désorption et d'échanges ioniques impliquent le partitionnement et l'échange de certains éléments chimiques entre la phase solide et la phase aqueuse. La sorption indique une fixation d'un ion sur un solide tandis que la désorption indique la libération de cet ion dans la phase aqueuse. Un échange ionique implique une substitution entre un ion et un autre ion à la surface du solide.

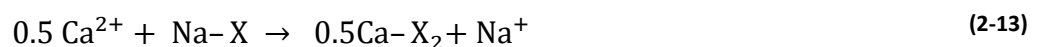
Dans le milieu souterrain, il existe de nombreux sites avec un potentiel d'adsorption mais ceux avec la plus grande capacité d'échange ionique sont les minéraux argileux, la matière organique et les oxydes/hydroxydes. Les processus d'échanges ioniques concernent principalement les cations mais il peut également y avoir des échanges ioniques avec les anions. Ces processus dépendent du pH : en cas de pH acide, les sites d'adsorption sont occupés par les ions H^+ et les cations (notamment les métaux) se retrouvent dans la phase aqueuse. Il y a également une sélectivité dans les échanges ioniques, les cations avec la charge la plus élevée et le rayon effectif le plus grand sont ceux qui s'adsorbent en priorité. Pour les cations les plus communs dans les eaux souterraines, l'ordre d'échangeabilité est le généralement le suivant (Edmunds and Shand, 2008) :



Les processus d'échanges ioniques sont importants lors des intrusions salines ou des processus de rafraîchissement (déplacement d'eau saline par de l'eau douce). Dans les eaux douces, l'eau est généralement de type $Ca-HCO_3$. Les sites d'adsorption sont donc dominés par des ions Ca^{2+} . Quand il y a une intrusion d'eau salée, le Ca^{2+} est remplacé par du Na^+ suivant l'équation 2-12:



L'eau passe alors de type $Na-Cl$ à un type $Ca-Cl_2$. Le processus inverse se produit quand de l'eau douce remplace une eau salée :



Dans ce cas, l'eau passe d'un type $Ca-HCO_3$ à un type $Na-HCO_3$. Comme de nombreux aquifères ont une origine sédimentaire marine, ce processus est assez fréquent et s'observe encore longtemps après le passage de l'aquifère dans l'environnement terrestre.

2.2.6. Activités anthropiques

Les activités humaines peuvent impacter la qualité de l'eau souterraine par de nombreuses manières. La pollution peut avoir un impact sur les apports atmosphériques. Les gaz tels que NO_x , SO_2 et NH_3 émis principalement par les industries et un peu par l'agriculture, peuvent réagir avec d'autres composés pour produire des pluies acides. Les émissions industrielles peuvent également amener de nombreux autres solutés dans les eaux de pluie comme les halogènes ou d'autres éléments en trace.

La pollution a le plus souvent lieu à la surface du sol, ou à faible profondeur, et est souvent liée à l'occupation du sol. L'agriculture moderne est à l'origine de pollutions diffuses avec des apports de nutriments (N, P and K), d'autres ions majeurs (SO₄, Cl) et des pesticides. Les effluents agricoles et domestiques (puits perdus, fosses septiques, égouts ...) peuvent également être à l'origine de pollutions ponctuelles comme N, Cl, P, bactéries, carbone organique. Les industries peuvent émettre des rejets locaux d'hydrocarbures, de solvants chlorés, de métaux lourds ... Les infrastructures de transports peuvent être la source de polluants inorganiques comme le Na et le Cl à cause du salage des routes, les pesticides ou des polluants organiques comme l'essence, le diesel et leurs additifs (benzène, MTBE...).

La pollution peut également avoir lieu directement dans le milieu souterrain. Dans des milieux très urbanisés comme la Région de Bruxelles-Capitale, il y a de nombreux ouvrages de prélèvements d'eau souterraine qui constituent des points de contact entre la nappe et la surface. Si ces puits ne sont pas protégés correctement, l'introduction de substances polluantes par rejets directs dans les ouvrages de prélèvements peut contaminer les eaux souterraines.

La pollution peut aussi être provoquée de manière indirecte. Par exemple, un surpompage peut entraîner un rabattement de la nappe qui la fait passer de conditions captives à des conditions libres et changer les conditions d'oxydo-réduction prévalant au sein de l'aquifère. Il peut y avoir notamment une oxydation des sulfures, ce qui a pour conséquence la libération de nombreux éléments trace notamment des métaux. Un surpompage peut aussi attirer des eaux avec une signature différente. Par exemple, à proximité du littoral, le surpompage peut provoquer une intrusion d'eau marine.

Dans la région de Bruxelles-Capitale, toutes les sources de pollution citées ci-dessus sont susceptibles d'être présentes et peuvent potentiellement amener à la contamination des masses d'eau souterraines. Néanmoins les masses d'eau du Landénien et du Socle et Crétacé sont captives et sont donc a priori moins susceptibles d'être polluées que les masses d'eau sus-jacentes.

2.2.7. Processus de drainance

La drainance désigne un flux entre deux aquifères séparés par une couche peu perméable. Pour évaluer l'impact d'un flux entrant sur un aquifère, il faut identifier l'origine du flux et ses caractéristiques chimiques. L'eau de l'aquifère impacté par ce phénomène de drainance est alors un mélange entre une eau résultant des interactions avec l'encaissant et une eau en provenance de l'autre aquifère (Chery, 2006). Pour mettre en évidence le phénomène de drainance, certains marqueurs peuvent être utilisés. Des éléments majeurs ou en traces peuvent être caractéristiques de certaines lithologies ou contextes hydrogéologiques. Par exemple, la présence de nitrate dans des eaux profondes peut indiquer un mélange avec les eaux superficielles. Les isotopes stables peuvent également être utilisés car chaque aquifère possède sa propre signature isotopique. Les isotopes radioactifs peuvent aussi servir à dater les différents aquifères et à mettre des mélanges en évidence. L'utilisation des isotopes

stables et radioactifs sera décrite de manière plus détaillée dans le chapitre 6 sur les recommandations.

2.2.8. Intrusion d'eau salée et rafraichissement

Les masses d'eau souterraine du Landénien (BR03) et du Socle et Crétacé (BR01) présentent des concentrations en Na et Cl très élevées. Cette salinité pourrait avoir plusieurs origines. Les principaux processus à l'origine d'une salinité élevée sont : l'intrusion marine, le mélange avec des saumures anciennes et de la dissolution d'évaporites. A ces processus naturels peuvent s'ajouter aussi des sources anthropiques.

L'intrusion saline affecte de nombreux aquifères côtiers. Il y a un équilibre entre les eaux douces et les eaux marines, conditionné principalement par la différence de densité entre ces deux eaux. Dans la zone d'intersection, il y a généralement une zone de mélange peu épaisse et de géométrie variable. Une surexploitation des aquifères côtiers peut entraîner une rupture de cet équilibre et conduire à un déplacement et une dispersion de cette zone de mélange. Les échanges ioniques qui ont lieu lors d'une intrusion saline ont été décrits précédemment.

La salinisation des nappes peut provenir du contact de l'aquifère avec des saumures anciennes. Ces eaux salées sont préservées dans des aquifères qui échangent peu avec les eaux de surface (aquifères profonds, captifs, peu perméables). Il s'agit le plus souvent d'eaux marines résiduelles fortement concentrées en sels, formées suite à l'évaporation d'une eau de mer ancienne. Ces eaux salées peuvent subir un phénomène de rafraichissement. Ce phénomène a déjà été décrit précédemment.

2.2.9. Dissolution d'évaporites

La dissolution d'évaporites constitue également une source fréquente de salinité dans les aquifères. La halite et le gypse sont les minéraux évaporitiques les plus souvent impliqués dans les cas de salinisation par une réaction eau-roche. La dissolution de la halite se traduit par une augmentation de la concentration en Cl^- et en Na^+ tandis que la dissolution du gypse conduit à une augmentation du Ca^{2+} et du SO_4^{2-} .

3. Matériels et méthodes

3.1. Détermination des valeurs de référence des masses d'eau souterraines du Socle et du Crétacé (BR01) et du Landénien (BR03)

La méthodologie appliquée dans cette étude se base sur les projets européens FP6 BRIDGE (Müller, 2006) et BaSeLiNe (Edmunds and Shand, 2008). Ces deux projets européens se sont penchés sur les méthodologies pour déterminer les concentrations de référence des eaux souterraines.

Plusieurs méthodologies sont envisageables en fonction du niveau de connaissance de l'aquifère. Elles sont illustrées à la figure 3-1. Si l'aquifère est assez peu connu et qu'il n'y a pas 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 avec une typologie semblable. Dans le cas d'un aquifère pour lequel il existe des données de monitoring mais avec niveau moyen de connaissance (cas de figure n°2), il est possible de déterminer des concentrations de référence sur base d'une méthode simplifiée de pré-sélection. 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 déterminée spécialement pour l'aquifère étudié. Pour les masses d'eau du Landénien (BR03) et du Socle et du Crétacé (Br01), on se situe plutôt dans le cas de figure n°2, avec des données disponibles mais une connaissance moyenne de l'aquifère

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 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, Sb.

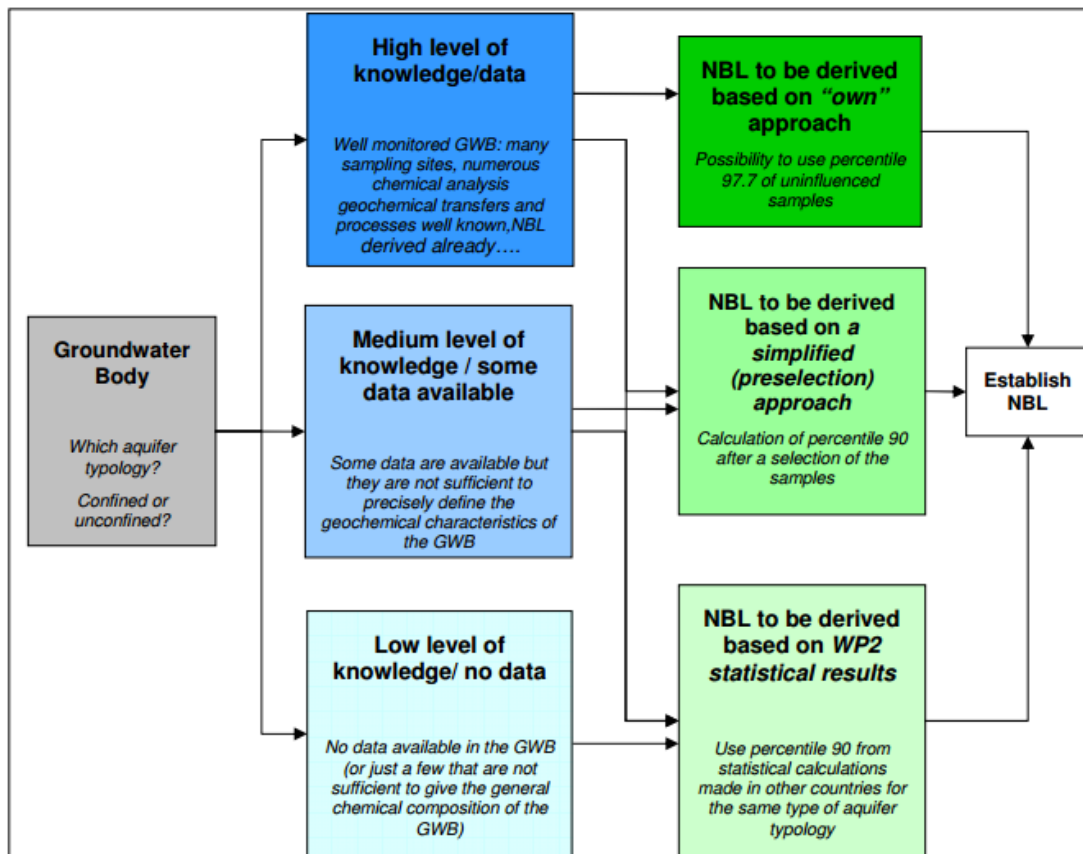


Figure 3-1 : Méthodologie pour la détermination des concentrations de référence proposée par le projet Bridge (Müller, 2006)

La méthode simplifiée de présélection est basée sur l'exclusion de certains échantillons avec des indicateurs de pression anthropique supérieurs à certaines valeurs. Ces indicateurs peuvent être des polluants organiques, mais aussi certains polluants inorganiques en concentration élevée, par exemple : NO_3 , K, Cl, Na, NH_4 . 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 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 que les échantillons potentiellement contaminés ont été enlevés du jeu de données, les concentrations de référence peuvent être déterminées sur une méthode statistique classique. Habituellement, c'est le percentile 90 qui est choisi comme valeur de référence mais si l'aquifère est bien défini et sans influence anthropique, le percentile 97.7 peut être utilisé.

Pour les éléments qui sont inférieurs 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.

D'autres recommandations sont également données par le projet BRIDGE. Par exemple, il est prudent d'exclure les échantillons avec une erreur sur la balance ionique excédant 10%. Dans ce présent travail cette règle sera cependant un peu nuancée. Ce sera expliqué dans le point suivant. Il est également recommandé d'exclure des échantillons pour lesquels la profondeur de prélèvement est inconnue. Les aquifères salins doivent être étudiés séparément des autres aquifères. Il est préférable de séparer les échantillons des aquifères aérobies de ceux des aquifères anaérobies parce que les conditions, notamment d'oxydo-réduction ne sont pas les mêmes et donc les processus de minéralisation sont différents. Pour représenter une série temporelle de données pour une même station d'échantillonnage, il est plus judicieux d'utiliser la médiane, afin que 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 donnée.

Pour les masses d'eau du Landénien (BR03) et du Socle et du Crétacé (Br01), des données sont disponibles mais il a relativement peu de stations d'échantillonnage. 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. La méthodologie pour identifier les processus géochimiques est présentée dans le point suivant. Et enfin, les concentrations de référence seront calculées sur base du percentile 90 en sélectionnant les échantillons avec une signature chimique semblable.

3.2. Méthodologie mise en œuvre pour identifier les processus d'acquisition de la minéralisation des masses d'eau du Socle et du Crétacé et du Landénien

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

3.2.1. Présentation et vérification de la qualité des données

Les données hydrochimiques des masses d'eau BR03 et BR01 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 en tant que tel (la localisation des stations, le nombre de d'échantillonnage, les 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. Pour les points des masses d'eau souterraine de la Région de Bruxelles-Capitale, les informations concernant la profondeur des crépines seront recoupées avec le modèle numérique de terrain (Lidar) et le modèle stratigraphique. Il sera alors possible de connaître la lithologie de l'aquifère sollicité par la station d'échantillonnage et de vérifier s'il s'agit de la bonne masse d'eau souterraine.

Pour vérifier la qualité des données, la balance ionique* sera également calculée ainsi que le pourcentage de valeurs quantifiées par paramètre. Les limites de quantification des méthodes analytiques seront également comparées entre les 3 régions. Les valeurs inférieures à la limite de quantification seront traitées comme recommandé par le projet BRIDGE (Müller, 2006). La valeur utilisée sera celle de 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 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).

Un point sur la présence de polluants dans la nappe sera ensuite abordé pour identifier si certains points semblent a priori 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.

Pour clore ce chapitre sur la qualité des données, les analyses isotopiques de ^{14}C et de ^{36}Cl seront également analysées pour voir si elles sont pertinentes et exploitables.

3.2.2. 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 la masse d'eau souterraine BR03, la médiane sera calculée en ne conservant que les échantillons de ou postérieurs à l'année 2006. Le programme de surveillance a officiellement commencé en 2004 mais c'est à partir de 2006 qu'il est estimé être représentatif. Pour les échantillons contaminés, ils ont été traités de deux manières différentes. Dans le premier cas, si l'ensemble des échantillons de la station d'échantillonnage sont contaminés, alors ils sont conservés dans le calcul de la médiane et la station est considérée comme un marqueur de l'impact anthropique pour l'analyse des processus chimiques. Si lors de la suite de l'analyse, il est démontré que la pollution n'a pas

d'impact significatif sur la minéralisation, l'analyse pourra éventuellement être conservée pour le calcul des concentrations de référence. Dans le deuxième cas, si seulement 1 ou 2 échantillons de la station d'échantillonnage semblent contaminés, ceux-ci sont exclus du calcul de la médiane. La station est considérée comme a priori non contaminée. Elle est prise en compte dans l'analyse des processus chimiques et elle peut potentiellement être utilisée pour le calcul des concentrations de référence si les autres indicateurs de qualités sont assurés (balance ionique,...) et en fonction des conclusions de l'analyse des processus chimiques.

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. Les variations temporelles des paramètres et concentrations seront également étudiées. Des graphiques représentant l'évolution des paramètres en fonction du temps seront tracés. Une analyse de tendance sera également réalisée sur 3 paramètres présents en concentrations importantes dans les masses d'eau souterraine BR03 et BR01 : Cl, Fe, Mn. L'analyse de tendance sera réalisée par la méthode de régression de Mann-Kendall*.

Pour définir l'origine de la salinité, plusieurs méthodes seront appliquées : le calcul des rapports Na/Cl et Br/Cl*, le calcul des indices de saturation* de la calcite, de la halite et du gypse. Un graphe (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) en fonction de (Na+K)-Cl * sera également tracé pour mettre en évidence les échanges ioniques.

Une analyse statistique descriptive sera ensuite réalisée. Les paramètres statistiques de base seront calculés pour chaque masse d'eau souterraine à partir des médianes des paramètres de chaque station d'échantillonnage (en Région de Bruxelles-Capitale, wallonne et flamande). Il s'agit du minimum, de la moyenne, de la médiane, du percentile 25 (P25), du percentile 75 (P75), du percentile 90 (P90) et du maximum. La distribution des éléments sera étudiée avec l'aide d'histogrammes* et la différence entre les régions sera ensuite mise en évidence au moyen de boxplots*. Il serait peut-être plus adéquat d'étudier la distribution des données selon un découpage nappe libre/ nappe captive, plutôt que par les limites administratives mais avec les données disponibles, il n'est pas possible de classer les stations d'échantillonnage selon leur caractère libre ou captif. L'analyse multivariée permettra peut-être par la suite de dégager des groupes en fonction du caractère libre ou captif. Avant d'effectuer cette analyse multivariée, les coefficients de corrélations* seront également calculés pour mettre en évidence des relations entre des couples de variables.

Une analyse multivariée sera ensuite réalisée en utilisant la méthode des matrices auto-organisantes* (self-organizing maps – SOMs). L'analyse multivariée permettra 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 Landénien (BR03) et du Socle et du Crétacé (BR01), 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. Pour étudier la minéralisation globale, la technique de statistiques multivariées sera appliquée sur une sélection de 9 paramètres. Il s'agit de certains éléments majeurs (Cl, NO₃, Ca, K, Na, SO₄), le B et les rapports Na/Cl (molaire) et Br/Cl (massique). 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. Les rapports Na/Cl et Br/Cl donnent également des indications sur l'origine du Cl. Un rapport Na/Cl (molaire) inférieur à 0.86 ainsi qu'un rapport Br/Cl (massique) compris entre 5×10^{-4} et 3×10^{-3} correspondent généralement à une eau impactée par une pollution (Müller, 2006). Pour la nappe du Socle et du Crétacé, un paramètre tenant compte de la présence ou l'absence de craie a également été ajouté pour évaluer si la présence de craie a une influence sur la minéralisation. 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 et Br/C 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 les NO₃, Mn, SO₄, HCO₃ (potentiellement produits par ces réactions), le NH₄ et le TOC (carbone organique total) ainsi que les métaux pouvant être influencés par les conditions redox. Le fer n'a pas été inclus dans l'analyse parce que le fer total est mesuré en Région de Bruxelles-Capitale tandis qu'en Région flamande et en Région wallonne, il s'agit du fer dissous. Pour les autres métaux, il s'agit de la concentration totale. Les concentrations ont été exprimées en logarithme à cause de leur distribution asymétrique et le pH a été exprimé comme tel.

Une synthèse sera ensuite réalisée pour établir le modèle conceptuel de l'acquisition de la minéralisation.

3.3.3. 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 écarté 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, l'analyse sera conservée provisoirement et s'il n'y a ni polluants ni anomalie, les résultats de l'analyse pourront être conservés.

Diagramme de Piper

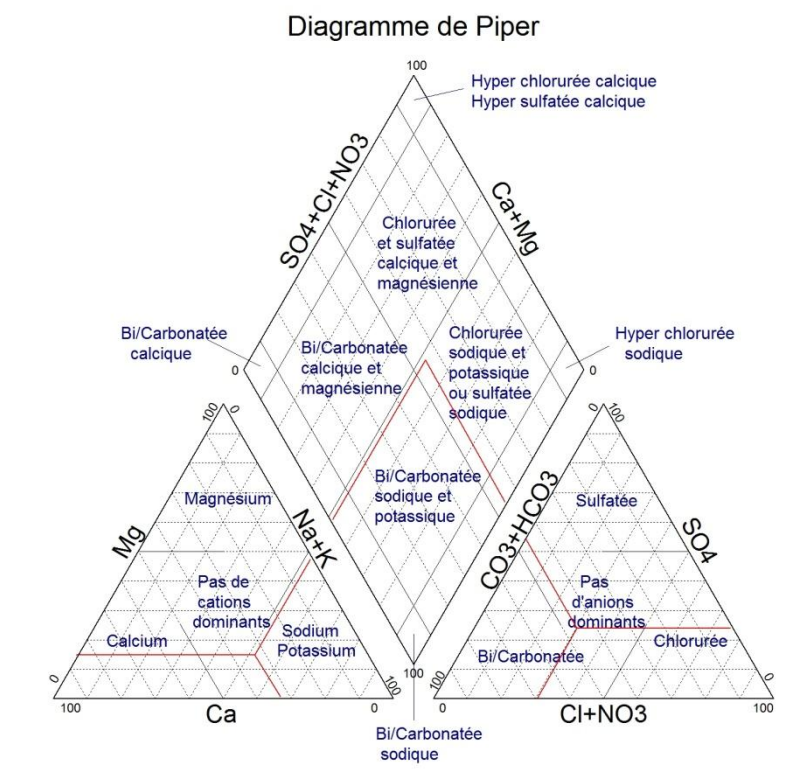


Figure 3-2 : Diagramme de Piper (Simler, 2013)

Le diagramme de Piper (Piper, 1944) permet d'établir le faciès hydrochimique des eaux étudiées (figure 3-2). Le logiciel « DIAGRAMMES » du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (Simler, 2013), permet de tracer des diagrammes de Piper. Les échantillons sont représentés sous forme d'un premier diagramme ternaire avec les principaux cations (Ca, Mg, Na, K), d'un deuxième diagramme ternaire avec les principaux anions (Cl, SO4, NO3, HCO3) et d'un losange des compositions qui regroupe l'ensemble des ions. Les échantillons sont représentés dans les différents graphes en fonction de leur concentration relative. 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 sulfaté sodique).

Analyse de tendance selon la méthode de régression de Mann-Kendall

Dans la directive fille 2006/118/CE, il est exigé que « les Etats membres identifient les tendances significatives à la hausse et durables des concentrations de polluants, groupes de polluants ou d'indicateurs de pollution observées dans les masses ou groupes de masses d'eau souterraine identifiés comme à risque ». Pour identifier cette tendance, la directive dit d'utiliser une méthode statistique, par exemple la technique de la régression, pour l'analyse des tendances temporelles dans des séries chronologiques de points de surveillance distincts mais elle ne recommande pas de méthode précise.

Dans ce travail, la méthode régression de Mann-Kendall a été sélectionnée. C'est une méthode non paramétrique, c'est-à-dire qu'elle peut être utilisée même si le jeu de donnée ne suit pas une distribution normale et si des outliers sont présents dans le jeu de données. Par contre, il est recommandé que le suivi d'une durée supérieure à 3 ans et un nombre d'échantillon supérieur à 10 (Lopez *et al*, 2011). Pour une étude sur l'analyse de tendance dans le bassin du Geer en Belgique, Batlle-Aguilar et al. (2007) recommandent même d'utiliser un jeu de donnée de minimum 20 échantillons répartis sur une durée d'au moins 10 ans. L'analyse statistique sera 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 tendance dans le jeu de donnée et l'hypothèse alternative est qu'il y a une tendance qui se dégage dans le jeu de donnée. 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, cela que quand la p-value est inférieure à 0.05, on peut rejeter l'hypothèse qu'il n'y a pas de tendance dans le jeu de donnée.

Rapport Na/Cl et Br/Cl

La salinité de l'eau souterraine peut avoir différentes origines et pour les mettre en évidence, il existe plusieurs techniques. Une des techniques les plus utilisées consiste à calculer le ratio Na/Cl et Br/Cl. Le Cl et le Br sont deux éléments conservateurs, ils sont donc peu affectés 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 0.85 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).

Le ratio massique Br/Cl de l'eau de mer est de 3.3×10^{-3} tandis que ce rapport est plus faible pour la halite ($< 5 \times 10^{-4}$) car seule une petite partie du Br est incorporé dans le minéral. Un rapport Br/Cl plus élevé que celui de l'eau de mer est souvent lié à des saumures. Et en cas de pollution le rapport massique Br/Cl est généralement inférieur à 2.2×10^{-3} (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).

Le graphique (Na+K)-Cl en fonction de (Ca+Mg)-(HCO3+SO4)

Le graphique (Na+K)-Cl en fonction de (Ca+Mg)-(HCO3+SO4), permet de mettre en évidence les échanges cationiques. Si le rapport (Na+K)-Cl est positif cela signifie qu'il y a un apport en Na et en K par rapport à la dissolution de la halite et si le rapport (Ca+Mg)-(HCO3+SO4) est positif cela signifie qu'il y a un apport en Ca et en Mg par rapport à la dissolution de la calcite, du gypse ou de la dolomite. S'il y a un échange cationique, les points tendent à s'aligner sur une droite de pente -1. Suivant la position sur le graphique, il est possible de dire s'il y a un remplacement du Na par du Ca ou l'inverse.

Histogramme

L'histogramme permet de visualiser la distribution d'une variable (figure 3-3). 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 de savoir la distribution de la donnée : normale, asymétrique,...

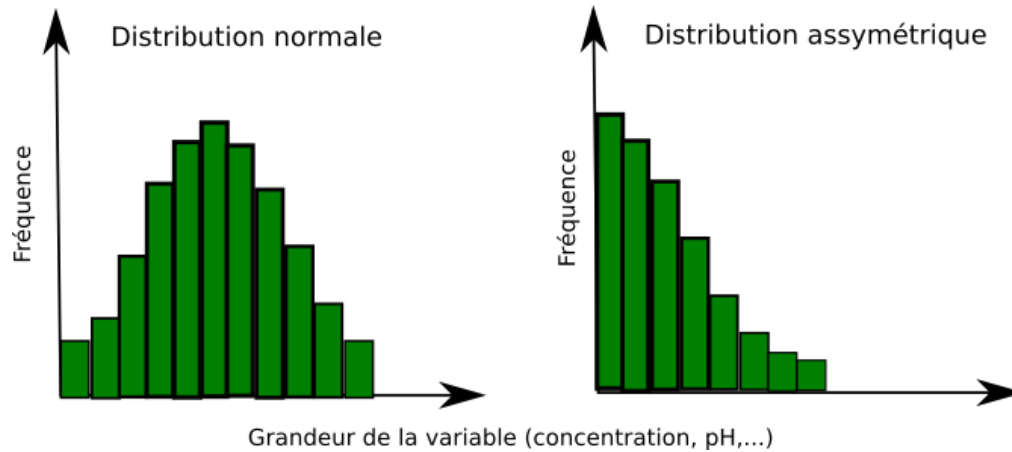


Figure 3-3 : Distribution et histogramme

Boxplot

Le boxplot se compose d'une boîte prolongée de part et d'autre par 2 moustaches (figure 3-4). La boîte s'étend du 1^{er} quartile (P25) au 3^{ème} quartile (P75) et contient donc la moitié des données. Les moustaches prolongent la boîte jusqu'au P10 et au P90. Le minimum, le maximum et la moyenne sont également représentés.

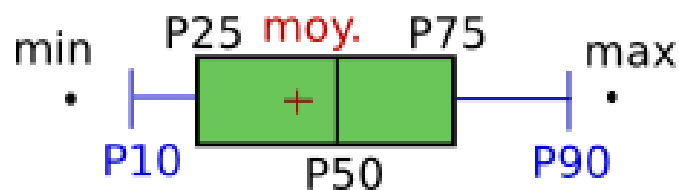


Figure 3-4 : Boxplot

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 coefficient qui dépendent de la distribution des 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.

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

L'application de statistiques multivariées 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 'mxn' de nœuds. Chaque échantillon est associé au nœud avec 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 (Ultsh et Hermann, 2005).

4. Analyse des données et résultats pour la masse d'eau du Landénien (BR03)

4.1. Présentation et vérifications de la qualité des données

4.1.1. Présentation de la masse d'eau souterraine du Landénien (BR03)

La masse d'eau souterraine du Landénien (BR03) s'étend sur l'entièreté de la Région de Bruxelles-Capitale (162 km²). Le Landénien est composé de la Formation de Hannut qui comprend elle-même deux membres : celui de Lincent et celui de Grandglise. Le premier membre est principalement argileux constitue la base de la masse d'eau et a une épaisseur moyenne de 20 m tandis que le second est principalement sableux avec quelques intercalations argileuses et son épaisseur est d'environ 8m. La masse d'eau du Landénien a son siège dans la formation de Grandglise. La masse d'eau du Landénien (BR03) est captive en Région de Bruxelles-capitale, en raison de la présence d'une couverture argileuse sur toute sa surface (Formation de Kortrijk (membre de Saint-Maur)).

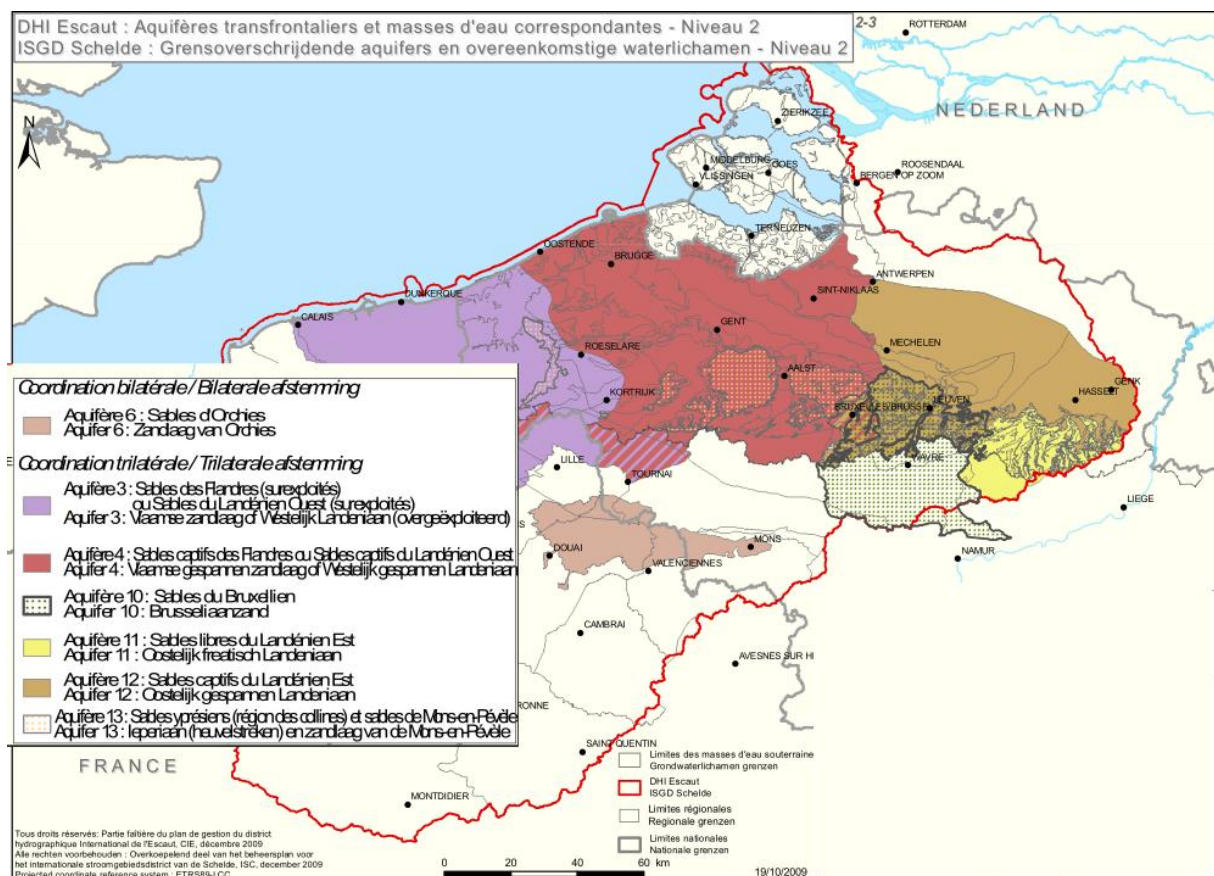


Figure 4-1: Aquifères transfrontaliers du Paléocène et de l'Eocène du bassin de l'Escaut (CIE, 2009)

La masse d'eau souterraine du Landénien (BR03) délimitée en Région de Bruxelles-Capitale présente des échanges par delà les frontières administratives régionales et fait partie d'aquifères transfrontaliers des sables captifs du Landénien Ouest (id 4) et des sables captifs du Landénien Est (id 12) du district hydrographique de l'Escaut. Ces deux aquifères se prolongent tous les deux en Flandre et en Wallonie.

Ceux-ci sont représentés à la figure 4-1. Le tableau A-1 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 figure en annexe.

Parmi les aquifères du Landénien du district de l'Escaut, il y a également les Sables libres du Landénien Est (id 11), les sables d'Orchies (id 6) et les sables des Flandres (id 3) qui sont en dépression à cause de leur surexploitation.

Les affleurements du Landénien sont représentés à la figure 4-2. Ils sont principalement situés dans la région du bassin de Mons et du Tournaisis ainsi que de part et d'autre de la Frontière entre la Wallonie et la Flandres dans la région de Hannut-Saint Trond. Il y a également quelques zones où le Landénien affleure dans les vallées au Sud de la Région de Bruxelles-Capitale, notamment dans la vallée de la Senne, à moins de 1 km de la Région de Bruxelles-Capitale. Ces zones d'affleurements constituent des zones de recharge de l'aquifère du Landénien.

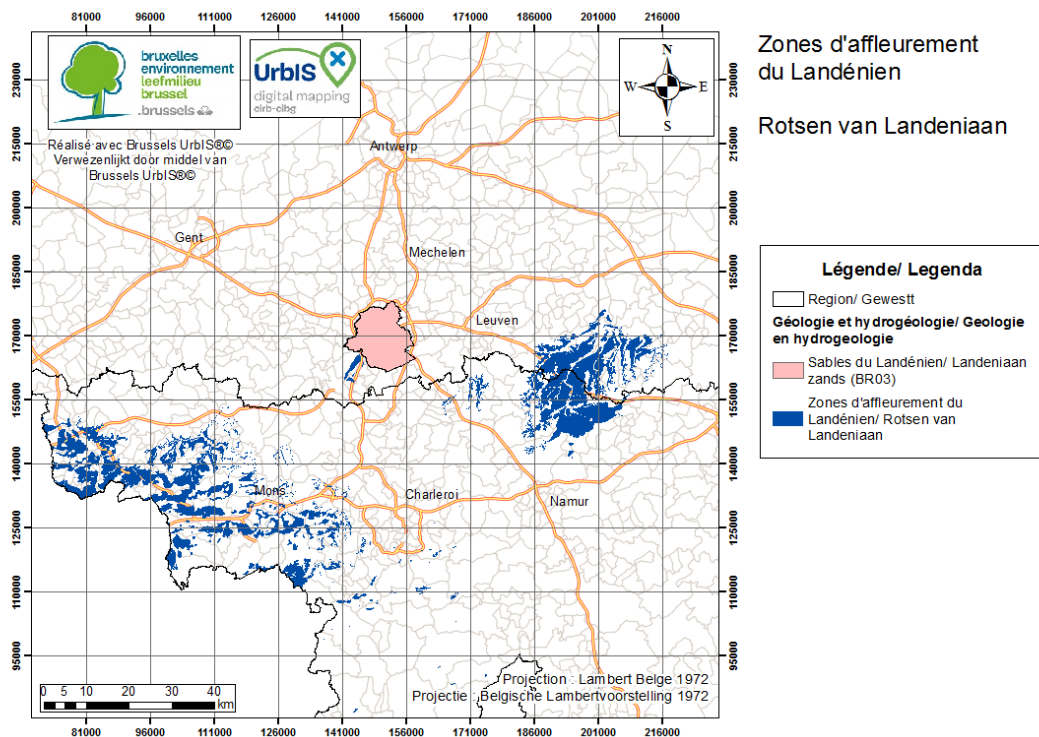


Figure 4-2 : Localisation de la masse d'eau BR03 et des affleurements du Landénien (Service Géologique de Belgique, 2003)

4.1.2. Présentation des données

Les données sur lesquelles se base l'étude ont été fournies par l'Institut Bruxellois de Gestion de l'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 Landénien pour lesquels des données hydrochimiques sont disponibles, sont décrits dans le tableau 4-1 et leur répartition spatiale est illustrée à la figure 4-3. Ces

stations sont au nombre de 15 et ne sont pas réparties de manière homogène sur la Région de Bruxelles-Capitale, principalement au Nord et à l’Ouest. La profondeur des différents puits est de l’ordre de plusieurs dizaines de mètres, elle varie entre 32 et 129 m.

Point de prélèvement	Code	Période de suivi	Nombre de mesures	X Lambert belge 72 (m)	Y Lambert belge 72 (m)	Profondeur (m)
Wash Express	P26	2010-2015	9	149842	169511	92
Lavallée	367	2006	1	148151	172034	80
Centre sportif BNB	L6	2006-2015	13	145390	172676	105
Lavoir Carsen	P20	2008-2011	7	151130	173530	88
Pépinière Boitsfort	P27	2010-2015	9	153330	166457	90
Royal Uccle Sports	P25	2010-2014	7	146327	165318	32
Smet Boring	P5	2004-2015	17	145955	167707	55
UCL Services Techniques 3	P18b	1983-2015	101	156407	171192	129
Parc Roi Baudouin	P3	2008-2015	13	147100	174885	107
Lavoir Helmet	P33	2011-2015	6	151127	173514	96
Lavoir Koekelberg	P16	2006-2009	5	146153	172996	107
Initial Textiles nv	P2b	2004-2006	3	151370	173525	96
T&T	P49	2015	1	148662	172935	87
Car_wash Kennedy bis	P47	2014	1	153206	174514	110
Lavoir Quai Demets	P46	2010-2014	6	146336	169644	55.5

Tableau 4-1 : Données relatives aux points de prélèvement de la masse d’eau du Landénien 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 que deux points pour lesquels un suivi continu a été effectué entre 2004 et 2015 : le point Smet Boring (code : P5) et le point UCL Services Techniques 3 (code : P18b). Pour ce dernier, le suivi remonte même à 1983. Pour les autres stations, le suivi a été mis en place plus tard ou il 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 à 101 pour le point UCL Services Techniques 3, ces analyses ayant été réalisées par l’exploitant du captage et transmises à Bruxelles Environnement.

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). Pour certains échantillons, des analyses isotopiques ont également été réalisées (^{14}C et ^{36}Cl).

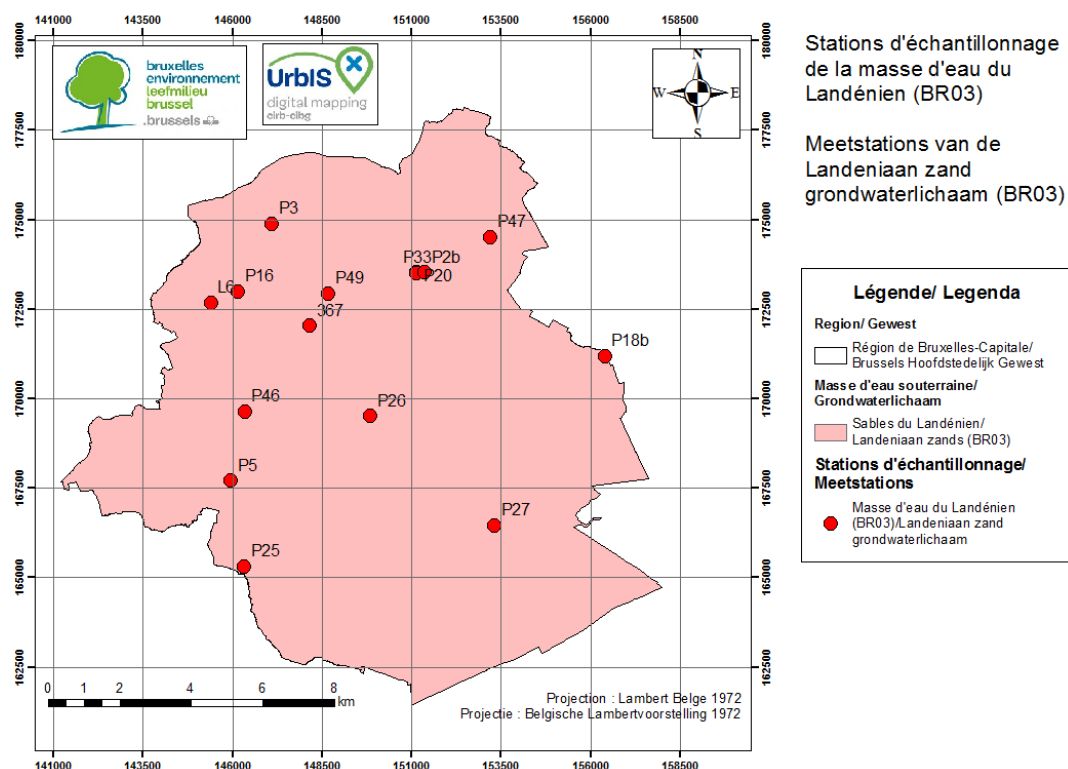


Figure 4-3: Points de prélèvement de la masse d'eau du Landénien pour lesquels des données hydrochimiques sont disponibles

Afin d'élargir le jeu de données, des données complémentaires ont été recherchées 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 hydrochimiques « Calypso » du SPW. 6 stations d'échantillonnage ont été sélectionnées en Wallonie et 25 en Flandre (figure 4-4 et tableau 4-2). En Flandre, les stations d'échantillonnage concernent l'aquifère des sables captifs du Landénien Ouest (id 4) et l'aquifère des sables captifs du Landénien Est (id 12) et en Wallonie, les stations d'échantillonnage concernent l'aquifère des Sables libres du Landénien Est (id 11). Ces stations ont été choisies pour leur proximité avec la Région de Bruxelles-Capitale. Quelques stations plus éloignées ont également été sélectionnées pour pouvoir étudier les variations des compositions chimiques et pouvoir ainsi replacer la masse d'eau souterraine du Landénien (BR03) dans son contexte hydrogéologique et hydrochimique et notamment mettre en évidence la transition nappe libre/ nappe captive. En Wallonie, la masse d'eau RWE061 (Sables captifs du Landénien Ouest id 4) n'a pas été sélectionnée parce qu'elle est fort éloignée de la Région de Bruxelles-Capitale et n'est pas sur la même ligne d'écoulement.

Avoir un nombre plus élevé de données permettra 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 Landénien, il s'agira des données fournies

par l'Institut Bruxellois de Gestion de l'Environnement pour la masse d'eau BR03 et des stations de prélèvement sélectionnées dans le Landénien 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 en concentration totale à l'exception du fer qui est mesuré en concentration dissoute. Tous les paramètres n'ont pas forcément été mesurés pour chaque analyse. En Région wallonne, les paramètres mesurés sont les mêmes qu'en Flandre. Les métaux sont également mesurés en concentration totale à l'exception du fer mais des paramètres supplémentaires ont été mesurés notamment le Br et des polluants (pesticides, micropolluants organiques, cyanures ...).

Région	MESO	Point de prélèvement	Code	X Lambert belge 72 (m)	Y Lambert belge 72 (m)	Profondeur (m)	Nombre de mesures	Période de suivi
Région wallonne	RWE053	MONT SAINT ANDRE PR1	4039002	184496	149636	-	18	2008-2015
		FOLX LES CAVES PRESBYTERE 17M	4048002	190290	150218	-	6	2006-2016
		PISSAUMONT	4049001	193560	151230	-	83	1998-2015
		LES7FONTAINES	4111005	196150	156190	-	11	2006-2016
		RUE LORIERIS 4 8-9M	4118005	199180	149854	-	11	2006-2016
		RUE DE CRENWICK 51 5M	4125003	206403	153498	-	1	2006
Région flamande	BLKS_1000_GWL_2S	2-0072		168699	174665	137	8	2004-2014
		2-0419b		155955	180524	114	3	2011-2014
		2-0420b		160113	170398	92	3	2011-2014
		2-0421		180790	176231	127	3	2011-2014
		2-0422a		188763	177376	109	3	2011-2014
		2-0424b		160639	186224	153	3	2011-2014
		2-0429b		174590	165125	92	2	2012-2014
		2-0430		166516	167019	65	2	2011-2014
		2-0431		157749	163462	104	4	2011-2014
		2-0435c		144309	154699	76	3	2012-2014
		2-0438a		180804	166112	51	3	2011-2014
		2-0440b		183110	172384	80	3	2011-2014
	710/71/3		164952	161769	43	20	2004-2015	
	SS_1000_GWL_2	2-0046		135108	165364	54	9	2004-2014
		2-0415		131650	156174	36	3	2011-2014
		2-0417b		141379	174618	143	3	2011-2014
		2-0418b		147660	181650	150	3	2011-2014
		2-0426		135773	159470	51	3	2011-2014
		2-0432b		131538	170127	91	3	2011-2014
		4-0069		116925	180755	138	8	2006-2014
		4-0111		100133	197682	190	3	2006-2009
		4-0253b		119504	171387	112	4	2011-2014
4-0256b			105339	178263	143	4	2011-2014	

		4-0270b		117851	197640	197	4	2011-2014
		4-0272c		117256	188168	152	2	2011-2014

Tableau 4-2 : Récapitulatif des données complémentaires de la masse d'eau du Landénien sélectionnées en Wallonie et en Flandre.

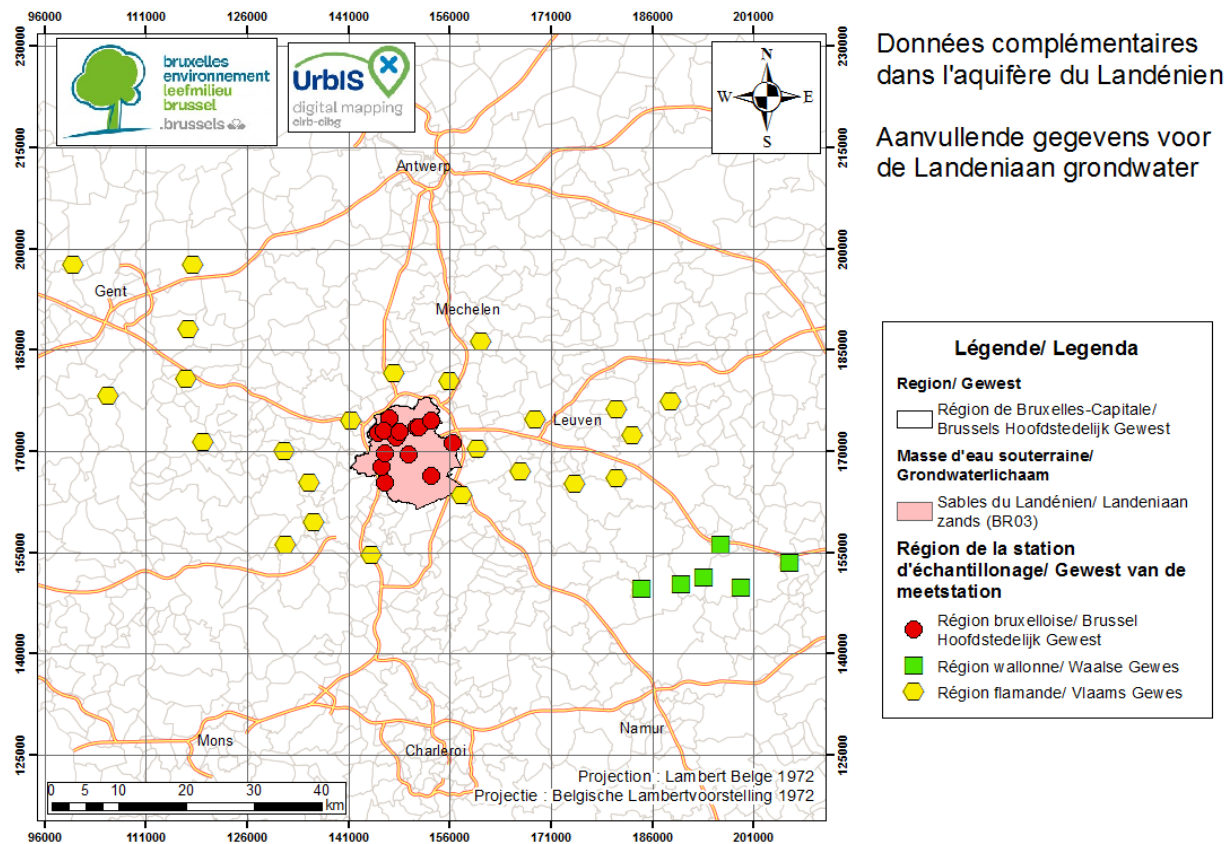


Figure 4-4 : Données complémentaires dans l'aquifère du Landénien en Wallonie et en Flandre

4.1.3. Vérification de la qualité des données

4.1.3.1. Correspondance avec la masse d'eau souterraine étudiée

En croisant les informations concernant la profondeur des crépines avec le modèle numérique de terrain (Lidar) et le modèle stratigraphique, il a été possible de connaître la lithologie de l'aquifère sollicité par la station d'échantillonnage pour la masse d'eau BR03. Les résultats sont présentés à la figure 4-5. Toutes les stations d'échantillonnage semblent bien situées dans le Landénien à l'exception du point Lavoir de Koekelberg (P16) qui sollicite l'Yprésien. Ce point sera donc écarté de l'analyse. Cette analyse de la qualité des données a permis de mettre en évidence l'erreur d'encodage effectuée dans la base de données de la masse d'eau sollicitée pour ce site de surveillance. L'erreur commise a été corrigée.

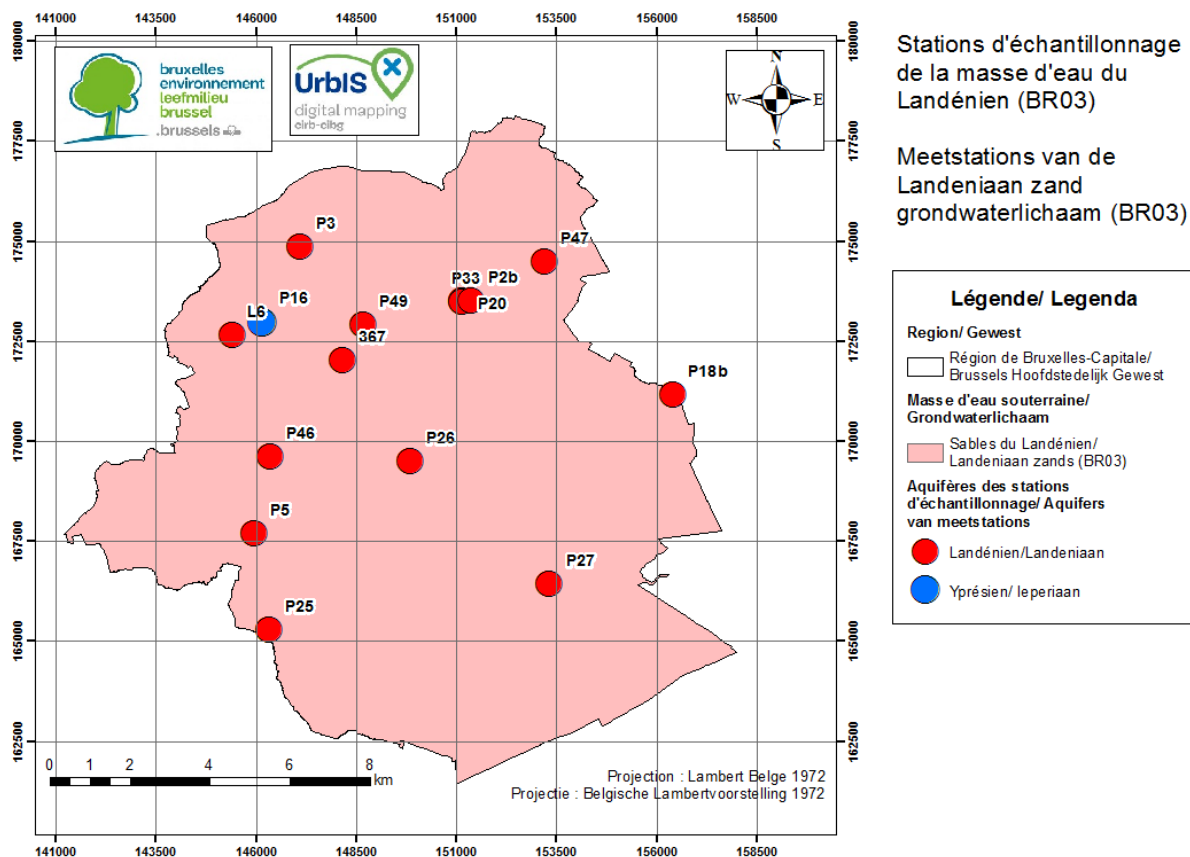


Figure 4-5 : Aquifère sollicité par la station d'échantillonnage

4.1.3.2. Balance ionique

La balance ionique a été calculée pour chaque échantillon et les résultats sont présentés dans le tableau 4-3. On constate que de nombreux échantillons présentent des balances ioniques supérieures à 10 % ou inférieures à -10 % principalement en Région de Bruxelles-Capitale et en Région wallonne. Ces balances ioniques qui sortent de l'intervalle de confiance sont liées à des analyses incomplètes (l'ensemble des éléments majeurs n'ont pas été analysés).

En utilisant les échantillons à partir de l'année 2006 (début du programme de surveillance) pour la masse d'eau BR03, une grande partie des échantillons avec une balance ionique trop élevée est éliminée. Il reste tout de même 19 échantillons avec une balance ionique supérieure à 10% ou inférieure à -10% qui sont liés à des analyses incomplètes. Comme précisé dans le chapitre matériel et méthode, les analyses avec une balance ionique qui sort de l'intervalle de confiance, seront éliminées si tous les éléments majeurs ont été mesurés. Par contre si tous les éléments majeurs n'ont pas été analysés, l'analyse sera conservée provisoirement et s'il n'y a ni polluants ni anomalie, elle pourra être conservée pour l'analyse statistique.

Pour vérifier la qualité des données, la balance ionique est ensuite recalculée à partir de la médiane des concentrations pour chaque station. La balance ionique est comprise entre -10% et 10% pour chaque station d'échantillonnage à l'exception d'une station en Région de

Bruxelles-Capitale, la station P47 (Car_wash Kennedy bis). Pour cette station, un seul échantillonnage a été réalisé et tous les éléments majeurs n'ont pas été analysés, il manque notamment HCO₃, Na, K et Mg. Cette station ne sera donc pas éliminée directement, il sera d'abord vérifié si des polluants sont détectés et si les analyses chimiques relatives à cette station se démarquent des autres notamment via l'analyse multivariée.

	Région de Bruxelles-Capitale	Région wallonne	Région flamande
Nb stations d'échantillonnage	14	6	25
Nb d'analyses (total)	199	130	89
Nb d'analyses (à partir de 2006)	110		
Nb analyses avec BI > 10% ou < 10% (total)	104	106	6
Nb analyses avec BI > 10% ou < 10% (à partir de 2006)	19		
Médiane des stations d'échantillonnage avec BI > 10% ou < 10%	1	0	0

Tableau 4-3 : Calcul de la balance ionique des échantillons du Landénien (Nb = nombre, BI = balance ionique)

4.1.3.3. 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 4-4. Pour chaque élément, le nombre total d'analyses est indiqué ainsi que le nombre d'analyses dont la valeur est supérieure à la limite de quantification, le pourcentage de quantification 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. On constate également qu'il y a aussi des différences dans les limites de quantification entre les 3 régions.

Les valeurs inférieures à la limite de quantification seront traitées comme recommandé par le projet BRIDGE (Müller, 2006). La valeur utilisée sera la limite de quantification divisée par 2. Les valeurs de limite de quantification qui sont égales ou supérieur aux normes seront exclues de l'analyse. 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). C'est le cas de certaines valeurs pour le plomb et l'arsenic.

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 l'arsenic (mais uniquement en Région de Bruxelles-Capitale), le cadmium, le mercure, le nitrite et le nickel. Pour ces paramètres, comme les concentrations sont rarement supérieures à la limite de quantification, il ne sera pas possible de calculer directement la concentration de référence.

Paramètre	unité	BR03 : Landénien Région de Bruxelles-Capitale				Landénien Région wallonne				Landénien Région flamande			
		Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ	Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ	Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ
Aluminium dissous	µg/L									54	9	17	20, 40, 50
Aluminium total	µg/L	89	73	82	1, 10, 20	104	91	88	10, 20, 30	29	1	3	20, 40, 50
Ammonium	mg/L	92	82	89	0.05, 0.1	121	26	21	0.05	104	78	75	0.05, 0.10, 0.11, 0.26
Arsenic total	µg/L	94	0	0	0.5, 1, 5, 10, 20	104	96	92	0.2, 1	49	10	20	0.5, 2, 5
Baryum total	µg/L	89	89	100		16	16	100					
Bore total	µg/L	94	94	100		113	97	86	20, 25	37	15	41	10, 30, 100
Bromure	µg/L	56	56	100		11	11	100					
Cadmium dissous	µg/L	85	0	0	0.1								
Cadmium total	µg/L	94	1	1	0.1	104	12	12	0.2	49	1	2	0.03, 0.5, 1
Chrome total	µg/L	89	0	0	0.5, 1, 2	104	100	96	1	49	7	14	1, 2, 5, 10
Cobalt total	µg/L	89	12	13	0.1, 1, 2	1	0	0	0.1				
Cuivre total	µg/L	89	21	24	1, 2	104	99	95	1, 2	49	5	10	0.4, 2, 4, 5
Fer dissous	µg/L					98	83	85	2	100	86	86	20, 40, 50
Fer total	µg/L	90	90	100									
Fluorure	µg/L	86	84	98	200	63	63	100	50	45	41	91	100, 200
Manganèse dissous	µg/L									97	84	87	10
Manganèse total	µg/L	90	90	100		104	84	81	1, 5	49	39	80	10
Mercure dissous	µg/L	85	0	0	0.02, 0.05								
Mercure total	µg/L	92	1	1	0.02, 0.03, 0.05	103	15	15	0.05, 0.1	49	2	4	0.01, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5

Molybdène total	µg/L	87	87	100		104	64	62	0.1, 2				
Nickel dissous	µg/L	85	5	6	1, 2								
Nickel total	µg/L	94	7	7	1, 2, 5	0	0	0		49	8	16	2, 4, 5
Nitrate	mg/L	100	6	6	0.05, 0.1, 1, 2	122	122	100		104	40	38	0.20, 0.44, 0.90
Nitrite	mg/L	92	1	1	0.01, 0.02, 0.03	122	21	17	0.01	104	27	26	0.010, 0.030, 0.070
Ortho-phosphates	mg/L	79	78	99	0.0066	41	33	80	0.02				
Phosphate	mg/L	8	0	0	0.1, 0.5	120	119	99	0.1	98	73	74	0.03, 0.05, 0.10, 0.31
Phosphore total	mg/L	92	28	30	0.05, 0.1								
Plomb dissous	µg/L	85	10	12	0.1								
Plomb total	µg/L	94	49	52	0.1, 5	104	80	77	0.5, 1	49	3	6	0.5, 2, 5, 10
Strontium	µg/L	80	80	100		16	16	100					
Tétrachloroéthylène	µg/L	92	2	2	0.1	44	0	0					
Trichloroéthylène	µg/L	92	0	0	0.1	44	0	0					
Vanadium	µg/L	78	47	60	0.1	0	0	0					
Zinc total	µg/L	93	76	82	2	104	99	95	1, 20	48	17	35	5, 10, 20

Tableau 4-4 : Limite de quantification des principaux éléments mineurs et en trace (Nb = nombre, LQ = limite de quantification)

En outre, certains paramètres ne sont pas mesurés de la même manière dans les différentes régions. A Bruxelles, le fer total est mesuré tandis que dans les autres régions il s'agit du fer dissous. Concernant le phosphore, en Région de Bruxelles-Capitale, c'est les orthophosphates et le phosphore total qui est mesuré, en Région wallonne c'est les orthophosphates et le phosphate et en Région flamande, c'est uniquement le phosphate qui est mesuré.

4.1.3.4. Présence de polluants

Pour déterminer les concentrations de référence, il faut normalement écarter les points qui sont impactés par des contaminations anthropiques. Dans ce travail cette règle sera un peu nuancée comme expliqué dans le chapitre 3 matériel et méthodes. Les échantillons impactés par une contamination anthropique seront traités différemment si tous les échantillons de la station d'échantillonnage sont impactés ou s'il s'agit seulement d'un ou deux échantillons de la station. Et si l'ensemble des échantillons sont impactés ils seront tout de même conservés pour la suite de l'analyse pour évaluer si la contamination a un impact significatif ou non sur la minéralisation.

Les principaux polluants qui sont retrouvés dans la nappe du Landénien sont repris dans le tableau 4-5. Pour chaque région, une liste des échantillons a été établie pour lesquels au moins une analyse dépasse la norme. 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). Pour certains polluants (le benzène, les pesticides, les cyanures, le tétrachloroéthylène et trichloréthylène) il est également indiqué quand ils sont présents à une concentration supérieure à la limite de quantification car ceux-ci ne sont pas censés être présent naturellement, ce qui indique un impact anthropique. Pour les points situés en Région flamande, les données ne sont pas disponibles pour ces polluants.

Dans le tableau 4-5, il est possible de constater que de nombreux puits semblent impactés. En Région wallonne, tous les puits ont des concentrations en nitrate supérieures à 10 mg/L. Des pesticides sont également détectés dans la majorité des cas. En Région Bruxelles-Capitale et en Région flamande, ce n'est généralement pas le cas (à l'exception du point 710/71/3 en Flandre). C'est plutôt cohérent avec ce qui est attendu parce que la nappe du Landénien est principalement captive dans ces régions et les conditions sont vraisemblablement anaérobiques.

Par contre, concernant les polluants organiques, le cyanure et les pesticides, pratiquement tous les puits du Landénien en Région de Bruxelles-Capitale, présentent un ou plusieurs polluants qui dépassent la limite de quantification. Cependant, c'est généralement non récurrent et les normes sont rarement dépassées. Il y a juste les puits P5 et P25 pour

lesquels du cyanure est quantifié de manière récurrente et les puits P20 et P47 pour lesquels les normes en pesticides sont dépassées. Pour un aperçu plus détaillé des polluants quantifiés dans chaque station d'échantillonnage de la masse d'eau BR03, un graphique est présenté dans l'annexe A1.

Il y aussi d'autres polluants qui sont détectés dans la masse d'eau du Landénien: des métaux (notamment le fer et le manganèse), le chlore, le sodium, le sulfate, le fluor, le bore et l'ammonium. Cependant, ces éléments peuvent aussi être présents naturellement, notamment suite à l'occurrence de conditions réductrices, voire en liaison avec d'anciennes eaux marines. Il ne faut donc pas exclure directement les points avec des concentrations élevées en ces différents éléments.

Au final, la majorité des points de monitoring du Landénien en Région de Bruxelles-Capitale semblent impactés par des activités anthropiques mais ils ne seront pas éliminés directement. Ils seront inclus dans la suite des analyses pour voir si l'impact anthropique influence la minéralisation de manière significative.

Paramètres	Norme qualité de l'eau distribuée par réseau	Valeurs seuils applicables à la MESO BR03	Points du Landénien avec au moins un échantillon dépassant la norme eau potable ou avec des polluants organiques ou pesticides quantifiés		
			Région de Bruxelles-Capitale BR03	Région wallonne	Région flamande
Nickel	20 µg/L	20 µg/L	P26	0	2-0432b
Arsenic	10 µg/L	10 µg/L	0	0	0
Plomb	10 µg/L	10 µg/L	0	0	2-0432b
Cadmium	5 µg/L	5 µg/L	0	0	0
Mercure	1 µg/L	1 µg/L	0	0	0
Nitrite	0.5 mg/L	0.5 mg/L	0	0	2-0046 (1x), 2-0417b (1X)
Ammonium (indicateur)	0.5 mg/L	0.5 mg/L	P20, P46	RUE LORIER 4 8-9M	4-0069, 4-0253b, 4-0270b, 2-0046, 710/71/3 (1X)
Nitrate	50 mg/L mais > 10 mg/L indique influence anthropique (Müller, 2006)		0	> 50 mg/L : RUE DE CRENWICK 51 5M > 10 mg/L : MONT SAINT ANDRE PR1, FOLX LES CAVES PRESBYTERE 17M, PISSAUMONT, LES 7 FONTAINES, RUE LORIER 4 8-9M	> 50 mg/L : 710/71/3
Sélénium	10 µg/L		0	0	*
Antimoine	5 µg/L		0	0	*
Fluorures	1.5 mg/L		0	0	0
Bore	1 mg/L		0	0	0
Benzène	1 µg/L		0 mais quantifié 1x dans L6, P27, P25	0	*
Pesticides	0.1 µg/L		P20 : plusieurs pesticides quantifiés avec 1 dépassement de norme P25 : un pesticide quantifié 1x P47 : 4 pesticides quantifié et 2 dépasse la norme	Quantifié pour PISSAUMONT, MONT SAINT ANDRE PR1 et dépassement de norme pour RUE LORIER 4 8-9M, LES7FONTAINES, FOLX LES CAVES PRESBYTERE 17M	*
Cyanures	50 µg/L		0 mais quantifié de manière récurrente dans	0 mais quantifié pour PISSAUMONT, RUE LORIER 4 8-9M	*

			P25 et P5		
Tétrachloroéthylène et trichloréthylène	10 µg/L	10 µg/L	0 mais quantifié 1x dans P27 et P46	0	*
Escherichia Coli (nb/100ml)	0		P20, P25	PISSAUMONT, MONT SAINT ANDRE PR1, FOLX LES CAVES PRESBYTERE 17M	*
Entérocoques (nb/100ml)	0		P20, P25, P27, P3, P47	PISSAUMONT, MONT SAINT ANDRE PR1, FOLX LES CAVES PRESBYTERE 17M	*
Chlorure de vinyle	0.5 µg/L		0	0	*
Aluminium (indicateur)	200 µg/L			PISSAUMONT	2-0432b
Sulfates (indicateur)	250 mg/L	250 mg/L	P5	0	4-0111
Chlorures (indicateur)	250 mg/L	150 mg/L	>150 mg/L : P3, L6, P2b	0	>250mg/L : 4-0069, 4-0111, 4-0270b, 4-0272c >150 mg/L : 2-0417b
Manganèse (indicateur)	50 µg/L		P26, 367, P20, P27, P25, P5, P18b, P33, P46	0	2-0421, 2-0422a, 2-0440b, 4-0069, 2-0046, 2-0072, 2-0415, 2-0420b, 2-0426, 2-0430, 2-0432b, 2-0435c
Sodium (indicateur)	200 mg/L		P3, L6	0	4-0069,4-0111, 4-0253b, 4-0256b, 4-0270b, 4-0272c, 2-0417b
Fer (indicateur)	200 µg/L		P26, 367, P20, P27, P25, P5, P18b, P33, P47	PISSAUMONT	2-0421, 2-0422a, 2-0438a, 2-0440b, 4-0069, 4-0253b, 4-0256b, 2-0046, 2-0072, 2-0415, 2-0420b, 2-0426, 2-0430, 2-0431, 2-0432b, 2-0435c, 710/71/3
Bactéries coliformes (/100ml) (indicateur)	0		P20, P25, P27, P3, P47	RUE LORIER 4 8-9M, PISSAUMONT, MONT SAINT ANDRE PR1, LES7FONTAINES, FOLX LES CAVES PRESBYTERE 17M	*
Phosphore (total)		2.185 mg/L	0	0	*

Tableau 4-5 : Principaux polluants dans l'aquifère du Landénien (* : pas de données)

4.1.3.5. Analyses isotopiques

Lors des campagnes d'échantillonnage, des analyses isotopiques ont été réalisées par l'IBGE pour certains puits de la masse d'eau du Landénien BR03. Les analyses concernent le ^{14}C et le ^{36}Cl . Elles sont présentées aux tableaux 4-6 et 4-7. Dans les deux cas, les mesures sont inférieures aux limites de quantification. Une interprétation des données a quand même été réalisée en utilisant la limite de quantification.

Pour le carbone 14, une seule mesure a été réalisée pour la masse d'eau du Landénien. Elle concerne le point Parc Roi Baudouin (P3). La mesure est inférieure à la limite de quantification (1.25 Bq/L). L'activité spécifique a ensuite été calculée en Bq/Kg C (Becquerel par Kg de carbone) en utilisant la valeur de la limite de quantification. L'activité spécifique obtenue est sous-estimée parce que la masse de carbone a été calculée en considérant la totalité des ions bicarbonates : ceux provenant du CO_2 dissous et ceux provenant des minéraux carbonatés. Il faut normalement évaluer les contributions respectives de ces deux sources de HCO_3 , puisque ces proportions déterminent l'activité initiale de ces ions (Michelot). Dans le tableau 4-6, le ^{14}C est également exprimé par rapport à un standard en pcm (pour cent mille). L'activité atmosphérique a été considérée jusqu'à la fin des années cinquante comme une constante. Aujourd'hui, les mesures d'activités en carbone-14 sont toujours exprimées en pourcentage par rapport à cette constante (qui équivaut à 0,227 Bq par gramme de C).

Pour le point P3, la concentration qui a été calculée est de 28490 Bq/Kg C ou 12550 pcm. Actuellement, l'activité spécifique est de l'ordre de 232 Bq/Kg C dans l'atmosphère. Cette activité a été relativement constante au cours du temps, il y a juste eu un pic de 400 Bq/Kg C après les essais nucléaires dans les années 1960. Dans l'eau de surface, l'activité moyenne des bicarbonates est de l'ordre de 150 – 250 Bq/Kg de C. Dans l'eau de mer à la Hague, les activités sont comprises entre 300 et 800 Bq/ kg C (IRSN, 2016). Les concentrations retrouvées habituellement dans le milieu naturel sont largement inférieures à ce qui a été calculé ici. L'activité calculée sur base de la moitié de la limite de détection est 60 fois plus grande que l'activité moyenne de l'atmosphère. Il semblerait donc, que la limite de détection de l'appareil qui a été utilisé soit beaucoup trop grande et que l'appareil n'est donc pas adapté pour mesurer des concentrations naturelles.

Station	Code	Date	C 14 (Bq/l)	HCO3 (mg/l)	C inorg. mg/l (C-HCO3-)	C 14 (Bq/kgC)	C 14 (Bq/gC)	C 14 (pcm)
Parc Roi Baudouin	P3	22-06-10	<1.25	222.8	43.9	28490	28.4	12550

Tableau 4-6 : Analyses isotopiques du C14 de la masse d'eau BR03

Les quatre mesures de ^{36}Cl qui ont été réalisées sont présentées au tableau 4-7. Elles sont également inférieures aux limites de quantification. La concentration (mg/L) a été estimée en utilisant la valeur de la limite de quantification. Le rapport $\text{Cl}36/\text{Cl}$ a ensuite été calculé. L'activité en ^{36}Cl est généralement de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-3} Bq/L (Colle *et al.*, 2002) dans les

eaux souterraines et le rapport $^{36}\text{Cl} / \text{Cl}$ varie généralement entre 10^{-15} et 10^{-12} (Phillips, 2013). Les valeurs qui résultent de ces calculs sont entre 10^3 et 10^6 fois plus élevées que les valeurs habituellement rencontrées dans la nature. Comme pour le ^{14}C , les appareils qui ont été utilisés ne sont pas adaptés à des mesures si précises.

Station	Code	Date	Cl (mg/l)	Cl 36 (Bq/l)	Cl 36 (mg/l)	$^{36}\text{Cl} / \text{Cl}$
Royal Uccle Sports	P25	21-06-11	73.6	<2.1	1.7×10^{-6}	2.4×10^{-8}
Parc Roi Baudouin	P3	01-12-11	219.5	<2.7	2.2×10^{-6}	1×10^{-8}
Parc Roi Baudouin	P3	21-06-11	211.9	<2.1	1.7×10^{-6}	8.2×10^{-9}
Lavoir Quai Demets	P46	22-06-11	107.6	<2.1	1.7×10^{-6}	1.6×10^{-8}

Tableau 4-7 : Analyses isotopiques du Cl36 de la masse d'eau BR03

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

4.2.1. Faciès hydrochimiques : diagramme de Piper

Les échantillons du Landénien sont représentés dans un diagramme de Piper à la figure 4-6. Dans le cas où il aurait eu plusieurs échantillonnages, c'est la médiane des concentrations qui est utilisée. Les échantillons du Landénien appartiennent principalement au faciès bicarbonaté calcique et magnésien et au faciès bicarbonaté sodique et potassique. Quelques échantillons appartiennent également au faciès chlorurés sodique et potassique. Les eaux caractérisées par les faciès bicarbonaté sodique et potassique et les quelques échantillons du faciès chloruré sodique et potassique proviennent de la Région de Bruxelles-Capitale et la Région flamande.

Au sein du faciès bicarbonaté calcique et magnésien, 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 contaminées. Il comporte principalement les échantillons de la Région wallonne et un échantillon de la Région flamande qui présentent tous des concentrations en nitrate relativement élevées. Le P25 se retrouve également dans le deuxième groupe. Cependant, celui-ci ne présente pas des concentrations élevées en nitrate mais plutôt une proportion élevée de chlorure pour une proportion faible de sodium.

Le diagramme de Piper montre qu'il y a une évolution depuis les eaux douces (bicarbonatées calciques et magnésiennes) vers les eaux bicarbonatées sodiques et potassiques. Dans le diagramme des cations, il y a une augmentation progressive des proportions de sodium et potassium. Les différents faciès des échantillons sont représentés spatialement à la figure 4-7. En Région wallonne et au Sud de la Région Bruxelles-Capitale et de la Région flamande, les

eaux sont de type bicarbonaté calcique et magnésien. Au nord de la Région de Bruxelles-Capitale et de la Région flamande, les eaux évoluent vers des faciès bicarbonaté sodique et potassique, voire localement chloruré sodique et potassique. Les eaux s'écoulent globalement du sud vers les nord. Les eaux jeunes sont donc bicarbonatées calcique et magnésienne et les eaux plus anciennes sont de type bicarbonaté sodique et potassique (et localement chloruré sodique et potassique). 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).

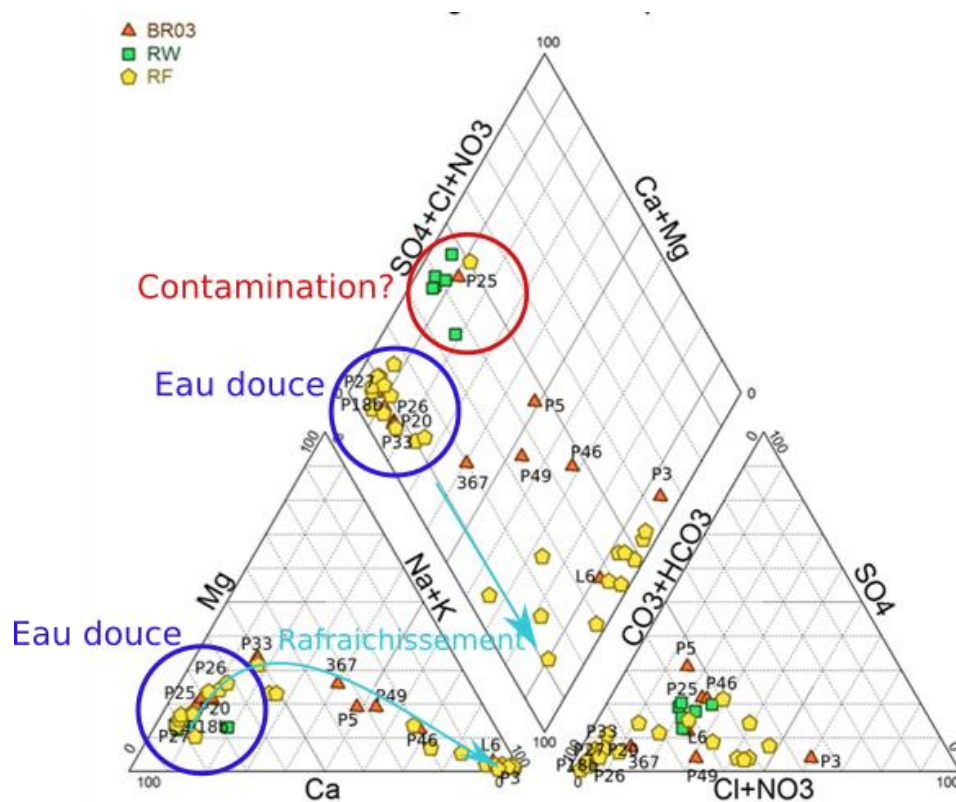


Figure 4-6 : Représentation des échantillons du Landénien (médiane) dans un diagramme de Piper

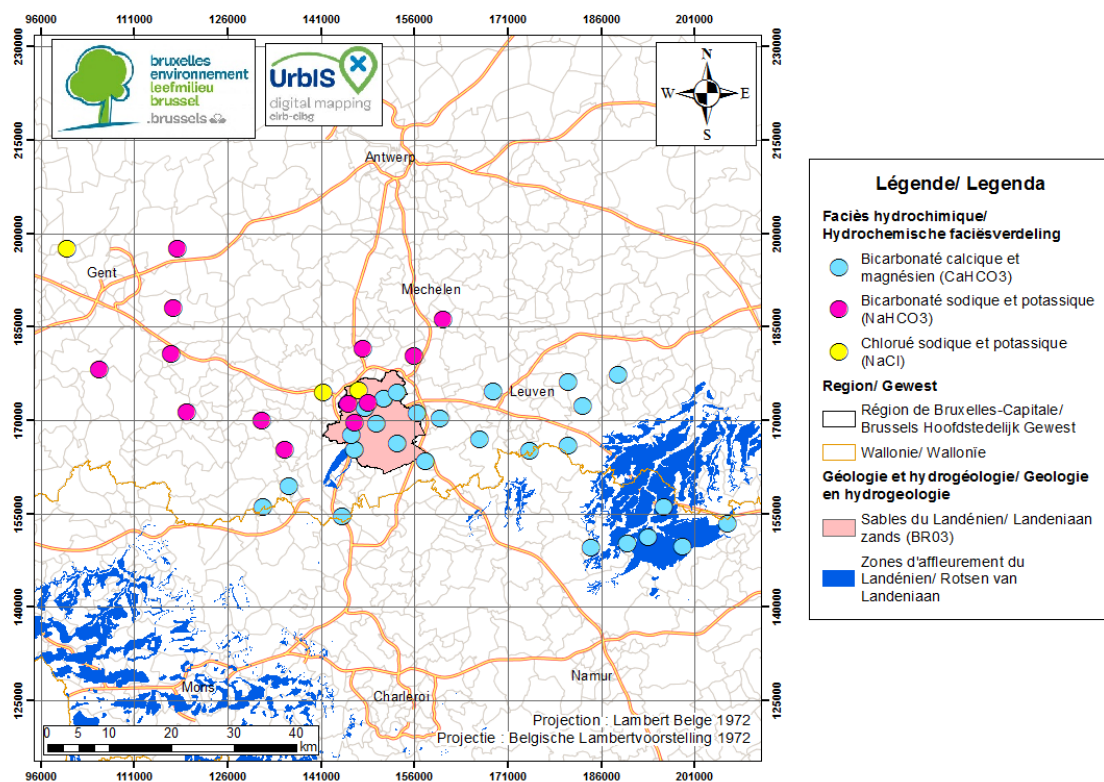


Figure 4-7 : Répartition spatiale des types de faciès hydrochimiques dans le Landénien

4.2.2. Variations spatiales

Les figures 4-8 à 4-25 présentent les distributions spatiales des principaux paramètres, des éléments majeurs et de certains éléments mineurs, à savoir la conductivité électrique de l'eau, le pH, et les concentrations en Ca, Cl, HCO₃, Mg, Na, K, SO₄, NO₃, O₂, NH₄, Fe, Mn, F, As, Zn et Pb.

La conductivité est globalement plus élevée au Nord qu'au Sud de la Région de Bruxelles-Capitale (jusqu'à 4000µS/cm au Nord), les valeurs de pH sont plutôt neutres au Sud et deviennent progressivement basiques vers le Nord (jusqu'à un pH de 9). 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 moyennes (<100 mg/L) dans les zones d'affleurement, faibles (< 20 mg/L) dans le Sud de la Région de Bruxelles-Capitale puis elles augmentent à partir du Nord de la Région de Bruxelles-Capitale (jusqu'à 500 mg/L). Les valeurs de concentrations en HCO₃ sont relativement moyennes (entre 100 et 500 mg/L), sauf à l'extrême Nord-Ouest où elles sont plus élevées (>500 mg/L). Les valeurs de concentrations en Mg sont moyennes au Sud (entre 10 et 20 mg/L), élevées en Région de Bruxelles-Capitale (jusqu'à 35 mg/L) et puis deviennent plus faibles au Nord (<10mg/L). Les valeurs de concentrations en Na sont faibles (<50 mg/L) au Sud et élevées au Nord (jusque 800 mg/L). Les valeurs de concentrations en K sont faibles au Sud (<10 mg/L), sont élevées au Nord de la Région de Bruxelles-Capitale (entre 20 et 30 mg/L) et moyennes au Nord (<20 mg/L). Les valeurs de concentrations en SO₄ sont élevées en Région wallonne (30 à 150

mg/L), elles deviennent globalement plus faibles vers le Nord (<30 mg/L) à l'exception de deux zones où les concentrations sont plus élevées (>80 mg/L), une zone à l'Ouest de la Région Bruxelles-Capitale, à proximité d'une zone d'affleurement du Landénien et une zone près de Gent. Les valeurs de concentrations en NO_3 sont élevées en Région wallonne (>25 mg/L) et faibles partout ailleurs (<1 mg/L) à l'exception d'un point en Région flamande. Les valeurs de concentrations en O_2 sont supérieures à 5 mg/L en Région wallonne, elles sont généralement plus faibles en Région flamande (<1mg/L) par contre, elles sont plus élevées en Région de Bruxelles-Capitale (jusqu'à 10,6 mg/L). Les valeurs de concentrations en NH_4 sont globalement plus élevées au Nord (entre 0.1 et 1 mg/L) qu'au Sud (<0.1 mg/L). Les valeurs de concentrations en Fe et Mn sont faibles au Sud et au Nord et sont élevées aux alentours de la Région de Bruxelles-Capitale (entre 100 et 5000 $\mu\text{g/L}$ pour le Fe et entre 25 et 300 $\mu\text{g/L}$). Pour rappel, pour le Fe, il s'agit de la concentration totale en Région Bruxelles-Capitale et de la concentration dissoute dans les autres régions. Les valeurs de concentrations en F sont plus élevées au Nord (entre 500 et 1000) qu'au Sud (<300 $\mu\text{g/L}$). L'As et le Pb ne sont pas systématiquement quantifiés mais leurs concentrations semblent un peu plus élevées vers le Nord. Les valeurs de concentrations en Zn sont relativement variables (entre 0 et 150 $\mu\text{g/L}$).

Pour de nombreux paramètres, on constate qu'il y a une grande différence entre le Sud et le Nord de l'aquifère du Landénien et 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 du Sud, ont des concentrations plus élevées en Ca, Mg, un pH relativement neutre, une concentration plus faible en Na, K, Cl et F. Pour les eaux bicarbonatées sodique et potassique du Nord, le pH est basique et c'est l'inverse pour les concentrations. Ces évolutions conjointes du Ca, Mg, Na, K et HCO_3 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 une 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. Dans la partie libre de l'aquifère, en Région wallonne, les concentrations en O_2 et NO_3 sont élevées et les diminuent progressivement vers le Nord, suivant l'écoulement souterrain. Il y a une exception, en Région de Bruxelles-Capitale, la concentration en O_2 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.

La concentration en NH_4 est plus élevée vers le nord, ce qui indique des conditions réductrices. Les teneurs élevées en Fe et en Mn dans et autour de la Région de Bruxelles-Capitale signifient que les eaux souterraines sont relativement réductrices, dans les zones de réduction du Fe et du Mn.

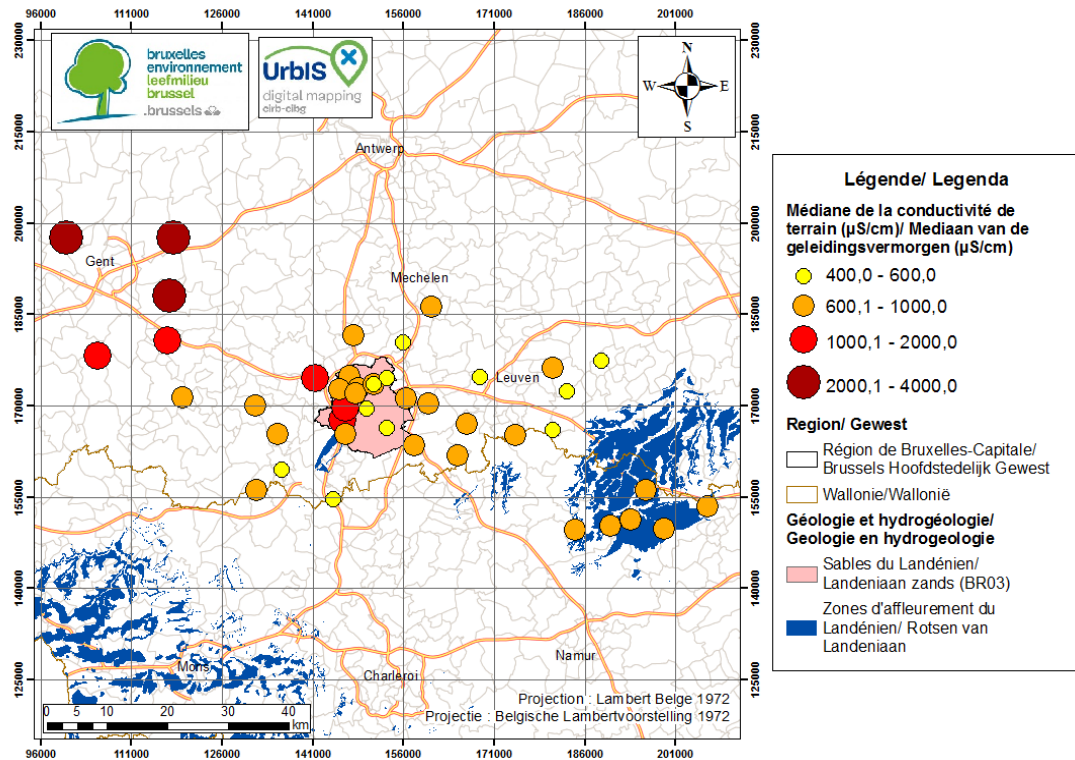


Figure 4-8 : Répartition spatiale de la conductivité de terrain dans l'aquifère du Landénien

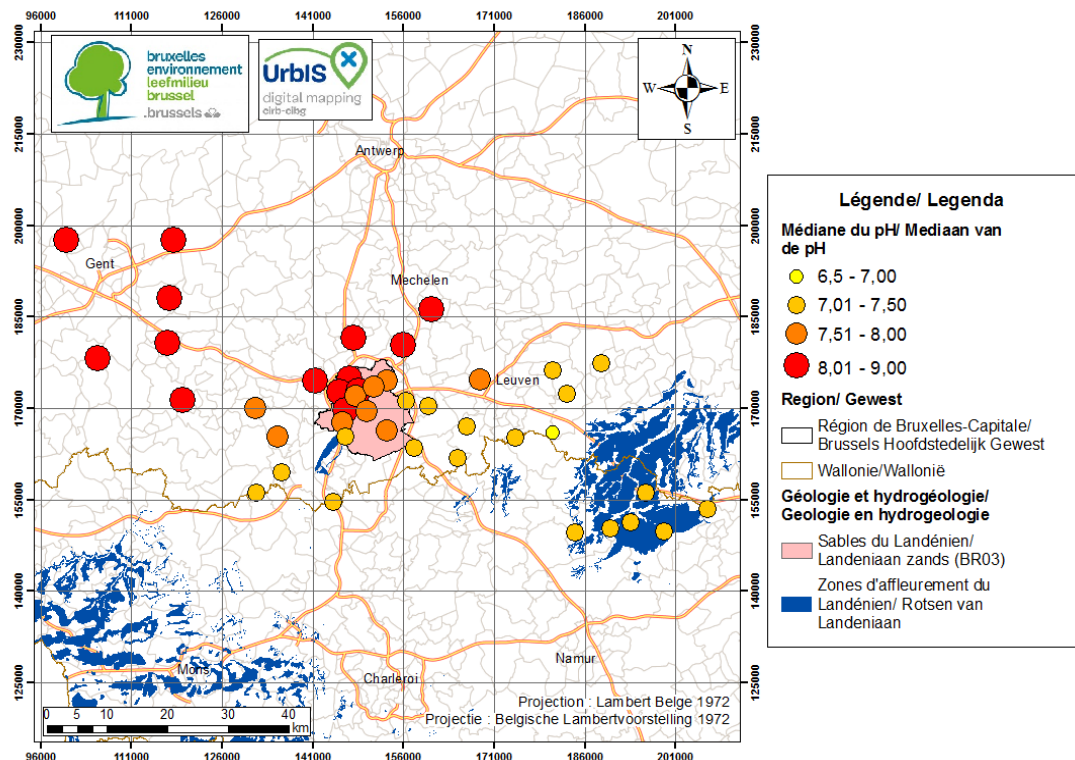


Figure 4-9 : Répartition spatiale du pH de terrain dans l'aquifère du Landénien

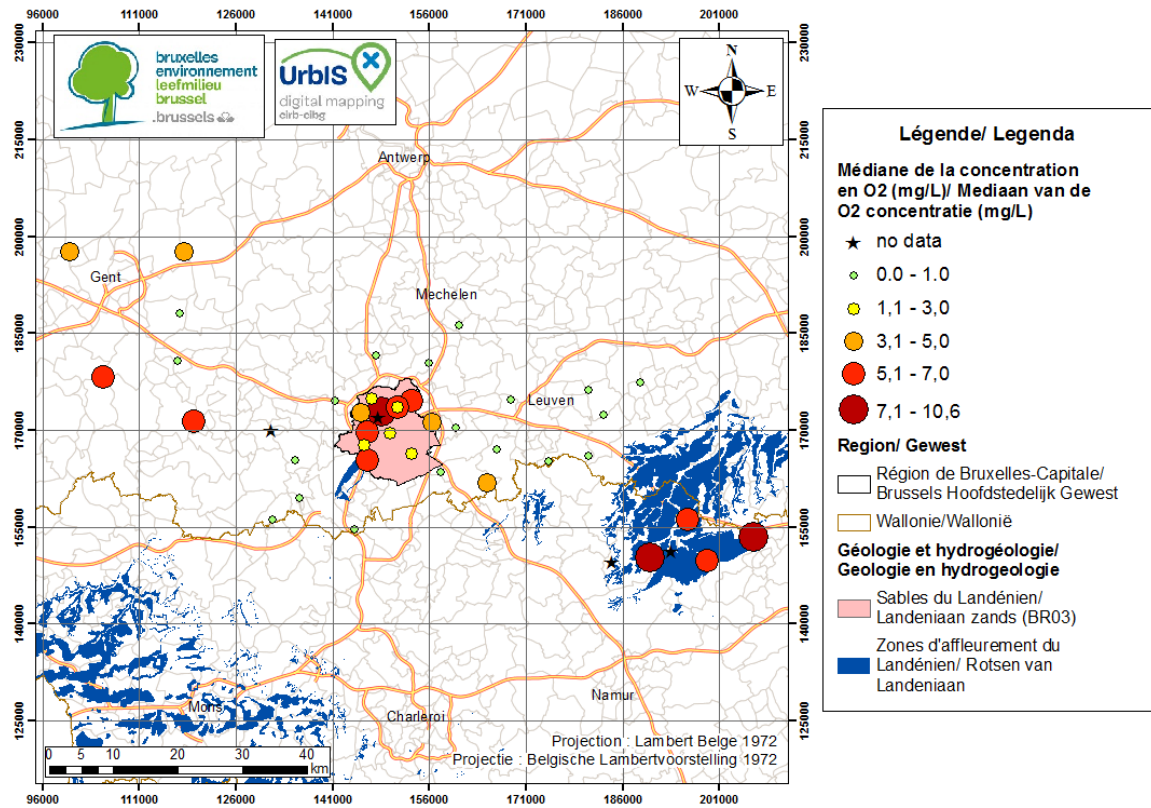


Figure 4-10 : Répartition spatiale de la concentration en O2 dans l'aquifère du Landénien

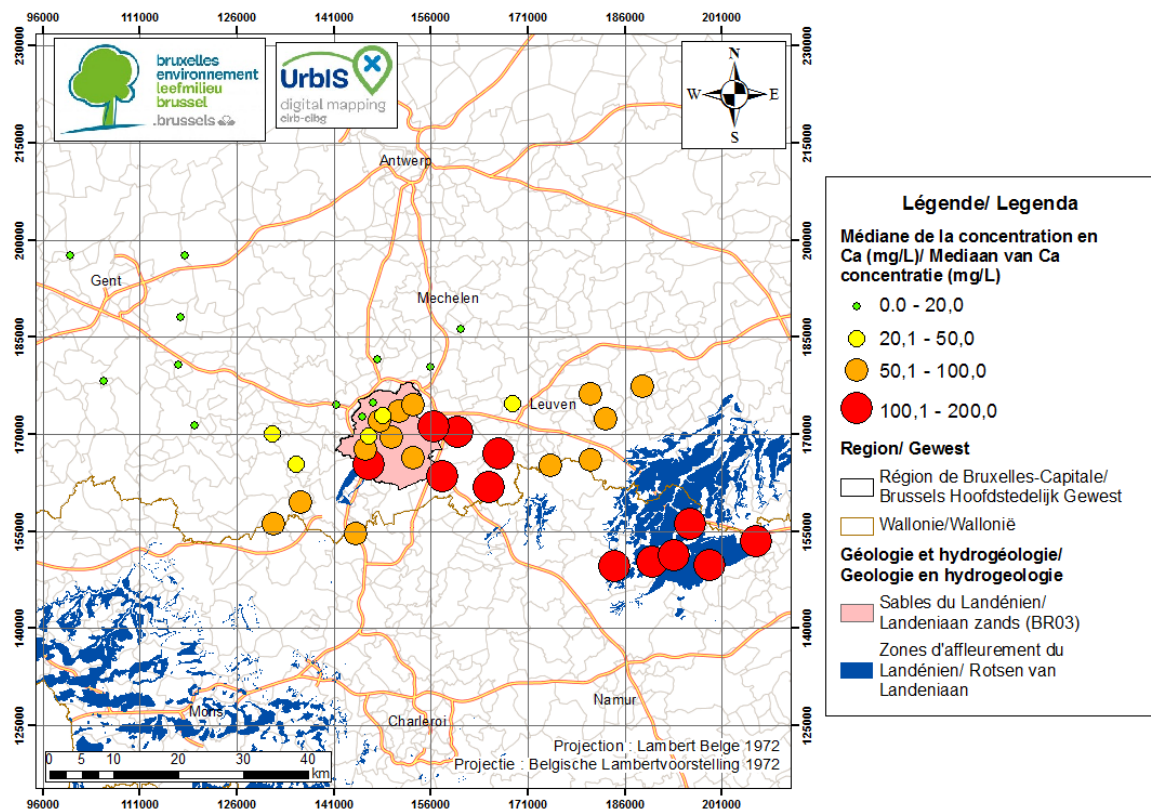


Figure 4-11 : Répartition spatiale de la concentration en Ca dans l'aquifère du Landénien

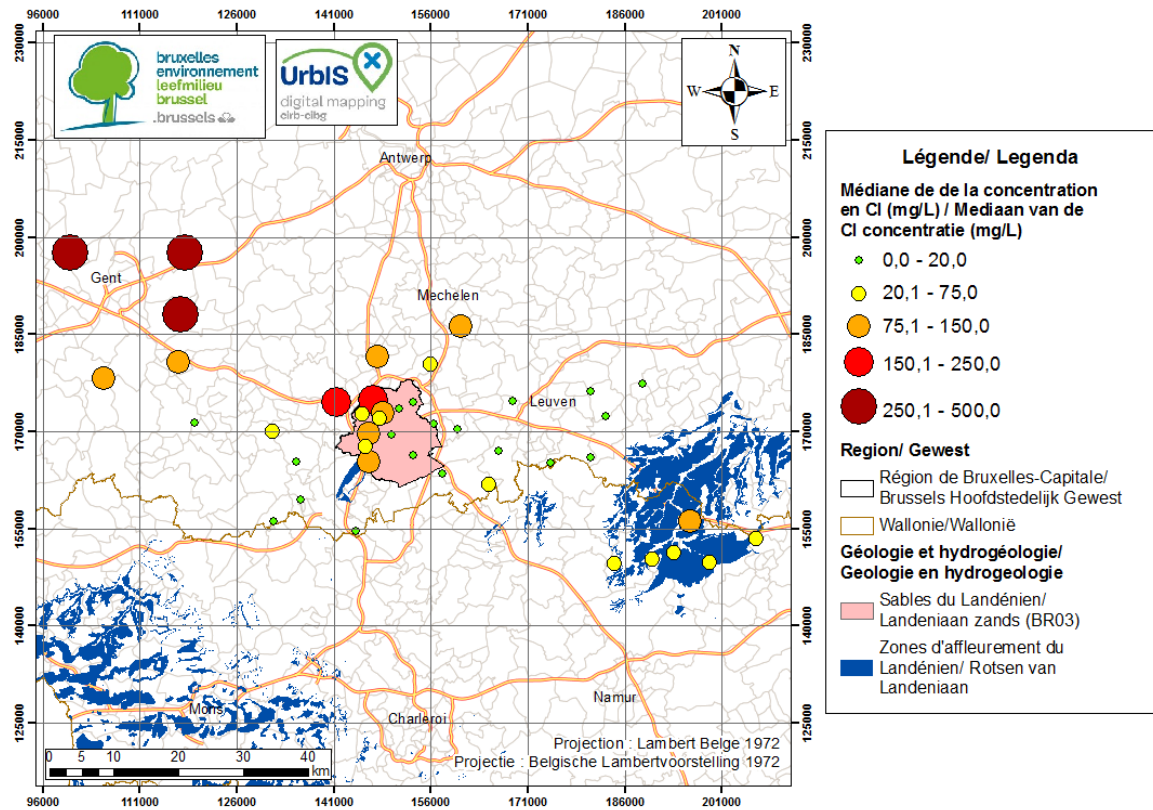


Figure 4-12 : Répartition spatiale de la concentration en Cl dans l'aquifère du Landénien

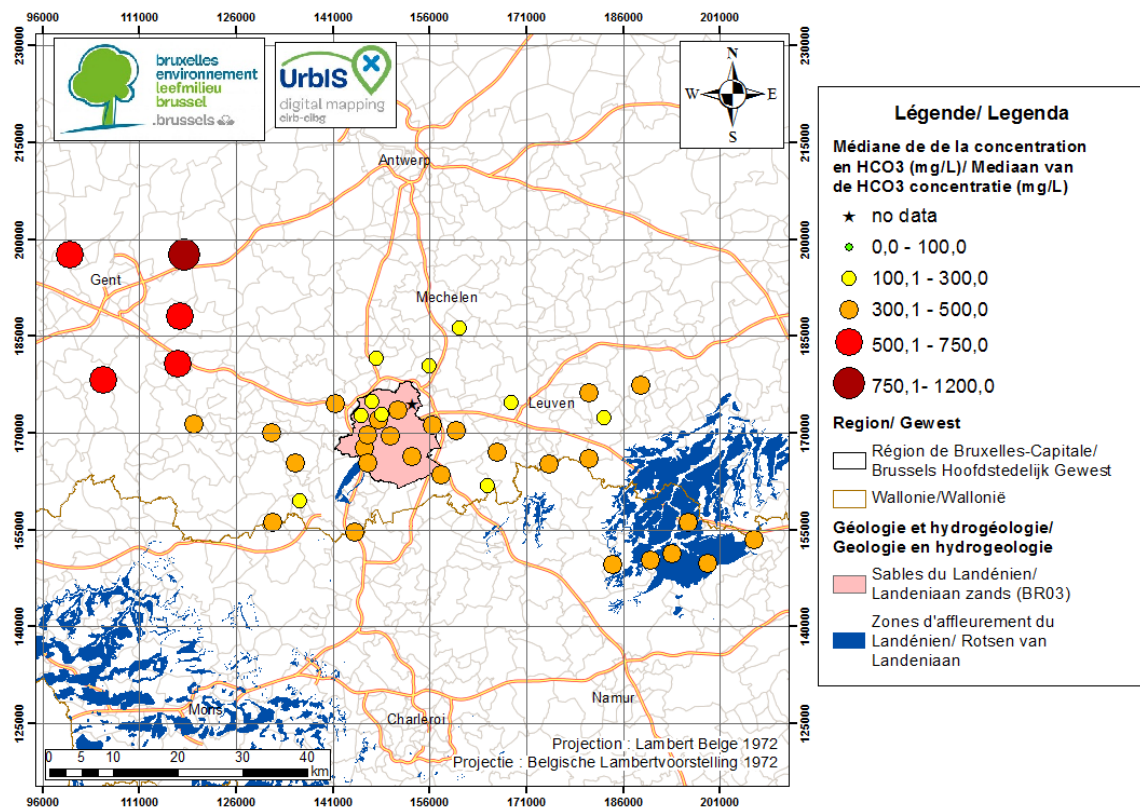


Figure 4-13 : Répartition spatiale de la concentration en HCO3 dans l'aquifère du Landénien

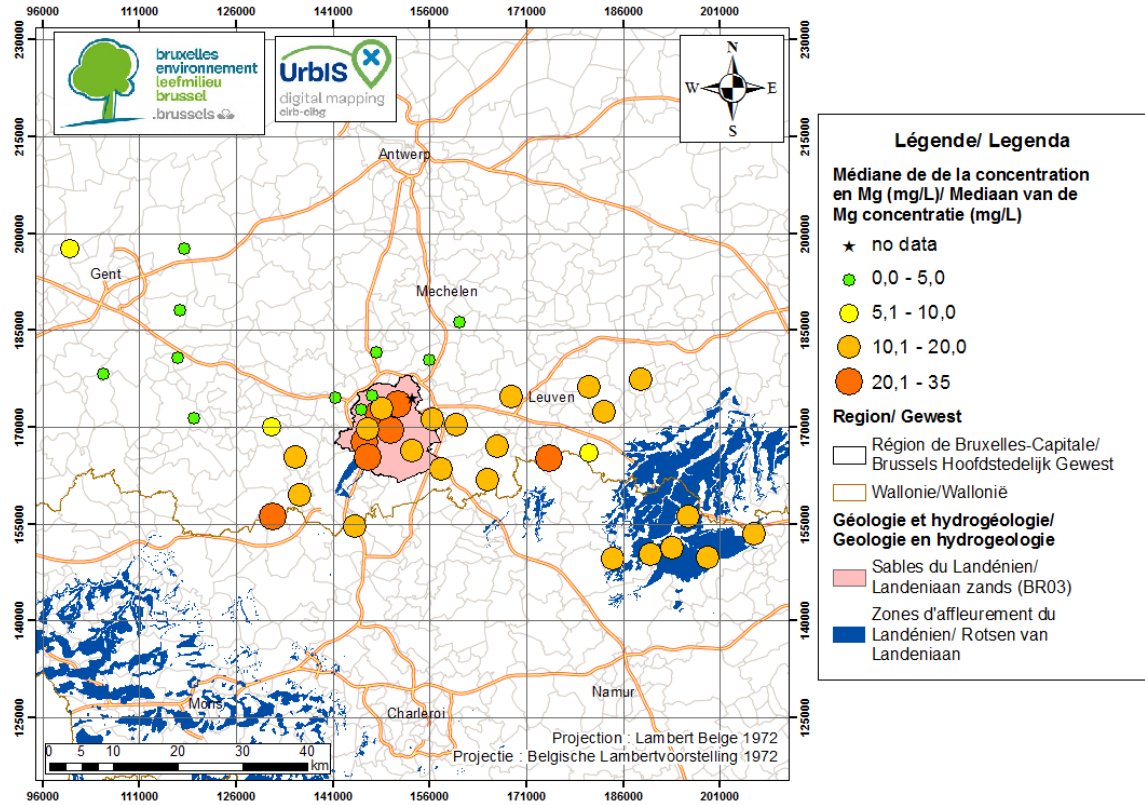


Figure 4-14 : Répartition spatiale de la concentration en Mg dans l'aquifère du Landénien

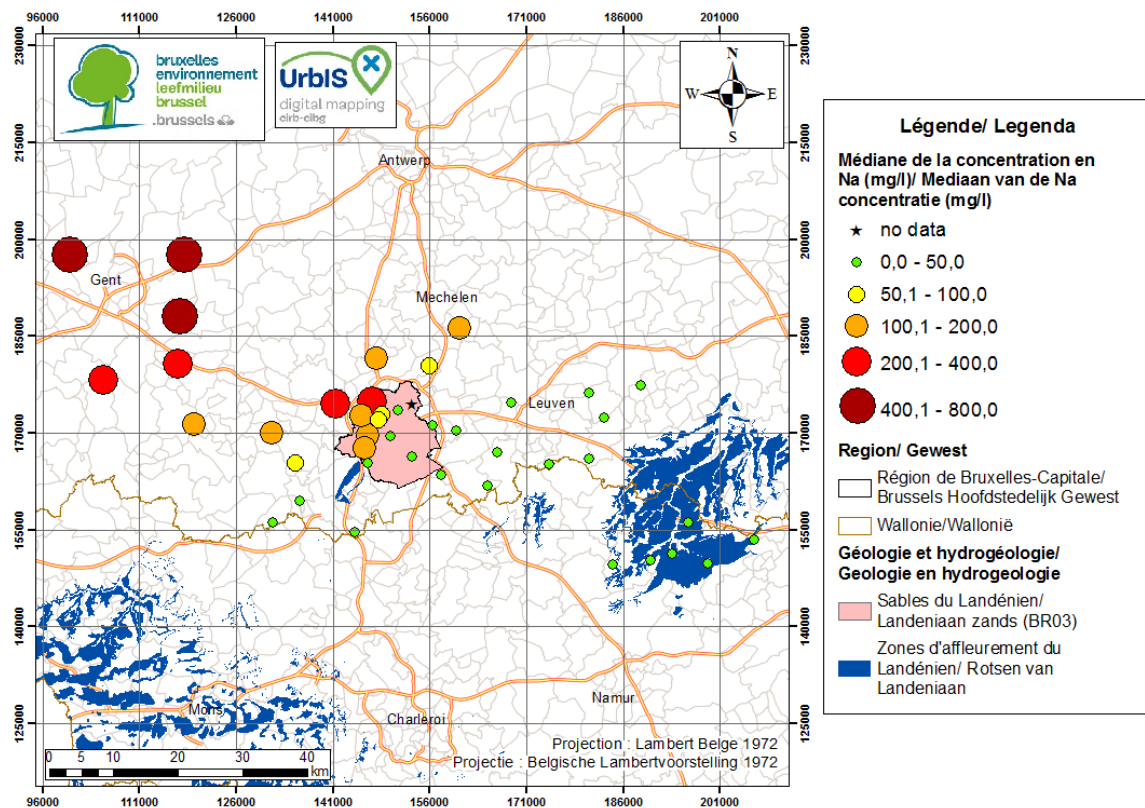


Figure 4-15 : Répartition spatiale de la concentration en Na dans l'aquifère du Landénien

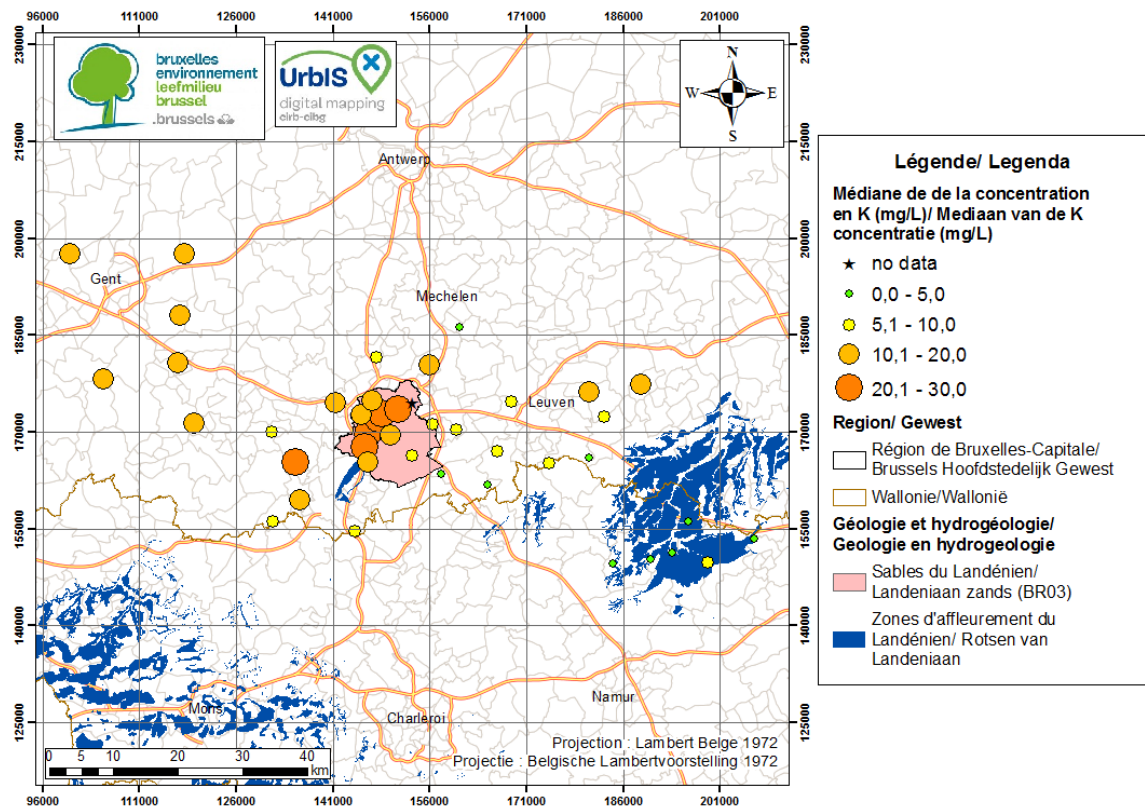


Figure 4-16 : Répartition spatiale de la concentration en K dans l'aquifère du Landénien

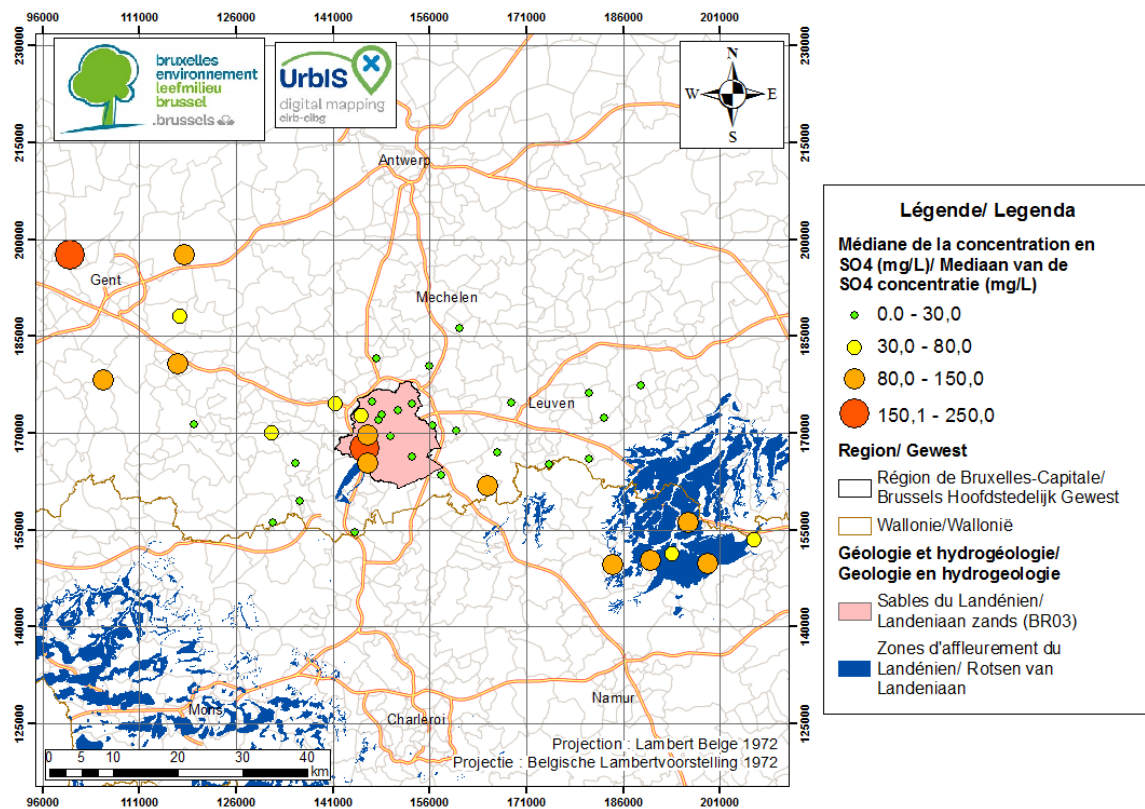


Figure 4-17 : Répartition spatiale de la concentration en SO4 dans l'aquifère du Landénien

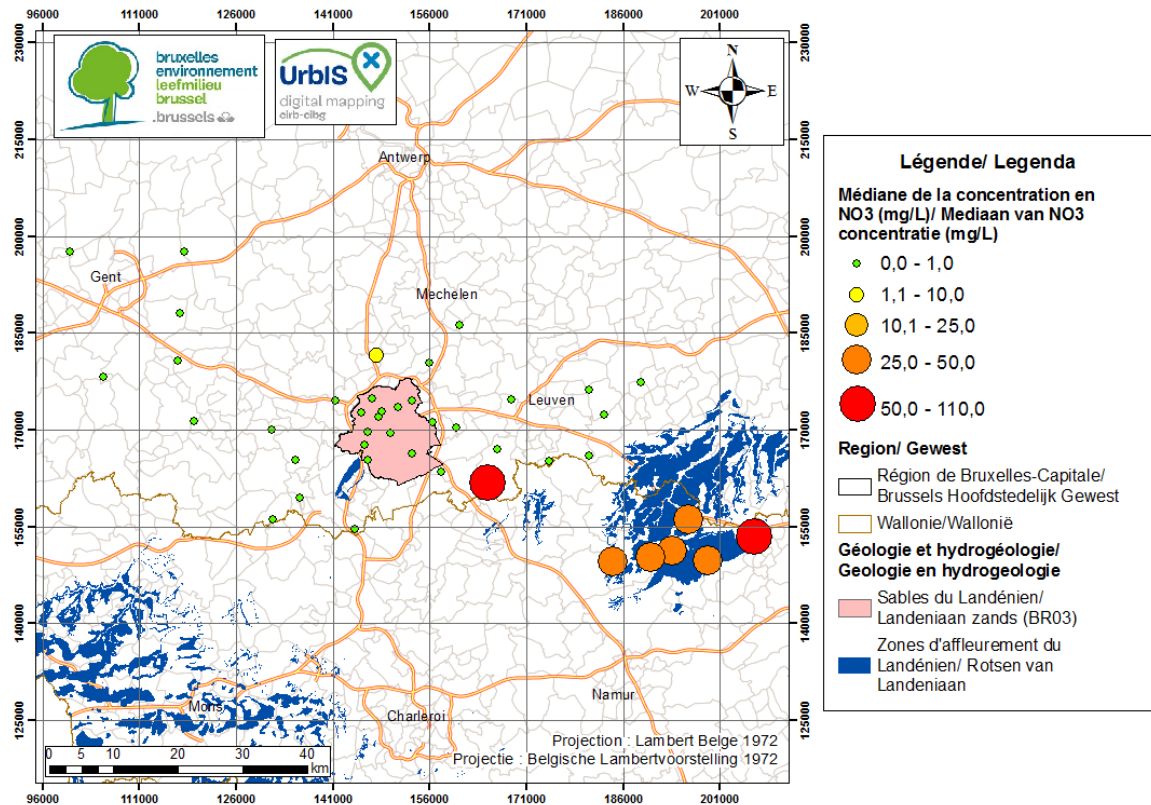


Figure 4-18 : Répartition spatiale de la concentration en NO3 dans l'aquifère du Landénien

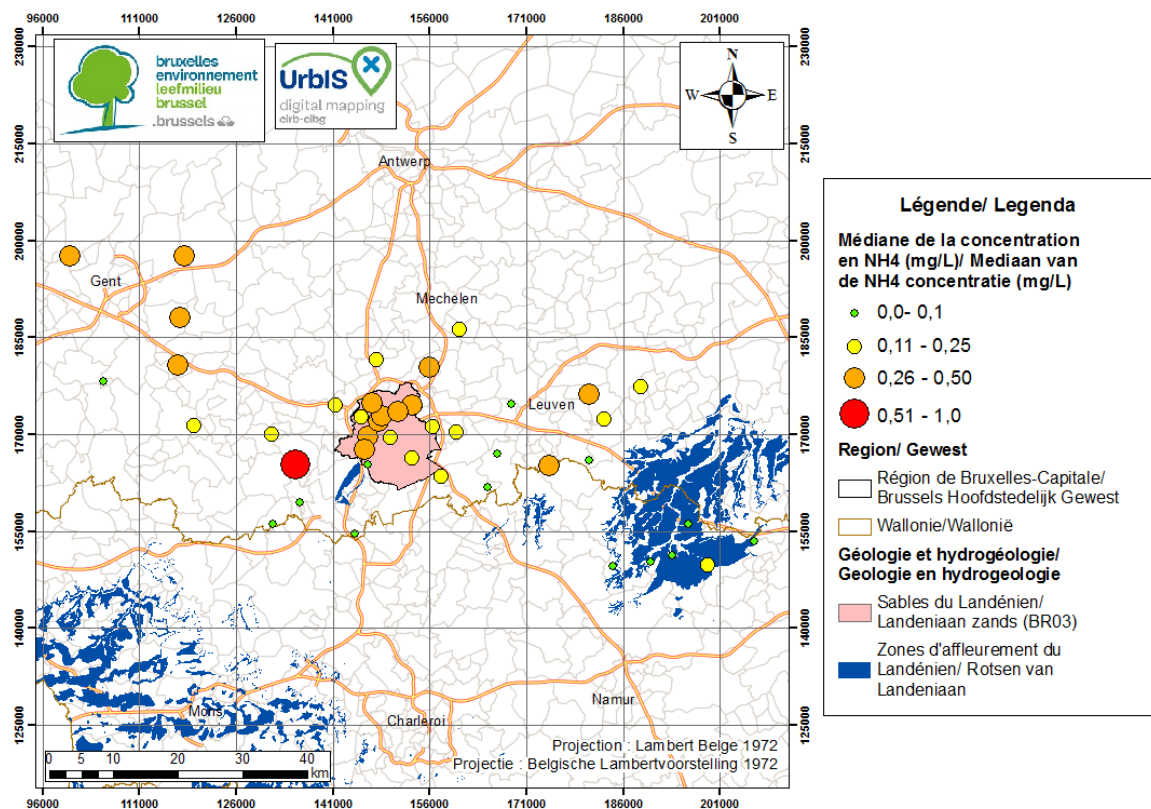


Figure 4-19 : Répartition spatiale de la concentration en NH4 dans l'aquifère du Landénien

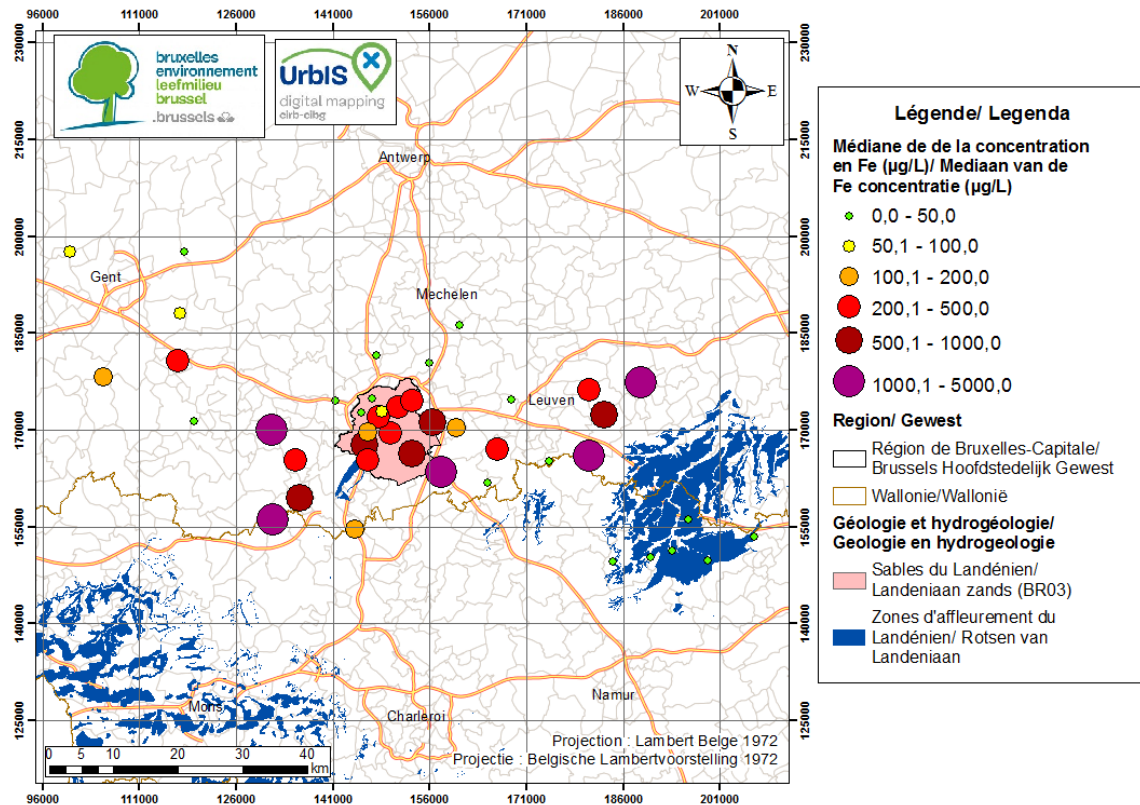


Figure 4-20 : Répartition spatiale de la concentration en Fe dans l'aquifère du Landénien (il s'agit du Fe total en Région de Bruxelles-Capitale mais du Fe dissous en Wallonie et en Flandre)

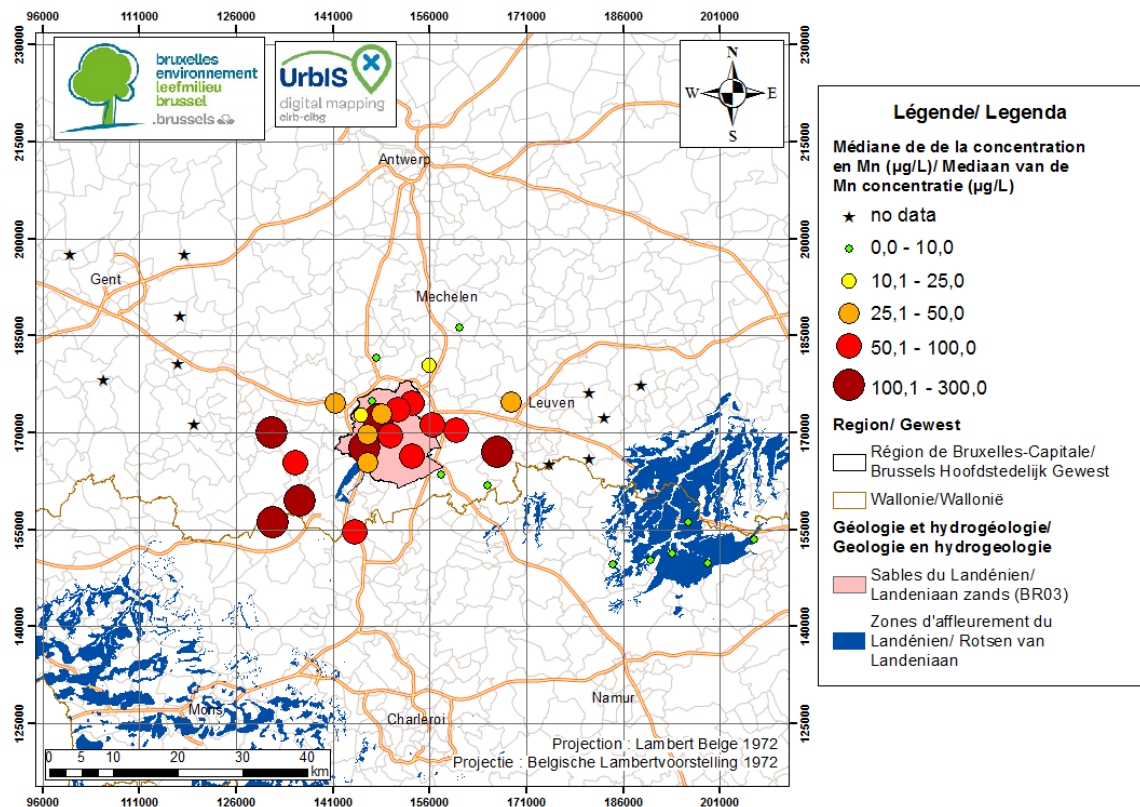


Figure 4-21 : Répartition spatiale de la concentration en Mn total dans l'aquifère du Landénien

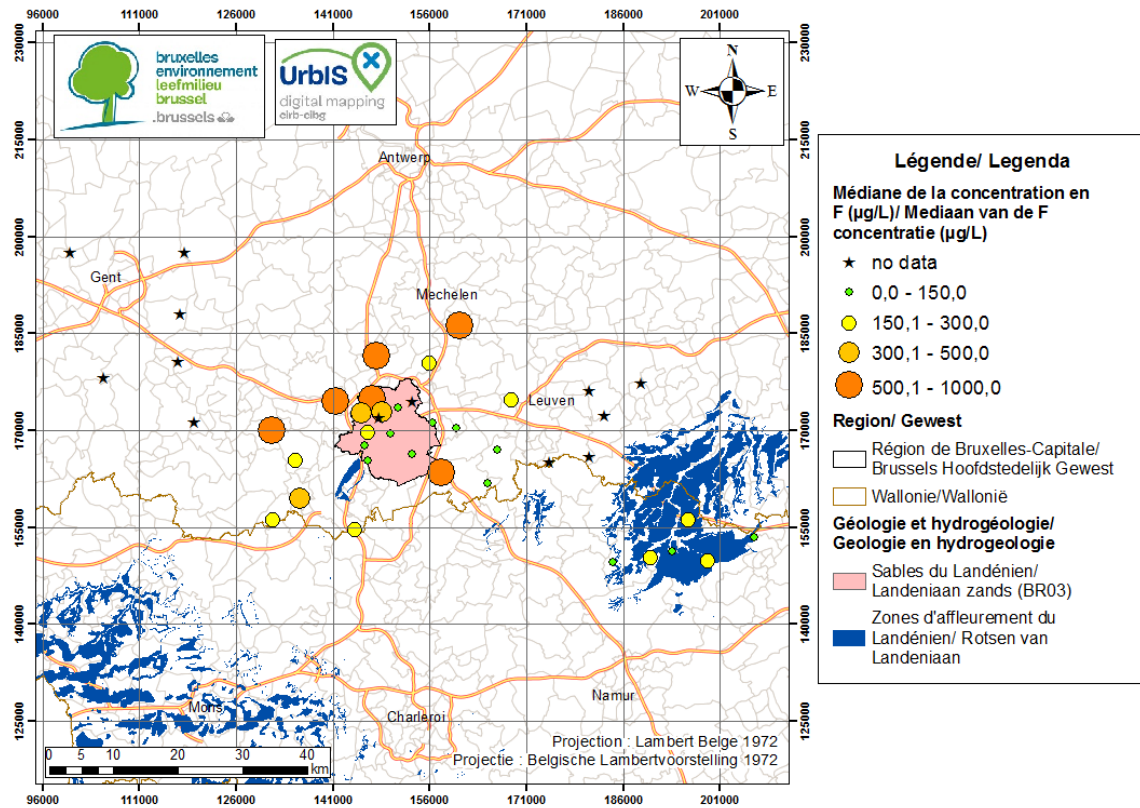


Figure 4-22 : Répartition spatiale de la concentration en F dans l'aquifère du Landénien

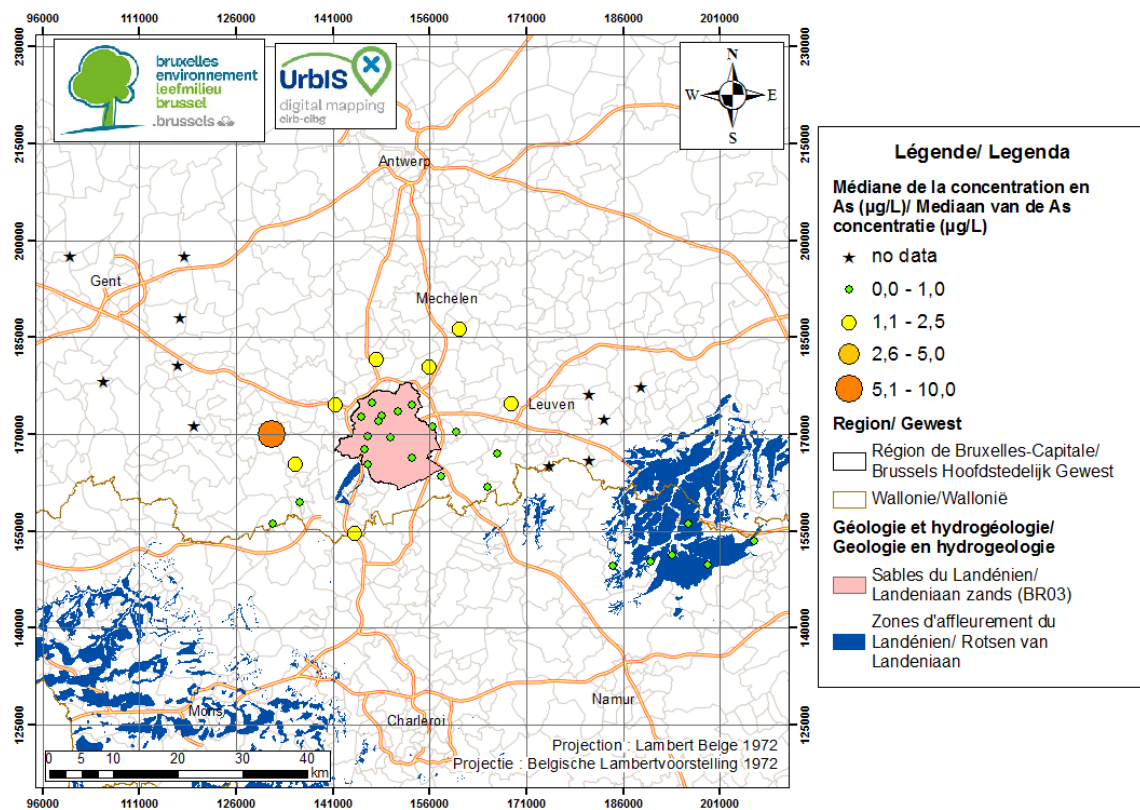


Figure 4-23 : Répartition spatiale de la concentration en As total dans l'aquifère du Landénien

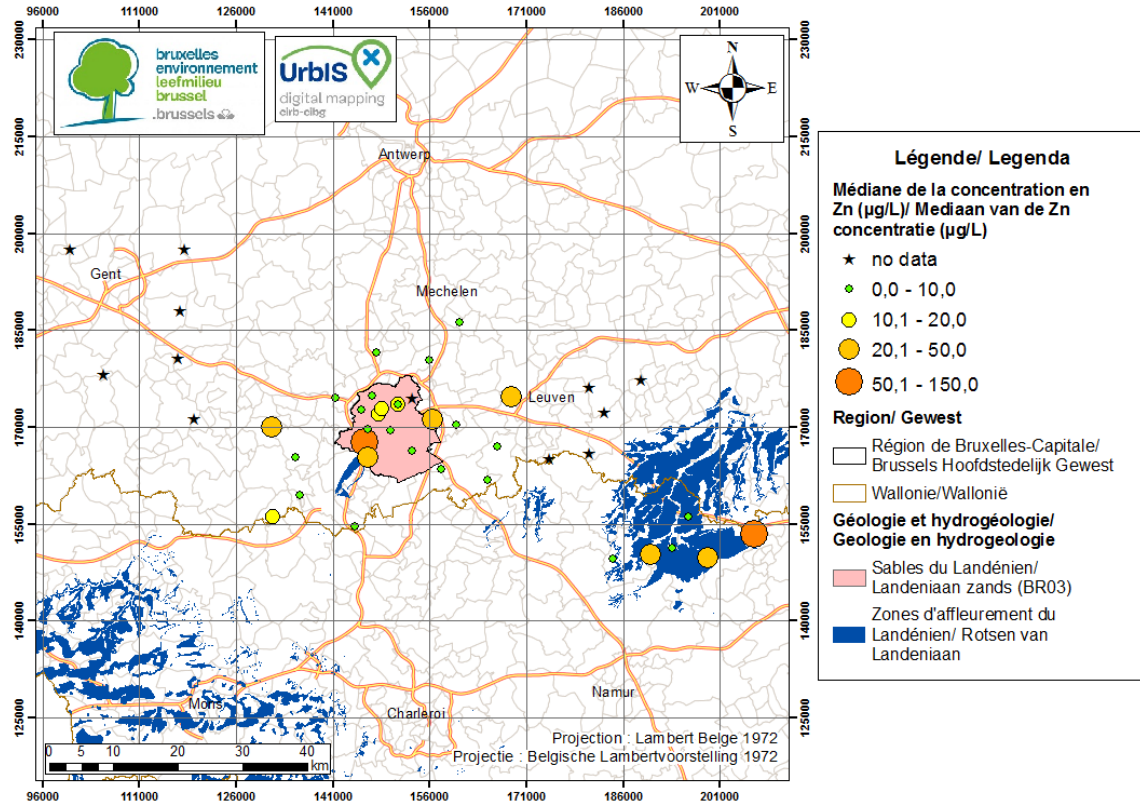


Figure 4-24 : Répartition spatiale de la concentration en Zn total dans l'aquifère du Landénien

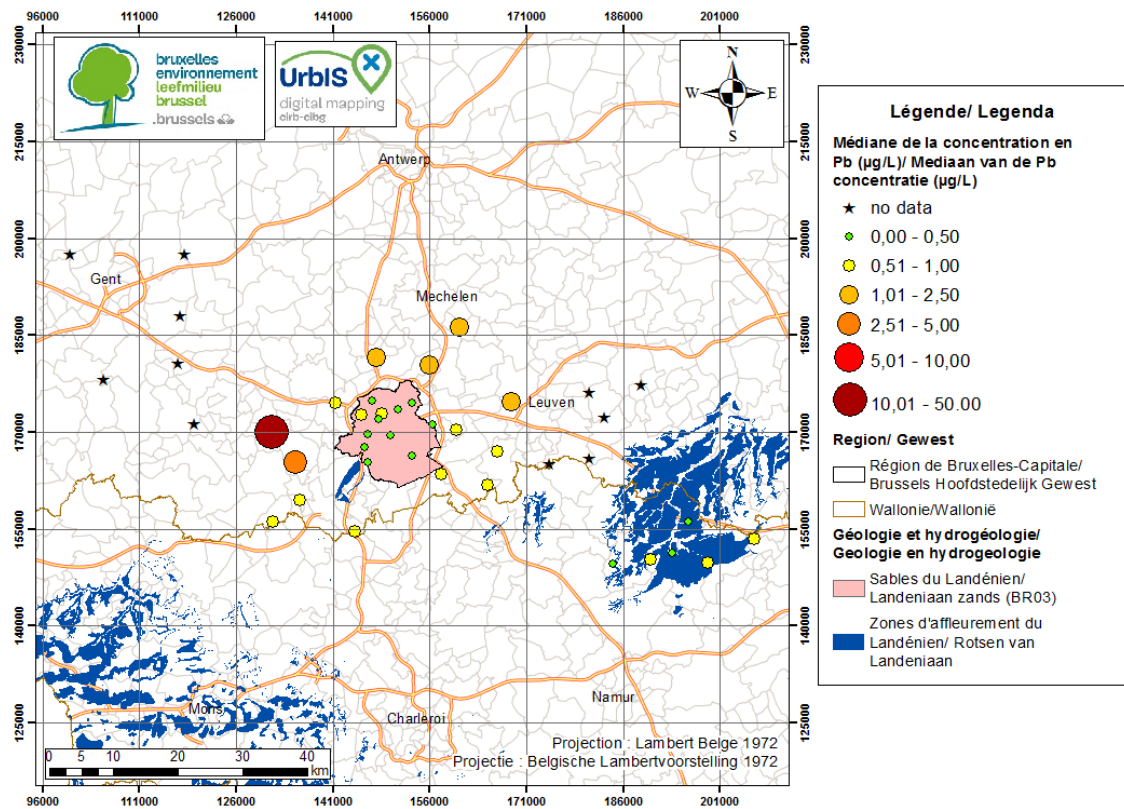


Figure 4-25 : Répartition spatiale de la concentration en Pb total dans l'aquifère du Landénien

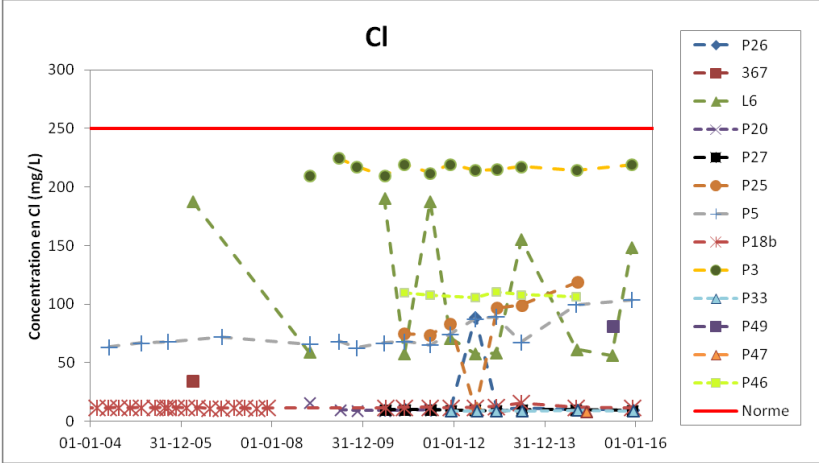
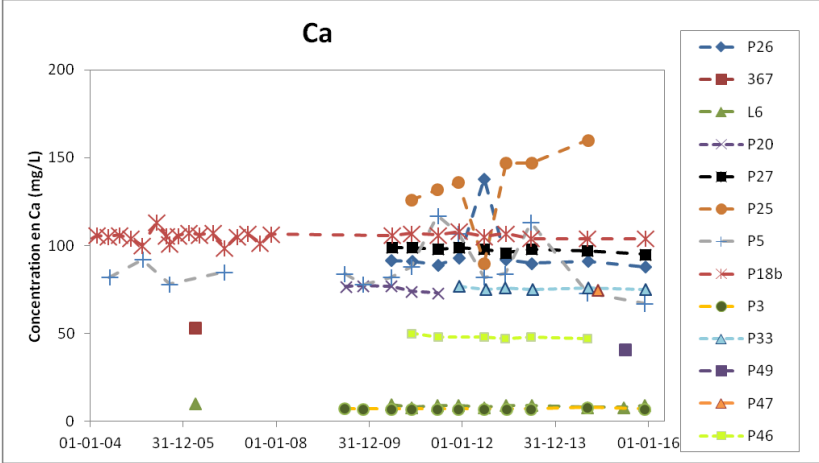
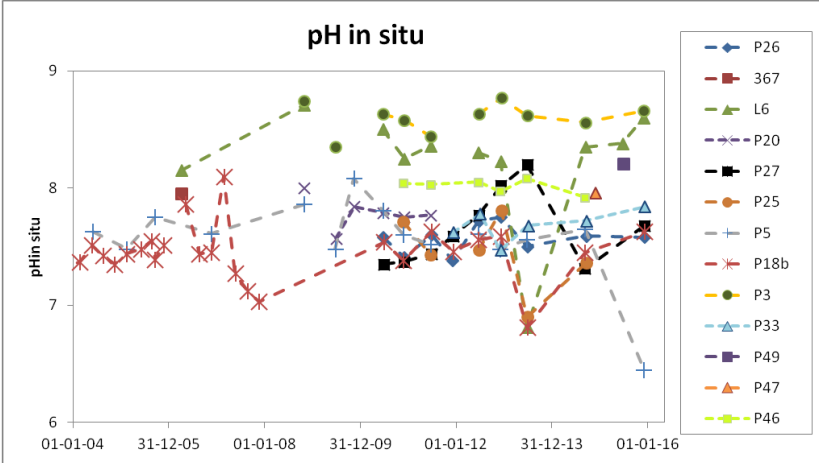
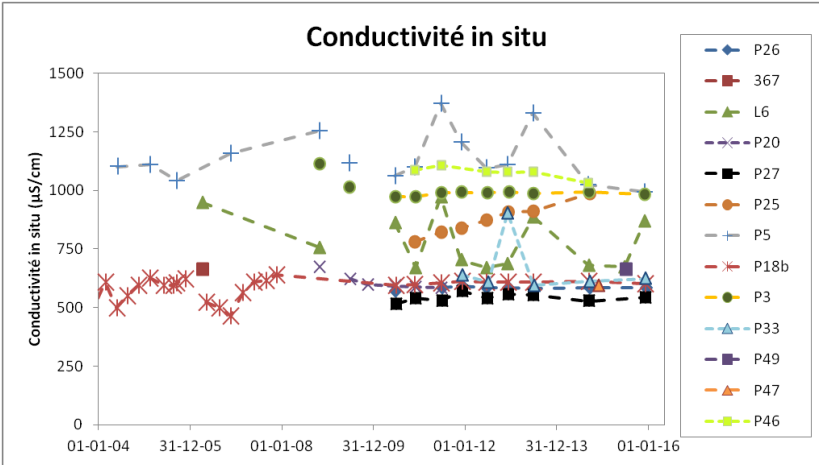
4.2.3. Analyse des variations temporelles des concentrations en éléments chimiques

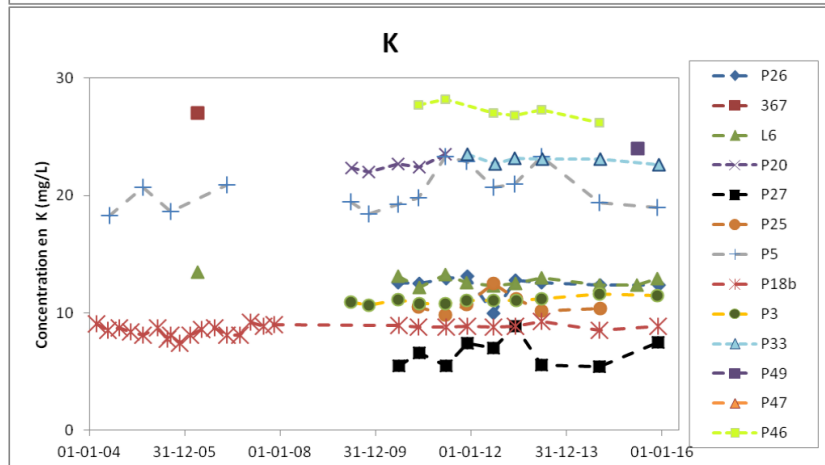
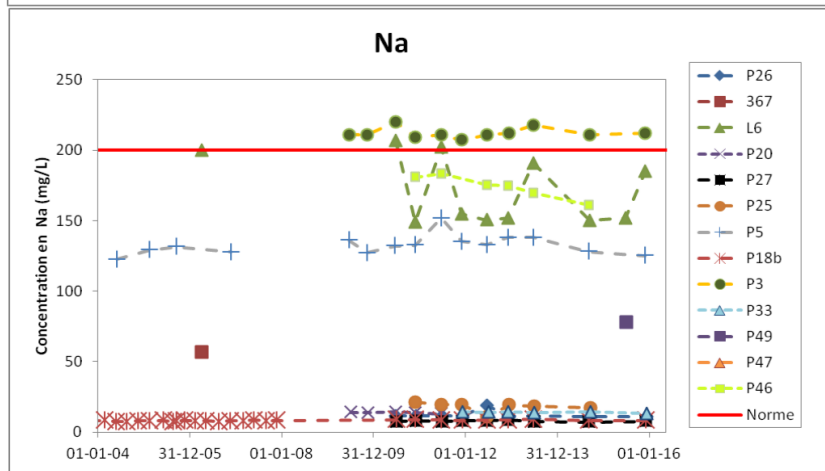
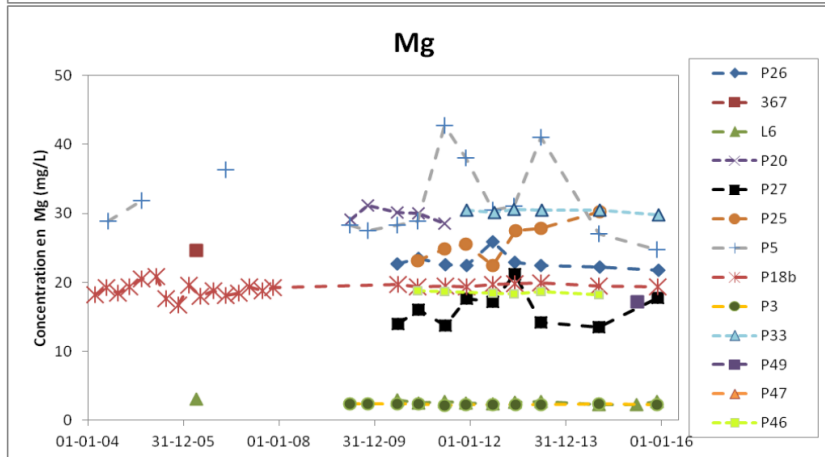
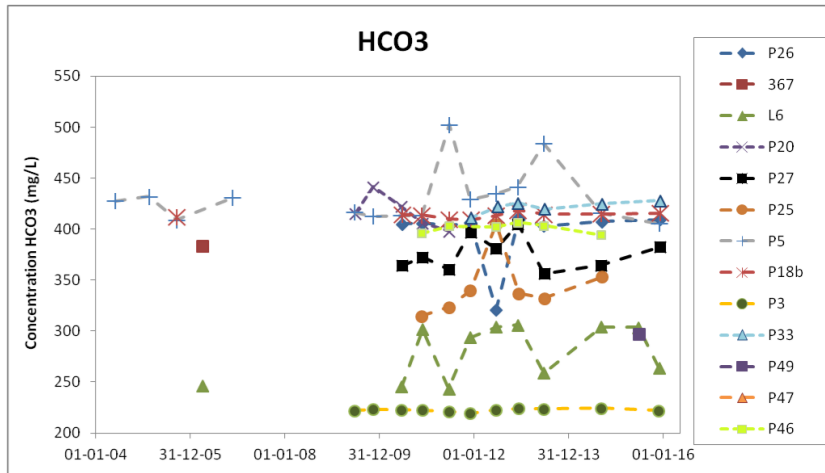
4.2.3.1. Graphe de l'évolution des concentrations au cours du temps

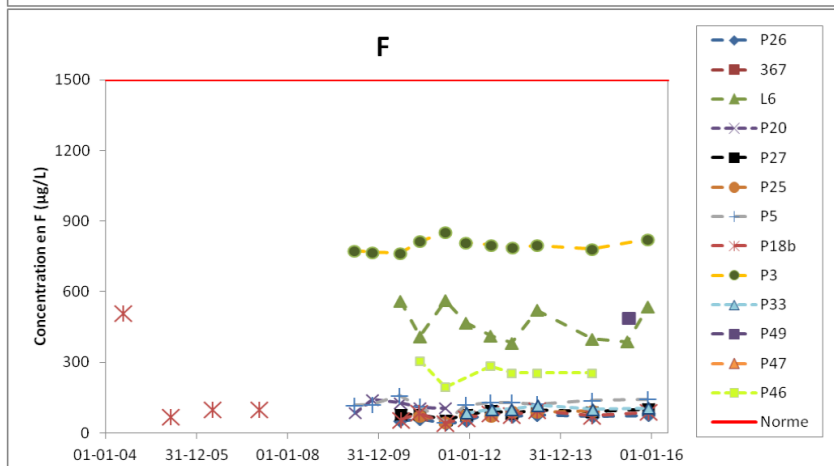
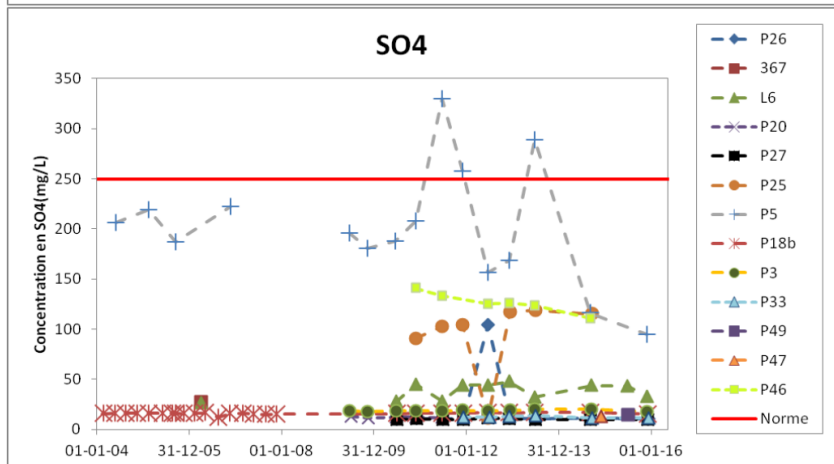
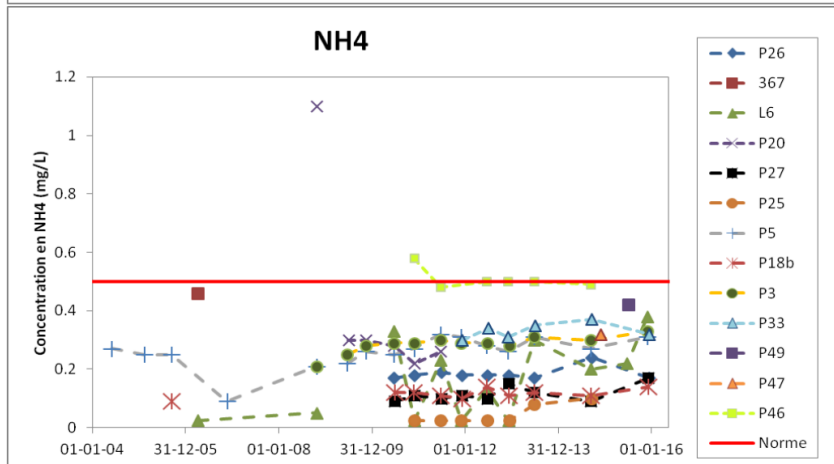
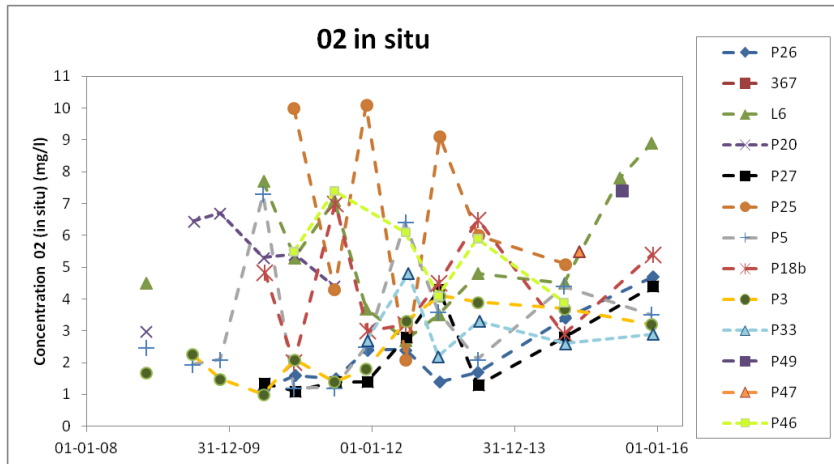
Les évolutions au cours des temps des principaux paramètres étudiés et des concentrations en éléments majeurs et mineurs sont représentées à la figure 4-26 pour la masse d'eau souterraine BR03 en Région de Bruxelles-Capitale. Les paramètres représentés sont la conductivité, le pH et les concentrations en Ca, Cl, HCO₃, Mg, Na, K, SO₄, O₂, NH₄, Fe, Mn, F, Zn, Pb. Les concentrations en NO₃ et As ne sont pas représentées car elles sont pour la plupart des analyses sous le seuil de quantification.

Pour de nombreux puits, les concentrations en éléments majeurs sont relativement stables au cours du temps mais pour certains, notamment les puits L6 et P5, on observe une certaine cyclicité. Concernant les concentrations en Fe et Mn, celles-ci sont plutôt variables pour la majorité des puits. Tous les puits présentent des concentrations en oxygène très variables et qui peuvent approcher voire dépasser 10 mg/L. Il a déjà été mentionné au chapitre précédent que cela ne correspond pas du tout à ce qui est attendu dans une nappe captive ou les conditions sont supposées être réductrices.

Les normes de potabilité (ou les paramètres indicateurs) sont également indiquées sur les graphes (traits rouges horizontaux) pour les paramètres où elles sont définies. Il y a un dépassement de la norme pour le Na systématiquement pour le point P3 et occasionnellement pour le point L6. Pour le NH₄, le point P46 présente des concentrations égales à la norme, avec une analyse qui la dépasse. Le point P5 présente des concentrations élevées en SO₄, avec trois dépassements de la norme constatés. Pratiquement tous les puits présentent des concentrations qui dépassent les valeurs indicatrices pour le Fe et le Mn à l'exception de L6, P3, P49.







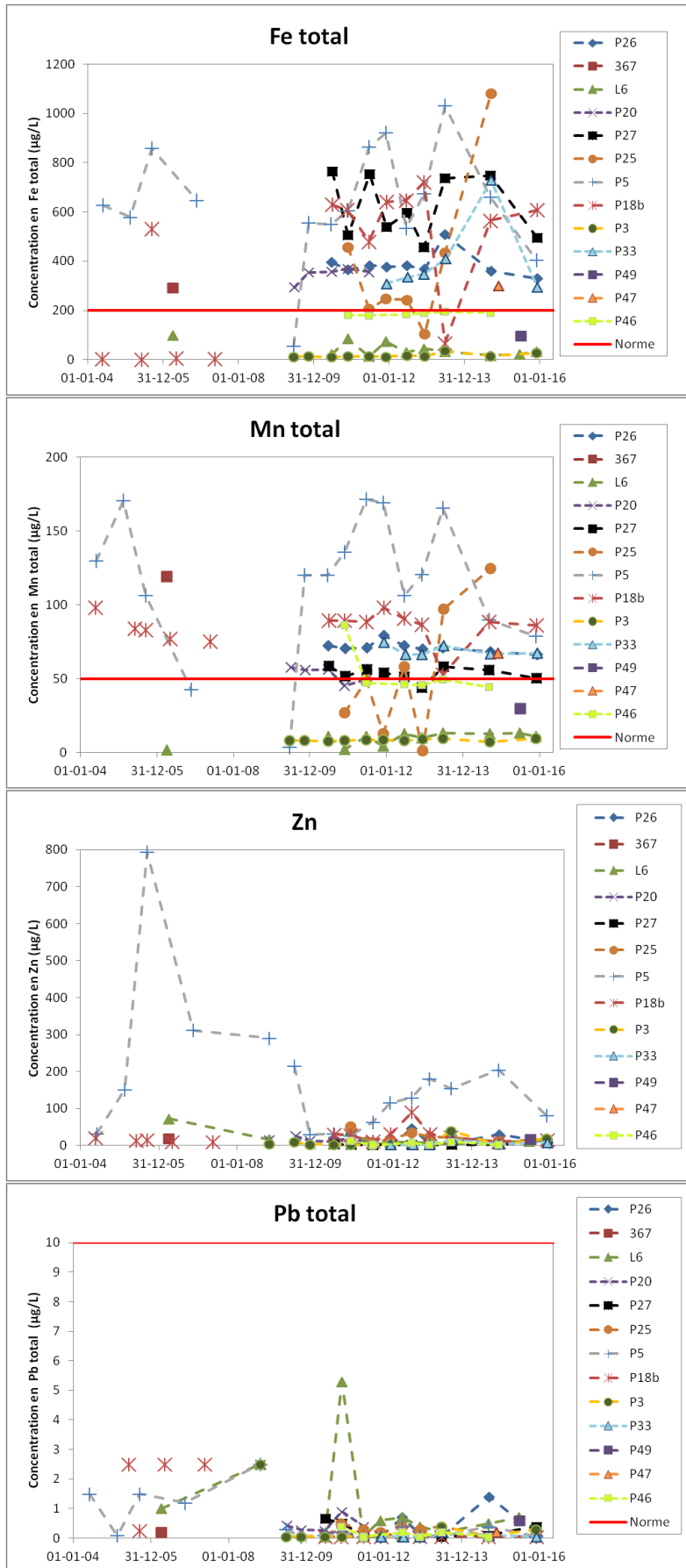


Figure 4-26 : Evolution des paramètres et des concentrations en éléments majeurs et mineurs au cours du temps de la masse d'eau BR03

4.2.3.2. Analyse de tendance

Une analyse de tendance a été réalisée sur 3 paramètres à risque correspondant à des éléments chimiques présents à des concentrations importantes dans la masse d'eau BR03 : le Cl, le Fe et le Mn. L'analyse de tendance a été réalisée par la méthode de régression de Mann-Kendall et uniquement sur les données disponibles sur la masse d'eau du Landénien en Région de Bruxelles-Capitale. Les résultats sont présentés aux tableaux 4-8, 4-9 et 4-10. L'analyse statistique est rarement significative (p -value < 0.05) mais le nombre de données est généralement assez faible ($N_d < 10$). La tendance a été calculée à partir de 2006 pour tous les points sauf le P18b pour lequel des données sont disponibles depuis 1984, ce qui permet de réaliser un test statistique avec une puissance plus élevée. Il faut cependant rester critique parce que la fiabilité des données antérieures à 2006 n'est pas garantie.

Les résultats pour lesquels une tendance significative est détectée sont mis en évidence en vert dans les tableaux 4-8, 4-9 et 4-10 et dans les figures 4-27, 4-28, 4-29. Le point P5 présente une tendance à la hausse en Cl relativement importante. Il y a une tendance à la baisse en Cl et en Fe dans le puits P18b. cependant sur la figure 4-28, la concentration en Fe diminue bien pour le point P18b jusqu'en 2007 mais après la tendance s'inverse avec une réaugmentation des concentrations. Le point P3 présente une tendance à la hausse en Fe et le point L6 présente une tendance à la hausse en Mn.

Les puits pour lesquels aucune tendance significative n'a été démontrée à cause d'un nombre d'échantillons trop réduit, il est recommandé de continuer le suivi qualitatif et de procéder ultérieurement à une analyse statistique avec plus de données.

Cl						
Station	Date début	Date fin	Nb. pts	p-value	Significatif (p<0.05)	Pente (mg/l an)
P47	27-11-14		1	/	/	
L6	06-04-06	01-12-15	12	0.28	N	
367	06-04-06		1	/	/	
P24	28-10-08	22-06-11	6	0.84	N	
P33	07-12-11	09-12-15	6	0.89	N	
P46	26-11-10	09-09-14	6	0.49	N	
P3	28-10-08	30-11-15	12	0.69	N	
P27	29-06-10	07-12-15	9	0.19	N	
P25	26-11-10	18-09-14	7	0.16	N	
P5	21-11-06	01-12-15	13	0.03	O	4.68
P49	02-07-15		1	/	/	
P18b	11-07-84	07-12-15	82	0.00	O	-0.08
P26	24-06-10	10-12-15	9	0.97	N	0

Tableau 4-8 : Pente calculé pour l'évolution de la concentration en Cl dans la masse d'eau BR03 par la méthode de Mann Kendall (/ : impossibilité de calcul statistiques)

Fe						
Station	Date début	Date fin	N. pts	p-value	Significatif (p<0.05)	Pente (µg/l an)

P47	27-11-14		1	/	/	
L6	06-04-06	01-12-15	11	0.39	N	
367	06-04-06		1	/	/	
P24	30-06-09	22-06-11	5	/	/	
P33	07-12-11	09-12-15	6	0.61	N	
P46	26-11-10	09-09-14	6	0.05	N	
P3	23-06-09	30-11-15	11	0.03	O	1.06
P27	29-06-10	07-12-15	9	0.46	N	
P25	26-11-10	18-09-14	7	0.67	N	
P5	21-11-06	01-12-15	12	0.48	N	
P49	02-07-15		1	/	/	
P18b	20-10-83	07-12-15	66	0.00	O	-18.44
P26	24-06-10	10-12-15	9	0.29	N	

Tableau 4-9 : Pente calculé pour l'évolution de la concentration en Fe dans la masse d'eau BR03 par la méthode de Mann Kendall (/ : impossibilité de calcul statistiques)

Mn						
Station	Date début	Date fin	Nb. pts	p-value	Significatif (p<0.05)	Pente (µg/l an)
P47	27-11-14		1	/	/	
L6	06-04-06	01-12-15	11	0.04	O	0.94
367	06-04-06		1	/	/	
P24	30-06-09	22-06-11	5	/	/	
P33	07-12-11	09-12-15	6	0.92	N	0.11
P46	26-11-10	09-09-14	6	0.10	N	-1
P3	23-06-09	30-11-15	11	0.29	N	0.23
P27	29-06-10	07-12-15	9	0.24	N	-0.76
P25	26-11-10	18-09-14	7	0.25	N	24.02
P5	21-11-06	01-12-15	12	0.67	N	5.03
P49	02-07-15		1	/	/	
P18b	20-10-83	07-12-15	66	0.76	N	0.04
P26	24-06-10	10-12-15	9	0.05	N	-1.01

Tableau 4-10 : Pente calculé pour l'évolution de la concentration en Mn dans la masse d'eau BR03 par la méthode de Mann Kendall (/ : impossibilité de calcul statistiques)

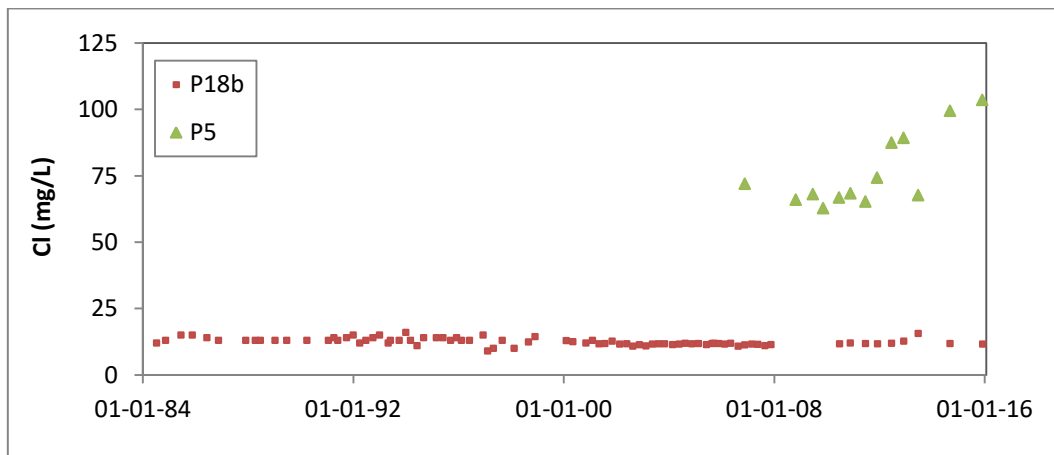


Figure 4-27: Evolution de la concentration en Cl pour les stations de la masse d'eau BR03 où la pente est significative

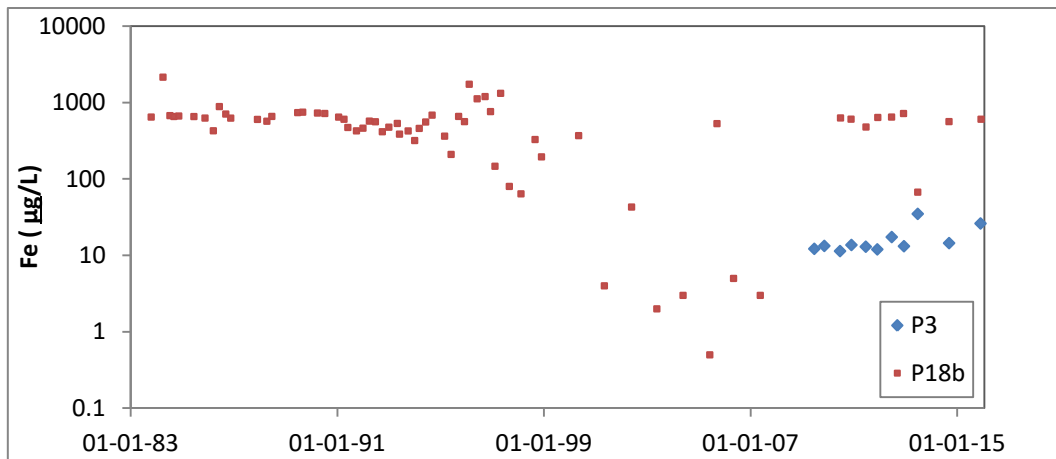


Figure 4-28 : Evolution de la concentration en Fe pour les stations de la masse d'eau BR03 où la pente est significative

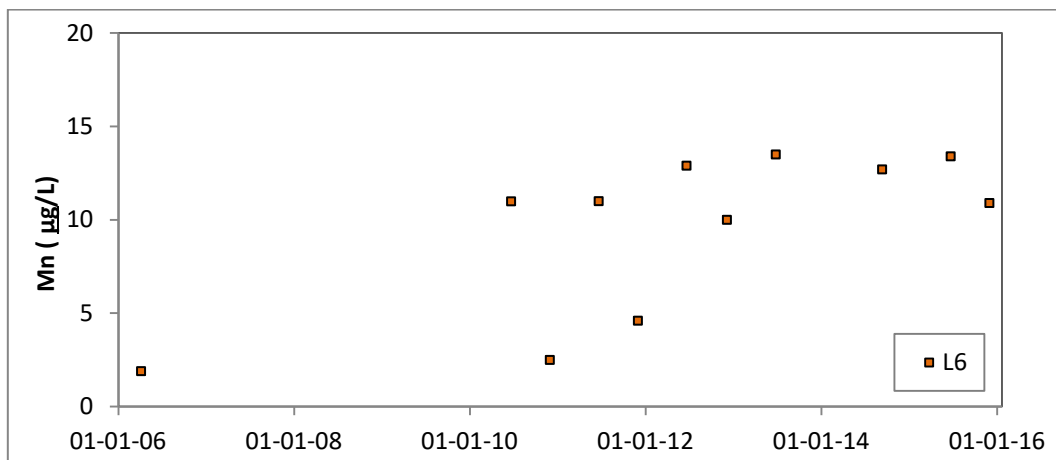


Figure 4-29 : Evolution de la concentration en Mn pour les stations de la masse d'eau BR03 où la pente est significative

4.2.3.3. Influence des variations piézométriques

Des données piézométriques relatives à la masse d'eau BR03 ont également été fournies. Une carte localisant les stations piézométriques ainsi qu'une chronique des niveaux piézométriques se trouvent à l'annexe 2. Aux figures 4-30 à 4-34, l'évolution des concentrations en éléments majeurs et en Fe et Mn sont représentés pour certains puits avec, en parallèle, l'évolution du niveau piézométrique. L'objectif est de mettre en évidence une éventuelle corrélation entre des variations de piézométrie et de concentrations en éléments chimiques dans les eaux souterraines. La piézométrie étant suivie sur un réseau de monitoring distinct, elle est rarement connue pour les stations de monitoring qualitatif. Sur les graphes tracés, la piézométrie indiquée est donc celle de la station piézométrique la plus proche.

Pour la station L6, certaines variations de concentrations semblent concomitantes aux variations piézométriques. Cependant, il ne semble pas que les variations piézométriques entraînent systématiquement un changement dans les concentrations. L'échantillonnage n'est peut-être pas assez régulier pour mettre en évidence des relations de ce type. De plus, la piézométrie provient généralement d'une station à proximité mais les variations du niveau piézométriques ne sont pas forcément identiques.

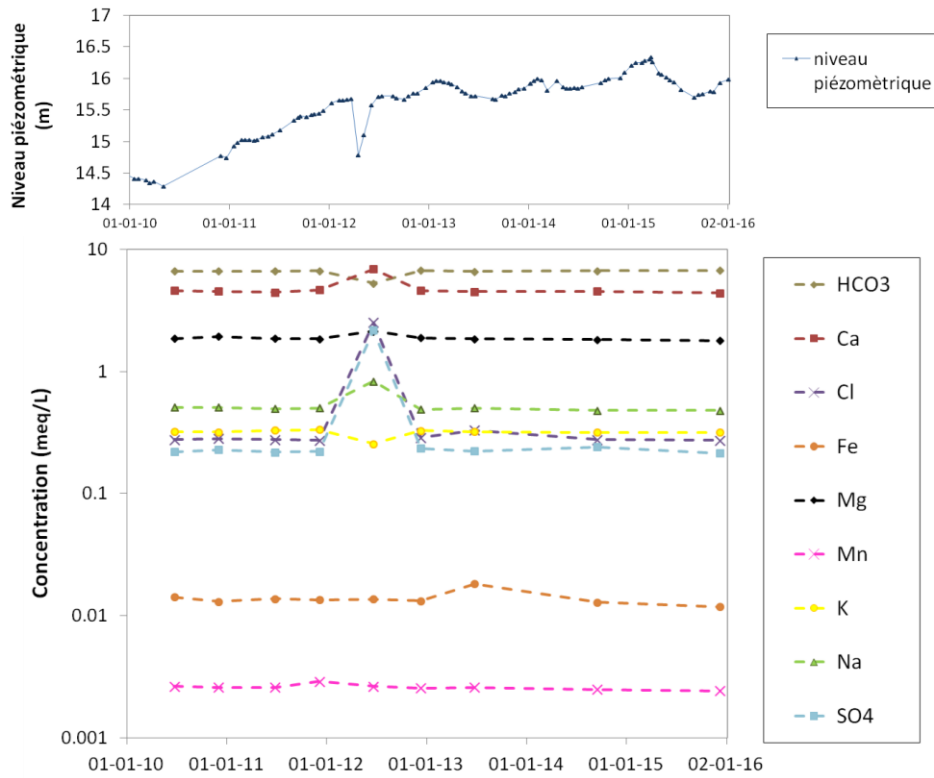


Figure 4-30 : Evolution des concentrations de la station P26 et variation piézométrique de la station la plus proche (520_L4)

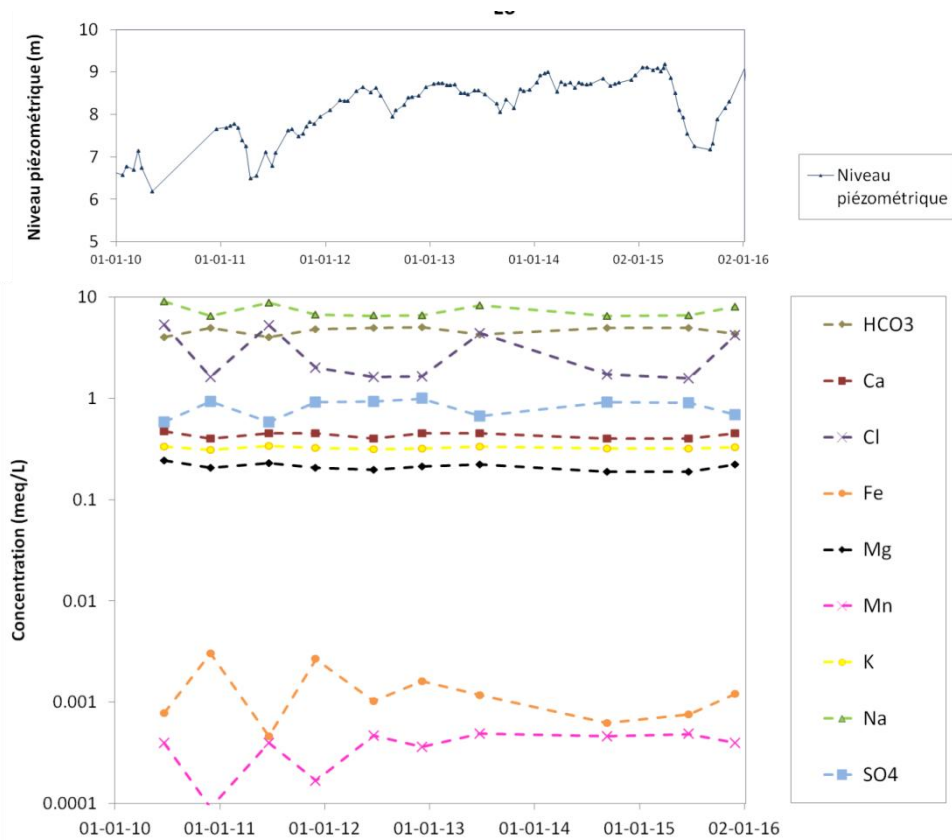


Figure 4-31 : Evolution des concentrations de la station L6 et variation piézométrique de la station la plus proche (522_L6)

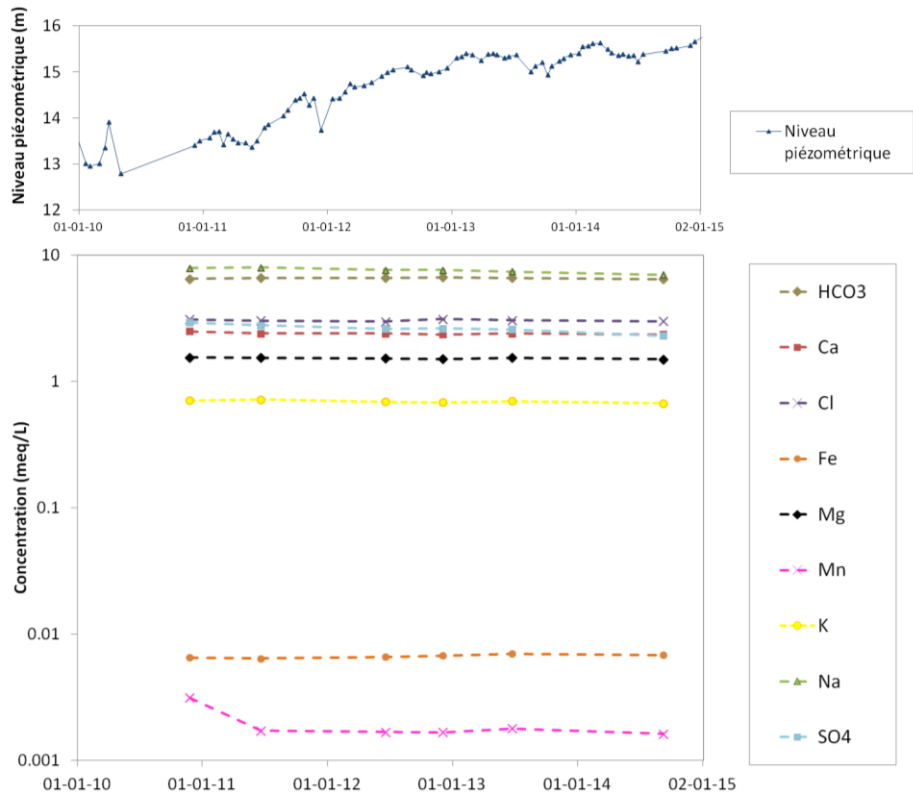


Figure 4-32 : Evolution des concentrations de la station P46 et variation piézométrique de la station la plus proche (523_L8)

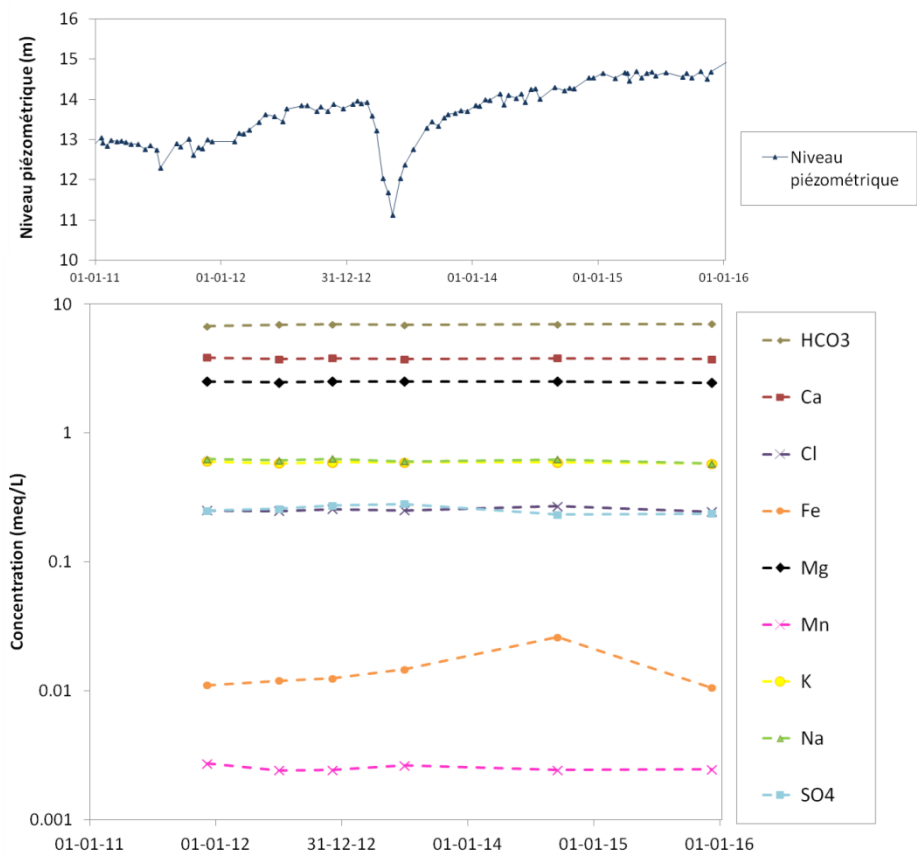


Figure 4-33 : Evolution des concentrations de la station P33 et variation piézométrique de la station la plus proche (518_L2)

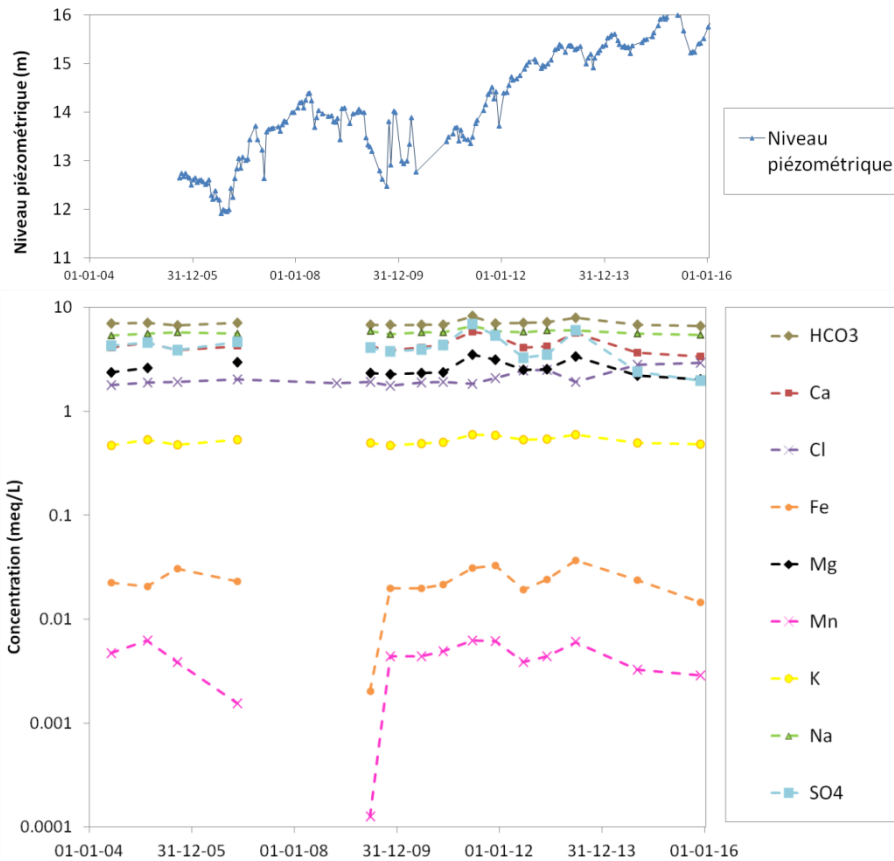


Figure 4-34 : Evolution des concentrations de la station P5 et variation piézométrique de la station la plus proche (523_L8)

4.2.4. Origine de la salinité des eaux souterraines

A la figure 4-35, l'évolution de la concentration en Na est représentée en fonction de la concentration en Cl. 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 plupart des points en Région wallonne et un point en Région de Bruxelles-Capitale (P25) 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).

Le rapport Br/Cl est représenté en fonction de la concentration en Cl pour les points de la Région de Bruxelles-Capitale et deux points de la Région wallonne (figure 4-36). Les concentrations en Br sont disponibles pour quelques points en Wallonie et ne sont pas disponibles pour les points d'échantillonnage situés en Région flamande. Les stations de la Région de Bruxelles-Capitale présentent généralement des rapports Br/Cl égaux ou supérieurs à celui de l'eau de mer ($3,3 \times 10^{-3}$). Ceci indique que le Cl a vraisemblablement une

origine marine. Les deux points situés en Région wallonne et les points P25 et P46 présentent des rapports Br/Cl inférieurs à celui de l'eau de mer et supérieur à celui de la halite (5×10^{-4}). D'après Müller (2006), la pollution de la nappe par de l'eau usée peut diminuer le ratio masse de Br/Cl en dessous de 2.25×10^{-3} . Les points situés en Région wallonne avaient déjà été identifiés comme contaminés à cause de leur teneur en nitrate et en pesticides et le point P25 avait déjà été mis en évidence à cause notamment de son rapport Na/Cl qui semblait indiquer une contamination. Sur base du même raisonnement, d'après le rapport Br/Cl, le point P46 est probablement aussi impacté par une contamination anthropique (cela n'avait pas été mis en évidence précédemment).

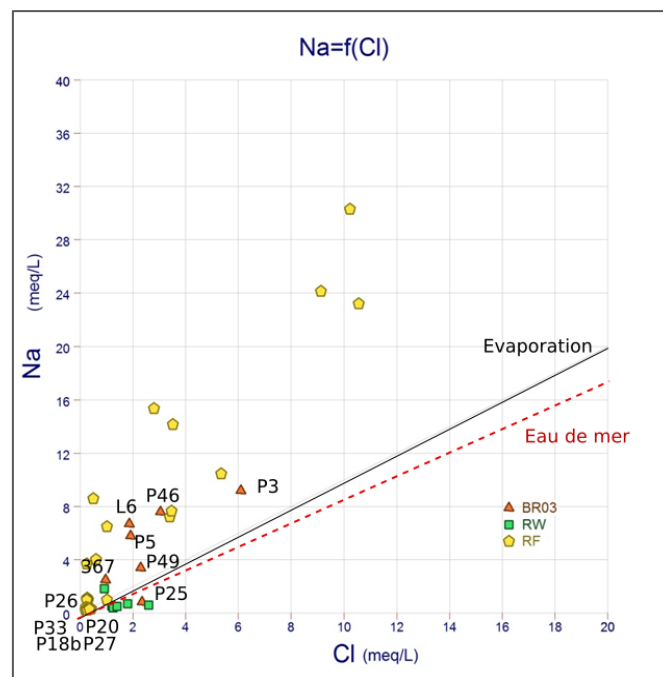


Figure 4-35 : Graphe de la concentration en Na par rapport à la concentration en Cl

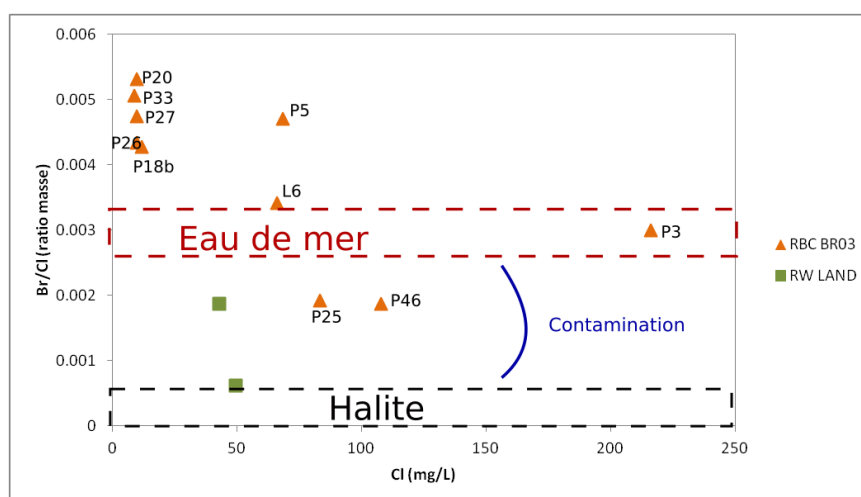


Figure 4-36 : Rapport Br/Cl en fonction de la concentration en Cl pour la masse d'eau du Landénien

Les indices de saturation de la calcite, du gypse et de la halite (figure 4-37) 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 Landénien 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 qu'elle influence la minéralisation de l'eau en y contrôlant la concentration en calcium.

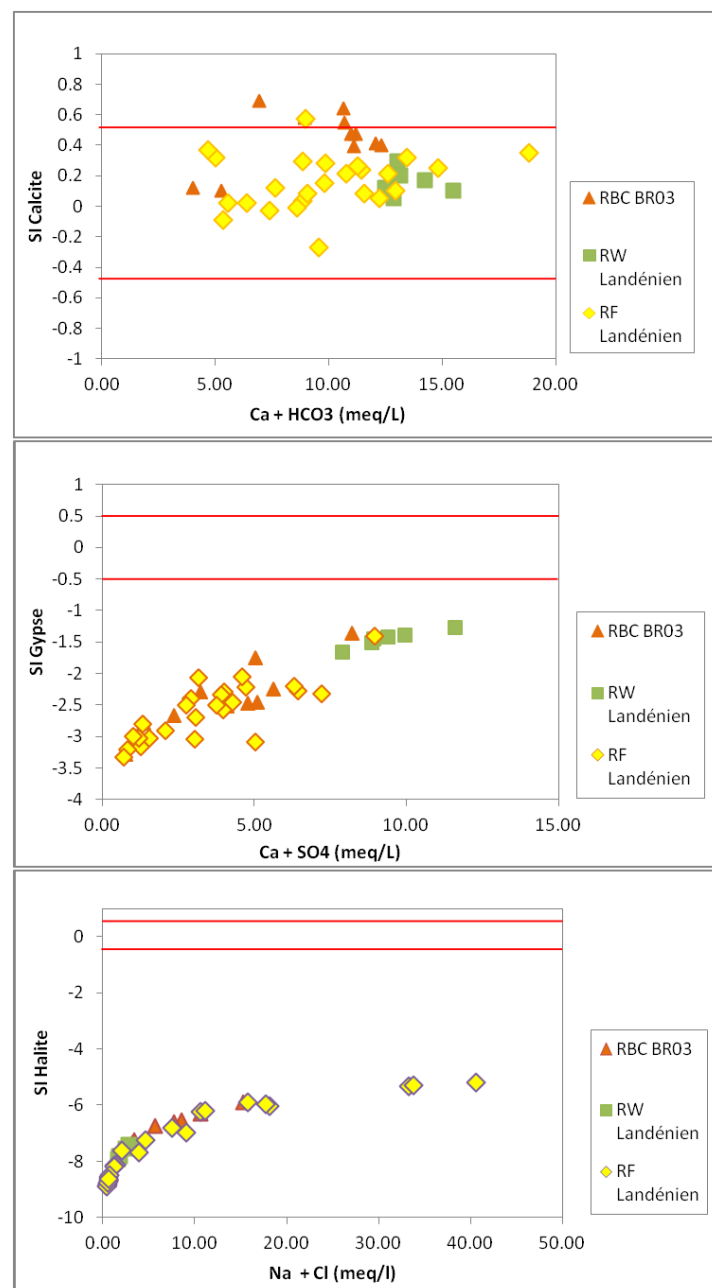


Figure 4-37 : Indice de saturation (SI) de la calcite, du gypse et de la halite en fonction des éléments chimiques susceptibles d'être contrôlés par ces minéraux

Le graphique (Na+K)-Cl en fonction de (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄), permet une fois encore de mettre en évidence les échanges cationiques (figure 4-38). Les points s'alignent sur une

droite de pente -1. Les eaux de la Région wallonne et quelques points de la Région de Bruxelles-Capitale avoisinent le point 0-0. Le reste des points de la Région de Bruxelles-Capitale et ceux de la Région flamande évoluent sur la droite de pente -1 avec un rapport (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) négatif et un rapport (Na+K)-Cl positif. Cela reflète qu'il y a des échanges cationiques, le Ca présent dans l'eau étant remplacé par du Na initialement fixé sur les sites d'adsorption des matériaux géologiques constitutifs du sous-sol.

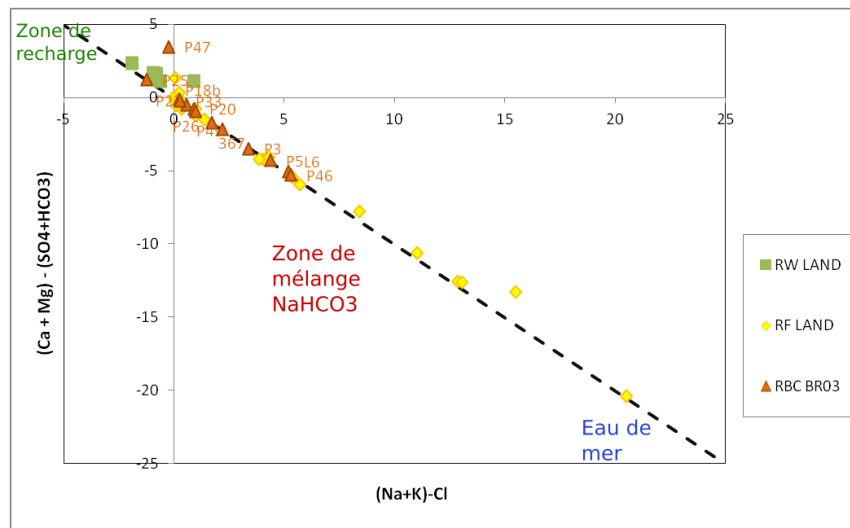


Figure 4-38 : Diagramme (Na+K)-Cl en fonction de (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄)

4.2.5. Statistique descriptive

4.2.5.1. Principaux paramètres

Les principaux paramètres de statistique descriptive sont repris dans le tableau 4-11. Ils ont été calculés pour l'ensemble des stations d'échantillonnage de la masse d'eau souterraine BR03 et celles qui ont été sélectionnées en Région wallonne et en Région flamande dans le chapitre 4.1.1. 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 (CE, pH, O₂ dissous) et des concentrations en éléments majeurs et mineurs de chaque station d'échantillonnage. Le nombre de stations d'échantillonnage mesurant chaque paramètre est également mentionné. Pour les métaux, les statistiques ont été effectuées pour la fraction totale à l'exception du fer pour lesquelles elles ont été également effectuées sur la fraction dissoute parce que la fraction totale est uniquement mesurée en Région de Bruxelles-Capitale contrairement en Flandre et en Wallonie où uniquement la fraction dissoute est mesurée.

Paramètre	Unité	Nb. stations	Min	P25	Moyenne	Médiane	P75	P90	Max
Al (total)	µg/L	42	1.0	4.3	88.6	10.0	15.0	19.6	3300.0
As (total)	µg/L	33	0.2	0.5	1.0	0.5	0.5	1.8	9.6
B (total)	µg/L	33	9.0	50.0	215.2	87.0	313.8	650.8	840.0
Ba (total)	µg/L	18	2.0	12.9	39.0	26.9	36.8	45.2	294.0
Br	µg/L	12	30.0	45.8	158.3	65.5	207.6	312.0	645.5
Ca	mg/L	44	5.0	14.9	72.3	74.8	109.5	142.6	187.0
Cl	mg/L	44	7.3	9.7	68.1	33.8	85.6	170.5	374.0
COT	mg/L	36	0.5	0.5	1.4	1.0	1.5	2.7	7.0
EC	(µS/cm)	44	441.5	604.6	890.7	736.0	870.0	1384.2	3055.0
F	µg/L	31	69.0	114.0	303.5	160.0	420.3	796.0	990.0
Fe (total)	µg/L	13	13.2	186.6	313.01	298.9	375.6	604.6	625.8
Fe (dissous)	µg/L	31	1	21.25	481.1	80	392.5	1235	4965.0
HCO3	mg/L	43	222.8	306.8	404.3	374.5	426.5	551.3	1125.5
K	mg/L	43	0.5	5.3	11.1	10.5	15.0	22.4	27.2
Mg	mg/L	43	0.9	5.0	13.6	15.0	18.6	25.4	30.5
Mn (total)	µg/L	33	0.15	7.5	59.1	49.0	88.3	120.0	280.0
Na	mg/L	43	5.5	9.8	109.8	23.0	160.8	308.6	696.4
NH4	mg/L	44	0.03	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5
Ni	µg/L	27	1.0	1.0	6.6	2.0	2.5	2.5	130.0
NO3	mg/L	44	0.1	0.1	8.2	0.5	1.0	32.6	101.9
O2	mg/L	40	0.05	0.1	2.7	1.6	5.3	5.8	10.6
Pb (total)	µg/L	33	0.05	0.1	2.2	0.6	1.0	1.8	46.0
pH		44	7.0	7.3	7.7	7.6	8.2	8.4	8.7
SO4	mg/L	44	2.4	13.2	47.1	19.4	84.2	109.7	191.9
Sr	mg/L	18	0.09	0.7	126.3	0.9	242.6	317.9	839.5
Zn (total)	µg/L	32	1.0	2.93	17.42	6.60	18.85	38.15	129.00

Tableau 4-11 : Principaux paramètres statistiques du Landénien

4.2.5.2. Distribution des paramètres et éléments

Aux figures 4-39 et 4-40, les histogrammes des paramètres de terrain, des concentrations en éléments majeurs et mineurs sont représentées. Les histogrammes ont également été tracés pour l'ensemble du jeu de données du Landénien (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 pour les paramètres de terrain (CE, pH, O₂ dissous) et des concentrations en éléments majeurs et mineurs de 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. Pour la plupart des éléments, la distribution est asymétrique et l'histogramme est fortement étiré vers la droite.

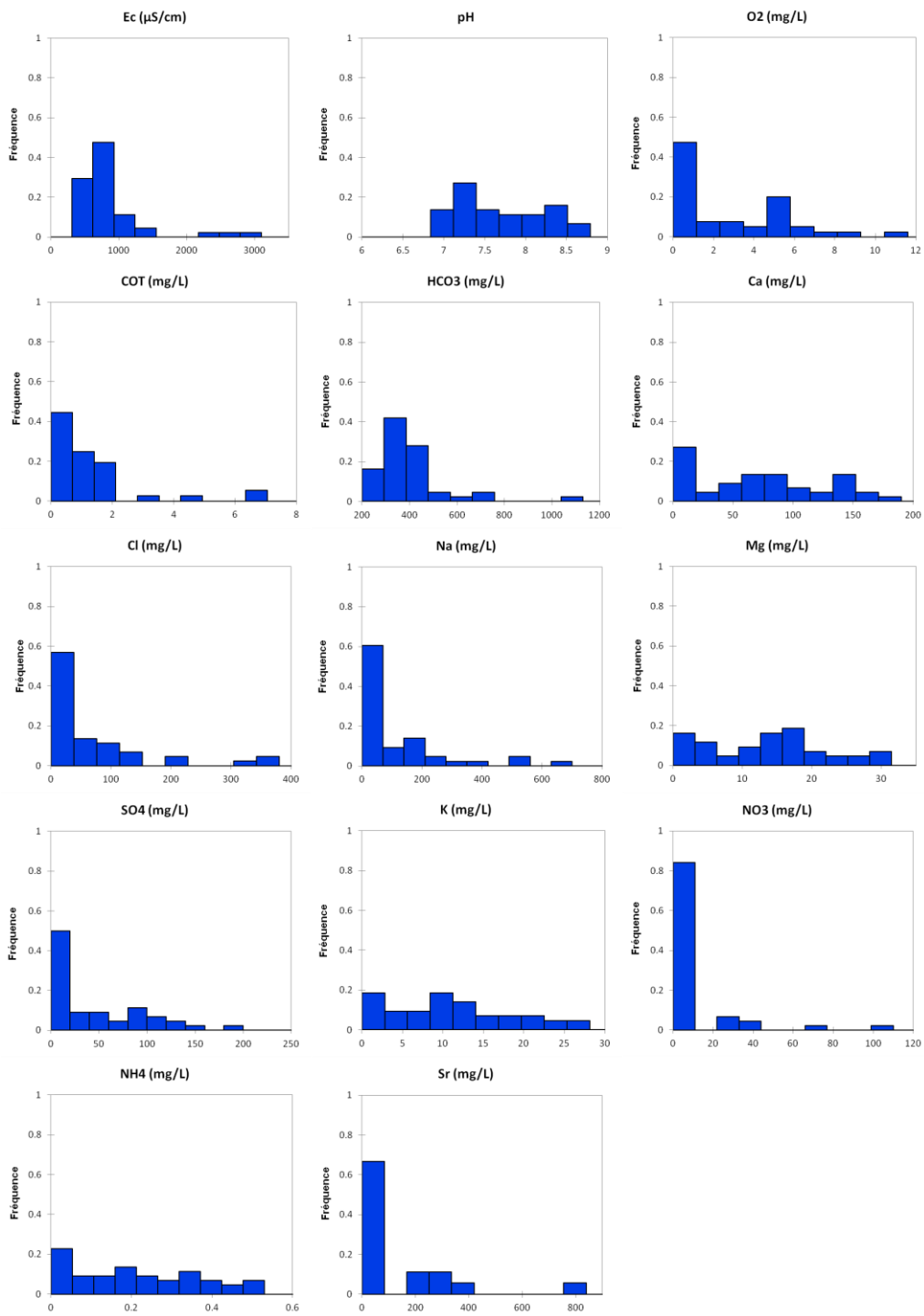


Figure 4-39: Histogrammes illustrant la distribution des paramètres de terrain et des éléments majeurs du Landénien

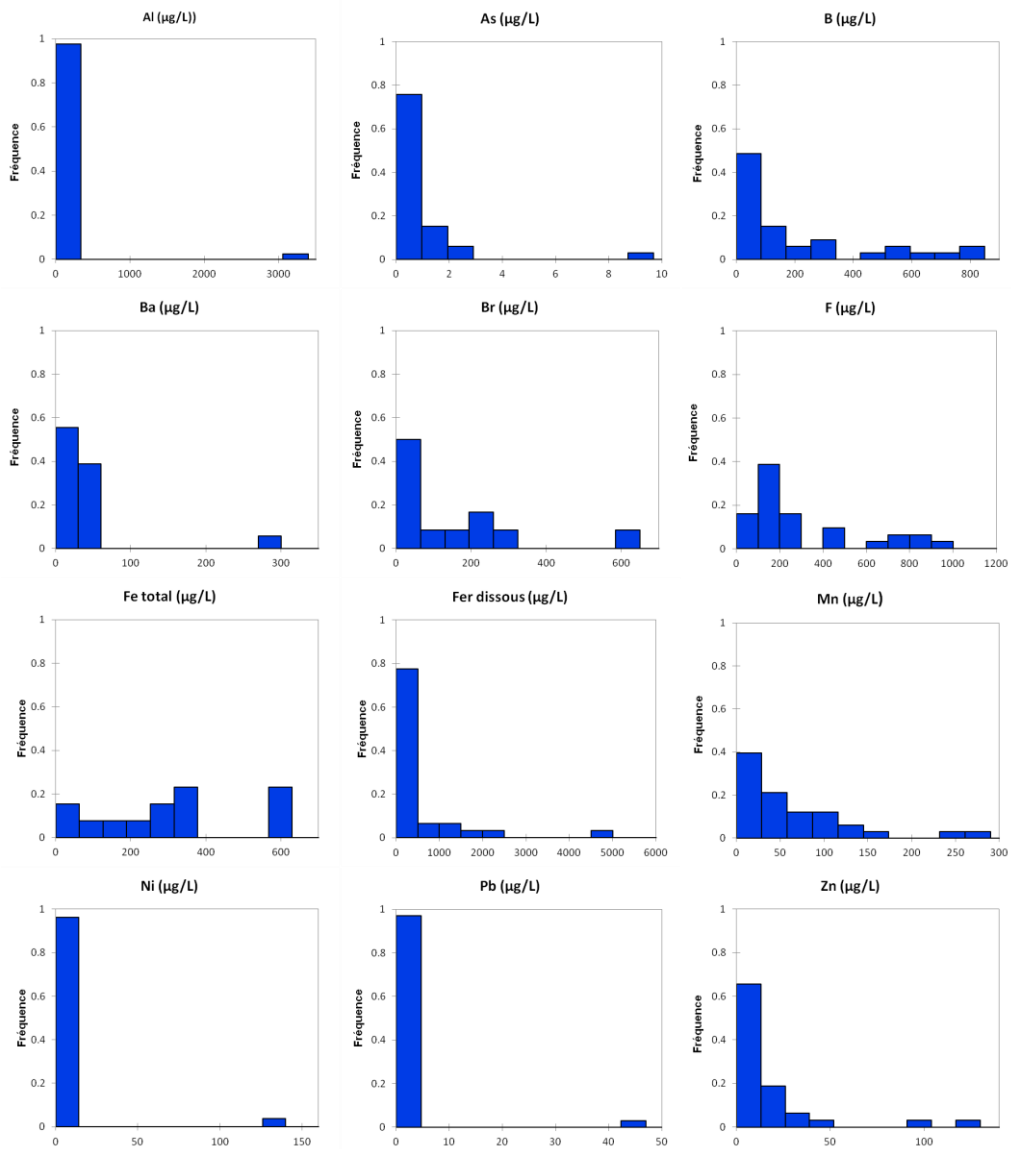


Figure 4-40 : Histogrammes illustrant la distribution des principaux éléments mineurs du Landénien (pour les métaux, il s’agit de la fraction totale sauf pour le Fe où la fraction dissoute est également représentée)

4.2.5.3. Différence entre les régions

Pour visualiser la différence entre les régions des diagrammes de type « boxplot » ont été utilisés (figures 4-41 et 4-42). Les données utilisées sont les médianes des valeurs disponibles pour les paramètres de terrain, et des concentrations en certains éléments majeurs et mineurs de chaque station d’échantillonnage. Les diagrammes de type « boxplot » permettent de visualiser les minimum et maximum, les percentiles 10, 25, 50 (la médiane), 75 et 90. La moyenne est également représentée par une croix rouge. Les paramètres qui ont été représentés sont le pH, certains éléments majeurs et mineurs. En Flandre, les valeurs de pH sont plus élevées, ainsi que les concentrations en Cl, NH₄, B, F, la plupart des métaux et métalloïdes à l’exception du Zn. En Wallonie, les concentrations sont plus élevées en O₂, Ca, SO₄, NO₃ et Zn. En Région de Bruxelles-Capitale, les concentrations sont généralement intermédiaires par rapport à celles observées dans les deux autres régions. Pour la Région de Bruxelles-Capitale et la Région flamande, les boxplots sont plus étirés

probablement parce que le jeu de données est plus grand mais surtout parce que ces régions comprennent la zone de transition entre les eaux de recharge récentes et les eaux marines plus anciennes, ainsi que des eaux caractérisées par des conditions réductrices variées.

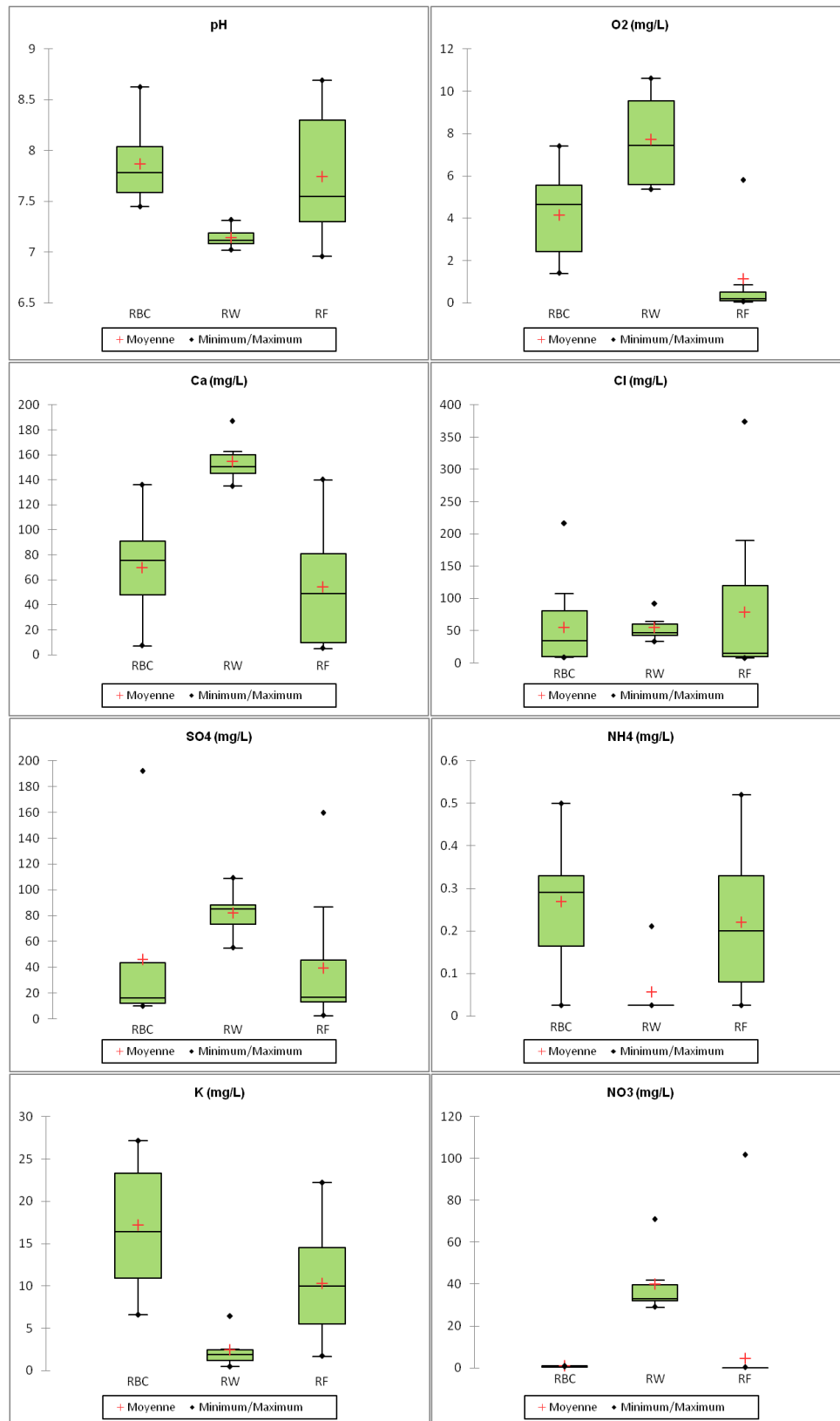


Figure 4-41 : Boxplots illustrant la distribution de quelques paramètres et éléments majeurs du Landénien

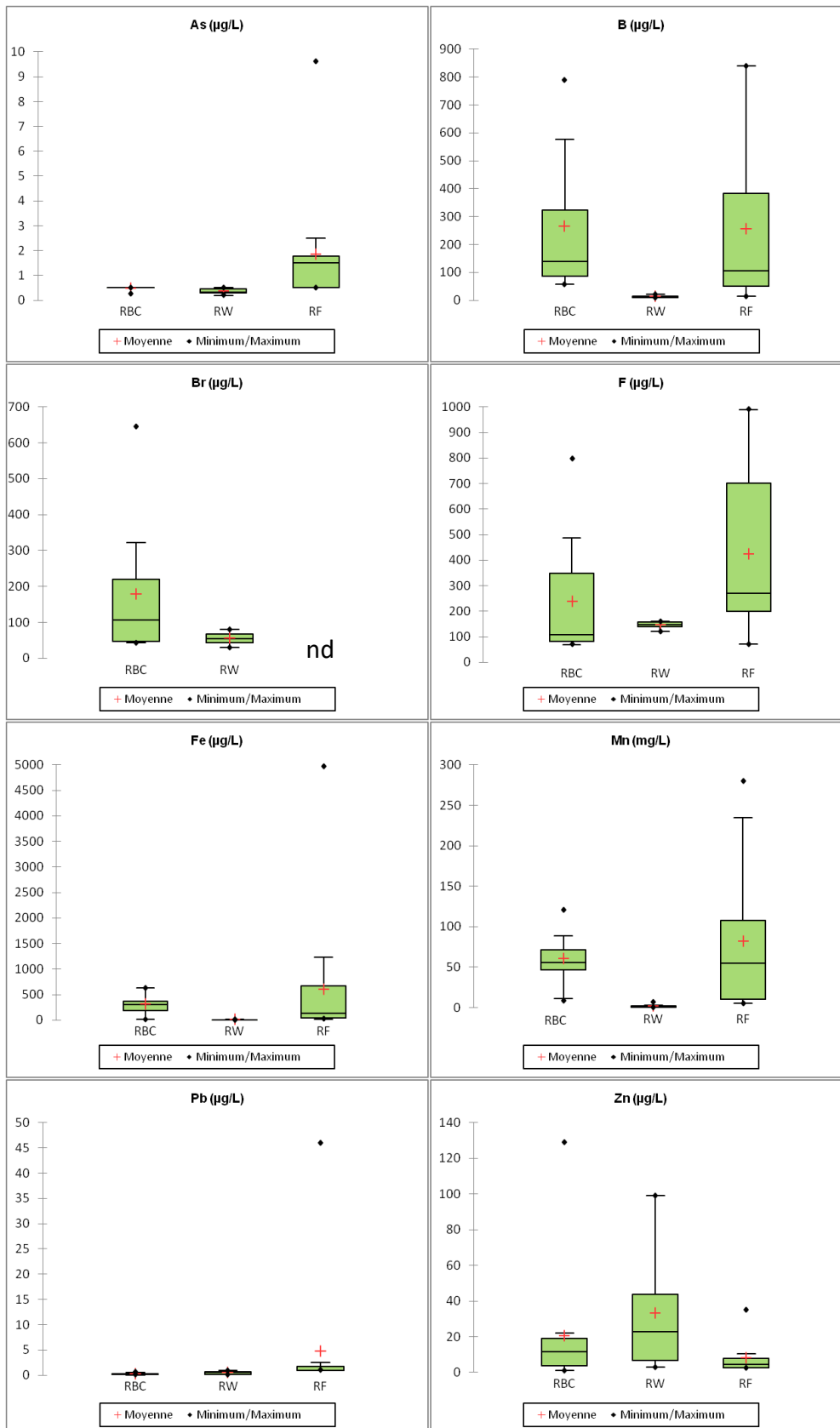


Figure 4-42 : Boxplots illustrant la distribution de quelques éléments mineurs du Landénien (pour les métaux, il s'agit de la fraction totale sauf pour le Fe où il s'agit de la fraction totale en RBC et de la fraction dissoute en RW et RF)

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 paramètres de terrain, des éléments majeurs et des principaux éléments mineurs est présentée au tableau 4-12. 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 0.5 sont mis en évidence au moyen d'un fond rouge et les coefficients de corrélation inférieurs à -0.5 sont mis en évidence par un fond bleu.

Il est possible de constater que de nombreuses variables sont corrélées. Le Cl est notamment corrélé avec le pH, la conductivité, Br, F, Na, SO₄, COT et il est inversement corrélé au Fe, Mn, Mg. Le Cl est donc plutôt corrélé avec des ions d'origine marine. Le Fe et le Mn sont tous les deux corrélés positivement et ils sont inversement corrélés au NO₃. Le Fe est également inversement corrélé à l'O₂. Les métaux et métalloïdes, As, Al, Ni, Pb sont positivement corrélés et ils sont inversement corrélés avec l'O₂ et le NO₃. Il n'y a par contre pas de corrélation significative entre le Fe et le Mn avec les autres métaux et métalloïdes. Les métaux semblent corrélés à des zones plus réductrices et il semble y avoir plusieurs zones réductrices : celles avec des échantillons riches en Fe et Mn et d'autres plus riches en As, Al, Ni, Pb.

Param.	Al	As	B	Ba	Br	Ca	Cl	COT	EC	F	Fe	HCO3	K	Mg	Mn	Na	NH4	Ni	NO3	O2	Pb	pH	SO4	Sr	Zn
Al		0.30								0.26								0.69	-0.38	-0.36	0.63			0.36	
As	0.30		0.44	-0.42		-0.47				0.35				-0.41				0.60	-0.42	-0.53	0.51	0.37			
B		0.44		-0.41	0.48	-0.76		0.33		0.39						0.58	0.49						0.75		-0.66
Ba		-0.42	-0.41			0.52																-0.56	0.44	0.49	
Br			0.48				0.55		0.52	0.50						0.64							0.42		
Ca		-0.47	-0.76	0.52				-0.28		-0.47			-0.39	0.44		-0.54	-0.44		0.31			-0.69		0.79	
Cl					0.55			0.37	0.66	0.29	-0.36			-0.25	-0.35	0.57						0.33	0.52		
COT			0.33			-0.28	0.37		0.43			0.27	0.36			0.52	0.24	-0.34		0.57		0.39	0.39		0.44
EC					0.52		0.66	0.43			-0.26	0.31				0.56				0.24		0.22	0.52		
F	0.26	0.35	0.39		0.50	-0.47	0.29					-0.31		-0.52		0.37		0.34	-0.28		0.39	0.34			
Fe							-0.36		-0.26						0.65	-0.26			-0.41	-0.29			-0.26		
HCO3								0.27	0.31	-0.31					0.36					-0.24					
K			0.53			-0.39		0.36							0.36	0.30	0.56	-0.40				0.41			-0.39
Mg		-0.41				0.44	-0.25			-0.52						-0.26		-0.42			-0.46	-0.35			
Mn							-0.35				0.65	0.36	0.36						-0.49				-0.35		
Na			0.58		0.64	-0.54	0.57	0.52	0.56	0.37	-0.26		0.30	-0.26			0.37			0.23		0.56	0.31	-0.35	
NH4			0.49			-0.44		0.24								0.56						0.43			-0.44
Ni	0.69	0.60						-0.34		0.34			-0.40	-0.42					-0.56	-0.64	0.75				
NO3	-0.38	-0.42				0.31				-0.28	-0.41	-0.24			-0.49				-0.56		0.47	-0.28			0.48
O2	-0.36	-0.53						0.57	0.24		-0.29					0.23			-0.64	0.47		-0.34		0.30	0.43
Pb	0.63	0.51								0.39				-0.46					0.75	-0.28	-0.34				
pH		0.37	0.75	-0.56	0.42	-0.69	0.33	0.39	0.22	0.34			0.41	-0.35		0.56	0.43								-0.75
SO4				0.44			0.52	0.39	0.52		-0.26				-0.35	0.31				0.30					0.31
Sr	0.36		-0.66	0.49		0.79							-0.39			-0.35	-0.44		0.48			-0.75			
Zn								0.44												0.43					

Tableau 4-12 : Coefficients de corrélation entre les principaux paramètres de terrain, les éléments majeurs et les principaux éléments mineurs du Landénien

4.2.7. 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 groupe d'eaux ayant des signatures géochimiques semblables.

Dans le cas de la masse d'eau souterraine du Landénien, 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.

Pour étudier la minéralisation globale, la technique de statistiques multivariées sera appliquée sur une sélection de 9 paramètres. Il s'agit de certains éléments majeurs (Cl, NO₃, Ca, K, Na, SO₄), le B et les rapports Na/Cl (molaire) et Br/Cl (massique). 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 celles-ci ont un impact significatif sur la minéralisation. 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. Les rapports Na/Cl et Br/Cl donnent également des indications sur l'origine du Cl. Un rapport Na/Cl (molaire) inférieur à 0.86 ainsi qu'un rapport Br/Cl (massique) compris entre 5×10^{-4} et $2,2 \times 10^{-3}$ correspondent 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 pH et les rapports Na/Cl et Br/C 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 les NO₃, Mn, SO₄, HCO₃ (potentiellement produits par ces réactions), le NH₄ et le TOC (carbone organique total) ainsi que les métaux pouvant être influencés par les conditions redox. Le fer n'a pas été inclus dans l'analyse parce que le fer total est mesuré en Région de Bruxelles-Capitale tandis qu'en Région flamande et en Région wallonne, il s'agit du fer dissous. Pour les autres métaux, il s'agit de la concentration totale. Les concentrations ont été exprimées en logarithme à cause de leur distribution asymétrique et le pH a été exprimé comme tel.

4.2.7.1. Influence de la minéralisation globale

Les résultats des SOMs, concernant l'influence de la minéralisation globale sur la masse d'eau du Landénien, sont représentés à la figure 4-43 La matrice des composants (figure 4-43a) permet de montrer les relations entre les paramètres. Il est notamment possible de voir que le Cl, le Na et le B sont corrélés et qu'ils sont inversement corrélés au Ca. La matrice U

est présentée à la figure 4-43b et de cette matrice U, 3 groupes ont été déduits par le logiciel (figure 4-43c). Le tableau 4-13 synthétise les principales caractéristiques de ces trois groupes et ceux-ci sont représentés spatialement à la figure 4-44.

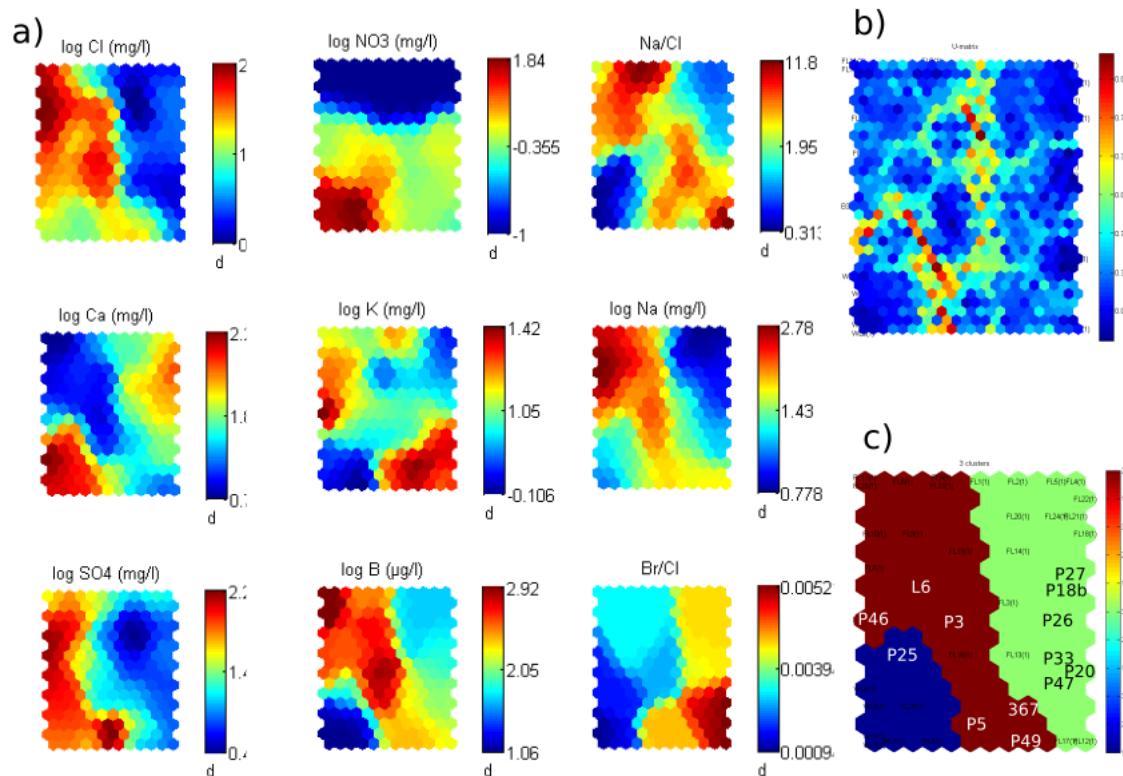


Figure 4-43 : Résultats des SOMs pour la minéralisation globale du Landénien : a) Matrice des composants, b) Matrice U, c) Groupes d'échantillons semblables définis par les SOMs

Le groupe 1, en bleu, présente des concentrations élevées en NO₃ (sauf pour le P25), SO₄, Cl et Ca, des concentrations faibles en Na, B et K ainsi que des rapports Na/Cl et Br/Cl bas. Les échantillons de ce groupe se retrouvent principalement en Région wallonne mais il y a également un point en Région flamande et un point en Région de Bruxelles-Capitale. L'échantillon en Région Bruxelles-Capitale est le point P25 (Royal Uccle Sport). Celui-ci avait déjà été mis en évidence à cause de son rapport Na/Cl assez faible qui semble indicatif d'une contamination. A l'exception du point situé en Flandre, tous les autres échantillons sont localisés dans la zone d'affleurement du Landénien, ou à proximité pour le puits P25. Le groupe 1 semble correspondre à la zone de recharge actuelle qui est impactée par des contaminations anthropiques. Ce groupe fait partie de la zone de recharge de l'aquifère du Landénien.

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

++ 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 moyennes par rapport au jeu de données

X concentrations variées (des plus élevées aux plus bas)

Tableau 4-13 : Caractéristiques de chacun des trois groupes

Les échantillons du groupe 2, en brun, présentent des concentrations élevées en Cl, Na, B, des concentrations moyenne à élevées en SO₄ et K, des concentrations faibles en NO₃ et en Ca et des rapports Na/Cl et Br/Cl moyens à élevés. Les échantillons de ce groupe sont localisés dans la partie Nord-Ouest de la Région de Bruxelles-Capitale et également au Nord-Ouest de celle-ci, 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 3, en vert, présentent des concentrations faibles en Cl, NO₃, Na, SO₄, B, des concentrations moyenne en Ca et des concentrations et des rapports variables en K, Na/Cl et Br/Cl. Ces échantillons sont localisés dans la partie Est de la Région de Bruxelles-Capitale et dans le Sud de la Région flamande. 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.

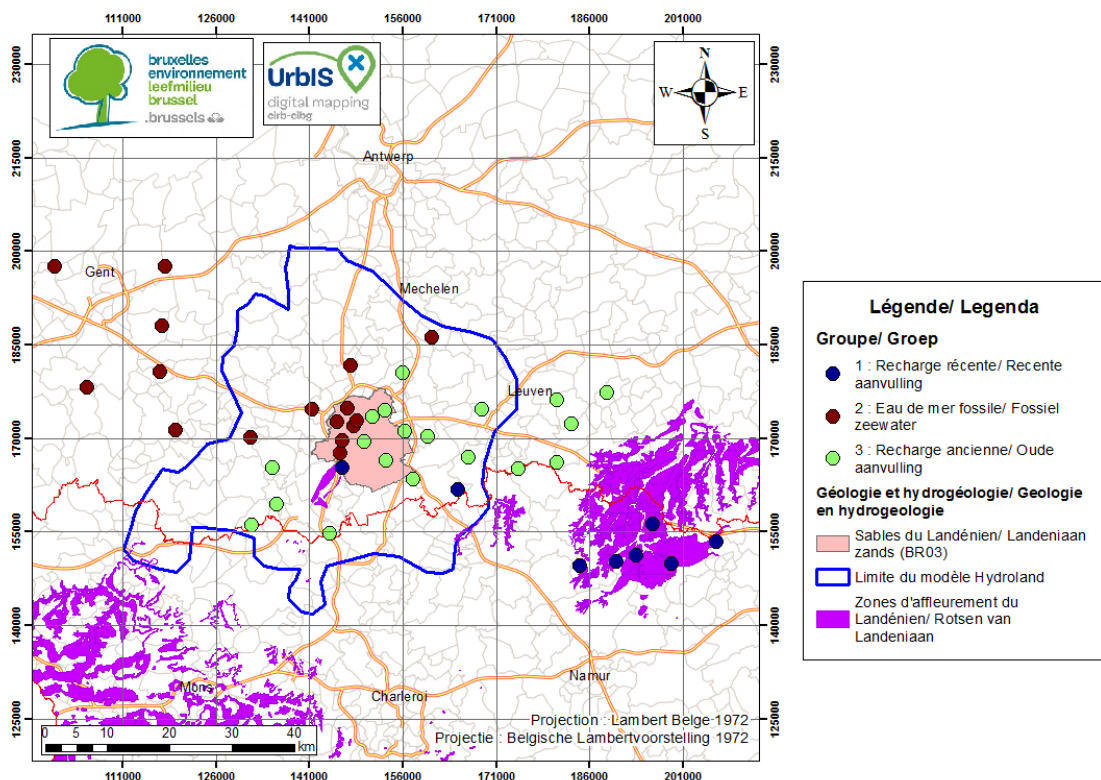


Figure 4-44 : Distribution spatiale des 3 groupes définis grâce à l'analyse multivariée (minéralisation globale)

4.2.7.2. Processus d'oxydoréduction

Les résultats de l'analyse statistique multivariée, concernant l'influence des processus d'oxydoréduction sur la masse d'eau souterraine du Landénien sont représentés à la figure 4-45. La matrice des composants (figure 4-45a) permet mettre en évidence certaines corrélations notamment entre le pH, le B et le NH₄, entre le SO₄ et le TOC ainsi qu'entre le Pb et l'As. La matrice U est présentée à la figure 4-45b et de cette matrice, 4 groupes ont été déduits par le logiciel (figure 4-45c). Le tableau 4-14 synthétise les principales caractéristiques de ces 4 groupes et ceux-ci sont représentés spatialement à la figure 4-46.

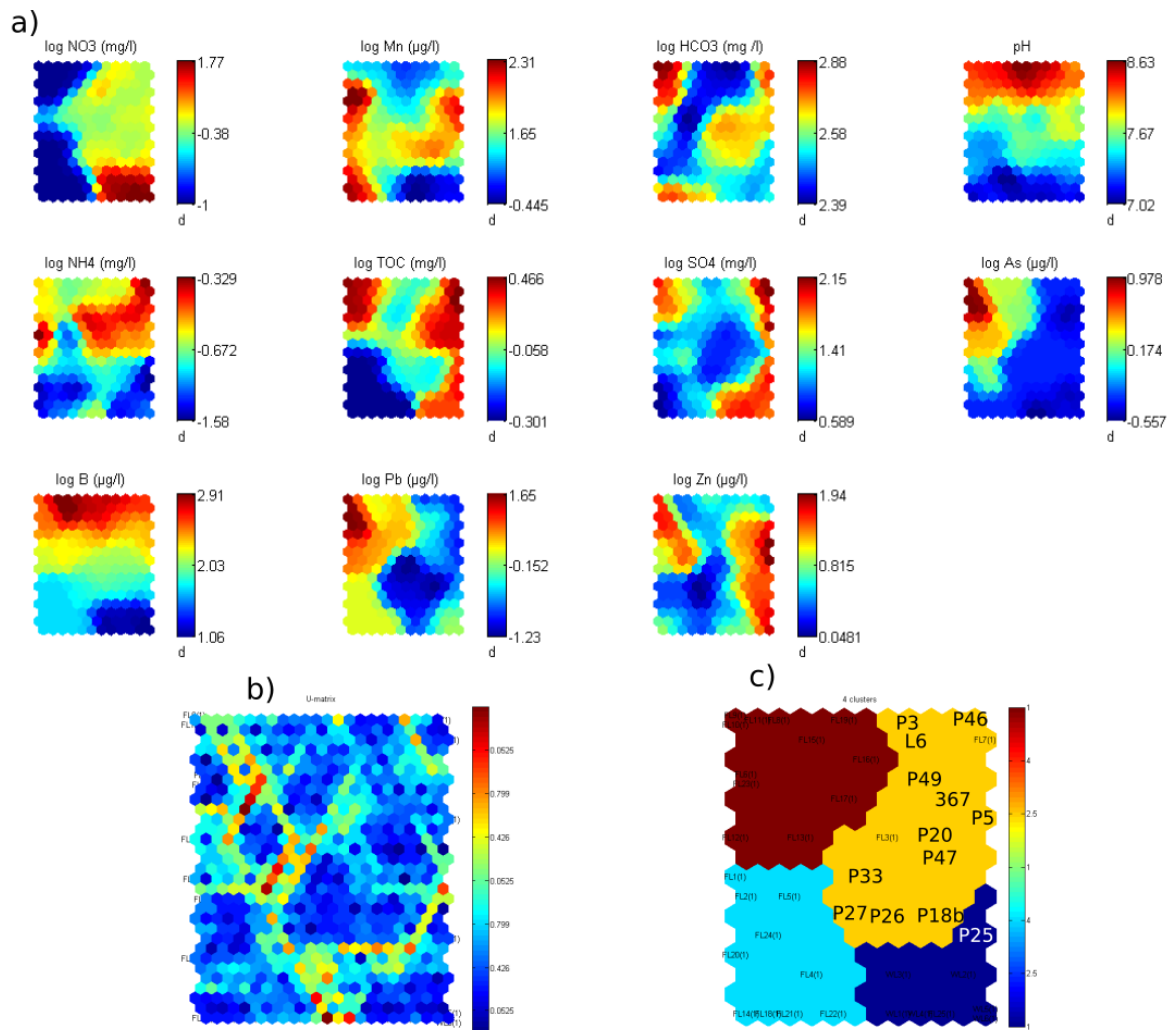


Figure 4-45 : Résultats des SOMs pour les processus redox du Landénien : a) Matrice des composants, b) Matrice U, c) Groupes d'échantillons semblables définis par les SOMs

Les échantillons du premier groupe présentent des concentrations élevées en NO_3 , SO_4 , et TOC, un pH de l'ordre de 7 et des concentrations faibles pour les autres paramètres. Les échantillons de ce groupe se retrouvent principalement en Région wallonne mais il y a également un point en Région flamande et un point en Région de Bruxelles-Capitale. Les échantillons de ce groupe sont les même que ceux qui avaient été identifiés comme correspondant à la zone de recharge récente dans le point précédent. En considérant les processus d'oxydoréduction, ce groupe correspond à la partie oxydante de la nappe, généralement avant la dénitrification. Cependant, le point bruxellois P25, ne présente pas de concentration élevée en NO_3 Il a donc peut être quand même subi de la dénitrification ou alors l'eau de la recharge n'est pas contaminée en nitrate à cet endroit. Il présente également une concentration en Mn un peu plus importante que le reste du groupe. Ce point est sans doute à la limite entre la zone oxygène et la zone suboxygène.

Les échantillons du groupe 2 présentent des concentrations faibles en NO_3 , des concentrations élevées en NH_4 , TOC, As, Pb, un pH élevé et des concentrations variables en Mn, SO_4 , Zn. Ces échantillons sont localisés en Région flamande, au Nord de la Région de Bruxelles-Capitale. Ce groupe correspond à la zone fortement réductrice de la nappe du Landénien. Dans ces conditions réductrices, les métaux sont présents naturellement en concentrations plus importantes. Il est par contre inhabituel de trouver une teneur en carbone organique total (TOC) relativement élevée dans de telles conditions. Cela pourrait être expliqué par des sédiments relativement riches en matière organique. Certaines formations argileuses du Cénozoïque situées en Flandre comme l'argile de Boom ou les formations du Ledo-panisielien présentent des concentrations importantes en matière organique (VMM, 2008). Il est possible les certaines couches argileuses du Landénien soient également riches en matière organique.

Les échantillons du groupe 3 présentent des concentrations faibles en NO_3 , NH_4 , TOC, SO_4 , As, B, Zn, un pH de l'ordre de 7, des concentrations variables en HCO_3 , une concentration moyenne en Pb et des concentrations moyennes à élevées en Mn. Les points de ce groupe sont localisés en Région flamande, au Sud et à l'Est de la Région de Bruxelles-Capitale. Ce groupe correspond à une zone de transition, avec les conditions suboxiques : Il n'y a plus de NO_3 et la concentration en manganèse est importante. Les échantillons de ce groupe se situent probablement dans la zone de réduction du manganèse.

Les échantillons du groupe 4 présentent des concentrations faibles en NO_3 , Pb, As, des concentrations relativement élevées en NH_4 , Mn, HCO_3 , TOC, B, un pH élevé, des concentrations variables en SO_4 et des concentrations variables mais généralement élevée en Zn. Les échantillons sont localisés principalement en Région Bruxelles-Capitale mais il y a également un en Région flamande. Les points de ce groupe sont situés entre ceux des groupes 2 et 3. Le groupe 4 correspond également à une zone de transition. Les conditions sont également suboxiques avec une absence de NO_3 et des concentrations élevées en Mn. Il y a cependant quelques différences avec la zone de transition 1. Le pH est plus élevé, les concentrations en TOC, NH_4 , B, Zn sont plus importantes et il n'y a plus de Pb. Les conditions sont sans doute un peu plus réductrices que dans le groupe 3.

Groupe	NO_3	Mn	HCO_3	pH	NH_4	TOC	SO_4	As	B	Pb	Zn
1 : Zone oxydante	++	X	-	--	--	+	+	--	--	o	X
2 : Zone fortement réductrice	--	X	X	+	+	X	X	+	+	++	X
3 : Zone de transition 1	--	X	X	--	--	--	--	--	-	0	-
4 : Zone de transition 2	-	+	+	+	+	X	X	--	X	-	X

++ 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)

Tableau 4-14 : Caractéristiques de chacun des quatre groupes

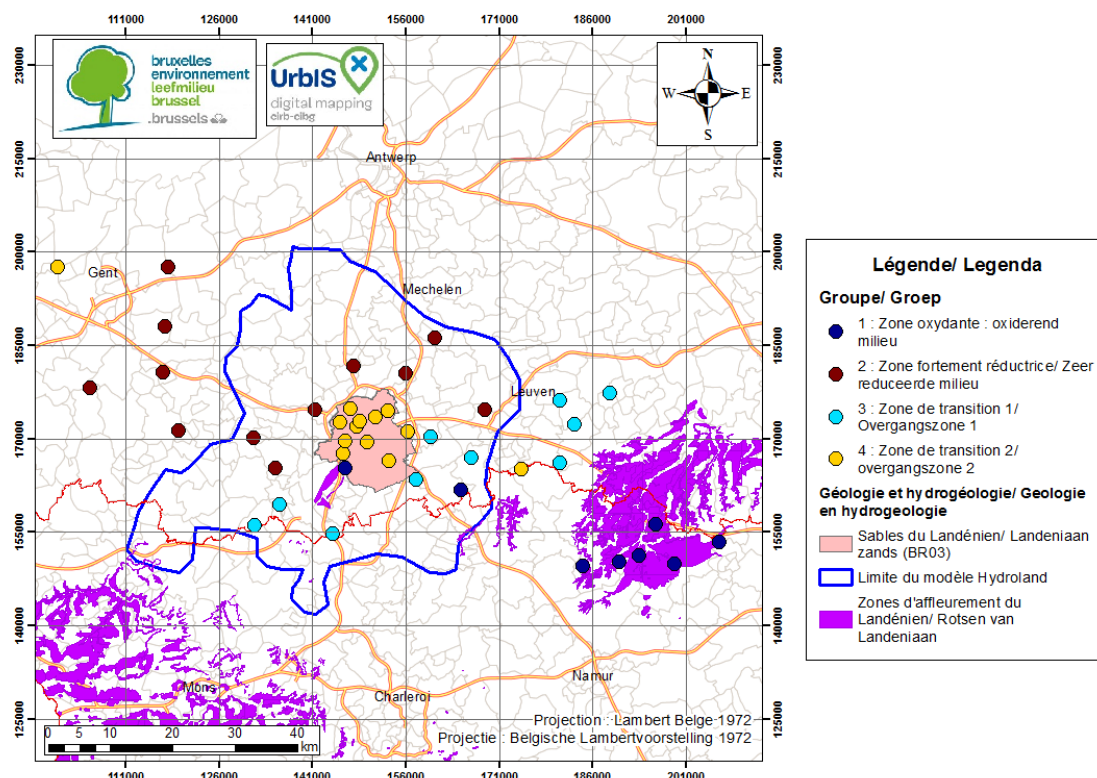


Figure 4-46 : Distribution spatiale des quatre groupes définis grâce à l'analyse multivariée (processus redox)

4.2.8. 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 souterraine du Landénien. Quatre zones avec différents processus influençant la minéralisation ont ainsi pu être mises en évidence. La figure 4-47 reprend ces différentes zones.

La première zone, la zone de recharge actuelle, est située au Sud, au niveau des zones d'affleurement du Landénien. Elle est principalement située en Région wallonne et à l'Est de la Flandre. Les stations d'échantillonnage dans cette zone présentent des concentrations importantes en nitrate. Elles subissent donc un impact anthropique. C'est la partie oxique de la nappe. Les eaux sont de type bicarbonaté calcique, avec des concentrations importantes en Ca. Un des principaux processus qui influence la minéralisation semble être la dissolution de la calcite.

Plus au Nord, il y a ensuite la zone de transition. 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 il n'y a plus de nitrate et il y a une forte concentration en Fe et Mn. C'est la zone suboxique de la nappe. Dans l'analyse multivariée deux zones de transition ont été mises en évidence, dont

une un peu plus réductrice avec des concentrations en métaux et en NH_4 un peu plus importante. Mais comme elles ont tout de même des caractéristiques fort semblables, elles ont été rassemblées ici en une seule zone de transition. Il est difficile de dire si cette eau est impactée par l'activité humaine. En Région de Bruxelles-Capitale des polluants (polluants organiques, pesticides...) sont parfois quantifiés mais ils le sont généralement à des concentrations très faibles et de manière non régulière. Il s'agit peut-être de légères pollutions ponctuelles dans les stations d'échantillonnage et que toute la nappe n'est pas impactée.

Au Sud-Est de la Région de Bruxelles-Capitale, une troisième zone a été mise en évidence. Il s'agit également d'une eau de type bicarbonaté calcique, en zone suboxique avec concentrations relativement élevée en Mn et Fe. Cette zone est à proximité d'affleurements du Landénien. Le point P25 qui fait partie de cette zone a été identifié dans l'analyse multivariée comme associé à une recharge récente contaminée. Les points P5 et P46 qui sont situés à proximité semblent également contaminés même s'ils n'ont pas été mis en évidence dans l'analyse multivariée. Il est possible qu'il s'agisse de pollutions ponctuelles mais ces deux puits pourraient aussi appartenir à cette zone de recharge relativement récente et contaminée. Le puits P46 avait été mis en évidence parce qu'il a un rapport Br/Cl qui indique une contamination. Le Puits P5 n'avait pas été mis en évidence par les rapports Na/Cl et Br/Cl mais il y a du cyanure qui est quantifié de manière récurrente comme pour le puits P25. De plus, dans ces trois stations d'échantillonnage, la concentration en SO_4 est plus élevée que dans le reste de la masse d'eau du Landénien aux alentours de la Région de Bruxelles-Capitale. Il est fort probable que cette concentration élevée provienne d'un apport anthropique lié à la zone de recharge située à proximité. Dans cette zone, il y a également une station piézométrique (la station 392) qui présente une cyclicité saisonnière assez marquée (voir Annexe 2) contrairement aux autres chroniques piézométriques. Il est donc probable que l'eau dans cette zone soit relativement récente. Cette zone n'a pas été associée à la première zone de recharge parce que les conditions d'oxydoréduction ne sont globalement pas les mêmes, les eaux semblent ici un peu plus réductrices.

La quatrième zone est située au Nord-Est de la Région de Bruxelles-Capitale. Il s'agit majoritairement d'eaux de type bicarbonaté sodique et potassique (Na/K-HCO_3). Les concentrations en Cl, Na, F, NH_4 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 matériaux géologiques constitutifs du sous-sol. Dans cette quatrième zone, les conditions sont également plus réductrices. La concentration en Fe et Mn est beaucoup moins importante que dans la zone de transition. Les eaux ne sont plus dans la zone de réduction du Fe et du Mn. La concentration en NH_4 et en certains métaux (B, As, Pb) devient plus implorante. Les conditions sont anoxiques.

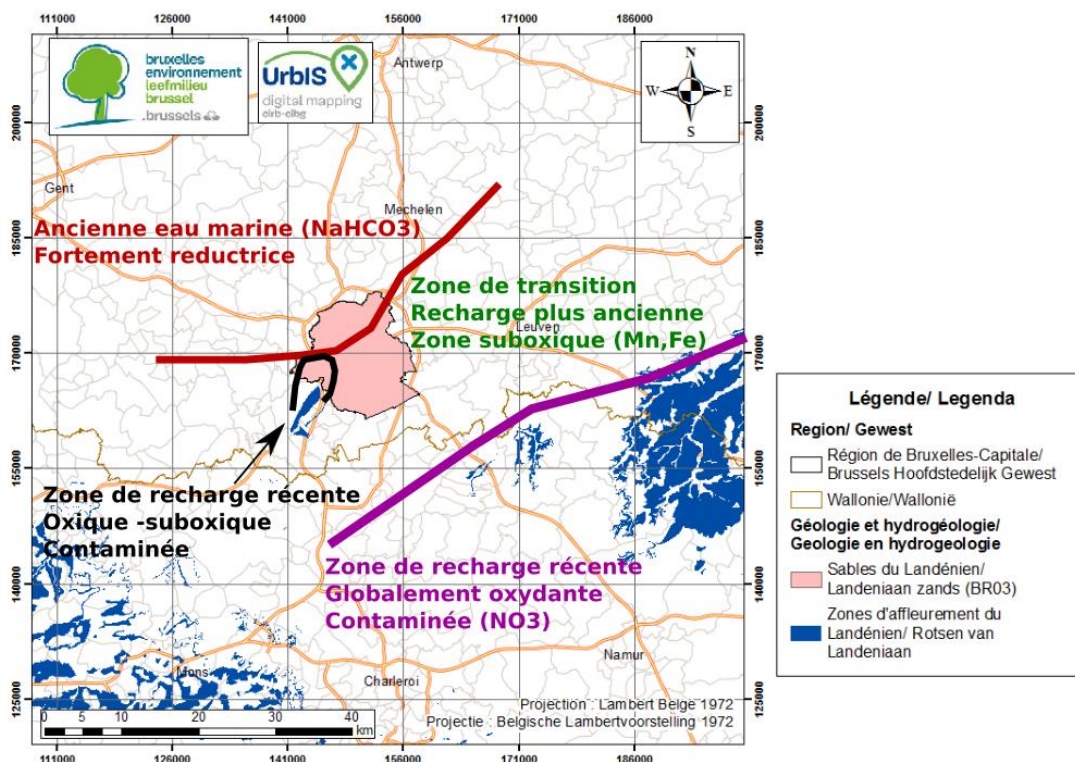


Figure 4-47 : Modèle conceptuel de l'acquisition de la minéralisation dans la masse d'eau du Landénien

4.3. Calcul des concentrations de référence

4.3.1. Sélection des échantillons

Les résultats de l'analyse statistique multivariée permettent 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 Landénien (BR03) se situe dans une zone de transition. Elle se situe sur la ligne de front entre la zone de recharge ancienne et l'eau de mer fossile. Concernant les processus d'oxydoréduction, la masse d'eau BR03 est dans la zone suboxique de la nappe, entre la zone oxydante et la zone fortement réductrice. Dans la masse d'eau souterraine BR03, il y a uniquement des points d'échantillonnage de la zone de transition 2. Cependant, certains points faisant partie de la zone de transition 1 ou de la zone fortement réductrice sont situés vraiment à proximité de la Région de Bruxelles-Capitale. La ligne de front entre ces différentes zones doit donc être contigüe à la Région de Bruxelles-Capitale et est peut-être même localisée à la limite de celle-ci. Il n'est aussi pas non plus exclu qu'elle varie légèrement au cours du temps. De plus, comme mentionné dans le point précédent, les zones de transition 1 et 2 sont fort semblables.

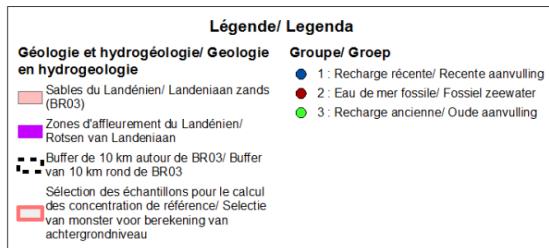
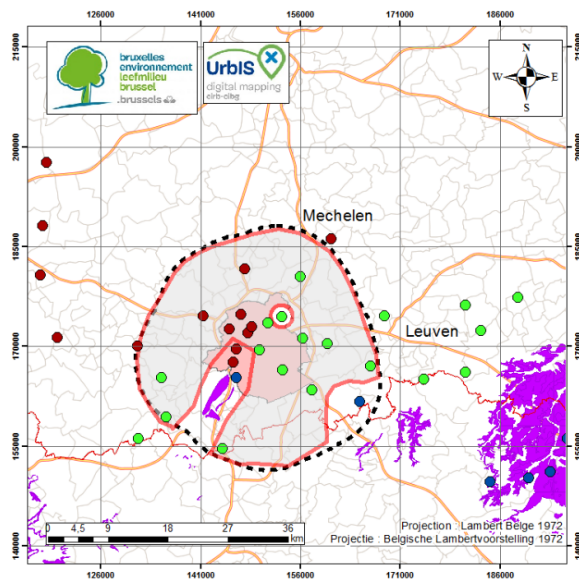
Dans le rapport du projet Bridge (Müller, 2006) il est recommandé de séparer les aquifères avec des minéralisations différentes notamment les aquifères aérobies et les aquifères anaérobies et d'étudier de manière séparée les aquifères salins.

Pour déterminer les concentrations de référence plusieurs approches sont possibles. La masse d'eau du Landénien pourrait être divisée en deux comme ce qui est recommandé par le projet Bridge et comme ce qui a été fait en Flandre. Il y aurait donc la masse du Landénien Est avec une forte salinité d'origine marine et la masse du Landénien Ouest avec une salinité moyenne. Cependant, comme la masse d'eau du Landénien (BR03) n'est pas très étendue (162 km²), ce découpage n'est pas forcément adéquat. De plus en considérant les processus d'oxydoréduction qui influencent notamment les concentrations en métaux, la ligne de front entre la zone suboxique et la zone fortement réductrice ne se situe pas forcément au même endroit que la limite entre l'eau de la recharge ancienne et l'eau de mer fossile.

Il est donc plutôt proposé de considérer l'ensemble des points de la masse d'eau BR03 mais en éliminant les échantillons dont l'impact anthropique influence significativement la minéralisation. Les puits P25, P5 et P46 qui semblent contaminés et qui ont été mis en évidence dans le point précédant seront écartés de l'analyse. Il est également proposé d'éliminer le puits P47 parce que celui-ci ne dispose que d'une analyse et tous les éléments n'ont pas été mesurés. Il n'est donc pas possible de calculer la balance ionique et les rapports Na/Cl et Br/Cl. De plus 4 pesticides ont été quantifiés dans ce puits et deux dépassent la norme.

Il reste donc 9 échantillons pour calculer les concentrations de références pour la masse d'eau souterraine BR03. Cependant, pour ces points aussi, 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 Landénien, qui est censée être captive, a des concentrations en oxygène 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 BR03 semblent impactées par une contamination anthropique. Pour déterminer les concentrations de référence, il est habituellement recommandé d'écarté 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 (ou les points pour lesquels cela n'a pas pu être vérifié) 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.

Minéralisation globale



Processus redox

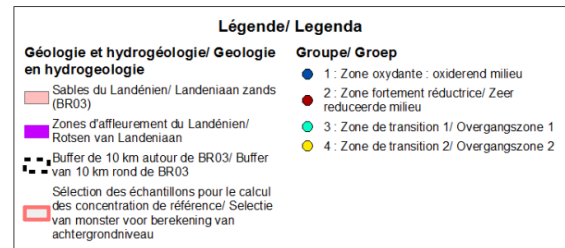
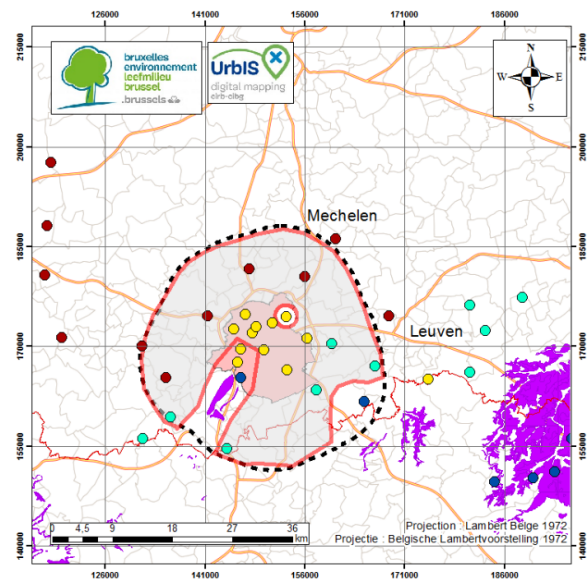


Figure 4-48 : Sélection des échantillons pour la détermination des concentrations de référence de la masse d'eau du Landénien (BR03)

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 Landénien 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 BR03 (figure 4-48). Les échantillons faisant partie de la zone de recharge récente contaminée et/ ou de la zone oxydante ne seront pas inclus dans le calcul des concentrations de référence. Concernant la minéralisation globale, les échantillons associés à de la recharge ancienne ainsi que ceux reflétant l'eau de mer fossile seront pris en compte comme ces deux types d'eau sont tous les deux retrouvés en Région de Bruxelles-Capitale. Pour les processus redox, les échantillons de la zone de transition 2 seront sélectionnés mais comme les échantillons faisant partie des groupes de la zone de transition 1 et la zone fortement réductrice sont retrouvés vraiment à proximité de la Région de Bruxelles-Capitale, ils seront également sélectionnés par sécurité. De cette manière 9 points supplémentaires sont sélectionnés en Région flamande pour le calcul des concentrations de fond.

4.3.2. Proposition de concentrations de référence

Pour les stations qui ont été sélectionnées dans le point précédent, les principaux paramètres statistiques sont calculés (tableau 4-15). 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 les valeurs de limite de quantification et le pourcentage de quantification de chaque valeur. Les paramètres statistiques ont été calculés sur base des médianes de chaque station d'échantillonnage et lorsqu'un paramètre est en dessous de la limite de quantification, il est estimé en divisant la limite de quantification par 2.

Dans le tableau 4-15, les paramètres de la liste minimale sont mis en évidence en bleu. La liste minimale est la liste des polluants et leurs indicateurs pour lesquels les États membres de l'Union européenne doivent envisager d'établir des valeurs seuils (DCE 2006/118/CE et 2014/80/CE). Le Fe et le Mn qui sont présents en concentrations importantes dans la masse d'eau souterraine BR03 ont également été considérés. Pour les autres paramètres il n'est pas nécessaire d'établir des concentrations de référence mais c'est une information complémentaire pour caractériser la composition type de la masse d'eau. 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 BR03 (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 caractériser la composition de la masse d'eau souterraine BR03, 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). Pour certains paramètres, les données ne sont pas disponibles en Flandre et il n'y a alors que 8 ou 9 stations d'échantillonnage pour lesquelles il y a des données. Faire un traitement statistique sur un petit nombre de données n'est pas très robuste. Plutôt que de calculer le P90 comme concentration de référence, il est plus prudent de donner une fourchette de valeur avec le minimum et le maximum et de prendre ce dernier comme valeur de référence. Les minimums et maximums sont calculés sur base des médianes de chaque station d'échantillonnage par paramètre.

Pour certains paramètres le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de quantification est très faible (mis en évidence en rouge dans le tableau 4-15). Pour ces paramètres il n'est pas recommandé d'utiliser le P90 calculé mais plutôt d'estimer la concentration de référence par les résultats d'un aquifère semblable (Müller, 2006). Les valeurs de référence du Landénien en Wallonie et en Flandre pourront être utilisées dans ce cas là. Elles sont présentées dans le tableau 4-16. Il s'agit de l'aquifère des Sables captifs du Landénien Ouest (SS_1000_GWL_2 en Flandre et RWE061 en Wallonie) et de l'aquifère des Sables captifs du Landénien Est (BLKS_1000_GWL_2S en Flandre). En Région wallonne, les valeurs de référence sont définies pour chaque combinaison masse d'eau + aquifère principal. Pour la masse d'eau RWE061, les valeurs de référence sont données pour l'aquifère principal qui est l'aquifère des Sables du Landénien et de l'Yprésien. En Annexe A-4, une note décrivant la méthodologie utilisée en Wallonie et en Flandre pour déterminer les concentrations de

référence est présentée. Les valeurs de référence de Wallonie et de Flandre ne seront pas forcément reprises telles quelles pour déterminer les concentrations de référence de la Région de Bruxelles-Capitale. Comme montré précédemment, les concentrations de la Région de Bruxelles-Capitale ont généralement des valeurs comprises entre celles de la Wallonie et de la Flandre. Les valeurs de référence de la masse d'eau BR03 seront donc fixées en prenant en compte les valeurs de Wallonie et de Flandre ainsi que les limites de quantification maximales des méthodes analytiques qui ont été réalisées sur les paramètres concernés et les quelques valeurs supérieures aux limites maximales de quantification.

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.

Paramètre	Unité	Nb. Stations	% >LQ	LQ	Min	P25	Moy.	P50	P75	P90	Max
Al total	µg/L	18	60	1, 10, 20, 40, 50	1	2.2	8.6	10	15	15.3	20
As total	µg/L	18	6	0.5, 1, 5	0.25	0.50	0.84	0.50	1.25	1.63	2.50
B total	µg/L	18	83	100	50	51.8	255.9	132.4	308.3	742.6	840
Br total	µg/L	7	97	0.1	42.5	45.5	158.0	50	138.5	393.8	645.5
Ca	mg/L	18	100		6.2	16.9	63.1	67.3	96.3	120.9	140
Cd dissous	µg/L	8	0	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Cd total	µg/L	18	1	0.03, 0.1, 0.5, 1	0.02	0.02	0.06	0.05	0.05	0.13	0.25
Cl	mg/L	18	100		7.30	9.8	46.8	11.9	58.3	141.1	216.2
COT	mg/L	17	85	1	0.50	0.50	0.82	0.61	1.07	1.30	1.97
EC (in situ)	µS/cm	18	100		455	587	682	652	729	863	1163
F	mg/L	17	98	0.1, 0.2	0.07	0.09	0.33	0.24	0.48	0.74	0.99
Fe total	µg/L	9	95	20, 40	13.3	96.8	301.2	341.1	375.6	599.1	606.4
HCO3	mg/L	18	100		222.8	296.7	356.7	378.0	414.7	430.3	478.6
Hg dissous	µg/L	8	0	0.02, 0.05	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
Hg total	µg/L	18	0	0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.5	0.01	0.01	0.04	0.03	0.03	0.13	0.25
K	mg/L	18	100		1.7	7.1	13.1	11.5	20.4	23.4	27.0
Mg	mg/L	18	100		1.6	5.4	14.2	15.3	18.9	26.2	30.5
Mn total	µg/L	18	96	10	8	21.6	60.4	57	97.1	114.5	145
Na	mg/L	18	100		6.1	8.1	65.4	14.1	90.9	180.1	240
NH4	mg/L	18	88	0.05, 0.1	0.03	0.12	0.24	0.22	0.32	0.46	0.52
Ni dissous	µg/L	8	5	1, 2	0.50	1.00	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00
Ni total	µg/L	18	7	1, 2, 5	1.00	1.00	1.75	1.75	2.50	2.50	2.50
NO2	mg/L	18	8	0.01, 0.02, 0.03, 0.07	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
NO3	mg/L	18	13	0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.9, 1, 2	0.10	0.10	0.66	0.50	1.00	1.00	3.50
O2 (in situ)	mg/L	17	97	0.1	0.05	0.15	1.85	0.20	2.80	5.02	7.40
Ortho phosphates	mg/L	8	100		0.02	0.02	0.05	0.03	0.06	0.09	0.11
P total	mg/L	9	34	0.05, 0.1	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.10
Pb dissous	µg/L	8	17	0.1	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05	0.10	0.20
Pb total	µg/L	18	32	0.1, 2, 5	0.05	0.13	0.84	0.80	1.00	1.75	3.75
pH (in situ)		18	100		7.09	7.41	7.78	7.73	8.17	8.41	8.63
SO4	mg/L	18	99	1	3.7	11.0	16.8	13.8	16.1	31.7	43.6
Sr	mg/L	9	100		0.09	0.52	0.64	0.71	0.90	0.94	0.98
Tétrachloro	µg/L	9	2	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

éthylène											
Trichloro éthylène	µg/L	9	0	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Zn	µg/L	18	62	2, 5, 10	1.00	2.50	6.90	3.75	9.51	17.30	22.00

Tableau 4-15 : Paramètres statistiques calculés pour estimer la concentration type de la masse d'eau du Landénien BR03 sur base des médianes des stations d'échantillonnage (en bleu paramètres de la liste minimale et le Fe et le Mn)

Paramètre	Unité	E061 /Sables du Landénien et de l'Yprésien	Landénien Est BLKS_1000 _GWL_2S	Landénien Ouest SS_1000_ GWL_2
Sites		7	/	/
As As dissous	µg/l	2.19	/	18
Cd Cd dissous	µg/l	0.07	/	/
Cl	mg/l	107.87	35	480
EC	µS/cm	/	800	3500
Fe Fe dissous	µg/l	446.35	1700	1600
Hg Hg dissous	µg/l	0.04	/	/
Mn Mn dissous	µg/l	549.36	110	400
NH4	mg/l	0.96	0.69	0.82
Ni Ni dissous	µg/l	6.03	/	8
NO2	mg/l	0.04	/	/
P total	mg/l	0.69	/	/
Pb Pb total	µg/l	2.97	/	/
PO4	mg/l	/	0.83	2.2
SO4	mg/l	229.24	84	370

Tableau 4-16 : Concentrations de référence du Landénien en Flandre et en Wallonie (* : Pour les métaux il s'agit des concentrations dissoutes pour la Flandre et ce n'est pas précisé s'il s'agit des concentrations totales ou dissoutes en Wallonie) (SPW-DGO3-DEE, 2016 et VMM, 2016)

Pour chaque élément de la liste minimale (+ Fe et Mn), une proposition de la concentration de référence sera discutée dans les points ci-dessous et un récapitulatif des valeurs proposées est présenté au tableau 4-17:

Arsenic total (As)

L'As a un taux de quantification de 6%. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser le P90 comme valeur de référence. La limite de quantification de l'arsenic varie entre 0.5 et 5 µg/L. En considérant l'ensemble du jeu de donnée (et non les médianes comme dans le tableau 4-15), les quelques valeurs quantifiées varient généralement entre 1 et 2 µg/L et un échantillon présente une valeur de 8 µg/L. Il est difficile de fixer une valeur de référence précise. Il peut être estimé que l'arsenic a généralement une concentration inférieure à 5 µg/L (limite de quantification la plus élevée). En Région wallonne, la concentration de référence est de 2.19 µg/L et en Région flamande elle est de 18 µg/L pour le Landénien

Ouest. La valeur de référence proposée pour la masse d'eau BR03 est de 5 µg/L qui est la limite de quantification la plus élevée et qui est une valeur comprise entre les valeurs de référence de Wallonie et de Flandre.

Cadmium total (Cd)

La concentration en Cd total est généralement inférieure à la limite de quantification, seulement 1% des mesures est supérieur à la limite de quantification. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser le P90 comme valeur de référence. La limite de quantification est de 0.1 µg/L en Région de Bruxelles-Capitale (sauf 2 valeurs plus anciennes qui sont à 1 µg/L) tandis qu'en Région flamande, elle varie entre 0.03 et 0.5 µg/L. La seule valeur supérieure à une limite de quantification est de 0.2 µg/L. Il peut être estimé que la teneur habituellement rencontrée est inférieure à 0.1 µg/L mais dire par précaution qu'elle peut aller jusque 0.5 µg/L (valeur de quantification maximale en Flandre). La valeur de référence proposée pour la masse d'eau BR03 est de 0.5 µg/L qui est la limite de quantification la plus élevée, ce qui est un peu plus élevée que la valeur de référence en Wallonie (0.07 µg/L). En Flandre, la valeur n'a pas été calculée car le cadmium n'est pas détecté dans la nappe.

Chlore (Cl)

Les eaux échantillonnées présentent constamment des concentrations en Cl supérieures à la limite de quantification. Le P50 (11.9 mg/L) peut être utilisé pour estimer la teneur habituelle et le P90 (141.1 mg/L) peut être utilisé pour déterminer la valeur de la concentration de référence. Ces valeurs sont comprises entre les valeurs de référence en Flandre et en Wallonie qui varient entre 35 et 480 mg/L.

Conductivité (EC) in situ

Il n'est pas obligatoire de déterminer une valeur de référence pour la conductivité électrique si des valeurs ont été fixées pour le Cl et le SO₄. La valeur habituelle de la conductivité électrique peut tout de même être estimée via le P50 (652 µS/cm) et la valeur de référence via le P90 (863 µS/cm).

Fer total (Fe)

Seules les valeurs de la Région de Bruxelles-Capitale ont été utilisées parce qu'en Flandre, c'est le fer dissous qui est mesuré. 95 % des valeurs sont supérieures à la limite de quantification mais uniquement 9 points sont utilisés pour le traitement statistique ce qui n'est pas très robuste. Plutôt que de calculer le P90 comme concentration de référence, il est peut-être plus prudent de donner une fourchette de valeur : entre 13.3 µg/L (min des médianes de chaque station) et 606.4 µg/L (max des médianes de chaque station). Néanmoins le P90 est de 599.1 µg/L ce qui est très proche de la valeur maximale. La concentration de référence est donc de l'ordre de 600 µg/L, ce qui est compris entre les valeurs de référence en Flandre et en Wallonie qui varient entre 446.35 et 1700 µg/L.

Mercure total(Hg)

Le mercure total n'est pas quantifié dans les points du Landénien sélectionnés en Région de Bruxelles-Capitale et en Région flamande. La limite de quantification varie entre 0.01 et 0.5 µg/L mais cette valeur plus élevée concerne uniquement les mesures les plus anciennes. Les valeurs de limite de quantification actuelles sont entre 0.01 et 0.05 µg/L. Il est proposé d'utiliser la valeur de 0.05 µg/L (limite de quantification maximale) comme concentration de référence, ce qui est dans le même ordre de grandeur que la valeur de référence en Région wallonne (0.04 µg/L). En Flandre, la valeur n'a pas été calculée car le mercure n'est pas détecté dans la nappe.

Manganèse total (Mn)

Le Mn total a un taux de quantification de 96 %. Le P50 (57 µg/L) peut être utilisé pour estimer la teneur habituelle et le P90 (114.5 µg/L) peut être utilisé pour déterminer la concentration de référence. Ces valeurs sont comprises entre les valeurs de référence en Flandre et en Wallonie qui varient entre 110 et 549.4 µg/L.

Ammonium (NH₄)

Le NH₄ a un taux de quantification de 88 %. Le P50 (0.22 mg/L) peut être utilisé pour estimer la teneur habituelle et le P90 (0.46 mg/L) peut être utilisé pour déterminer la concentration de référence. Ces valeurs sont comprises entre les valeurs de référence en Flandre et en Wallonie qui varient entre 0.69 et 0.96 mg/L.

Nickel total (Ni)

Le Ni a un taux de quantification de 7%. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser le P90 comme valeur de référence. La limite de quantification du nickel varie entre 0.5 et 5 µg/L. En considérant l'ensemble du jeu de données (et non les médianes comme dans le tableau 4-15), les quelques valeurs quantifiées varient généralement entre 1 et 6.2 µg/L et deux échantillons présentent des valeurs plus élevées : 12 µg/L et 47 µg/L. En Région wallonne, la concentration de référence est de 6.03 µg/L et en Région flamande elle est de 8 µg/L (en fraction dissoute) pour le Landénien Ouest. Il est difficile de fixer une valeur de référence précise pour la masse BR03. Il peut être estimé que le nickel en fraction totale a généralement une concentration inférieure à 5 µg/L (limite de quantification la plus élevée) mais cette valeur est parfois dépassée, il est donc proposé d'utiliser la même concentration de référence que pour les Sables du Landénien en Région wallonne soit : 6.03 µg/L.

Nitrite (NO₂)

Seulement 8% des valeurs sont supérieures à la limite de quantification. Les valeurs de références ne peuvent donc pas être déterminées sur base du P90. Les valeurs de limite de quantification varient entre 0.01 et 0.07 µg/L et les quelques valeurs quantifiées sont

majoritairement inférieures à cette valeur. Il est donc proposé d'estimer la concentration de référence comme étant de 0.07, ce qui dans le même ordre de grandeur que la valeur de référence déterminée en Wallonie (0.04 µg/L).

Phosphore total (P)

Le phosphore total est quantifié à 34% et il y a seulement 9 points de mesures parce qu'il n'est pas mesuré en Région flamande. Calculer le P90 n'est donc pas très robuste. Les médianes des stations d'échantillonnage varient entre 0.05 mg/L et 0.10 mg/L. En considérant l'ensemble du jeu de donnée (et non les médianes), les quelques valeurs quantifiées varient généralement entre 0.1 et 0.5 mg/L. En Wallonie, la valeur de référence est de 0.69 mg/L et en Flandre les valeurs de références sont calculées pour le phosphate mais pas pour le phosphore total. La valeur de référence proposée est 0.69 mg/L qui est la valeur de référence en Wallonie et qui est du même ordre de grandeur que les quelques mesures supérieures à la limite de quantification.

Plomb total (Pb)

Le plomb total est quantifié à 34% dans les points sélectionnés. Le P50 est 0.80 µg/L et le P90 est 1.75 µg/L. Ce qui est dans le même ordre de grandeur que la valeur calculée en Wallonie (2.97 µg/L). En Flandre, les valeurs de références n'ont pas été calculées. La valeur de référence proposée pour la masse d'eau BR03 est donc 1.75 µg/L (P90).

Sulfate (SO₄)

Les échantillons présentent presque constamment des concentrations en SO₄ supérieures à la limite de quantification. Le P50 (13.8 mg/L) peut être utilisé pour estimer la teneur habituelle et le P90 (31.7 mg/L) peut être utilisé pour déterminer la concentration de référence. Ces valeurs sont inférieures aux valeurs de référence en Flandre et en Wallonie qui varient entre 84 et 370 mg/L.

Paramètre	unité	Valeur de référence
As total	µg/l	5
Cd total	µg/l	0.5
Cl	mg/l	141.1
EC	µS/cm	836
Fe total	µg/l	606.4
Hg total	µg/l	0.05
Mn total	µg/l	114.5
NH ₄	mg/l	0.46
Ni total	µg/l	6
NO ₂	mg/l	0.07
P total	mg/l	0.69
Pb total	µg/l	1.75
SO ₄	mg/l	31.7

Tableau 4-17 : Valeurs de référence proposées pour la masse d'eau souterraine BR03

5. Analyse des données et résultats pour la masse d'eau du Socle et du Crétacé (BR01)

5.1. Présentation des données

5.1.1. Présentation de la masse d'eau souterraine du Socle et du Crétacé (BR01)

La masse d'eau souterraine du Socle et du Crétacé n'est pas présente sur l'ensemble de la Région de Bruxelles-Capitale. Elle s'étend sur la partie centrale et nord de la région. Elle a une superficie de 111 km². Cette masse d'eau regroupe les formations du Socle paléozoïque et du Crétacé. 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 feldspathique, phyllade et quartzite. Le Socle est recouvert de craie à silex de la Formation de Gulpen. L'épaisseur de la craie est variable, elle est d'environ une dizaine de mètres dans la masse d'eau souterraine BR01. Cette masse d'eau souterraine est recouverte 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). A cause de ces couvertures argileuses, la masse d'eau du Socle et du Crétacé (BR01) est captive.

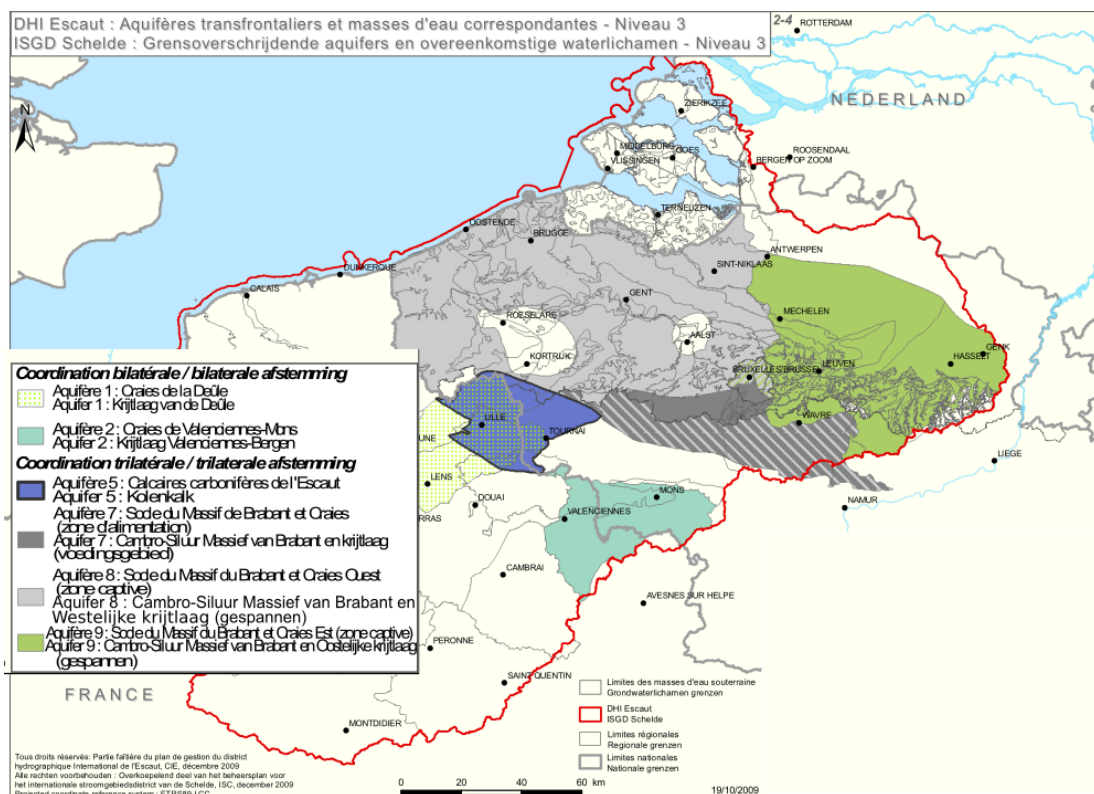


Figure 5-1 : Aquifères transfrontaliers du Paléo-Mésozoïque du bassin de l'Escaut (CIE, 2009)

En Région de Bruxelles-Capitale, le Socle est divisé en deux masses d'eau souterraine : celle du Socle et du Crétacé (BR01) dont il est question dans cette étude et celle du Socle en zone d'alimentation (BR02). Cette deuxième masse d'eau souterraine est présente au Sud de la

région et a une superficie de 51 km². La masse BR02 est également constituée du Socle paléozoïque mais les craies sont, par contre, absentes.

Les masses d'eau souterraines (BR01) et (BR02) délimitées en Région de Bruxelles-Capitale font partie d'aquifères transfrontaliers. Ceux-ci sont représentés à la figure 5-1 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 A-1 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 figure en annexe.

Dans le Socle en zone d'alimentation, la présence de craie est rare et les sédiments du tertiaire reposent généralement directement sur le Socle. Dans cette masse d'eau, le 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) et du Crétacé sont représentés à la figure 5-2. Le Crétacé affleure principalement dans les bassins du Geer et de la Meuse (à l'Est) et dans le bassin de l'Haine (Ouest). Le Socle et le Dévonien affleurent dans le Synclinorium de Dinant, 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.

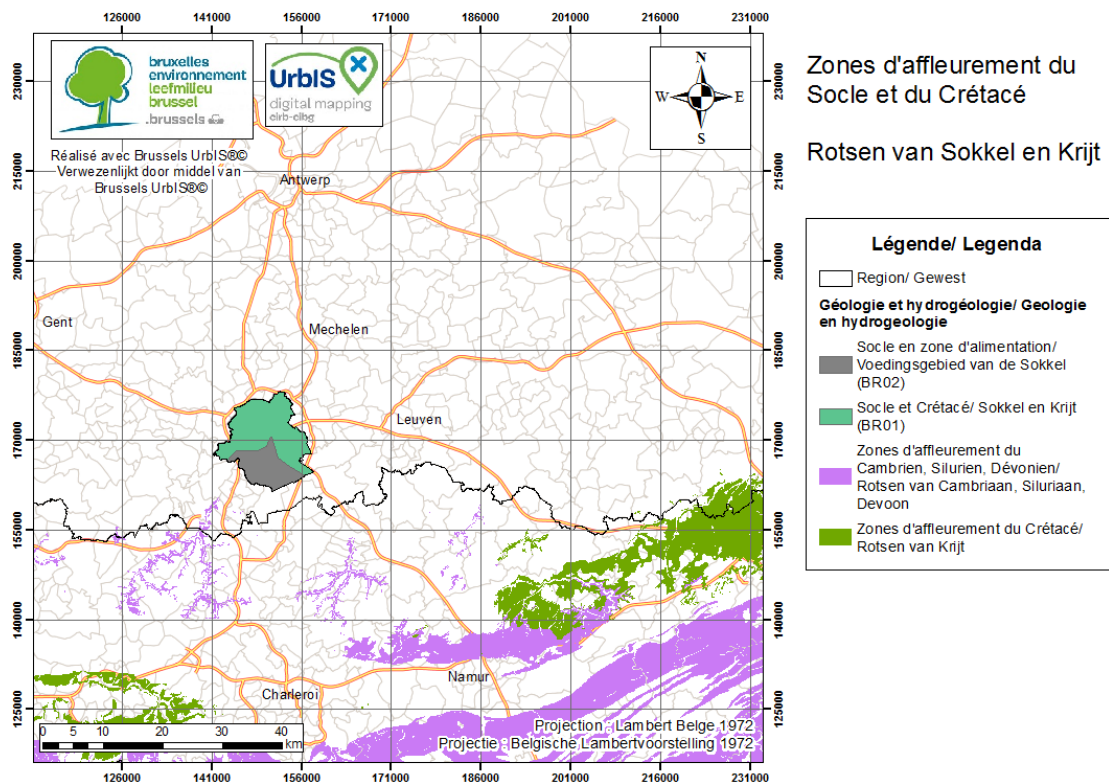


Figure 5-2 : Localisation des masses d'eau BR01 et BR02 et des affleurements du Cambrien, Silurien, Dévonien et du Crétacé (Service géologique de Belgique, 2003)

5.1.2. Présentation des données

Les données sur lesquelles se base l'étude ont été fournies par l'Institut Bruxellois pour la Gestion de l'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 du Socle et du Crétacé (BR01) pour lesquelles des données hydrochimiques sont disponibles, sont décrits dans le tableau 5-1 et leur répartition spatiale est illustrée à la figure 5-3. Les stations de la masse d'eau BR01 sont au nombre de 9. La profondeur des différents puits dépasse généralement la centaine de mètres et varie entre 85 et 204 m.

Afin d'élargir le jeu de données, les données provenant de masse d'eau souterraine du Socle en zone d'alimentation (BR02) seront également utilisées. Les points de prélèvements de la masse d'eau BR02 pour lesquels des données hydrochimiques sont disponibles, sont également repris dans le tableau 5-1 et leur répartition spatiale est illustrée à la figure 5-3. Les stations d'échantillonnage de la masse d'eau BR02 sont au nombre de 5. La profondeur des puits varie entre 65m et 164 m.

Point de prélèvement	Code	MESO	Période de suivi	Nombre de mesures	X Lambert belge 72 (m)	Y Lambert belge 72 (m)	Profondeur (m)
Koninklijk Instituut voor Doven en Blinden (KIDB)	P32	BR01	2011	1	153040	170406	124.5
Puits cocof	S1	BR01	2012-2015	5	143450	169300	149
Lavoir Anderlecht	P15	BR01	2006-2011	7	146344	169645	85
Nationale Bank van België	325	BR01	2009-2013	9	149237	170997	122
Solvay	P21	BR01	2010-2015	9	152360	176810	150
UCL Services Techniques 2	P18a	BR01	1983-2015	101	156410	171180	149
Quiétude	P22	BR01	2010-2015	6	152929	172276	135
Ceres	P1	BR01	2004-2006	4	152371	176041	204
Initial Textiles nv	P2a	BR01	2008-2016	2	151394	173458	170
Usine Union sa	384	BR02	2004-2015	13	146770	167414	100
Calypso	P23	BR02	2010-2015	3	152801	166208	115.4
Lavoir Carsen Stalle	P24	BR02	2010-2011	2	147706	165535	65
Royal Leopold Club	P45	BR02	2009-2015	11	148802	166249	164
St Niklaas Instituut	P4	BR02	2005-2015	19	144160	167010	77

Tableau 5-1 : Données relatives aux points de prélèvement de la masse d'eau du Socle et du Crétacé (BR01) et du Socle en alimentation (BR02) pour lesquels des données hydrochimiques sont disponibles

Le programme de surveillance de l'état chimique a été progressivement mis en place à partir de 2004. Il n'y a que deux points pour lesquels un suivi continu a été effectué entre 2004 et 2015 : le point Usine Union sa (code : 384) et le point UCL Services Techniques 2 (code : P18a). Pour ce dernier, le suivi remonte même à 1983. Pour les autres stations, le suivi a été mis en place plus tard ou il a été arrêté pour diverses raisons (puits rebouché, arrêt de l'exploitation ...). Le nombre de campagne d'échantillonnage est très variable en fonction des stations de prélèvement: d'un seul échantillonnage pour la station KIDB (code : P32) à 101 pour le point UCL Services Techniques 2.

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). Pour certains échantillons, des analyses isotopiques ont également été réalisées (^{14}C et ^{36}Cl).

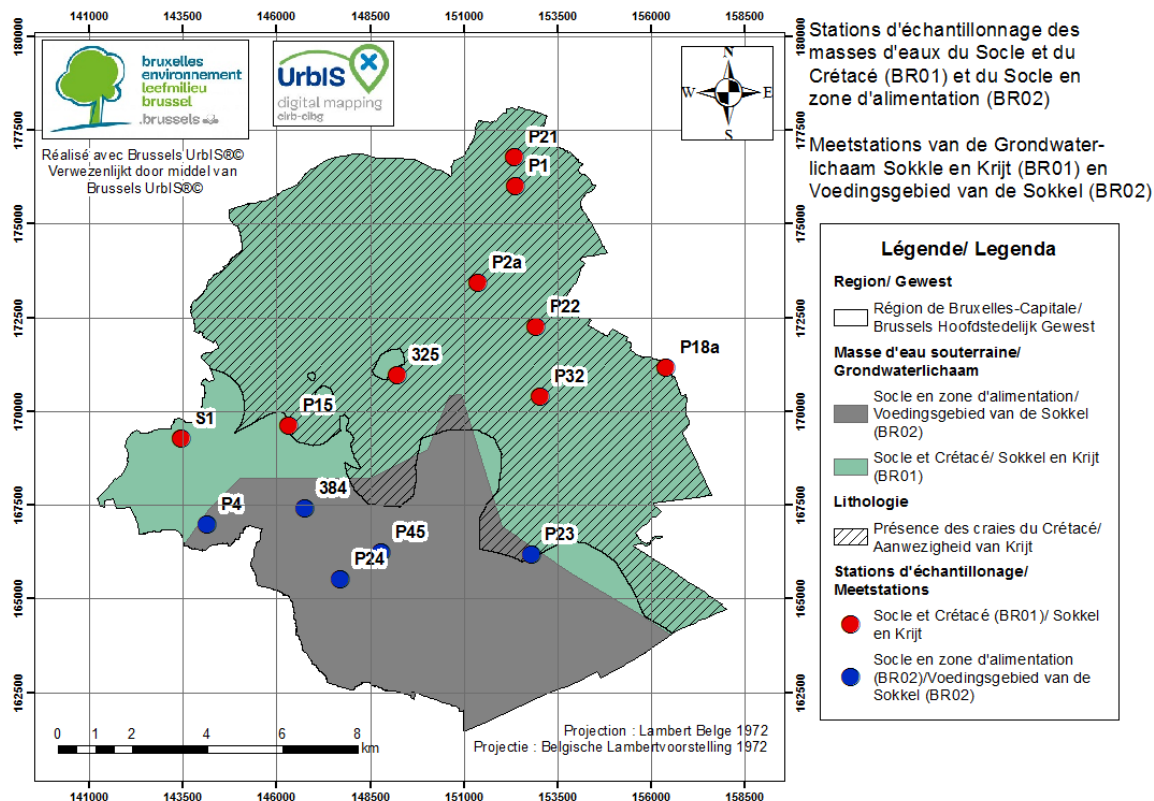


Figure 5-3 : Points de prélèvement de la masse d'eau du Socle et du Crétacé (BR01) et du Socle en alimentation (BR02) pour lesquels des données hydrochimiques sont disponibles (La délimitation des craies provient du modèle stratigraphique réalisé dans le cadre du projet Hydroland).

Afin d'élargir le jeu de données, les données provenant de masse d'eau BR02 seront donc utilisées mais des données complémentaires ont également été recherchées 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. 25 stations d'échantillonnage ont été sélectionnées en Wallonie et 45 en Flandre (figure 5-4 et tableau 5-2). Sur la figure 5-4, il est également précisé si les stations d'échantillonnage de Flandre et de Wallonie, sont crépinées dans le Socle ou dans le Crétacé. Ces stations ont été choisies pour leur proximité avec la région de Bruxelles-Capitale. Quelques stations plus éloignées ont également été sélectionnées pour pouvoir étudier les variations des compositions chimiques et pouvoir ainsi replacer la masse d'eau souterraine du Socle et du Crétacé (BR01) dans son contexte hydrogéologique et hydrochimique. Avoir un nombre plus élevé de données permettra 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 et du Crétacé, il s'agira des données fournies par l'Institut Bruxellois de Gestion de l'Environnement pour les masses d'eau BR01 et BR02 et des stations de prélèvement sélectionnées dans le Socle et/ou le Crétacé 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 en concentration totale à l'exception du fer qui est mesuré en concentration dissoute. Tous les paramètres n'ont pas forcément été mesurés pour chaque analyse. En Région wallonne, les paramètres mesurés sont les mêmes qu'en Flandre. Les métaux sont également mesurés en concentration totale à l'exception du fer mais des paramètres supplémentaires ont été mesurés notamment le Br et des polluants (pesticides, micropolluants organiques, cyanures ...).

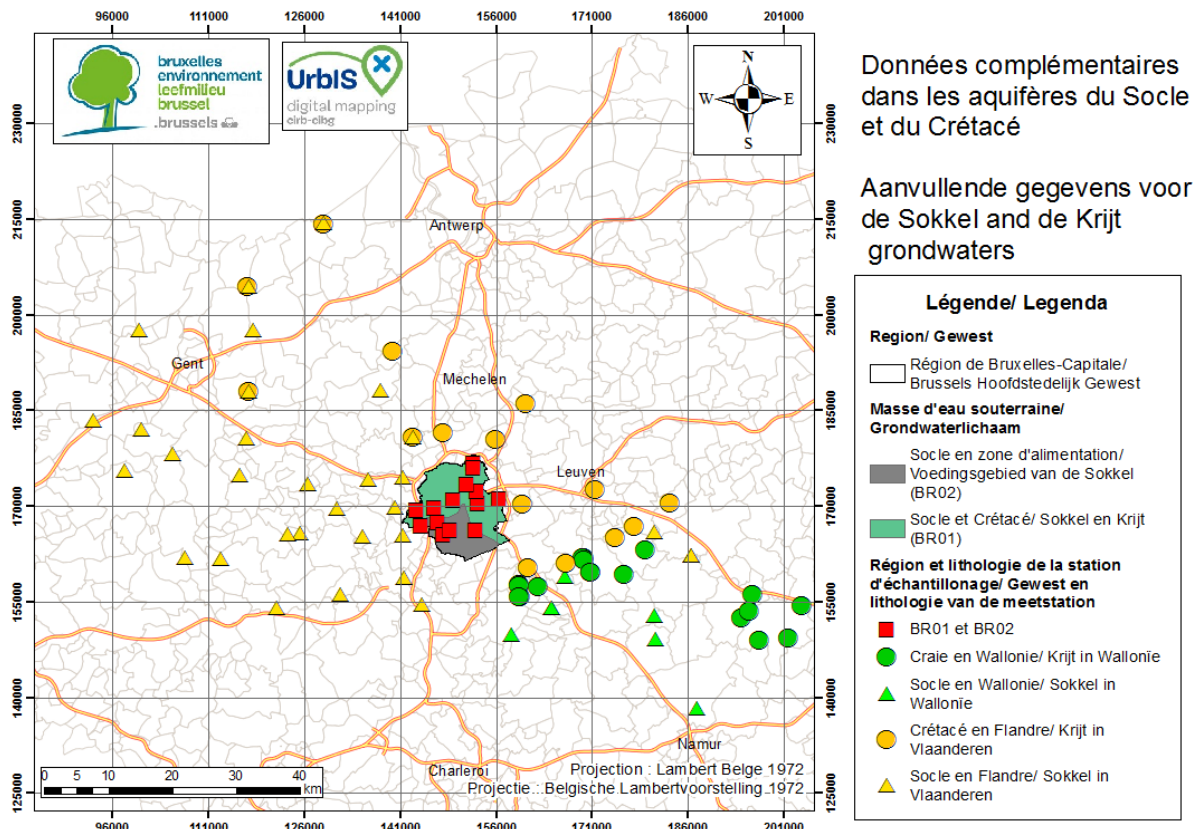


Figure 5-4 : Données complémentaires dans l'aquifère du Socle et dans l'aquifère du Crétacé, en Wallonie et en Flandre

Région	MESO	Aquifère	Point de prélèvement	Code	X	Y	Profondeur (m)	Nombre de mesures	Période de suivi	
Région wallonne	E160	Socle	PARC DE LA NOIRE EPINE P2	3258002	166783	158990		1	2015	
			BOIS LOWET	3948006	158290	149986		8	2006-2015	
			PUITS JAUMOTTE LIMAL	4014007	164610	154090		1	2007	
			Puits Martineau	4014008	164624	154078		4	2012-2015	
			SENTIER DONGELBERG	4035004	180830	152905		52	2007-2015	
			THOREMBAIS LES BEGUINES 62M	4038002	180922	149295		3	2006-2013	
			Irrigation 60M	4087002	187398	138393		5	2006-2015	
	E080	Crétacé	PECROT LA MARBAIX P1	3256001	169700	162000		2	1995-2000	
			PECROT P2	3256002	169642	161997		18	1995-2015	
			PECROT P20	3256003	169664	161739		19	1995-2014	
			LA MOTTE P2	3267002	170720	159800		31	1998-2015	
			LA MOTTE P3	3267004	170720	159800		23	1998-2015	
			BEAUSART ROBERTI 100M	3269003	175955	159370		1	2009	
			PUITS PROFOND RUE DU BROUX	3274002	179278	163223		15	1998-2015	
			PUITS S2	3943004	159550	157805		3	2007-2014	
			COUCOU PUIITS 1	3943011	159800	155939		24	1995-2015	
			GENVAL PUIITS S4	3943014	159560	157640		3	2007-2014	
			MOULIN PUIITS 2	3943016	159505	155888		17	1996-2015	
			Rosières	4011001	162540	157540		11	1995-2015	
			RUE DE LA VALLEE 54 35m	4111003	196084	156176		3	2006-2013	
			JANDRAIN-JANDRENOUILLE P3	4114002	194410	152622		46	1994-2015	
			Campagne à l'Arbre Pz1 31M	4114004	195569	153633		6	2003-2014	
			Moes PF1	4118017	197289	149144		1	2012	
	Vivier-Champiotte	4119002	201765	149460		1	2014			
	Christiaens Béton	4124003	203921	154445		3	2006-2013			
	Région flamande	BLKS_1100_GWL_2S	Crétacé	2-0005		171549	172681	119	5	2004-2009
				2-0007		160970	160430	136	1	2004
2-0012					166900	161070	70	9	2004-2014	
2-0111					183254	170590	170	9	2004-2014	
2-0117					177651	166995	112	9	2004-2014	
2-0419a					155951	180524	162	3	2011-2014	
2-0420a					160121	170401	130	3	2011-2014	
2-0424a					160635	186224	215	3	2011-2014	
2-0429a					174586	165125	104	3	2011-2014	
2-0113					186590	162370	86	9	2004-2014	
2-0438a			180804	166112	119	2	2013-2014			
SS_1300_GWL_2		Socle	2-0048		141520	158950	14	8	2006-2014	
			2-0415		131650	156174	51	3	2011-2014	
			2-0416a		141435	165457	63	3	2011-2014	

SS_1300_GWL_4	Crétacé	2-0428	121594	154145	38	3	2011-2014
		2-0435a	144289	154712	91	3	2012-2014
		4-0066	112834	161907	61	8	2006-2014
		4-0251a	107206	162083	147	4	2011-2014
	Socle	1-1110a	139839	194459	228	3	2011-2013
		2-0418a	147656	181650	176	3	2011-2014
		2-0427a	142914	180915	210	3	2012-2014
		4-0114	128908	214427	392	6	2006-2012
		4-0116	117145	204551	279	2	2006-2007
		4-0272a	117253	188146	192	1	2014
		2-0025	136044	174228	82	9	2004-2014
		2-0047	135107	165362	70	9	2004-2014
		2-0417a	141375	174618	178	3	2011-2014
		2-0427a	142914	180915	230	3	2011-2014
		2-0432a	130998	169789	123	3	2012-2014
		2-0434a	140132	169814	111	3	2011-2014
		4-0070	116923	180767	205	9	1990-2014
		4-0083	126426	173531	125	5	2006-2011
		4-0108	115784	174998	163	6	2006-2014
		4-0109	100440	182142	141	8	2006-2014
4-0110	100126	197675	264	3	2006-2009		
4-0113	128907	214442	503	5	2006-2012		
4-0115	117162	204553	378	7	2006-2012		
4-0118	125310	165800	96	8	2006-2014		
4-0252	123405	165780	110	4	2011-2014		
4-0255a	97759	175647	130	4	2011-2014		
4-0256a	105333	178281	168	4	2011-2014		
4-0257a	92868	183585	188	4	2011-2014		
4-0270a	117866	197649	272	4	2011-2014		
4-0272a	117253	188146	207	1	2014		
4-0300	137881	188197	355	4	2011-2014		

Tableau 5-2 : Récapitulatif des données complémentaires dans les masses d'eau du Socle et du Crétacé sélectionnées 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

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, il a été possible de connaître la lithologie de l'aquifère sollicité par la station d'échantillonnage pour les masses d'eau BR01 et BR02. Les résultats sont présentés à la figure 5-5.

Pour la masse d'eau BR01, 3 stations d'échantillonnage sont crépinées dans le Socle, 2 sont crépinées dans le Crétacé et 4 sont crépinées dans le Socle et le Crétacé. Toutes les stations sont donc crépinées dans l'aquifère correspondant à la masse d'eau du Socle et du Crétacé.

Pour la masse d'eau BR02, 3 points sont crépinés dans le Socle mais le point Lavoisier Carsen Stalle (P24) est crépiné dans le Socle et le Landénien et le point Calypso (P23) est crépiné dans le Socle, le Crétacé et le Landénien. Le point Carsen Stalle est crépiné majoritairement

dans le Landénien il sera donc écarté de l'analyse. Le point Calypso est majoritairement crépiné dans le Socle et potentiellement un peu dans la craie et un peu dans les argiles de Lincent du Landénien. Il est proposé que ce point soit conservé dans l'analyse mais en restant critique vis-à-vis des résultats qui pourraient être le résultat d'un mélange de plusieurs masses d'eau.

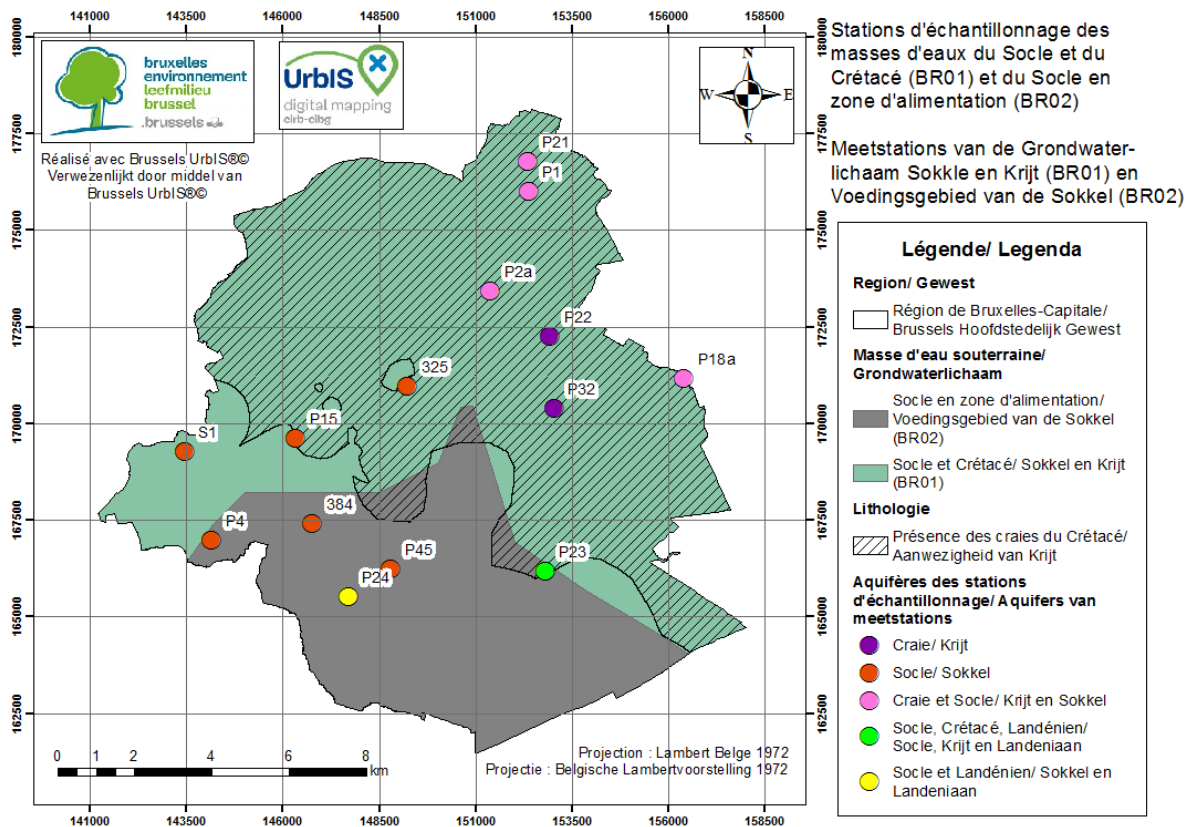


Figure 5-5 : Aquifère sollicité par la station d'échantillonnage (La délimitation des craies provient du modèle stratigraphique réalisé dans le cadre du projet Hydroland).

5.1.3.2. Balance ionique

La balance ionique a été calculée pour chaque échantillon et les résultats sont présentés dans le tableau 5-3. On constate que de nombreux échantillons présentent des balances ioniques supérieures à 10 % ou inférieures à -10 % principalement en Région de Bruxelles-Capitale et en Région wallonne. Ces balances ioniques qui sortent de l'intervalle de confiance sont liées à des analyses incomplètes (l'ensemble des éléments majeurs n'ont pas été analysés).

En prenant les échantillons à partir de l'année 2006 (début de la campagne de surveillance) pour les masses d'eau BR01 et BR02, une grande partie des échantillons avec une balance ionique trop élevée est éliminée. Il reste tout de même 14 échantillons avec une balance ionique qui sort de l'intervalle de confiance pour la masse d'eau BR01 et 5 pour la masse d'eau BR02. Comme précisé dans le chapitre matériel et méthode, les analyses avec une balance ionique qui sort de l'intervalle de confiance, seront éliminées si tous les éléments majeurs ont été mesurés. Par contre si tous les éléments majeurs n'ont pas été analysés,

l'analyse sera conservée provisoirement et s'il n'y a ni polluants ni anomalie, elle pourra être conservée.

Pour vérifier la qualité des données, la balance ionique est ensuite recalculée à partir de la médiane des concentrations pour chaque station. La balance ionique est comprise entre -10% et 10% pour la majorité des stations d'échantillonnage à l'exception de 3 stations en Flandre. Ces 3 stations ont des balances ioniques comprises entre 10 et 12.5 %. Tous les éléments majeurs ont été analysés, ces stations d'échantillonnage seront donc exclues pour la suite de l'analyse.

	Région Bruxelles Capitale BR01	Région Bruxelles Capitale BR02	Région wallonne	Région flamande
Nb stations d'échantillonnage	9	4	25	45
Nb d'analyses (total)	145	48	301	212
Nb d'analyses (à partir de 2006)	61	45		
Nb analyses avec BI > 10% ou < 10% (total)	96	7	80	30
Nb analyses avec BI > 10% ou < 10% (à partir de 2006)	14	5		
Médiane des stations d'échantillonnage avec BI > 10% ou < 10%	0	0	0	3

Tableau 5-3 : Calcul de la balance ionique des échantillons du Socle et du Crétacé (Nb = nombre, BI = balance ionique)

5.1.3.3. Limite de quantification

Les limites de quantification des principaux éléments mineurs et en traces sont présentées dans le tableau 5-4. Pour chaque élément, le nombre total d'analyses est indiqué ainsi que le nombre d'analyses dont la valeur est supérieure à la limite de quantification, 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. On constate également qu'il y a aussi des différences dans les limites de quantification entre les 3 régions.

Les valeurs inférieures à la limite de quantification seront traitées comme recommandé par le projet BRIDGE (Müller, 2006). La valeur utilisée sera la limite de quantification divisée par 2. Les valeurs de limite de quantification qui sont égales ou supérieur aux normes seront exclues de l'analyse. 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). C'est le cas de certaines valeurs pour le plomb, le nitrite et l'arsenic.

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, le mercure et le nitrite. Pour ces paramètres, comme les concentrations sont rarement supérieures à la limite de quantification, 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. A Bruxelles, le fer total est mesuré tandis que dans les autres régions il s'agit du fer dissous. Concernant le phosphore, en Région de Bruxelles-Capitale et en Région wallonne c'est les orthophosphates et le phosphore total qui est mesuré tandis qu'en Région flamande, c'est uniquement le phosphate qui est mesuré.

Paramètre	unité	BR01 : Socle et Crétacé Région de Bruxelles-Capitale				BR02 : Socle en zone d'alimentation de Bruxelles-Capitale				Socle et Crétacé Région Flamande				Socle et Crétacé Région Wallonne			
		Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ	Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ	Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ	Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ
Aluminium dissous	µg/L									115	12	10	10, 20, 40, 50				
Aluminium total	µg/L	49	39	80	1, 10, 20	40	34	85	1, 10	42	2	5	20, 40, 50	284	235	83	1, 10, 20
Ammonium	mg/L	49	39	80	0.05	42	34	81	0.05	212	188	89	0.05, 0.11, 0.16, 0.35	285	200	70	0.05
Arsenic total	µg/L	51	22	43	0.5, 1, 5, 20	42	0	0	0.5, 1, 5	66	30	45	0.5, 2, 5	271	200	74	0.2, 1, 4, 8
Baryum total	µg/L	49	49	100		40	40	100						223	223	100	
Bore total	µg/L	52	52	100		42	42	100		46	35	76	10, 30, 100	220	203	92	20, 25, 80
Bromure	µg/L	35	35	100		21	21	100						44	33	75	1000
Cadmium dissous	µg/L	44	2	5	0.1	38	0	0	0.1								
Cadmium total	µg/L	51	2	4	0.1	42	2	5	0.1	66	2	3	0.03, 0.5, 1	281	16	6	0.03, 0.1, 0.2, 0.5, 1
Chrome total	µg/L	49	1	2	0.5, 1, 2	40	3	8	0.5, 2	66	4	6	1, 2, 5, 10	283	86	30	0.5, 1, 2, 4, 8
Cobalt total	µg/L	49	8	16	0.1, 1, 2	40	5	13	0.1, 2					17	1	6	0.1
Cuivre total	µg/L	49	12	24	1, 2	40	16	40	1, 2	66	3	5	0.4, 2, 4, 5	285	151	53	1, 2, 4, 8, 20
Fer dissous	µg/L									208	171	82	20, 40, 50	279	238	85	2
Fer total	µg/L	49	48	98	5	40	37	93	5								
Fluorure	µg/L	46	44	96	200	38	38	100		67	65	97	100, 200	256	247	96	50

Paramètre	unité	BR01 : Socle et Crétacé Région de Bruxelles-Capitale				BR02 : Socle en zone d'alimentation de Bruxelles-Capitale				Socle et Crétacé Région Flamande				Socle et Crétacé Région Wallonne			
		Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ	Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ	Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ	Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ
Manganèse dissous										200	146	73	7, 10				
Manganèse total	µg/L	49	48	98	1	40	37	93	0,5, 1	66	53	80	10	288	198	69	4, 5, 20
Mercure dissous	µg/L	44	0	0	0,02, 0,04, 0,05	38	0	0	0,02, 0,05								
Mercure total	µg/L	49	2	4	0,02, 0,03, 0,05	42	0	0	0,02, 0,03, 0,05	66	0	0	0,05, 0,01, 0,05, 0,1, 0,3, 0,5	196	9	5	0,02, 0,05, 0,1, 0,5
Molybdène total	µg/L	47	47	100		40	37	93	0					1	1	100	
Nickel dissous	µg/L	44	7	16	1, 2	38	5	13	1, 2								
Nickel total	µg/L	51	13	25	1, 2, 5	42	6	14	1, 2, 5	66	3	5	2, 4, 5	285	221	78	2, 4, 8
Nitrate	mg/L	57	8	14	0,05, 0,1, 1, 2	42	15	36	0,05, 1, 2	211	67	32	0,20, 0,90	289	223	77	0,02, 0,1, 1, 2
Nitrite	mg/L	49	1	2	0,01, 0,02, 0,03	42	5	12	0,01, 0,02, 0,03	211	43	20	0,010,0,030, 0,070	283	70	25	0,01, 0,02, 0,03, 1
Ortho-phosphates	mg/L	38	34	89	0,0066	34	30	88	0,0066					217	154	71	0,02, 0,05, 0,23
Phosphate	mg/L	8	0	0	0,1, 0,5	0	0	0		189	125	66	0,05, 0,10, 0,31	2	2	100	
Phosphore total	mg/L	49	7	14	0,05, 0,1	42	9	21	0,05, 0,1					118	58	49	0,1, 0,23, 1

Paramètre	unité	BR01 : Socle et Crétacé Région de Bruxelles-Capitale				BR02 : Socle en zone d'alimentation de Bruxelles-Capitale				Socle et Crétacé Région Flamande				Socle et Crétacé Région Wallonne			
		Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ	Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ	Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ	Nb analyses	Nb > LQ	% > LQ	LQ
Plomb dissous	µg/L	44	5	11	0.1	38	3	8	0.1								
Plomb total	µg/L	51	40	78	0.1, 5	42	33	79	0.1, 5	66	4	6	0.5, 2, 5, 10	283	95	34	0.1, 0.5, 1, 4, 8
Strontium	µg/L	42	42	100		38	38	100						200	200	100	
Tétrachloro éthylène	µg/L	49	3	6	0.1	42	0	0	0.1					124	3	2	0.1
Trichloro éthylène	µg/L	49	1	2	0.1	42	4	10	0.1					125	1	1	0.1
Vanadium	µg/L	38	37	97	0.1	34	21	62	0.1					3	0	0	
Zinc total	µg/L	51	51	100	2	42	40	95	2	65	28	43	5, 10, 20	285	239	84	2, 20

Tableau 5-4 : Limite de quantification des principaux éléments mineurs et en trace du Socle et du Crétacé (Nb = nombre, LQ = limite de quantification)

5.1.3.4. Présence de polluants

Pour déterminer les concentrations de référence, il faut normalement écarter les points qui sont impactés par des contaminations anthropiques. Dans ce travail cette règle sera un peu nuancée comme expliqué dans le chapitre 3 matériel et méthodes. Les échantillons impactés par une contamination anthropique seront traités différemment si tous les échantillons de la station d'échantillonnage sont impactés ou s'il s'agit seulement d'un ou deux échantillons. Et si l'ensemble des échantillons sont impactés, ils seront tout de même conservés pour la suite de l'analyse pour évaluer si la contamination a un impact significatif ou non sur la minéralisation.

Les principaux polluants qui sont retrouvés dans la nappe du Socle et du Crétacé sont repris dans le tableau 5-4. Pour chaque région, une liste des échantillons a été établie pour lesquels au moins une analyse dépasse la norme. 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). Pour certains polluants (le benzène, les pesticides, les cyanures, le tétrachloroéthylène et trichloréthylène), il est également indiqué quand ils sont présents à une concentration supérieure à la limite de quantification car ceux-ci ne sont pas censés être présent naturellement, ce qui indique un impact anthropique. Pour les points situés en Région flamande, les données ne sont pas disponibles pour ces polluants.

Dans le tableau 5-4, il est possible de constater que de nombreux puits semblent impactés. En Région wallonne, où l'aquifère est partiellement libre, plusieurs points présentent des concentrations en nitrates élevées et des pesticides sont généralement détectés. En Région de Bruxelles-Capitale et en Région flamande, ce n'est généralement pas le cas ce qui est plutôt cohérent avec ce qui est attendu parce que la nappe du Socle et du Crétacé est principalement captive dans ces régions et les conditions sont vraisemblablement anaérobiques. Il y a tout de même quelques exceptions. Pour la masse d'eau BR01, le dernier échantillon du puits 325 a une concentration en nitrate qui dépasse 10 mg/L. Le point P23 dans la masse d'eau BR02 présente une concentration en nitrate systématiquement supérieure à la norme de l'eau potable (50 mg/L). En Flandre, un point a une concentration en nitrate supérieur à 10 mg/L, le point 2-0048.

Par contre, concernant les polluants organiques, le cyanure et les pesticides, pratiquement tous les puits des masses d'eau souterraine BR01 et BR02 en Région de Bruxelles-Capitale, présentent un ou plusieurs polluants qui dépassent la limite de quantification. Cependant, c'est généralement non récurrent et les normes sont rarement dépassées à l'exception du puits P23. Pour un aperçu plus détaillé des polluants quantifiés dans chaque station

d'échantillonnage des masses d'eau BR01 et BR02, un graphique est présenté dans l'annexe A1.

Il y aussi d'autres polluants qui sont quantifiés dans la masse d'eau du socle et du Crétacé : des métaux (notamment le fer et le manganèse), le chlore, le sodium, le sulfate, le fluor, le bore et l'ammonium. Cependant, ces éléments peuvent aussi être présents naturellement, notamment suite à l'occurrence de conditions réductrices, voire en liaison avec d'anciennes eaux marines. Il ne faut donc pas exclure directement les points avec des concentrations élevées en ces différents éléments.

Au final, la majorité des points de monitoring du Socle et du Crétacé en Région de Bruxelles-Capitale semblent impactés par des activités anthropiques mais la plupart ne seront pas éliminés directement. Ils seront inclus dans la suite des analyses pour voir si l'impact anthropique influence la minéralisation de manière significative.

Certains échantillons seront tout de même exclus de l'analyse. Il s'agit d'échantillons présentant une anomalie et qui se démarquent fortement des autres échantillons de la même station d'échantillonnage (présence de polluants, minéralisation différente). Il s'agit peut-être d'une contamination ponctuelle de la station, d'une mauvaise purge ou il a été aussi évoqué que pour certaines stations d'échantillonnage, les lavoirs par exemple, l'eau utilisé pouvait être celle de la nappe ou l'eau de distribution à certaines occasions. Peut-être qu'occasionnellement, des échantillonnages ont donc été réalisés sur l'eau de distribution et non celle de la nappe. Les échantillons qui seront écartés sont les suivants: l'échantillon 2016 du puits P2a, l'échantillon 2013 du puits 325, l'échantillon de novembre 2006 du puits P1, les deux échantillons de 2013 du puits 384. Ces échantillons ne seront donc pas pris en compte pour le calcul des médianes.

Paramètres	Norme qualité de l'eau distribuée par réseau	Valeurs seuils applicables à la MESO BR03	Points du Socle et du Crétacé avec au moins un échantillon dépassant la norme eau potable ou avec des polluants organiques ou pesticides quantifiés			
			Région de Bruxelles-Capitale BR01	Région de Bruxelles-Capitale BR02	Région wallonne	Région flamande
Nickel	20 µg/L	20 µg/L	P1 (2006)	0	BOIS LOWET, MOULIN PUIITS 2, PUIITS PROFOND RUE DU BROUX	0
Arsenic	10 µg/L	10 µg/L	0	0	PUIITS PROFOND RUE DU BROUX	2-0048 (4x)
Plomb	10 µg/L	10 µg/L	0	0	0	2-0427a, 2-0432a
Cadmium	5 µg/L	5 µg/L	0	0	0	0
Mercure	1 µg/L	1 µg/L	0	0	0	0
Nitrite	0.5 mg/L	0.5 mg/L	0	0	0	2-0025, 2-0048, 4-0109
Ammonium (indicateur)	0.5 mg/L	0.5 mg/L	P1 (2006), P2a (2016), P15 (2011)	P4	LA MOTTE P2	2-0111, 2-0424a, 4-0114, 2-0047, 2-0415, 4-0108, 4-0109, 4-0110, 4-0113, 4-0115, 4-0118, 4-0255a, 4-0270a, 4-0300
Nitrate	50 mg/L mais > 10 mg/L indique influence anthropique (Müller, 2006)		> 10 mg/L : 325 (2013)	> 50 mg/L : P23 3 point (2010, 2015)	> 10 mg/L : Campagne l'Arbre Pz1 31M, JANDRAIN-JANDRENOUILLE P3, LA MOTTE P2, LA MOTTE P3, Moes PF1, PECROT LA MARBAIX P1, PERCOT P2, PERCOT P20, PUIITS PROFOND RUE DU BROUX, SENTIER DONGELBERG	> 10 mg/L : 2-0048
Sélénium	10 µg/L		0	0	0	*
Antimoine	5 µg/L		0	0	0	*
Fluorures	1.5 mg/L		0	0	0	2-0432a, 4-0300
Bore	1 mg/L		0	0	0	4-0300
Benzène	1 µg/L		0 mais quantifié une fois dans S1	0 mais quantifié une fois 384	0 mais quantifié dans COUCOU PUIITS 1	*
Pesticides	0.1 µg/L		0 juste quantifié une fois pour P21, P22, P2a (2016)	P23 : pesticides quantifiés de manière	Dépasse la norme dans 2 puits : Puits Martineau et SENTIER DONGELBERG et est quantifié dans Irrigation 60M, PUIITS	*

				récurrente et la norme est plusieurs fois dépassée; juste quantifié pour P45, P4	JAUMOTTE LIMAL, Rosière, COUCOU PUIITS 1, JANDRAIN-JANDRENOUILLE P3, LA MOTTE P2, LA MOTTE P3, MOULIN PUIITS 2, PECROT LA MARBAIX P1, PECROT P2, PECROT P20, PUIITS PROFOND RUE DU BROUX, RUE DE LA VALLEE 54 35m	
Cyanures	50 µg/L		0 mais quantifié une fois dans P2a (2016)	0	0 mais est quantifié dans : LA MOTTE P2, LA MOTTE P3, PUIITS PROFOND RUE DU BROUX, SENTIER DONGELBERG	*
Tétra chloroéthylène et trichloréthylène	10 µg/L	10 µg/L	ok mais quantifié pour P21, P18a, P15	0 mais quantifié pour 384 (2x) et de manière récurrente pour P23	0 mais est quantifié dans : COUCOU PUIITS 1, JANDRAIN-JANDRENOUILLE P3	*
Escherichia Coli (nb/100ml)	0		0	0	JANDRAIN-JANDRENOUILLE P3, LA MOTTE P2, Irrigation 60M, SENTIER DONGELBERG	*
Entérocoques (nb/100ml)	0		0	P45	JANDRAIN-JANDRENOUILLE P3, LA MOTTE P2, PECROT P20, Irrigation 60M, SENTIER DONGELBERG	*
Chlorure de vinyle	0.5 µg/L		0	0	0	*
Aluminium (indicateur)	200 µg/L		P2a (2016)	0	COUCOU PUIITS 1, Moes PF1, MOULIN PUIITS 2	2-0025, 2-0432a, 4-0118, 4-0256a
Sulfates (indicateur)	250 mg/L	250 mg/L	0	0	0	4-0114, 4-0113
Chlorures (indicateur)	250 mg/L	150 mg/L	>250 mg/L : S1, P21, P15, P1 >150 mg/L : P2a (2008), P18a	0	0	>250 mg/L : 1-1110a, 2-0424a, 4-0114, 4-0116, 2-0427a, 4-0108, 4-0109, 4-0113, 4-0115, 4-0270a, 4-0300 >150 mg/L : 2-0418a, 2-0419a, 2-0417a, 4-0109, 4-0110, 4-0257a
Manganèse	50 µg/L		P32, S1, P21, P15,	384, P4	BOIS LOWET, PUIITS JAUMOTTE LIMAL,	2-0012, 1-1110a, 4-0114, 4-

(indicateur)			P22, P1, P2a		Puits Martineau, SENTIER DONGELBERG, Irrigation 60M, Rosière, COUCOU PUIITS 1, Moes PF1, MOULIN PUIITS 2, PUIITS S2, RUE DE LA VALLEE 54 35m	0272a, 2-0047, 2-0048, 2- 0113, 2-0416a, 2-0417a, 2- 0427a, 2-0428, 2-0432a, 4- 0070, 4-0109, 4-0110, 4- 0113, 4-0115, 4-0251a
Sodium (indicateur)	200 mg/L		S1, P15, P21	0	0	1-1110a, 2-0424a, 4-0114, 4-0116, 2-0417a, 2-0427a, 4-0070, 4-0083, 4-0108, 4- 0109, 4-0110, 4-0113, 4- 0115, 4-0255a, 4-0256a, 4- 0257a, 4-0270a, 4-0300
Fer (indicateur)	200 µg/L		P32, 325, P15, P18a, P22, P1, P2a	384, P4, P45	BOIS LOWET, PUIITS JAUMOTTE LIMAL, Puits Martineau, Irrigation 60M, Rosière, COUCOU PUIITS 1, GENVAL PUIITS S4, JANDRAIN-JANDRENOUILLE P3, Moes PF1, MOULIN PUIITS 2, PUIITS S2, Vivier-Champiotte, PUIITS PROFOND RUE DU BROUX	2-0007, 2-0012, 1-1110a, 2- 0117, 2-0420a, 2-0429a, 4- 0114, 4-0272a, 2-0025, 2- 0047, 2-0048, 2-0113, 2- 0415, 2-0416a, 2-0417a, 2- 0427a, 2-0428, 2-0432a, 2- 0435a, 2-0438a, 4-0070, 4- 0113, 4-0118, 4-0256a, 4- 0270a
Bactéries coliformes (/100ml) (indicateur)	0		S1	384, P4, P45	Rosières, COUCOU PUIITS 1, JANDRAIN- JANDRENOUILLE P3, LA MOTTE P2, MOULIN PUIITS 2, PUIITS PROFOND RUE DU BROUX, BOIS LOWET, Irrigation 60M, SENTIER DONGELBERG	*
Phosphore (total)		2.185 mg/L	0	0	0	*

Tableau 5-5 : Principaux polluants dans l'aquifère du Socle et du Crétacé (* : pas de données)

5.1.3.5. Analyses isotopiques

Lors des campagnes d'échantillonnage, des analyses isotopiques ont été réalisées par l'IBGE pour certains puits des masses d'eau du BR01 et BR02. Les analyses concernent le ^{14}C et le ^{36}Cl . Elles sont présentées aux tableaux 5-6 et 5-7. Dans les deux cas, les mesures sont inférieures aux limites de quantification. Une interprétation des données a quand même été réalisée en utilisant la limite de quantification.

Pour le carbone 14, 5 mesures ont été réalisées, 4 pour la masse d'eau BR01 et une pour la masse d'eau BR02. Toutes les mesures sont inférieures à la limite de quantification (1.2 -1.25 Bq/L). L'activité spécifique a ensuite été calculée en Bq/Kg C (Becquerel par Kg de carbone) en utilisant la valeur de la limite de quantification. L'activité spécifique obtenue est sous-estimée parce que la masse de carbone a été calculée en considérant la totalité des ions bicarbonates : ceux provenant du CO_2 dissous et ceux provenant des minéraux carbonatés. Il faut normalement évaluer les contributions respectives de ces deux sources de HCO_3 , puisque ces proportions déterminent l'activité initiale de ces ions (Michelot). Dans le tableau 5-6, le ^{14}C est également exprimé par rapport à un standard en pcm (pour cent mille). L'activité atmosphérique a été considérée jusqu'à la fin des années cinquante comme une constante. Aujourd'hui, les mesures d'activités en carbone-14 sont toujours exprimées en pourcentage par rapport à cette constante (qui équivaut à 0,227 Bq par gramme de C).

Les concentrations qui ont été calculées sont supérieures à 10 000 Bq/Kg C. Actuellement, l'activité spécifique est de l'ordre de 232 Bq/Kg C dans l'atmosphère. Cette activité a été relativement constante au cours du temps, il y a juste eu un pic de 400 Bq/Kg C après les essais nucléaires dans les années 1960. Dans l'eau de surface, l'activité moyenne des bicarbonates est de l'ordre de 150 – 250 Bq/Kg de C. Dans l'eau de mer à la Hague, les activités sont comprises entre 300 et 800 Bq/ kg C (IRSN, 2016). Les concentrations retrouvées habituellement dans le milieu naturel sont largement inférieures à ce qui a été calculé ici. L'activité calculée sur base de la limite de détection est 10 à 100 fois plus grande que l'activité moyenne de l'atmosphère. Il semblerait donc, que la limite de détection de l'appareil qui a été utilisé soit beaucoup trop grande et que l'appareil n'est donc pas adapté pour mesurer des concentrations naturelles.

Station	Code	Date	MESO	C 14 (Bq/l)	HCO3 (mg/l)	C inorg. mg/l (C-HCO3-)	C 14 (Bq/KgC)	C 14 (Bq/gC)	C 14 (Pcm)
Quiétude	P22	29-06-10	BR01	<1.25	272.9	53.7	23261.2	23.2	10247.2
Nationale Bank van België	325	24-06-10	BR01	<1.23	238.4	46.9	26198.6	26.2	11541.2
Solvay	P21	24-06-10	BR01	<1.22	217.9	42.9	28429.4	28.4	12524
UCL Services	P18a	29-06-10	BR01	<1.22	224.5	44.2	27594.8	27.6	12156.2

Techniques 2									
St Niklaas Instituut	P4	21-06-10	BR02	<1.2	449.9	88.6	13542	13.6	5965.6

Tableau 5-6 : Analyses isotopiques du C14 des masses d'eau BR01 et BR02

Les 8 mesures de ^{36}Cl qui ont été réalisées sont présentées au tableau 5-7. Elles sont également inférieures aux limites de quantification. La concentration (mg/L) a été estimée en utilisant la valeur de la limite de quantification. Le rapport $\text{Cl}36/\text{Cl}$ a ensuite été calculé. L'activité en ^{36}Cl est généralement de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-3} Bq/L (Colle *et al.*, 2002) dans les eaux souterraines et le rapport $^{36}\text{Cl} / \text{Cl}$ varie généralement entre 10^{-15} et 10^{-12} (Phillips, 2013). Les valeurs qui résultent de ces calculs sont entre 10^3 et 10^6 fois plus élevées que les valeurs habituellement rencontrées dans la nature. Comme pour le ^{14}C , les appareils qui ont été utilisés ne sont pas adaptés à des mesures si précises.

Station	Code	Date	MESO	Cl (mg/l)	Cl 36 (Bq/l)	Cl 36 (mg/l)	$^{36}\text{Cl} / \text{Cl}$
UCL Services Techniques 2	P18a	24-06-11	BR01	131.6	<3	2.40×10^{-6}	1.86×10^{-8}
UCL Services Techniques 2	P18a	08-12-11	BR01	130.8	<14	1.14×10^{-5}	8.80×10^{-8}
Lavoir Anderlecht	P15	02-12-11	BR01	106	<2.7	2.20×10^{-6}	2.00×10^{-8}
KIDB	P32	08-12-11	BR01	10.8	<2.4	1.96×10^{-6}	1.82×10^{-7}
Nationale Bank van België	325	07-12-11	BR01	117.4	<2.3	1.88×10^{-6}	1.60×10^{-8}
Solvay	P21	23-06-11	BR01	354.2	<2.1	1.72×10^{-6}	4.80×10^{-9}
Solvay	P21	06-12-11	BR01	358	<4	3.20×10^{-6}	9.20×10^{-9}
Quiétude	P22	24-06-11	BR01	16.3	<2.1	1.72×10^{-6}	1.06×10^{-7}

Tableau 5-7 : Analyses isotopiques du C36 des masses d'eau BR01 et BR02

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

5.2.1. Faciès hydrochimiques : diagramme de Piper

Les échantillons du Socle et du Crétacé sont représentés dans un diagramme de Piper à la figure 5-6. Dans le cas où il aurait eu plusieurs échantillonnages, c'est la médiane des concentrations qui est utilisée. Les échantillons du Socle et du Crétacé appartiennent principalement au faciès bicarbonaté calcique et magnésien, au faciès bicarbonaté sodique et potassique et faciès chloruré sodique et potassique. Il y a également un échantillon au faciès sulfaté sodique et un échantillon au faciès chloruré calcique et magnésien. Les eaux caractérisées par les faciès bicarbonaté sodique et potassique ou un faciès chloruré sodique et potassique proviennent de la Région de Bruxelles-Capitale et la Région flamande.

Au sein du faciès bicarbonaté calcique et magnésien, 2 pôles se distinguent : un avec une proportion faible en SO₄, Cl et NO₃ et un avec une proportion élevée en ces éléments. Dans les deux groupes, des échantillons des trois régions sont retrouvés mais ils sont généralement situés au sud de la Région de Bruxelles-Capitale. Le premier groupe rassemble des eaux « douces » qui ne sont a priori pas contaminées. Le deuxième groupe rassemble plutôt des eaux contaminées. Il comporte principalement les échantillons de la Région wallonne, un échantillon de la Région Bruxelles-Capitale (P23) et un échantillon de la Région flamande (2-0048) qui présentent tous des concentrations en nitrate relativement élevées. Il y a également le puits P18a qui a un faciès chloruré calcique et magnésien et qui est relativement proche du groupe contaminé. Il ne présente cependant, pas des concentrations élevées en nitrate mais plutôt une proportion élevée de chlorure pour une proportion faible de sodium.

Le diagramme de Piper montre qu'il y a une évolution depuis les eaux douces (bicarbonatées calciques et magnésiennes) 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. Les différents faciès des échantillons sont représentés spatialement à la figure 5-7. En Région wallonne et au Sud de la Région Bruxelles-Capitale et de la Région flamande, les eaux sont de type bicarbonaté calcique et magnésien. Au nord de la Région de Bruxelles-Capitale et de la Région flamande, les eaux évoluent vers des faciès bicarbonaté sodique et potassique et des faciès chloruré sodique et potassique. Les eaux s'écoulent globalement du sud vers les nord. Les eaux jeunes sont donc bicarbonatées calciques et magnésiennes et les eaux plus anciennes sont de type bicarbonaté sodique et potassique (et localement chloruré sodique et potassique). 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).

En Région de Bruxelles-Capitale, la masse d'eau du Socle en Zone d'Alimentation (BR02) contient des eaux bicarbonatées calcique et magnésienne qui sont à priori jeunes. La masse d'eau du Socle et du Crétacé contient des eaux bicarbonatées sodique et potassique, chlorurées sodique et potassique mais aussi des eaux bicarbonatées calcique et magnésienne et chlorurées calciques et magnésiennes. La limite entre les deux masses d'eau ne correspond donc pas tout à fait au front de rafraîchissement.

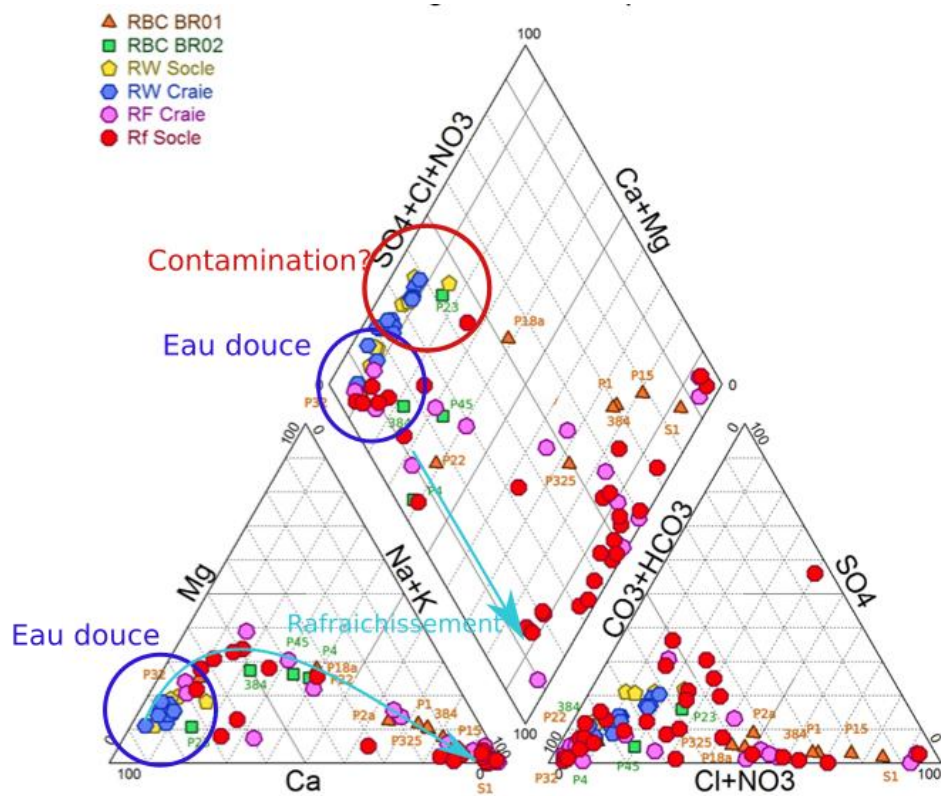


Figure 5-6 : Représentation des échantillons du Socle et du Crétacé (médiane) dans un diagramme de Piper

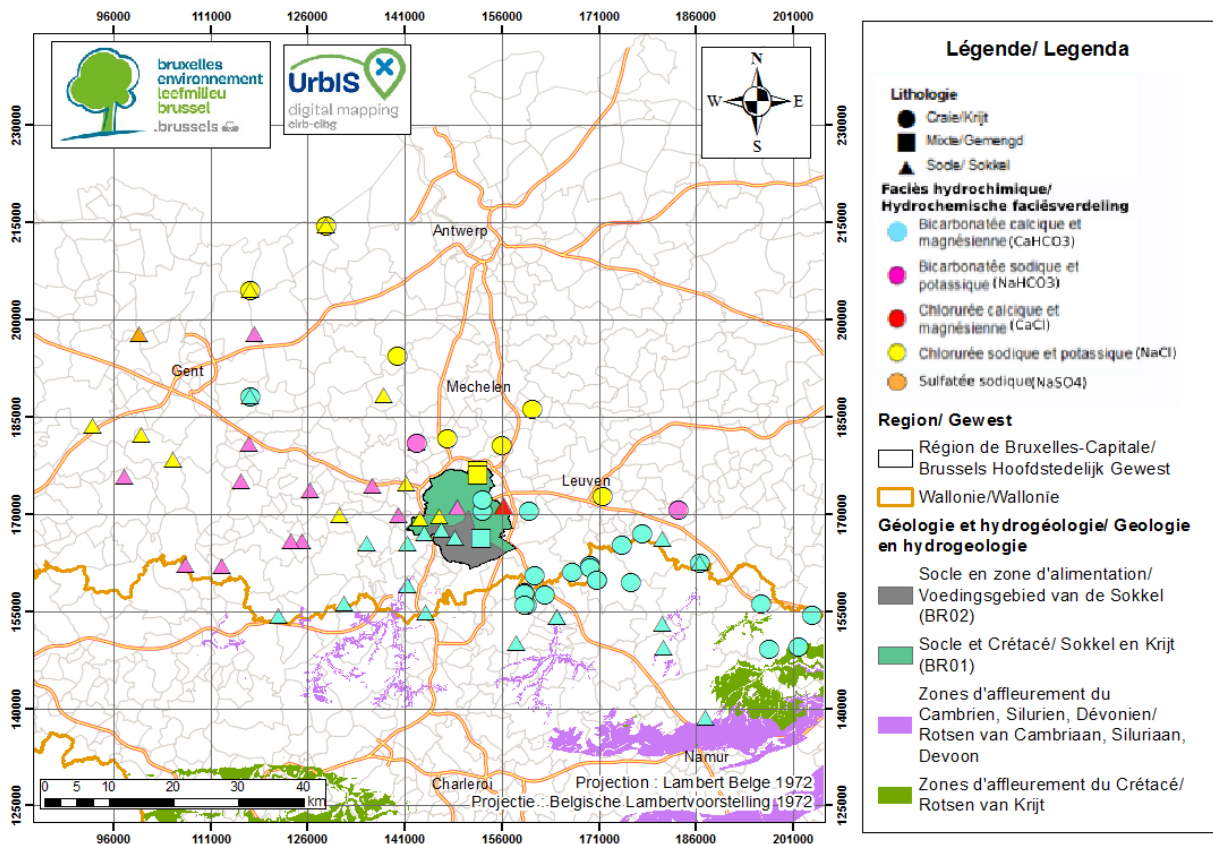


Figure 5-7 : Répartition spatiale des types de faciès hydrochimiques

5.2.2. Variations spatiales

Les figures 5-8 à 5-25 présentent les distributions spatiales des principaux paramètres, des éléments majeurs et de certains éléments mineurs, à savoir la conductivité électrique de l'eau, le pH, et les concentrations en Ca, Cl, HCO₃, Mg, Na, K, SO₄, NO₃, O₂, NH₄, Fe, Mn, F, As, Zn et Pb.

La conductivité est globalement plus élevée au Nord qu'au Sud de la Région de Bruxelles-Capitale (jusqu'à 16000µS/cm au Nord), les valeurs de pH sont plutôt neutres au Sud et deviennent progressivement basiques vers le Nord (jusqu'à un pH de 10.5). 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 faibles (< 20 mg/L) dans le Sud de la Région de Bruxelles-Capitale puis elles augmentent à partir du Nord de la Région de Bruxelles-Capitale (entre 75 mg/L et 6000 mg/L). Les valeurs de concentrations en HCO₃ sont généralement moyennes ou faibles sauf à l'extrême Nord où quelques points ont des concentrations plus élevées (>500 mg/L). Les valeurs de concentrations en Mg sont moyennes au Sud (entre 10 et 20 mg/L), élevées en Région de Bruxelles-Capitale (jusqu'à 35 mg/L) et puis deviennent plus faibles au Nord (<10mg/L). Les valeurs de concentrations en Na sont faibles (<50 mg/L) au Sud et élevées au Nord (jusque 3500 mg/L). Les valeurs de concentrations en K sont globalement plus faibles au Sud (<10 mg/L) qu'au Nord (entre 10 et 55 mg/L) mais il y a quand même quelques variations dans le Nord. Les valeurs de concentrations en SO₄ sont plutôt moyennes à faibles dans l'ensemble de la zone (< 80 mg/L) sauf quelques valeurs en Région wallonne et à l'extrême Nord-Ouest où elles sont plus élevées. 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 O₂ sont plutôt élevées en Région wallonne, elles sont plus faibles en Région flamande, par contre, elles sont plus élevées en Région de Bruxelles-Capitale (jusqu'à 10.6 mg/L). Les valeurs de concentrations en NH₄ sont globalement plus élevées au Nord (entre 0.1 et 4 mg/L) qu'au Sud (<0.1 mg/L) mais avec une variabilité importante. Les valeurs de concentrations en Fe et Mn sont très variables dans toute la zone de la Région de Bruxelles-Capitale. Pour rappel, pour le Fe, il s'agit de la concentration totale en Région Bruxelles-Capitale et de la concentration dissoute dans les autres régions. Les valeurs de concentrations en F sont plus élevées au Nord (entre 500 et 3000) qu'au Sud (<300 µg/L). L'As et le Pb ne sont pas systématiquement quantifiés mais leurs concentrations semblent un peu plus élevées vers le Nord. Les valeurs de concentrations en Zn sont relativement variables (entre 0 et 400 µg/L) mais elles semblent plus élevées en Région de Bruxelles-Capitale.

Pour de nombreux paramètres, on constate qu'il y a une grande différence entre le Sud et le Nord de l'aquifère du Socle et du Crétacé et 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 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 et HCO_3 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 une 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 O_2 et NO_3 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 O_2 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.

La concentration en NH_4 est plus élevée vers le nord, ce qui indique des conditions réductrices. Les teneurs en Fe et en Mn sont très variables et elles peuvent déjà être présentes en grande quantité dans la partie Sud. Pour le Socle et le Crétacé, contrairement au Landénien, la nappe est déjà en partie captive 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 et le Crétacé. Il n'y a pas de transition nette entre la partie libre et la partie captive. C'est pour cette raison qu'il est beaucoup plus difficile de distinguer la zone oxiqne, la zone suboxiqne et la zone réductrice.

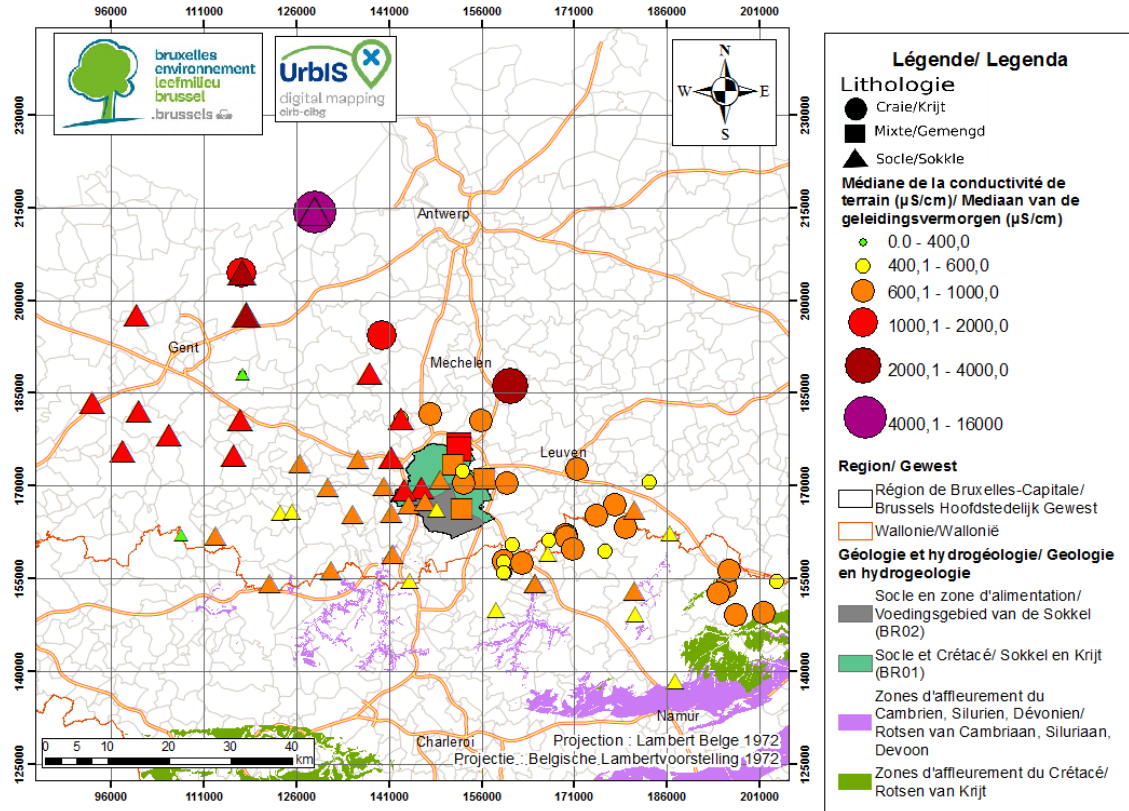


Figure 5-8 : Répartition spatiale de la conductivité de terrain dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

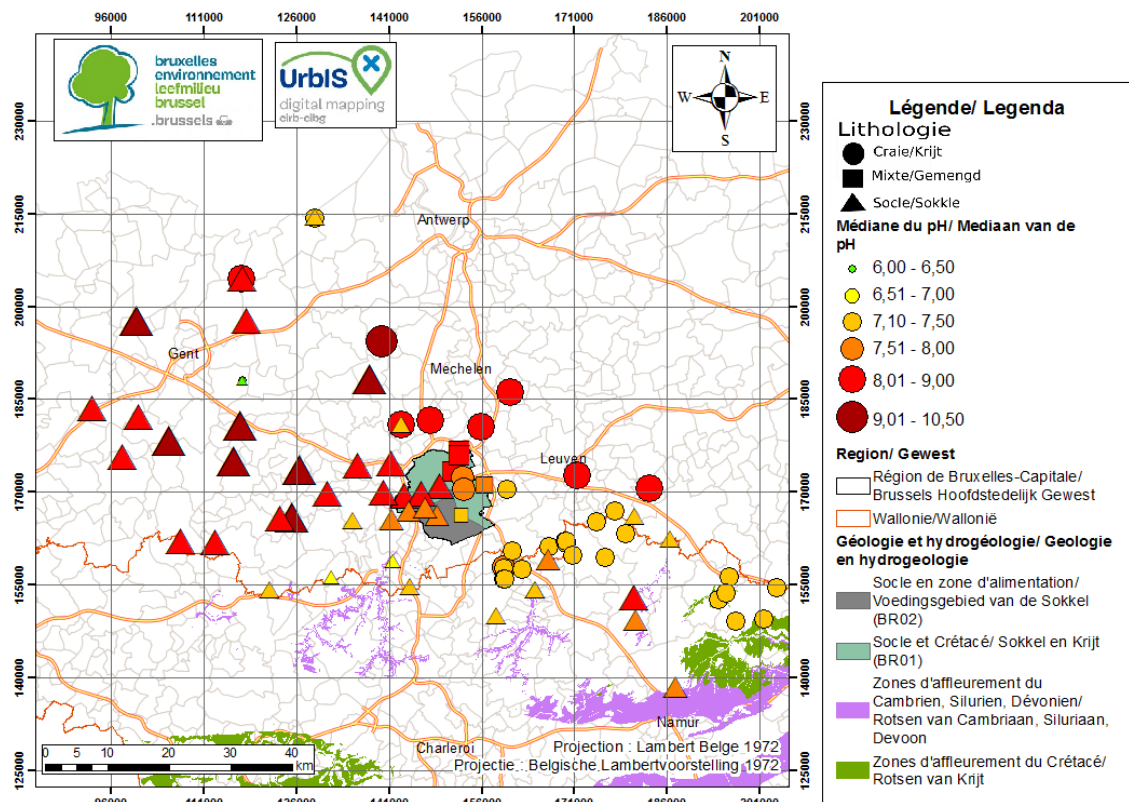


Figure 5-9 : Répartition spatiale du PH de terrain dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

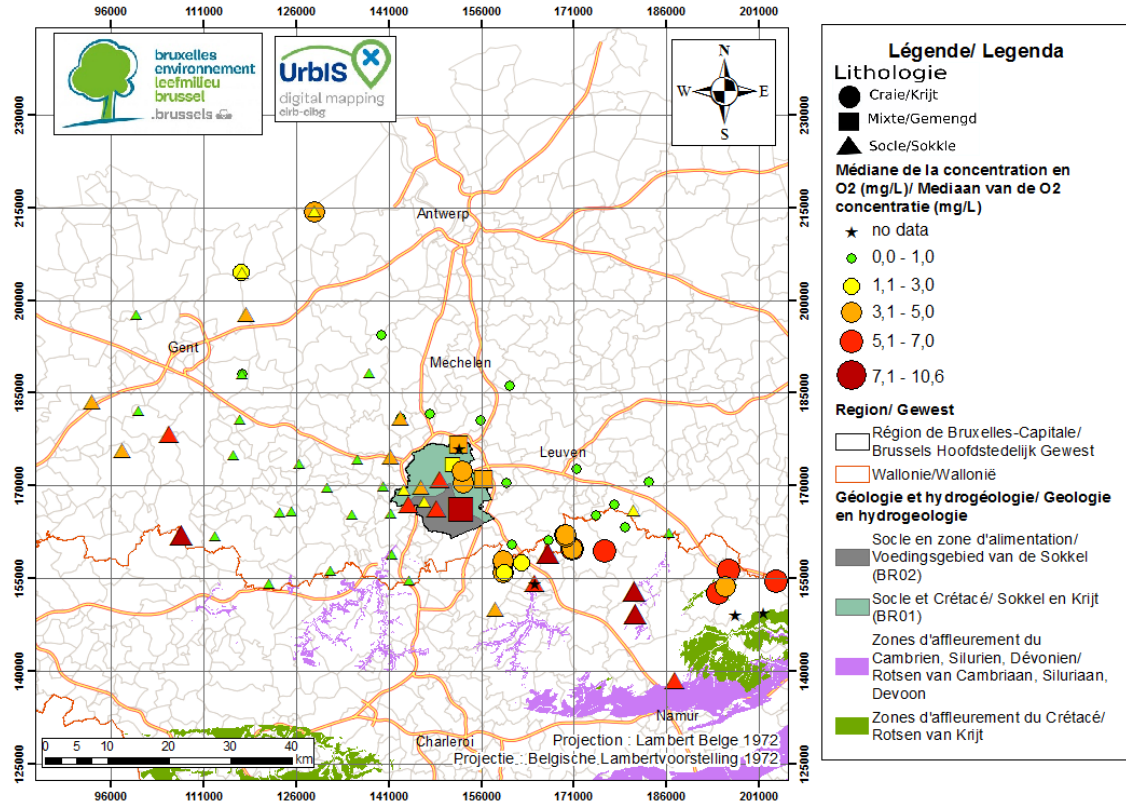


Figure 5-10 : Répartition spatiale de la concentration en O2 dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

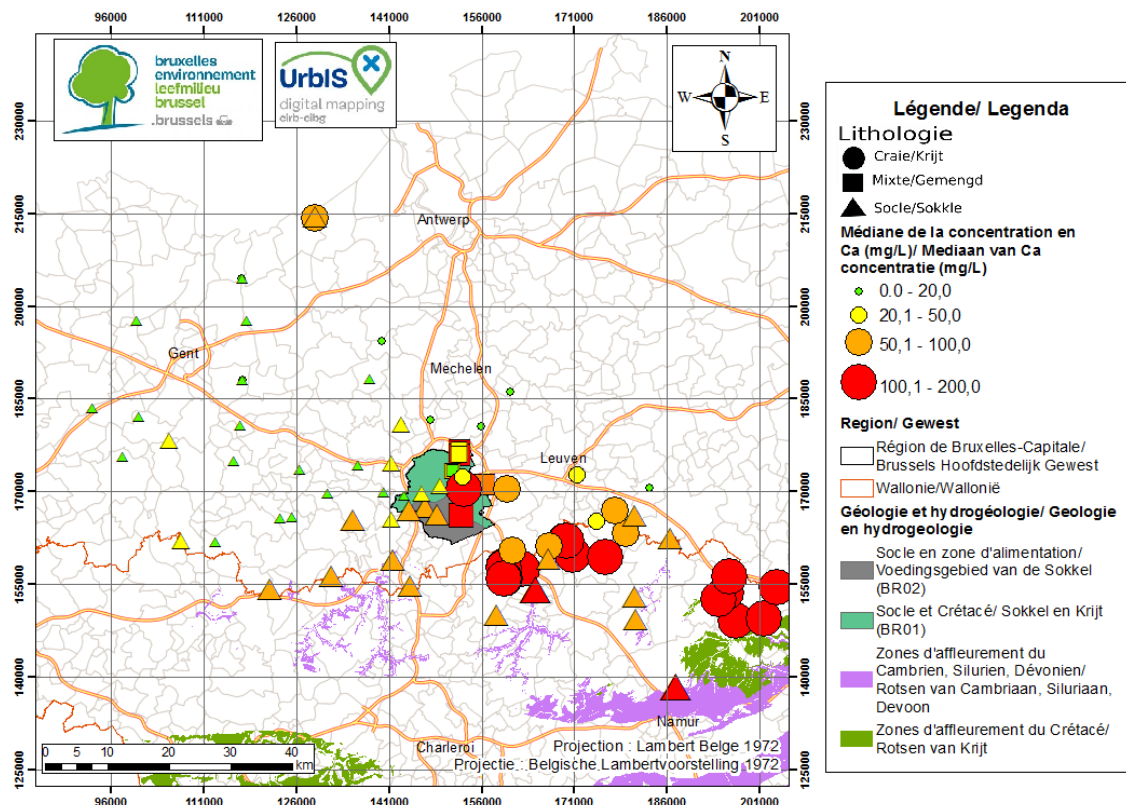


Figure 5-11 : Répartition spatiale de la concentration en Ca dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

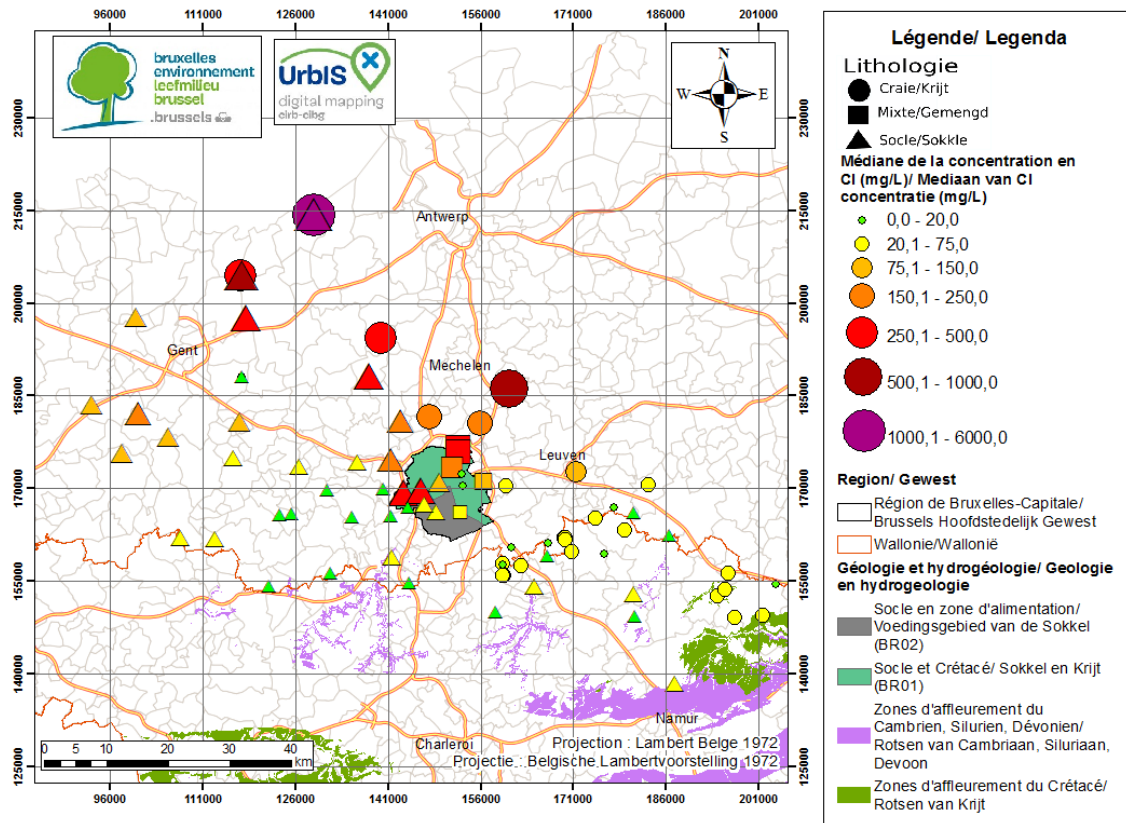


Figure 5-12 : Répartition spatiale de la concentration en Cl dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

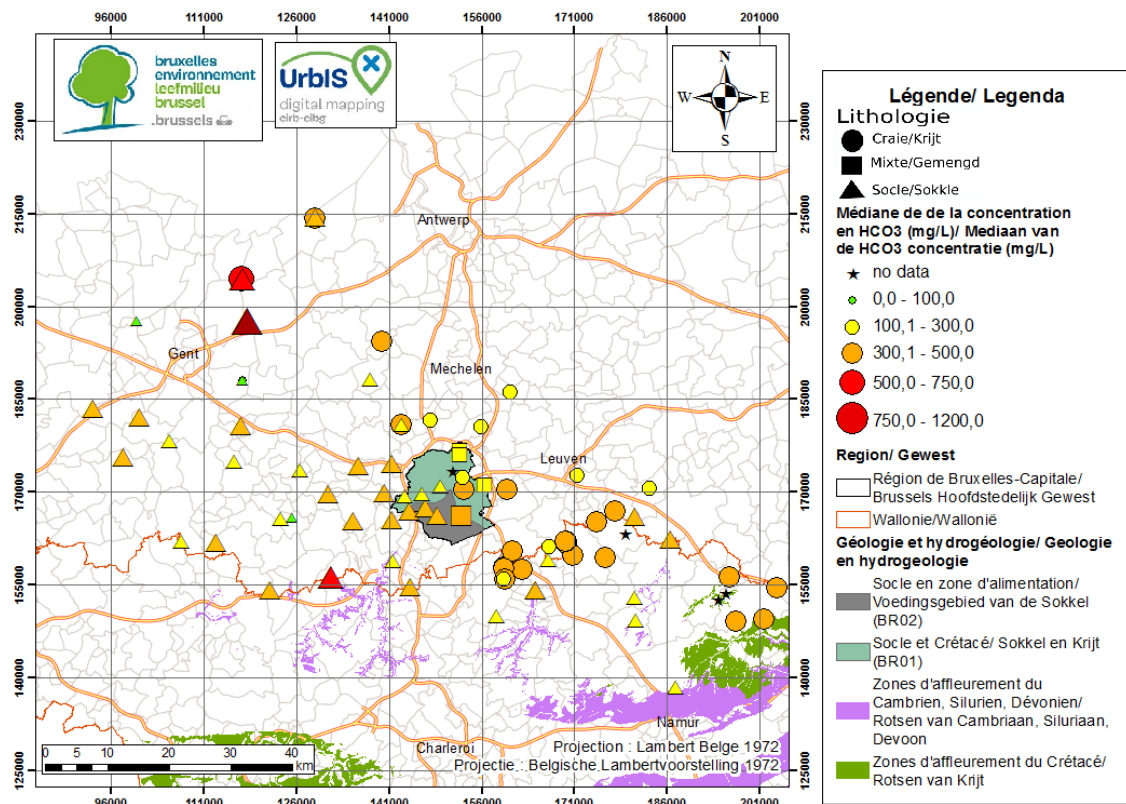


Figure 5-13 : Répartition spatiale de la concentration en HCO₃ dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

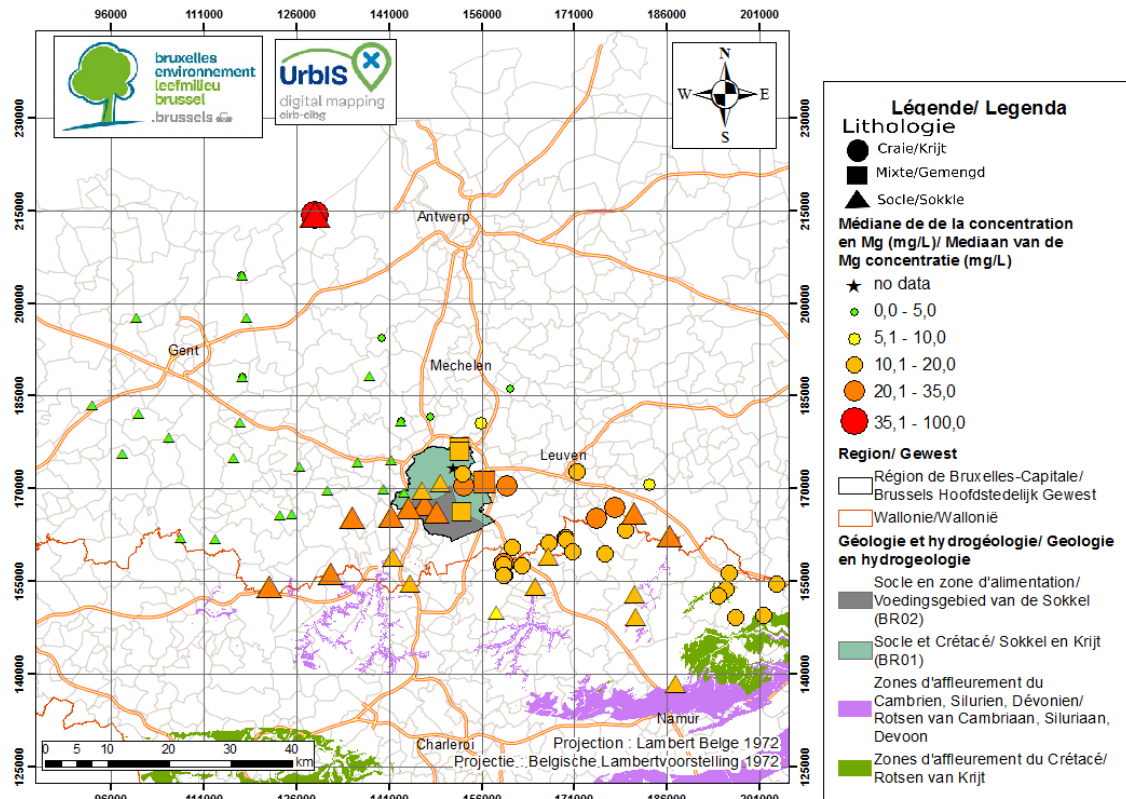


Figure 5-14 : Répartition spatiale de la concentration en Mg dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

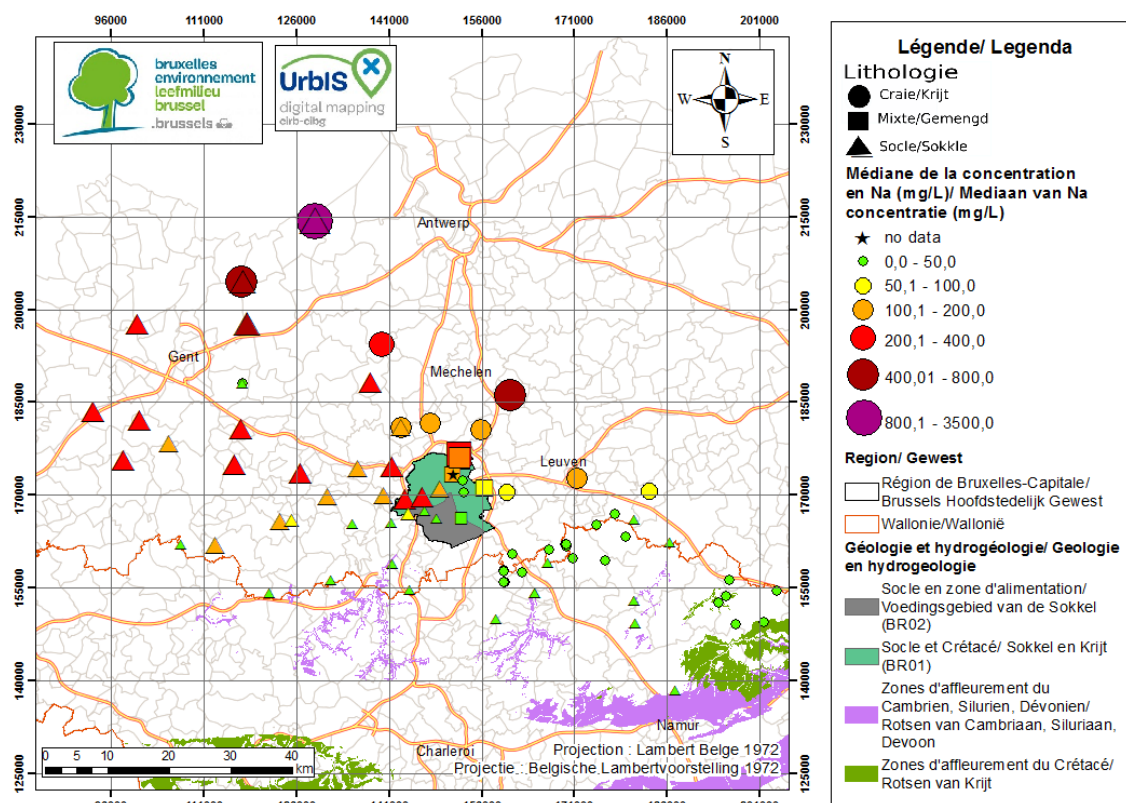


Figure 5-15 : Répartition spatiale de la concentration en Na dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

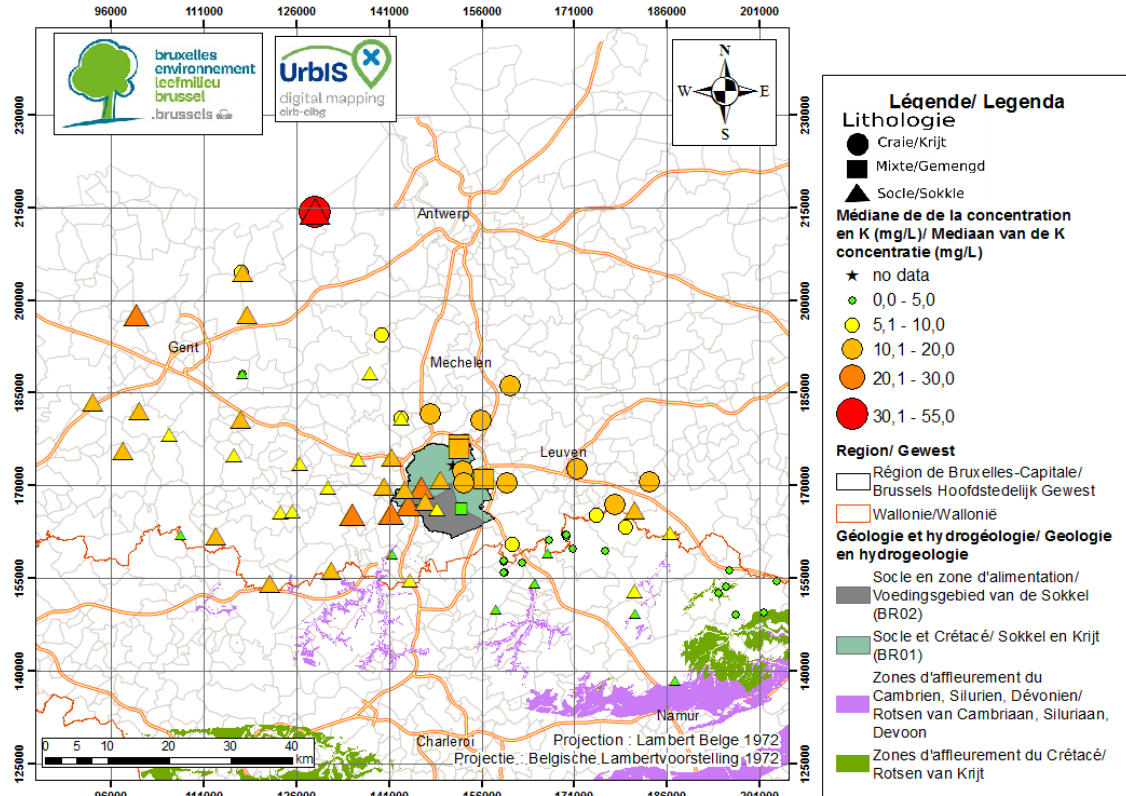


Figure 5-16 : Répartition spatiale de la concentration en K dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

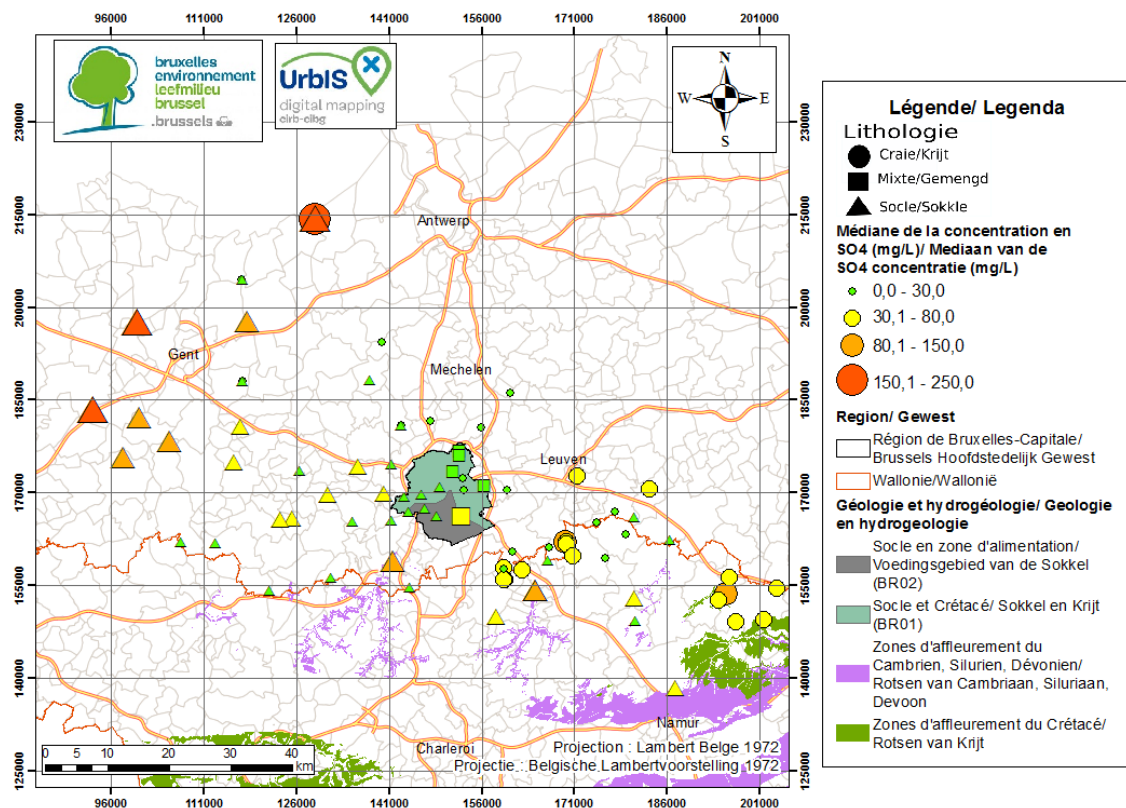


Figure 5-17 : Répartition spatiale de la concentration en SO4 dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

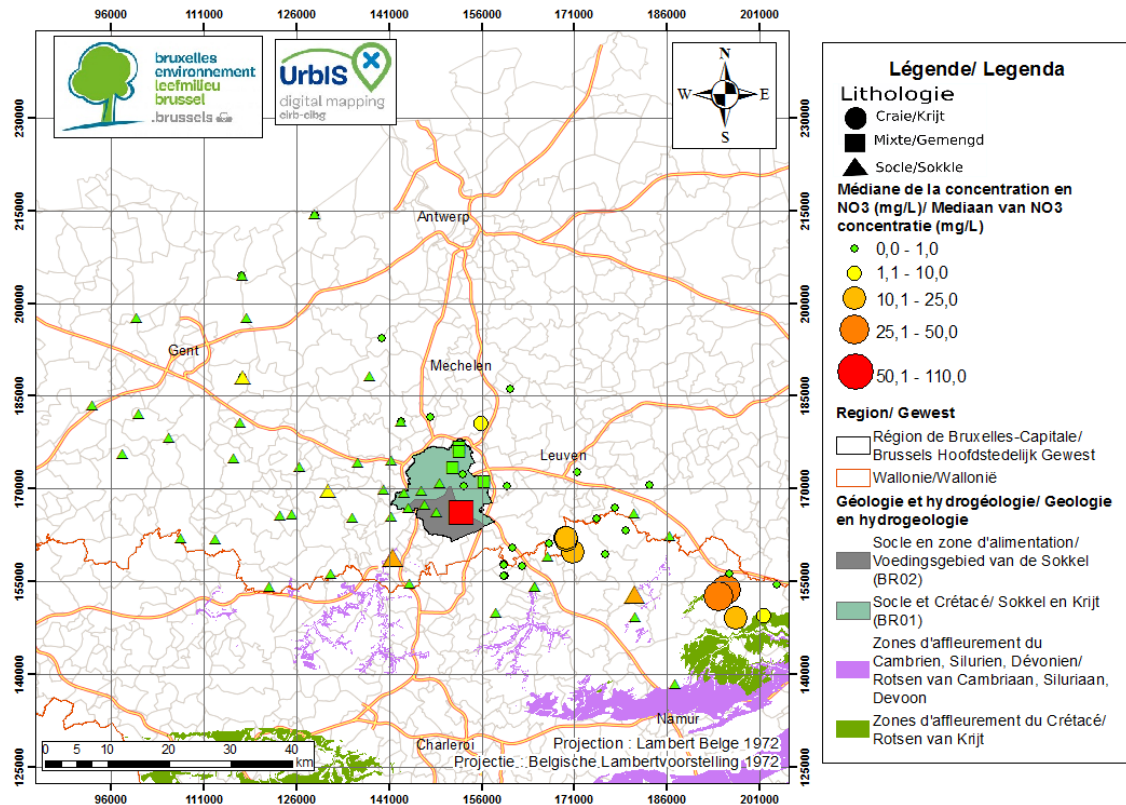


Figure 5-18 : Répartition spatiale de la concentration en NO₃ dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

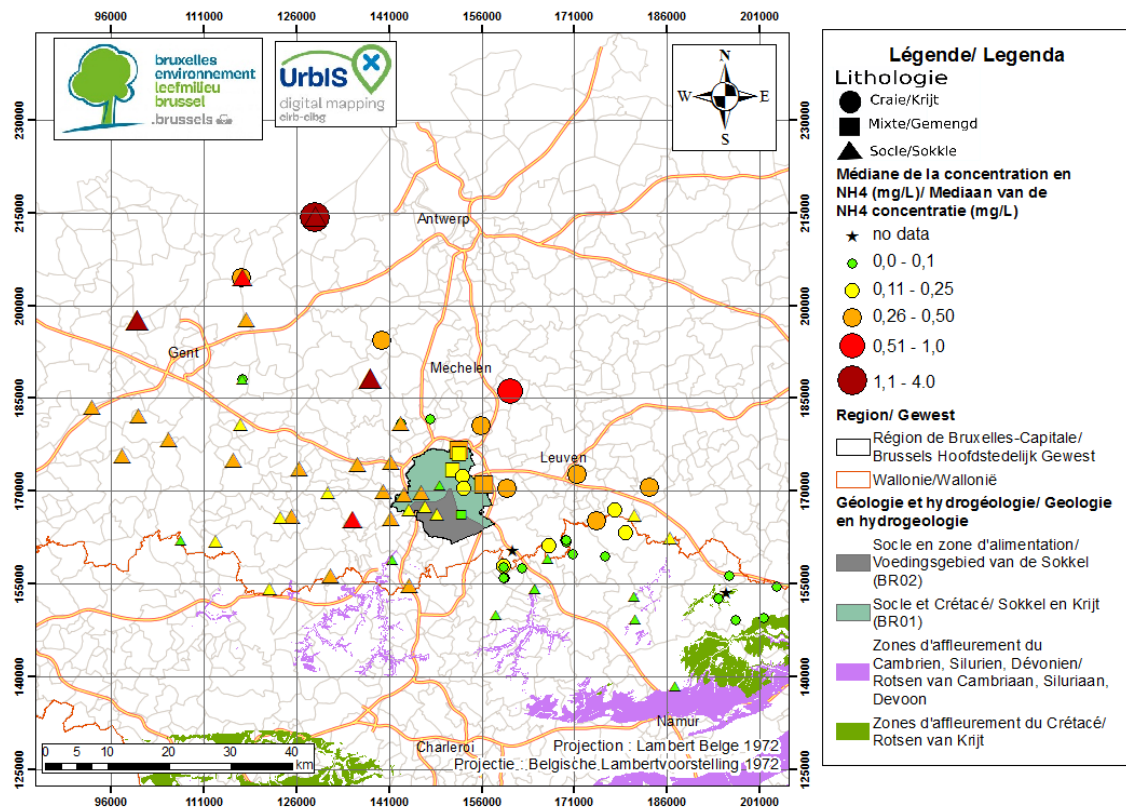


Figure 5-19 : Répartition spatiale de la concentration en NH₄ dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

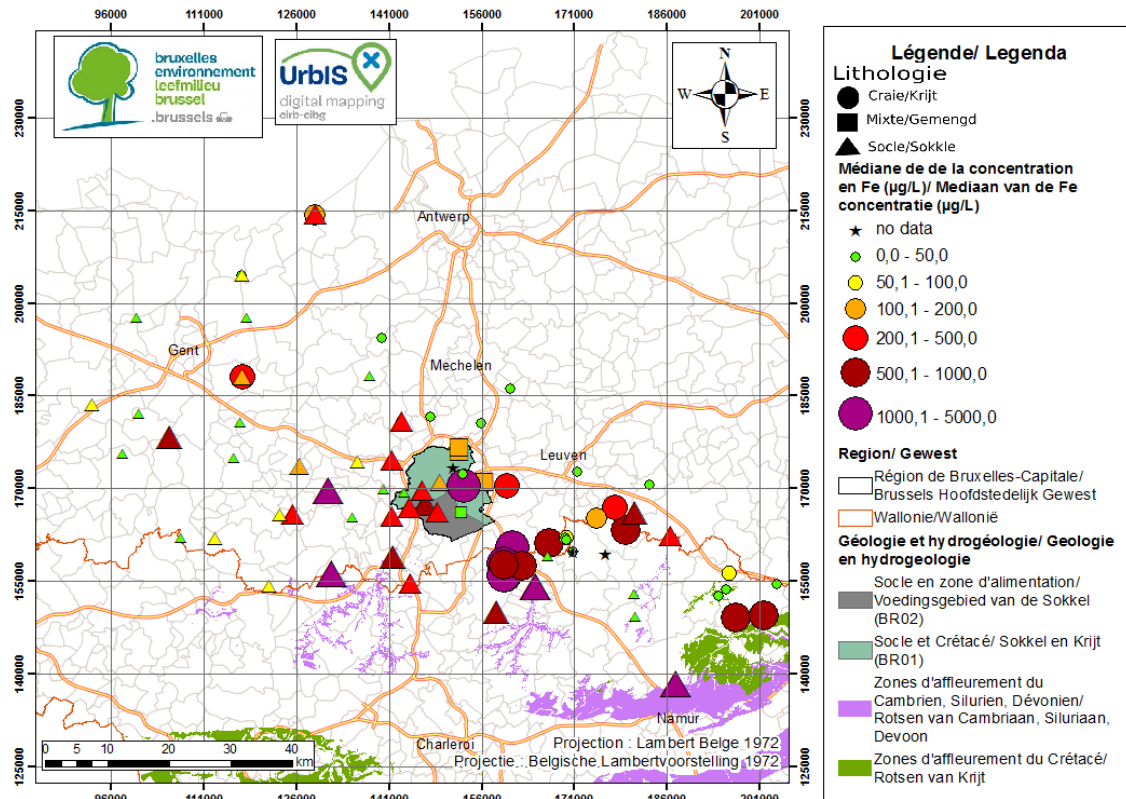


Figure 5-20 : Répartition spatiale de la concentration en Fe dans l'aquifère du Socle et du Crétacé (il s'agit du Fe total en Région de Bruxelles-Capitale mais du Fe dissous en Wallonie et en Flandre)

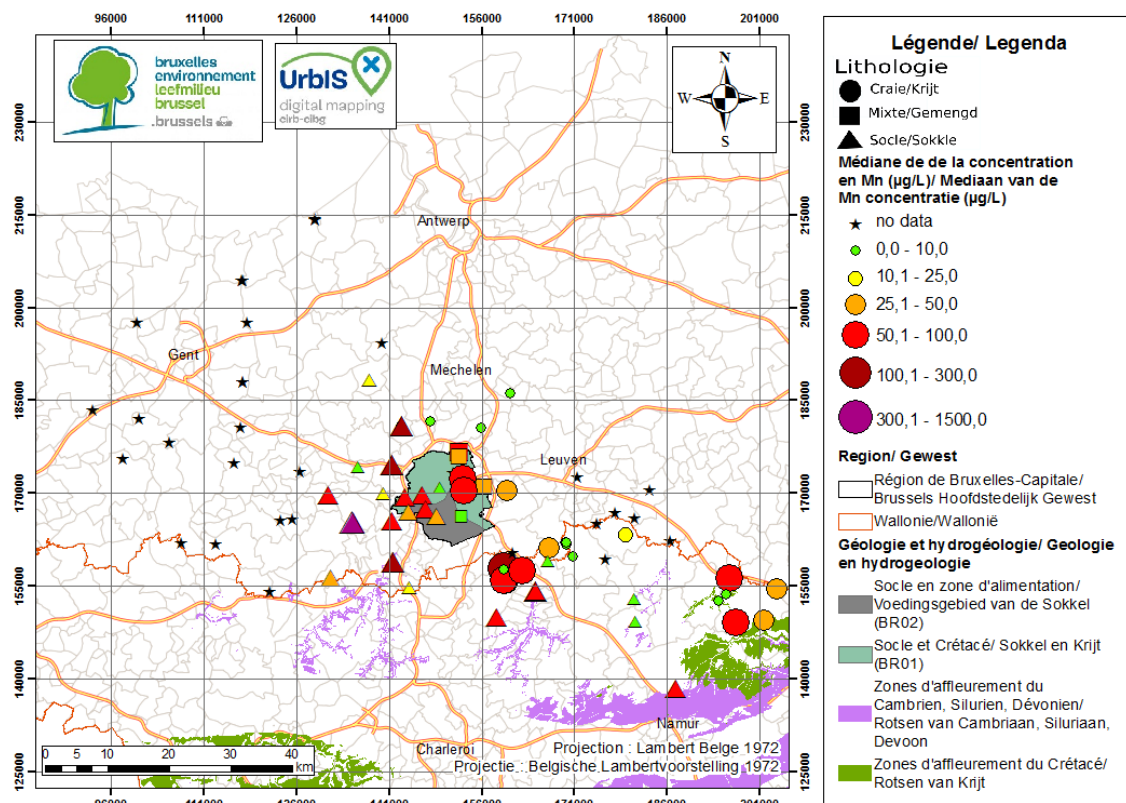


Figure 5-21 : Répartition spatiale de la concentration en Mn total dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

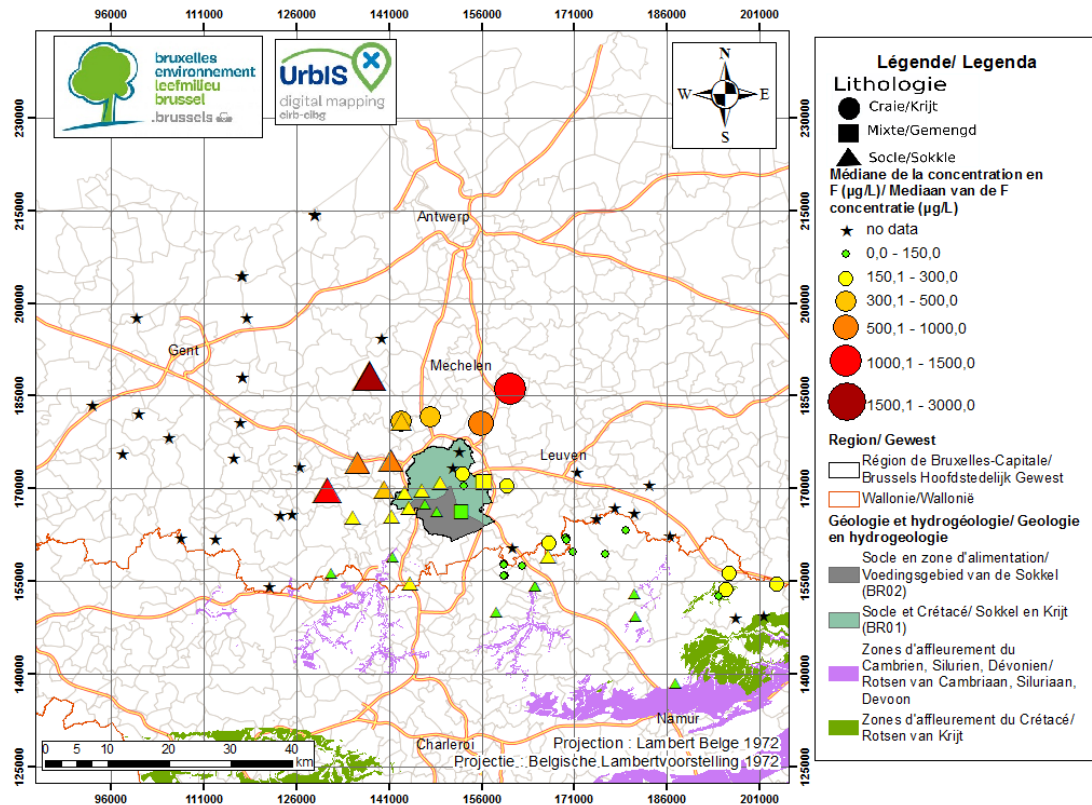


Figure 5-22 : Répartition spatiale de la concentration en F dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

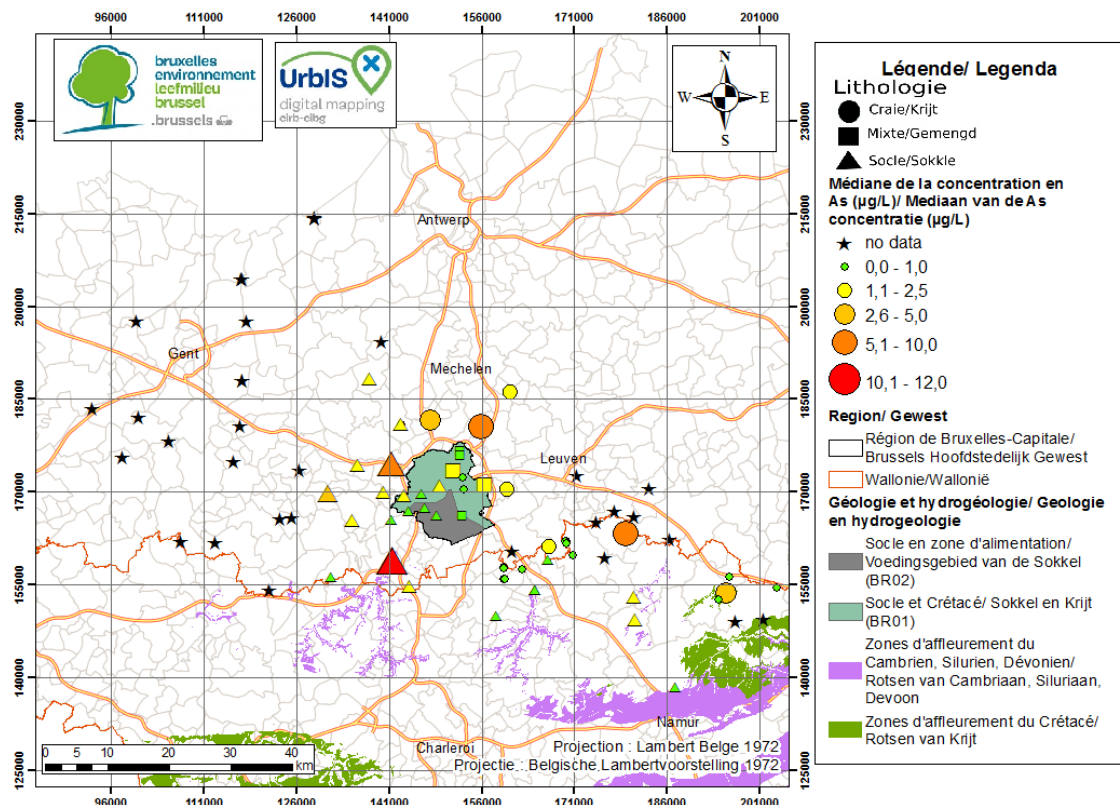


Figure 5-23 : Répartition spatiale de la concentration en As total dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

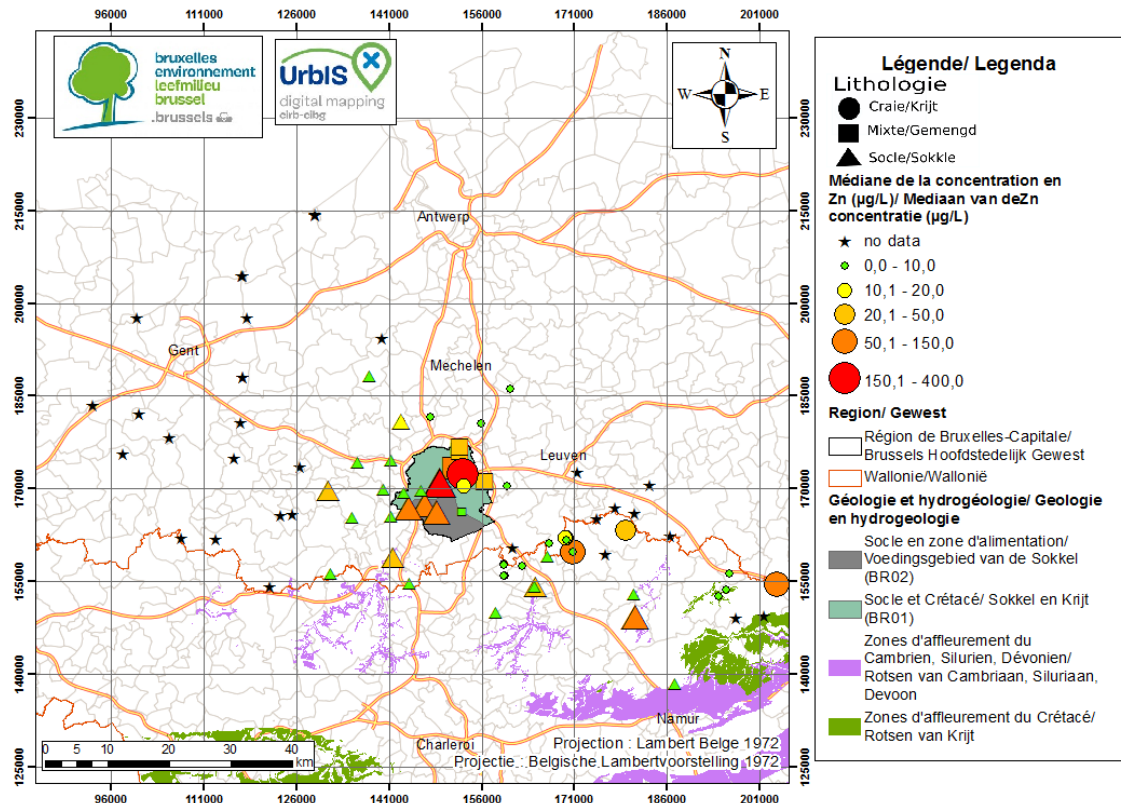


Figure 5-24 : Répartition spatiale de la concentration en Zn total dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

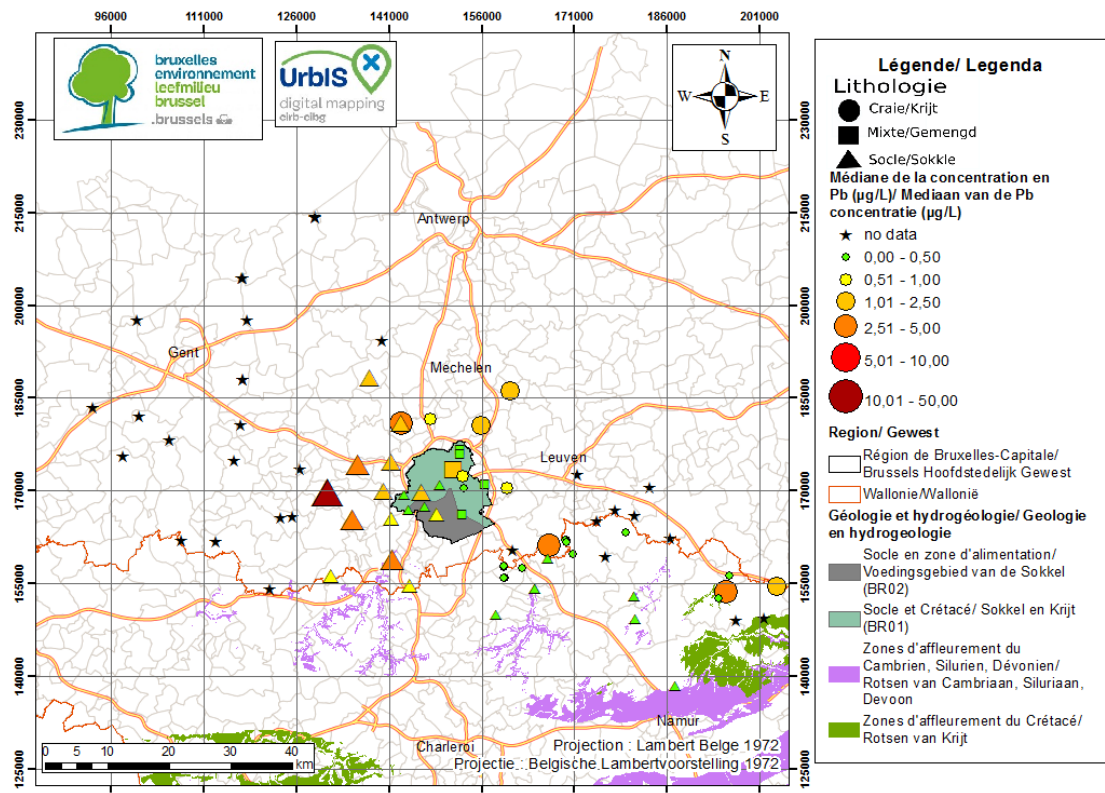


Figure 5-25 : Répartition spatiale de la concentration en Pb total dans l'aquifère du Socle et du Crétacé

5.2.3. Analyse des variations temporelles des concentrations en éléments chimiques

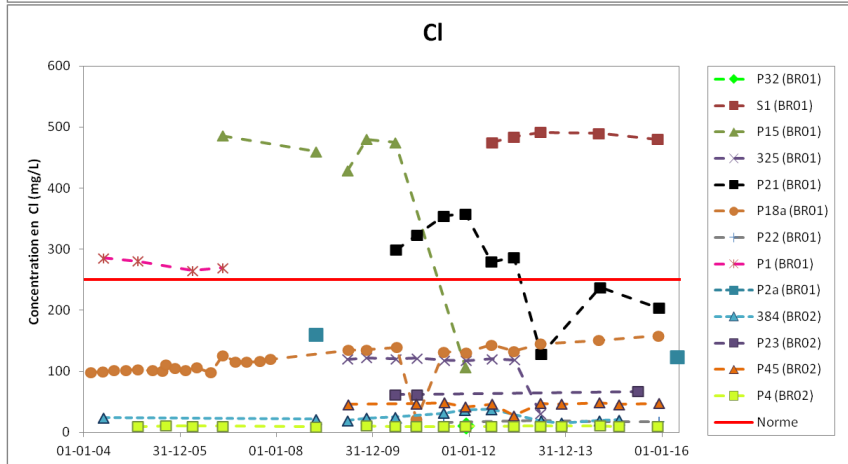
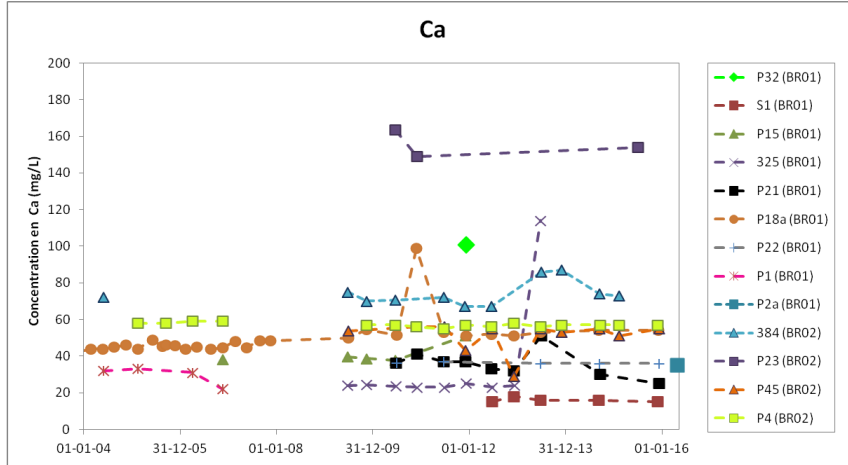
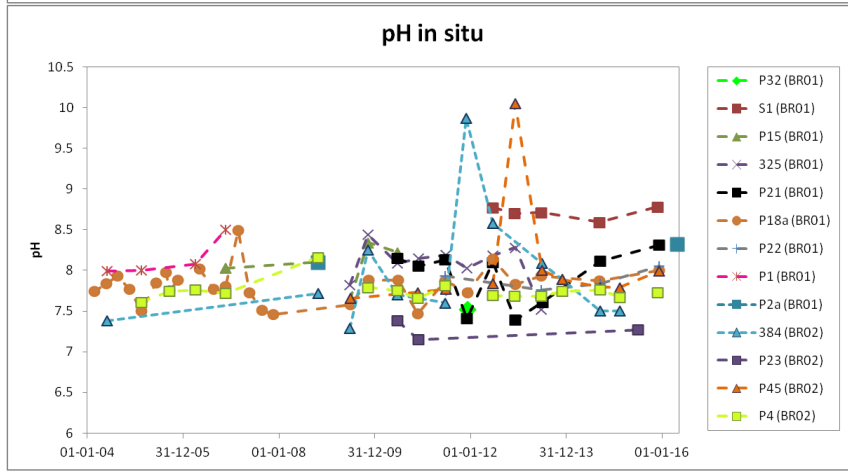
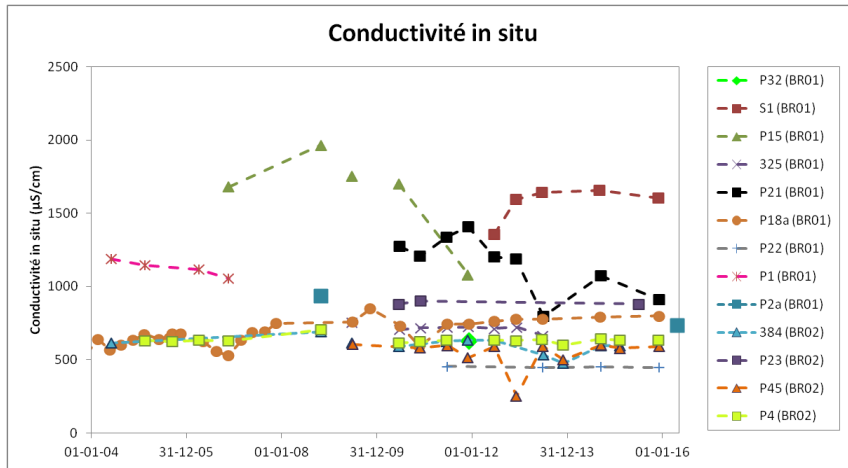
5.2.3.1. *Graphe de l'évolution des concentrations au cours du temps*

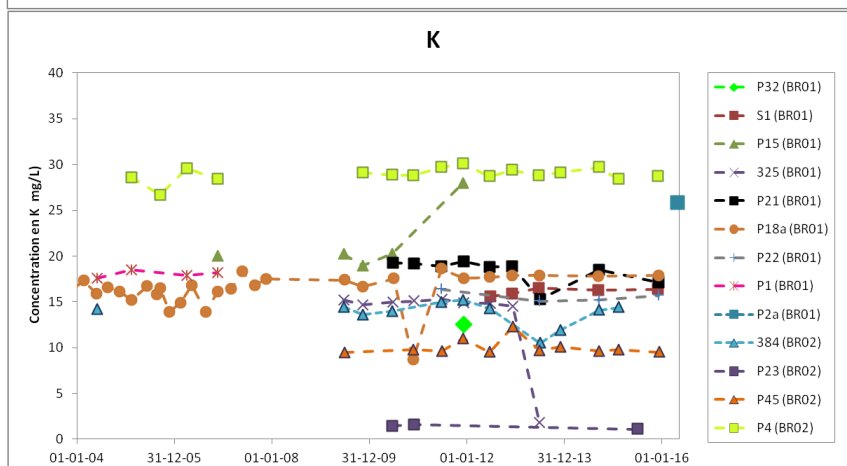
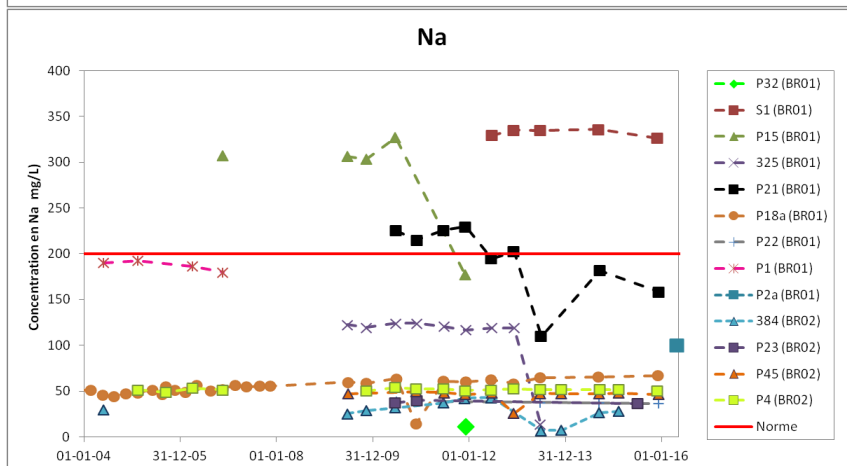
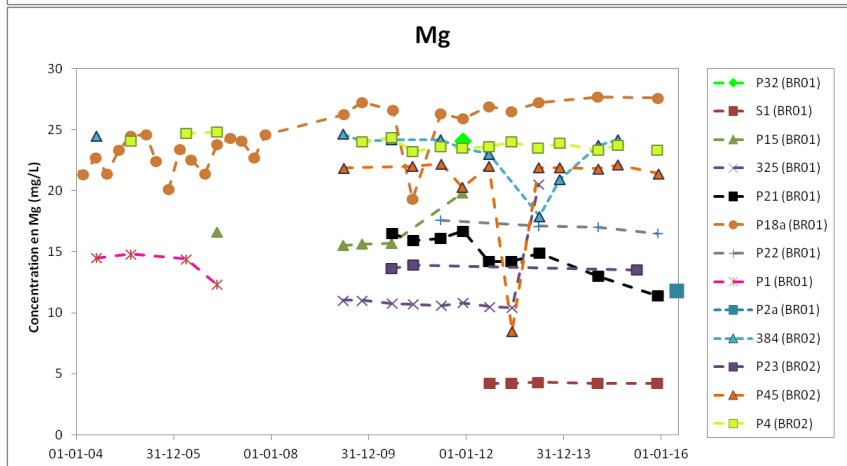
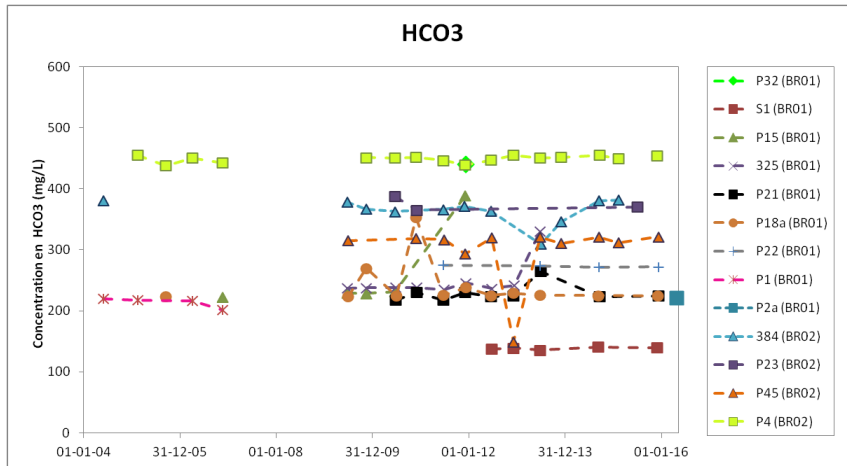
Les évolutions au cours des temps des principaux paramètres étudiés et des concentrations en éléments majeurs et mineurs sont représentées à la figure 5-26 pour les masses d'eau souterraine BR01 et BR02 en Région de Bruxelles-Capitale. Les paramètres représentés sont la conductivité, le pH et les concentrations en Ca, Cl, HCO₃, Mg, Na, K, SO₄, O₂, NH₄, Fe, Mn, F, Zn, Pb. Les concentrations en NO₃ et As ne sont pas représentées car elles sont pour la plupart des analyses sous le seuil de quantification.

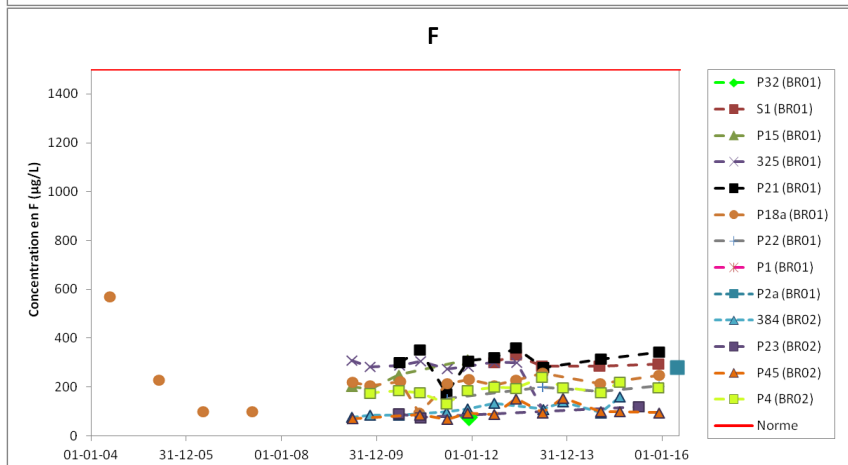
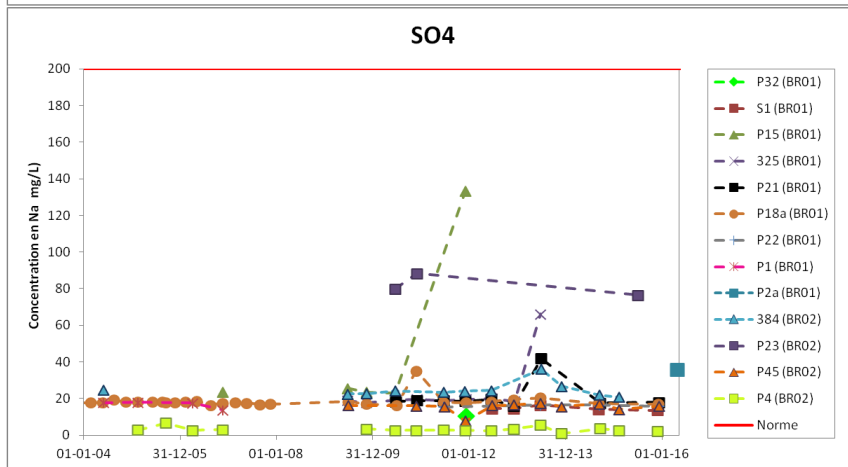
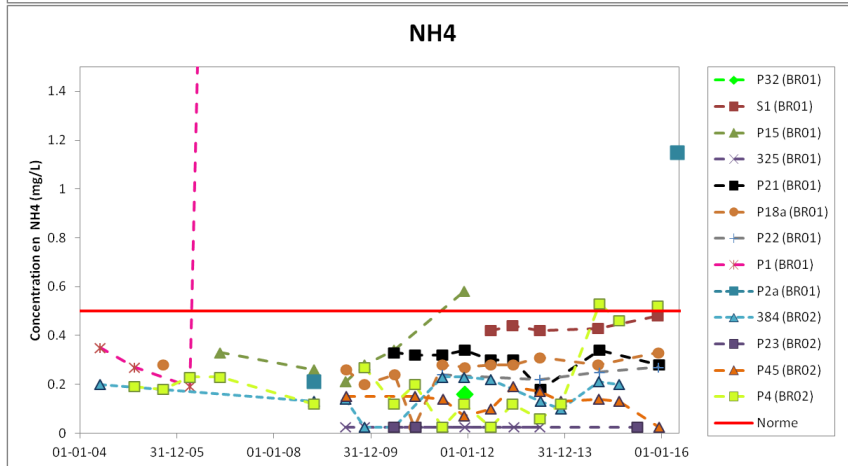
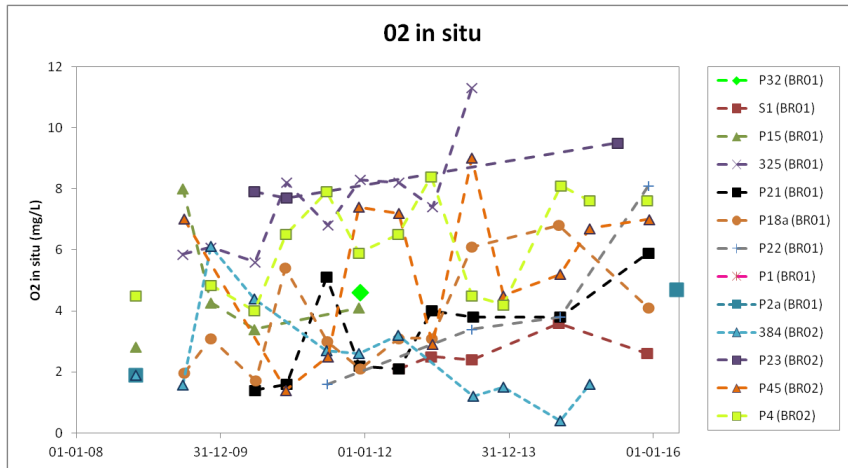
Pour de nombreux puits, les concentrations en éléments majeurs sont relativement stables au cours du temps. Il y a cependant quelques points qui ressortent, notamment ceux qui avaient déjà été mis en évidence dans la partie « présence de polluant » : l'échantillon 2016 du puits P2a, l'échantillon 2013 du puits 325, l'échantillon de novembre 2006 du puits P1, les deux échantillons de 2013 du puits 384. L'échantillon de 2016 du P2a a une concentration en Cl plus faible que l'échantillon précédant du point P2a et une concentration en NH₄ beaucoup plus élevée. L'échantillon de 2013 du puits 325 se démarque des autres échantillons de ce puits par l'augmentation de la concentration en Ca, Mg, HCO₃ et SO₄, NO₃ et une diminution de Cl, Na, K. L'échantillon de novembre 2006 du puits P1 se démarque par des concentrations en NH₄ et Mn très élevées. Les deux échantillons de 2013 du puits 384 se distinguent des autres échantillons de ce puits par une légère augmentation en Ca, SO₄ une diminution en Na, K, HCO₃ et Mg et une forte augmentation en Fe et Mn.

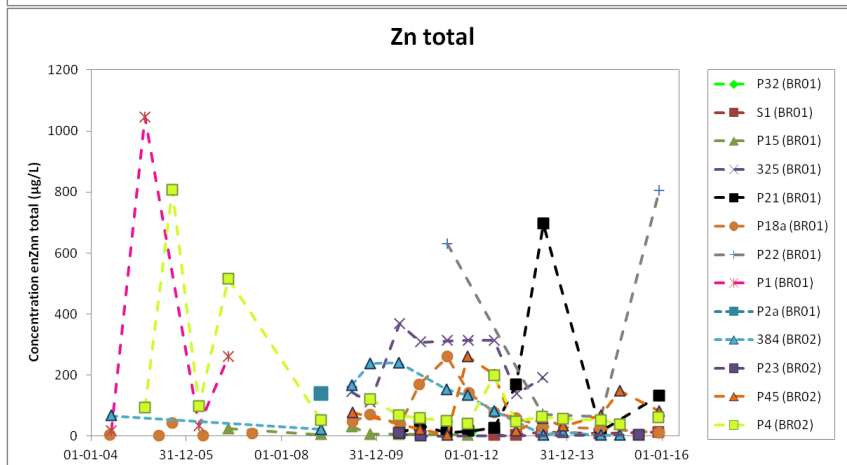
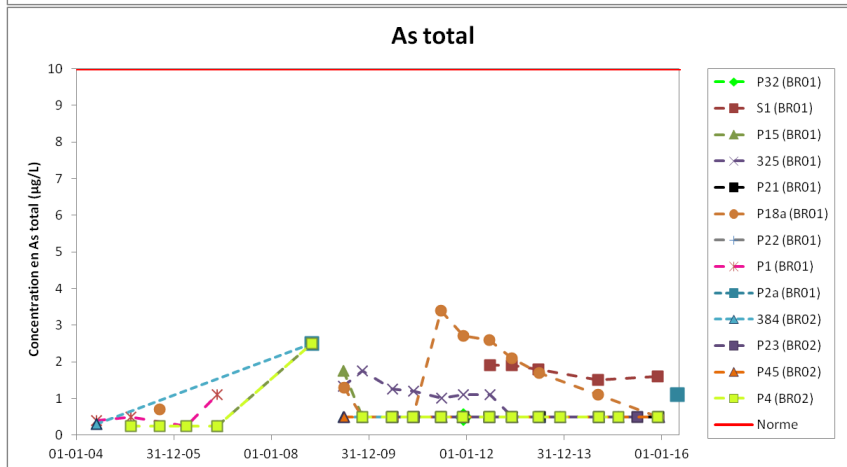
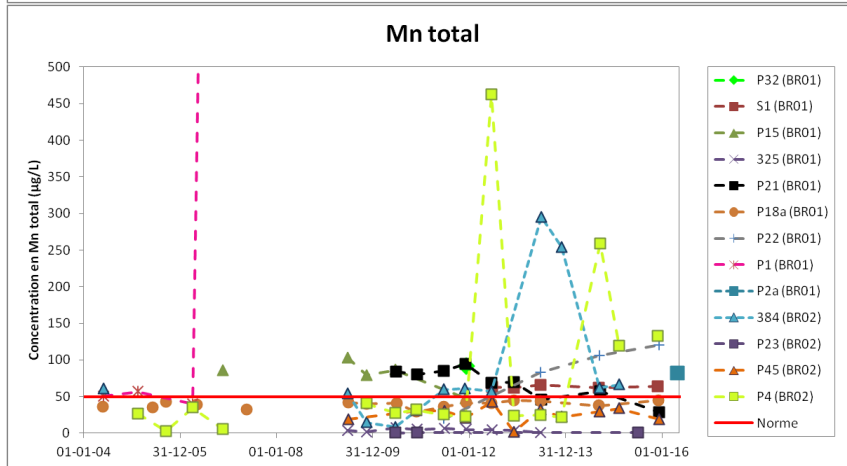
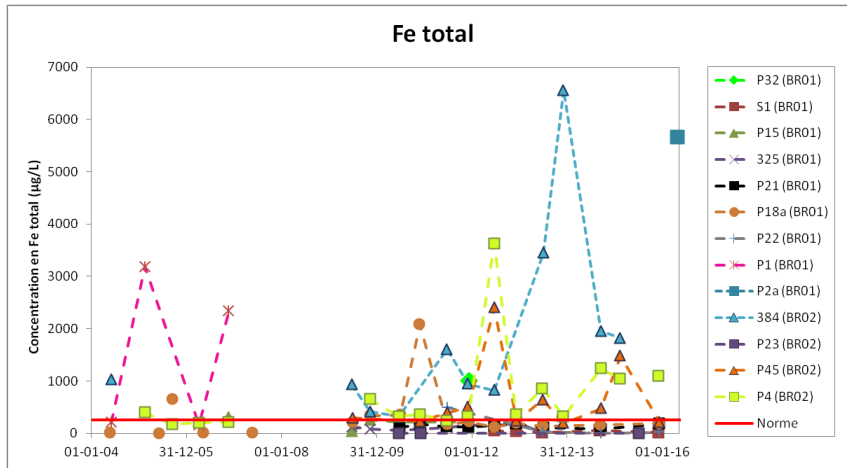
Concernant la concentration en oxygène, tous les puits présentent des concentrations très variables et qui peuvent approcher voire dépasser 10 mg/L. Il a déjà été mentionné au chapitre précédent que cela ne correspond pas du tout à ce qui est attendu dans une nappe captive ou les conditions sont supposées être réductrices.

Les normes de potabilité sont également indiquées sur les graphes (traits rouges horizontaux) pour les paramètres où elles sont. Les normes de l'eau potable sont également indiquées sur les graphes. Il y a un dépassement systématique ou régulier de la norme pour le Cl pour 4 puits : P1, P15, S1, P21. Pour le Na, 3 points dépassent la norme régulièrement : P15, S1, P21. Pour le NH₄, 4 puits dépassent la norme de manière ponctuelle : l'échantillon de novembre 2006 du puits P1, un point du puits P15, certains points du puits P4, l'échantillon 2016 du puits P2a. Pratiquement tous les puits présentent des concentrations qui dépassent les normes de potabilité en Fe et Mn.









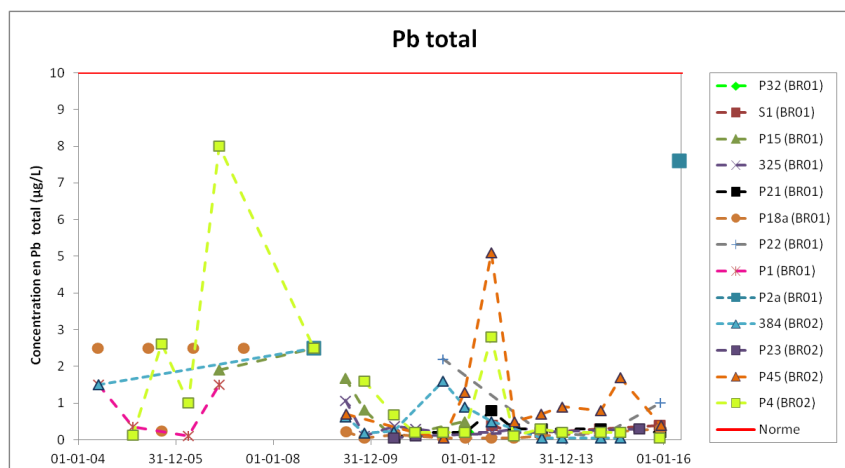


Figure 5-26 : Evolution des paramètres et des concentrations en éléments majeurs et mineurs au cours du temps des masses d'eau BR01 et BR02

5.2.3.2. Analyse de tendance

Une analyse de tendance a été réalisée sur 3 paramètres à risque correspondant à des éléments chimiques présents à des concentrations importantes dans les masses d'eau BR01 et BR02 : le Cl, le Fe et le Mn. L'analyse de tendance a été réalisée par la méthode de régression de Mann-Kendall et uniquement sur les données de la masse d'eau du Socle et du Crétacé en Région de Bruxelles-Capitale. Les résultats sont présentés aux tableaux 5-8, 5-9 et 5-10. L'analyse statistique est rarement significative ($p\text{-value} < 0.05$) mais le nombre de données est généralement assez faible ($N_d < 10$). La tendance a été calculée à partir de 2006 pour tous les points sauf le P18a pour lequel des données sont disponibles depuis 1984, ce qui permet de réaliser un test statistique avec une puissance plus élevée. Il faut cependant rester critique parce que les données antérieures à 2006 sont relativement peu connues.

Les résultats pour lesquels une tendance significative est détectée sont mis en évidence en vert dans les tableaux 5-9, 5-10 et 5-11 et dans les figures 5-27 et 5-28. Le point P18a présente une tendance à la hausse en Cl relativement importante et une faible augmentation en Mn. Il y a une tendance à la hausse en Fe pour le puits P4. Le puits P21 présente une augmentation de la concentration en Mn. Il y a une tendance à la hausse en Fe et Mn pour le puits 384 mais cela semble principalement dû à la présence d'outliners qui seront d'ailleurs écarté du calcul des concentrations de référence. Les puits pour lesquels aucune tendance significative n'a été démontrée à cause d'un nombre d'échantillons trop réduit, il est recommandé de continuer le suivi qualitatif et de procéder ultérieurement à une analyse statistique avec plus de données

Cl							
Station	MESO	Date début	Date fin	Nbre pts	p-value	Significatif ($p < 0.05$)	Pente (mg/l an)
P1	BR01	06-04-06	21-11-06	2	/	/	
S1	BR01	22-06-12	01-12-15	5	/	/	
P2a	BR01	21-11-06	27-04-16	3	/	/	
P32	BR01	08-12-11		1	/	/	
P15	BR01	21-11-06	02-12-11	6	0.20	N	

325	BR01	23-06-09	26-06-13	9	0.06	N	
P22	BR01	29-06-10	16-09-14	4	/	/	
P21	BR01	24-06-10	09-12-15	9	0.07	N	
P18a	BR01	10-07-84	07-12-15	84	0.00	O	4.57
P23	BR02	21-06-10	03-07-15	3	/	/	
P45	BR02	30-06-09	10-12-15	11	0.74	N	
P4	BR02	06-04-06	01-12-15	15	0.86	N	
384	BR02	28-10-08	12-02-15	11	0.63	N	

Tableau 5-8 : Pente calculé pour l'évolution de la concentration en Cl dans les masses d'eau BR01 et BR02 par la méthode de Mann Kendall (/ : impossibilité de calcul statistiques)

Fe							
Station	MESO	Date début	Date fin	Nbre pts	p-value	Significatif (p<0.05)	Pente (µg/l an)
P1	BR01	06-04-06	21-11-06	2	/	/	
S1	BR01	22-06-12	01-12-15	5	/	/	
P2a	BR01	21-11-06	27-04-16	2	/	/	
P32	BR01	08-12-11		1	/	/	
P15	BR01	21-11-06	02-12-11	5	/	/	
325	BR01	23-06-09	26-06-13	9	0.62	N	
P22	BR01	29-06-10	16-09-14	4	/	/	
P21	BR01	24-06-10	09-12-15	9	0.80	N	
P18a	BR01	24-05-83	07-12-15	68	0.23	N	
P23	BR02	21-06-10	03-07-15	3	/	/	
P45	BR02	30-06-09	10-12-15	11	0.90	N	
P4	BR02	06-04-06	01-12-15	14	0.00	O	91.87
384	BR02	23-06-09	12-02-15	10	0.02	O	318.61

Tableau 5-9 : Pente calculé pour l'évolution de la concentration en Fe dans les masses d'eau BR01 et BR02 par la méthode de Mann Kendall (/ : impossibilité de calcul statistiques)

Mn							
Station	MESO	Date début	Date fin	Nbre pts	p-value	Significatif (p<0.05)	Pente (µg/l an)
P1	BR01	06-04-06	21-11-06	2	/	/	
S1	BR01	22-06-12	01-12-15	5	/	/	
P2a	BR01	21-11-06	27-04-16	2	/	/	
P32	BR01	08-12-11		1	/	/	
P15	BR01	21-11-06	02-12-11	5	/	/	
325	BR01	23-06-09	26-06-13	9	0.34	N	
P22	BR01	24-06-11	08-12-15	4	/	/	
P21	BR01	24-06-10	09-12-15	9	0.03	O	-10.03
P18a	BR01	24-05-83	07-12-15	71	0.00	O	0.63
P23	BR02	21-06-10	03-07-15	3		mesures<LQ	
P45	BR02	30-06-09	10-12-15	11	0.83	N	
P4	BR02	06-04-06	01-12-15	14	0.48	N	
384	BR02	23-06-09	12-02-15	10	0.01	O	9.81

Tableau 5-10 : Pente calculé pour l'évolution de la concentration en Mn dans les masses d'eau BR01 et BR02 par la méthode de Mann Kendall (/ : impossibilité de calcul statistiques)

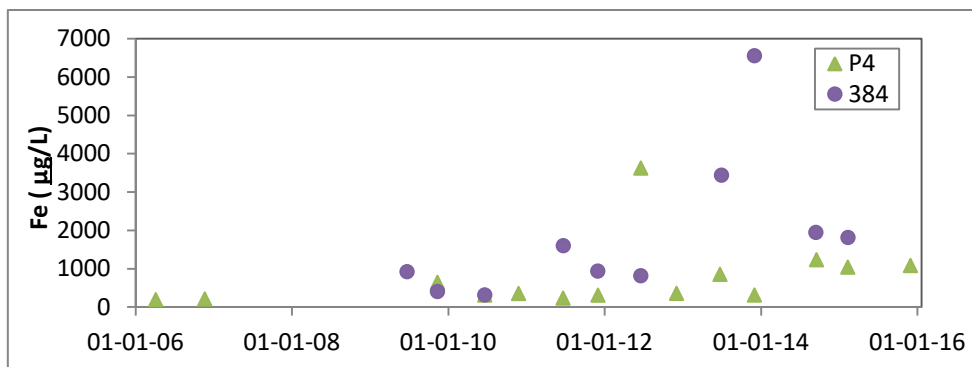


Figure 5-27 : Evolution de la concentration en Fe pour les stations de la masse d'eau BR01 et BR02 où la pente est significative (à l'exception du puits P18a présenté à la figure 5-30)

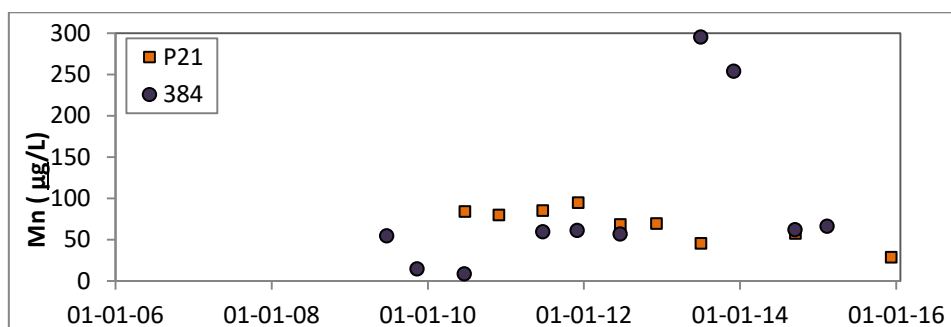


Figure 5-28 : Evolution de la concentration en Mn pour les stations de la masse d'eau BR01 et BR02 où la pente est significative

Une analyse de tendance plus détaillée a été réalisée sur le puits P18a pour essayer de comprendre l'augmentation très importante de la concentration en Cl (4,5 mg/L an). L'analyse de tendance a été réalisée deux fois, une fois sur la série complète des données (à partir de 1983 ou plus tard en fonction du paramètre) et une fois sur les données postérieures à 2006. Les résultats sont présentés au tableau 5-12 et l'évolution des concentrations est présentée aux figures 5-29 et 5-30.

La conductivité et la plupart des éléments majeurs (Ca, K, Mg, Na, Cl) présentent une tendance à la hausse pour les deux analyses. Il y a cependant, quelques différences entre les deux analyses. Pour la série longue, il y a une légère diminution en SO₄ et une légère hausse en Mn qu'on ne retrouve pas sur la série courte. Sur la série courte, il y a une augmentation en B, F et NH₄ qu'on ne retrouve pas pour la série longue.

Sur la figure 5-29, il est possible de constater que les concentrations sont relativement stables pendant les années 80 et qu'elles commencent à augmenter dans les années 90. La concentration augmente graduellement de 30 mg/L jusqu'à 158 mg/L en 2015 et la concentration en Cl augmente beaucoup plus que celle en Na. Comme il semble y avoir un apport en Cl beaucoup plus élevée que l'apport en Na, l'origine de cette concentration élevée, doit plutôt être anthropique. Dans le puits P18a, des solvants chlorés sont d'ailleurs parfois présents en quantité supérieure à la limite de quantification (même s'ils sont présents en très faibles concentrations et qu'ils ne sont pas quantifiés de manière systématique).

Paramètres.	Unité	Toute la série (à partir de 1983 si données mesurées)						Série courte (données postérieures à 2006)					
		Date début	Date fin	Nbre pts	p-value	Significatif (p<0.05)	Pente (unité/an)	Date début	Date fin	Nbre pts	p-value	Significatif (p<0.05)	Pente (unité/an)
As	µg/L	10-07-84	07-12-15	25	0.18	N		30-06-09	07-12-15	11	0.88	N	
B	µg/L	24-05-83	07-12-15	36	0.37	N		08-05-06	07-12-15	13	0.03	O	2.34
Ca	mg/L	04-04-84	07-12-15	93	0.00	O	0.83	14-02-16	07-12-15	19	0.00	O	1.08
Cd	µg/L	24-05-83	07-12-15	38	0.96	N		08-05-06	07-12-15	13	0.90	N	
EC	µS/cm	10-06-86	07-12-15	87	0.00	O	10.40	08-05-06	07-12-15	18	o	O	17.43
F	µg/L	24-05-83	07-12-15	32	0.13	N		08-05-06	07-12-15	13	0.01	O	10.84
HCO3	mg/L	19-09-05	07-12-15	12	0.91	N		30-06-09	07-12-15	11	0.62	N	
K	mg/L	10-07-84	07-12-15	84	0.00	O	0.13	14-02-06	07-12-15	19	0.00	O	0.19
Mg	mg/L	04-04-84	07-12-15	92	0.00	O	0.40	14-02-06	07-12-15	19	0.00	O	0.52
Na	mg/L	10-07-84	07-12-15	84	0.00	O	0.82	14-02-06	07-12-15	19	0.00	O	0.81
NH4	mg/L	16-09-05	07-12-15	12	0.10	N		30-06-09	07-12-15	11	0.02	O	0.01
Pb	µg/L	24-05-83	07-12-15	37	0.63	N		08-05-06	07-12-15	13	0.56	N	
SO4	mg/L	10-07-84	07-12-15	86	0.00	O	-0.18	14-02-06	07-12-15	19	0.71	N	
Cl	mg/L	10-07-84	07-12-15	84	0.00	O	4.57	14-02-06	07-12-15	19	0.00	O	4.90
Fe	µg/L	24-05-83	07-12-15	68	0.23	N		08-05-06	07-12-15	13	0.94	N	
Mn	µg/L	24-05-83	07-12-15	71	0.00	O	0.63	08-05-06	07-12-15	13	0.08	N	

Tableau 5-11 : Pente calculé pour l'évolution de la concentration éléments majeurs et mineurs dans la station P18a par la méthode de Mann Kendall à partir de 1983 et à partir de 2006

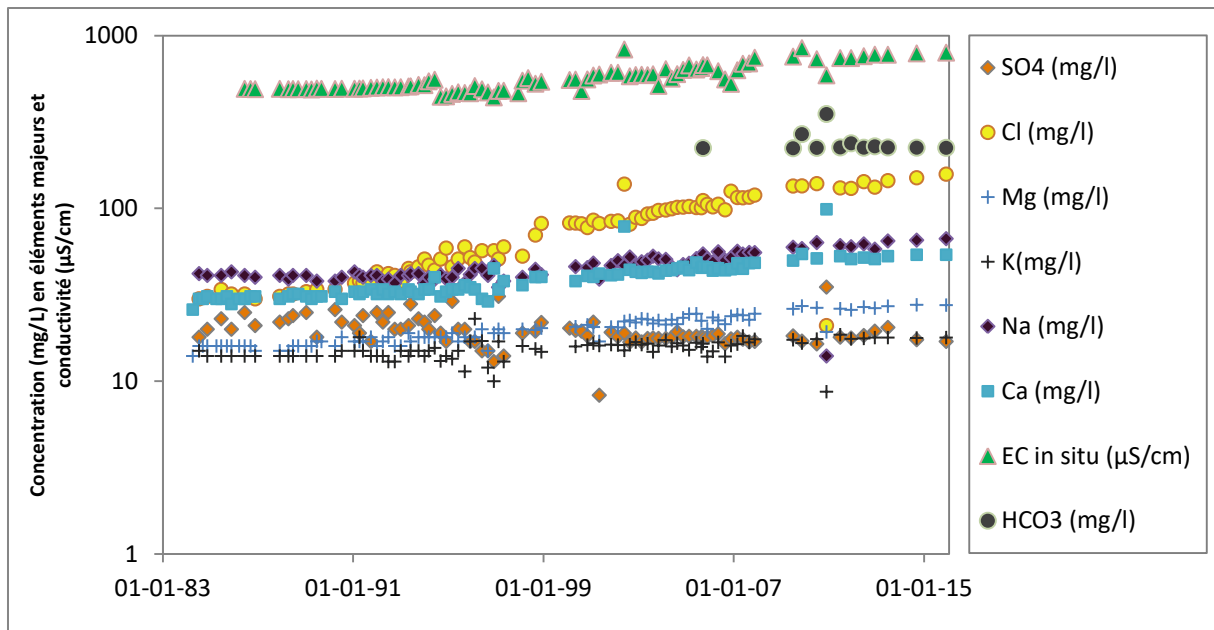


Figure 5-29: Evolution de la conductivité et de la concentration en éléments majeurs de la station P18a

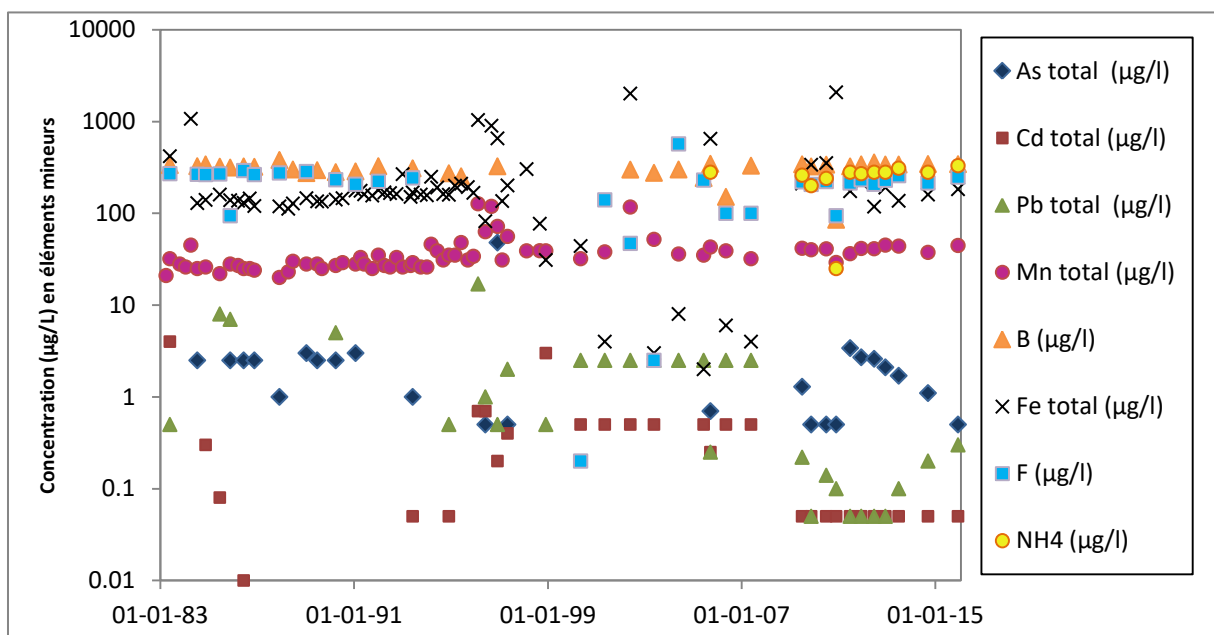


Figure 5-30 : Evolution de la concentration en éléments mineurs de la station P18a

5.2.3.3. Influence des variations piézométriques

Des données piézométriques relatives à la masse d'eau BR01 ont également été fournies. Une carte localisant les stations piézométriques ainsi qu'une chronique des niveaux piézométriques se trouvent à l'annexe 2. Aux figures 5-31 à 5-33, l'évolution des concentrations en éléments majeurs et en Fe et Mn sont représentés pour certains puits avec, en parallèle, l'évolution du niveau piézométrique. L'objectif est de mettre en évidence une éventuelle corrélation entre des variations de piézométrie et de concentrations en éléments chimiques dans les eaux souterraines. La piézométrie étant suivie sur un réseau de monitoring distinct, elle est rarement connue pour les stations de monitoring qualitatif. Sur

les graphes tracés, la piézométrie indiquée est donc celle de la station piézométrique la plus proche.

Dans les 3 figures ci-dessous, les variations de concentrations ne semblent pas concomitantes aux variations piézométriques. L'échantillonnage n'est peut-être pas assez régulier pour mettre en évidence des relations de ce type. De plus, la piézométrie provient généralement d'une station à proximité mais les variations du niveau piézométriques ne sont pas forcément identiques.

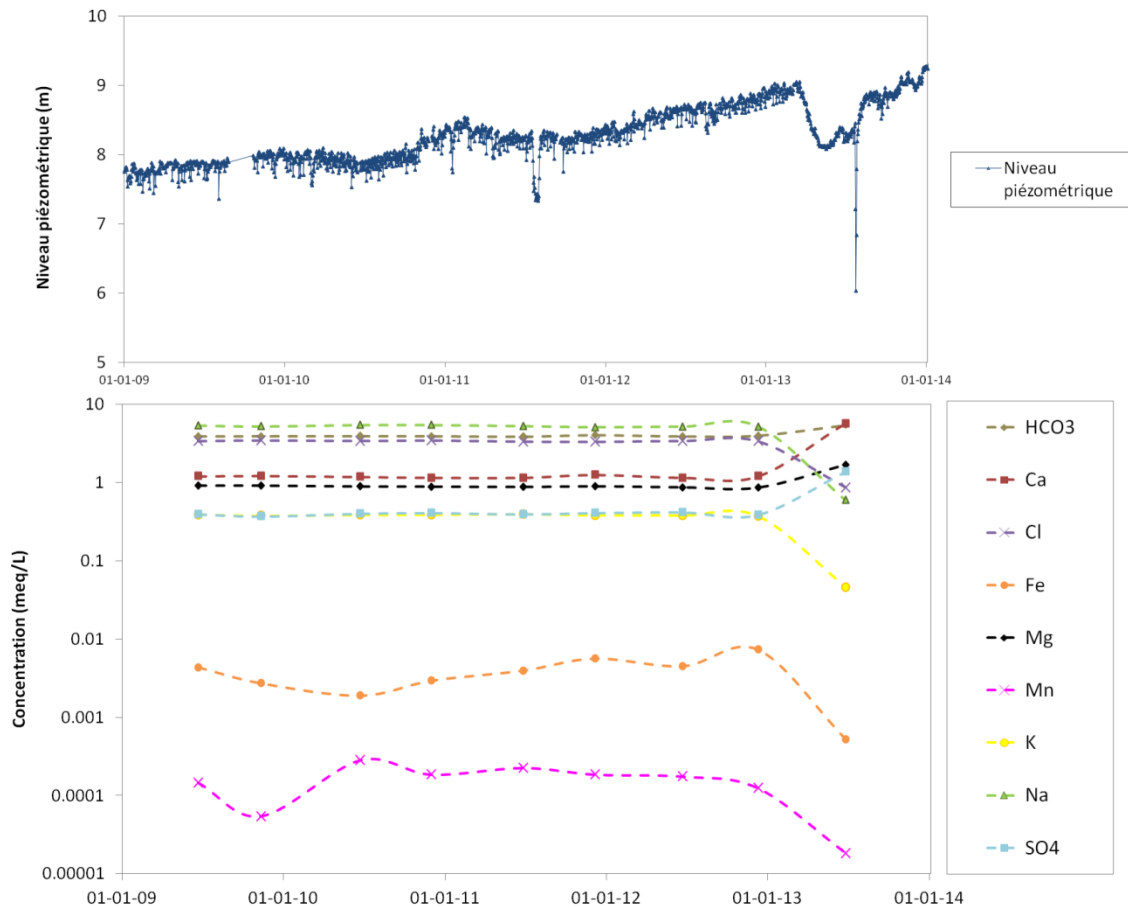


Figure 5-31 : Evolution des concentrations de la station 325 et variation piézométrique de la station la plus proche (324)

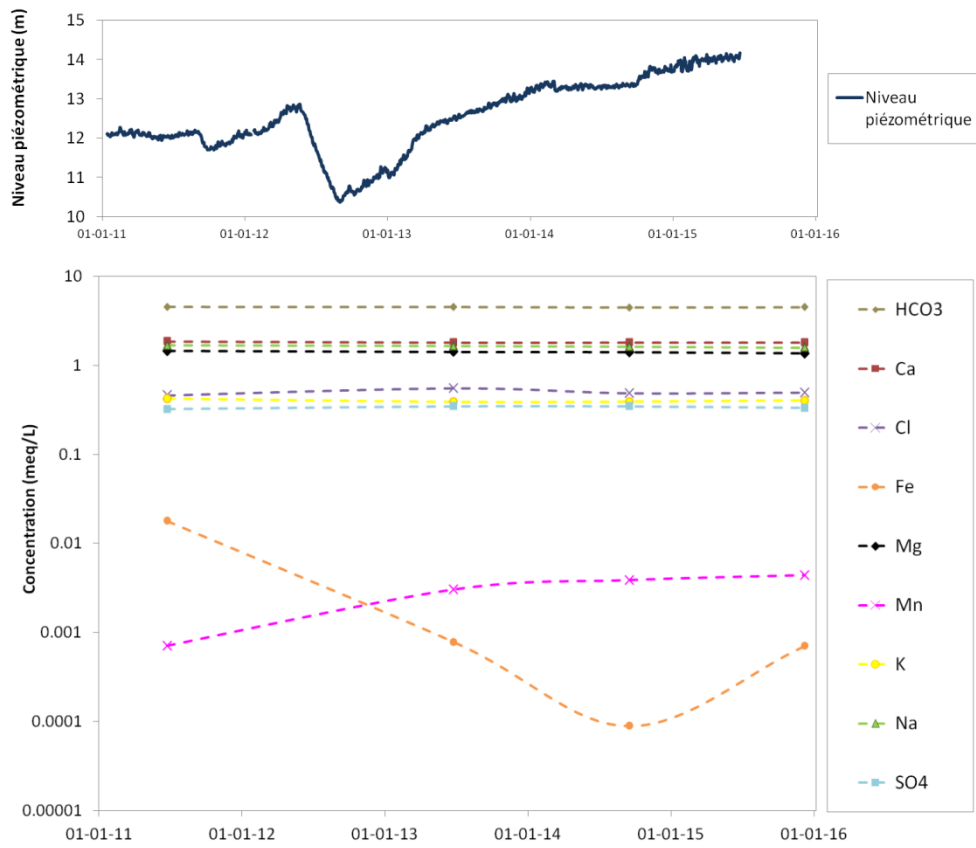


Figure 5-32 : Evolution des concentrations de la station P22 et variation piézométrique de la station la plus proche (368)

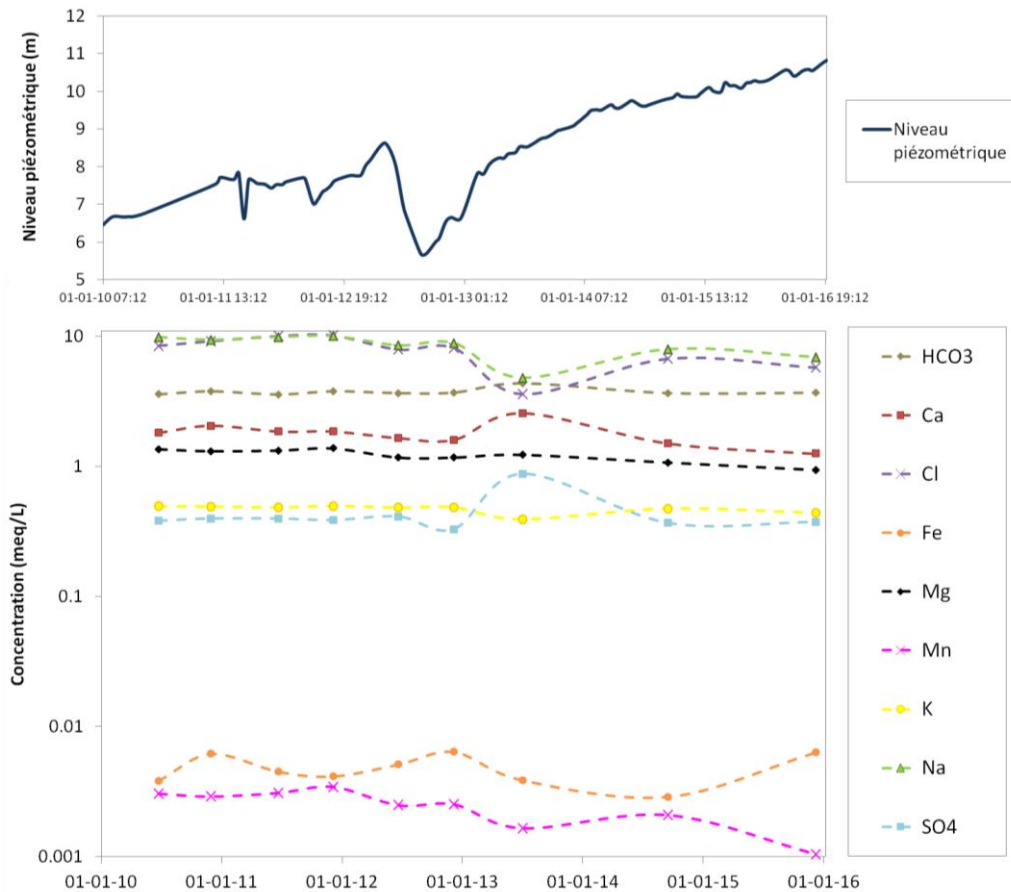


Figure 5-33 : Evolution des concentrations de la station P21 et variation piézométrique de la station la plus proche (525)

5.2.4. Origine de la salinité des eaux souterraines

A la figure 5-34, l'évolution de la concentration en Na est représentée en fonction de la concentration en Cl. 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 plupart des points en Région wallonne et deux points en Région de Bruxelles-Capitale (P18a et P23) 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).

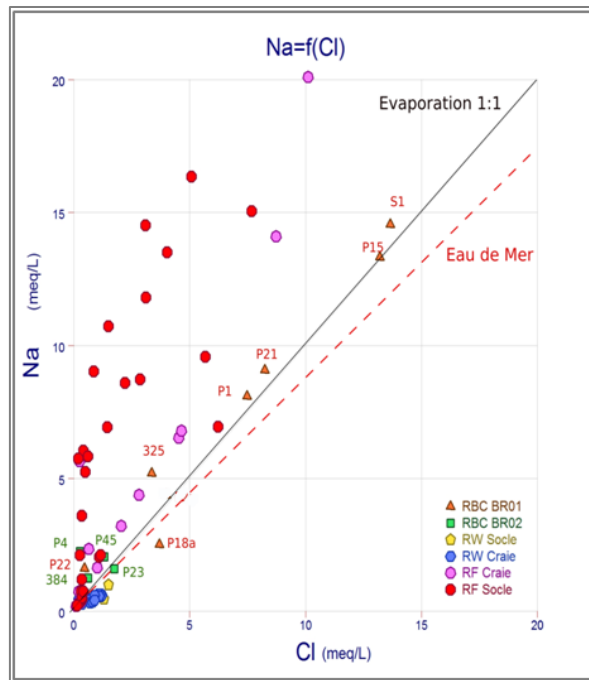


Figure 5-34 : Graphe de la concentration en Na par rapport à la concentration en Cl pour la masse d'eau du Socle et du Crétacé

Le rapport Br/Cl est représenté en fonction de la concentration en Cl pour les points de la Région de Bruxelles-Capitale et six points de la Région wallonne (figure 5-35). Les concentrations en Br sont disponibles pour quelques points en Wallonie et ne sont pas disponibles pour les points d'échantillonnage situés en Région flamande. Les stations de la Région de Bruxelles-Capitale présentent généralement des rapports Br/Cl égaux ou supérieurs à celui de l'eau de mer (5×10^{-4}). Ceci indique que le Cl a vraisemblablement une origine marine. La plupart des points situés en Région wallonne et le puits P15 (de la masse d'eau BR01) présentent des rapports Br/Cl inférieurs à celui de l'eau de mer et supérieur à celui de la halite ($3,3 \times 10^{-3}$). Il y a également un point de la Région wallonne qui est situé dans le domaine de la halite. D'après Müller (2006), la pollution de la nappe par de l'eau usée peut diminuer le ratio masse de Br/Cl en dessous de $2,25 \times 10^{-3}$. Les points situés en Région wallonne avaient déjà été identifiés comme contaminés à cause de leur teneur en nitrate et en pesticides. Concernant le point en Région wallonne situé dans le domaine de la halite, il a peut être une minéralisation qui est impacté par des évaporites présentes localement mais il est plus probable que la halite provienne du salage des routes. Pour le point P15, uniquement l'échantillon du 02/12/2011 a un rapport Br/Cl qui indique une contamination. Après une vérification, cet échantillon a été mal encodé dans la base de données. Il n'appartient pas à la station P15 mais à la station P46 de la masse d'eau BR03. La station P46 avait déjà été mise en évidence à cause de son rapport Br/Cl qui semblait indiquer une contamination dans le chapitre précédant. En recalculant le rapport Br/Cl de la station P15 en excluant l'échantillon du 02/12/2011, le résultat est de $2,9 \times 10^{-3}$, ce qui indique que le Cl a plutôt une origine marine qu'une origine anthropique.

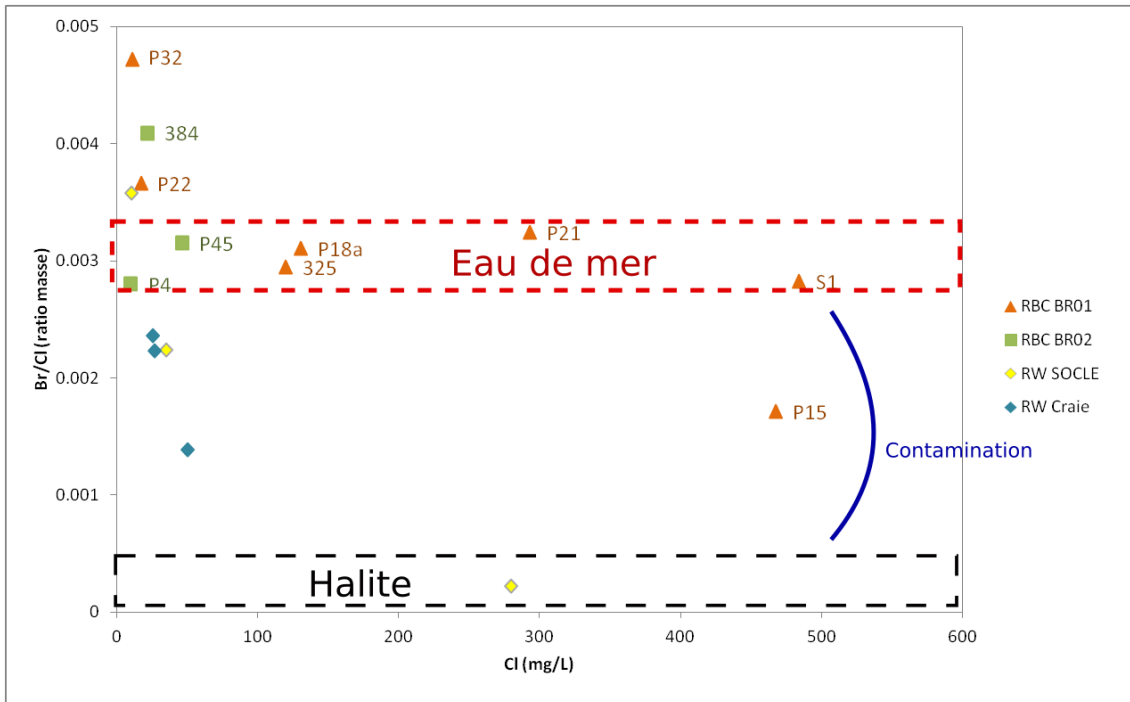


Figure 5-35 : Rapport Br/Cl en fonction de la concentration en Cl pour les masses d'eau du Socle et du Crétacé

Les indices de saturation de la calcite, du gypse et de la halite (figure 5-36) 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 et du Crétacé 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 qu'elle influence la minéralisation de l'eau en y contrôlant la concentration en calcium.

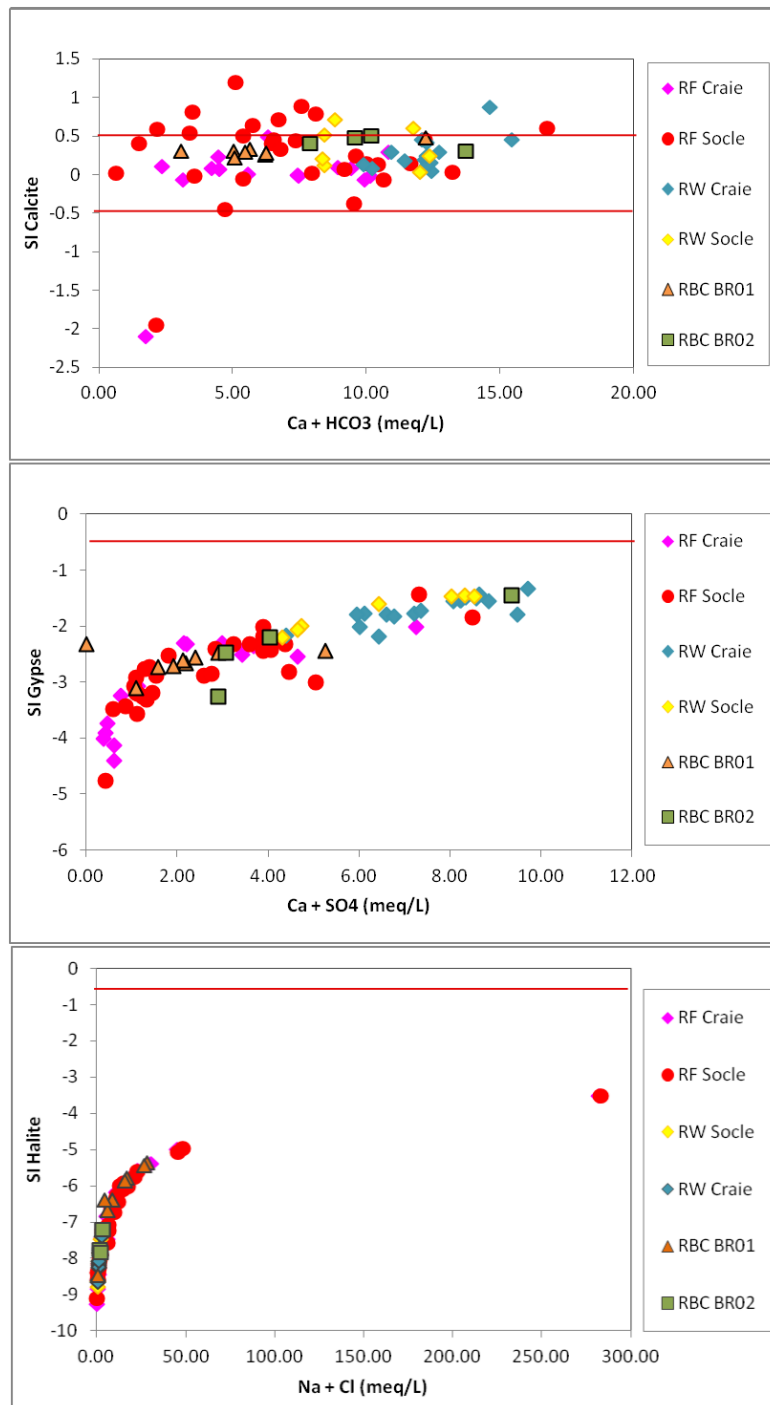


Figure 5-36 : Indice de saturation (SI) de la calcite, du gypse et de la halite en fonction des éléments chimiques susceptibles d'être contrôlés par ces minéraux

Le graphique (Na+K)-Cl en fonction de (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄), permet une fois encore de mettre en évidence les échanges cationiques (figure 5-37). Les points s'alignent sur une droite de pente -1. Les eaux de la Région wallonne et quelques points de la Région de Bruxelles-Capitale avoisinent le point 0-0. Le reste des points de la Région de Bruxelles-Capitale et ceux de la Région flamande évoluent sur la droite de pente -1 avec un rapport (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) négatif et un rapport (Na+K)-Cl positif. Cela reflète qu'il y a des échanges cationiques, le Ca présent dans l'eau étant remplacé par du Na initialement fixé sur les sites d'adsorption des matériaux géologiques constitutifs du sous-sol.

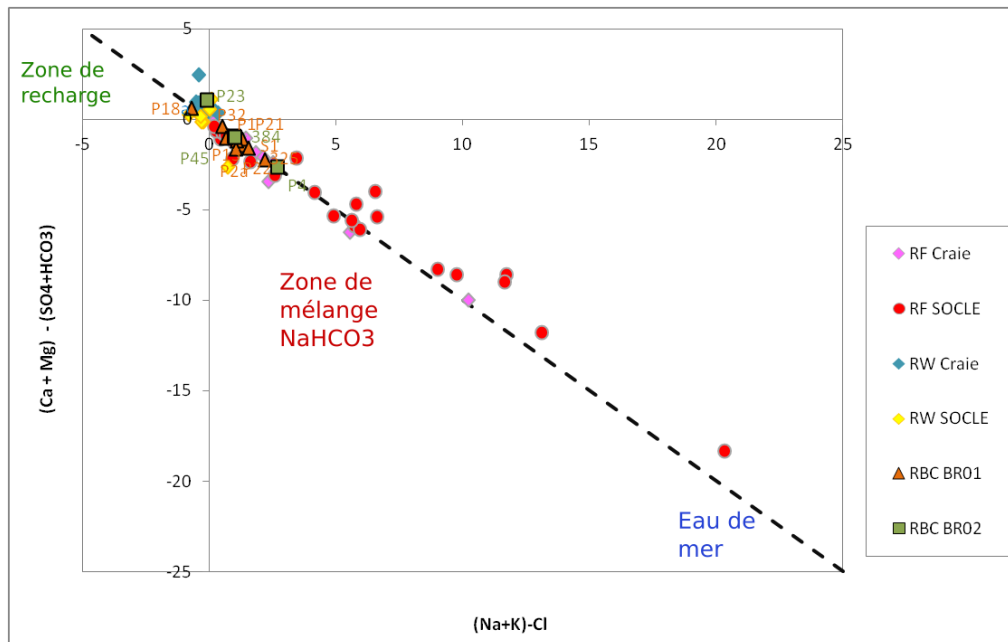


Figure 5-37 : Diagramme (Na+K)-Cl en fonction de (Ca+Mg)-(HCO3+SO4)

5.2.5. Statistiques descriptives

5.2.5.1. Principaux paramètres

Les principaux paramètres de statistique descriptive sont repris dans le tableau 5- 12. Ils ont été calculés pour l'ensemble des stations d'échantillonnage des masses d'eau souterraine BR01 et BR02 et celles qui ont été sélectionnées en Région wallonne et en Région flamande dans le chapitre 5.1.1. 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 (CE, pH, O₂ dissous) et des concentrations en éléments majeurs et mineurs de chaque station d'échantillonnage. Le nombre de stations d'échantillonnage mesurant chaque paramètre est également mentionné. Pour les métaux, les statistiques ont été effectuées pour la fraction totale à l'exception du fer pour lesquelles elles ont été également effectuées sur la fraction dissoute parce que la fraction totale est uniquement mesurée en Région de Bruxelles-Capitale contrairement en Flandre et en Wallonie où uniquement la fraction dissoute est mesurée.

Paramètre	Unité	Nb. Stations	Min	P25	Moyenne	Médiane	P75	P90	Max
Al total	µg/L	75	0.25	5	52.4	10	15	25.0	2000
As total	µg/L	53	0.05	0.5	1.6	0.5	2.15	3.6	10.6
B total	µg/L	53	10	37.5	249.2	116	420	642.0	1261.4
Ba total	µg/L	34	16.1	60.1	98.7	101.1	132.2	175.1	191.5
Br	µg/L	18	28	60.8	359.2	127.5	476.5	1039.5	1399
Ca	mg/L	83	2.6	13.7	62.5	56	101	135.5	175.7
Cl	mg/L	84	3.8	14.4	212.6	38.4	113.3	302.4	5102
COT	mg/L	58	0.35	0.61	1.9	0.89	1.375	4.6	20.3
EC	µS/cm	84	101	591.8	1205.8	718	961.8	1568.1	15320
F	µg/L	52	78	110	307.1	165	290.1	548.5	2825
Fe dissous	µg/L	68	2	35	417.3	100	692.5	1110	3220
Fe total	µg/L	13	2.5	109.6	293.6	183	359.35	826.5	1006.2
HCO3	mg/L	80	18.3	240.1	323.1	330.6	379.5	439.3	1005.9
K	mg/L	83	0.5	3.0	10.0	9.1	13.4	17.8	51.05
Mg	mg/L	83	0.05	3.5	13.6	12.7	17.1	24.1	96.3
Mn	µg/L	54	0.5	5.7	71.6	36.0	70.8	98.8	1500
Na	mg/L	83	4.8	12.5	190.0	47.3	172.8	334.5	3336.4
NH4	mg/L	83	0	0.04	0.3	0.21	0.31	0.4	3.7
Ni total	µg/L	53	0.5	1	1.9	2	2.5	2.5	8.75
NO3	mg/L	84	0.05	0.1	3.6	0.11	1	14.3	60.7
O2	mg/L	80	0.1	0.3	2.9	2.6	4.6	6.8	10.2
Pb total	µg/L	53	0.025	0.1	1.1	0.3	1.8	3.5	10.8
pH		84	6.38	7.3	7.9	7.7	8.4	9.0	10.1
SO4	mg/L	83	0.5	15	45.6	26.2	63.7	105.8	205.7
Sr	mg/L	33	0.16	0.7	272.7	311.8	396	592.4	833.5
Zn	µg/L	53	1	5	34.0	9	27	68.0	351

Tableau 5-12 : Principaux paramètres statistiques du Socle et du Crétacé

5.2.5.2. Distribution des paramètres et éléments

Aux figures 5-38 et 5-39, les histogrammes des paramètres de terrain, des concentrations en éléments majeurs et mineurs sont représentées. Les histogrammes ont également été tracés pour l'ensemble du jeu de données du Socle et du Crétacé (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 pour les paramètres de terrain (CE, pH, O₂ dissous) et des concentrations en éléments majeurs et mineurs de chaque station d'échantillonnage. 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. Pour la plupart des éléments, la distribution est asymétrique et l'histogramme est fortement étiré vers la droite.

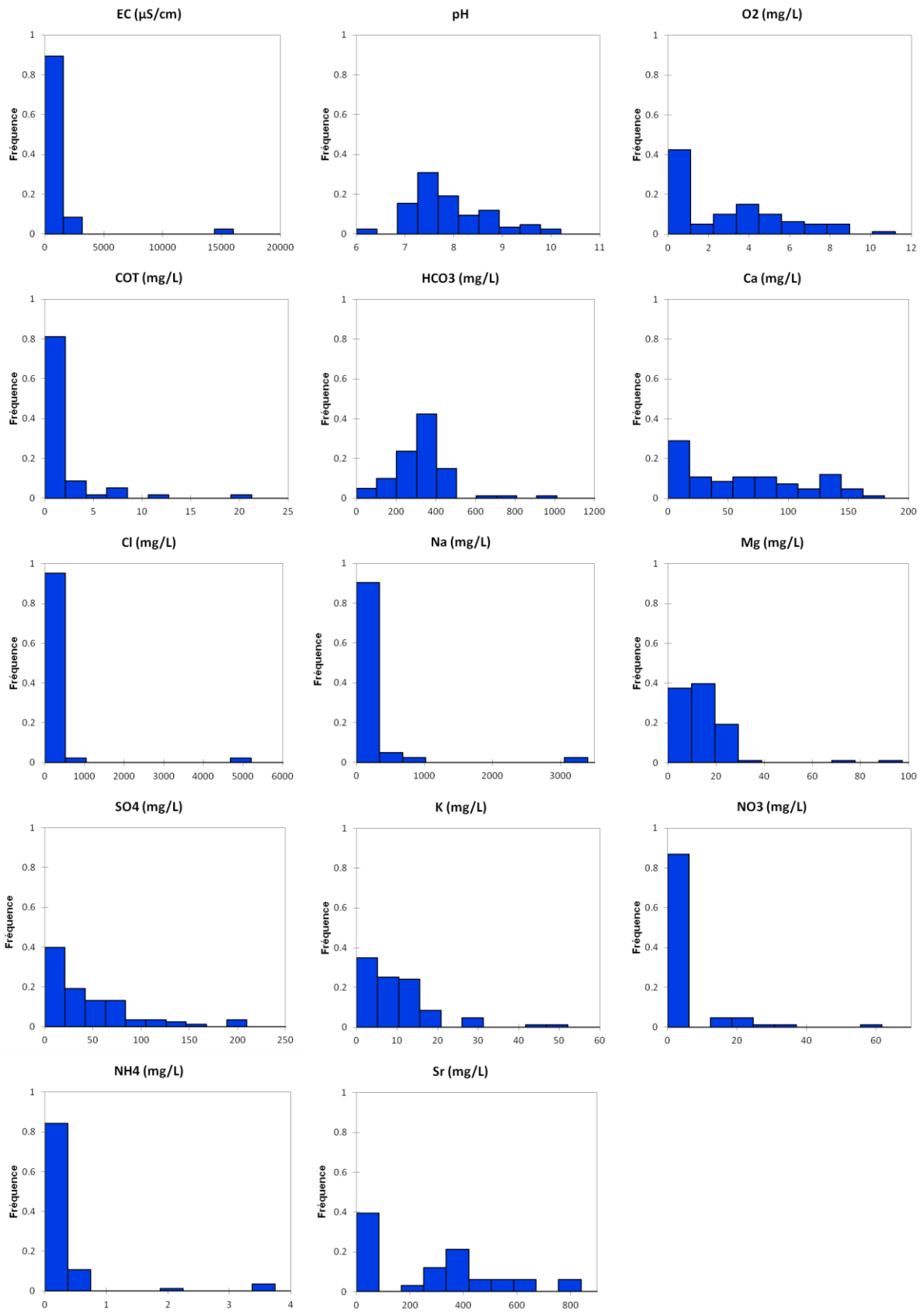


Figure 5-38 Histogrammes illustrant la distribution des paramètres de terrain et des éléments majeurs du Socle et du Crétacé

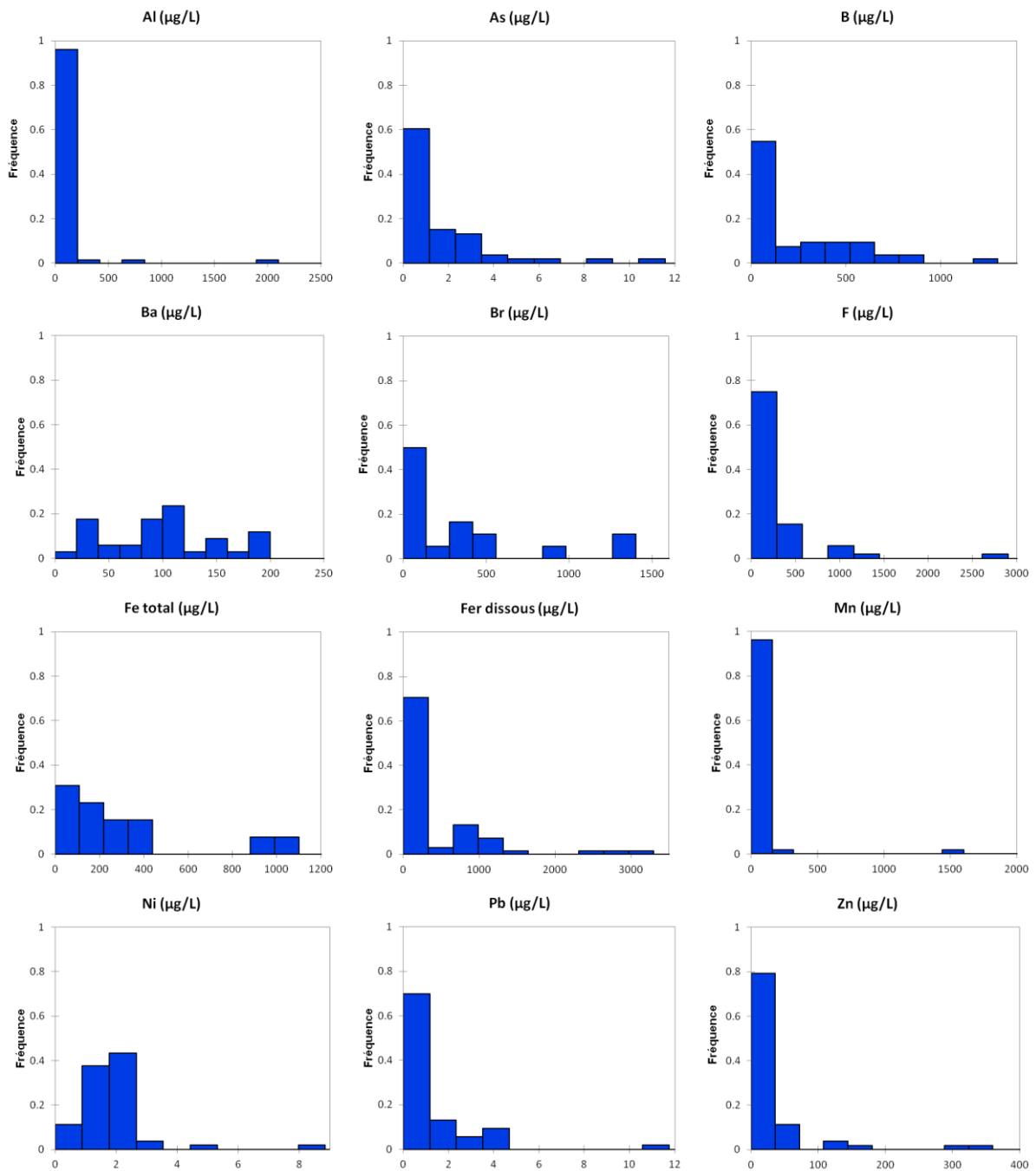


Figure 5-39 : Histogrammes illustrant la distribution des principaux éléments mineurs du Socle et du Crétacé (Pour les métaux il s'agit de la fraction totale à l'exception du Fe pour lequel la fraction dissoute est également représentée)

5.2.5.3. Différence entre les régions.

Pour visualiser la différence entre les régions des diagrammes de type « boxplot » ont été utilisés (figures 5-40 et 5-41). Les données utilisées sont les médianes des valeurs disponibles pour les paramètres de terrain, et des concentrations en certains éléments majeurs et mineurs de chaque station d'échantillonnage. Les diagrammes de type « boxplot » permettent de visualiser les minimum et maximum, les percentiles 10, 25, 50 (la médiane), 75 et 90. La moyenne est également représentée par une croix rouge. Les paramètres qui ont été représentés sont le pH, certains éléments majeurs et mineurs. En Flandre, les valeurs de pH sont plus élevées, ainsi que les concentrations en Cl, NH₄, B, F, la plupart des métaux et métalloïdes à l'exception du Fe et du Mn. En Wallonie, les concentrations sont plus élevées en O₂, Ca, SO₄, NO₃. En Région de Bruxelles-Capitale les concentrations sont généralement intermédiaires par rapport à celles observées dans les deux autres régions. Pour la Région de Bruxelles-Capitale et la Région flamande, les boxplots sont plus étirés probablement parce que le jeu de données est plus grand mais surtout parce que ces régions comprennent la zone de transition entre les eaux de recharge récentes et les eaux marines plus anciennes, ainsi que des eaux caractérisées par des conditions réductrices variées. Les boxplots de la Région wallonne sont également plus étirées pour le NO₃, l'O₂, le Fe et le Mn, probablement parce qu'elle est partiellement dans la zone oxygène et partiellement dans la zone suboxygène.

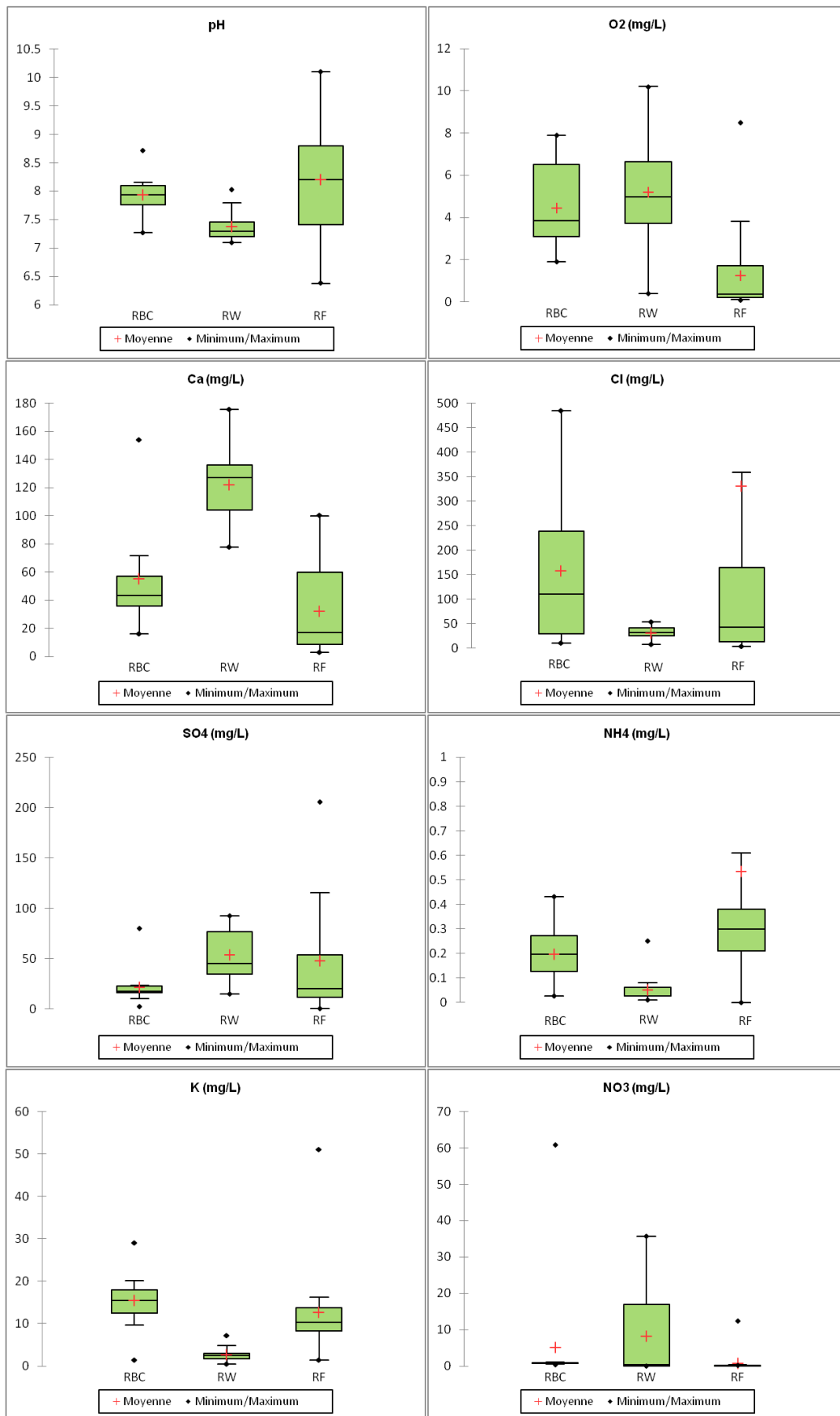


Figure 5-40 : Boxplots illustrant la distribution de quelques paramètres et éléments majeurs du Socle et du Crétacé

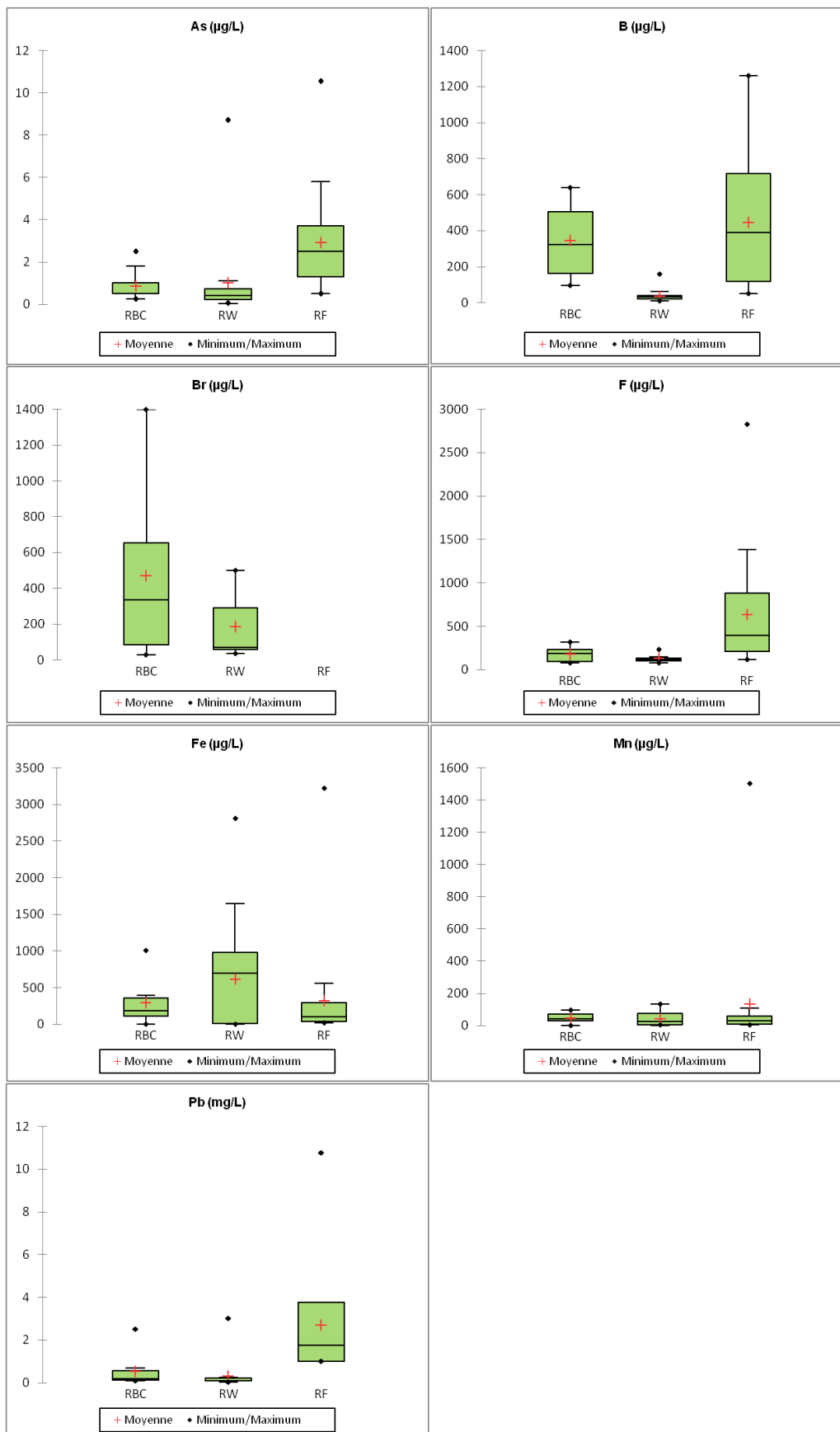


Figure 5-41 : Boxplots illustrant la distribution de quelques éléments mineurs du Socle et du Crétacé (pour les métaux il s'agit de la fraction totale à l'exception du Fe où il s'agit de la fraction totale en RBC et de la fraction dissoute en RW et RF)

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 paramètres de terrain, des éléments majeurs et des principaux éléments mineurs est présentée au tableau 5-13. 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 0.5 sont mis en évidence au moyen d'un fond rouge et les coefficients de corrélation inférieurs à -0.5 sont mis en évidence par un fond bleu.

Il est possible de constater que de nombreuses variables sont corrélées. Le Cl est notamment corrélé positivement avec la conductivité, le pH, NH₄, As, B, Br, la conductivité, K, Na, SO₄ et inversement corrélé le Fe et Sr. Il est donc plutôt corrélé avec des ions d'origine marine. Le Fe et le Mn sont tous les deux corrélés positivement. Les métaux et métalloïdes As, Al, Ni, Pb et B sont également positivement corrélés et inversement corrélé à l'O₂ et/ ou aux NO₃. Il n'y a par contre pas de corrélations significatives entre le Fe et le Mn et les autres métaux et métalloïdes. As, Al, Ni, Pb. Les métaux semblent corrélés à des zones plus réductrices et il semble y avoir plusieurs zones réductrices : celles avec des échantillons riches en Fe et Mn et d'autres plus riches en As, Al, Ni, Pb

Param.	Al	NH4	As	Ba	HCO3	B	Br	Ca	COT	Cl	EC	Fe	F	Mg	Mn	Ni	NO3	O2	pH	Pb	K	Na	Sr	SO4	Zn
Al		0.32	0.28					-0.29	0.26				0.27	-0.22		0.51	-0.24	-0.29	0.20	0.49		0.24			-0.25
NH4	0.32		0.35			0.50	0.39	-0.43		0.32	0.40		0.39		0.29		-0.25	-0.27	0.40	0.41	0.50	0.54			
As	0.28	0.35			-0.23	0.41	0.51	-0.35		0.20	0.26		0.34					-0.32	0.27	0.49		0.36	-0.31	-0.20	
Ba																									
HCO3			-0.23			-0.25		0.22			0.17		-0.35	0.32					-0.17						
B		0.50	0.41		-0.25		0.42	-0.71		0.26	0.35		0.49					-0.42	0.60	0.36	0.56	0.65	-0.30	-0.41	
Br		0.39	0.51			0.42			-0.55	0.69	0.56								0.44			0.52			
Ca	-0.29	-0.43	-0.35		0.22	-0.71			-0.26			0.22	-0.53	0.44		-0.22	0.23	0.30	-0.66	-0.42	-0.33	-0.52	0.36	0.19	
COT	0.26						-0.55	-0.26						-0.36					0.18	0.31	-0.29				
Cl		0.32	0.20			0.26	0.69				0.66	-0.18							0.27		0.22	0.57	-0.38	0.22	
EC		0.40	0.26		0.17	0.35	0.56			0.66		-0.16	0.24						0.21		0.29	0.56	-0.28	0.15	
Fe								0.22		-0.18	-0.16				0.48				-0.19			-0.21			
F	0.27	0.39	0.34		-0.35	0.49		-0.53			0.24			-0.36		0.37		-0.31	0.43	0.46	0.24	0.36		-0.31	
Mg	-0.22				0.32			0.44	-0.36				-0.36			-0.23			-0.41			-0.20			0.20
Mn		0.29										0.48					-0.23								
Ni	0.51							-0.22					0.37	-0.23				-0.38		0.41					
NO3	-0.24	-0.25						0.23							-0.23				-0.21				-0.26		
O2	-0.29	-0.27	-0.32			-0.42		0.30					-0.31			-0.38				-0.31	-0.25			0.20	0.27
pH	0.20	0.40	0.27		-0.17	0.60	0.44	-0.66	0.18	0.27	0.21	-0.19	0.43	-0.41			-0.21			0.27	0.26	0.55	-0.41		
Pb	0.49	0.41	0.49			0.36		-0.42	0.31				0.46			0.41		-0.31	0.27		0.21	0.29	-0.40	-0.27	
K		0.50				0.56		-0.33	-0.29	0.22	0.29		0.24					-0.25	0.26	0.21		0.45	-0.32		
Na	0.24	0.54	0.36			0.65	0.52	-0.52		0.57	0.56	-0.21	0.36	-0.20					0.55	0.29	0.45		-0.50		
Sr			-0.31			-0.30		0.36		-0.38	-0.28						-0.26		-0.41	-0.40	-0.32	-0.50			
SO4			-0.20			-0.41		0.19		0.22	0.15		-0.31					0.20		-0.27					
Zn	-0.25													0.20				0.27							

Tableau 5-13 : Coefficients de corrélation entre les principaux paramètres de terrain, les éléments majeurs et les principaux éléments mineurs du Socle et du Crétacé

5.2.7. 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 groupe d'eaux ayant des signatures géochimiques semblables.

Dans le cas de la masse d'eau souterraine du Socle et du Crétacé, 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.

Pour étudier la minéralisation globale, la technique de statistiques multivariées sera appliquée sur une sélection de 9 paramètres. Il s'agit de certains éléments majeurs (Cl, NO₃, Ca, K, Na, SO₄), le B et les rapports Na/Cl (molaire) et Br/Cl (massique). 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. Les rapports Na/Cl et Br/Cl donnent également des indications sur l'origine du Cl. Un rapport Na/Cl (molaire) inférieur à 0.86 ainsi qu'un rapport Br/Cl (massique) compris entre 5×10^{-4} et 3×10^{-3} correspondent généralement à une eau impactée par une pollution (Müller, 2006). Un paramètre tenant compte de la présence ou l'absence de craie a également été ajouté pour évaluer si la présence de craie a une influence sur la minéralisation. 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 et Br/C 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 les NO₃, Mn, SO₄, HCO₃ (potentiellement produits par ces réactions), le NH₄ et le TOC (carbone organique total) ainsi que les métaux pouvant être influencés par les conditions redox. Le fer n'a pas été inclus dans l'analyse parce que le fer total est mesuré en Région de Bruxelles-Capitale tandis qu'en Région flamande et en Région wallonne, il s'agit du fer dissous. Pour les autres métaux, il s'agit de la concentration totale. Les concentrations ont été exprimées en logarithme à cause de leur distribution asymétrique et le pH a été exprimé comme tel.

5.2.7.1. Influence de la minéralisation globale

Pour évaluer l'impact de la lithologie sur la minéralisation de la nappe du Socle et du Crétacé, les SOMs ont été appliqués deux fois sur le jeu de données. La première application a été faite en prenant en compte la lithologie de l'aquifère où le piézomètre est crépiné (Socle, Crétacé ou les deux). La deuxième application a été réalisée en prenant en compte la présence ou l'absence de la craie à l'endroit de la station d'échantillonnage. En effet, même si le piézomètre est crépiné dans un seul des deux aquifères, comme il n'y a pas de couche imperméable entre les deux il y a vraisemblablement des échanges entre ceux-ci.

Le résultat de la deuxième analyse est présenté à la figure 5-42. Les concentrations ont été exprimées en logarithme à cause de leur distribution asymétrique tandis que le pH et les rapports Na/Cl et Br/C ont été utilisés tels quels. Pour les stations d'échantillonnage où la craie est présente, une valeur de 1 leur est attribuée tandis que pour les stations où la craie est absente, une valeur de 0 est attribuée. D'après la matrice des corrélations (tableau 5-13) il n'y a pas de corrélation évidente entre la présence de craie et la minéralisation. Il semble y avoir moins de Cl en l'absence de craie mais cela doit plutôt être lié à la localisation des stations où la craie n'est pas présente. Elles sont situées au Sud de la Région flamande, où la concentration en Cl n'est pas très élevée, même dans les stations où la craie est présente. Les concentrations en Cl augmentent graduellement du Sud vers le Nord. Les résultats de la première analyse ne sont pas présentés ici car les conclusions étaient les mêmes que celles de la deuxième analyse.

La minéralisation ne semble pas être influencée de manière significative par les variations de lithologie. Le paramètre prenant en compte la présence de la craie sera donc exclu de l'analyse pour pouvoir mettre en évidence les autres processus (eau de mer fossile, rafraîchissement, éventuelles contaminations anthropiques).

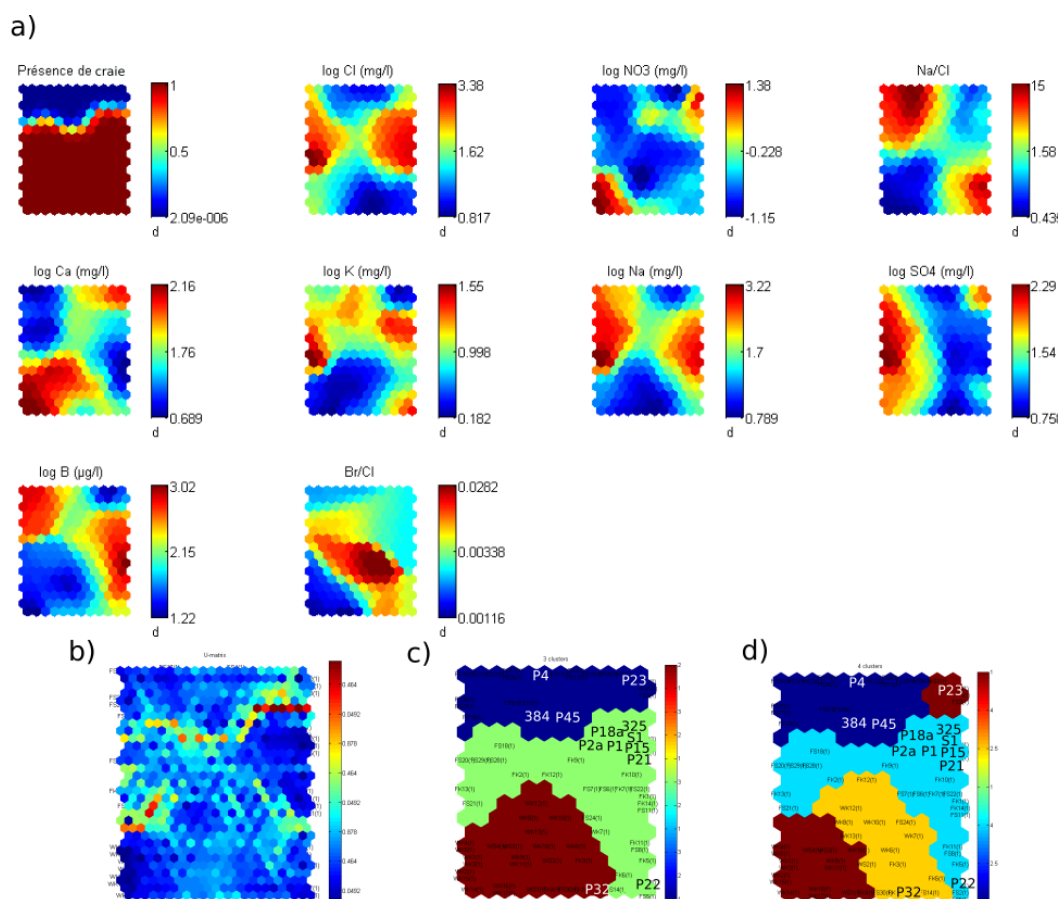


Figure 5-42 : Résultats des SOMs pour la minéralisation globale du Socle et du Crétacé en tenant compte de la lithologie:
a) Matrice des composants, b) Matrice U, c) Groupes d'échantillons semblables définis par les SOMs

Les résultats de l'analyse multivariée qui ne tiennent pas compte de la présence de la craie sont présentés à la figure 5-43. La matrice des composants (figure 5-43a) permet de montrer certaines corrélations notamment entre le Cl, le Na et le B et qui sont également inversement corrélé au Ca. A partir de la matrice U (figure 5-43b), 3 groupes ont été déduits par le logiciel des SOMs (figure 5-43c). Le tableau 5-14 synthétise les principales caractéristiques de ces trois groupes et ceux-ci sont représentés spatialement à la figure 5-44.

Le groupe 1, en bleu, présentent des concentrations élevées en NO₃, SO₄, Ca, des concentrations intermédiaires en Cl, des concentrations faibles en Na, B et K, un rapport Na/Cl faible et un rapport Br/Cl variable. Les échantillons de ce groupe se retrouvent principalement en Région wallonne mais il y a également un point en Région flamande et un point en Région de Bruxelles-Capitale. L'échantillon en Région Bruxelles-Capitale est point P23 (Calypso), il se situe dans la masse d'eau du Socle en zone d'alimentation (BR02). Celui-ci avait déjà été mis en évidence à cause de ses concentrations en nitrates importantes (> 50 mg/L) et des teneurs en pesticides supérieures aux normes de potabilité (> 0.1 µg/L). Les échantillons de ce groupe sont généralement situés dans ou à proximité les zones d'affleurement du Crétacé et du Socle (figure 5-44). Le groupe 1 semble correspondre à la

zone de recharge de l'aquifère du Socle et du Crétacé qui est impactée par des contaminations anthropiques

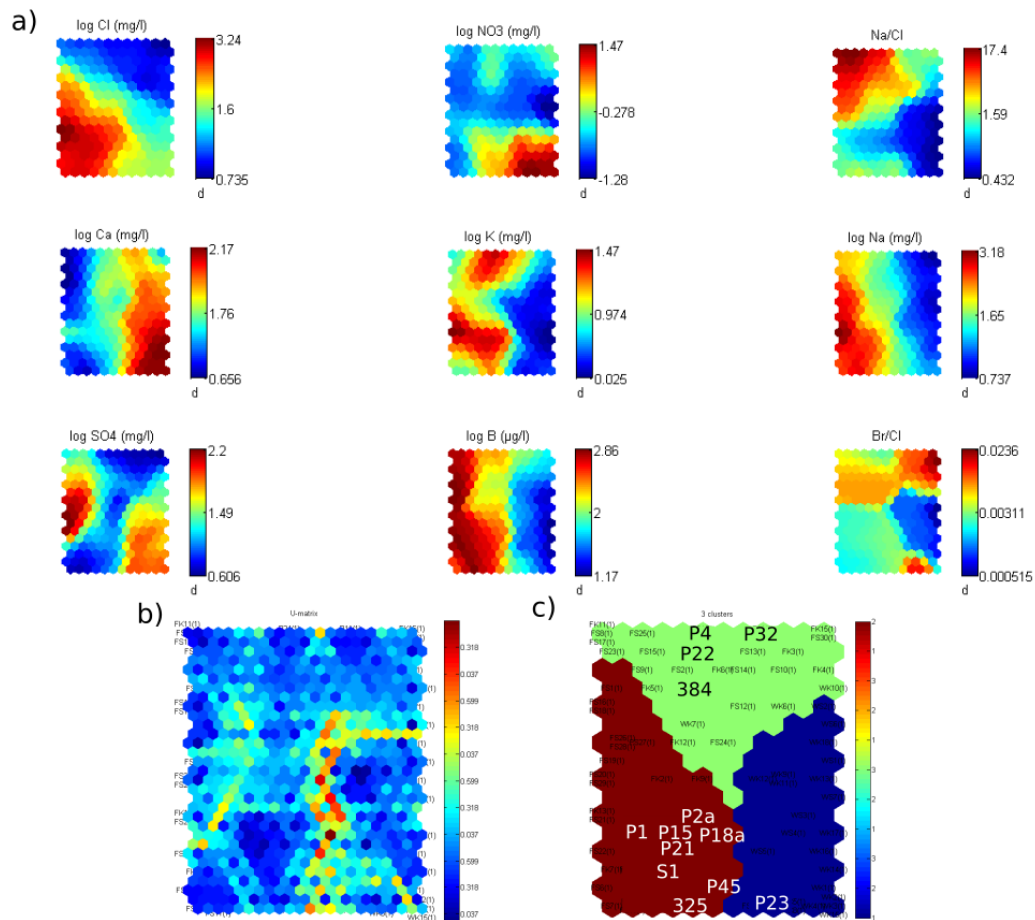


Figure 5-43 : Résultats des SOMs pour la minéralisation globale du Socle et du Crétacé sans tenir compte de la lithologie: a) Matrice des composants, b) Matrice U, c) Groupes d'échantillons semblables définis par les SOMs

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

++ 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)

Tableau 5-14 : Caractéristiques de chacun des trois groupes

Les échantillons du groupe 2, en brun, présentent des concentrations élevées en Cl, Na, B, K, des concentrations faibles en NO3 et en Ca et des concentrations et rapports variables en SO4, Na/Cl et Br/Cl. Les échantillons de ce groupe sont retrouvés dans la partie Nord de la Région de Bruxelles-Capitale et également au Nord de celle-ci (figure 5-44). Ce groupe correspond à des échantillons localisés dans la partie captive de l'aquifère. La salinité élevée est liée à de l'eau de mer fossile, piégée lors de la sédimentation.

Les échantillons du groupe 3, en vert, présentent des concentrations faibles en Cl, NO₃, Na, SO₄, des concentrations variables en Ca, B et Ket des rapports élevés en Na/Cl et Br/Cl. Ces échantillons sont localisés dans la partie Sud de la Région de Bruxelles-Capitale au Sud de celle-ci (figure 5-44). Ils sont situés entre les points des groupes 1 et 2. Le groupe 3 correspond à zone de transition entre la zone de recharge et la zone de forte salinité. Ce groupe est probablement lié à une eau de recharge mais plus ancienne et qui n'est pas contaminée. Les échanges cationiques liés au phénomène de rafraichissement explique le rapport Na/Cl élevé.

Les trois groupes qui se sont dégagés de l'étude de la minéralisation globale (zone de recharge récente contaminée, zone de recharge ancienne et zone avec eau de mer fossile) sont les mêmes que ceux qui avaient été mis en évidence pour le Landénien. Les deux aquifères semblent donc avoir subi les même processus : une eau de mer fossile piégée dans les sédiments et un phénomène de rafraichissement progressif de la nappe. Dans les deux cas (Landénien, Socle et Crétacé), la Région de Bruxelles-Capitale se situe dans la zone de transition entre la recharge ancienne et l'eau de mer fossile.

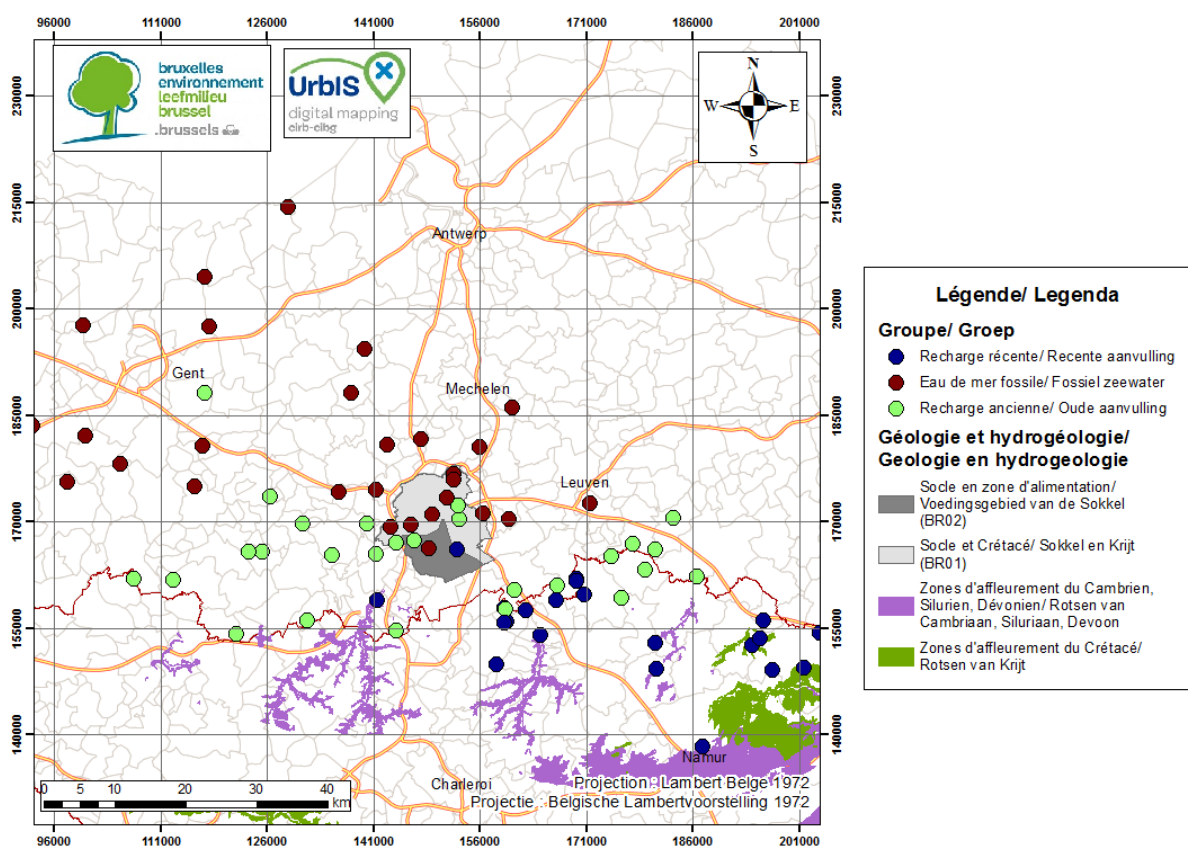


Figure 5-44 : Distribution spatiale des 3 groupes définis grâce à l'analyse multivariée (minéralisation globale)

5.2.7.2. Processus redox

Les résultats de l'analyse statistique multivariée, concernant l'influence des processus d'oxydoréduction sur la masse d'eau du Socle et du Crétacé, sont représentés à la figure 5-45. Certaines corrélations peuvent être observées, par exemple celle entre les paramètres

pH, NH₄, B, As, Pb (figure 5-45a). A partir de la matrice U (figure 5-45b), 3 groupes ont été déduits par le logiciel (figure 5-45c). Le tableau 5-15 synthétise les principales caractéristiques de ces trois groupes et ceux-ci sont représentés spatialement à la figure 5-46.

Les échantillons du premier groupe présentent des concentrations élevées en NO₃, SO₄, et TOC, un pH de l'ordre de 7 et des concentrations moyennes en HCO₃, des concentrations faibles à élevées en Pb et des concentrations faibles pour les autres paramètres (Mn, NH₄, As, B, Zn). Les échantillons de ce groupe se retrouvent principalement en Région wallonne mais il y a également deux points en Région flamande et un point en Région de Bruxelles-Capitale (figure 5-46). L'échantillon en Région Bruxelles-Capitale est le point P23 (Calypso), celui-ci présente des concentrations en nitrates élevées. Les échantillons du groupe 1 font partie de la zone oxydante de l'aquifère où la dénitrification n'a pas encore eu lieu

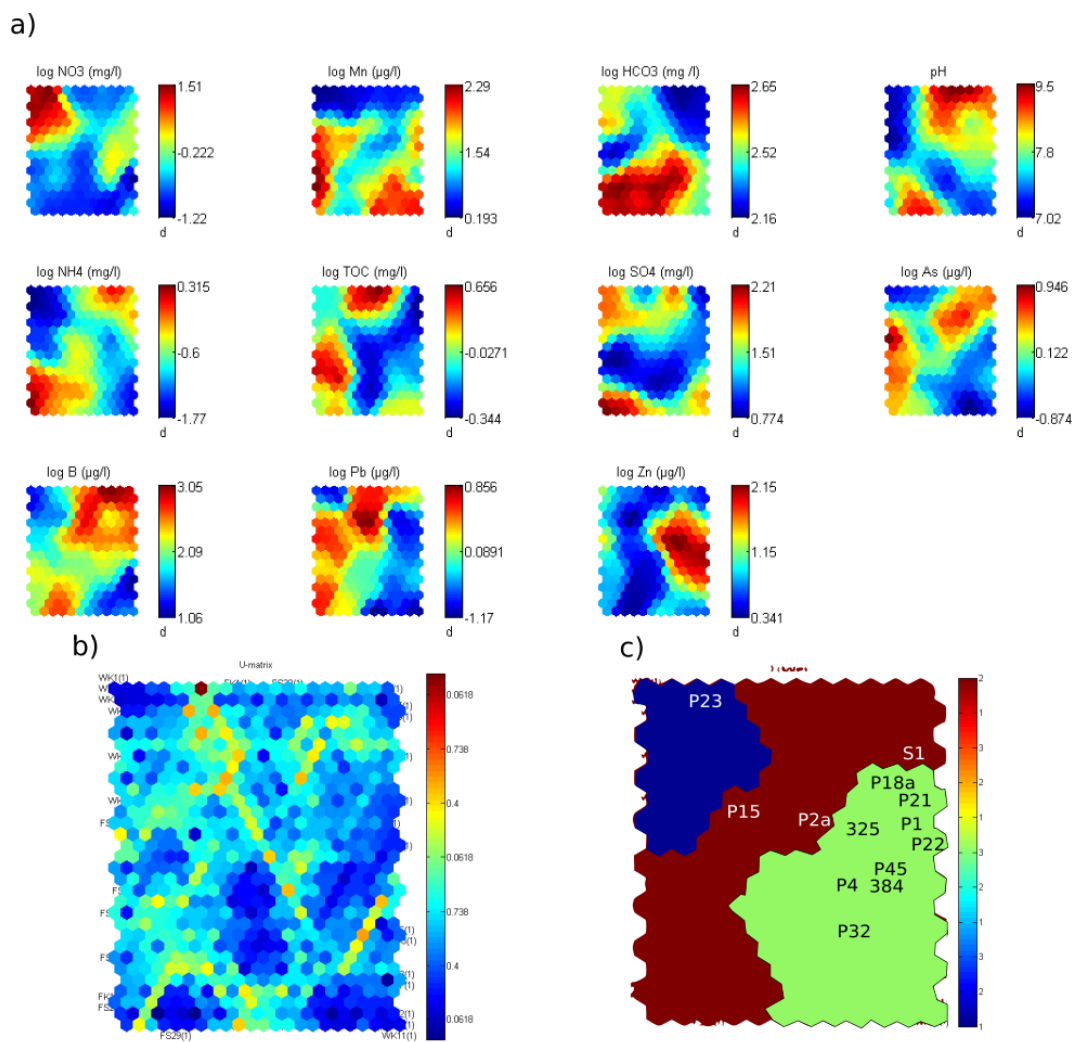


Figure 5-45 : Résultats des SOMs pour les processus redox du Socle et du Crétacé: a) Matrice des composants, b) Matrice U, c) Groupes d'échantillons semblables définis par les SOMs

Les échantillons du groupe 2 présentent des concentrations faibles en NO₃ et en Zn, des concentrations élevées en NH₄, B, As, Pb, un pH élevé et des concentrations variables en

Mn, HCO₃ et SO₄. Ces échantillons sont principalement localisés au Nord de la Région de Bruxelles-Capitale mais il y a également quelques points à la frontière entre la Wallonie et la Flandre (figure 5-46). Ce groupe correspond à la zone fortement réductrice de la nappe du Socle et du Crétacé. Dans ces conditions réductrices, les métaux tel que le Pb et As sont présents naturellement en concentrations importantes.

Les échantillons du groupe 3 présentent des concentrations faibles en NO₃, NH₄, TOC, As, Pb, un pH de l'ordre de 7, des concentrations variables en HCO₃, SO₄ et B, des concentrations élevées en Mn et Zn. Les points de ce groupe sont localisés en Région de Bruxelles-Capitale et au sud de celle-ci (figure 5-46). Ce groupe correspond à une zone de transition, les conditions sont suboxiques : le NO₃ a déjà été consommé et la concentration en manganèse devient importante. Ce groupe se situe probablement dans la zone de réduction du manganèse. Contrairement au Landénien un seul groupe de transition a été identifié avec des paramètres relativement homogènes.

Les résultats de l'analyse de la minéralisation globale et des processus rédox 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 rédox mais cela reste cohérent parce que l'eau de la recharge récente et contaminée peut avoir subir la dénitrification relativement rapidement et ne plus faire partie de la zone oxydante de la nappe.

Groupe	NO ₃	Mn	HCO ₃	pH	NH ₄	TOC	SO ₄	As	B	Pb	Zn
1 : Zone oxydante	++	-	O	--	--	X	+	X	-	X	-
2 : Zone fortement réductrice	-	X	X	+	+	X	X	+	++	++	-
3 : Zone de transition	-	+	X	-	-	-	X	-	X	--	+

++ 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 moyennes par rapport au jeu de données

X concentrations variées (des plus élevées aux plus bas)

Tableau 5-15 : Caractéristiques de chacun des 3 groupes

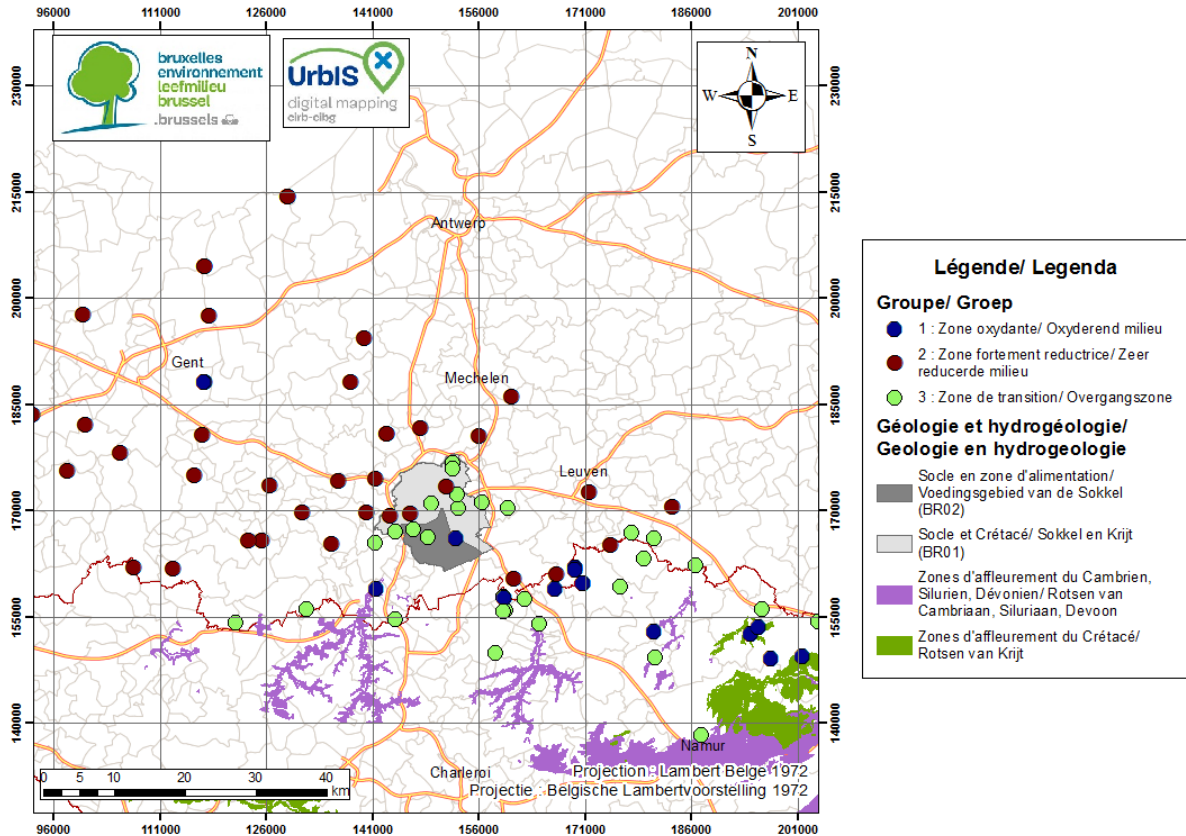


Figure 5-46 : Distribution spatiale des 3 groupes définis grâce à l'analyse multivariée (processus redox)

5.2.8. 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 du Socle et du Crétacé. Trois zones avec différents processus influençant la minéralisation ont ainsi pu être mises en évidence. La figure 5-47 reprend ces différentes zones.

La première zone, la zone de recharge actuelle, est située au Sud, principalement en Région wallonne, là où le Socle et le Crétacé affleurent à de nombreux endroits (figure 5-47). Les eaux sont de type bicarbonaté calcique et présentent des concentrations importantes en Ca. Un des principaux processus qui influence la minéralisation dans cette zone, semble être la dissolution de la calcite. Une partie des eaux présentent des concentrations importantes en O_2 et en NO_3 et une partie des eaux ne contiennent pas de nitrate et ont des concentrations en Fe et Mn qui deviennent importantes. Cette zone comprend des eaux oxiques et suboxiques. Il n'a pas été possible de distinguer deux zones distinctes comme pour le Landénien parce que les variations sont très locales, les affleurements sont plus disséminés, la nappe est plus profonde et il n'y a pas partout une couverture argileuse imperméable. En Région Wallonne, la nappe est localement libre et localement captive.

Plus au Nord, il y a ensuite la zone de transition (figure 5-47). 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 la concentration en K et Mg est plus importante que dans la zone 1 peut-être à cause des échanges ioniques. Contrairement à la zone 1, toute la zone est suboxique parce que la nappe semble être captive de manière continue. La concentration en oxygène est globalement faible, il n'y a plus de nitrate et il y a une forte concentration en Fe, Mn et NH₄. Comme pour le Landénien, il est difficile de dire si cette eau est impactée par l'activité humaine. En Région de Bruxelles-Capitale des polluants (polluants organiques, pesticides...) sont parfois quantifiés mais ils le sont généralement en concentration très faibles et de manière non régulière. Il s'agit peut-être de légères pollutions ponctuelles dans les stations d'échantillonnage et que toute la nappe n'est pas impactée. Pour la majorité des stations d'échantillonnage, la contamination ne semble pas avoir un impact significatif sur la minéralisation des échantillons à l'exception des stations P18a et P23 qui sont d'ailleurs mises en évidence sur la figure 5-47. Le point P18a n'a pas été mis en évidence par l'analyse multivariée mais il présente un rapport Na/Cl inférieur à celui de l'eau de mer, et il montre une concentration en Cl qui a augmenté graduellement de 30mg/L en 1984 à 150 mg/L en 2015. Le puits P23 a été mis en évidence par l'analyse multivariée. Il a une signature très différente des autres puits des masses d'eau BR01 et BR02 notamment à cause d'une concentration en nitrate élevée (> 50 mg/L).

La troisième zone est située au Nord de la Région de Bruxelles-Capitale et en Flandre (figure 5-47). 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. La concentration en Fe et Mn est beaucoup moins importante que dans la zone de transition. Les eaux ne sont plus dans la zone de réduction du Fe et du Mn. La concentration en NH₄ et en certains métaux (B, As, Pb) devient plus implorante. Les conditions sont anoxiques.

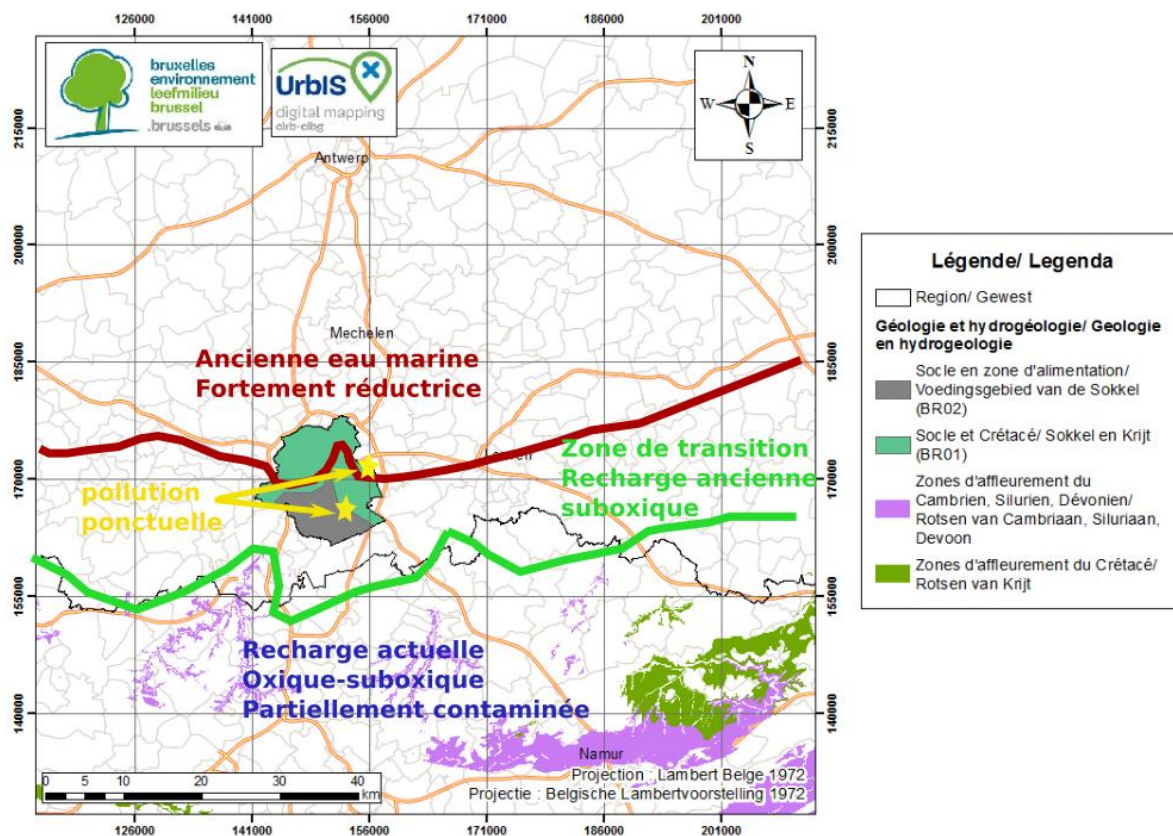


Figure 5-47 : Modèle conceptuel de l’acquisition de la minéralisation dans la masse d’eau du Socle et du Crétacé

5.3. Calcul des concentrations de référence

5.3.1. Sélection des échantillons

Comme pour le Landénien, L’analyse multivariée a montré que la masse d’eau du Socle et du Crétacé (BR01) se trouve à une zone de transition entre les eaux provenant de la recharge ancienne et celles provenant de l’eau de mer fossile. Concernant les processus d’oxydoréduction, la masse d’eau est sur la ligne de front entre la zone suboxique de la nappe et la zone fortement réductrice.

La méthodologie qui sera appliquée pour la sélection des échantillons servant au calcul des concentrations de référence sera la même que celle qui a été proposée pour le Landénien. L’ensemble des points de la masse d’eau BR01 sera considéré mais en éliminant en éliminant les échantillons dont l’impact anthropique influence significativement la minéralisation. Certains échantillons avaient déjà été écartés du calcul des médianes pour chaque station d’échantillonnage. Il s’agissait de l’échantillon 2016 du puits P2a, de l’échantillon 2013 du puits 325, de l’échantillon de novembre 2006 du puits P1, des deux échantillons de 2013 du puits 384 et de l’échantillon de 2011 du P15 (qui s’avère appartenir au puits P46 mais qui a été mal encodé dans la base de données).

L’analyse multivariée n’a pas permis de mettre en évidence des points dont la minéralisation semble impactée par une influence anthropique dans la masse d’eau BR01. Il est tout de

même proposé d'exclure l'échantillon P18a dont la minéralisation semble impactée par l'activité anthropique comme déjà expliqué dans le point précédent. Il est également proposé d'exclure la station d'échantillonnage P2a. Celle-ci a deux échantillons, un en 2016 qui semble contaminé et qui a déjà été écarté de l'analyse et celui de 2008 pour lequel les analyses ne sont pas complètes. La balance ionique n'a donc pas pu être calculée ni les rapports Na/Cl et Br/Cl.

Il reste donc 7 échantillons pour calculer les concentrations de références pour la masse d'eau souterraine BR01. Cependant, pour ces points aussi, 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 et du Crétacé, qui est censée être captive, a des concentrations en oxygène 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 BR01 semblent impactées par une contamination anthropique. Pour déterminer les concentrations de référence, il est habituellement recommandé d'écarté 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 semblaient impacter la minéralisation (ou les points pour lesquelles cela n'a pas pu être vérifié) 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.

Comme pour le Landénien et 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 et du Crétacé provenant de la Région de Bruxelles-Capitale (BR02), 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 BR01 (figure 5-48). Il comprend des données de la masse BR02, ainsi que des données de la Région wallonne et de la Région flamande. Les échantillons faisant partie de la zone de recharge récente contaminée et/ ou de la zone oxydante ne seront pas inclus dans le calcul des concentrations de référence. De cette manière, 15 points supplémentaires seront ajoutés au jeu de données pour le calcul des concentrations de référence/ concentrations de fond

Minéralisation globale

Processus redox

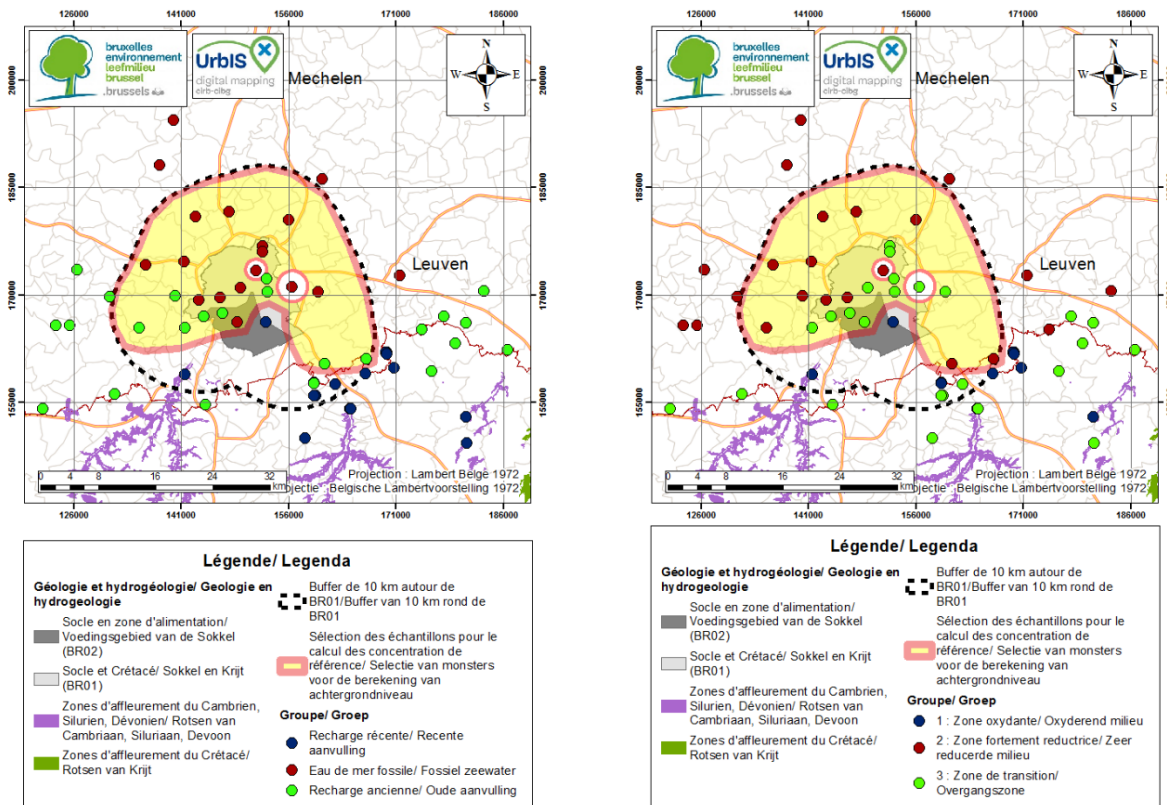


Figure 5-48 : Sélection des échantillons pour la détermination des concentrations de référence de la masse d'eau du Socle et du Crétacé (BR01)

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 5-16). 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 et lorsqu'un paramètre est en dessous de la limite de quantification, il est estimé en divisant la limite de quantification par 2.

Dans le tableau 5-16, les paramètres de la liste minimale sont mis en évidence en bleu. La liste minimale est la liste des polluants et leurs indicateurs pour lesquels les États membres de l'Union européenne doivent envisager d'établir des valeurs seuils (DCE 2006/118/CE et 2014/). Le Fe et le Mn qui sont présents en concentrations importantes dans la masse d'eau souterraine BR01 ont également été considérés. Pour les autres paramètres il n'est pas nécessaire d'établir des concentrations de référence mais c'est une information complémentaire pour caractériser la composition type de la masse d'eau. 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 BR01

(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 caractériser la composition de la masse d'eau souterraine BR01, 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). Pour certains paramètres, les données ne sont pas disponibles en Flandre, il n'y a alors que 9 ou 10 stations d'échantillonnage pour lesquelles il y a des données. Faire un traitement statistique sur un petit nombre de données n'est pas très robuste. Plutôt que de calculer le P90 comme concentration de référence, il est plus prudent de donner une fourchette de valeur avec le minimum et le maximum et de prendre ce dernier comme valeur de référence. Les minima et maxima sont calculés sur base des médianes de chaque station d'échantillonnage par paramètre.

Pour certains paramètres le pourcentage de valeurs supérieures à la limite de quantification est très faible (mis en évidence en rouge dans le tableau 5-16). Pour ces paramètres il n'est pas recommandé d'utiliser le P90 calculé mais plutôt d'estimer la concentration de référence par les résultats d'un aquifère semblable (Müller, 2006). Les valeurs de référence de l'aquifère du Socle et du Crétacé en Wallonie et en Flandre pourront être utilisées dans ce cas là. Elles sont présentées dans le tableau 5-17. Il s'agit de l'aquifère du Massif du Brabant et Craies Ouest captif (masse d'eau SS_1300_GWL_4 en Flandre et RWE160 en Wallonie), de l'aquifère du Massif du Brabant et Craies Est captif (masse d'eau BLKS_1100_GWL_2S en Flandre et RWE080 en Wallonie) et de l'aquifère du Socle du Massif de Brabant et Craies (zone d'alimentation) (masse d'eau SS_1300_GWL_2 en Flandre et RWE160 en Wallonie). En Région wallonne les valeurs de référence sont définies pour des combinaisons masse d'eau et aquifère principal. Pour la masse d'eau RWE080, deux aquifères principaux ont été définis (Craies de Hesbaye et Craie captives du Brabant), les valeurs de référence des deux aquifères sont donc présentées dans le tableau 5-17. En Annexe A-4, une note décrivant la méthodologie utilisée en Wallonie et en Flandre pour déterminer les concentrations de référence est présentée. Les valeurs de référence de Wallonie et de Flandre ne seront pas forcément reprises telles quelles pour déterminer les concentrations de référence de la Région de Bruxelles-Capitale. Comme montré précédemment les concentrations de la Région de Bruxelles-Capitale ont généralement des valeurs entre celles de la Wallonie et de la Flandre. Les valeurs de référence de la masse d'eau BR01 seront donc fixées en prenant en compte les valeurs de Wallonie et de Flandre ainsi que les limites de quantification maximales qui ont été réalisées sur les paramètres concernés et les quelques valeurs supérieures aux limites maximales de quantification.

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.

Paramètre	Unité	Nb. Stations	% >LQ	LQ	Min	P25	P50	Moy.	P75	P90	Max
Al total	µg/L	21	54	1, 10, 20, 40, 50	1.35	4.00	10.00	9.12	15.00	15.00	20.00
As total	µg/L	21	33	0.5, 1, 5	0.25	0.50	1.10	1.68	2.50	3.70	5.80
B total	µg/L	21	90	100	50.00	149.0	391.0	386.5	557.55	642.80	730.0
Br total	µg/L	9	100		28.00	63.00	147	429.7	802.00	1032.4	1366
Ca	mg/L	22	100		2.60	19.83	35.28	40.71	61.50	70.89	101.00
Cd total	µg/L	21	4.6	0.03, 0.1, 0.3, 0.5	0.02	0.05	0.05	0.09	0.13	0.25	0.25
Cd dissous	µg/L	9	3.3	0.1	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.10
Cl	mg/L	22	100		6.80	11.38	48.80	121.5	192.34	290.14	484.1
COT	mg/L	21	95	1	0.35	0.50	0.71	1.23	1.20	1.80	8.25
EC (in situ)	µS/cm	22	100		451.5	623.5	740.3	842.4	1060	1202	1700.0
F	mg/L	21	98	0.1	0.05	0.19	0.29	0.33	0.40	0.56	0.99
Fe total	µg/L	10	94	5, 20, 50	20.80	115.83	191.81	338.41	386.01	941.57	1006.2
HCO3	mg/L	22	99	1	138.9	229.69	317.65	307.21	364.21	438.85	450.15
Hg dissous	µg/L	9	0	0.02, 0.05	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03
Hg total	µg/L	21	1	0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.5	0.01	0.01	0.03	0.07	0.13	0.25	0.25
K	mg/L	22	100		4.00	9.84	13.38	14.62	17.50	27.22	29.50
Mg	mg/L	22	100		0.90	3.71	14.73	13.27	21.98	24.06	25.10
Mn total	µg/L	22	92	10	4.80	25.00	42.5	117.23	82.95	136.4	1470.0
Na	mg/L	22	100		7.60	40.03	124.65	118.76	159.38	218.72	334.70
NH4	mg/L	22	86	0.05, 0.1	0.03	0.13	0.27	0.24	0.35	0.43	0.55
Ni dissous	µg/L	9	13	1, 2	0.50	0.50	0.75	0.75	1.00	1.00	1.00
Ni total	µg/L	21	12	1, 2, 5	0.50	1.00	2.50	1.85	2.50	2.50	3.00
NO2	mg/L	22	13	0.01, 0.02, 0.03, 0.07	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
NO3	mg/L	22	26	0.05, 0.2, 0.9, 1, 2	0.10	0.10	0.48	0.61	1.00	1.00	2.20
O2 (in situ)	mg/L	21	98	0.2	0.10	0.20	2.50	2.45	4.10	6.50	7.40
Ortho phosphates	mg/L	9	85	0.0066	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
P total	mg/L	10	17	0.05, 0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Pb total	µg/L	20	48	0.1, 2, 3, 5	0.05	0.05	1.00	1.27	1.75	3.75	3.75
Pb dissous	µg/L	10	8	0.1	0.10	0.20	0.30	0.44	0.58	0.76	1.25
pH (in situ)		22	100		7.33	7.53	7.98	7.95	8.18	8.59	8.72
SO4	mg/L	22	99	2	2.67	11.75	16.00	18.06	19.01	27.6	54.10
Sr	mg/L	10	100		0.16	0.63	0.67	0.65	0.76	0.82	1.02
Tétrachloro éthylène	µg/L	10	1	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Trichloroéthylène	µg/L	10	4	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Zn total	µg/L	21	75	5,10	2.50	5.00	8.00	50.67	34.00	134.00	351.00

Tableau 5-16 : Paramètres statistiques calculés pour estimer la concentration type de la masse d'eau du Socle et du Crétacé BR01 sur base des médianes des stations d'échantillonnage (en bleu paramètres de la liste minimale et le Fe et le Mn)

Paramètre	Unité	E080/ Craies captives du Brabant	E080/ Craies de Hesbaye	E160/ Cambro-Silurien du Massif du Brabant	Socle Est BLKS_1100_GWL_2S	Socle zone d'alimentation SS_1300_GWL_2	Socle Ouest SS_1300_GWL_4
Sites		17	4	21	/	/	/
As As dissous	µg/l	1.14	0.72	3.09	6	6	20
Cd Cd dissous	µg/l	0.07	0.07	0.2	/	/	/
Cl	mg/l	47.3	69.55	167.45	170	57	650
EC	µS/cm	/	/	/	1100	750	3800
Fe Fe dissous	µg/l	1735.76	573.3	2887.3	1400	1100	1100
Hg Hg dissous	µg/l	0.12	0.03	0.04	/	/	/
Mn Mn dissous	µg/l	151.44	86.1	833.1	80	90	110
NH4	mg/l	0.11	0.05	0.16	0.81	0.52	1.3
Ni Ni dissous	µg/l	2.81	2.71	13.38	/	/	8
NO2	mg/l	0.01	0.05	0.02	/	/	/
P total	mg/l	0.17	0.21	0.1	/	/	/
Pb Pb dissous	µg/l	0.49	0.71	1.04	/	/	/
PO4	mg/l	/	/	/	0.33	0.31	1.1
SO4	mg/l	92.96	86.38	410.44	70	71	420

Tableau 5-17 : Concentrations de référence du Socle et du Crétacé en Flandre et en Wallonie (* : Pour les métaux il s'agit des concentrations dissoutes pour la Flandre et ce n'est pas précisé s'il s'agit des concentrations totales ou dissoutes en Wallonie) (SPW-DGO3-DEE, 2016 et VMM, 2016)

Pour chaque élément de la liste minimale (+ Fe et Mn) une proposition de la concentration de référence est discutée ci-dessous et un récapitulatif des valeurs proposées est présenté au tableau 5-18:

Arsenic total (As)

L'As total a un taux de quantification de 33 %. Le P50 est de 1.10 µg/L et le P90 de 3.70 µg/L. Ces valeurs sont comprises entre les valeurs de référence en Flandre et en Wallonie qui varient entre 0.72 et 20 µg/L. La concentration de référence proposée pour la masse d'eau BR01 est donc 3.70 µg/L (P90).

Cadmium total (Cd)

La concentration en Cd total est généralement inférieure à la limite de quantification, seulement 4.6% des mesures sont supérieures à la limite de quantification. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser le P90 comme valeur de référence. La limite de quantification est de 0.1 µg/L en Région de Bruxelles-Capitale tandis qu'en Région flamande, elle varie entre 0.03 et 0.5 µg/L. Les quelques valeurs supérieures à une limite de quantification sont généralement inférieures ou égales à 0.1 µg/L. Il y a juste une valeur à 0.4 µg/L. Il peut être estimé que la teneur habituellement rencontrée est inférieure à 0.1 µg/L mais dire par précaution qu'elle peut aller jusque 0.5 µg/L (valeur de quantification maximale en Flandre). Les valeurs de référence en Wallonie varient entre 0.07 et 0.2 µg/L. La concentration de référence qui est proposée est 0.5 µg/L.

Chlore (Cl)

Les eaux échantillonnées présentent constamment des concentrations en Cl supérieures à la limite de quantification. Le P50 (48.8 mg/L) peut être utilisé pour estimer la teneur habituelle et le P90 (290.1 mg/L) peut être utilisé pour déterminer la valeur de la concentration de référence. Ces valeurs sont comprises entre les valeurs de référence en Flandre et en Wallonie qui varient entre 47.3 et 650 mg/L.

Conductivité (EC) in situ

Il n'est pas obligatoire de déterminer une valeur de référence pour la conductivité électrique si des valeurs ont été fixées pour le Cl et le SO₄. Mais la valeur habituelle de la conductivité peut tout de même être estimée via le P50 (740 µS/cm) et via le P90 (1202 µS/cm) pour déterminer la valeur de référence.

Fer total (Fe)

Seules les valeurs de la Région de Bruxelles-Capitale ont été utilisées parce qu'en Flandre, c'est le fer dissous qui est mesuré. 94 % des valeurs sont supérieures à la limite de quantification mais uniquement 10 stations d'échantillonnage sont utilisés pour le traitement statistique ce qui n'est pas très robuste. Il est peut être plus prudent de donner une fourchette de valeur : entre 20.8 µg/L (minimum des médianes des stations d'échantillonnage) et 1006.2 µg/L (maximum des médianes des stations d'échantillonnage). Le P90 a d'ailleurs une valeur relativement proche du maximum : 941.57 µg/L. La valeur de référence proposée est 1006.2 µg/L pour le fer total, ce qui est compris entre les valeurs de référence en Flandre et en Wallonie qui varient entre 573.3 µg/L et 2887.3 µg/L même si celles-ci sont calculées pour le fer dissous.

Mercure total (Hg)

Le mercure n'est pratiquement pas détecté (1%) dans les points du Socle et du Crétacé sélectionnés en Région de Bruxelles-Capitale et en Région flamande. Il n'est donc pas

recommandé d'utiliser le P90 comme valeur de référence. La limite de quantification varie entre 0.01 et 0.5 µg/L mais cette valeur plus élevée concerne uniquement les mesures les plus anciennes. Les valeurs de limite de quantification actuelles sont entre 0.01 et 0.05 µg/L. En considérant l'ensemble du jeu de données (et non les médianes comme dans le tableau 5-16), il y a juste un échantillon pour lequel le mercure est détecté et la concentration mesurée est 0.07 µg/L. En Région wallonne, les valeurs de référence varient entre 0.04 µg/L et 0.12 µg/L. En Flandre, la valeur n'a même pas été calculée car le mercure n'est pas détecté dans la nappe. Il est difficile de fixer une valeur de référence précise pour la masse BR01. Il peut être estimé que le mercure a généralement une concentration inférieure à 0.05 µg/L (limite de quantification actuelle la plus élevée) mais cette valeur est parfois dépassée, il est donc proposé d'utiliser la même concentration de référence que pour les craies captives du Brabant: 0.12 µg/L.

Manganèse total (Mn)

Le Mn total a un taux de quantification de 92 %. Le P50 (42.5 µg/L) peut être utilisé pour estimer la teneur habituelle et le P90 (136.4 µg/L) peut être utilisé pour déterminer la concentration de référence. Ces valeurs sont comprises entre les valeurs de référence en Flandre et en Wallonie qui varient entre 80 et 833.1 µg/L.

Ammonium (NH₄)

Le NH₄ a un taux de détection de 86 %. Le P50 (0.27 mg/L) peut être utilisé pour estimer la teneur habituelle et le P90 (0.43 mg/L) peut être utilisé pour déterminer la concentration de référence. Ces valeurs sont comprises entre les valeurs de référence en Flandre et en Wallonie qui varient entre 0.05 et 1.3 mg/L.

Nickel total (Ni)

Le Ni a un taux de quantification de 12%. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser le P90 comme valeur de référence. La limite de quantification du nickel varie entre 1 et 5 µg/L. En considérant l'ensemble du jeu de données (et non les médianes comme dans le tableau 5-16), les quelques valeurs quantifiées varient généralement entre 1 µg/L et 9 µg/L et un échantillon présente une valeur plus élevée : 15 µg/L. En Région wallonne, la concentration de référence varie entre 2.81 et 13.38 µg/L et en Région flamande elle est de 8 µg/L pour le Socle Ouest en fraction dissoute. Il est difficile de fixer une valeur de référence précise pour la masse BR01. Il peut être estimé que le nickel a généralement une concentration inférieure à 5 µg/L (limite de quantification la plus élevée) mais cette valeur est parfois dépassée, il est donc proposé d'utiliser la même concentration de référence que pour le Massif du Brabant : 13.38 µg/L.

Nitrite (NO₂)

Seulement 13% des valeurs sont supérieures à la limite de quantification. Les valeurs de références ne peuvent donc pas être déterminées sur base du P90. Les valeurs de limite de quantification varient entre 0.01 et 0.07 µg/L et les quelques valeurs quantifiées sont majoritairement inférieures à cette valeur. Il est donc proposé d'estimer la concentration de référence comme étant inférieure à 0.07, ce qui dans le même ordre de grandeur que les concentrations déterminées en Wallonie (0.01 à 0.05 µg/L).

Phosphore total (P)

Le phosphore total est quantifié à 17% et il y a seulement 10 points de mesures parce qu'il n'est pas mesuré en Région flamande. Calculer le P90 n'est donc pas très robuste. Les valeurs sont généralement inférieures à la limite de quantification (0.05mg/L - 0.1 mg/L). En considérant l'ensemble du jeu de données (et non les médianes), les quelques valeurs quantifiées varient généralement entre 0.1 et 0.2 mg/L. En Wallonie, les valeurs de références sont 0.10 mg/L, 0.17 mg/L et 0.21 mg/L et en Flandre les valeurs de références sont calculées pour le phosphate mais pas pour le phosphore total. La valeur de référence proposée est 0.21 mg/L qui est la valeur de référence maximale en Wallonie.

Plomb total(Pb)

Le plomb total est quantifié à 34% dans les points sélectionnés. Le P50 est 1.0 µg/L et le P90 est 3.75 µg/L. Ce qui est un peu plus élevé que les valeurs calculées en Wallonie (0.49-1.04 µg/L). En Flandre, les valeurs de références n'ont pas été calculées. La valeur de concentration de référence proposée est de 3.75 µg/L (P90).

Sulfate (SO4)

Les échantillons présentent presque constamment des concentrations en SO₄ supérieures à la limite de quantification. Le P50 (16.0 mg/L) peut être utilisé pour estimer la teneur habituelle et le P90 (27.6mg/L) peut être utilisé pour déterminer la concentration de référence. Ces valeurs sont inférieures aux valeurs de référence en Flandre et en Wallonie qui varient entre 70 et 420 mg/L.

Paramètre	unité	Valeur de référence
As total	µg/l	3.7
Cd total	µg/l	0.5
Cl	mg/l	290.1
EC	µS/cm	1202
Fe total	µg/l	1006.2
Hg total	µg/l	0.12
Mn total	µg/l	136.4
NH ₄	mg/l	0.43
Ni	µg/l	13.38
NO ₂	mg/l	0.07
P total	mg/l	0.21

Pb total	µg/l	3.75
SO4	mg/l	27.6

Tableau 5-18 : Valeurs de référence proposées pour la masse d'eau souterraine BR01

6. 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.

6.1. 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, Br/Cl),... C'est pourquoi il est recommandé d'analyser les éléments majeurs et les éléments mineurs à chaque échantillonnage. Il y a notamment le point P47 (appartenant à la masse d'eau BR03) pour lequel, seulement une analyse a été réalisée et tous les éléments majeurs et mineurs n'ont pas été mesurés. Il manque notamment : HCO₃, Br, F, Mg, Na, Sr. Il est recommandé de refaire une mesure complète sur cette station, d'autant plus que 4 pesticides ont été quantifiés lors de l'échantillonnage précédent.

D'autres points d'échantillonnage ont également été identifiés comme subissant un impact anthropique. Il s'agit des points P25, P46 et P5 pour la masse d'eau BR03, du point P23 et des deux échantillons de 2013 du puits 384 pour la masse d'eau BR02. Pour la masse d'eau BR01, il y a le puits P18a, l'échantillon de 2016 du puits P2a, l'échantillon de 2013 du puits 325, l'échantillon de novembre 2006 du puits P1 et de l'échantillon de 2011 du P15. Il est recommandé d'échantillonner à nouveau régulièrement ces puits, si leur accès est encore possible, pour voir si la pollution persiste. Il faudrait notamment échantillonner en particulier les puits P2a, 325 et P15 pour lesquels les derniers prélèvements seulement indiquaient des contaminations. Cela permettrait de savoir s'il s'agissait seulement d'une pollution ponctuelle dans le temps où si la pollution est encore présente.

Dans le rapport, il a été montré que les concentrations en oxygène étaient souvent anormalement élevées dans les masses d'eau BR01 et BR03 qui sont supposées être captives. 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.

Dans ce travail, il a également été évoqué plusieurs fois que les mesures sur le fer se réfèrent au fer dissous en Wallonie et en Flandre et au fer total en Région de Bruxelles-Capitale. Réaliser des mesures sur le fer dissous en Région de Bruxelles-Capitale, serait pertinent pour pouvoir comparer les données avec les autres régions. Il serait également intéressant de savoir s'il y a une forte différence entre les concentrations en fer dissous et les concentrations en fer total. Cela permettrait de savoir si les concentrations élevées sont dues au fer dissous ou à la présence de particules (colloïdes/complexes). Il pourrait également être intéressant de réaliser cette mesure sur d'autres métaux tels que le manganèse, le zinc et l'arsenic.

6.2. Recommandation relatives à la représentativité spatiale et temporelle des jeux de données

Dans ce présent rapport, un calcul de tendance a été réalisé pour le Cl, le Fe et le Mn pour chacun des ouvrages disponibles dans les masses d'eau souterraine BR01, BR02, BR03. Très peu de tendances ont pu être mises en évidence, en grande partie dû au fait qu'il n'y a pas assez de données. Il est donc recommandé de continuer le monitoring pour toutes les stations et le plus régulièrement possible, pour pouvoir refaire un calcul de tendance dans quelques années quand les données seront plus nombreuses. D'après certains auteurs il faut au minimum 10 points de mesures (Lopez *et al*, 2011) et même 20 points de mesures pour d'autres auteurs (Aguilar *et al.*, 2007). Il est également recommandé de calculer les tendances via des méthodes de régressions non paramétriques comme celle de Mann Kendall qui a été utilisée dans ce rapport. Ces méthodes sont plus robustes et plus adaptées lorsque que la distribution n'est pas normale et qu'il y a des outliers. L'utilisation de la régression linéaire simple repose d'ailleurs sur une hypothèse de distribution normale des données.

Le nombre de stations d'échantillonnage dans les masses d'eau BR01 et BR03 n'est pas très élevé. Ceci ne permet pas de faire des statistiques très robustes sur ce jeu de données. Dans la masse d'eau BR03, il y a 14 stations d'échantillonnage et seulement 9 ont pu être utilisées pour le calcul des concentrations de référence (à cause de puits contaminés, de données antérieures à 2006 et de données manquantes). Dans la masse d'eau BR01, il y a 9 stations d'échantillonnage et seulement 7 ont pu être utilisées pour le calcul des concentrations de fond. 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 BR03 et BR01 est relativement réduite : 162 km² et 111 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 BR03 et BR01, certains emplacements seraient plus judicieux que d'autres. Pour la masse BR01, la répartition des stations d'échantillonnage n'est pas très homogène, il n'y a pas de puits dans le Nord-Ouest de la masse d'eau. C'est également le cas pour la masse d'eau BR03, il y a peu de puits dans le Sud et Sud-Est de la masse d'eau. Si des nouveaux puits venaient à être réalisés il serait plus intéressant qu'ils le soient dans ces zones-là et qu'ils soient sélectionnés dans le réseau de monitoring.

Certaines recommandations concernent aussi la base de données reprenant l'ensemble des analyses chimiques fournies par l'IBGE. Certaines informations ont été transmises oralement concernant des échantillonnages douteux : mauvaise purge, contamination atmosphériques... Il est recommandé de noter systématiquement ce genre d'information dans la base de données pour que ces informations soient disponibles pour tous et pour une meilleure compréhension des résultats.

Une autre recommandation concerne la base de données qui a été fournie. Deux stations d'échantillonnage sont mal répertoriées dans les masses d'eau. Il s'agit des points P16 et P24. Le puits P16 est crépiné dans l'Yprésien alors qu'il est répertorié dans la masse d'eau du Landénien et le puits P24 est crépiné dans le Socle et le Landénien alors qu'il est répertorié dans la masse d'eau du Socle en zone d'alimentation. Il est recommandé d'exclure le point P16 de la masse BR03 et de l'inclure dans la masse d'eau BR04. Concernant le point P24, il est recommandé de ne pas le considérer comme appartenant à la masse d'eau BR02 ni à la masse d'eau BR03 parce qu'il mélange l'eau de ces deux masses d'eau.

6.3. Recommandations relatives à la caractérisation hydrochimique et isotopique des eaux souterraines

Des mesures isotopiques relatives au ^{14}C et au ^{36}Cl ont été réalisées pour plusieurs échantillons des masses d'eau BR01, BR02 et BR03. Ces mesures sont toutes inférieures aux limites de quantification et après l'analyse des données, il a été mis en évidence que ces limites de quantification étaient beaucoup trop élevées pour mesurer l'activité du ^{14}C et du ^{36}Cl dans des eaux naturelles. Les appareils qui ont été utilisés ne semblent pas adaptés. Si de telles mesures devaient à nouveau être réalisées, il est recommandé de le faire dans un laboratoire adéquat. La méthode du ^{14}C est relativement complexe à interpréter en raison des sources multiples de carbone dans l'eau souterraine. Il est donc aussi recommandé de réaliser des mesures supplémentaires en même temps que la mesure de l'isotope ^{14}C : l'analyse des éléments majeurs et la mesure du $\delta^{13}\text{C}$ pour pouvoir faire un modèle de correction géochimique (Edmunds and Shand, 2008). Pour une meilleure estimation de l'âge de l'aquifère, il est également recommandé de coupler plusieurs techniques.

Si Bruxelles Environnement souhaite aller plus loin dans la compréhension des processus géochimiques, l'étude de certains isotopes stables pourrait apporter des informations complémentaires intéressantes. Par exemple les mesure de $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des molécules d'eau permettent de déterminer l'origine et le mode d'alimentation des aquifères et l'origine de la salinisation. Les mesures de $\delta^{34}\text{S}$ et $\delta^{18}\text{O}$ du sulfate peuvent être utilisés pour avoir une idée de l'origine des sulfates (Chery, 2006) et mettre en évidence les réactions de sulfato-réduction. Cela pourrait notamment être intéressant pour déterminer l'origine des sulfates des puits P25, P46 et P5 qui montrent des concentrations plus élevées que dans le reste de la masse d'eau BR03. Les mesures de $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{18}\text{O}$ du nitrate et le $\delta^{15}\text{N}$ de l'ammonium peuvent être utilisées pour déterminer l'origine des composés azotés et mettre en évidence certaines réactions d'oxydoréduction qui font intervenir ces formes azotées (nitrification, dénitrification...). Ces mesures sont généralement couplées à des mesures de $\delta^{11}\text{B}$ du bore qui permet de mieux caractériser les sources de pollution. De telles mesures pourraient être intéressantes pour déterminer la ou les sources de nitrate présents dans les puits P23 et 325 (juste la dernière analyse est contaminée). Elles pourraient également être intéressantes pour essayer de comprendre l'origine de l'ammonium dans les masses d'eau. De manière concomitante, il serait intéressant d'analyser le $\delta^{13}\text{C}$ du carbone organique et du carbone inorganique qui sont également des réactifs et produits de nombreuses réactions d'oxydoréduction.

7. Conclusions

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. 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 captives du Socle et du Crétacé (BR01) et du Landénien (BR03) 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 5 masses d'eau de la Région de Bruxelles-Capitale 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. Ces données ont également été comparées aux concentrations qui sont effectivement retrouvées en Région de Bruxelles-Capitale. Pour ce faire, pour chaque masse d'eau de la Région de Bruxelles-Capitale, le minimum, le maximum ainsi que certains paramètres statistiques (la moyenne, la médiane, le P25, le P75 et le P90) ont été calculés pour l'ensemble du jeu de données. Aucun prétraitement n'a été réalisé pour vérifier la qualité des données (balance ionique, présence de pollution). L'objectif était seulement d'avoir une idée des concentrations en éléments majeurs et mineurs rencontrées à Bruxelles. Cette première analyse 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 répertorier les principaux processus géochimiques susceptibles d'affecter les masses d'eau souterraine de la Région de Bruxelles-Capitale. Les processus affectant l'eau depuis la pluie jusqu'à son transfert dans la zone

saturée ont été décrits ainsi que l'évolution que l'eau peut subir ensuite. Les principaux processus sont les apports atmosphériques, la modification des concentrations en O₂ et en CO₂ dans le sol, la précipitation et la dissolution de minéraux, les réactions redox, les processus de sorption/désorption et les échanges cationiques associés, les impacts anthropiques, les processus de drainance, l'intrusion d'eau salée ou le rafraîchissement, la dissolution d'évaporites.

Le rapport comprend ensuite une partie décrivant la méthodologie qui a été appliquée pour comprendre les processus géochimiques affectant la minéralisation et la méthodologie pour calculer les concentrations de référence. La méthodologie appliquée se base sur les recommandations des projets européens FP6 BRIDGE (Müller, 2006) et BaSeLiNe (Edmunds and Shand, 2008) qui se sont tous les deux penchés sur les manières de déterminer les concentrations de référence des eaux souterraines. L'ensemble des outils qui ont été utilisés dans ce travail ont également été décrits dans cette partie.

Les données d'environ une dizaine de stations d'échantillonnage sont disponibles pour chacune des masses d'eau souterraine BR03 et BR01. Des données supplémentaires provenant des masses d'eau souterraine voisines (en Région de Bruxelles-Capitale (BR02), 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. Pour les échantillons contaminés, ils ont été traités de deux manières différentes. Dans le premier cas, si l'ensemble des échantillons de la station d'échantillonnage est contaminé, alors ceux-ci sont conservés dans le calcul de la médiane et la station est considérée comme un marqueur de l'impact anthropique pour l'analyse des processus chimiques. Si lors de la suite de l'analyse, il est démontré que la pollution n'a pas d'impact significatif sur la minéralisation, la station de mesure pourra éventuellement être conservée pour le calcul des concentrations de référence. Dans le deuxième cas, si seulement 1 ou 2 échantillons de la station d'échantillonnage semblent contaminés, ceux-ci sont écartés du calcul de la médiane. La station est considérée comme a priori non contaminée. Elle est prise en compte dans l'analyse des processus chimiques et elle peut potentiellement être utilisée pour le calcul des concentrations de référence si les autres indicateurs de qualité sont assurés (balance ionique,...) et en fonction des conclusions de l'analyse des processus chimiques. Il faut aussi noter que des polluants organiques et des pesticides sont régulièrement détectés en petite quantité dans

pratiquement tous les puits des masses d'eau souterraine BR01 et BR03. Il est dès lors conseillé de parler de concentration de fond plutôt que de concentration de référence.

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 et des calculs de tendance ont été effectués pour le Cl, le Mn et le Fe. L'origine de salinité a été examinée au moyen des rapports Na/Cl, Br/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. La corrélation entre les éléments a été étudiée et une analyse multivariée a été réalisée.

Pour le Landénien, l'ensemble des analyses a permis de mettre en évidence 4 zones avec différents processus influençant la minéralisation. Il y a la zone de recharge actuelle, elle est située au Sud, au niveau des zones d'affleurement du Landénien. L'eau est bicarbonatée calcique, les conditions sont oxydantes et l'eau est impactée par l'activité humaine. Plus au Nord, il y a ensuite la zone de transition. L'eau semble plus ancienne, elle est toujours bicarbonatée calcique, les conditions sont suboxiques et l'eau ne semble pas (ou moins) contaminée. La troisième zone est située au Sud de la Région de Bruxelles-Capitale, à proximité d'un affleurement du Landénien. L'eau semble contaminée, les conditions sont oxiques à suboxiques. Il peut s'agir d'une eau de recharge plus récente ou de pollutions ponctuelles mais qui sont proches les unes des autres. La quatrième zone est située au Nord-Est de la de Bruxelles-Capitale. Il s'agit d'une eau marine résiduelle qui aurait subi un processus de rafraîchissement. Dans cette zone, les conditions sont aussi fortement réductrices.

Dans la masse d'eau du Socle et du Crétacé, 3 zones avec différents processus influençant la minéralisation ont été mis en évidence. La première zone est située au Sud. Elle correspond à la zone de recharge actuelle. L'eau est bicarbonatée calcique, les conditions varient entre oxiques et suboxiques. Il n'a pas été possible de distinguer deux zones distinctes comme pour le Landénien, parce que les variations sont très locales, les affleurements sont plus disséminés, la nappe est plus profonde et il n'y a pas partout une couverture argileuse imperméable, la nappe est donc localement libre et localement captive. La deuxième zone, ou la zone de transition, est située plus au Nord. Elle correspond à des eaux plus anciennes. Les conditions sont plus réductrices que dans la première zone et les conditions sont majoritairement suboxiques. La troisième zone est située au Nord-Est de la Région de

Bruxelles-Capitale. Il s'agit comme pour le Landénien, d'une eau marine résiduelle qui aurait subi un processus de rafraîchissement et les conditions sont anoxiques.

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. Pour la masse d'eau BR03, 9 stations d'échantillonnage ont été sélectionnées en Région de Bruxelles-Capitale, complétées par 9 stations d'échantillonnage supplémentaires situées en Région flamande. Pour la masse d'eau BR01, 7 stations d'échantillonnage ont été sélectionnées et 15 stations d'échantillonnage supplémentaires provenant de la Région flamande ont été ajoutées. Les principaux paramètres statistiques ont été calculés pour les éléments majeurs et mineurs de chaque masse d'eau (le P25, la moyenne, la médiane (P50), le P75 et le P90). Les concentrations de référence ont été déterminées pour les paramètres de la liste minimale de la directive fille (2006/118/CE), à savoir : l'arsenic le cadmium, le plomb, le mercure, l'ammonium, le chlorure, les sulfates, les nitrites, le phosphore total et la conductivité. A la liste minimale s'ajoutent les paramètres à 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, 2014). Les concentrations de référence du fer et du manganèse ont également été déterminées parce que ce sont des paramètres non à risque mais significativement présents dans les masses d'eau souterraines BR01 et BR03.

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. Quand le nombre d'échantillons était trop faible pour calculer le P90, la valeur de référence a été estimée par une gamme de valeur en donnant le minimum et le maximum des valeurs.

La plupart des stations d'échantillonnage des masses d'eau souterraines BR01 et BR03 semblent impactées par des contaminations anthropique il a donc été conseillé de parler de concentration de fond plutôt que de concentration de référence parce que 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 semblaient impacter la minéralisation de manière significative (ou les points pour lesquelles cela n'a pas pu être vérifié) ont été écartés. Les concentrations « de référence » qui ont été calculées sont donc a priori plutôt 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'identification des paramètres susceptibles d'être présents

naturellement dans les masses d'eau souterraine étudiées et l'estimation des concentrations de référence. Il est notamment recommandé d'analyser l'ensemble des éléments majeurs et mineurs à chaque fois, de suivre régulièrement les stations qui ont été identifiées comme contaminées, de refaire des analyses de tendance dans quelques années, avec plus de données. 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. Certaines données supplémentaires pourraient également être intéressantes pour comprendre les processus qui affectent la minéralisation des masses d'eau souterraine de la Région de Bruxelles-Capitale. Des mesures de datations, par exemple des mesures de ^{14}C et ^{36}Cl , pourraient à nouveau être réalisées mais avec des appareils de mesures adaptées à des concentrations naturelles. Des études sur les isotopes stables : $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des molécules d'eau, $\delta^{34}\text{S}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des sulfates, $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{18}\text{O}$ du nitrate, $\delta^{15}\text{N}$ de l'ammonium et $\delta^{11}\text{B}$ du bore pourraient également être effectuées. Ces données pourraient permettre de déterminer l'origine et le mode d'alimentation des aquifères, l'origine de la salinisation, l'origine des sulfates et l'origine des composés azotés. Enfin, des recommandations ont également été faites sur la base de données qui a été fournie par l'IBGE.

8. Bibliographie

- Alhoniemi E., Himberg J., Parhankangas J. and Vesanto J. 2000-2005. *SOM Toolbox*
- Appelo C A.J. and Postma D., 2005. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, second ed. Balkema, Rotterdam, pp 649.
- Battle-Aguilar J., Orban P., Dassargues A., Brouyère S. (2007) - Identification of groundwater quality trends in a chalk aquifer threatened by intensive agriculture in Belgium, *Hydrogeology Journal*, 15: 1615-1627.
- 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).
- 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 faitière 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
- Colle C., Adams C. & Bréchnignac F. 2002. Fiche radionucléide : CL36 et environnement. IRSN. 14 p.
- Edmunds W.M, Shand P. 2008. *Natural Groundwater Quality*. Blackwell Publishing, Ltd, 469p.
- Geyh M. A., D'Amore F., Darling G., Paces T., Pang Z. And Šila J. 2008. *Isotopes de l'environnement dans le cycle hydrologique, Volume IV*, Training course series no. 31, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IBGE : Division Police de l'Environnement & Sols. 2016. 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, Info fiches-sols, 26 P.

IRSN. 2016. *Carbone 14 et environnement*. URL : <http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/fiches-radionucleides/environnement/Pages/carbone-14-environnement.aspx#.WVyHbWjyjiU> (consulté le 05/07/2017).

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

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

Michelot J.-L. *L'utilisation du carbone 14 pour la datation*. Paris : carbone 14. La Société Française de Radioprotection. URL : <http://www.sfrp.asso.fr/medias/sfrp/documents/03-Michelot.pdf> (consulté le 04/09/2017).

Ministère de la 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.

Ministère de la 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.

Ministère de la 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.

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.

Phillips F.M. 2013. *Chlorine-36 dating of old groundwater Chapter 6*, in Isotope methods for dating old groundwater, International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA, Vienna, pp 125-152.

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

Projet Hydroland – Etude hydrogéologique de la masse d’eau souterraine du Landénien – Modèle géologique en 3D de l’aquifère du Landénien – Rapport final de la phase I de l’Institut Royal des Sciences naturelles de Belgique et d’Aqualé sprl Ecofox Développement réalisé en collaboration avec Bruxelles Environnement, 61 p

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

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)

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.

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.

Ultsh 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.

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

VMM. 2008. *Grondwater in Vlaanderen: het Brulandkrijtstelsel*. Vlaamse Milieumaatschappij. Aalst. 125 p.

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.

A. Annexes

A.1. Annexe : 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 quaternaire au-dessus des argiles paleogènes	14				BEVL021	BE_Escaut_RWE061
Dépôts alluviaux pléistocènes	15		NLWWS0002		BEVL022	BE_Escaut_RWE061
Sables oligocènes	16		NLWWS0005		BEVL023	
Sables centraux de Campine	17		NLWWS0003		BEVL031	
Dunes et zones de criques côtières	18		NLWWS0003		BEVL041	
Dunes et zones de criques des Polders de Flandre orientale	19		NLWWS0003		BEVL042	
Sables quaternaires et éocènes (saumâtres) de la côte	20		NLWWS0004		BEVL043	
Sables quaternaires et oligocènes (saumâtres) des Polders de la Flandre orientale	21		NLWWS0004		BEVL044	
Sables quaternaires et plio-miocènes (saumâtres) des Polders de l'Escaut	22		NLWWS0004		BEVL045	

Tableau A-1 : 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.2. Annexe: présence de polluants en Région de Bruxelles-Capitale

A.2.1. Landénien

Sur le graphe de la figure A-1, les types de polluants qui sont retrouvés dans chaque station de prélèvement de la masse d'eau souterraine du Landénien (BR03) sont représentés. La hauteur de l'histogramme est fonction du nombre de polluants quantifiés dans une station divisés par le nombre d'analyses. Ce graphe n'indique pas forcément si des polluants sont fréquemment retrouvés. Par exemple, pour le puits P47, une seule analyse est disponible mais plusieurs pesticides sont quantifiés, la hauteur de l'histogramme est donc élevée. Pour le puits 367, il n'y a pas de polluants qui sont quantifiés mais pour ce puits, une seule analyse a été réalisée et tous les polluants n'ont pas été analysés.

Ce graphe permet tout de même de montrer que la majorité des stations de prélèvement du Landénien en Région de Bruxelles-Capitale semble être impactée par des pollutions anthropiques. Des pesticides, des huiles minérales, des hydrocarbures aromatiques polycycliques, des hydrocarbures aromatiques monocycliques, des composés organo-halogénés, des additifs pour carburant et des cyanures sont parfois supérieurs aux limites de quantification dans les stations de prélèvement du Landénien. Cependant, les polluants sont généralement quantifiés de manière non récurrente et les normes sont rarement dépassées, à l'exception des stations de prélèvement P25 et P5 pour lesquelles du cyanure est régulièrement supérieur aux limites de quantification.

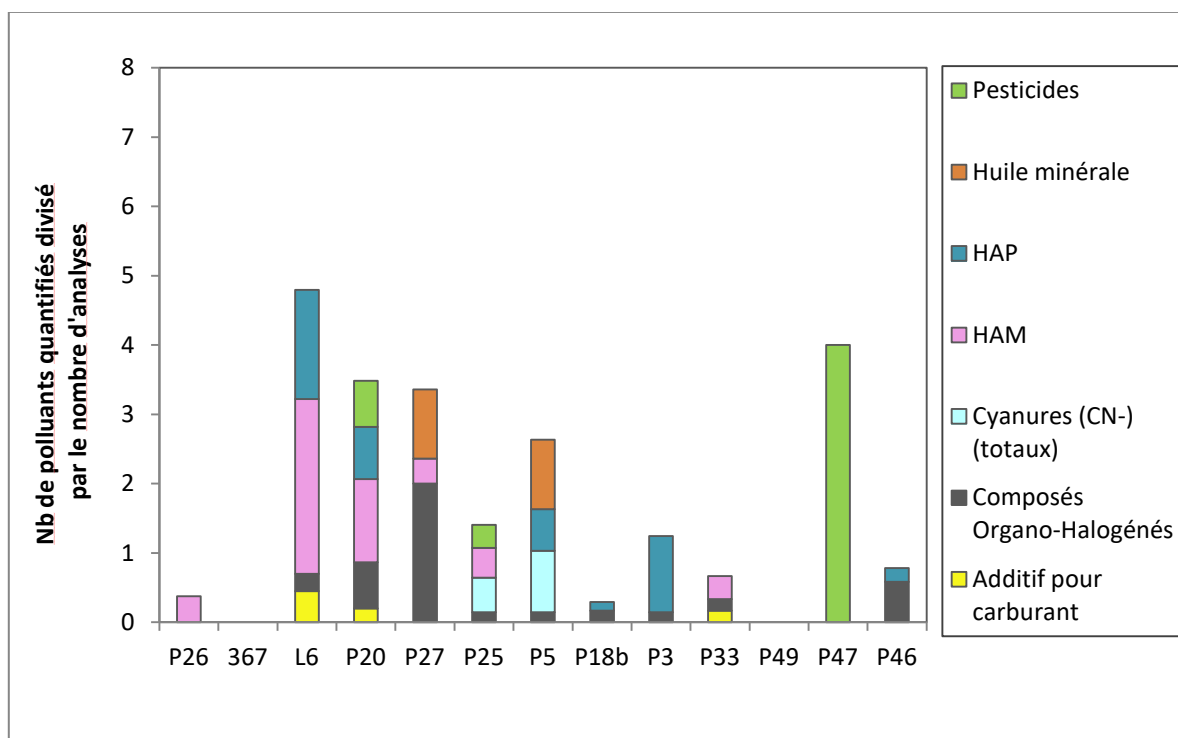


Figure A-1 : Types de polluants quantifiés par station de prélèvement pour la masse d'eau du Landénien BR03 (Nb : nombre ; HAP : hydrocarbure aromatique polycyclique ; HAM : hydrocarbures aromatique monocyclique)

A.2.2. Socle et Crétacé

Sur le graphe de la figure A-2, les types de polluants qui sont retrouvés dans chaque station de prélèvement des masses d'eau souterraine BR01 et BR02 sont représentés. La hauteur de l'histogramme est fonction du nombre de polluants quantifiés dans une station divisés par le nombre d'analyses. Ce graphe permet de montrer que la majorité des stations de prélèvement des masses d'eau BR01 et BR02 en Région de Bruxelles-Capitale semblent impactés par des pollutions anthropiques. Des pesticides, des hydrocarbures aromatiques polycycliques, des hydrocarbures aromatiques monocycliques, des composés organo-halogénés, des additifs pour carburant et des cyanures sont parfois supérieurs aux limites de quantification. Cependant, les polluants sont généralement quantifiés de manière non récurrente et les normes sont rarement dépassées, il y a juste les stations de prélèvement P2a et P23 qui semblent plus impactées que les autres. Le puits P23 a des concentrations importantes en nitrate, il est donc clairement contaminé. Pour le puits P2a, les polluants sont principalement quantifiés dans l'analyse de 2016 qui a une minéralisation très différente de l'analyse de 2008, l'analyse de 2016 a été écartée du jeu de données pour la suite des analyses.

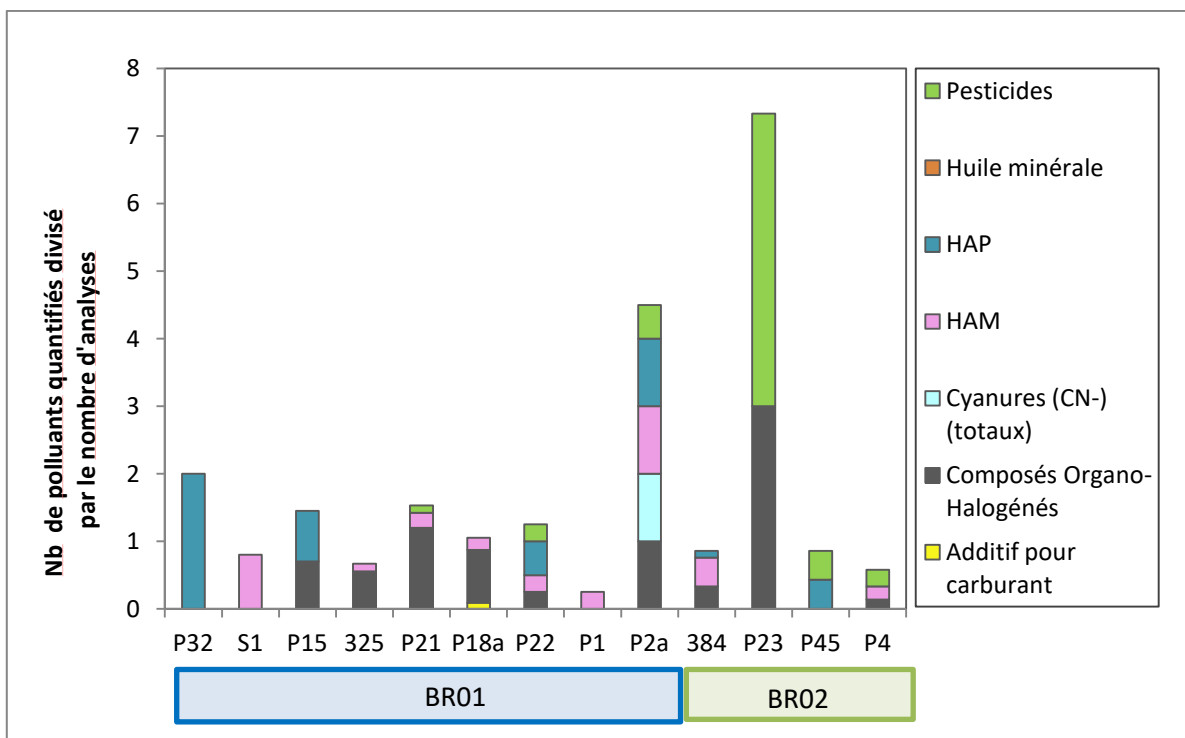


Figure A-2 : Types de polluants quantifiés par puits pour la masse d'eau souterraine du Socle et du Crétacé (BR01) et du Socle en zone d'alimentation (BR02) (Nb : nombre ; HAP : hydrocarbure aromatique polycyclique ; HAM : hydrocarbures aromatique monocyclique)

A. 3. Annexe : Variation du niveau piézométrique

A.3.1. Landénien

Il y a 8 stations utilisées pour le suivi du niveau piézométrique qui sont situées dans la masse d'eau souterraine BR03. Elles sont présentées à la figure A-3. Elles sont principalement situées dans la partie Ouest de la Région de Bruxelles-Capitale. Pour la station 392, il y a eu un suivi entre 1988 et 2007. Pour la station 367_Lavallée, il y a un suivi de 1997 à aujourd'hui et pour les 5 autres stations, il y a des mesures de 2005 à aujourd'hui. L'évolution de la piézométrie des 8 stations est présentée à la figure A-4. Pour la plupart des stations il y a une augmentation du niveau piézométrique, c'est principalement visible pour la station 367_Lavallée dont le niveau augmente d'une dizaine de mètres sur 20 ans. Pour le puits 392, il n'y a pas d'augmentation significative mais des variations saisonnières sont observés, le niveau est plus haut en hiver et plus bas en été.

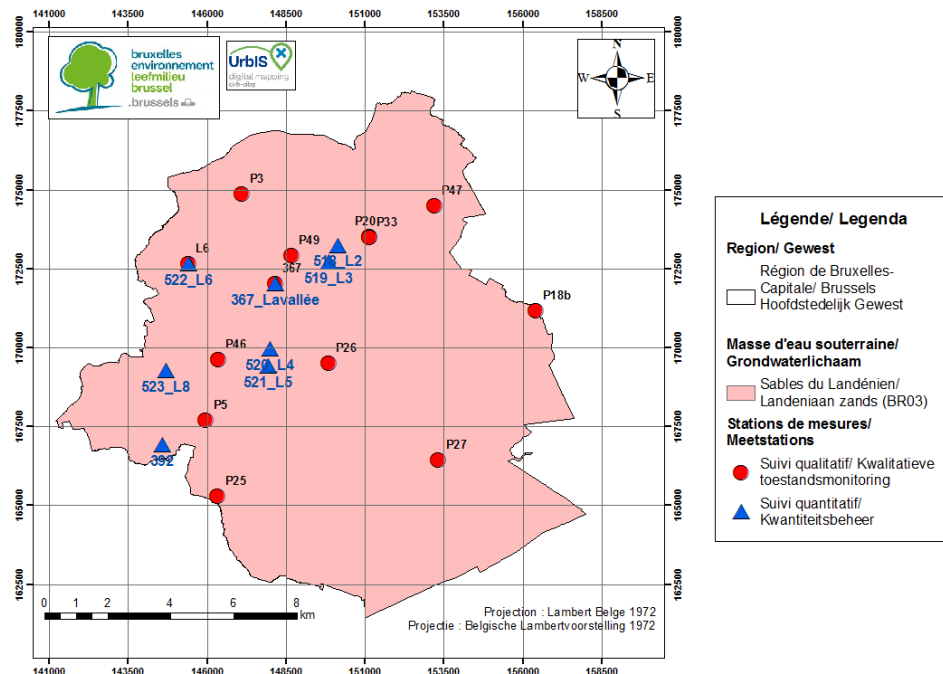


Figure A-3 : Localisation des stations de mesures quantitatives (niveau piézométrique) de la masse d'eau BR03

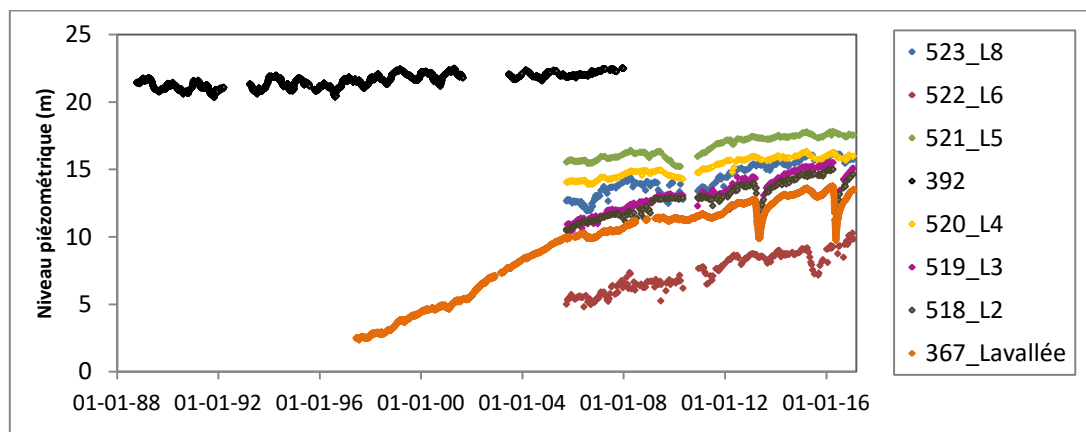


Figure A-4 : Evolution de la piézométrie dans la masse d'eau BR03

A.3.2. Socle et Crétacé

Les niveaux piézométriques de la masse d'eau souterraine BR01 sont mesurés de manière régulière à 5 stations. Celles-ci sont présentées à la figure A-5. Elles ne sont pas localisées de manière homogène, elles sont surtout localisées dans la partie centrale de la masse d'eau souterraine BR01 et il n'y a pas de stations à l'Ouest de la masse d'eau. L'évolution de la piézométrie à ces 5 stations est représentée à la figure A-6. Les plus anciennes données datent de 2002, d'autres puits de surveillance ont été mis en place en 2005 puis en 2010. Pour les puits 368, 324, 317 il est possible d'observer une remontée des niveaux piézométriques.

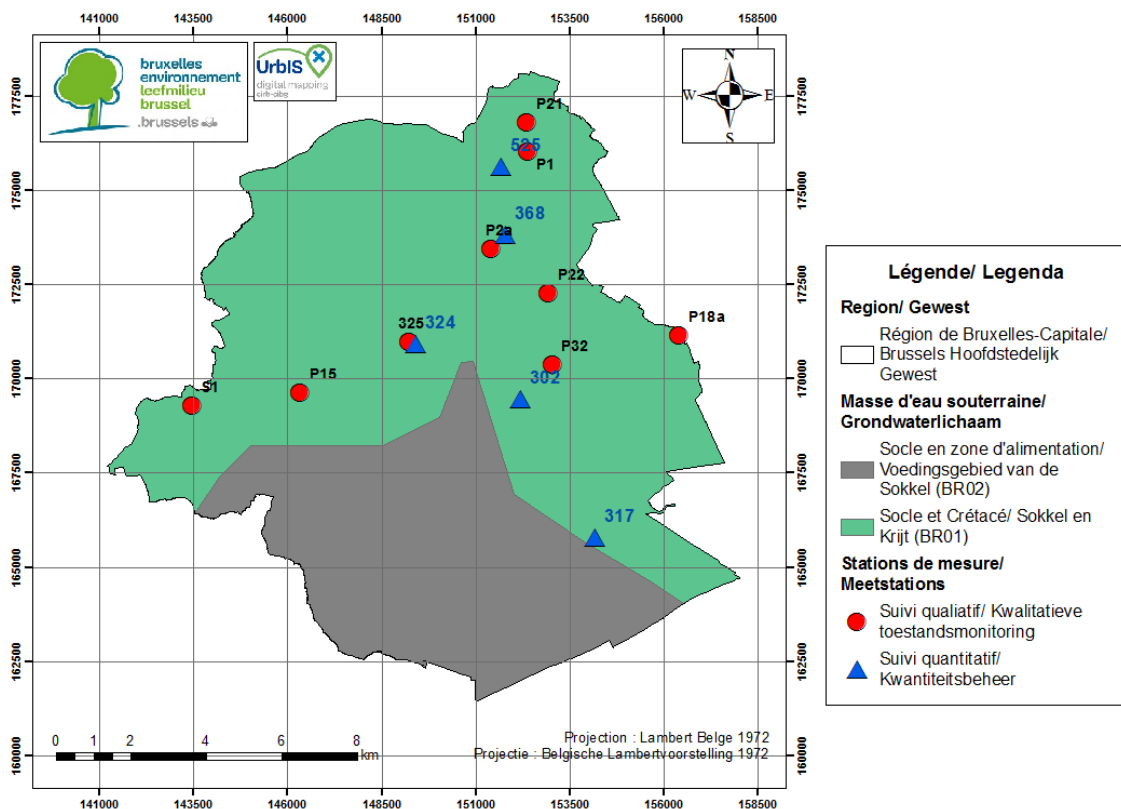


Figure A-5 : Localisation des stations de mesures quantitatives (niveau piézométrique) de la masse d'eau BR01

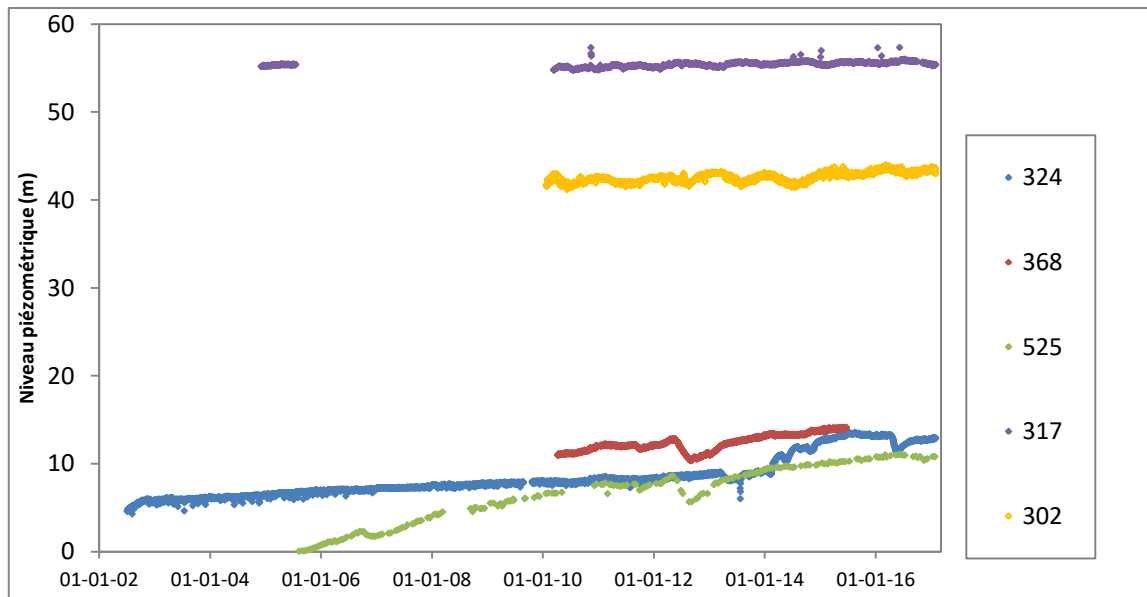


Figure A-6 : Evolution de la piézométrie dans la masse d'eau BR01

A.4. Méthodologie pour déterminer les concentrations de référence en Région wallonne et en Région flamande

A.4.1. Région wallonne

Les concentrations de référence ont été calculées en 2015 par la DGO3. Ces valeurs sont présentées dans le Document général : *Deuxièmes plans de gestion des bassins hydrographiques wallons* (SPW-DGO3-DEE, 2016). Les concentrations de référence sont calculées pour chaque combinaison masse d'eau + aquifère principal. Certaines masses d'eau ont été agrégées et pour certaines masses d'eau il y a plusieurs valeurs de concentration de référence dans le cas où plusieurs aquifères principaux sont considérés. Par exemple, pour la masse d'eau *RWE080 : Craie du Brabant*, il y a une valeur pour l'aquifère des *Craies captives du Brabant (Maastrichtien)* et une valeur pour l'aquifère des *Craies de Hesbaye*. Pour chaque combinaison masse d'eau + aquifère principal, les concentrations de référence sont calculées comme les percentiles 90 des concentrations moyennes des sites non influencés par une pollution ponctuelle. Les paramètres pour lesquels des concentrations de référence ont été calculées sont les suivants : Sr, Cl, SO₄, Fe, Mn, Cu, Zn, As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Sn, Se, NO₃, NO₂, NH₄, P, B, COT et l'oxydabilité. Les concentrations de référence n'ont pas été systématiquement calculées pour l'ensemble des paramètres pour chaque masse d'eau. C'est notamment le cas des masses d'eau où certains paramètres ne sont pas présents. Pour les métaux, il n'est pas précisé s'il s'agit de la fraction dissoute ou de la fraction totale.

A.4.2. Région flamande

Les concentrations de référence ont été mises à jour en 2016 par la VMM. Il est possible de consulter ces valeurs dans la 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 (VMM, 2016).

Les concentrations de référence sont déterminées sur base d'une approche statistique (percentiles 90) pour chaque masse d'eau souterraine. Les données proviennent des mesures de qualité sans influences anthropogéniques issues des réseaux de mesures du VMM entre 2004 et 2013. Les paramètres pour lesquels des concentrations de référence ont été calculées sont les suivants : pH, conductivité, Al, As, B, Ca, Cl, Cr, Cu, F, Fe, K, Mg, Mn, Na, NH₄, Ni, NO₂, Pb, PO₄, SO₄, Zn. Les concentrations de référence n'ont pas été systématiquement calculées pour l'ensemble des paramètres pour chaque masse d'eau. C'est notamment le cas des masses d'eau où certains paramètres ne sont pas présents. Pour les métaux, il s'agit de la fraction dissoute.