

Rapport rédigé par Aquale sprl
pour
l'Institut bruxellois pour la gestion de
l'environnement

RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE
LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU BRUXELLIEN

Rapport final (phase II)

R-2015-031

DECEMBRE 2015



TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	21
2	LE LOGICIEL FEFLOW	25
2.1	MOTIVATION RELATIVE AU CHOIX DU LOGICIEL	25
2.2	DESCRIPTION SUCCINCTE DU LOGICIEL	26
3	ELABORATION DU MODÈLE CONCEPTUEL	27
3.1	EXTENSION GÉOGRAPHIQUE DU MODÈLE	27
3.2	EXTENSION VERTICALE DU MODÈLE	30
3.3	CONCEPTUALISATION DE LA STRUCTURE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE	30
3.3.1	<i>Description de la géologie et de l'hydrogéologie de la zone modélisée</i>	31
3.3.1.1	Contexte géologique régional	31
3.3.1.2	Contexte hydrogéologique régional	39
3.3.1.2.1	Année de référence pour le régime permanent - 2013	39
3.3.1.2.2	Période de référence pour le régime transitoire – 2009-2013	47
3.3.1.3	Contexte bruxellois	67
3.3.2	<i>Conceptualisation de la géologie et de l'hydrogéologie</i>	68
3.3.2.1	Conceptualisation de la géologie – géométrie des couches	68
3.3.2.2	Conceptualisation de l'hydrogéologie – hypothèses simplificatrices sur le comportement de l'aquifère	69
3.4	CONDITIONS AUX FRONTIÈRES EXTERNES ET INTERNES	74
3.4.1	<i>Définition des limites externes</i>	74
3.4.1.1	Frontières latérales – Condition de Dirichlet, niveau d'eau imposé	74
3.4.1.2	Limite supérieure - Infiltration	75
3.4.1.3	Limite inférieure – Condition de Neumann, flux imposé	75
3.4.2	<i>Définition des limites internes</i>	75
3.4.2.1	Cours d'eau – Condition de Dirichlet, niveau d'eau imposé	76
3.4.2.2	Grands Collecteurs – Condition de Dirichlet, niveau d'eau imposé	76
3.4.2.3	Captages et galeries – Conditions « Multilayer Well » et de Dirichlet, niveau d'eau imposé	77
3.4.2.4	Sources – Condition de Dirichlet, niveau d'eau imposé	79
4	ELABORATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE SOUS FEFLOW®	80
4.1	ETAPE #1 – CRÉATION DE LA GÉOMÉTRIE DE BASE	80
4.2	ETAPE #2 - GÉNÉRATION DU MAILLAGE EN ÉLÉMENTS FINIS	82
4.3	ETAPE #3 - DÉFINITION DU TYPE DE PROBLÈME	85
4.4	ETAPE #4 - DÉFINITION DES CONDITIONS AUX LIMITES	86
4.4.1	<i>Définition des limites externes</i>	86
4.4.1.1	Frontières latérales – Condition de Dirichlet, niveau d'eau imposé	86
4.4.1.2	Limite supérieure - Infiltration	88
4.4.1.2.1	Evaluation de l'infiltration en régime permanent	89
4.4.1.2.1.1	Calcul de l'eau utile et variabilité spatiale des précipitations	89
4.4.1.2.1.2	Prise en considération de la géomorphologie	95
4.4.1.2.2	Evaluation de l'infiltration en régime transitoire	101
4.4.1.2.2.1	Etude du contexte climatique pour la période 2009 - 2013	101
4.4.1.2.2.2	Etude du contexte climatique à long terme	104
4.4.1.2.2.3	Etude du contexte climatique à très long terme	110
4.4.1.2.2.4	Conséquence pour le modèle	112
4.4.1.2.3	Composante additionnelle – Evaluation de l'apport en provenance des réseaux d'égouttage et de distribution	112
4.4.1.2.4	Remarque importante	115

4.4.1.3	Limite inférieure – Condition de Neumann, flux imposé	116
4.4.2	<i>Définition des limites internes</i>	116
4.4.2.1	Cours d'eau – Condition de Dirichlet, niveau d'eau imposé	116
4.4.2.2	Collecteurs – Condition de Dirichlet, niveau d'eau imposé	118
4.4.2.3	Captages et galeries – Conditions « Multilayer Well » et de Dirichlet, niveau d'eau imposé.....	119
4.4.2.3.1	Puits de captage.....	119
4.4.2.3.1.1	En régime permanent.....	119
4.4.2.3.1.2	En régime transitoire	128
4.4.2.3.2	Galerie Vivaqua.....	133
4.4.2.4	Sources – Condition de Dirichlet, niveau d'eau imposé	139
5	CALIBRATION DU MODÈLE.....	141
5.1	ETAPE #5 - DÉFINITION DES POINTS D'OBSERVATION.....	141
5.1.1	<i>Observation de la piézométrie</i>	142
5.1.1.1	En régime permanent.....	142
5.1.1.2	En régime transitoire	159
5.1.2	<i>Observation des débits</i>	159
5.1.2.1	Observation du débit aux sources	160
5.1.2.2	Observation du débit de la galerie.....	169
5.1.2.3	Observation du débit des rivières et ruisseaux.....	172
5.1.2.3.1	Contexte géologique des vallées en Région de Bruxelles-Capitale	174
5.1.2.3.2	En régime permanent	175
5.1.2.3.2.1	Bilan sur la Senne	175
5.1.2.3.2.2	Bilan sur la frontière Est – Argentine, Lasne, Dyle.....	180
5.1.2.3.2.3	Bilan sur le Hain	182
5.1.2.3.2.4	Bilan sur la Woluwe	183
5.1.2.3.2.5	Bilan sur la Voer.....	184
5.1.2.3.2.6	Bilan sur l'Ijse.....	184
5.1.2.3.2.7	Bilan sur les autres rivières et ruisseaux à l'intérieur du modèle	184
5.1.2.3.3	En régime transitoire	185
5.1.2.3.3.1	La Senne	186
5.1.2.3.3.2	La frontière Est – Argentine, Lasne, Dyle.....	187
5.1.2.3.3.3	Le Hain	188
5.1.2.3.3.4	La Woluwe.....	189
5.1.2.3.3.5	La Voer.....	195
5.1.2.3.3.6	L'Ijse.....	196
5.1.2.4	Observation du débit des collecteurs en Région de Bruxelles-Capitale	197
5.1.2.4.1	Introduction	197
5.1.2.4.2	Collecteur de la Woluwe	198
5.1.2.4.3	Collecteur Emissaire Uccle Sud	199
5.1.2.4.4	Collecteur industriel.....	201
5.1.2.4.5	Collecteur Maelbeek.....	203
5.1.2.4.6	Collecteur Emissaire rive droite	208
5.1.2.4.7	Synthèse concernant les collecteurs en Région de Bruxelles-Capitale	210
5.1.2.5	Synthèse des observations des débits	215
5.2	ETAPE #6 - DÉFINITION DES PARAMÈTRES D'ÉCOULEMENT	216
5.2.1	<i>Conductivité hydraulique</i>	218
5.2.2	<i>Porosité efficace</i>	220
5.2.3	<i>Coefficient d'emmagasinement</i>	220
5.3	ETAPE #7 – VISUALISATION DES RÉSULTATS.....	220
5.3.1	<i>Calibration en régime permanent – Période de mai-juin 2013</i>	220
5.3.2	<i>Calibration en régime permanent – Période de novembre 2013</i>	230
5.3.3	<i>Calibration et validation en régime transitoire – Période de 2009 à 2013</i>	237
5.4	ETAPE #8 – BILAN HYDROGÉOLOGIQUE.....	247
5.4.1	<i>Calibration en régime permanent – Période de mai – juin 2013</i>	247
5.4.1.1	Bilan global	247
5.4.1.2	Etat de Calibration	248
5.4.2	<i>Calibration en régime permanent – Période de novembre 2013</i>	253

5.4.2.1	Bilan global	253
5.4.2.2	Etat de calibration	253
5.4.3	<i>Calibration et validation en régime transitoire – Période de 2009 à 2013</i>	253
5.4.3.1	Tous les collecteurs	254
5.4.3.2	La Senne	255
5.4.3.3	L'Ijse.....	256
5.4.3.4	La Voer.....	257
5.4.3.5	La Woluwe en amont de Middlebourg	258
5.4.3.6	Le Rode en amont de Kloosterberg	259
5.4.3.7	La Galerie Vivaqua	260
5.5	CONCLUSION GÉNÉRALE SUR L'ÉTAT DE CALIBRATION DU MODÈLE HYDROGÉOLOGIQUE	260
6	ETUDE DE SENSIBILITÉ	263
6.1	INFILTRATION ET CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE.....	263
6.2	DÉBITS PRÉLEVÉS PAR POMPAGE.....	265
6.3	NIVEAUX D'EAU IMPOSÉS AU DROIT DES RIVIÈRES ET COLLECTEURS	270
6.4	POROSITÉ	277
6.5	COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT	286
6.6	CONCLUSION GÉNÉRALE DE L'ÉTUDE DE SENSIBILITÉ.....	295
7	SIMULATIONS ET RÉSULTATS DE L'ÉTUDE	298
7.1	INTRODUCTION	298
7.1.1	<i>Définition des scénarii</i>	298
7.1.2	<i>Estimation de l'infiltration de référence pour les différents scénarii</i>	299
7.1.2.1	Scénarii n°1 à 3 – Infiltration représentative d'une situation moyenne	299
7.1.2.2	Scénarii n°4 à 6 – Infiltration représentative d'une période de recharge faible.....	300
7.1.2.3	Scénarii n°7 à 9 – Infiltration représentative d'une période de recharge élevée	301
7.2	ESTIMATION DES RESSOURCES DISPONIBLES	301
7.2.1	<i>Généralités</i>	301
7.2.1.1	Législation Européenne	301
7.2.1.2	Législation bruxelloise	302
7.2.1.3	Démarche	303
7.2.2	<i>Etude à très long terme des niveaux d'eau mesurés dans les piézomètres de la Région de Bruxelles-Capitale</i>	303
7.2.3	<i>Simulations</i>	310
7.2.3.1	Scénarii n°1 à 3 – Régime permanent, infiltration représentative d'une situation moyenne	310
7.2.3.1.1	Scénario 1 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale identique à celui de 2013.....	310
7.2.3.1.2	Scénario 2 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 50 % par rapport à celui de 2013.....	314
7.2.3.1.3	Scénario 3 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 100 % par rapport à celui de 2013.....	318
7.2.3.1.4	Remarque sur la sensibilité.....	322
7.2.3.2	Scénarii n°4 à 6 – Régime transitoire, infiltration représentative d'une période de 5 années de recharge faible.....	322
7.2.3.2.1	Scénario 4 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale identique à celui de 2013.....	322
7.2.3.2.2	Scénario 5 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 50 % par rapport à celui de 2013.....	326
7.2.3.2.3	Scénario 6 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 100 % par rapport à celui de 2013.....	330
7.2.3.3	Scénarii n°7 à 9 – Régime transitoire, infiltration représentative d'une période de 5 années de recharge élevée.....	336
7.2.3.3.1	Scénario 7 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale identique à celui de 2013.....	336
7.2.3.3.2	Scénario 8 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 50 % par rapport à celui de 2013.....	340
7.2.3.3.3	Scénario 9 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 100 % par rapport à celui de 2013.....	344
7.2.4	<i>Synthèse</i>	349
7.3	QUANTIFICATION DES ÉCHANGES AVEC LA RÉGION FLAMANDE	351

7.3.1	<i>Simulations</i>	351
7.3.1.1	Scénarii n°1 à 3 – Régime permanent, infiltration représentative d’une situation moyenne	351
7.3.1.1.1	Scénario 1 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale identique à celui de 2013.....	351
7.3.1.1.2	Scénario 2 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 50 % par rapport à celui de 2013.....	354
7.3.1.1.3	Scénario 3 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 100 % par rapport à celui de 2013.....	356
7.3.1.1.4	Remarque sur les scénarii	358
7.3.1.2	Scénarii n°4 à 6 – Régime transitoire, infiltration représentative d’une période de 5 années de recharge faible.....	358
7.3.1.3	Scénarii n°7 à 9 – Régime transitoire, infiltration représentative d’une période de 5 années de recharge élevée.....	361
7.3.2	<i>Synthèse</i>	364
7.4	INTERACTIONS AVEC LES EAUX DE SURFACE DE LA WOLUWE.....	364
7.4.1	<i>Etude de l’évolution des débits mesurés de la Woluwe</i>	364
7.4.2	<i>Simulations</i>	373
7.4.2.1	Scénarii n°1 à 3 – Régime permanent, infiltration représentative d’une situation moyenne	373
7.4.2.1.1	Scénario 1 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale identique à celui de 2013.....	373
7.4.2.1.2	Scénario 2 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 50 % par rapport à celui de 2013.....	376
7.4.2.1.3	Scénario 3 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 100 % par rapport à celui de 2013.....	378
7.4.2.1.4	Remarque sur les scénarii	380
7.4.2.2	Scénarii n°4 à 6 – Régime transitoire, infiltration représentative d’une période de 5 années de recharge faible.....	380
7.4.2.3	Scénarii n°7 à 9 – Régime transitoire, infiltration représentative d’une période de 5 années de recharge élevée.....	383
7.4.3	<i>Synthèse</i>	385
8	CONCLUSIONS, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS	386

FIGURES – TABLEAUX - ANNEXES

FIGURES

Figure 1-1 : Les différentes étapes dans le développement d'un modèle numérique des écoulements et du transport	23
Figure 3-1 : Etendue géographique de la zone d'étude	28
Figure 3-2 : Carte géologique de la zone modélisée (Source : les planches évoquées dans le texte ci-dessus) ...	35
Figure 3-3 : Coupes géologiques de la planche 31-39 (Bruxelles-Nivelles)	36
Figure 3-4 : Tracés des coupes géologiques schématiques A-A' et B-B'	37
Figure 3-5 : Coupe géologique schématique A-A' (le niveau piézométrique représenté par la ligne pointillée bleue est le résultat de l'interpolation des niveaux d'eau piézométriques de la <i>nappe du Bruxellien</i> pour la campagne de mai et juin 2013, les abréviations utilisées pour les formations sont reprises dans la carte géologique officielle, voir légende de la figure 3-2)	38
Figure 3-6 : Coupe géologique schématique B-B' (le niveau piézométrique représenté par la ligne pointillée bleue est le résultat de l'interpolation des niveaux d'eau piézométriques de la <i>nappe du Bruxellien</i> pour la campagne de mai et juin 2013, les abréviations utilisées pour les formations sont reprises dans la carte géologique officielle, voir légende de la figure 3-2)	38
Figure 3-7 : Carte piézométrique des formations de Sint-Huilbrechts-Hern, de Diest ainsi que des dépôts du Quaternaire, campagne de mai et juin 2013 (contexte d'intermédiaires eaux)	40
Figure 3-8 : Carte piézométrique des formations de Sint-Huilbrechts-Hern, de Diest ainsi que des dépôts du Quaternaire, campagne de novembre 2013 (contexte d'intermédiaires eaux)	41
Figure 3-9 : Carte piézométrique de l'aquifère des sables du Bruxellien, campagne de mai et juin 2013 (contexte d'intermédiaires eaux)	42
Figure 3-10 : Carte piézométrique de l'aquifère des sables du Bruxellien, campagne de novembre 2013 (contexte d'intermédiaires eaux)	43
Figure 3-11 : Carte des isodifférences entre la piézométrie des formations de Sint-Huilbrechts-Hern, de Diest ainsi que des dépôts du Quaternaire et la piézométrie de l'aquifère des sables du Bruxellien, campagne de mai et juin 2013	45
Figure 3-12 : Carte des isodifférences entre la piézométrie des formations de Sint-Huilbrechts-Hern, de Diest ainsi que des dépôts du Quaternaire et la piézométrie de l'aquifère des sables du Bruxellien, campagne de novembre 2013	46
Figure 3-13 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 0 et 10 m)	49
Figure 3-14 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 10 et 20 m)	50

Figure 3-15 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 20 et 30 m)	51
Figure 3-16 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 30 et 40 m)	52
Figure 3-17 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 40 et 50 m)	53
Figure 3-18 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 50 et 60 m)	54
Figure 3-19 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 60 et 70 m)	55
Figure 3-20 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 70 et 80 m)	56
Figure 3-21 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 80 et 90 m)	57
Figure 3-22 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 90 et 100 m)	58
Figure 3-23 : Localisation des piézomètres pour lesquels un suivi piézométrique est réalisé entre 2009 et 2013 (ceux-ci sont repris aux figures 3-13 à 3-22)	59
Figure 3-24 : Identification des différents types de variation piézométrique entre 2009 et 2013 au sein de la zone modélisée.....	66
Figure 3-25 : Différents types de variation piézométrique entre 2009 et 2013 au sein de la zone modélisée et profondeur piézométrique en mai 2013.....	71
Figure 3-26 : Zonage par comportement piézométrique (période 2009 – 2013)	73
Figure 3-27 : Reproduction d'une section de la galerie Vivaqua	78
Figure 3-28 : Zoom sur la base de la reproduction de la galerie Vivaqua	78
Figure 4-1 : Etape #1 – création de la géométrie de base du modèle numérique (Supermesh)	81
Figure 4-2 : Etape #2 – génération du maillage en éléments finis	83
Figure 4-3 : Etape #2 – zoom sur le maillage en éléments.....	84
Figure 4-4 : Modèle numérique de terrain généré après maillage	85
Figure 4-5 : Potentiels imposés le long des frontières extérieures (Vue vers le Nord).....	87
Figure 4-6 : Potentiels imposés le long des frontières extérieures (Vue vers le Sud).....	88
Figure 4-7 : Précipitations annuelles moyennes sur la période 1999 – 2010 en Région de Bruxelles-Capitale (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement).....	90

Figure 4-8 : Précipitations hivernales moyennes sur la période 1999 – 2010 en Région de Bruxelles-Capitale (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement).....	91
Figure 4-9 : Précipitations printanières moyennes sur la période 1999 – 2010 en Région de Bruxelles-Capitale (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement).....	92
Figure 4-10 : Précipitations estivales moyennes sur la période 1999 – 2010 en Région de Bruxelles-Capitale (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement).....	93
Figure 4-11 : Précipitations automnales moyennes sur la période 1999 – 2010 en Région de Bruxelles-Capitale (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement).....	94
Figure 4-12 : Zonage de l’infiltration.....	97
Figure 4-13 : Infiltration annuelle (d’après Meyus et al. (2004))	98
Figure 4-14 : Zonage de l’infiltration au sein de la zone modélisée (d’après Meyus et al. (2004))	100
Figure 4-15 : Evolution de la pluviométrie et de l’eau utile mensuelle à la station IRM d’Uccle entre 2009 et 2013	101
Figure 4-16 : Evolution de l’eau utile cumulée de décembre à mars pour les années 1991 à 2013 (la valeur indiquée est calculée en prenant la somme des valeurs mensuelles calculées entre le mois de décembre de l’année précédente et le mois de mars de l’année en cours)	106
Figure 4-17 : Impact de l’eau utile à très long terme sur le piézomètre Ferme Fond Roy.....	107
Figure 4-18 : Impact de l’eau utile à très long terme sur les piézomètres Régent et Pz20.....	108
Figure 4-19 : Impact de l’eau utile à très long terme sur les piézomètres Erasmus et Van Mullem.....	109
Figure 4-20 : Précipitations hivernales (les trois mois consécutifs de décembre à février) à Uccle sur la période 1901 – 2014 (en mm). L’année reprise sur le graphique est celle de la fin de la période des trois mois consécutifs. Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (202.8 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement)	110
Figure 4-21 : Précipitations printanières (mars – mai) à Uccle sur la période 1901 – 2014 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (178.5 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période (droite quasi horizontale, dans ce cas) (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement).....	110
Figure 4-22 : Précipitations estivales (juin – août) à Uccle sur la période 1901 – 2013 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (220.5 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement).....	111
Figure 4-23 : Précipitations automnales (septembre – novembre) à Uccle sur la période 1901 – 2013 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (210.7 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période (droite quasi horizontale, dans ce cas) (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement)	111
Figure 4-24 : Périmètre concerné par les stations d’épuration Sud et Nord de la Région de Bruxelles-Capitale (Source : AQUIRIS).....	113

Figure 4-25 : Infiltration imposée au modèle hydrogéologique en régime permanent	115
Figure 4-26 : Potentiels imposés sur les ruisseaux / rivières à l'intérieur de la zone modélisée	117
Figure 4-27 : Potentiels imposés sur les collecteurs majeurs à l'intérieur de la zone modélisée	119
Figure 4-28 : Débits de pompage imposés dans la <i>nappe superficielle</i> en régime permanent.....	121
Figure 4-29 : Débits de pompage imposés dans la <i>nappe du Bruxellien</i> en régime permanent	125
Figure 4-30 : Débits de pompage imposés dans la <i>nappe de l'Yprésien</i> en régime permanent	127
Figure 4-31 : Galerie Vivaqua et puits témoins	135
Figure 4-32 : Coupe de la galerie Vivaqua et de ses puits témoins (Ville de Bruxelles, Service des Eaux, 1915) 136	
Figure 4-33 : Evolution du niveau d'eau absolu dans les puits témoins de la galerie captante Vivaqua (Source : VIVAQUA)	137
Figure 4-34 : Galerie Vivaqua dans le modèle numérique	138
Figure 4-35 : Sources de la <i>nappe du Bruxellien</i> dans le modèle numérique	140
Figure 5-1 : Points d'observation dans la <i>nappe superficielle</i> pour la période de mai – juin 2013.....	144
Figure 5-2 : Points d'observation dans la <i>nappe superficielle</i> pour la période de novembre 2013	145
Figure 5-3 : Points d'observation dans la <i>nappe du Bruxellien</i> pour la période de mai – juin 2013	149
Figure 5-4 : Points d'observation dans la <i>nappe du Bruxellien</i> pour la période de novembre 2013	150
Figure 5-5 : Points d'observation dans la <i>nappe de l'Yprésien</i> pour la période de mai – juin 2013.....	152
Figure 5-6 : Points d'observation dans la <i>nappe de l'Yprésien</i> pour la période de novembre 2013.....	153
Figure 5-7 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> en Région de Bruxelles-Capitale au sein de quelques ouvrages équipés d'une sonde de mesure automatique	154
Figure 5-8 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> en Région de Bruxelles-Capitale au sein des piézomètres Erasmus et I-089 (plage de piézométrie de 30 à 40 m).....	155
Figure 5-9 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> en Région de Bruxelles-Capitale au sein des piézomètres Régent et Pz20 (plage de piézométrie de 43 à 53 m)	156
Figure 5-10 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> en Région de Bruxelles-Capitale au sein des piézomètres Voets, Ferme Fond Roy et Bonne-Odeur (plage de piézométrie de 66 à 76 m)	157
Figure 5-11 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Bruxellien</i> en Région de Bruxelles-Capitale au sein des piézomètres Soignes-T19 et Bonniers (plage de piézométrie de 80 à 90 m).....	158
Figure 5-12 : Source du Sylvain – photo 1 (7 février 2013)	162
Figure 5-13 : Source du Sylvain – photo 2 (7 février 2013)	162

Figure 5-14 : Source de l'Empereur (25 octobre 2012).....	163
Figure 5-15 : Source Trois Fontaines (7 février 2013)	167
Figure 5-16 : Evolution du débit moyen mensuel exhauré par la galerie Vivaqua entre 2009 et 2013 (m ³ /j) ...	172
Figure 5-17 : Stations de jaugeage prises en considération pour la réalisation des bilans hydrographiques	173
Figure 5-18 : Coupe géologique des dépôts du Quaternaire en vallée de la Senne (ULB, 2013).....	175
Figure 5-19 : Représentation schématique des apports et retraits d'eau pour la Senne en Région de Bruxelles-Capitale et aux alentours	176
Figure 5-20 : Evolution de l'augmentation moyenne mensuelle du débit de la Senne entre l'entrée et la sortie de la Région de Bruxelles-Capitale (en m ³ /j).....	186
Figure 5-21 : Evolution de l'augmentation moyenne mensuelle du débit de la Dyle entre Sint-Joris-Weert et Wilsele (en m ³ /j)	187
Figure 5-22 : Evolution de l'augmentation moyenne mensuelle du débit du Hain entre Braine-l'Alleud et Braine-le-Château (en m ³ /j).....	188
Figure 5-23 : Tronçons de Woluwe étudiés pour le régime transitoire	190
Figure 5-24 : Débit moyen mensuel de la Woluwe à la station de Middlebourg (m ³ /j)	191
Figure 5-25 : Débit moyen mensuel du Rode à la station de Kloosterberg (m ³ /j)	192
Figure 5-26 : Augmentation du débit de la Woluwe entre la station de Gobert et les stations amont (Middlebourg et Kloosterberg) (m ³ /j)	193
Figure 5-27 : Augmentation du débit de la Woluwe entre la station Sortie Région et la station de Gobert (m ³ /j)	194
Figure 5-28 : Débit moyen mensuel de la Voer à Heverlee (en m ³ /j)	195
Figure 5-29 : Débit moyen mensuel de l'Ijse à Huldenberg (en m ³ /j)	196
Figure 5-30 : Collecteurs pris en considération.....	197
Figure 5-31 : Collecteur de la Woluwe	198
Figure 5-32 : Collecteur Emissaire Uccle Sud	200
Figure 5-33 : Collecteur industriel.....	202
Figure 5-34 : Collecteur Maelbeek	205
Figure 5-35 : Collecteur Emissaire rive droite	209
Figure 5-36 : Débits drainés par les collecteurs en Région de Bruxelles-Capitale	211
Figure 5-37 : Débits drainés par les collecteurs en rive droite de la Senne en Région de Bruxelles-Capitale	212

Figure 5-38 : Subdivision en zones de propriétés équivalentes au sein de la Layer 3	218
Figure 5-39 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe superficielle</i> pour la période de mai – juin 2013	222
Figure 5-40 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe du Bruxellien</i> pour la période de mai – juin 2013	226
Figure 5-41 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe de l'Yprésien</i> pour la période de mai – juin 2013	228
Figure 5-42 : Diagramme de dispersion (scatterplot) de l'ensemble des points d'observation pour la période de mai – juin 2013.....	229
Figure 5-43 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe superficielle</i> pour la période de novembre 2013.....	232
Figure 5-44 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe du Bruxellien</i> pour la période de novembre 2013.....	234
Figure 5-45 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe de l'Yprésien</i> pour la période de novembre 2013.....	235
Figure 5-46 : Diagramme de dispersion (scatterplot) de l'ensemble des points d'observation pour la période de novembre 2013.....	236
Figure 5-47 : Piézométrie mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 0 à 20 m	239
Figure 5-48 : Piézométrie mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 20 à 40 m	240
Figure 5-49 : Piézométrie mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 40 à 60 m	241
Figure 5-50 : Piézométrie mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 60 à 80 m	242
Figure 5-51 : Piézométrie mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 80 à 100 m	243
Figure 5-52 : Qualité de la calibration en régime transitoire	246
Figure 5-53 : Bilan global en m ³ /j en régime permanent pour la période de mai – juin 2013.....	247
Figure 5-54 : Diagramme de dispersion (scatterplot) de l'ensemble des débits sortants pour la période de mai – juin 2013	250
Figure 5-55 : Diagramme de dispersion (scatterplot) des débits sortants en Région de Bruxelles-Capitale pour la période de mai – juin 2013	252
Figure 5-56 : Evolution du débit de drainage par les collecteurs en Région de Bruxelles-Capitale simulé en régime transitoire.....	254

Figure 5-57 : Evolution du débit de drainage par la Senne en Région de Bruxelles-Capitale simulé en régime transitoire.....	255
Figure 5-58 : Evolution du débit de drainage par l'Ijse en amont d'Huldenberg simulé en régime transitoire..	256
Figure 5-59 : Evolution du débit de drainage par la Voer en amont d'Heverlee simulé en régime transitoire ..	257
Figure 5-60 : Evolution du débit de drainage par la Woluwe en amont de Middlebourg simulé en régime transitoire.....	258
Figure 5-61 : Evolution du débit de drainage par le Rode en amont de Kloosterberg simulé en régime transitoire	259
Figure 5-62 : Evolution du débit de la Galerie vivaqua simulé en régime transitoire	260
Figure 6-1 : Graphique de l'étude de sensibilité sur l'infiltration et la conductivité hydraulique	264
Figure 6-2 : Augmentation du niveau d'eau simulé lorsque le débit prélevé par pompage est de 30 % du débit imposé dans le cadre de la calibration en régime permanent.....	266
Figure 6-3 : Augmentation du niveau d'eau simulé lorsque le débit prélevé par pompage est de 60 % du débit imposé dans le cadre de la calibration en régime permanent.....	267
Figure 6-4 : Diminution du niveau d'eau simulé lorsque le débit prélevé par pompage est de 200 % du débit imposé dans le cadre de la calibration en régime permanent.....	268
Figure 6-5 : Diminution du niveau d'eau simulé lorsque le débit prélevé par pompage est de 300 % du débit imposé dans le cadre de la calibration en régime permanent.....	269
Figure 6-6 : Diminution du niveau d'eau simulé lorsque les niveaux d'eau imposés sont diminués de 2 m sur l'ensemble des rivières et collecteurs dans le cadre de la calibration en régime permanent.....	272
Figure 6-7 : Diminution du niveau d'eau simulé lorsque les niveaux d'eau imposés sont diminués de 1 m sur l'ensemble des rivières et collecteurs dans le cadre de la calibration en régime permanent.....	273
Figure 6-8 : Augmentation du niveau d'eau simulé lorsque les niveaux d'eau imposés sont augmentés de 1 m sur l'ensemble des rivières et collecteurs dans le cadre de la calibration en régime permanent.....	274
Figure 6-9 : Augmentation du niveau d'eau simulé lorsque les niveaux d'eau imposés sont augmentés de 2 m sur l'ensemble des rivières et collecteurs dans le cadre de la calibration en régime permanent.....	275
Figure 6-10 : Diminution du niveau d'eau simulé lorsque les niveaux d'eau imposés sont diminués de 2 m sur l'ensemble des collecteurs dans le cadre de la calibration en régime permanent.....	276
Figure 6-11 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage Pz20 pour différentes valeurs de porosité.....	278
Figure 6-12 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage VI-037 pour différentes valeurs de porosité.....	279
Figure 6-13 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage 2-0419b pour différentes valeurs de porosité.....	280
Figure 6-14 : Variation du débit drainé par les collecteurs pour différentes valeurs de porosité	282

Figure 6-15 : Variation du débit drainé par le tronçon de la Woluwe en amont de la station de Middlebourg pour différentes valeurs de porosité	283
Figure 6-16 : Variation du débit drainé par le tronçon du Rode en amont de la station de Kloosterberg pour différentes valeurs de porosité	284
Figure 6-17 : Variation du débit drainé par la galerie Vivaqua pour différentes valeurs de porosité	285
Figure 6-18 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage Pz20 pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement	287
Figure 6-19 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage VI-037 pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement	288
Figure 6-20 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage 2-0419b pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement	289
Figure 6-21 : Variation du débit drainé par les collecteurs pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement	291
Figure 6-22 : Variation du débit drainé par le tronçon de la Woluwe en amont de la station de Middlebourg pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement	292
Figure 6-23 : Variation du débit drainé par le tronçon du Rode en amont de la station de Kloosterberg pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement	293
Figure 6-24 : Variation du débit drainé par la galerie Vivaqua pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement	294
Figure 6-25 : Détermination des simulations à réaliser pour l'évaluation de l'incertitude sur les résultats	297
Figure 7-1 : Scénarii réalisés dans le cadre de la présente étude	299
Figure 7-2 : Evolution de la piézométrie mesurée automatiquement à très long terme (1988 – 2014)	304
Figure 7-3 : Evolution de la piézométrie mesurée manuellement à très long terme (2002 – 2014)	306
Figure 7-4 : Evolution de la piézométrie à très long terme en Région de Bruxelles-Capitale	308
Figure 7-5 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°1	311
Figure 7-6 : Augmentation du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence de l'année 2013 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°1	312
Figure 7-7 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°2	315
Figure 7-8 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°2	316
Figure 7-9 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°3	319
Figure 7-10 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°3	320

Figure 7-11 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°4	323
Figure 7-12 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°4	324
Figure 7-13 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°5	327
Figure 7-14 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°5	328
Figure 7-15 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°4 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°5	329
Figure 7-16 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°6	332
Figure 7-17 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°6	333
Figure 7-18 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°4 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°6	334
Figure 7-19 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°7	337
Figure 7-20 : Augmentation du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°7	338
Figure 7-21 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°8	341
Figure 7-22 : Augmentation du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°8	342
Figure 7-23 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°7 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°8	343
Figure 7-24 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°9	346
Figure 7-25 : Augmentation du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°9	347
Figure 7-26 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°7 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°9	348
Figure 7-27 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Bruxellien selon le scénario n°1.....	353
Figure 7-28 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Bruxellien selon le scénario n°2.....	355
Figure 7-29 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Bruxellien selon le scénario n°3.....	357
Figure 7-30 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Bruxellien selon le scénario n°4.....	360

Figure 7-31 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Bruxellien selon le scénario n°7.....	363
Figure 7-32 : Vallée de la Woluwe	366
Figure 7-33 : Evolution du débit mesuré de la Woluwe à la station de Middlebourg	367
Figure 7-34 : Evolution du débit mesuré du Rode à la station de Kloosterberg	368
Figure 7-35 : Evolution du débit mesuré de la Woluwe à la station de Gobert	369
Figure 7-36 : Evolution du débit mesuré de la Woluwe à la sortie de la Région	370
Figure 7-37 : Evolution du débit mesuré de la Woluwe aux différentes stations	372
Figure 7-38 : Lignes de flux en direction des tronçons amont de la Woluwe selon le scénario n°1	375
Figure 7-39 : Lignes de flux en direction des tronçons amont de la Woluwe selon le scénario n°2	377
Figure 7-40 : Lignes de flux en direction des tronçons amont de la Woluwe selon le scénario n°3	379
Figure 7-41 : Lignes de flux en direction des tronçons amont de la Woluwe selon le scénario n°4	382
Figure 7-42 : Lignes de flux en direction des tronçons amont de la Woluwe selon le scénario n°7	384

TABLEAUX

Tableau 3-1 : Entités hydrogéologiques en Région de Bruxelles-Capitale	31
Tableau 3-2 : Comportement de la nappe du Bruxellien au droit des différents piézomètres entre 2009 et 2013	64
Tableau 4-1 : Eau utile calculée aux stations pluviométriques pour l'année 2013	95
Tableau 4-2 : Evolution de l'eau utile annuelle entre 1990 et 2013 (mm) (Source des données pluviométriques : IRM).....	105
Tableau 4-3 : Débits de pompage imposés dans la <i>nappe superficielle</i> en régime permanent.....	120
Tableau 4-4 : Débits de pompage imposés dans la <i>nappe du Bruxellien</i> en régime permanent	124
Tableau 4-5 : Débits de pompage imposés dans la <i>nappe de l'Yprésien</i> en régime permanent.....	126
Tableau 4-6 : Débits de pompage imposés dans la <i>nappe superficielle</i> en régime transitoire	128
Tableau 4-7 : Débits de pompage imposés dans la <i>nappe du Bruxellien</i> en régime transitoire	132
Tableau 4-8 : Débits de pompage imposés dans la <i>nappe de l'Yprésien</i> en régime transitoire.....	133
Tableau 4-9 : Sources prises en considération dans le modèle numérique	139
Tableau 5-1 : Points d'observation dans la <i>nappe superficielle</i>	143
Tableau 5-2 : Points d'observation dans la <i>nappe du Bruxellien</i>	148
Tableau 5-3 : Points d'observation dans la <i>nappe de l'Yprésien</i>	151
Tableau 5-4 : Débits des sources.....	169
Tableau 5-5 : Evolution du débit exhauré par la galerie Vivaqua entre 2009 et 2013	171
Tableau 5-6 : Mesures de débit dans la Senne, dans ses apports et ses retraits pour l'année 2013	177
Tableau 5-7 : Mesures de débit dans la Senne, dans ses apports et ses retraits pour le mois d'avril 2007	179
Tableau 5-8 : Mesures de débit le long de la frontière Est, dans ses apports et ses retraits.....	181
Tableau 5-9 : Mesures de débit le long du Hain, dans ses apports et ses retraits	183
Tableau 5-10 : Mesures de débit le long de la Woluwe, dans ses apports et ses retraits	184
Tableau 5-11 : Observations du débit parasite sur le collecteur de la Woluwe	199
Tableau 5-12 : Observations du débit parasite sur le collecteur Emissaire Uccle Sud	201
Tableau 5-13 : Observations du débit parasite sur le collecteur industriel	203
Tableau 5-14 : Observations du débit parasite sur le collecteur Maelbeek.....	207

Tableau 5-15 : Observations du débit parasite sur le collecteur Emissaire rive droite.....	210
Tableau 5-16 : Débit drainé par km de collecteur.....	213
Tableau 5-17 : Synthèse de l'observation des débits.....	216
Tableau 5-18 : Conductivités hydrauliques imposées aux zones de propriétés équivalentes du modèle.....	219
Tableau 5-19 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe superficielle</i> pour la période de mai – juin 2013.....	221
Tableau 5-20 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe du Bruxellien</i> pour la période de mai – juin 2013.....	225
Tableau 5-21 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe de l'Yprésien</i> pour la période de mai – juin 2013.....	227
Tableau 5-22 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe superficielle</i> pour la période de novembre 2013.....	231
Tableau 5-23 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe du Bruxellien</i> pour la période de novembre 2013.....	233
Tableau 5-24 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe de l'Yprésien</i> pour la période de novembre 2013.....	234
Tableau 5-25 : Comparaison des débits mesurés (ou estimés) et simulés en régime permanent pour la période mai – juin 2013.....	249
Tableau 6-1 : Sensibilité du modèle vis-à-vis des débits prélevés par pompage.....	265
Tableau 6-2 : Sensibilité du modèle vis-à-vis des niveaux d'eau imposés au droit des rivières et collecteurs...	270
Tableau 7-1 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°1.	314
Tableau 7-2 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°2.	318
Tableau 7-3 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°3.	322
Tableau 7-4 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°4.	326
Tableau 7-5 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°7.	340
Tableau 7-6 : Synthèse des évaluations des ressources pour les 9 scénarii	350
Tableau 7-7 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°1.....	352
Tableau 7-8 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°4.....	359
Tableau 7-9 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°7.....	361

Tableau 7-10 : Synthèse des évaluations des flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale pour les 9 scénarii	364
Tableau 7-11 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°1373	
Tableau 7-12 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°4380	
Tableau 7-13 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°7383	
Tableau 7-14 : Synthèse des évaluations des flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale pour les 9 scénarii	385
Tableau 8-1 : Synthèse des évaluations des ressources pour les 9 scénarii	388
Tableau 8-2 : Synthèse des évaluations des flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale pour les 9 scénarii	389
Tableau 8-3 : Synthèse des évaluations des flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale pour les 9 scénarii	390

ANNEXES

Annexe 1 : Présentation détaillée du logiciel FEFLOW®	26
Annexe 2 : Bilans de Thornthwaite sur l'année 2013 aux différentes stations pluviométriques	89

DECHARGE DE RESPONSABILITE – DISCLAIMER

Le présent livrable / rapport a été préparé par AQUALE – ECOFOX Développement selon les modalités définies dans le Cahier Spécial des Charges et le contenu de notre offre remise lors de la soumission au marché en exerçant une démarche et une compétence professionnelles appropriées, sur la base des connaissances disponibles au moment de l'étude, en utilisant un personnel de compétence adéquate et en accordant les plus grands soins et attentions possibles en fonction des ressources humaines et financières allouées au projet.

Le standard du service presté doit être évalué en fonction du moment et des conditions dans lesquels le service a été fourni et ne pourra pas être évalué selon un standard applicable à des périodes successives. Les estimations de coûts, les recommandations et les opinions présentées dans ce livrable / rapport sont fournies sur la base de notre expérience et de notre compétence professionnelle et ne constituent pas une garantie et/ou une certification.

Ce livrable / document est destiné à l'usage exclusif de l'IBGE (Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement) et des tierces parties dûment autorisées par ses soins.

AQUALE – ECOFOX Développement n'assume aucune responsabilité vis-à-vis des plaintes / litiges / usages de tiers à qui viendrait à être consigné, en tout ou en partie, ce livrable / rapport. Dans le cas particulier où la diffusion à des tiers de ce rapport sera préalablement concertée formellement avec AQUALE – ECOFOX Développement, les tiers dont objet qui utiliseront pour un quelconque motif / objectif les contenus de ce livrable / rapport le feront à leur risque et péril exclusif.

AQUALE – ECOFOX Développement n'assume aucune responsabilité vis-à-vis des plaintes / litiges / usages issues du Client ou encore de tiers en relation avec un quelconque élément non inclus dans l'objectif / la finalité du travail préalablement concerté avec le Client lui-même.

AQUALE – ECOFOX Développement ne pourra être tenu responsable de toutes imprécisions dans la construction et la calibration du modèle hydrogéologique qui seraient liées à la qualité des données communiquées par l'IBGE.

1 INTRODUCTION

L'Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement (appelé *IBGE* dans la suite du rapport) a lancé un appel d'offres en procédure négociée sans publicité pour la réalisation d'une étude hydrogéologique de la masse d'eau souterraine du Bruxellien. Le marché a été attribué au Service Géologique de Belgique (appelé *SGB* dans la suite du rapport) avec comme sous-traitant la société *AQUALE* sprl pour la partie modélisation hydrogéologique (phase 2).

L'objet final de cette étude hydrogéologique est – à partir des données géologiques, hydrogéologiques, hydrologiques et climatiques – de construire un modèle numérique permettant de simuler les processus d'écoulements des eaux souterraines, d'estimer les ressources disponibles, de mettre en évidence les interactions pouvant exister entre la masse d'eau souterraine¹ du Bruxellien² et les eaux de surface de la Woluwe et de quantifier les échanges d'eau souterraine avec la Région Flamande.

Le marché porte également sur l'élaboration d'un schéma conceptuel de la masse d'eau du Bruxellien en vue de représenter de façon schématique le fonctionnement réel de l'hydrosystème de façon à répondre aux obligations de la directive et de l'ordonnance cadre eau relative aux masses d'eau transfrontalières faisant partie du district hydrographique de l'Escaut.

La zone d'intérêt pour cette étude couvre globalement plus de la moitié du territoire de la Région de Bruxelles-Capitale essentiellement dans sa partie Est.

La première partie de cette étude (appelée *Phase I* dans la suite du rapport), à savoir la construction du modèle géologique, a été réalisée par le Service géologique de Belgique (appelé *SGB* dans la suite du rapport). Le rapport final de cette première phase de l'étude a été finalisé par le SGB durant l'été 2014.

Les développements du SGB ne sont pas rappelés / résumés dans le présent rapport. Le lecteur désireux d'en savoir plus sur la première phase de l'étude est renvoyé vers le rapport « *Modélisation géologique en 3D des formations composant la masse d'eau souterraine des sables du Bruxellien* »³.

Le présent rapport a pour objectif de présenter à l'IBGE le modèle hydrogéologique finalisé (en date du 16 novembre 2015).

Le rapport est subdivisé en 8 chapitres, incluant la présente introduction.

Le développement d'un modèle numérique des écoulements et du transport s'opère généralement selon la succession des étapes résumées ci-après :

- **collecte des données de base** (logs de forage, puits, topographie, coupes géologiques...);
- **élaboration du modèle conceptuel** – idéalisation simplifiée mais réaliste de l'aquifère⁴ :
 - o conceptualisation de la structure géologique simplifiée : lithologie, stratification... ;
 - o conceptualisation des zones simplifiées de propriétés équivalentes : sables aquifères, argiles aquicludes... ;

¹ Volume distinct d'eau à l'intérieur d'un ou de plusieurs aquifères.

² La masse d'eau souterraine du Bruxellien (Br05) caractérisée au titre de la définition de la directive et de l'ordonnance cadre eau regroupe les sables de la Formation de Bruxelles et les formations perméables auxquelles cette dernière est hydrogéologiquement connectée, soit : formations de Maldeghem (Membre de Wemmel), Ledegent (Membre de Vlierzele) et Tielt. Son extension se limite à la partie Est de la vallée de Senne.

³ Projet Hydrobrux, Etude hydrogéologique de la masse d'eau souterraine du Bruxellien, Projet eau n°2011.410 – CSC 2011-03-ALI, Modélisation géologique en 3D des formations géologiques composant la masse d'eau souterraine des sables du Bruxellien (Br05), Rapport final de la phase 1, Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique (D.O. Terre et Histoire de la Vie) et AQUALE – ECOFOX Développement, Décembre 2014.

⁴ Formation rocheuse suffisamment poreuse et/ou fracturée et perméable pour contenir une nappe d'eau souterraine.

- conceptualisation des conditions aux frontières :
 - condition de Dirichlet – 1^{er} type : potentiel imposé ou concentration imposée ;
 - condition de Neumann – 2^e type : flux ou flux massique imposé ;
 - condition de Cauchy – 3^e type : potentiel imposé ou concentration imposée avec flux entrant ou sortant ;
 - condition de Fourier : flux variable en fonction de la variation de potentiel ;
 - pompages et injections ;
- **élaboration du modèle numérique :**
 - détermination des limites du modèle ;
 - construction du maillage (grid / mesh) ;
 - application du modèle conceptuel au maillage ;
 - attribution numérique des conditions initiales (piézométrie, pression, concentration en polluant...);
 - attribution numérique des conditions aux frontières (infiltration, potentiel imposé à une rivière, pompage, fuite de polluant...);
 - attribution numérique des propriétés des matériaux (conductivités, porosité, coefficient d'emmagasinement spécifique, diffusion moléculaire, dispersivités, coefficient de retard...);
- **calibration du modèle numérique :**
 - adaptation des paramètres de calibration en vue de permettre la reproduction d'évènements passés et présents à l'aide du modèle numérique (évolution historique de niveaux d'eau au droit de piézomètres, de débits à une source ou de concentrations en polluants dans une nappe...);
- **validation du modèle numérique :**
 - vérification de la capacité du modèle numérique à reproduire d'autres évènements passés et présents lorsque les variables seules sont modifiées (pluviométrie, point bas d'une fosse d'extraction, concentrations en polluants dans un épandage de surface...);
- **analyse de sensibilité :**
 - vérification de la sensibilité des résultats obtenus à l'aide du modèle numérique suite à une modification des divers paramètres de calibration ;
- **réalisation des simulations prédictives :**
 - une fois le modèle numérique jugé suffisamment robuste, ce dernier peut être utilisé à des fins prédictives selon divers scénarii à élaborer (influence d'une future zone d'extraction sur la nappe, influence d'une modification des pratiques agricoles sur la concentration en nitrate dans le sol et le sous-sol...).

La **FIGURE 1-1** illustre ces différentes étapes de manière synthétique.

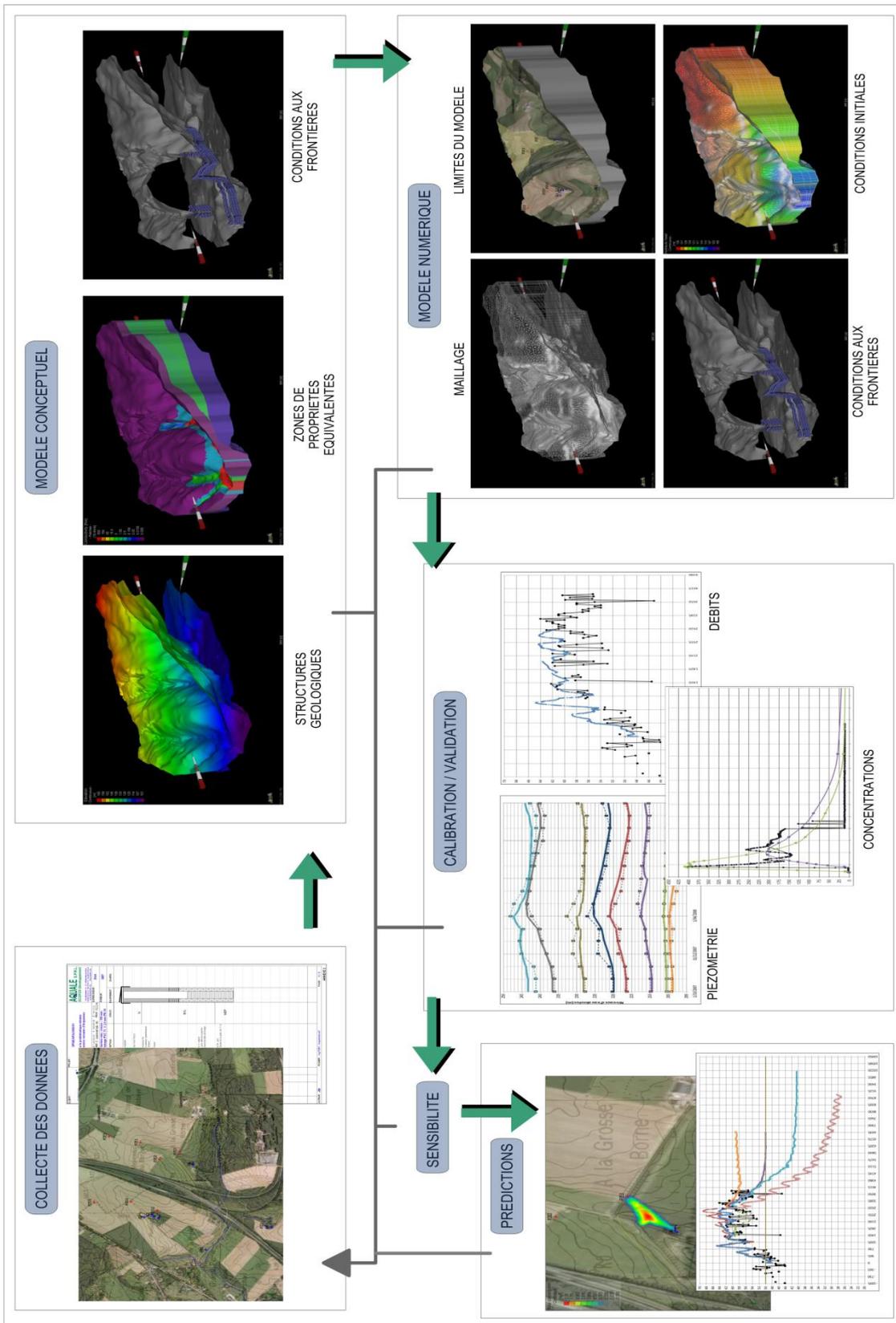


Figure 1-1 : Les différentes étapes dans le développement d'un modèle numérique des écoulements et du transport

Le présent rapport intermédiaire est structuré de la façon suivante :

- le **CHAPITRE 2** reprend une brève présentation de FEFLOW® 6.1, logiciel de modélisation hydrogéologique utilisé dans le cadre de cette étude ;
- le **CHAPITRE 3** a pour objectif de définir le modèle conceptuel qui est la base de toutes modélisations hydrogéologiques ;
- le **CHAPITRE 4** présente la transposition du modèle conceptuel vers le modèle numérique à l'aide du logiciel FEFLOW® 6.1 ;
- le **CHAPITRE 5** détaille la phase de calibration du modèle ;
- le **CHAPITRE 6** est consacré à l'étude de sensibilité réalisée sur le modèle hydrogéologique ;
- le **CHAPITRE 7** présente les résultats des simulations par rapport aux objectifs énoncés ci-avant ;
- le **CHAPITRE 8** reprend les conclusions, perspectives et recommandations.

2 LE LOGICIEL FEFLOW

2.1 MOTIVATION RELATIVE AU CHOIX DU LOGICIEL

Dès lors que les problématiques étudiées en hydrogéologie deviennent de plus en plus complexes à représenter en modélisation :

- prise en compte de structures de plus en plus complexes (galeries, phénomènes karstiques...);
- prise en compte des interactions eaux souterraines / eaux de surface ;
- prise en compte de réactions chimiques de plus en plus complexes (problématique nitrate, dégradation de produits organochlorés, réaction multi-espèces, salinité et densité de l'eau...);
- ...

Il a été décidé d'utiliser le code FEFLOW® dès lors que celui-ci, de par sa puissance bien supérieure à d'autres logiciels de modélisation, permet de prendre en compte toute une série de complexités hydrogéologiques en garantissant une meilleure précision des résultats, une avancée considérable en terme de contrôle des instabilités numériques et un potentiel de représentativité de la réalité.

Par ailleurs, FEFLOW® est développé en Allemagne par une équipe de programmeurs et hydrogéologues compétents et à l'écoute des besoins de ses clients modélisateurs, garantissant ainsi la pérennité du logiciel et des améliorations toujours constantes.

FEFLOW® est actuellement une référence internationale dans de nombreux domaines de modélisation tels que :

- la gestion des eaux souterraines ;
- la gestion environnementale de pollutions diverses ;
- l'industrie de la construction (barrages, CET...);
- l'industrie extractive ;
- l'étude des réservoirs enfouis et des zones de stockage ;
- la géothermie ;
- ...

Les utilisateurs de FEFLOW® proviennent de divers secteurs d'activités :

- autorités publiques et institutions ;
- secteur privé ;
- universités et organismes œuvrant dans la Recherche.

Outre les nouvelles performances techniques et la nouvelle interface conviviale de la version récente (6.1) du logiciel FEFLOW®, il paraît opportun de privilégier son utilisation dès lors qu'il permet de produire une imagerie très puissante et dès lors susceptible d'appuyer très efficacement la communication auprès des autorités compétentes :

- images 2D (coupes horizontales, verticales ou obliques) ;
- représentation 3D paramétrables (couleurs, couches d'informations, orientation spatiale) ;
- plus fondamentalement, des animations vidéo 2D ou 3D illustrant l'évolution dynamique d'un cône de rabattement de rideaux de puits, d'un front d'exhaure...

Le manuel de référence du code FEFLOW® est également disponible pour tout complément d'information qui pourrait être souhaité sur :

- les bases physiques sur lesquelles s'appuie le logiciel (équations de base, processus de flux et de transport, équations de base en modélisation, conditions initiales, conditions aux frontières...);
- les applications principales et les théories y relatives.

Par ailleurs, FEFLOW® est disponible en version DEMO de même qu'en version VIEWER⁵. Ces versions, disponibles en téléchargement gratuit, ne nécessitent pas de licence, et permettent respectivement :

- de créer, modifier et manipuler un modèle, toutefois limité à 500 nœuds et 5 couches pour l'ouverture et la sauvegarde (DEMO) ;
- d'ouvrir un modèle existant, visualiser et analyser les simulations préalablement enregistrées, créer des captures d'écran et des vidéos (VIEWER).

2.2 DESCRIPTION SUCCINCTE DU LOGICIEL

FEFLOW® est un logiciel de modélisation de l'eau souterraine (écoulement en milieu saturé et non saturé, transport de masse et de chaleur) développé par WASY GmbH (Berlin, Deutschland) depuis 1979 puis par DHI – WASY GmbH depuis 2007.

Il est développé selon les techniques d'éléments finis et permet de gérer une vaste gamme de processus physiques tels que :

- les écoulements dans les milieux poreux (selon la loi de Darcy) ;
- les écoulements en milieu saturé et / ou non-saturé ;
- les transports de solutés et de chaleur par advection / diffusion / dispersion ;
- les réactions chimiques multi-espèces ;
- les contrastes de densité (milieu salin...).

Par couplage avec le logiciel MIKE 11, développé par DHI GmbH, il permet également de prendre en considération les écoulements fluviaux et de préciser les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

Un descriptif plus détaillé du logiciel, reprenant ses caractéristiques techniques, ses applications principales et ses avantages, est repris en **ANNEXE 1**.

Annexe 1 : Présentation détaillée du logiciel FEFLOW®

Pour plus de détails, le lecteur se référera au manuel de référence (*Reference Manual*) ainsi qu'aux livres blancs (*White Papers, volumes 1 à 5*) disponibles gratuitement en téléchargement⁶.

⁵ Ces versions sont disponibles gratuitement à l'adresse http://www.feflow.info/download.html?&no_cache=1

⁶ Ces manuels et livres blancs sont disponibles gratuitement à l'adresse <http://www.feflow.info/manuals.html>

3 ELABORATION DU MODÈLE CONCEPTUEL

La première étape dans le développement d'un modèle, et probablement l'étape la plus importante, concerne l'élaboration du modèle conceptuel.

Le modèle conceptuel est la représentation simplifiée du système complexe d'écoulement souterrain à modéliser, il représente la meilleure approximation du fonctionnement de celui-ci. La conceptualisation consiste à choisir les hypothèses fondamentales qui vont conduire la modélisation. Ces hypothèses réduisent le problème réel en un problème simplifié qui doit être acceptable au vu des objectifs de modélisation et des questions spécifiques auxquelles il faut répondre.

Ce chapitre décrit le modèle conceptuel. Il est subdivisé en plusieurs sous-chapitres relatifs aux diverses hypothèses réalisées :

- dans un premier point (**CHAPITRE 3.1**), et afin de limiter géographiquement (*horizontalement*) le problème, les limites latérales du modèle sont localisées ;
- dans un second point (**CHAPITRE 3.2**), et afin de limiter *verticalement* le problème, les limites supérieure et inférieure du modèle sont localisées ;
- ensuite, la conceptualisation de la structure géologique simplifiée (lithologie, stratification...) et la conceptualisation des zones simplifiées de propriétés équivalentes (sables aquifères, argiles aquicludes...) sont présentées au **CHAPITRE 3.3** ;
- enfin, la conceptualisation des conditions aux frontières extérieures et intérieures est présentée au **CHAPITRE 3.4**.

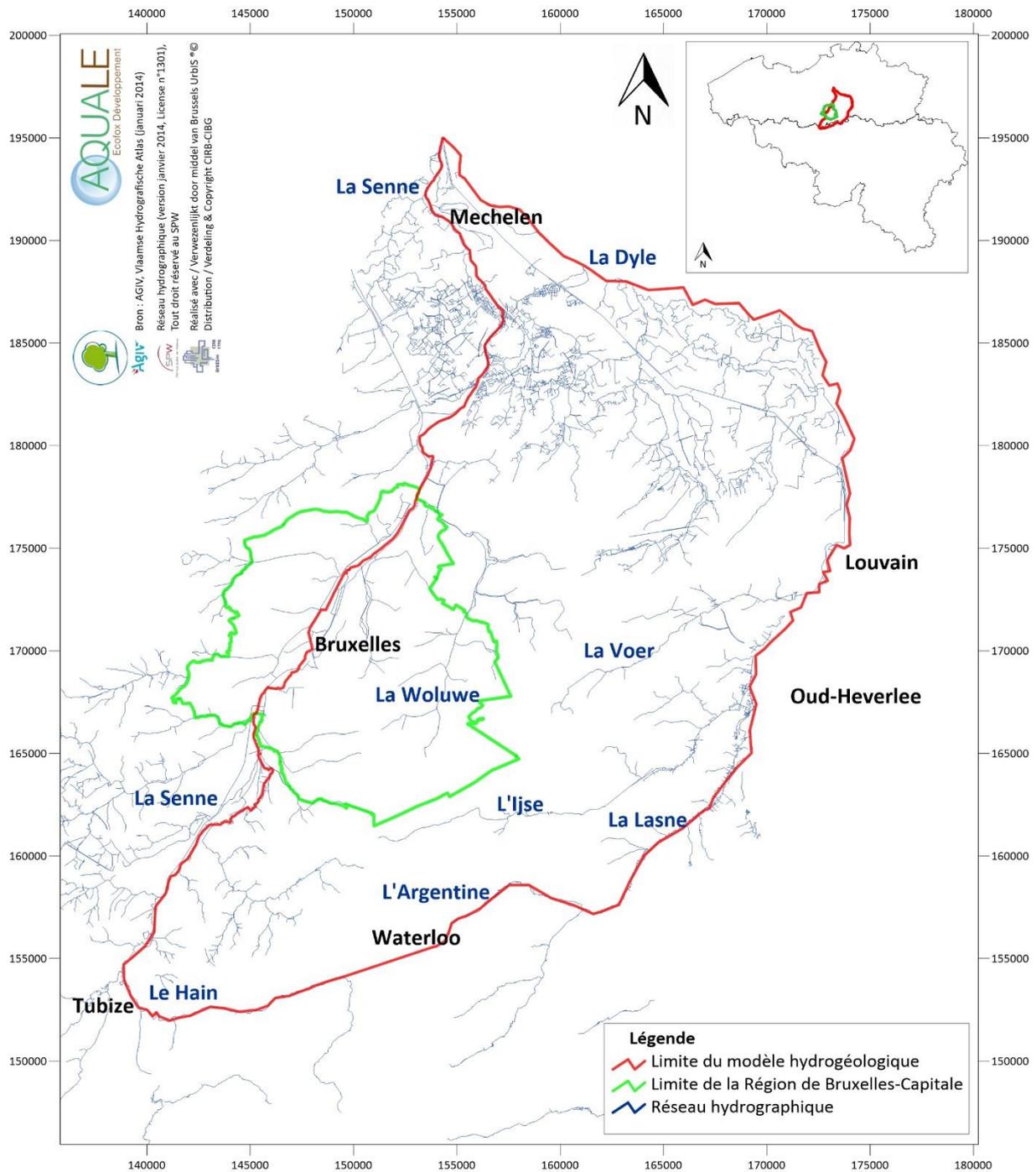
Dans chacun de ces sous-chapitres, les données utiles à la construction du modèle conceptuel sont présentées et commentées.

3.1 EXTENSION GÉOGRAPHIQUE DU MODÈLE

En ce qui concerne l'hydrogéologie de la Région de Bruxelles-Capitale, cinq masses d'eau souterraine ont été délimitées au titre de la définition de la Directive Cadre Eau (2000/60/CE) et de l'Arrêté du GRBC du 10 juin 2010 relatif à la protection des eaux souterraines contre la pollution à savoir :

- La masse d'eau Br01 : masse d'eau du Socle et du Crétacé qui s'étend dans la partie centrale et Nord de la région sur environ 111 km² ;
- La masse d'eau Br02 : masse d'eau du Socle en zone d'alimentation localisée au Sud de la région sur environ 51 km² ;
- La masse d'eau Br03 : masse d'eau du Landénien que l'on retrouve sous l'entière du territoire régional, soit sur environ 162 km² ;
- La masse d'eau Br04 : masse d'eau de l'Yprésien, région des Collines, au Nord-Ouest de la région sur environ 21 km².
- La masse d'eau des sables du Bruxellien, Br05, qui couvre la partie Est de la Région de Bruxelles-Capitale à partir de la vallée de la Senne, sur environ 89 km².

La **FIGURE 3-1** ci-après présente l'extension du modèle conceptuel relatif à la modélisation numérique de la masse d'eau souterraine des sables du Bruxellien (Br05). La zone couverte par le modèle fait partie du bassin versant (hydrographique) de l'Escaut et s'étend dans les provinces du Brabant wallon et du Brabant flamand et dans la Région de Bruxelles-Capitale.



Les limites du modèle sont définies comme suit (voir également **CHAPITRES 3.4, 4.1 et 4.4**) :

- à l'Ouest, la zone d'étude est limitée par la vallée de la Senne, qui représente par ailleurs la limite de l'extension de la masse d'eau Br05 des sables du Bruxellien ;
- au Nord, la zone s'étend jusqu'au point de confluence de la Senne et de la Dyle ;
- à l'Est, la zone est limitée par la Dyle ;
- au Sud-Ouest, la limite suit le Hain qui est un affluent de la Senne ;

- au Sud-Est, la limite suit le parcours de l'Argentine puis celui de la Lasne, affluent de la Dyle ;
- au Sud, entre le point le plus amont du Hain et le point de source de l'Argentine, la limite du modèle est poursuivie de manière rectiligne.

La vallée de la Senne est choisie comme limite du modèle hydrogéologique car il s'agit en réalité de la limite Ouest de l'aquifère étudié. En effet, sur la carte géologique (voir **FIGURE 3-2**), il apparaît très clairement que la vallée de la Senne recoupe la Formation des sables du Bruxellien et parfois même les formations sous-jacentes encore plus anciennes.

Compte tenu des objectifs du modèle et du caractère transfrontalier des écoulements entre la Région Flamande et la Région de Bruxelles-Capitale, il est essentiel que le modèle soit étendu en dehors de la Région de Bruxelles-Capitale.

Ainsi, la Dyle est choisie comme limite Est car il s'agit de la première rivière majeure vers l'Est et qu'elle recoupe, tout comme la Senne, la Formation des sables du Bruxellien sur l'ensemble de son parcours. Il est de ce fait jugé que les écoulements à l'Est de la Dyle n'influencent pas grandement les échanges / écoulements entre la Région Flamande et la Région de Bruxelles-Capitale. Le point de passage de la Dyle le plus proche de la Région de Bruxelles-Capitale est situé à Sint-Joris-Weert, au Sud d'Oud-Heverlee, soit à un peu plus de 11 km de la limite Est de la Région de Bruxelles-Capitale. L'influence des conditions aux limites imposées sur cette frontière devrait dès lors être assez réduite dans la zone d'intérêt.

Enfin, la limite Sud est localisée le long des rivières de la Lasne et de l'Argentine à l'Est, et le long du Hain à l'Ouest. Ces ruisseaux ne recoupent que partiellement l'aquifère étudié. A nouveau, cette frontière se situe à plusieurs kilomètres de la zone d'intérêt et son influence est donc jugée réduite sur les écoulements à modéliser. Entre le point le plus amont du Hain et le point de source de l'Argentine, la frontière est prolongée de manière rectiligne.

La digitalisation (détermination des points XY) des cours d'eau a été réalisée avec une plus grande précision pour la Senne que pour les autres cours d'eau. En effet, la prise en compte de tous les détails du parcours des rivières / ruisseaux provoquerait la nécessité d'utiliser un maillage fin le long de ces rivières / ruisseaux aux limites du modèle alors que celles-ci sont expressément éloignées de la zone d'intérêt.

Le modèle a une extension légèrement supérieure à 35 km selon l'axe Ouest – Est et une extension d'environ 43 km selon l'axe Nord – Sud. Sa superficie est de 709 km². Il englobe une partie des villes de Tubize au Sud, d'Oud-Heverlee et de Louvain à l'Est et enfin de Malines au Nord.

En ce qui concerne les cours d'eau, le modèle englobe principalement :

- à l'Ouest, une partie du bassin versant de la Senne, avec la Woluwe qui traverse la Région de Bruxelles-Capitale,
- au Nord, une partie du bassin versant de la Senne et de la Dyle,
- à l'Est, une partie du bassin versant de la Dyle, avec ses affluents :
 - o la Lasne (et en amont l'Argentine) ;
 - o l'Ijse ;
 - o la Voer.
- au Sud, une partie du bassin versant du Hain.

La conceptualisation de ces frontières latérales est détaillée au **CHAPITRE 3.4**.

3.2 EXTENSION VERTICALE DU MODÈLE

Le modèle est limité verticalement par :

- la surface topographique pour la limite supérieure ;
- le sommet du Membre de Saint-Maur (Formation de Kortrijk) pour la limite inférieure là où ce membre est présent. Si le Membre de Saint-Maur est absent, la base du modèle est placée au niveau du sommet des couches sous-jacentes (dans l'ordre : Formation de Hannut, Crétacé, Paléozoïque⁷).

Pour définir la limite supérieure, une couche topographique combinant les données suivantes a été utilisée :

- LIDAR (*Light Detection And Ranging*), dont la résolution est de 1 m, au droit de la Région de Bruxelles-Capitale et dans un rayon de 500 m ;
- IGN, dont la résolution est de 20 m, sur un carré de 20 km de côté recouvrant les données du LIDAR ;
- SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), dont la résolution est de 80 m, sur le restant de la zone.

Ces couches ont également servi de base pour l'élaboration du modèle géologique par le SGB.

Pour la limite inférieure, le sommet du Membre de Saint-Maur (ou des couches sous-jacentes là où le Membre de Saint-Maur n'est pas présent) modélisé par le SGB lors de la Phase I de l'étude a été utilisé comme référence.

L'épaisseur maximale du modèle est de 110 m environ. L'épaisseur minimale est d'environ 2.5 m en bordure de la Senne à proximité de la limite Sud de la zone modélisée. Entre le point le plus haut et le point le plus bas du modèle, il y a une différence d'altitude de 238.7 m.

3.3 CONCEPTUALISATION DE LA STRUCTURE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE

Les paragraphes suivants décrivent le contexte géologique et hydrogéologique de la zone à modéliser. Les différentes formations sont listées avec une distinction entre aquifère, aquiclude et aquitard dans le **TABLEAU 3-1**.

Ce tableau reprend la séquence des formations géologiques rencontrées au sein de la Région de Bruxelles-Capitale.

⁷ Ces formations ne sont pas forcément imperméables. Cependant, vu la profondeur des contacts avec ces formations et la faible proportion de territoire caractérisée par l'absence de la Formation de Saint-Maur au sein de la zone modélisée, il est considéré que les flux d'eau verticaux à travers la base du modèle sont négligeables et que l'hypothèse d'imperméabilité est acceptable.

Ere	Système	Série	Etage/Ancien nom	Formation	Type	Contexte hydrogéologique
IV (CENOZOIQUE)	Quaternaire	Holocène	Flandrien	-	AQUICLUDE	
		Pléistocène	-	-	AQUIFERE	Aquifères alluviaux
III (CENOZOIQUE)	Néogène	Miocène supérieur	Diestien	Diest	AQUIFERE	Nappes perchées
		Miocène inférieur	Bolderien	Bolderberg	AQUIFERE	
	Eocène supérieur	Tongerien	Sint-Huilbrechts-Hern	AQUIFERE / AQUITARD	AQUICLUDE	
		Eocène moyen	Complexe de Kallo	Maldegem (Zomergem)		
	Paléogène	Eocène moyen	Complexe de Kallo	Maldegem (Onderdale)	AQUIFERE	Nappes perchées
		Eocène moyen	Complexe de Kallo	Maldegem (Ursel et Asse)	AQUICLUDE	
		Eocène moyen	Complexe de Kallo	Maldegem (Wemmel)	AQUIFERE	Aquifère des sables Lédobruxellien-Paniséliens
		Eocène moyen	Ledien	Lede	AQUIFERE	
		Eocène moyen	Bruxellien	Bruxelles	AQUIFERE	
		Eocène inférieur	Panisélien	Gent (Vlierzele)	AQUIFERE	
		Eocène inférieur	Panisélien	Gent (Merelbeke)	AQUICLUDE	
		Eocène inférieur	Ypresien	Tielt	AQUIFERE / AQUITARD	Aquifère des sables yprésiens de la formation de Tielt
		Eocène inférieur	Ypresien	Kortrijk (Aalbeke)	AQUICLUDE	
		Eocène inférieur	Ypresien	Kortrijk (Moen)	AQUITARD	Aquitard sablo limoneux yprésien de la formation de Kortrijk
		Eocène inférieur	Ypresien	Kortrijk (Saint-Maur)	AQUICLUDE	
		Paléocène supérieur	Landénien	Hannut (Grandglise)	AQUIFERE	Aquifère des sables du Landénien
Paléocène supérieur		Landénien	Hannut (Lincent)	AQUICLUDE		
II (MESOZOIQUE)		Crétacé	-	-	Gulpen	AQUIFERE
I (PALEOZOIQUE)	-	-	-	-	AQUIFERE / AQUITARD	

Tableau 3-1 : Entités hydrogéologiques en Région de Bruxelles-Capitale⁸

3.3.1 DESCRIPTION DE LA GÉOLOGIE ET DE L'HYDROGÉOLOGIE DE LA ZONE MODÉLISÉE

3.3.1.1 CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL

Ci-dessous, la géologie des formations intégrées dans le modèle est présentée chronologiquement, c'est-à-dire des formations les plus anciennes vers les formations les plus jeunes⁹.

La base du modèle hydrogéologique repose sur le Membre de Saint-Maur (Formation de Kortrijk), constituant un aquiclude. Il s'agit de dépôts d'argile très finement silteuse avec quelques minces intercalations d'argile

⁸ Source : Bruxelles Environnement

⁹ Source : Carte géologique de Belgique, Planche 31-39 : Bruxelles – Nivelles, Ph. BUFFEL, J. MATTHIJS, 2002

grossièrement silteuse ou de silt très fin argileux. L'épaisseur moyenne du membre est de 30 m (y inclus le Membre du Mont-Héribu).

Ce membre est surmonté par un aquitard de la Formation de Kortrijk, le Membre de Moen. Ce sont des dépôts hétérogènes de sable silteux à argileux, faiblement glauconieux, avec quelques couches d'argile et présence de nummulites. L'épaisseur moyenne est de 35 m.

Au-dessus se trouve le Membre d'Aalbeke, constituant un aquiclude d'argile grise à gris brun, très finement silteuse. L'épaisseur moyenne de ce membre est de 4 m.

Ensuite, la Formation de Tielt constitue un aquifère / aquitard composé de dépôts hétérogènes de sable fin, glauconieux et micacé, alternant avec des couches d'argile. Localement, des fragments de grès sont présents. L'épaisseur moyenne est de 20 m.

Au-dessus de Tielt et assez localement, le Membre de Merelbeke (Formation de Gent) est composé d'argile gris vert avec des zones sableuses vertes et parfois, la présence de pyrite. Ce membre aquiclude a une épaisseur maximale de 4 m.

En ce qui concerne la typologie géologique et hydrogéologique de la masse d'eau des sables du Bruxellien (Br05), elle se compose stratigraphiquement des quatre formations suivantes, de la plus ancienne à la plus jeune :

- Gent (Membre de Vlierzele) qui n'est cependant pas présente dans la zone modélisée,
- Bruxelles,
- Lede,
- et Maldegem (Membre de Wemmel).

Le Membre de Vlierzele de la Formation de Gent est composé de sable gris vert, très fin, glauconieux et plus argileux vers la base. Son épaisseur est restreinte à 4 m.

La Formation de Bruxelles est constituée de sable blanc à jaune, quartzeux, parfois glauconifère et elle présente souvent une stratification oblique. Ces sables renferment souvent des concrétions gréseuses particulières (« grès fistuleux ») et ils sont parfois calcarifères. Quand le sédiment est calcaire, on retrouve typiquement des nummulites laevigatus. A la base de la Formation de Bruxelles, les sables sont plus grossiers, parfois même graveleux et également plus chargés en glauconie. L'épaisseur totale de la formation sur la zone modélisée varie de 0 à 70 m vu la structure en chenaux érosifs à la base.

La Formation de Bruxelles est surmontée par la Formation de Lede, composée de sables gris, fins, carbonatés et légèrement glauconieux. Par endroit, le sable est caractérisé par la présence de bancs de calcaire sableux. Vers la base, la Formation de Lede présente des niveaux plus grossiers et tout à la base, un gravier bien marqué avec des éléments remaniés. L'épaisseur maximale atteint 12 m.

Au-dessus de la Formation de Lede se trouve la Formation de Maldegem composée de quatre membres (le Membre de Wemmel, les Membres d'Ursel et d'Asse, le Membre de Onderdale et le Membre de Zomergem). Le Membre de Wemmel fait également partie intégrante de l'aquifère Br05 étudié. Il est également sableux, composé de sables gris, fins, très glauconieux. La teneur en argile augmente vers le sommet. Ce membre est caractérisé par la présence de nummulites wemmelensis et d'une couche de base bien développée, riche en nummulites remaniées et roulées, ainsi qu'en fragments de grès calcaire fossilifère. L'épaisseur est très variable, atteignant en moyenne 5 m.

Le Membre de Wemmel est recouvert par les Membres d'Ursel et d'Asse, qui hydrogéologiquement constitue un aquiclude. Ils sont composés d'argile gris bleuâtre, homogène, passant graduellement à une argile glauconieuse. A la base, ils sont composés principalement de sable grossier très glauconieux (« Bande noire »). L'épaisseur maximale atteint 12 m.

Au-dessus, le Membre de Onderdale, dont l'épaisseur moyenne est de 7 m, constitue un aquifère contenant des nappes perchées. Il se compose de sable fin moyen, gris foncé, silteux, glauconieux et micacé.

Avec son épaisseur faible (environ 2 m) et une présence uniquement sur la partie Nord, le Membre de Zomergem est un aquiclude. Il est formé par de l'argile grise à gris bleu, compacte et ne contient pas de glauconie ni de calcaire.

Au-dessus de cet aquiclude se trouve un aquifère constitué des formations de Sint-Huilbrechts-Hern, de Bolderberg (non présente dans la zone modélisée) et de Diest. Cet aquifère est constitué de nappes perchées. La Formation de Sint-Huilbrechts-Hern est constituée de sable fin, jaune, micacé, passant graduellement de haut en bas à une argile ou un silt jaune blanc à gris rose (l'argile saumon), légèrement sableuse et glauconieuse, suivi d'une argile grise à gris vert, sableuse et plus glauconieuse. La base de cette formation est caractérisée par la présence d'un gravier de quartz, de silex tantôt plats noirs, tantôt de plus grande taille et ovales. Parfois, elle présente également des galets de grès vert cambrien. L'épaisseur est réduite au Nord mais peut atteindre plus de 10 m au Sud-Est de la Région de Bruxelles-Capitale.

La Formation de Bolderberg (non présente dans la zone modélisée) est composée de sable fin, jaune pâle, micacé (« sable chamois »). A la base, elle est caractérisée par la présence d'un gravier de petits silex. Son épaisseur maximale est de 7 mètres.

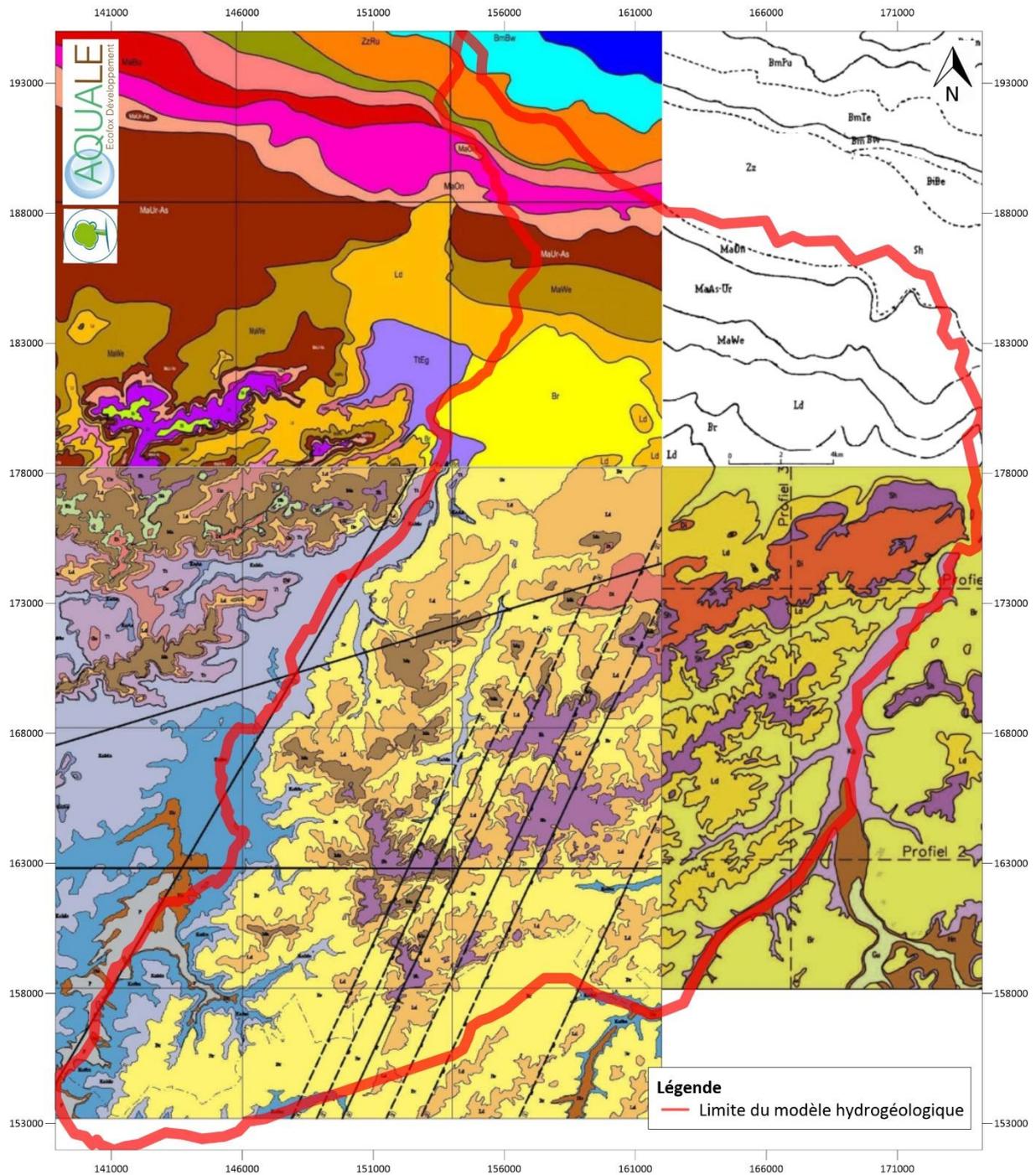
Enfin, la Formation de Diest est composée de sable vert brun à rouille, mi-fin à grossier, très glauconieux, avec concrétions limoniteuses. Parfois, elle présente des stratifications entrecroisées abondantes et des terriers tubulaires d'animaux fouisseurs. Son épaisseur atteint 20 m.

Finalement, les dépôts du Quaternaire présentent une alternance entre des sables grossiers, graviers, tourbes et limons. Il y a également une présence de couches fines d'argiles et de silex. Les dépôts les plus récents des alluvions sont argileux et forment une couche assez peu perméable en surface.

Afin de mieux illustrer la situation géologique, la carte et les coupes géologiques de la zone sont présentées ci-dessous. La zone modélisée est couverte par les cartes géologiques suivantes :

- Planche 31-39 : Bruxelles – Nivelles, Ph. BUFFEL, J. MATTHIJS, 2002 ;
- Planche 40/1-2 : Wavre – Chaumont-Gistoux, S. BLOCKMANS, A. HERBOSCH, 2012 ;
- Planche 39/3-4 pour l'extrémité Sud du modèle (pas encore publiée) ;
- Planche 23 : Mechelen, Ph. BUFFEL, N. VANDENBERGHE, M. VACKIER, 2009 ;
- Planche 24 : Aarschot, M. SCHILTZ, N. VANDENBERGHE, F. GULLENTOPS, 1993 ;
- Planche 32 : Leuven, N. VANDENBERGHE, F. GULLENTOPS, 2001.

La **FIGURE 3-2** ci-dessous reprend la carte géologique complète de la zone modélisée ainsi que sa légende.



Di	Formatie van Diest (Boven Mioceen) - Formation de Diest (Miocène supérieur)
	Groenbruin tot roestkleurig matig fijn tot grof zand met ijzerhoudende concreties en veel glauconiet. Soms komen gekruiste gelaagdheden voor evenals buisvormige wormgangen. De dikte kan oplopen tot meer dan 20 m. <i>Sable vert brun à rouille, m-fin à grossier, très glauconieux, avec concrétions limonitiques. Parfois, présence de stratifications entrecroisées abondantes et des terriers tubulaires d'animaux fouisseurs. L'épaisseur maximale atteint plus de 20 m.</i>
Bb	Formatie van Bolderberg (Onder Mioceen) - Formation de Bolderberg (Miocène inférieur)
	Bleekgele fijne micahoudende zanden ("sable chamois") met aan de basis een grind bestaande uit kleine silex. De dikte kan oplopen tot 7 m. <i>Sable fin, jaune pâle, micacé ("sable chamois"). A la base, présence d'un gravier de petits silex. L'épaisseur maximale atteint 7 m.</i>
Sh	Formatie van Sint-Huibrechts-Hern (Boven Eoceen) - Formation de Sint-Huibrechts-Hern (Eocène supérieur)
	Geel fijn zand met mica dat van boven naar onder geleidelijk overgaat in een wigele tot grijs-roze klei/silt ("argile saumon") die licht zand- en glauconiehoudend is, gevolgd door een grijs tot grijsgroene zandhoudende klei met meer glauconiet. Aan de basis komt een grind voor bestaande uit kwarts, platte zwarte en grote ovale vuursteenkeien en soms kelen van groene Cambrium zandsteen. De afzetting komt beperkt in dikte voor in het noorden terwijl in het zuidoosten de dikte kan oplopen tot meer dan 10 m. <i>Sable fin, jaune, micacé, passant graduellement de haut en bas à une argile ou un silt jaune blanc à gris rose ("argile saumon"), légèrement sableuse et glauconieuse, suivi d'une argile gris à gris vert, sableuse et plus glauconieuse. A la base, présence d'un gravier de quartz, de silex tantôt plats noirs, tantôt de plus grande taille et ovales. Parfois, présence de galets de grès vert cambrien. L'épaisseur est réduite au nord mais peut atteindre plus de 10 m au sud-est.</i>
Ma	Formatie van Maldegem (Midden Eoceen) - Formation de Maldegem (Eocène moyen)
	Lid van Zomergem - Membre de Zomergem Grijze tot grijsblauwe zware klei. Het bevat noch glauconiet, zand of kalk. Gemiddeld 2 m dik (enkel nog in het noorden aanwezig). <i>Argile grise à gris bleu, compacte, ne contenant pas de glauconie ni de calcaire. L'épaisseur moyenne est de 2 m (uniquement présent au nord).</i>
	Lid van Onderdale - Membre de Onderdale Donkergrijs middelmatig fijn siltig zand, glauconiet- en glimmerhoudend. Gemiddeld 7 m dik (enkel nog in het noorden aanwezig). <i>Sable fin moyen, gris foncé, silteux, glauconieux et micacé. L'épaisseur moyenne est de 7 m (uniquement présent au nord).</i>
	Leden van Ursel en Asse - Membres d'Ursel et d'Asse Homogene grijsblauwe klei die geleidelijk overgaat in glauconiehoudende klei met plaatselijk vooral aan de basis grof glauconietzand ("bande noire"). De dikte kan oplopen tot maximaal 12 m. <i>Argile gris bleuâtre, homogène, passant graduellement à une argile glauconieuse. A la base, principalement sable grossier très glauconieux («Bande noire»). L'épaisseur maximale atteint 12 m.</i>
	Lid van Wemmel - Membre de Wemmel Grijs glauconiehoudend fijn zand met een toename van het kleigehalte naar de top. Gekenmerkt door het voorkomen van <i>Nummulites wemmelensis</i> en een goed ontwikkelde basislaag rijk aan herwerkte en gerolde nummulieten evenals fossielhoudende kalkzandsteenbanken. De dikte wisselt soms sterk maar bedraagt gemiddeld 5 m. <i>Sable fin, gris, très glauconieux. La teneur en argile augmente vers le sommet. Ce membre est caractérisé par la présence de Nummulites wemmelensis et d'une couche de base bien développée, riche en nummulites remaniées et roulées, ainsi qu'en fragments de grès calcaire fossilifère. L'épaisseur est très variable mais atteint en moyenne 5 m.</i>
Le	Formatie van Lede (Midden Eoceen) - Formation de Lede (Eocène moyen)
	Grijs fijn zand, kalkhoudend en licht glauconiehoudend. Het zand wordt gekenmerkt door enkele banken zandige kalksteen en, indien niet verweerd, door de aanwezigheid van <i>Nummulites variolarius</i> . Naar de basis toe komen af en toe grovere zones voor met aan de basis een duidelijk grindlaagje met herwerkte elementen. De dikte kan oplopen tot maximaal 12 m. <i>Sable gris, fin, carbonaté et légèrement glauconieux. Le sable est caractérisé par quelques bancs de calcaire sableux et par la présence de Nummulites variolarius, quand le sable n'est pas altéré. Vers la base, présence de niveaux plus grossiers et tout à la base, d'un gravier bien marqué avec des éléments remaniés. L'épaisseur maximale atteint 12 m.</i>
Br	Formatie van Brussel (Midden Eoceen) - Formation de Bruxelles (Eocène moyen)
	Heterogene afzetting van zeer licht glauconiehoudende fijne tot grove kwartshoudende zanden. Gekenmerkt door het voorkomen van harde banken (zandige kalksteenbanken "Gobertange facies" - kalkige, soms vertieelde zandsteenbanken) en/of losse zandsteenrollen met zeer grillige vormen. Indien kalkhoudend is het voorkomen van <i>Nummulites laevigatus</i> typerend. De dikte wisselt sterk door het geuwigvormig karakter en kan in een deel oplopen tot meer dan 10m. <i>Sables quartzeux, fins à grossiers, hétérogènes et très faiblement glauconieux, caractérisés par la présence de bancs durs (bancs de calcaire sableux « facies de Gobertange - bancs de grès carbonaté, parfois siliceux) et/ou par des nodules de grès de formes très capricieuses. Quand le sédiment est calcaire, la présence de Nummulites laevigatus est typique. Etant donné la structure en chenaux érosifs à la base, l'épaisseur est très variable et peut atteindre dans un chenal plus de 10 m.</i>
Ge	Formatie van Gent (Onder Eoceen) - Formation de Gent (Eocène inférieur)
	Lid van Vlierzele - Membre de Vlierzele Grijsgroen glauconiehoudend zeer fijn zand, meer kleihoudend naar de basis toe. De dikte is beperkt tot 4 m. <i>Sable gris vert, très fin, glauconieux, plus argileux vers la base. L'épaisseur est restreinte à 4 m.</i>
	Lid van Merelbeke - Membre de Merelbeke Groenrijke klei met voorkomen van zandige klei. Soms is de klei pyleithoudend. De dikte bedraagt maximaal 4 m. <i>Argile gris vert avec des zones sableuses vertes. Parfois, présence de pyrite. L'épaisseur maximale est de 4 m.</i>
Tt	Formatie van Tielt (Onder Eoceen) - Formation de Tielt (Eocène inférieur)
	Heterogene afzetting van kleihoudend fijn zand met glauconiet en glimmers afgezweld met kleilagen. Plaatselijk kunnen zandsteenfragmenten voorkomen. Gemiddeld 20 m dik. <i>Dépôt hétérogène de sable fin, glauconieux et micacé, alternant avec des couches d'argile. Localement, présence de fragments de grès. L'épaisseur moyenne est de 20 m.</i>
Ko	Formatie van Kortrijk (Onder Eoceen) - Formation de Kortrijk (Eocène inférieur)
	Lid van Aalbeke - Membre d'Aalbeke Grijze tot grijsbruine zeer fijnsiltige klei. Gemiddeld 4 m dik. <i>Argile grise à gris brun, très finement silteuse. L'épaisseur moyenne est de 4 m.</i>
	Lid van Moen - Membre de Moen Heterogene afzetting van siltig tot kleihoudend en licht glauconiehoudend zand met enkele kleilige zones. Vaak nummuliehoudend. De dikte bedraagt gemiddeld 35 m. <i>Dépôt hétérogène de sable silteux à argileux, faiblement glauconieux, avec quelques couches d'argile. Présence de nummulites. L'épaisseur moyenne est de 35 m.</i>
	Lid van Saint-Maur - Membre de Saint-Maur Fijnsiltige klei met enkele dunne intercalaties van grofsiltige klei of kleilig zeer fijn silt. De gemiddelde dikte bedraagt 30 m, inclusief het Lid van Mont-Hérub (= basislaag van de formatie). <i>Argile très finement silteuse avec quelques minces intercalations d'argile grossièrement silteuse ou de silt très fin argileux. L'épaisseur moyenne est de 30 m, Membre du Mont-Hérub inclus.</i>
Hn	Formatie van Hannut (Boven Paleoceen) - Formation de Hannut (Paléocène supérieur)
	Lid van Grandglise - Membre de Grandglise Fijn glauconiehoudend zand met dunne kleilige intercalaties. De dikte bedraagt gemiddeld 8 m. <i>Sable fin, glauconieux, avec intercalations argileuses minces. L'épaisseur moyenne est de 8 m.</i>
	Lid van Lincent - Membre de Lincent Grijsgroene (licht) zandhoudende klei met plaatselijk kiezelige verlichtingen en aan de basis donkergroene vuursteenkeien. De dikte neemt toe naar het noorden waar het tot 20 m dik kan zijn. <i>Argile gris vert, légèrement sableuse, localement cimentée par de l'opale. A la base, quelques galets de silex vert foncé. Vers le nord, l'épaisseur atteint 20 m.</i>
P	Paleozoïcum - Paléozoïque
	Overwegend veldspaathoudende zandsteenbanken, schiefer en kwartsiet van Onder Cambrium ouderdom. Ze kunnen verweerd voorkomen onder de vorm van harde kleien. <i>Dominance de bancs de grès feldspathique, schiste et quartzites d'âge cambrien inférieur. Ces roches peuvent s'altérer sous la forme d'argile compacte.</i>

-  Breuk met neerwaartse beweging aan de zijde van het rechthoekje. *Faille. Les petits rectangles indiquent le bloc descendant.*
-  Vermoedelijke breuk. *Faille probable.*
-  Gewestgrenzen. *Limites de régions.*

Figure 3-2 : Carte géologique de la zone modélisée (Source : les planches évoquées dans le texte ci-dessus)

La **FIGURE 3-3** présente les coupes géologiques de la planche 31-39 (Bruxelles-Nivelles) qui passent directement à travers la Région de Bruxelles-Capitale (les lignes de coupes sont figurées par un trait noir continu sur la carte géologique présentée à la **FIGURE 3-2**).

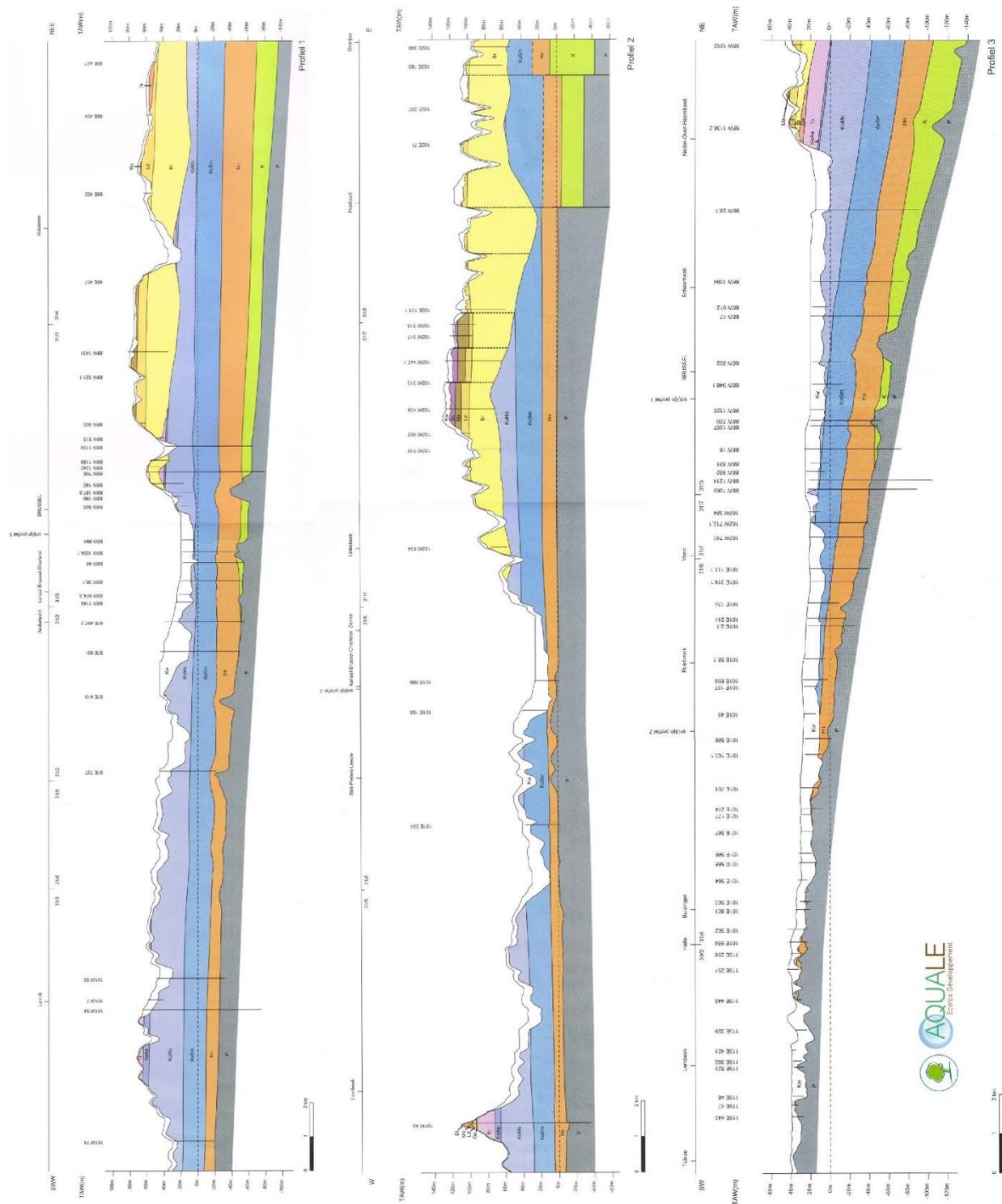


Figure 3-3 : Coupes géologiques de la planche 31-39 (Bruxelles-Nivelles)

En plus de ces coupes et afin de mieux appréhender la géologie et l'hydrogéologie au droit de la zone modélisée, deux coupes supplémentaires reprenant à titre indicatif le niveau piézométrique de la nappe située dans les sables du Bruxellien pour la campagne de mai – juin 2013 sont présentées ci-dessous (FIGURES 3-4 à 3-6). Ces coupes, qui traversent l'ensemble de la zone modélisée selon l'axe Ouest – Est, illustrent en particulier l'encaissement des rivières utilisées comme limites extérieures du modèle.

Ces coupes sont réalisées à l'aide du logiciel Surfer®.

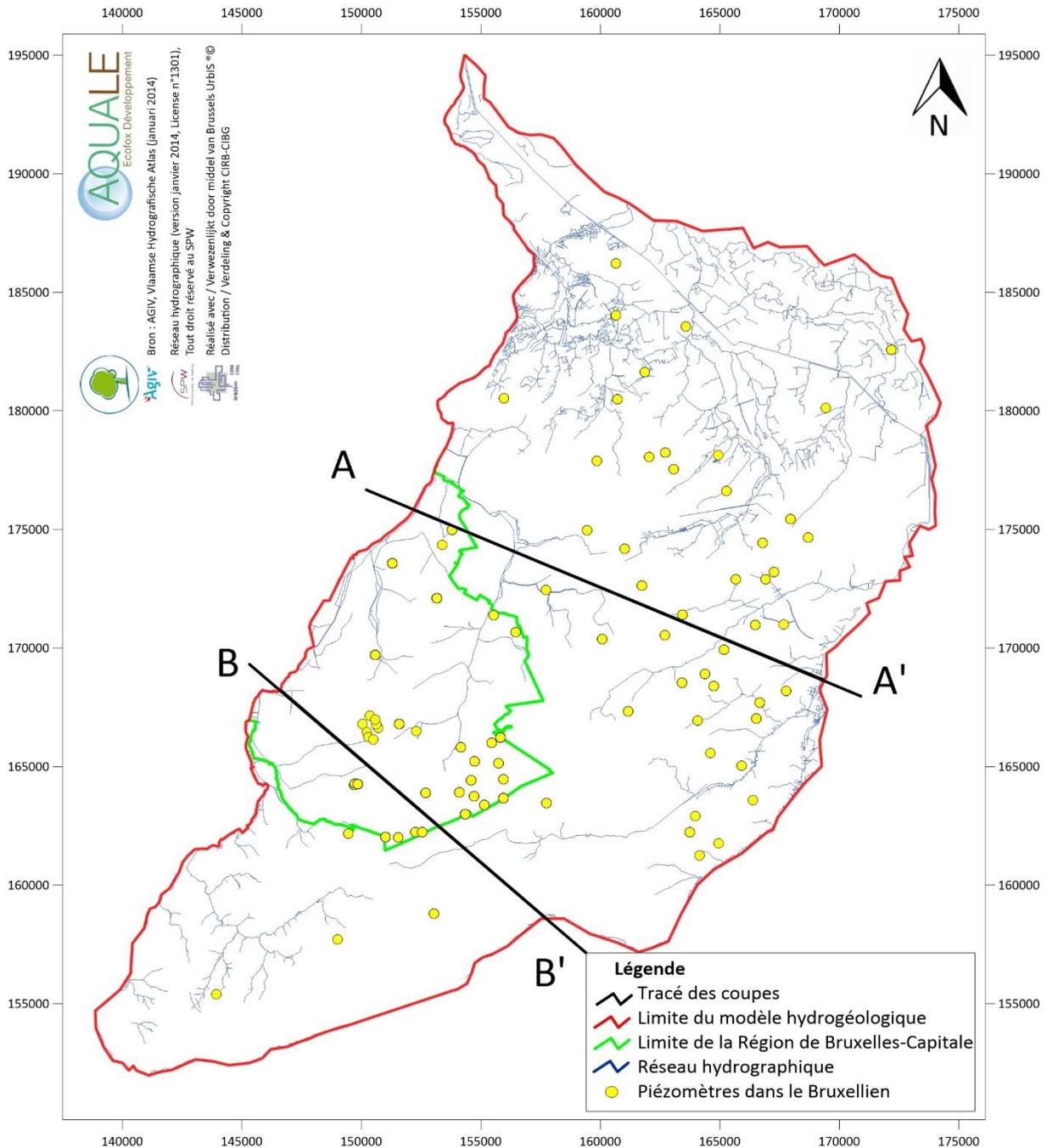


Figure 3-4 : Tracés des coupes géologiques schématiques A-A' et B-B'

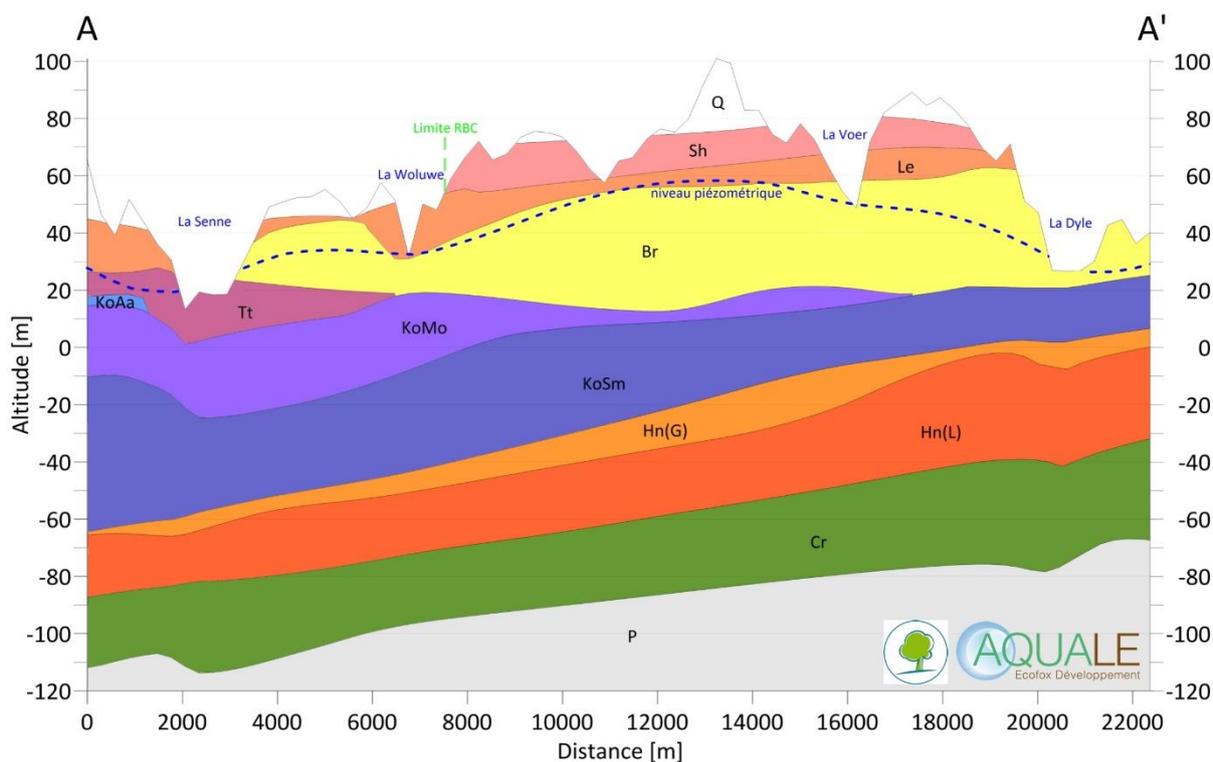


Figure 3-5 : Coupe géologique schématique A-A' (le niveau piézométrique représenté par la ligne pointillée bleue est le résultat de l'interpolation des niveaux d'eau piézométriques de la *nappe du Bruxellien* pour la campagne de mai et juin 2013, les abréviations utilisées pour les formations sont reprises dans la carte géologique officielle, voir légende de la figure 3-2)

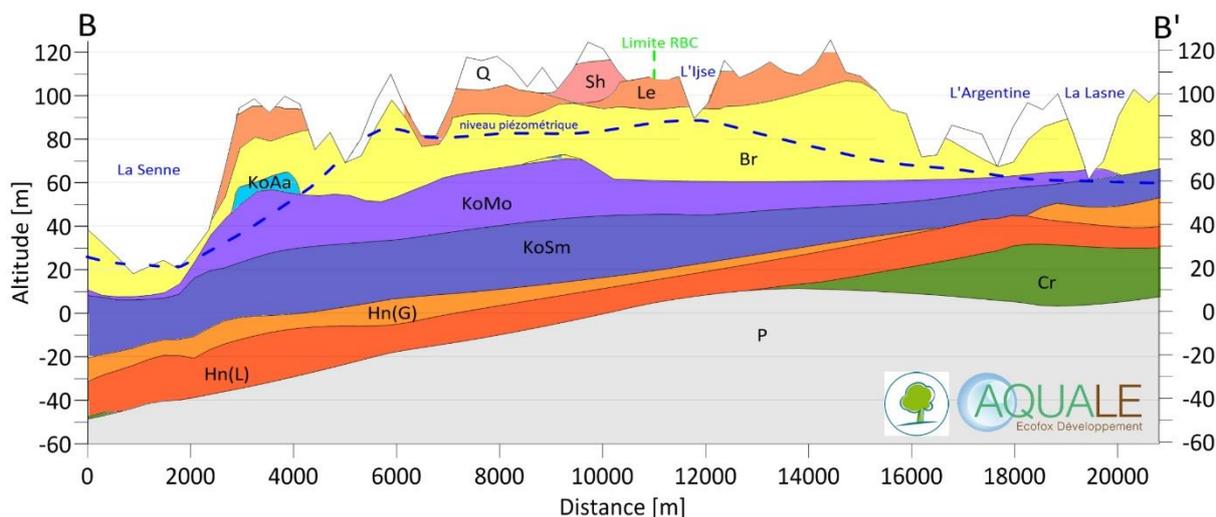


Figure 3-6 : Coupe géologique schématique B-B' (le niveau piézométrique représenté par la ligne pointillée bleue est le résultat de l'interpolation des niveaux d'eau piézométriques de la *nappe du Bruxellien* pour la campagne de mai et juin 2013, les abréviations utilisées pour les formations sont reprises dans la carte géologique officielle, voir légende de la figure 3-2)

Les coupes géologiques schématisées présentées sur les **FIGURES 3-5 et 3-6** ont été tracées selon les lignes AA' et BB' (**FIGURE 3-4**). Les tracés ont été choisis afin de visualiser les formations géologiques au sein de la zone modélisée, en tenant compte des limites du modèle conceptuel, la Senne et l'Argentine / la Dyle constituant des limites hydrogéologiques drainant l'aquifère des sables du Bruxellien. Le niveau piézométrique de l'aquifère des sables du Bruxellien est représenté par un trait bleu pointillé. Il est important de garder à l'esprit qu'il s'agit de coupes schématisées n'ayant pas pour objectif de présenter la situation hydrogéologique réelle avec précision. En particulier, le niveau d'eau représenté est déduit du krigeage qui a permis de réaliser les cartes piézométriques (voir ci-après). Il s'agit donc d'une interprétation qu'il faut analyser dans sa globalité. D'autre part, il existe des artefacts au niveau des couches géologiques qui sont déduites du modèle géologique construit par le SGB (par exemple, les discontinuités de la couche de Quaternaire).

Sur la coupe AA', la limite gauche est représentée par la vallée de la Senne et la limite droite par la vallée de la Dyle. Les vallées atteignent des cotes altimétriques assez faibles par rapport au « plateau » central et les rivières érodent les formations d'une manière importante et profonde, garantissant le caractère drainant des cours d'eau par rapport à l'aquifère des sables du Bruxellien.

Sur la coupe BB', la limite gauche est représentée par la vallée de la Senne également, pendant que la limite droite traverse la vallée de l'Argentine. Les deux vallées sont caractérisées par une découpe assez profonde des terrains et *a fortiori*, les cours d'eau qui s'y trouvent drainent la nappe du Bruxellien. Dans la partie gauche de cette seconde coupe, il apparaît que le niveau piézométrique interpolé passe sous la base des sables du Bruxellien avant d'arriver à la Senne. Il s'agit évidemment d'un artefact lié à l'interpolation quasiment linéaire entre le niveau situé dans les vallées juste un peu plus à l'Est et la Senne. En réalité, le niveau piézométrique remonte probablement entre la Senne et ces vallées.

Les coupes illustrent le caractère drainant des cours d'eau qui jouent le rôle de limites du modèle hydrogéologique (cet aspect est discuté au **CHAPITRE 3.3.1.2**).

3.3.1.2 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE RÉGIONAL

La suite de la description aborde le contexte hydrogéologique dans sa globalité, soit de manière régionale.

Dans un premier temps, les données de l'année 2013 (référence pour le régime permanent) sont étudiées. Ensuite, l'étude du contexte hydrogéologique est approfondie en étudiant les données des années 2009 à 2013 (référence pour la validation en régime transitoire).

3.3.1.2.1 ANNÉE DE RÉFÉRENCE POUR LE RÉGIME PERMANENT - 2013

Les **FIGURES 3-7 et 3-8** présentent les cartes piézométriques pour les formations de Sint-Huilbrechts-Hern, de Diest ainsi que des dépôts du Quaternaire respectivement pour les campagnes de mai – juin 2013 et de novembre 2013 (ces deux campagnes sont caractéristiques d'une situation piézométrique intermédiaire, entre les hautes eaux du mois de mars et les basses eaux du mois de septembre). Les **FIGURES 3-9 et 3-10** présentent les cartes piézométriques des sables du Bruxellien pour les mêmes périodes.

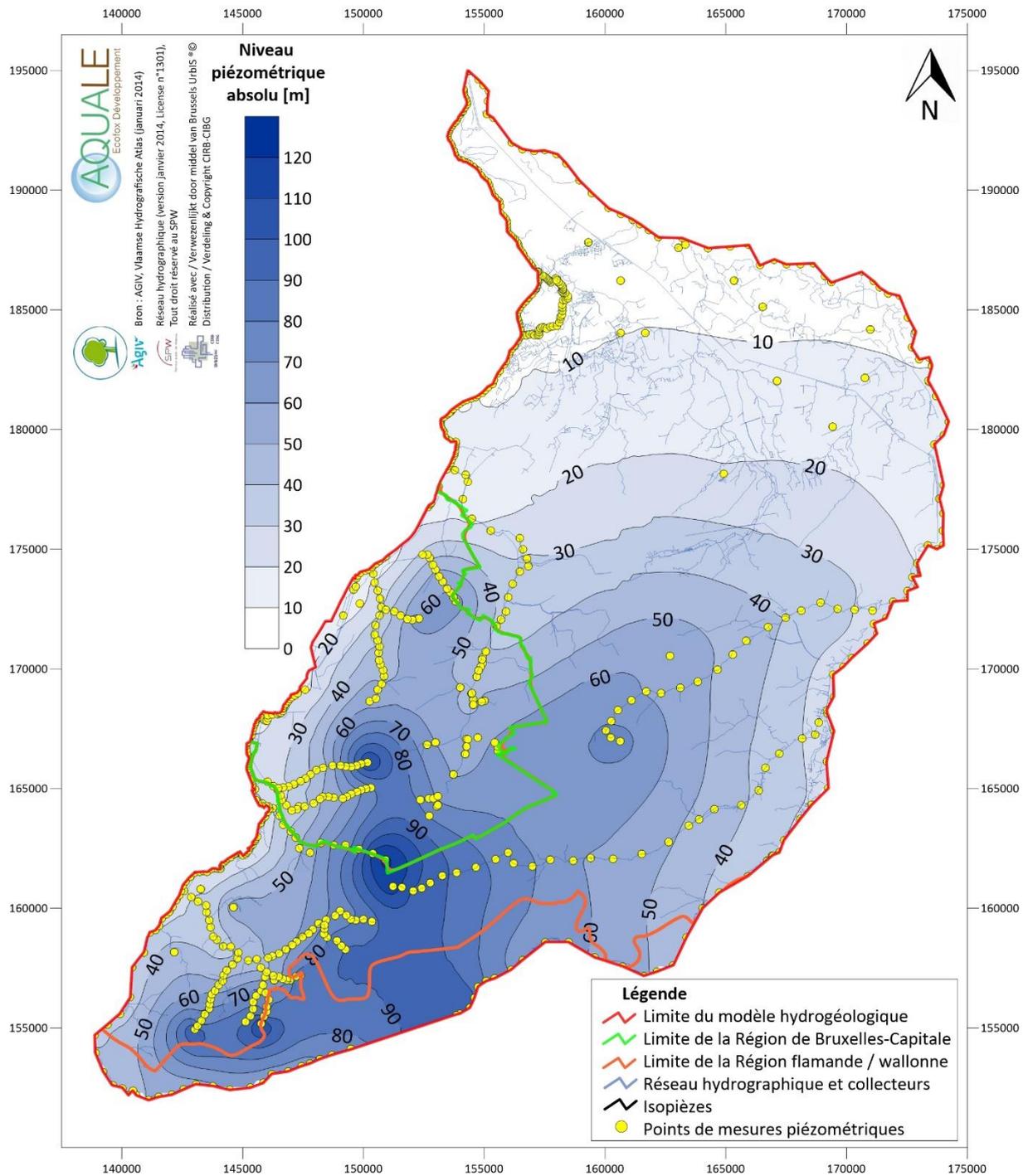


Figure 3-7 : Carte piézométrique des formations de Sint-Huilbrechts-Hern, de Diest ainsi que des dépôts du Quaternaire, campagne de mai et juin 2013 (contexte d'intermédiaires eaux)

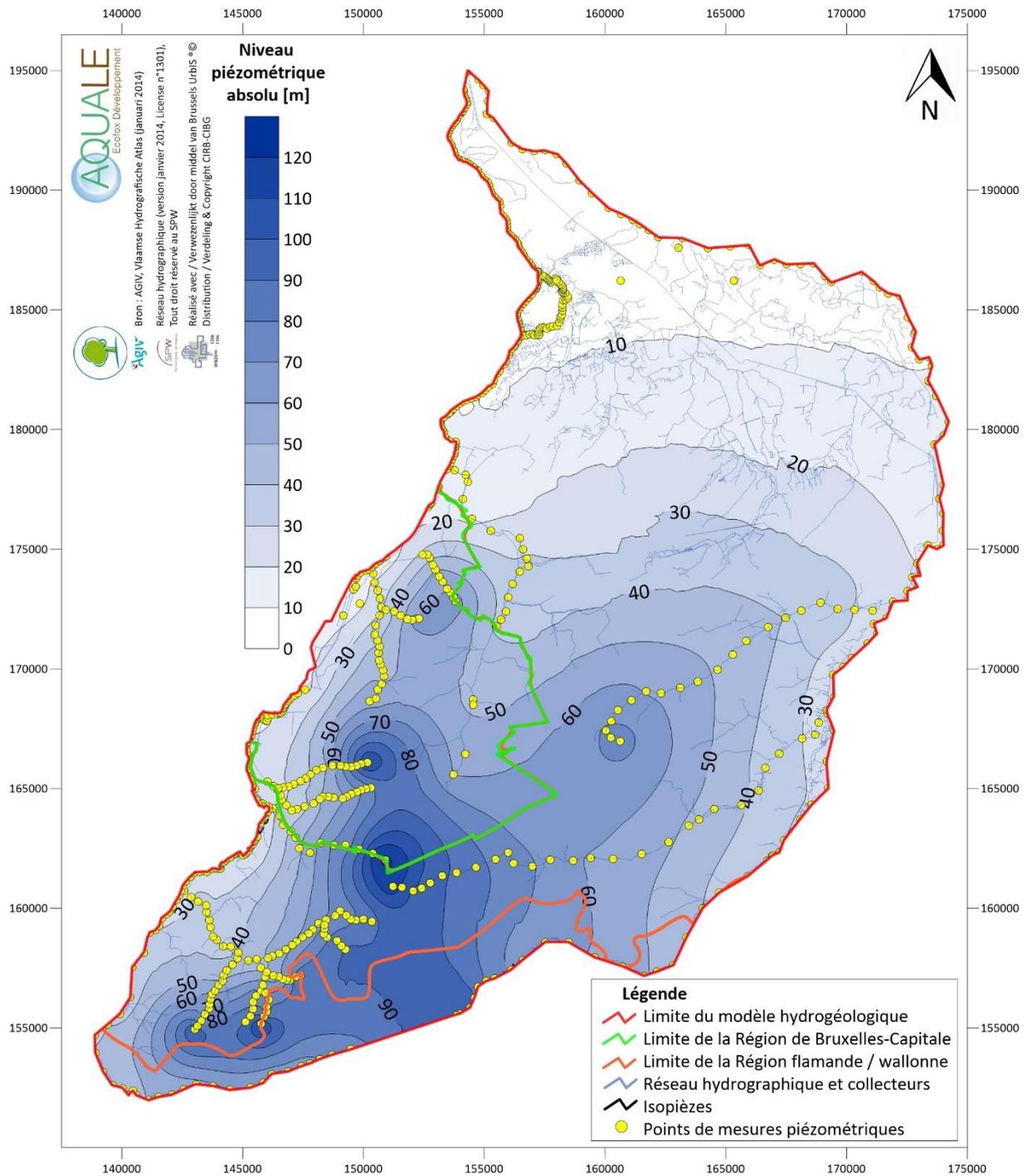


Figure 3-8 : Carte piézométrique des formations de Sint-Huilbrechts-Hern, de Diest ainsi que des dépôts du Quaternaire, campagne de novembre 2013 (contexte d'intermédiaires eaux)

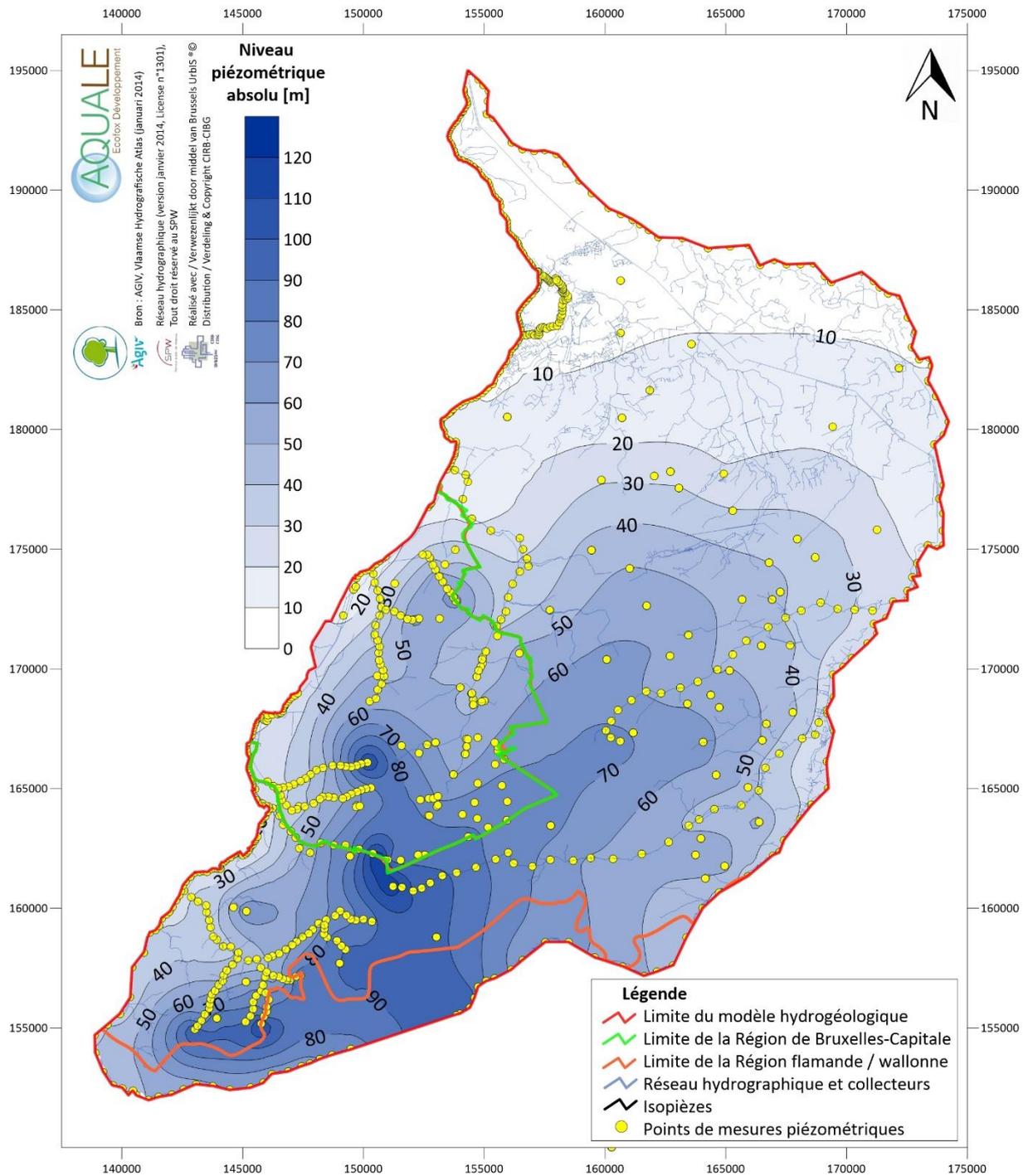


Figure 3-9 : Carte piézométrique de l'aquifère des sables du Bruxellien, campagne de mai et juin 2013 (contexte d'intermédiaires eaux)

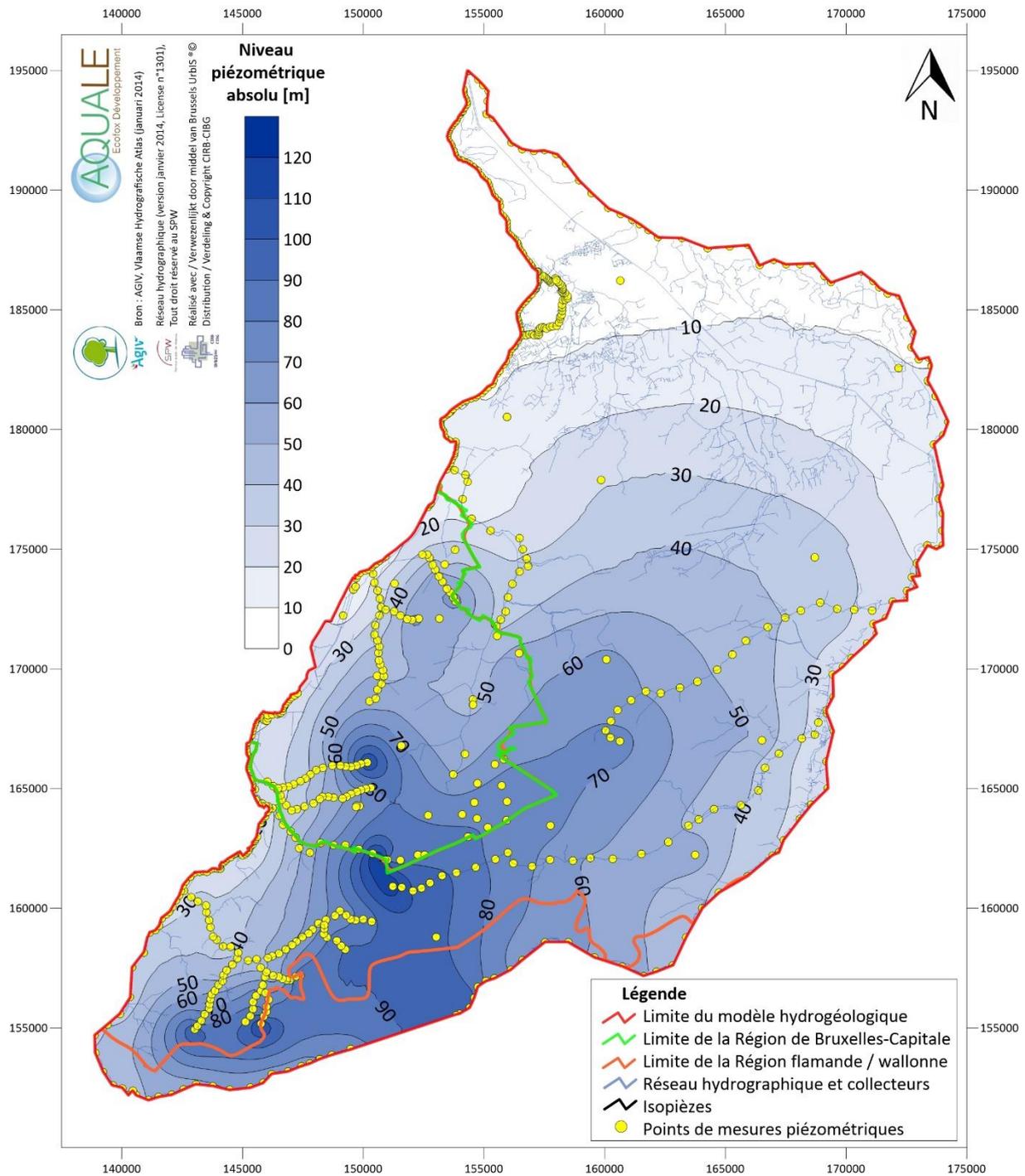


Figure 3-10 : Carte piézométrique de l'aquifère des sables du Bruxellien, campagne de novembre 2013 (contexte d'intermédiaires eaux)

Ces quatre cartes piézométriques ont été réalisées par krigeage en utilisant comme données de base :

- les niveaux piézométriques mesurés de chacun des aquifères durant la période concernée (voir **CHAPITRE 5.1.1**) ;
- les niveaux d'eau des rivières extraits du SRTM, de l'IGN ou du LIDAR ;
- les niveaux d'eau des sources.

Ces cartes sont donc des interprétations qu'il convient d'analyser dans leur globalité et non pas localement. En particulier, dans la réalité, la piézométrie en amont des points de sources des ruisseaux pris en considération est logiquement supérieure ou égale à la cote des points de source des ruisseaux qui constituent localement des points de sortie et non pas des sommets piézométriques tels que représentés sur les cartes.

Les deux premières cartes piézométriques (**FIGURES 3-7 et 3-8**) sont construites sur la base des niveaux d'eau mesurés dans plusieurs aquifères distincts, bien que tous « superficiels ». La valeur de ces cartes est donc toute relative, il ne s'agit pas d'une piézométrie réelle. Elles sont plutôt indicatives et permettent d'observer les éventuelles différences avec la piézométrie du Bruxellien, bien représentée quant à elle sur les **FIGURES 3-9 et 3-10**.

La prise en compte des niveaux d'eau des rivières pour la création de ces cartes permet de déterminer la situation du réseau hydrographique par rapport au niveau des eaux souterraines.

Les cartes piézométriques (**FIGURES 3-7 et 3-8**) confirment que les écoulements des eaux souterraines dans les formations de Sint-Huilbrechts-Hern de Diest ainsi que des dépôts du Quaternaire sont orientés globalement du Sud vers le Nord (des niveaux hauts vers les niveaux bas), soit depuis la Région Wallonne vers la Région Flamande. Il existe un transfert d'eau depuis la nappe vers le réseau hydrographique (situé en contrebas des niveaux de la nappe à proximité). Ce contact entre les eaux de surface et les eaux souterraines est cependant limité et non-continu. En effet, certaines portions de ruisseaux sont isolées, par exemple par la présence d'un matériau encaissant très peu perméable, comme c'est le cas au droit des argiles alluviales, ou plus ponctuellement par le réaménagement paysager de certains ruisseaux pourvus d'un géotextile imperméable. Les écoulements se font néanmoins globalement vers les ruisseaux, ce qui confirme leur caractère majoritairement drainant. Il est important de noter que la nappe du Bruxellien devient captive dans la partie Nord de la zone étudiée, en ce compris dans la vallée de la Dyle étant donné le pendage orienté Nord-Est. L'aquifère est par ailleurs localement recouvert des Membres d'Ursel et d'Asse (**FIGURE 3-2**), ce qui supprime le contact entre les eaux souterraines et les eaux provenant de la surface.

Une partie du réseau hydrographique est également alimentée par déversement et ruissellement depuis des sources en amont. Les écoulements sont par ailleurs influencés par la présence des collecteurs (reprenant généralement le tracé des cours d'eau), supposés majoritairement drainants de par la présence potentielle de brèches dues à leur état de vétusté et la présence de remblais drainants le long de leur tracé. Les remblais facilitent le cas échéant le contact entre les eaux souterraines et ces derniers.

On observe la même situation sur les cartes piézométriques de l'aquifère sableux du Bruxellien (**FIGURES 3-9 et 3-10**), dans lequel les écoulements sont orientés du Sud vers le Nord également (des niveaux hauts vers les niveaux bas). L'aquifère des Sables du Bruxellien est en contact hydraulique (direct ou indirect via le Quaternaire) avec la plupart des eaux de surface qui s'écoulent sur son étendue (contact cependant limité et non-continu comme mentionné dans le paragraphe précédent) ainsi qu'avec les collecteurs. En analysant les cartes piézométriques, on constate que l'eau souterraine s'écoule vers les ruisseaux et les rivières qui jouent un rôle drainant et constituent avec les collecteurs les principaux exutoires de la nappe aquifère (puisque ils sont situés en contrebas des niveaux de la nappe à proximité).

Ces cartes démontrent qu'il existe deux aquifères pour lesquels les niveaux piézométriques sont globalement identiques, ce qui tend à montrer un équilibre important entre les deux nappes. Elles ne sont que localement distinctes. Cela est principalement lié à la présence d'une couche imperméable ou semi-perméable qui sépare ces deux aquifères par endroit. Il s'agit des Membres d'Ursel et d'Asse qui sont considérés comme aquicludes et donc pratiquement imperméables. Ils séparent les deux aquifères par endroit car ils ne sont pas présents sur l'ensemble de la zone modélisée. Cette observation est confirmée par les **FIGURES 3-11 et 3-12** qui reprennent les cartes des isodifférences entre les deux nappes respectivement pour les campagnes de mai – juin 2013 et de novembre 2013.

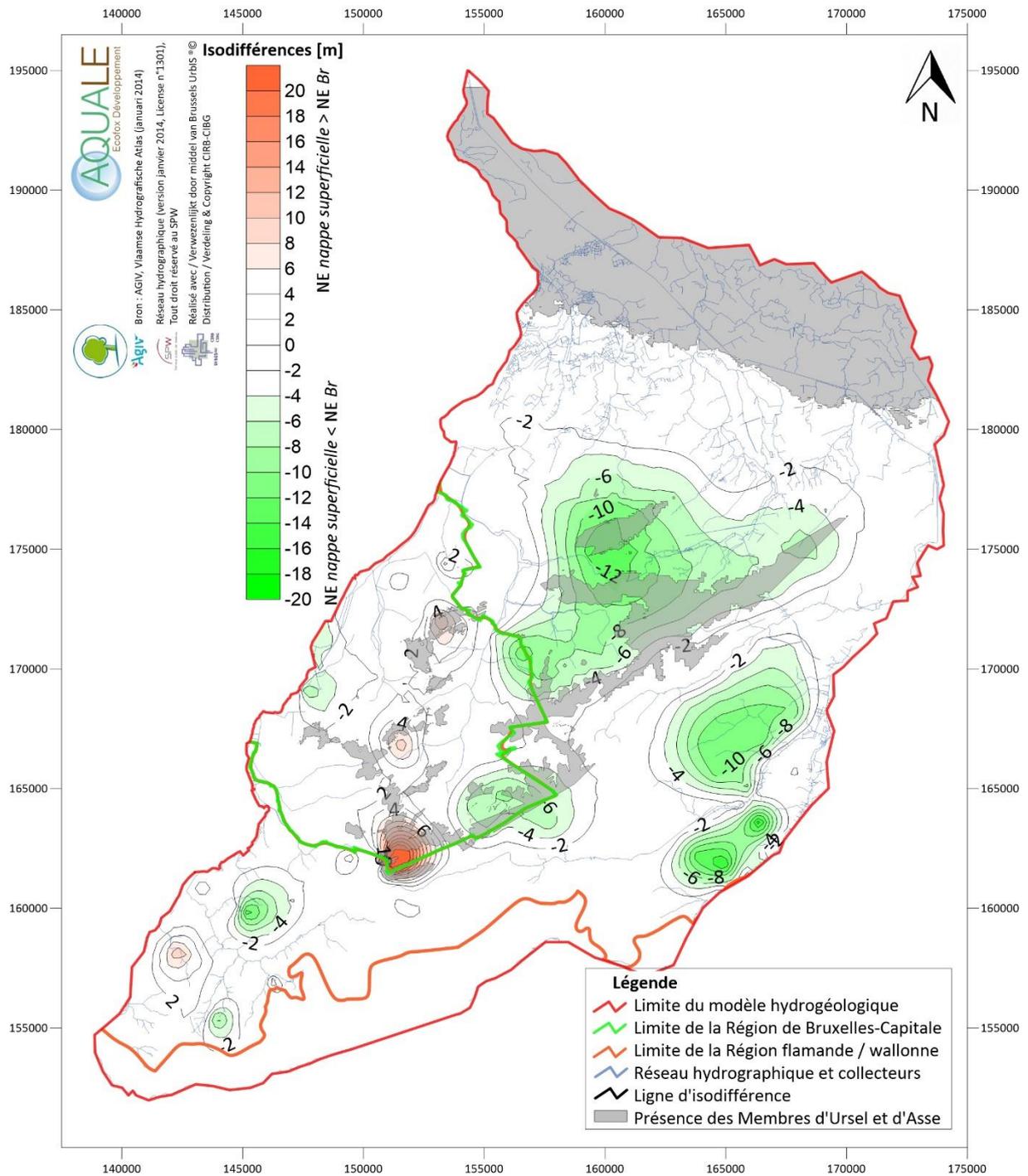


Figure 3-11 : Carte des isodifférences entre la piézométrie des formations de Sint-Huilbrechts-Hern, de Diest ainsi que des dépôts du Quaternaire et la piézométrie de l'aquifère des sables du Bruxellien, campagne de mai et juin 2013

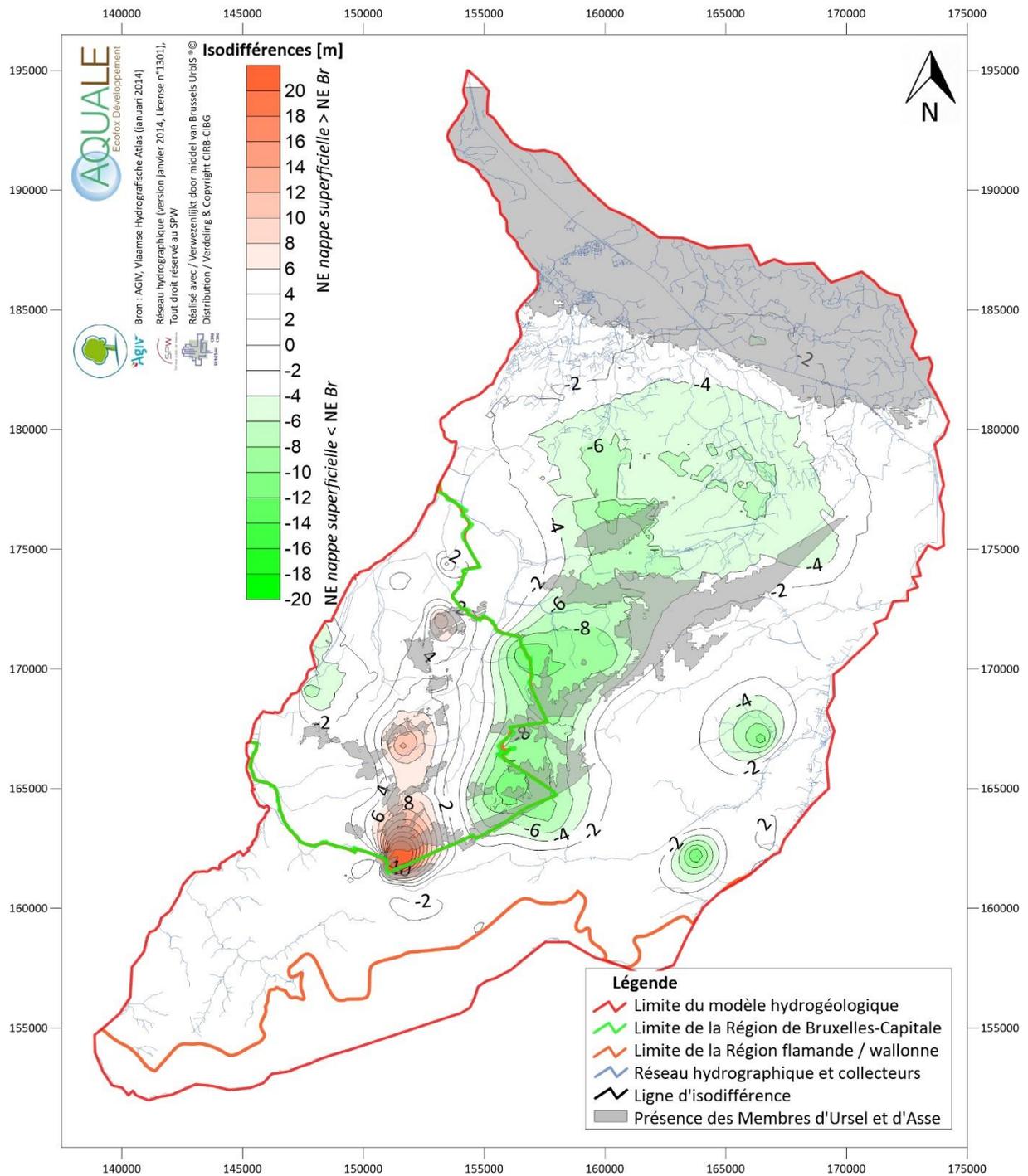


Figure 3-12 : Carte des isodifférences entre la piézométrie des formations de Sint-Huilbrechts-Hern, de Diest ainsi que des dépôts du Quaternaire et la piézométrie de l'aquifère des sables du Bruxellien, campagne de novembre 2013

Ces figures sont à interpréter comme suit :

- les zones vertes sont caractérisées par un niveau d'eau dans la nappe du Bruxellien supérieur au niveau d'eau dans la nappe des formations sus-jacentes ;

- les zones rouges sont caractérisées par un niveau d'eau dans la nappe du Bruxellien inférieur au niveau d'eau dans la nappe des formations sus-jacentes ;
- les zones blanches sont caractérisées par un niveau d'eau à l'équilibre (ou quasiment) entre les deux nappes.

Ces cartes sont à interpréter avec précautions car elles sont basées sur des points de mesures différents pour les deux nappes. De ce fait, dans certaines zones, une différence piézométrique peut apparaître (zones colorées en vert ou en rouge sur la carte) alors qu'elle n'existe pas en réalité. Cela serait lié à la prise en considération d'une mesure dans une des deux nappes qui ne serait pas accompagnée d'une mesure dans la même zone dans l'autre nappe.

En particulier, la zone rouge importante à l'extrémité Sud de la Région de Bruxelles-Capitale est liée à la présence des piézomètres Soignes – T19 et Soignes – S1 dans la nappe du Bruxellien caractérisés par un niveau d'eau particulièrement bas. Dans cette zone, la nappe des formations sus-jacentes n'est pas caractérisée par un piézomètre et l'interpolation dans cette nappe à cet endroit est donc guidée par les mesures les plus proches aux alentours. De ce fait, le niveau piézométrique dans la nappe du Bruxellien apparaît largement inférieur au niveau piézométrique des nappes sus-jacentes.

Ainsi, il est considéré que les zones colorées de faibles superficies ne sont *a priori* pas représentatives d'un déséquilibre ou d'un compartimentage des nappes mais bien liées à des artefacts d'interpolation ou à l'absence de données. Par exemple, l'axe Nord-Sud situé entre les vallées de la Woluwe et du Maelbeek est caractérisé par 3 zones successives où la nappe superficielle semble être d'un niveau plus élevé que la nappe du Bruxellien. Cette axe est également caractérisé par la présence des Membres d'Ursel et d'Asse mais il n'y a aucun point de mesure dans le Quaternaire dans cette zone pour appuyer cette observation.

A l'inverse, la grande zone verte couvrant une surface importante dans la partie centrale supérieure du modèle représente bien une zone où les deux nappes sont en déséquilibre. Cette zone se superpose assez bien avec la présence des Membres d'Ursel et d'Asse qui créent le compartimentage. La nappe du Bruxellien a donc un caractère plutôt captif dans cette zone.

3.3.1.2.2 PÉRIODE DE RÉFÉRENCE POUR LE RÉGIME TRANSITOIRE – 2009-2013

Pour parvenir à calibrer le modèle en régime transitoire, il est nécessaire de comprendre la manière dont les niveaux d'eau évoluent, d'identifier la source de ces variations piézométriques. Le modèle étant validé en régime transitoire sur les années 2009 à 2013, les données piézométriques sont étudiées sur cette période. De nombreux piézomètres ont fait l'objet d'un suivi automatisé ou manuel.

Les **FIGURES 3-13 à 3-22** présentent l'évolution des niveaux d'eau de la nappe des sables du bruxellien au droit de ces piézomètres durant les années 2009 à 2013. Ces figures illustrent les évolutions piézométriques pour différentes gammes de hauteur d'eau (niveaux absolus compris entre 0 et 10 m à la **FIGURE 3-13**, 10 m et 20 m à la **FIGURE 3-14**, ..., 90 m et 100 m à la **FIGURE 3-22**). De ce fait, certaines courbes sont tronquées ; les points bas étant visibles sur une figure et les points hauts sur la suivante.

Ces figures permettent de classer les piézomètres en fonction du comportement de la nappe qui y est observé. Les différents critères observés sont les suivants :

- type de variation : saisonnière, annuelle, descente continue, montée continue, stabilité... ;
- amplitude de la variation :
 - o entre 0 et 10 cm : piézométrie jugée constante ;
 - o entre 10 et 50 cm : amplitude faible ;
 - o entre 50 et 100 cm : amplitude moyenne ;
 - o supérieure à 100 cm : amplitude élevée ;

- nombre de mesures entre 2009 et 2013 :
 - o entre 0 et 10 mesures (soit entre 0 à 2 mesures par an en moyenne) : **faible** ;
 - o entre 11 et 100 mesures (soit entre 2 à 10 mesures par an en moyenne) : **moyen** ;
 - o supérieur à 100 mesures (soit supérieur à 10 mesures par an en moyenne) : **élevé**.

Les commentaires sur l'ensemble des figures sont repris après celles-ci.

La **FIGURE 3-23** présente une carte de localisation des différents piézomètres dont le niveau d'eau est repris dans les **FIGURES 3-13 à 3-22**. Sur cette carte, une symbologie adaptée a été utilisée de manière à identifier aisément le numéro de la figure présentant l'évolution du niveau d'eau du piézomètre correspondant.

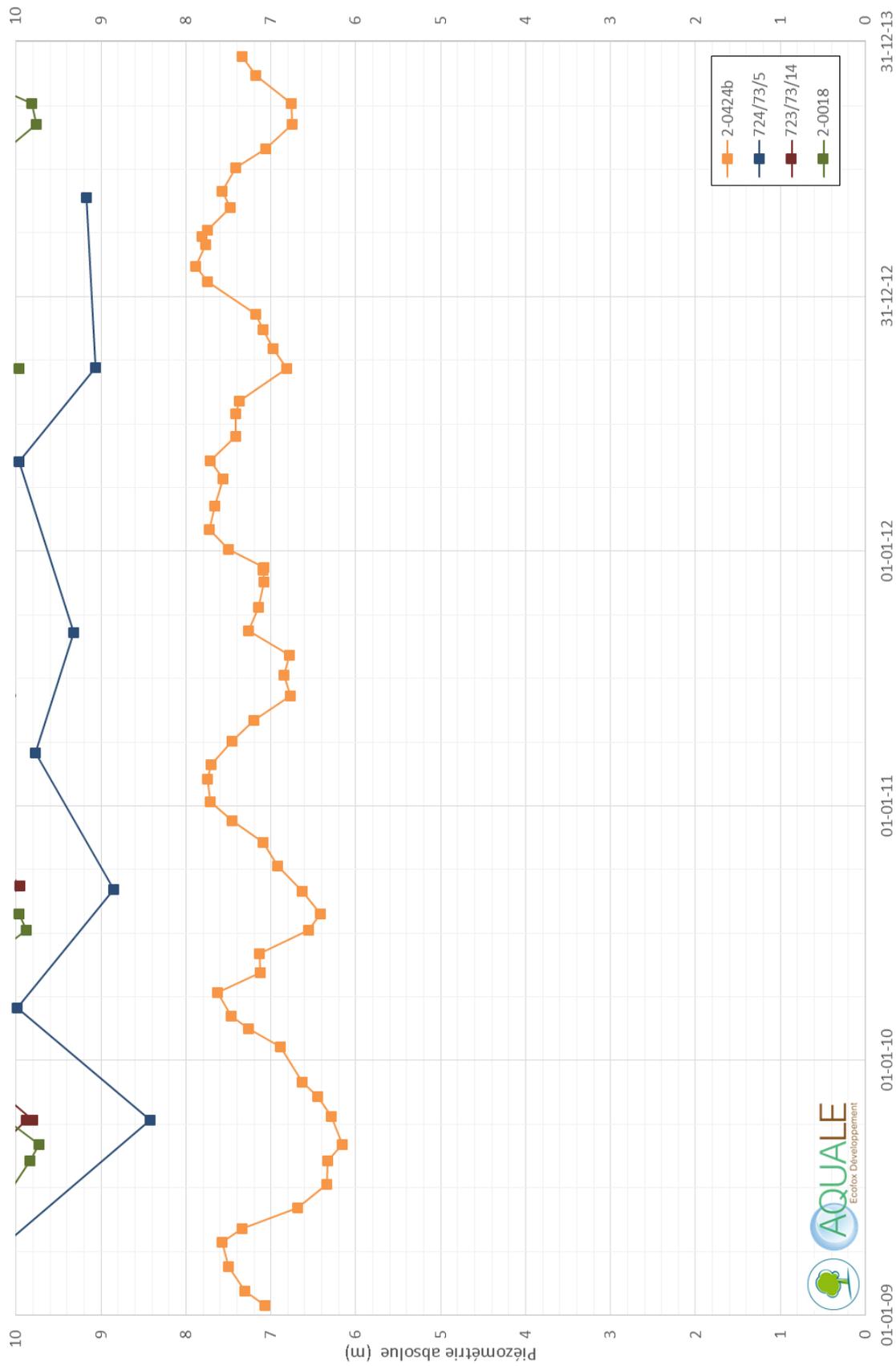


Figure 3-13 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Bruxellien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 0 et 10 m)

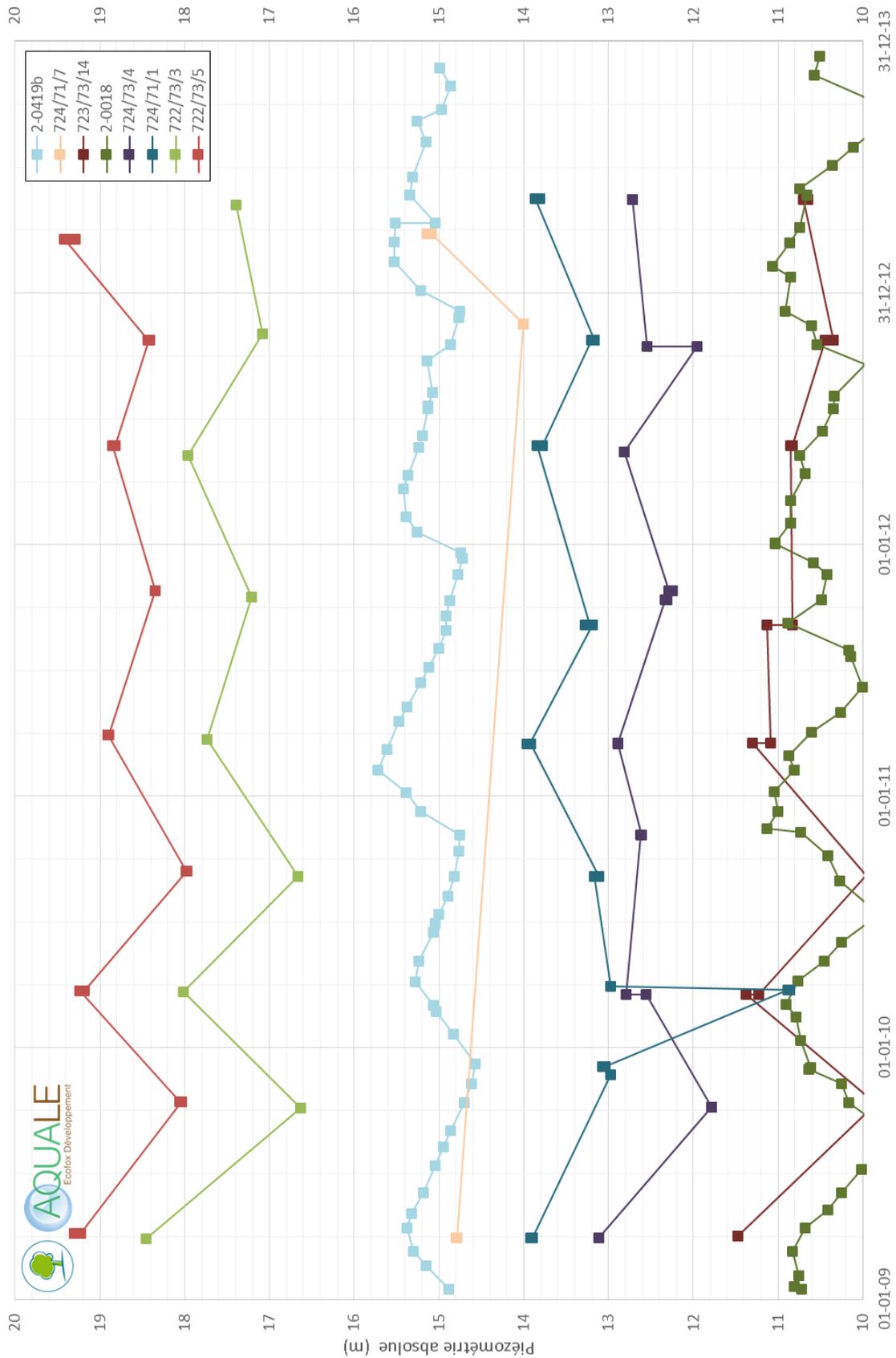


Figure 3-14 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Bruxellien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 10 et 20 m)

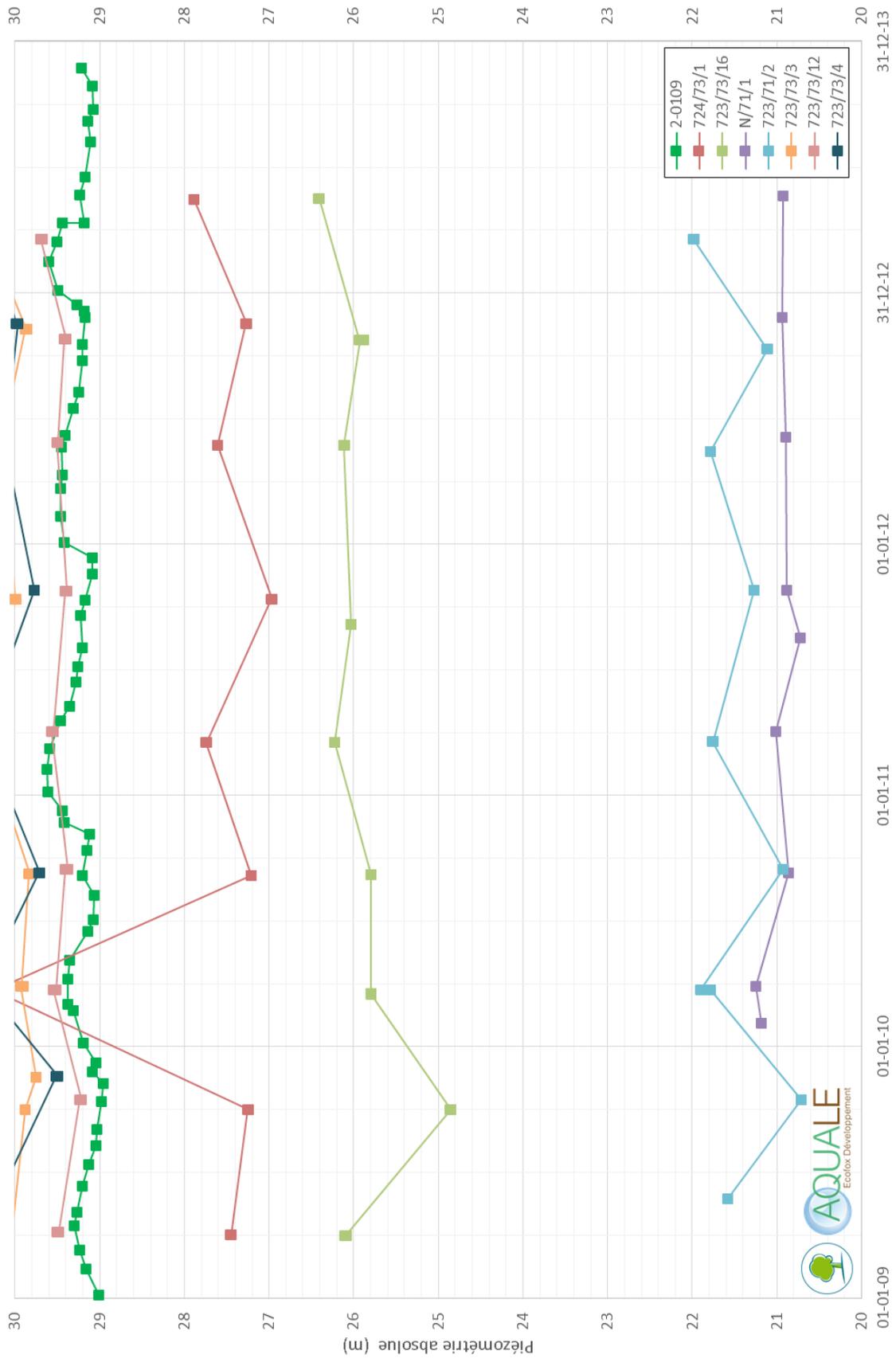


Figure 3-15 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Bruxellien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 20 et 30 m)

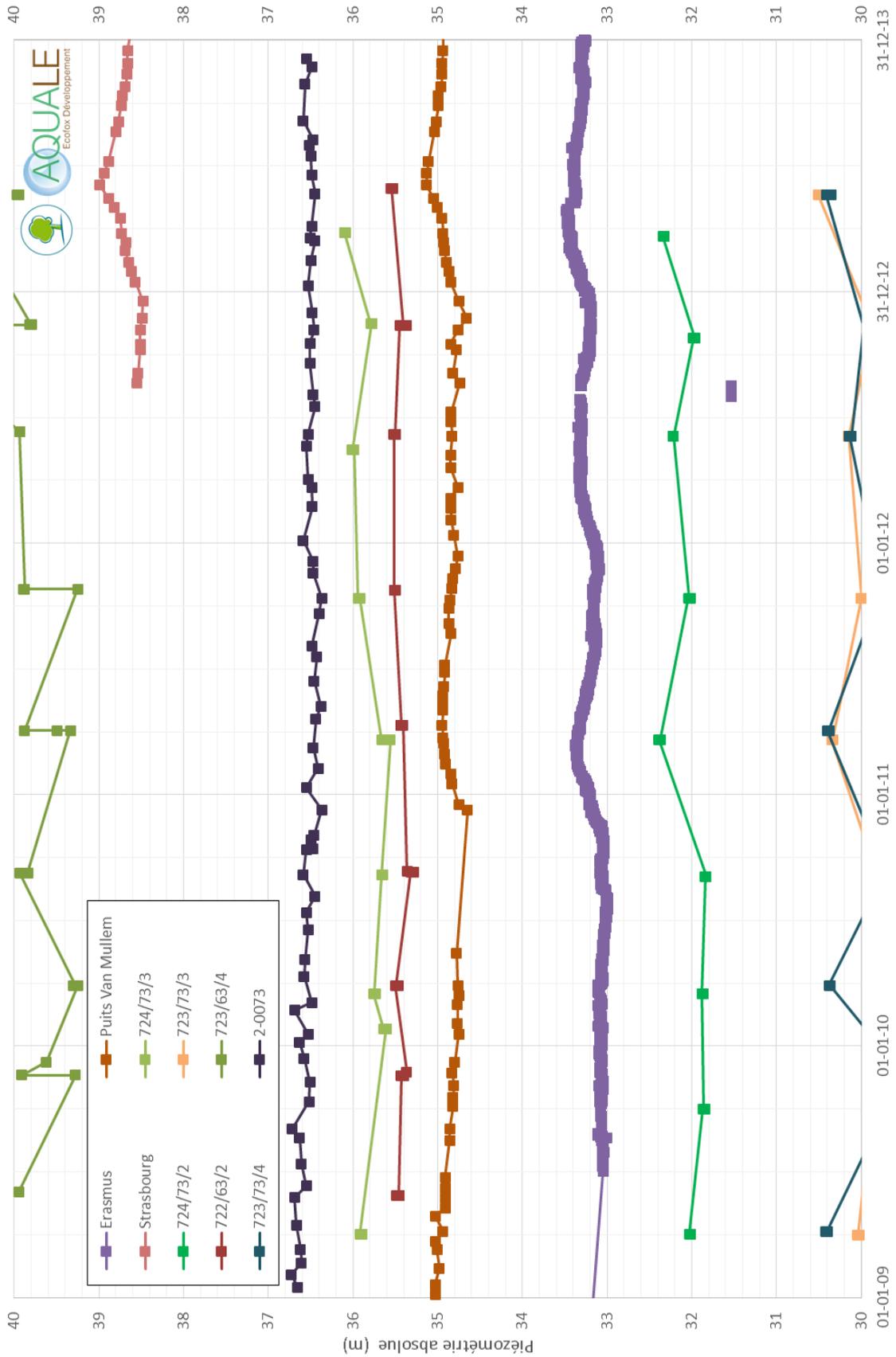


Figure 3-16 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Bruxellien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 30 et 40 m)

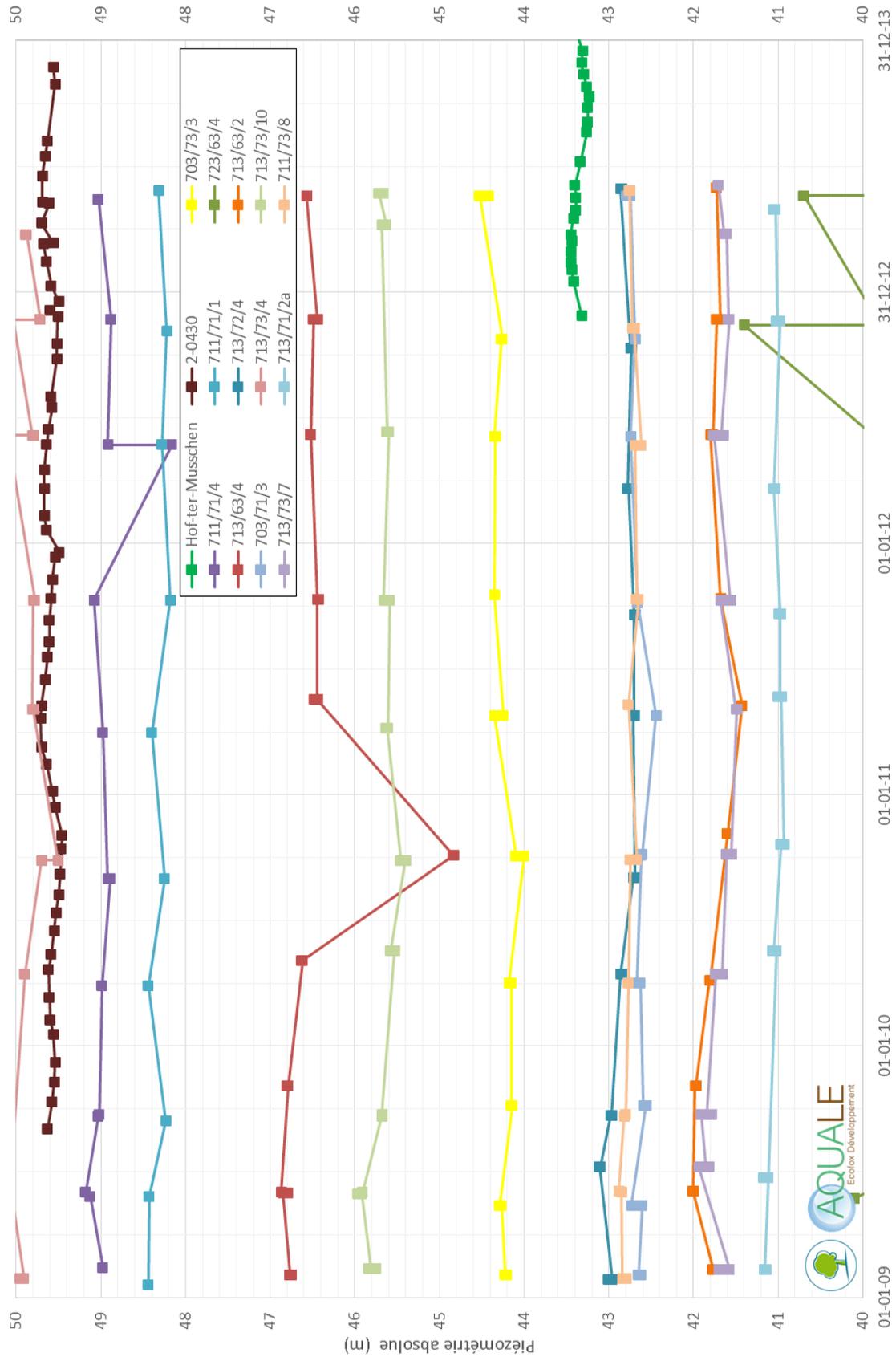


Figure 3-17 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Bruxellien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 40 et 50 m)

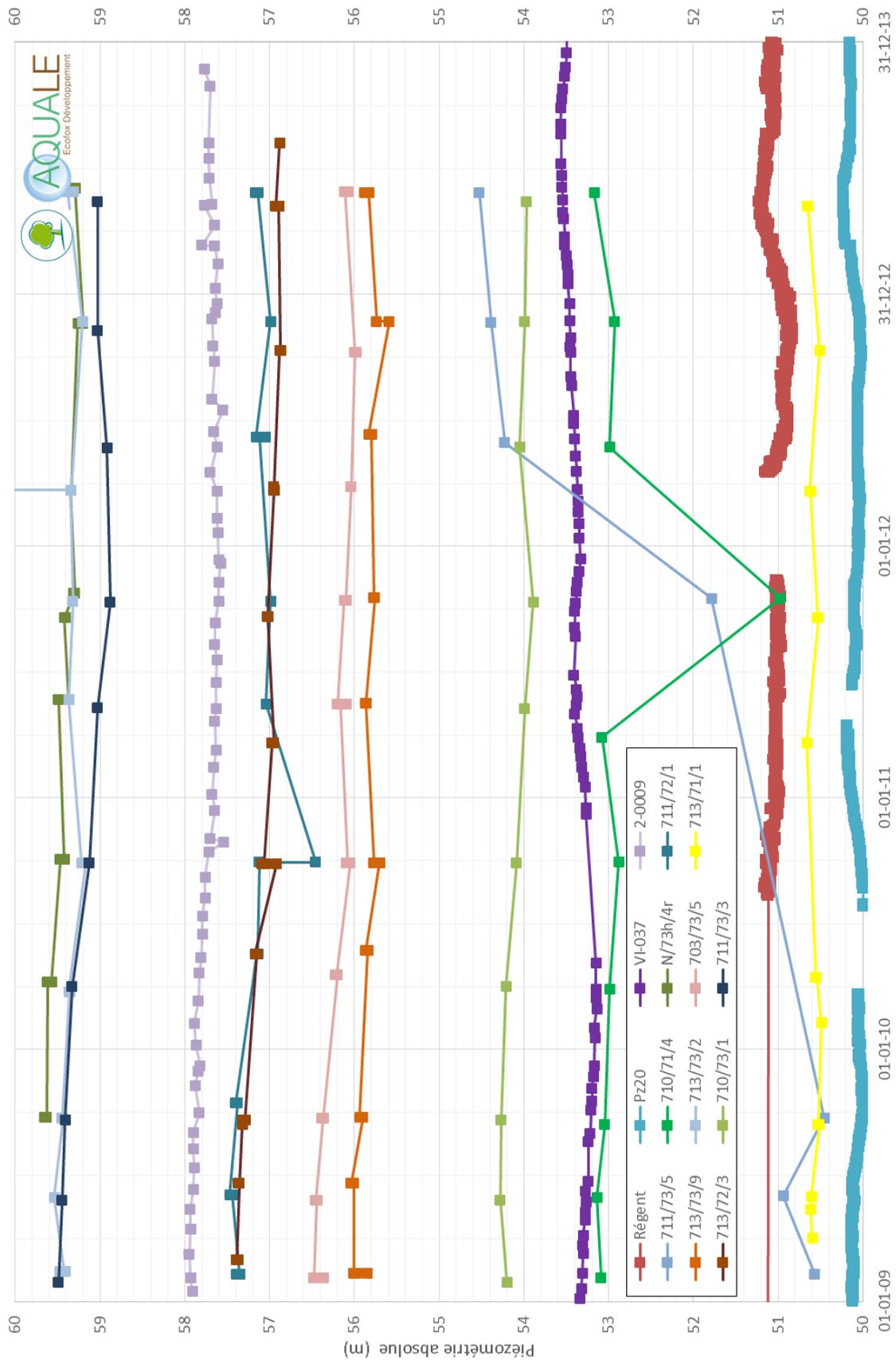


Figure 3-18 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Bruxellien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 50 et 60 m)

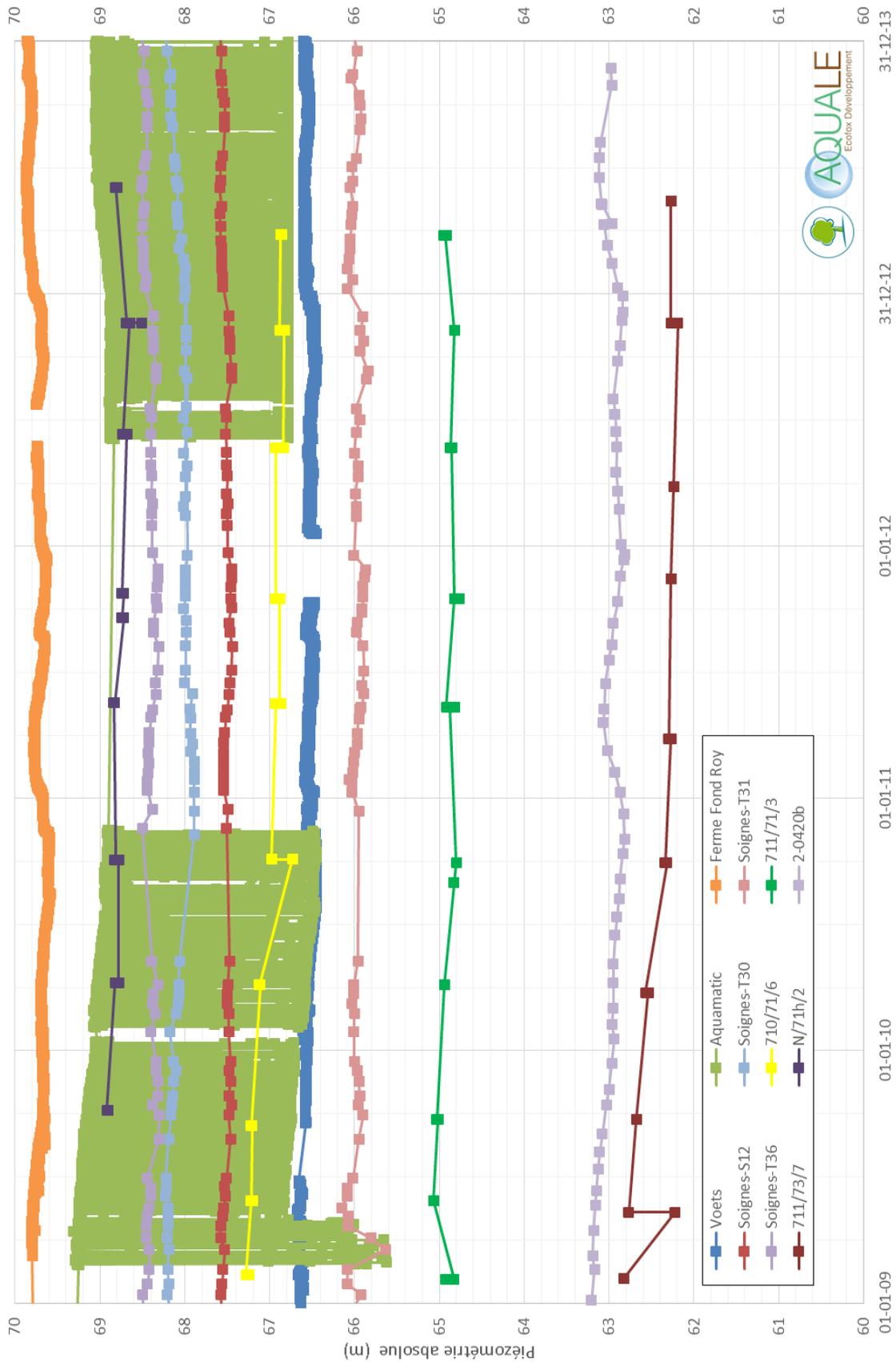


Figure 3-19 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Bruxellien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 60 et 70 m)

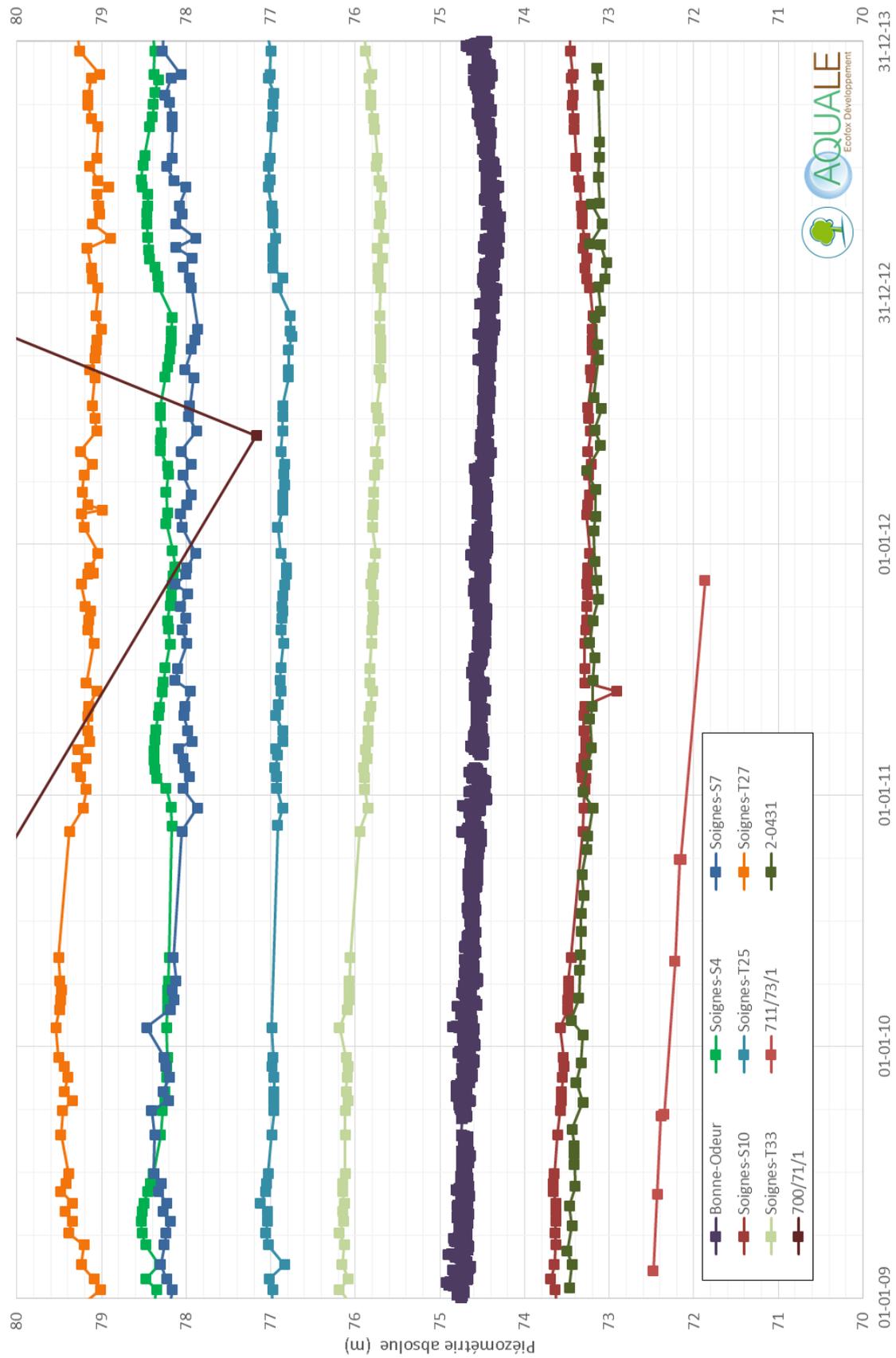


Figure 3-20 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Bruxellien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 70 et 80 m)



Figure 3-21 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Bruxellien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 80 et 90 m)

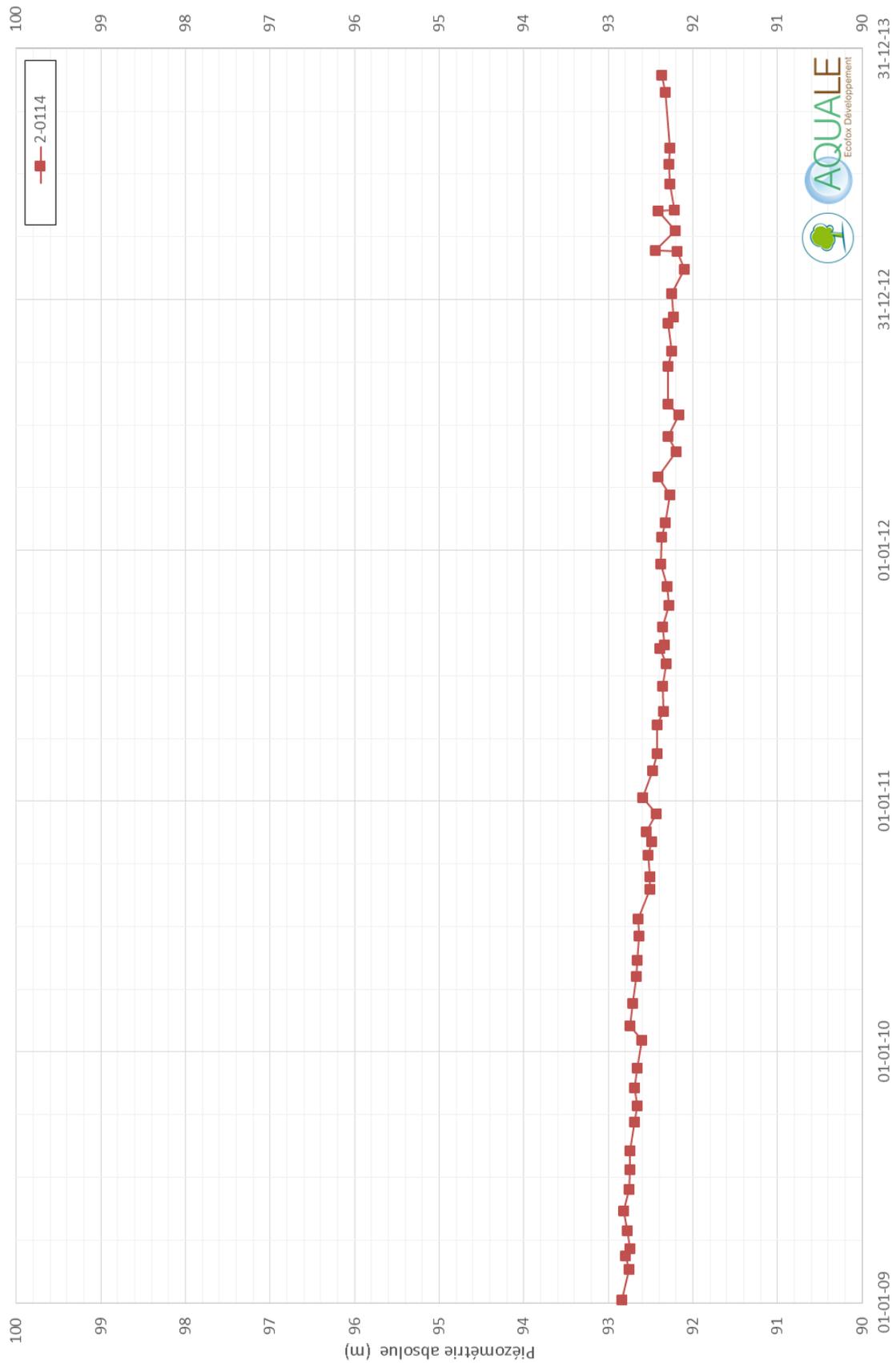


Figure 3-22 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Bruxellien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 90 et 100 m)

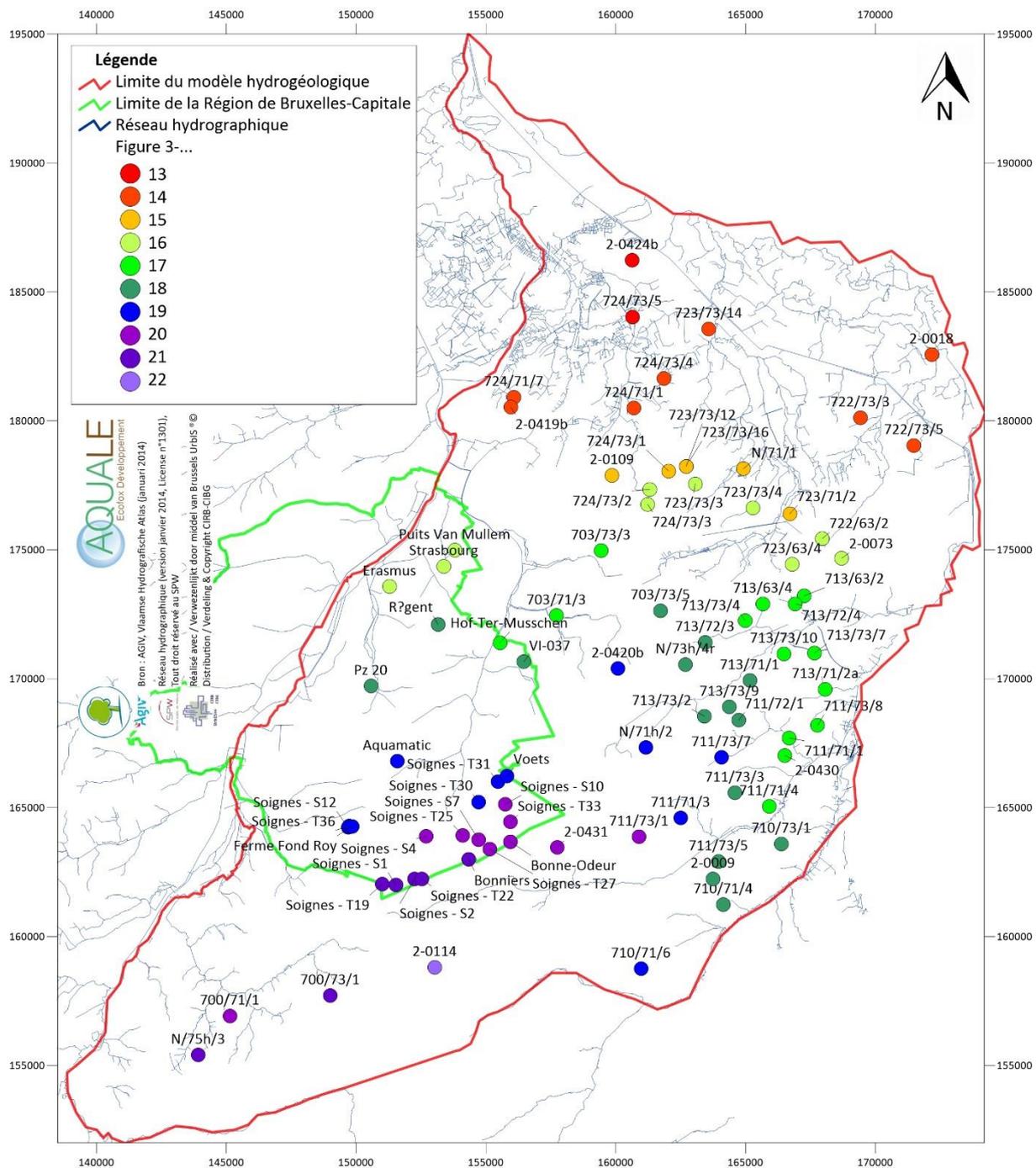


Figure 3-23 : Localisation des piézomètres pour lesquels un suivi piézométrique est réalisé entre 2009 et 2013 (ceux-ci sont repris aux figures 3-13 à 3-22)

La **FIGURE 3-23** ci-dessus illustre le fait que de nombreux piézomètres sont présents au sein de la zone modélisée. Bon nombre d'entre eux ont fait l'objet d'un suivi automatisé (en Région de Bruxelles-Capitale, ce suivi est réalisé à raison d'une mesure par heure) ; d'autres ont fait l'objet d'un suivi manuel très régulier (en Région de Bruxelles-Capitale, ce suivi est réalisé à raison de deux mesures par an) ; enfin, quelques-uns ont été relevés occasionnellement. La qualité des informations est donc très variable.

Le **TABLEAU 3-2** ci-dessous reprend les observations sur chacune des figures.

Figure	Piézomètre	Type de variation	Amplitude moyenne de la variation	Nombre de mesures entre 2009 et 2013	Commentaire
3-13	2-0424b	saisonnaire	élevée	moyen	
	724/73/5	saisonnaire	élevée	faible	
3-14	2-0018	saisonnaire	élevée	moyen	
	723/73/14	saisonnaire	élevée	faible	Depuis début 2011, la variation saisonnière est moins perceptible.
	724/73/4	saisonnaire	moyenne	faible	Depuis début 2011, la variation saisonnière est moins perceptible. Parfois, deux mesures effectuées avec un faible intervalle de temps montrent une variation importante.
	724/71/1	saisonnaire	moyenne	faible	Parfois, deux mesures effectuées avec un faible intervalle de temps montrent une variation importante.
	724/71/7	/	/	faible	Trop peu de mesures pour une interprétation.
	2-0419b	saisonnaire	moyenne	moyen	
	722/73/3	saisonnaire	élevée	faible	
	722/73/5	saisonnaire	élevée	faible	
3-15	N/71/1	stable	constante	faible	
	723/71/2	saisonnaire	moyenne	faible	
	723/73/16	saisonnaire	faible	faible	La mesure du 1 ^{er} octobre 2009 semble particulièrement basse par rapport aux autres.
	724/73/1	saisonnaire	moyenne	faible	La mesure du 26 mars 2010 semble particulièrement haute par rapport aux autres.
	2-0109	saisonnaire	faible	moyen	
	723/73/12	saisonnaire	faible	faible	
3-16	723/73/3	saisonnaire	faible	faible	
	723/73/4	saisonnaire	faible	faible	
	724/73/2	saisonnaire	faible	faible	

Figure	Piézomètre	Type de variation	Amplitude moyenne de la variation	Nombre de mesures entre 2009 et 2013	Commentaire
3-16	Erasmus	saisonnière	faible	élevé	
	Puits Van Mullem	saisonnière	faible	moyen	
	722/63/2	stable	constante	faible	
	724/73/3	saisonnière	faible	faible	
	2-0073	stable	constante	moyen	
	Strasbourg	saisonnière	faible	moyen	Mesures uniquement en 2012 et 2013.
	723/63/4	/	/	moyen	Trop de variations à courts termes pour interpréter.
3-17	713/71/2a	stable	constante	faible	
	713/73/7	descendant jusqu'en 2010 - 2011 puis montant	faible	moyen	
	713/63/2	descendant jusqu'en 2010 - 2011 puis montant	faible	faible	
	703/71/3	descendant jusqu'en 2010 - 2011 puis montant	faible	faible	
	713/72/4	descendant jusqu'en 2010 - 2011 puis montant	faible	faible	
	711/73/8	stable	constante	faible	
	Hof-Ter-Musschen	saisonnière	faible	moyen	Mesures uniquement en 2012 et 2013.
	703/73/3	descendant jusqu'en 2010 - 2011 puis montant	faible	faible	
	713/73/10	descendant jusqu'en 2010 - 2011 puis montant	faible	faible	
	713/63/4	descendant jusqu'en 2010 - 2011 puis montant	faible	faible	La mesure du 5 octobre 2010 semble particulièrement basse par rapport aux autres.
	711/71/1	stable	constante	faible	

Figure	Piézomètre	Type de variation	Amplitude moyenne de la variation	Nombre de mesures entre 2009 et 2013	Commentaire
3-17	711/71/4	stable	constante	faible	La mesure du 23 mai 2012 semble particulièrement basse par rapport aux autres.
	2-0430	saisonniers	faible	moyen	
	713/73/4	descendant jusqu'en 2010 - 2011 puis montant	faible	faible	
3-18	Pz20	saisonniers	faible	élevé	La mesure du 17 octobre 2011 semble particulièrement basse par rapport aux autres.
	713/71/1	saisonniers	faible	faible	
	711/73/5	montant	élevé	faible	
	Régent	saisonniers	faible	élevé	
	710/71/4	saisonniers	faible	faible	
	VI-037	descendant jusqu'en 2010 - 2011 puis montant	faible	moyen	
	710/73/1	descendant	faible	faible	
	713/73/9	descendant	faible	faible	
	703/73/5	descendant	faible	faible	
	711/72/1	descendant	faible	faible	
	713/72/3	descendant	faible	faible	
	2-0009	descendant	faible	moyen	
	711/73/3	descendant	moyenne	faible	
	713/73/2	descendant jusqu'en 2010 - 2011 puis montant	faible	faible	
N/73h/4r	descendant	faible	faible		
3-19	711/73/7	descendant	faible	faible	
	2-0420b	saisonniers	faible	moyen	
	711/71/3	saisonniers	faible	faible	
	Soignes-T31	stable	constante	élevé	
	Voets	stable	constante	élevé	
	710/71/6	descendant	faible	faible	
	Soignes-S12	stable	constante	moyen	
	Soignes-T30	descendant	faible	moyen	
Soignes-T36	stable	constante	moyen		

Figure	Piézomètre	Type de variation	Amplitude moyenne de la variation	Nombre de mesures entre 2009 et 2013	Commentaire
3-19	N/71h/2	stable	constante	faible	
	Aquamatic	descendant jusqu'en 2010 - 2011 puis montant	faible	élevé	Les mesures oscillent très fortement. Le piézomètre fait l'objet d'une activité de captage.
	Ferme Fond Roy	saisonniers	faible	élevé	
3-20	711/73/1	descendant	moyenne	faible	Mesures uniquement entre 2009 et 2011.
	2-0431	descendant jusqu'en 2013 puis montant	faible	moyen	
	Soignes-S10	descendant jusqu'en 2013 puis montant	faible	moyen	
	Bonne-Odeur	descendant jusqu'en 2013 puis montant	faible	élevé	
	Soignes-T33	descendant jusqu'en 2013 puis montant	faible	moyen	
	Soignes-T25	descendant jusqu'en 2013 puis montant	faible	moyen	
	Soignes-S7	descendant jusqu'en 2013 puis montant	faible	moyen	
	Soignes-S4	descendant jusqu'en 2013 puis montant	faible	moyen	
	Soignes-T27	descendant jusqu'en 2013 puis montant	faible	moyen	
	700/71/1	descendant jusqu'en 2010 - 2011 puis montant	moyenne	faible	La mesure du 7 juin 2012 semble particulièrement basse par rapport aux autres.
3-21	Bonniers	descendant jusqu'en 2013 puis montant	faible	élevé	

Figure	Piézomètre	Type de variation	Amplitude moyenne de la variation	Nombre de mesures entre 2009 et 2013	Commentaire
3-21		avec composante saisonnière			
	Soignes-S2	descendant jusqu'en 2013 puis montant avec composante saisonnière	faible	moyen	
	Soignes-T22	descendant jusqu'en 2013 puis montant avec composante saisonnière	faible	moyen	
	Soignes-T19	descendant jusqu'en 2013 puis montant avec composante saisonnière	faible	élevé	
	Soignes-S1	descendant jusqu'en 2013 puis montant avec composante saisonnière	faible	moyen	
	700/73/1	/	/	faible	Trop peu de mesures pour une interprétation.
	N/75h/3	stable	constante	faible	La mesure du 4 juin 2013 semble particulièrement basse par rapport aux autres.
3-22	2-0114	descendant jusqu'en 2013 puis montant	faible	moyen	

Tableau 3-2 : Comportement de la nappe du Bruxellien au droit des différents piézomètres entre 2009 et 2013

Ce tableau permet d'identifier différents types de variation. Sur les 85 piézomètres repris dans le tableau :

- 3 sont jugés inadaptés à l'interprétation (724/71/7, 723/63/4 et 700/73/1) ;

- 1 est caractérisé par un niveau d'eau montant fortement durant les 5 années étudiées ;
- 12 sont caractérisés par un niveau d'eau descendant durant les 5 années étudiées :
 - o pour 10 d'entre eux, le niveau d'eau varie faiblement ;
 - o pour 2 d'entre eux, le niveau d'eau varie moyennement ;
- 12 sont caractérisés par un niveau d'eau descendant jusqu'en 2010 – 2011 puis remontant :
 - o pour 11 d'entre eux, le niveau d'eau varie faiblement ;
 - o pour 1 d'entre eux, le niveau d'eau varie moyennement ;
- 14 sont caractérisés par un niveau d'eau descendant faiblement jusqu'en 2013 puis remontant :
 - o pour 9 d'entre eux, il n'y a pas de composante saisonnière ;
 - o pour 5 d'entre eux, une composante saisonnière est visible ;
- 30 sont caractérisés par un niveau d'eau variant saisonnièrement :
 - o pour 6 d'entre eux, la variation saisonnière est élevée ;
 - o pour 5 d'entre eux, la variation saisonnière est moyenne ;
 - o pour 19 d'entre eux, la variation saisonnière est faible ;
- 13 sont caractérisés par un niveau d'eau stable ou presque.

Sur les 85 piézomètres, seulement 10 sont caractérisés par un grand nombre de mesures (> 100). 28 sont caractérisés par un nombre de mesures intermédiaire (compris entre 11 et 100 mesures). Enfin, 47 piézomètres sont caractérisés par 10 mesures ou moins durant la période étudiée. Il convient donc de garder à l'esprit que ces derniers piézomètres pourront être utilisés comme indicateurs mais pas comme référence absolue pour caractériser le type de variation piézométrique.

Les différentes catégories de variations sont représentées sur un plan à la **FIGURE 3-24**.

Les commentaires suivants peuvent être faits :

- les différents types de variation sont globalement regroupés par zone ;
- les piézomètres au sein desquels une évolution saisonnière des niveaux d'eau est observée sont principalement localisés dans la partie Nord du modèle ;
- l'amplitude de la variation saisonnière est d'autant plus forte que l'on va vers le Nord ;
- les piézomètres caractérisés par un niveau d'eau descendant durant toute la période étudiée sont localisés principalement dans la partie centre-Est du modèle ;
- les piézomètres caractérisés par un niveau d'eau descendant jusqu'en 2010 – 2011 puis montant sont localisés principalement dans la partie centrale du modèle ;
- à proximité de la limite Sud de la Région de Bruxelles-Capitale sont regroupés les piézomètres au sein desquels le niveau d'eau descend jusqu'en 2013 puis remonte ; pour une partie de ces piézomètres, une composante saisonnière est observée ; ces piézomètres sont situés à proximité de la galerie drainante de Vivaqua qui pourrait être à l'origine de la faible amplitude des variations observées dans ces piézomètres ;
- les piézomètres au sein desquels le niveau d'eau est stable sont situés généralement à proximité directe de ruisseaux ou rivières ;
- dans la partie centre-Est du modèle, différents types de variation piézométrique sont observés ;
- les piézomètres au sein desquels l'amplitude de variation du niveau d'eau est élevée sont le plus souvent localisés dans des zones où les sables du bruxellien sont surmontés par les Membres d'Ursel et d'Asse (ce qui pourrait entraîner la captivité de l'aquifère).

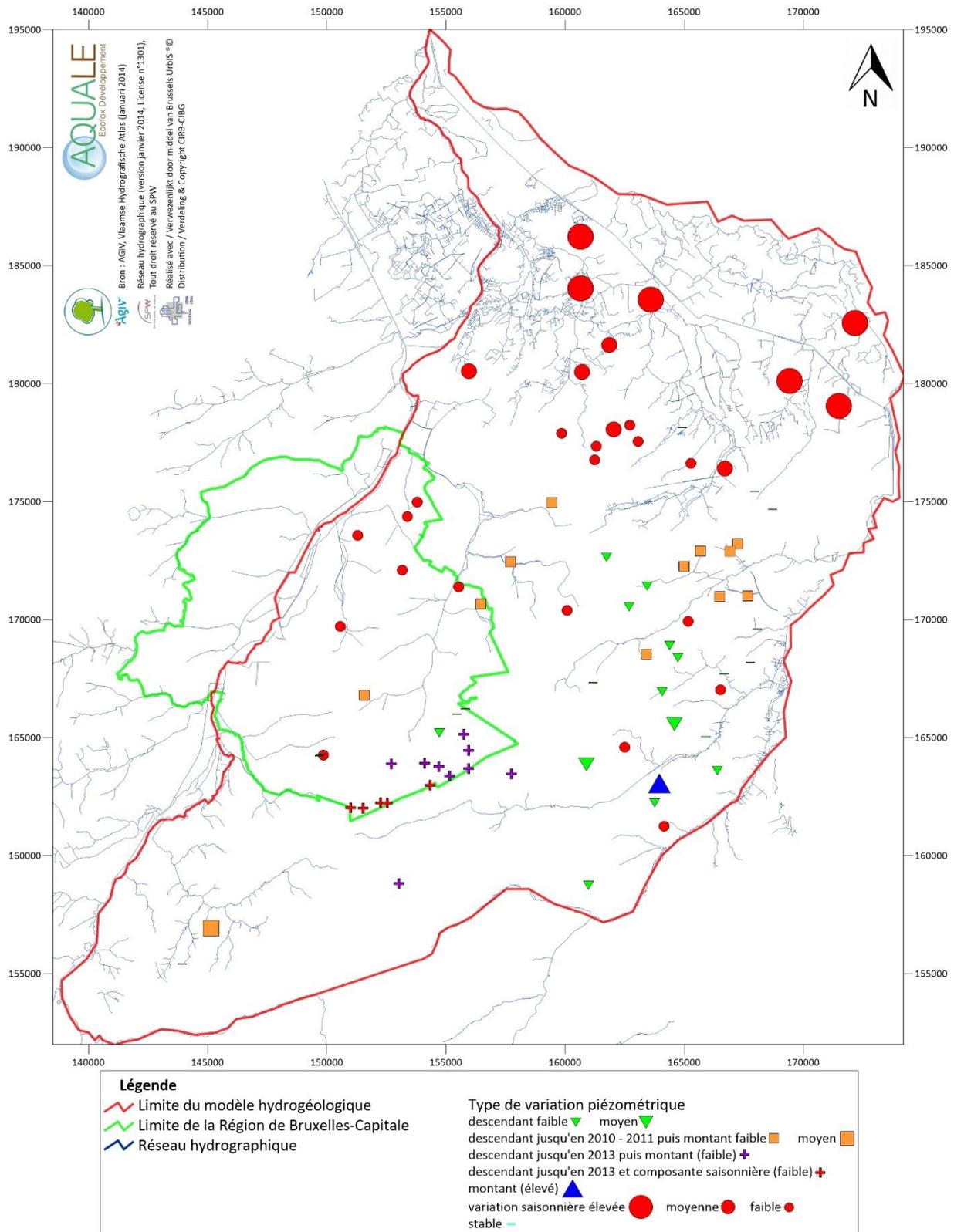


Figure 3-24 : Identification des différents types de variation piézométrique entre 2009 et 2013 au sein de la zone modélisée

3.3.1.3 CONTEXTE BRUXELLOIS

La zone modélisée étant fortement urbanisée au sein de la Région de Bruxelles-Capitale, elle présente une complexité élevée du point de vue hydrogéologique. Cette complexité doit être évaluée avec beaucoup de soin et de compréhension pour ensuite pouvoir être réduite et simplifiée lors de la conceptualisation du modèle hydrogéologique.

La partie de la Région de Bruxelles-Capitale qui est fortement urbanisée couvre une surface de quelques kilomètres carrés. Cependant, elle présente une grande hétérogénéité spatiale, qui se manifeste en surface et dans le proche sous-sol :

- à petite échelle dans l'organisation du tissu urbain ;
- mais aussi à l'échelle de la ville ou de l'agglomération urbaine qui regroupe des zones urbanisées et naturelles (espaces péri-urbains).

On note également une forte anthropisation et donc :

- l'imperméabilisation des surfaces ;
- le réseau hydrographique transformé et artificialisé ;
- la construction d'ouvrages de contrôle des flux d'eau de surface ;
- les ouvrages de génie civil (fondations des bâtiments, tunnels, infrastructures du métro...) ;
- la présence d'une galerie souterraine drainante en forêt de Soignes et d'un champ captant au bois de la Cambre pour l'approvisionnement en eau potable (VIVAQUA).

En ce qui concerne les modifications du réseau hydrographique, la Senne est un bon exemple. Dans le passé, la rivière passait sous le centre-ville de Bruxelles. Elle suivait les boulevards Lemonnier, Anspach, Adolphe Max. Elle s'écoulait dans un double pertuis souterrain. Ensuite, ce pertuis a été abandonné et le lit de la Senne a été dévié et se trouve actuellement dans un double pertuis en béton, sous la petite ceinture. A certains niveaux (par exemple au niveau du Square Jules de Trooz et au niveau du Pont Van Praet), on note la présence des rejets des collecteurs du Molenbeek et du Maelbeek, Nouveau Maelbeek, Vieux Maelbeek, Boerenhout, Vergote et Kerkebeek.

Par ailleurs, on a vu se développer des réseaux séparatifs (collecte et transit séparés des eaux usées et des eaux pluviales). Malgré les efforts entrepris, il existe des interactions entre ces réseaux, les eaux de surface et les eaux souterraines. Parfois, les réseaux de distribution d'eau ou les collecteurs constituent une source supplémentaire d'alimentation des nappes souterraines par des fuites d'eau sous haute pression (distribution) ou sous pression atmosphérique (collecteurs) ou, à l'inverse, assurent involontairement ou volontairement le drainage. Plusieurs autres ouvrages liés au réseau hydrologique existent dans la Région de Bruxelles-Capitale :

- les déversoirs ;
- les bassins de stockage, de décantation et d'infiltration.

A part les bassins mentionnés ci-avant, il existe aussi les bassins d'orage de Flagey, de Forest, du Maelbeek et de Roodebeek qui ont pour fonction de tamponner les surplus de pluie qui dépasseraient les capacités du réseau d'évacuation des eaux.

Pour la modélisation hydrogéologique à une micro-échelle et dans le souci du détail pour la Région de Bruxelles-Capitale, il serait très intéressant de mieux comprendre, mesurer et modéliser le fonctionnement et l'hydraulique de ces systèmes de gestion complexes présents sur le territoire. Ces derniers transportent des eaux usées et pluviales et assurent le transport de charge dissoute vers les stations de traitement. Il faudrait mettre l'accent sur le transport sédimentaire où la pollution est évacuée par les réseaux sous forme de particules et de sédiments dont les caractéristiques diffèrent de ce que l'on rencontre en milieu naturel. Ces paramètres sont mesurables à l'aide des appareillages spécialisés tels que des turbidimètres et spectromètres. De plus, il faudrait suivre

l'évolution bio-physico-chimique des polluants dans le système d'assainissement (ceci sort toutefois du cadre de la présente étude).

Au sein de la Région de Bruxelles-Capitale, en cas de pluie, la majeure partie de l'eau ruisselle sur les surfaces imperméabilisées. La modélisation doit prendre en considération l'ensemble des composantes du bilan hydrologique telles que :

- les interactions entre la zone saturée et les réseaux de drainage urbain ;
- le rôle de l'évaporation et de l'évapotranspiration dans le ressuyage des surfaces ;
- l'infiltration à travers des surfaces réputées imperméables (voiries) ;
- la variabilité temporelle de l'infiltration et du ruissellement.

Cette réponse dépend également du niveau de densification du bâti qui conduit à une artificialisation des cheminements et une concentration des écoulements sur la voirie à côté d'un bâti plus ou moins perméable et le passage d'une structure ramifiée (la rivière et ses affluents) à une structure maillée et hétéroclite (les réseaux de rues) plus complexe où on doit tenir compte de la multiplication des sites de jonction et de division des écoulements et de la présence de singularités (carrefours, embâcle, mobilier urbain).

Vu la complexité et l'hétérogénéité spatiale à micro-échelle dans la Région de Bruxelles Capitale, il s'avère nécessaire de simplifier cette réalité en créant un modèle conceptuel représentatif, cohérent et valide. Ce modèle doit prendre en considération la morphologie, la géologie et les propriétés hydrogéologiques à plus grande échelle, décrites aux chapitres précédents.

3.3.2 CONCEPTUALISATION DE LA GÉOLOGIE ET DE L'HYDROGÉOLOGIE

3.3.2.1 CONCEPTUALISATION DE LA GÉOLOGIE – GÉOMÉTRIE DES COUCHES

Pour le besoin de la modélisation numérique, nous distinguons principalement trois nappes :

- la nappe présente dans les formations de Moen, Aalbeke et Tielt (appelée *nappe de l'Yprésien* dans la suite du rapport) ;
- la nappe présente dans les formations de Bruxelles, Lede et le Membre de Wemmel (appelée *nappe du Bruxellien* dans la suite du rapport) ;
- la nappe présente dans les formations de Sint-Huilbrechts-Hern, de Diest ainsi que dans les dépôts du Quaternaire (appelée *nappe superficielle* dans la suite du rapport).

Au sein du modèle hydrogéologique, la *nappe de l'Yprésien* et la *nappe du Bruxellien* sont très localement séparées par l'aquiclude constitué par le Membre de Merelbeke de la Formation de Gent.

La *nappe du Bruxellien* et celle des formations plus superficielles sont quant à elles séparées localement par l'aquiclude constitué par les Membres d'Ursel et d'Asse de la Formation de Maldegem.

Dans le modèle hydrogéologique, les différentes couches géologiques modélisées par le SGB sont donc prises en considération, bien que parfois regroupées au sein d'une même *Layer* du modèle. Comme cela est défini ci-dessous, le modèle est donc constitué de 5 couches appelées *Layers* :

- Layer 1 : *nappe superficielle* ;
- Layer 2 : aquiclude des Membres d'Ursel et d'Asse ;
- Layer 3 : *nappe du Bruxellien* ;

- Layer 4 : aquiclude du Membre de Merelbeke ;
- Layer 5 : *nappe de l'Yprésien*.

La Layer 1 a été définie de manière à combler l'espace entre le sommet des formations les plus jeunes situées sous la Formation de Sint-Huilbrechts-Hern et la topographie.

Au sein d'une même Layer, aucune variation verticale des paramètres hydrodynamiques n'est possible (c'est la raison pour laquelle il est particulièrement intéressant de créer plusieurs Layers permettant de prendre en considération la variation verticale des paramètres hydrodynamiques). Chaque Layer est par ailleurs horizontalement divisée en une multitude d'*éléments* triangulaires auxquels il est possible d'assigner des paramètres hydrodynamiques variables. Ces éléments triangulaires (en 2D horizontal) sont en réalité des prismes (en 3D) puisque chaque Layer a une épaisseur bien définie.

En plus de cette subdivision en 5 Layers, différentes zones de propriétés équivalentes sont définies au sein du modèle pour prendre en considération la variabilité des lithologies regroupées au sein d'une même couche. Ainsi, il sera possible d'assigner des paramètres hydrodynamiques spécifiques aux différents groupes de cellules suivants (ces aspects seront plus clairement définis au **CHAPITRE 5**) :

- Quaternaire uniquement : reprend l'ensemble des cellules triangulaires / prismes dont les caractéristiques hydrodynamiques seront typiques des dépôts du Quaternaire ;
- Quaternaire et Sint-Huilbrechts-Hern : reprend l'ensemble des cellules triangulaires / prismes dont les caractéristiques hydrodynamiques seront définies sur la base des caractéristiques des dépôts du Quaternaire et de la Formation de Sint-Huilbrechts-Hern – un prisme qui fait partie de ce groupe recoupe en fait les dépôts du Quaternaire pour sa partie supérieure et la Formation de Sint-Huilbrechts-Hern pour sa partie inférieure ;
- Quaternaire, Sint-Huilbrechts-Hern et Diest : reprend l'ensemble des cellules triangulaires / prismes dont les caractéristiques hydrodynamiques seront définies sur la base des caractéristiques des dépôts du Quaternaire, de la Formation de Sint-Huilbrechts-Hern et de la Formation de Diest – un prisme qui fait partie de ce groupe recoupe en fait les dépôts du Quaternaire pour sa partie supérieure, la Formation de Diest dans sa partie centrale et la Formation de Sint-Huilbrechts-Hern dans sa partie inférieure ;
- Quaternaire et Onderdale (selon le même principe pour la suite) ;
- Quaternaire, Onderdale et Zomergem ;
- Ursel et Asse ;
- Bruxellien uniquement ;
- Bruxellien et Lede ;
- Bruxellien, Lede et Wemmel ;
- Merelbeke ;
- Moen uniquement ;
- Moen et Aalbeke ;
- Moen, Aalbeke et Tielt.

3.3.2.2 CONCEPTUALISATION DE L'HYDROGÉOLOGIE – HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES SUR LE COMPORTEMENT DE L'AQUIFÈRE

Typiquement, les écoulements souterrains au sein de l'aquifère sableux du Bruxellien sont orientés du Sud vers le Nord, soit depuis la Région Wallonne vers la Région Flamande. Localement et spécialement en Région de Bruxelles-Capitale, les écoulements sont influencés par les collecteurs, les pompages et en particulier le champ captant de Vivaqua situé au Sud-Est de la Région et dont l'influence est perceptible sur les cartes piézométriques par l'intermédiaire de son cône de rabattement.

Généralement, l'aquifère des sables du Bruxellien est en contact avec la plupart des eaux de surface (Woluwe, Senne, Dyle, Ijse, Argentine, Lasne, Hain, Voer...) qui s'écoulent sur son étendue bien que ces dernières soient parfois isolées par des argiles alluviales. L'alimentation en eau de l'aquifère des sables du Bruxellien provient principalement de l'infiltration de l'eau de pluie qui percole à travers les formations plus jeunes pour rejoindre les sables du Bruxellien. Evidemment, toute l'eau qui s'infiltré ne rejoint pas directement les sables du Bruxellien. Selon la lithologie rencontrée, des nappes perchées peuvent se créer dans les formations les plus jeunes. L'eau peut également rejoindre les exutoires que sont les ruisseaux et rivières avant d'avoir atteint les sables du Bruxellien. Dans le cas où l'eau atteint les sables du Bruxellien, elle s'y écoule depuis les points hauts vers les points bas. Les ruisseaux, les rivières et les collecteurs (lorsqu'ils sont poreux ou en mauvais état) en sont les principaux exutoires. De nombreux puits de pompage sont par ailleurs répertoriés dans la zone d'étude et constituent également un important exutoire de l'aquifère des sables du Bruxellien. Enfin, quelques sources ont été répertoriées et constituent à leur tour, un exutoire dont l'influence est par contre nettement plus réduite.

Dans la nappe des formations de Sint-Huilbrechts-Hern, de Diest ainsi que des dépôts du Quaternaire, les écoulements suivent le même axe depuis le Sud vers le Nord. Localement, les écoulements sont perturbés par les pompages. Les cours d'eau ainsi que les collecteurs dans la Région de Bruxelles-Capitale drainent cet aquifère dans toute sa profondeur et constituent ainsi ses exutoires principaux.

Généralement, les écoulements au sein de ces formations suivent bien la topographie. On constate par ailleurs que les limites des sous-bassins hydrogéologiques sont directement liées au relief. Le lien entre les écoulements de surface et les écoulements souterrains est donc évident, et ce d'autant plus que cela concerne un aquifère proche de la surface.

En régime transitoire, afin de reproduire les différents types de variation observés au **CHAPITRE 3.3.1.2.2**, il est nécessaire d'identifier les mécanismes hydrogéologiques à la base de ces comportements. A cette fin, les différentes zones de variation identifiées précédemment sont comparées à la profondeur du niveau d'eau de la nappe étudiée par rapport au niveau du sol (**FIGURE 3-25**). En effet, l'épaisseur de la zone non saturée a probablement une influence sur l'amplitude des variations piézométriques à cause de :

- la dispersivité verticale générant des temps de transits hétérogènes des filets d'eau ;
- la probabilité de la présence d'horizons moins perméables qui dépend également de cette épaisseur.

La carte de profondeur piézométrique présentée à la **FIGURE 3-25** est obtenue en soustrayant les valeurs obtenues par interpolation de la piézométrie absolue de mai 2013 aux valeurs de topographie de référence.

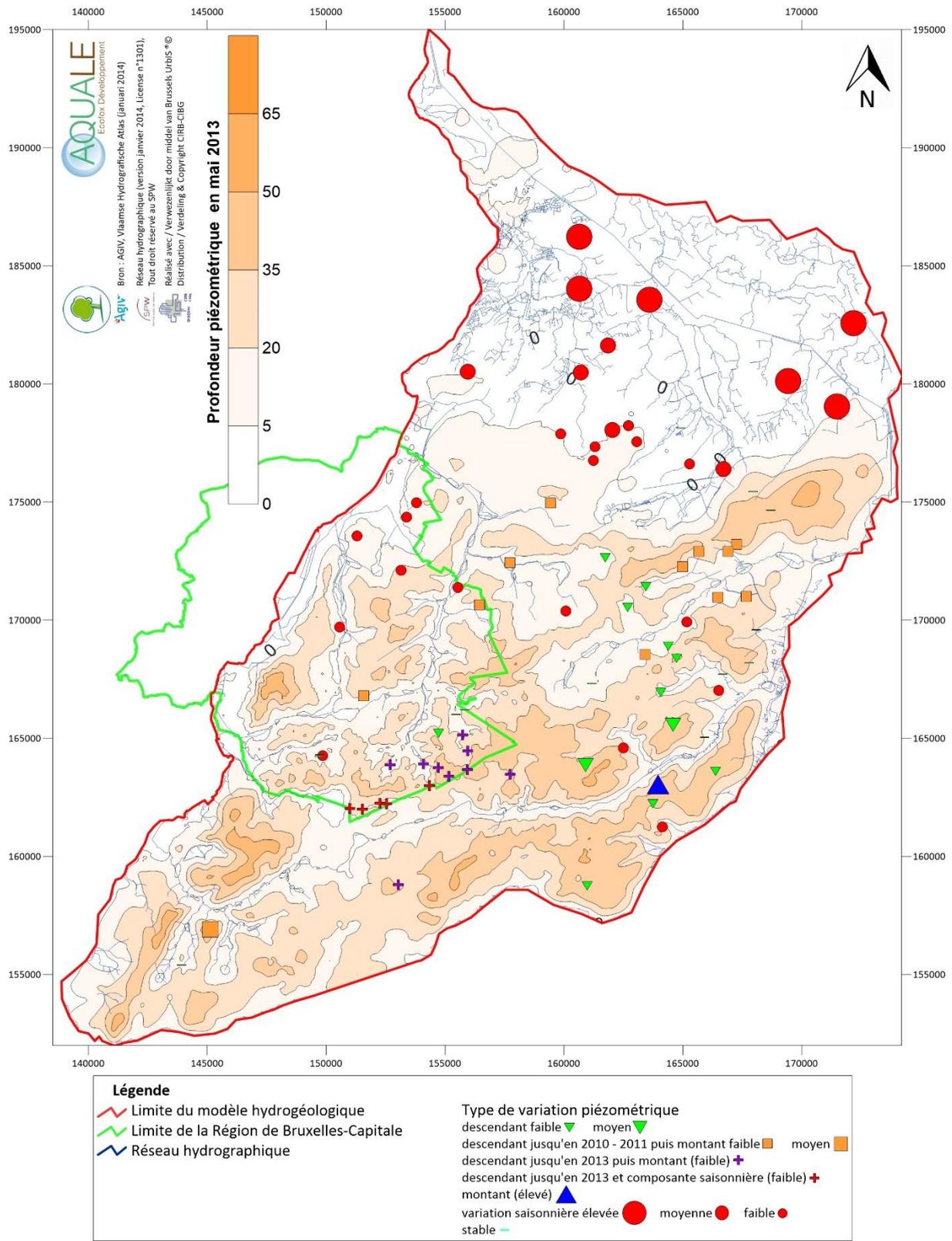


Figure 3-25 : Différents types de variation piézométrique entre 2009 et 2013 au sein de la zone modélisée et profondeur piézométrique en mai 2013

Il apparaît sur cette figure que la profondeur du niveau d'eau diminue globalement en direction du Nord. Cette tendance est moins claire à proximité de la limite Est du modèle. Il semble cependant assez clair que l'on peut probablement associer (en tous les cas partiellement) les différents comportements piézométriques à cette profondeur relative du niveau d'eau.

Près de la limite Nord du modèle, là où la nappe apparaît sub-affleurante, la variation piézométrique saisonnière est la plus élevée (grand rond rouge). Les deux piézomètres (2-0424b et 2-0018) caractérisés par ce comportement et qui se trouvent le plus au Nord sont situés dans une zone captive (présence des Membres d'Ursel et d'Asse). A la suite des périodes pluvieuses, l'eau qui trouve un passage vers la nappe du Bruxellien (*a fortiori* là où les Membres d'Ursel et d'Asse sont absents) induit une remontée rapide de la nappe puisque celle-ci se trouve à très faible profondeur. Cette remontée est directement répercutée dans la zone captive de manière synchrone puisque la nappe y est sous pression. A l'inverse, en période sèche, le niveau d'eau diminue rapidement pour revenir à un niveau plus bas.

En se déplaçant légèrement vers le Sud, on arrive à des piézomètres dont le niveau d'eau varie modérément avec les saisons (rond rouge intermédiaire).

Encore plus vers le Sud sont localisés les piézomètres dont le niveau d'eau varie saisonnièrement mais avec une amplitude faible (petit rond rouge). Pour ceux-ci, l'influence des saisons est encore clairement perceptible mais avec une amplitude plus faible. La profondeur du niveau d'eau est plus grande. De ce fait, le trajet à parcourir pour une goutte d'eau qui s'infiltré au niveau du sol pour rejoindre la zone saturée est plus long. La durée du parcours en zone non-saturée est plus grande. L'effet saisonnier est donc logiquement tamponné et amoindri.

En continuant notre trajet vers le Sud, on arrive dans la partie centrale du modèle caractérisée par différents types de comportement piézométrique. Pour les piézomètres dont le niveau d'eau diminue en continu durant la période étudiée (triangle vert), il est supposé que l'effet saisonnier est totalement tamponné du fait de l'épaisseur de la zone non-saturée et/ou de la nature géologique de la zone non-saturée. La faible diminution du niveau d'eau serait liée à un apport trop faible ces dernières années par rapport à la quantité extraite par pompage notamment. Pour les piézomètres dont le niveau d'eau diminue jusqu'en 2010 – 2011 puis remonte, une explication liée à la variation pluviométrique ne semble pas évidente. Il semble plus probable que cette variation piézométrique soit liée à un phénomène anthropique tel que la variation de débit de pompage dans des puits proches (cette zone est caractérisée par la présence de nombreux puits à débit élevé). Pour ces piézomètres, la variation observée est cependant très faible, ils peuvent donc presque être considérés comme stables.

A proximité de la limite Sud de la Région de Bruxelles-Capitale, les piézomètres voient leur niveau d'eau diminuer jusqu'en 2013 puis remonter. Cela est probablement lié à un apport trop faible ces dernières années par rapport à la quantité extraite par pompage. Pour une partie de ces piézomètres, une tendance faible saisonnière est observée. Celle-ci est probablement liée à une profondeur piézométrique plus faible ou à une alimentation par infiltration un peu plus directe (nature des terrains potentiellement différente).

Ce zonage est reproduit à la **FIGURE 3-26**. Six zones ont ainsi été définies.

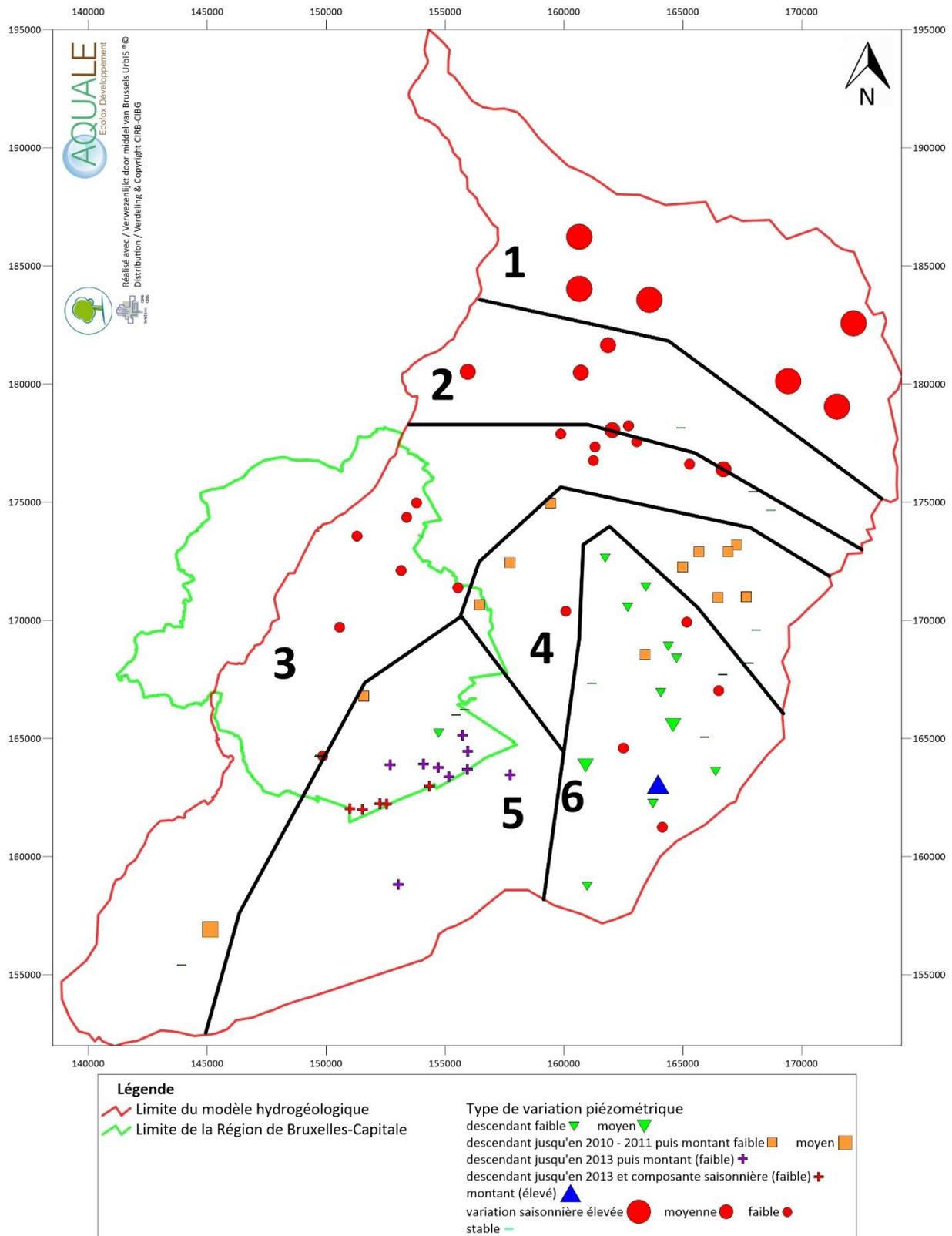


Figure 3-26 : Zonage par comportement piézométrique (période 2009 – 2013)

La **zone 1** est caractérisée par un niveau d'eau variant fortement avec les saisons. Ce comportement est lié à la très faible profondeur du niveau d'eau et au caractère captif de la moitié Nord de la zone. Il sera reproduit en donnant un poids important à la variation pluviométrique (prise en compte de la variation mensuelle).

La **zone 2** est caractérisée par un niveau d'eau variant avec les saisons avec une amplitude intermédiaire. Ce comportement est lié à la faible profondeur du niveau d'eau. Il sera reproduit en donnant un poids intermédiaire à la variation pluviométrique (prise en compte de la variation bimestrielle).

La **zone 3** est caractérisée par un niveau d'eau variant faiblement avec les saisons. Ce comportement est lié à la profondeur intermédiaire du niveau d'eau. Il sera reproduit en donnant un poids faible à la variation pluviométrique (prise en compte de la variation annuelle). La faible variation peut également être liée à l'effet tampon joué par la Senne, ses affluents et les collecteurs.

La **zone 4** est caractérisée par un niveau d'eau descendant jusqu'en 2010 – 2011 puis remontant. Ce comportement n'est *a priori* pas lié à la variation pluviométrique. Il pourrait par contre être lié à des phénomènes anthropiques tels que la variation de débit de pompage dans des puits proches (cette zone est caractérisée par la présence de nombreux puits à débit élevé). Ce comportement sera reproduit en considérant un apport pluviométrique constant et en assignant les débits annuels connus pour les ouvrages de la zone.

La **zone 5** est caractérisée par un niveau d'eau descendant jusqu'en 2013 puis remontant. Pour une partie des ouvrages, une composante saisonnière est visible. Cette diminution du niveau d'eau continue pourrait être liée à un apport pluviométrique trop faible par rapport à la quantité d'eau extraite par pompage notamment (champ captant et galerie drainante de Vivaqua voire influence à plus grande distance depuis la zone 6). Ce comportement sera reproduit en considérant un apport pluviométrique constant.

La **zone 6** est caractérisée par un niveau d'eau descendant durant toute la période étudiée. Cette diminution continue pourrait être liée à un apport pluviométrique trop faible par rapport à la quantité d'eau extraite par pompage notamment. Ce comportement sera reproduit en considérant un apport pluviométrique constant.

Comme c'est le cas de manière générale pour la construction du modèle, ce zonage donne une idée globale de la distribution des données. Il n'est cependant pas exclu que des aménagements locaux soient réalisés pour reproduire le comportement de l'un ou l'autre piézomètre.

La description des zones ci-dessus est volontairement simplifiée afin d'identifier l'hypothèse majeure réalisée pour chacune d'elle. Il est évident que la profondeur de la nappe n'est pas seule responsable de son comportement variable dans le temps...

3.4 CONDITIONS AUX FRONTIÈRES EXTERNES ET INTERNES

3.4.1 DÉFINITION DES LIMITES EXTERNES

3.4.1.1 FRONTIÈRES LATÉRALES – CONDITION DE DIRICHLET, NIVEAU D'EAU IMPOSÉ

Sur toutes les limites latérales du modèle, des conditions de 1^{er} type (Dirichlet, niveau d'eau) sont imposées. Les potentiels imposés le long des limites ont été extraits du modèle numérique de terrain fourni par le SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) sur lequel une correction a été opérée pour tenir compte de l'encaissement des rivières / ruisseaux non représenté sur le SRTM. Localement, de petites corrections supplémentaires ont été apportées pour assurer une diminution du niveau d'eau depuis l'amont vers l'aval (ces corrections sont minimes

et ont pour unique but d'assurer la cohérence d'un écoulement dirigé depuis l'amont vers l'aval ou des points hauts vers les points bas).

Les conditions de Dirichlet sont imposées sur toutes les couches en bordure du modèle.

Dans la partie Nord du modèle, en présence des Membres d'Ursel et d'Asse, la connexion entre les aquifères profonds et le réseau hydrographique (en particulier la Dyle qui constitue la limite Nord) n'est plus évidente. Les niveaux d'eau imposés le long de cette frontière restent cependant une solution adéquate pour la conceptualisation du modèle. Le débit sortant par cette frontière du modèle ne sera simplement pas considéré comme alimentant la Dyle mais comme un écoulement à part entière au sein des aquifères captifs.

3.4.1.2 LIMITE SUPÉRIEURE - INFILTRATION

La limite supérieure correspond à la surface topographique.

Pour définir la limite supérieure, une couche topographique combinant les données suivantes a été utilisée :

- LIDAR (*Light Detection And Ranging*), dont la résolution est de 1 m, au droit de la Région de Bruxelles-Capitale et dans un rayon de 500 m ;
- IGN, dont la résolution est de 20 m, sur un carré de 20 km de côté recouvrant les données du LIDAR ;
- SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), dont la résolution est de 80 m, sur le restant de la zone.

Une condition de 2^e type (Neumann) avec un flux imposé correspondant à l'infiltration est imposée sur cette frontière.

3.4.1.3 LIMITE INFÉRIEURE – CONDITION DE NEUMANN, FLUX IMPOSÉ

La limite inférieure coïncide avec le toit du Membre de Saint-Maur (Formation de Kortrijk) qui constitue une couche imperméable d'argile très finement silteuse. L'argile peut présenter quelques minces intercalations d'argile grossièrement silteuse ou de silt très fin argileux. L'épaisseur moyenne de cette couche est de 30 mètres (comprenant le Membre du Mont-Héribu) et elle est présente sur la quasi-totalité de la zone modélisée. Là où elle n'est pas présente, la base du modèle coïncide avec le toit des couches sous-jacentes (Formation de Hannut, Crétacé, Paléozoïque). Ainsi, il est raisonnable de considérer que les flux verticaux à travers la base du modèle avec les formations plus anciennes comme celle de Hannut (Landénien) sont négligeables et influencent très peu les écoulements à modéliser. Dès lors, cette limite est représentée dans le modèle numérique par une condition de 2^e type (Neumann) avec un flux nul, c'est-à-dire que la base du modèle est considérée comme une frontière imperméable.

3.4.2 DÉFINITION DES LIMITES INTERNES

Les limites internes au modèle concernent principalement les éléments de type point, ligne ou polygone à travers lesquels un transfert de flux peut se produire (vers l'extérieur ou l'intérieur du modèle).

Il s'agit typiquement des éléments suivants :

- les **cours d'eau et collecteurs** : pouvant être drainants, en quasi-équilibre avec la nappe, infiltrants ou de type perte – résurgence ;
- les **captages** : prélevant généralement par pompage l'eau de la nappe, ils peuvent également, dans des cas plus particuliers, constituer des dispositifs de réalimentation de la nappe ;
- les **galeries, drains et sources** : prélevant généralement par gravité l'eau de la nappe, avec ou sans aménagement.

3.4.2.1 COURS D'EAU – CONDITION DE DIRICHLET, NIVEAU D'EAU IMPOSÉ

La zone modélisée est majoritairement couverte (voir **FIGURE 3-1**) par les bassins versants :

- de la Senne à l'Ouest ;
- de la Dyle au Nord-Est ;
- de la Lasne au Sud-Est ;
- de l'Argentine et du Hain au Sud ;
- de la Woluwe, de l'Ijse et de la Voer à l'intérieur de la zone modélisée.

La plupart des affluents de ces cours d'eau prennent leur source au droit de la *nappe du Buxellien* et sont considérés comme drainant cette dernière quasiment sur toute sa profondeur (l'altitude de ces rivières / ruisseaux est ainsi souvent proche ou inférieure à la base des sables du Bruxellien, allant jusqu'à drainer la Formation de Kortrijk (Membre de Moen), qui surmonte l'aquiclude de Saint-Maur).

Cette hypothèse est faite essentiellement sur la base des historiques piézométriques disponibles et des comparaisons entre les niveaux piézométriques de la nappe et ceux des cours d'eau à proximité. Ainsi, l'ensemble des cours d'eau peut être considéré comme étant en équilibre (bien que l'échange soit limité et non-continu, parfois même absent dans le cas des zones captives) avec la *nappe du Bruxellien* et peut être valablement représenté dans le modèle numérique par une condition de 1^{er} type (Dirichlet) avec un potentiel imposé le long de leur tracé et correspondant à la cote de leur plan d'eau (à défaut de levé topographique disponible, la cote du plan d'eau est définie arbitrairement comme étant située 1.50 m sous la cote fournie par le modèle SRTM / LIDAR).

La condition de 1^{er} type sur le potentiel imposé peut être couplée à une contrainte imposant la mise en veille / l'activation de la condition de potentiel en-dessous / au-dessus d'un débit entrant / sortant défini. En pratique, cela revient à autoriser les rivières à drainer la nappe lorsque celle-ci atteint au minimum la cote des rivières et à considérer celles-ci comme déconnectées de la nappe lorsque cette dernière est rabattue sous la cote des rivières (ces dernières ne débitent plus).

3.4.2.2 GRANDS COLLECTEURS – CONDITION DE DIRICHLET, NIVEAU D'EAU IMPOSÉ

Comme pour les rivières, les grands collecteurs (gérés par la SBGE) sont représentés par une condition de 1^{er} type (Dirichlet) avec un potentiel imposé le long de leur tracé et correspondant à une cote intermédiaire entre le niveau topographique et le niveau du collecteur (étant donné que les collecteurs ne drainent pas suffisamment la nappe pour la rabattre).

La condition de 1^{er} type sur le potentiel imposé peut être couplée à une contrainte imposant la mise en veille / l'activation de la condition de potentiel en-dessous / au-dessus d'un débit entrant ou sortant défini. En pratique, cela revient à autoriser les collecteurs à drainer la nappe lorsque celle-ci atteint au minimum la cote des collecteurs et à considérer ceux-ci comme déconnectés de la nappe lorsque cette dernière est rabattue sous la cote des collecteurs (ces derniers ne débitent plus).

3.4.2.3 CAPTAGES ET GALERIES – CONDITIONS « MULTILAYER WELL » ET DE DIRICHLET, NIVEAU D'EAU IMPOSÉ

Dans la zone modélisée, de nombreux puits de captages ainsi qu'une galerie captante sont répertoriés.

Les débits extraits de certains ouvrages sont connus pour les périodes de calibration (mai – juin 2013 et novembre 2013 pour le régime permanent, 2009 – 2013 pour le régime transitoire). Pour d'autres ouvrages, seuls les débits moyens annuels sont connus. Pour d'autres encore, seuls les débits autorisés sont connus.

De manière générale, tous les ouvrages déclarés sont repris dans le modèle. Une condition de 4^e type (Multilayer Well) est imposée au droit de l'ouvrage avec un flux sortant du modèle correspondant aux débits fournis par les exploitants. Compte tenu de la variabilité des données disponibles, une imprécision existe sur les débits de pompage appliqués au modèle. Cependant, dans la zone d'intérêt que constitue la Région de Bruxelles-Capitale, les débits les plus importants sont connus pour les périodes de calibration (par exemple, dans la *nappe du Bruxellien*, le débit de pompage des ouvrages pour lesquels l'information n'est pas disponible en 2013 représenterait moins de 5 % du débit prélevé au sein de la Région de Bruxelles-Capitale).

Lorsque les captages sont susceptibles de se tarir suite à un abaissement de la nappe (par exemple en cas d'exploitation trop importante par le champ captant), la condition de 4^e type sur le débit de pompage imposé peut être couplée à une contrainte imposant la mise en veille / l'activation de la condition de flux en-dessous / au-dessus d'un niveau d'eau défini. En pratique, cela revient à autoriser le pompage au droit d'un puits lorsque la nappe atteint au minimum la cote où se situe la pompe et à empêcher tout pompage ou toute infiltration au droit de l'ouvrage lorsque la nappe est rabattue sous la cote où se situe la pompe (le puits s'assèche).

Pour la galerie drainante Vivaqua, une condition de 1^{er} type (Dirichlet) avec un potentiel imposé est utilisée. La société Vivaqua utilise un des procédés les plus répandus qui consiste à capter les eaux par le biais de galeries drainantes creusées au cœur de l'aquifère. Elles ont une section rectangulaire d'environ 1.80 m sur 1.20 m et elles sont pourvues dans leur partie inférieure de barbacanes récoltant les eaux (**FIGURES 3-27 et 3-28**). Elles permettent de rabattre fortement l'aquifère et d'en extraire des débits importants. Pour améliorer leur efficacité, ces galeries ont été équipées de serrements (une sorte d'écluses souterraines). A l'heure actuelle, ces serrements sont bloqués et ne peuvent plus être manipulés. La galerie fait environ 5 500 m de long (mesure sur carte). Pour représenter son caractère drainant, une conductivité hydraulique très élevée est assignée à la *Layer 3* au droit de la galerie.



Figure 3-27 : Reproduction d'une section de la galerie Vivaqua



Figure 3-28 : Zoom sur la base de la reproduction de la galerie Vivaqua

3.4.2.4 SOURCES – CONDITION DE DIRICHLET, NIVEAU D’EAU IMPOSÉ

Les sources peuvent être représentées dans le modèle numérique par une condition de 1^{er} type (Dirichlet) avec un potentiel imposé au droit de la source et correspondant à la cote topographique.

La condition de 1^{er} type sur le potentiel imposé peut être couplée à une contrainte imposant la mise en veille / l’activation de la condition de potentiel en-dessous / au-dessus d’un débit entrant ou sortant défini. En pratique, cela revient à autoriser les sources à drainer la nappe lorsque celle-ci atteint au minimum la cote des sources et à considérer les sources comme déconnectées de la nappe lorsque cette dernière est rabattue sous la cote des sources (ces dernières ne débitent plus).

4 ELABORATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE SOUS FEFLOW®

Une fois le modèle conceptualisé, ce dernier peut être transposé sous forme numérique au sein du logiciel FEFLOW® 6.1. Classiquement, cette transposition numérique se fait selon les différentes étapes suivantes :

- étape #1 : création de la géométrie de base ;
- étape #2 : génération du maillage en éléments finis ;
- étape #3 : définition du type de problème ;
- étape #4 : définition des conditions aux limites ;
- étape #5 : définition des points d'observation ;
- étape #6 : définition des paramètres d'écoulement et de transport ;
- étape #7 : visualisation des résultats ;
- étape #8 : bilan hydrogéologique.

Les étapes #1 à #4 découlent directement de la conceptualisation du modèle.

Les étapes #5 à #8 sont liées au processus de calibration du modèle numérique et seront évoquées au **CHAPITRE 5**. Si la calibration ne peut être valablement réalisée (c'est-à-dire si elle ne permet pas de représenter la réalité des écoulements et du transport de manière satisfaisante), il importe alors de redéfinir le modèle conceptuel et de réadapter les étapes #1 à #4 en conséquence.

Le **CHAPITRE 4** sera donc structuré en suivant les quatre premières étapes évoquées ci-dessus.

4.1 ETAPE #1 – CRÉATION DE LA GÉOMÉTRIE DE BASE

La construction du modèle numérique débute par la création de la géométrie de base.

Le *Supermesh* forme la structure de base nécessaire à l'élaboration du maillage en éléments finis sous FEFLOW® 6.1. Il contient toutes les informations géométriques basiques nécessaires pour appliquer l'algorithme de génération de maillage.

Le *Supermesh* se compose au minimum d'un polygone représentant la limite externe du modèle numérique mais peut également se composer, dans des versions plus complexes, d'un nombre arbitraire élevé d'éléments de type :

- **polygones** : ces éléments sont utilisés pour représenter la limite externe du modèle numérique mais également des limites internes telles que les diverses unités géologiques. Une fois définis, ils peuvent être utilisés plus tard dans le processus de construction du modèle numérique pour définir, par exemple, une densité de maillage variable selon les zones (étape #2), une configuration des conditions aux frontières (étape #4) ou encore une assignation variable des paramètres d'écoulement ;
- **lignes** : ces éléments sont utilisés pour représenter des structures linéaires telles que des cours d'eau, des galeries ou des failles. Une fois définis, ils peuvent être également utilisés plus tard dans le processus de construction du modèle numérique (comme les polygones) ;
- **points** : ces éléments sont utilisés pour représenter des structures ponctuelles telles que des puits, des sources ou des points d'observation (piézomètres). Une fois définis, ils assurent la présence d'un nœud du futur maillage à l'endroit exact où a été défini l'élément. Ils peuvent être également utilisés plus tard dans le processus de construction du modèle numérique pour permettre, par exemple, le raffinage du maillage autour du point (étape #2) ou encore l'assignation des conditions de pompage aux puits (étape #4).

La **FIGURE 4-1** présente le *Supermesh* de même que ses différents composants (polygones, lignes et points).

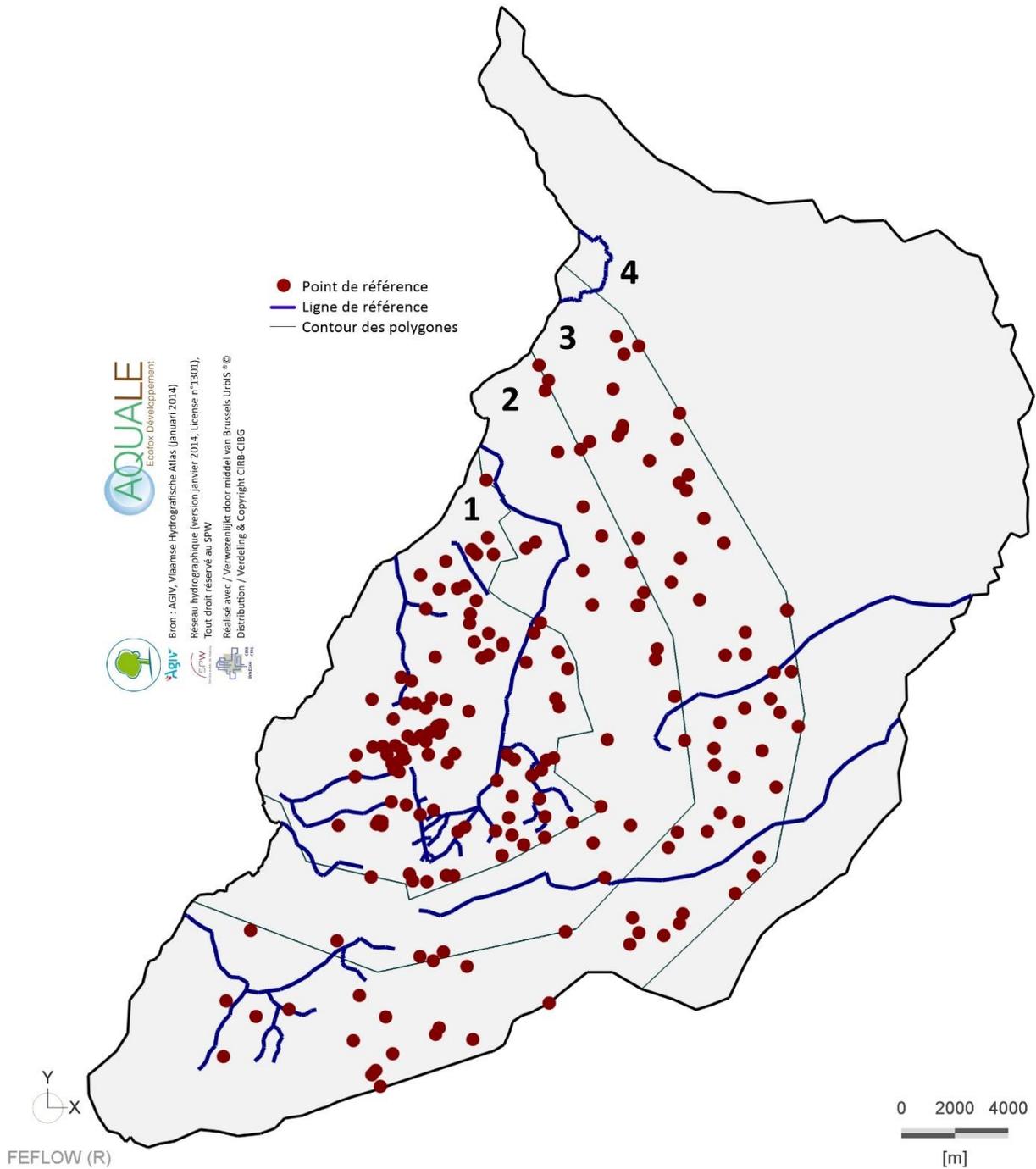


Figure 4-1 : Etape #1 – création de la géométrie de base du modèle numérique (*Supermesh*)

La **FIGURE 4-1** montre que le modèle est subdivisé en 4 polygones (séparés par les fines lignes noires) dessinés à main levée. Cette subdivision en 4 polygones a pour objectif de créer un maillage avec une densité variable d'éléments. Les polygones sont définis de la manière suivante :

- le contour du premier polygone longe la limite de la Région de Bruxelles-Capitale en restant toujours à l'extérieur, une densité maximale d'éléments est assignée à ce polygone et tous les points d'intérêt y sont pris en compte ;
- le second polygone reprend la zone géographique située entre 0 et 5 km des limites de la Région de Bruxelles-Capitale, une densité intermédiaire d'éléments est assignée à ce polygone et tous les points d'intérêt y sont pris en compte ;
- le troisième polygone reprend la zone géographique située entre 5 et 10 km des limites de la Région de Bruxelles-Capitale, une densité minimale d'éléments est assignée à ce polygone et tous les points d'intérêt y sont pris en compte ;
- le quatrième et dernier polygone reprend la zone géographique située à plus de 10 km des limites de la Région de Bruxelles-Capitale, une densité minimale d'éléments est assignée à ce polygone et les points d'intérêt n'y sont pas pris en compte (afin d'optimiser la vitesse de calcul et les performances du modèle hydrogéologique).

La prise en compte des points d'intérêt, figurés en rouge sur la **FIGURE 4-1**, entraîne la création d'un nœud du maillage à la position exacte du point d'intérêt. L'ensemble des points d'intérêt lié à la *nappe du Bruxellien* ont été pris en considération, à savoir :

- les sources ;
- les piézomètres crépinés dans les sables du Bruxellien ;
- les pompages crépinés dans les sables du Bruxellien.

Le fait de ne pas considérer les points d'intérêt dans le quatrième polygone (zone géographique située à plus de 10 km de la Région de Bruxelles-Capitale) ne signifie pas que les niveaux d'eau n'y seront pas observés, ou que les pompages n'y seront pas implantés. Cela signifie simplement qu'un nœud du maillage ne sera pas créé aux coordonnées XY précises du piézomètre / puits.

Les collecteurs et cours d'eau majeurs ainsi que la galerie drainante Vivaqua sont pris en considération (lignes bleues) pour la création du maillage. Le maillage suivra donc la géométrie de ces lignes.

Le *Supermesh*, dans sa version actuelle, comporte 4 polygones, 33 lignes et 229 points. Les intersections créées par ces éléments permettent de définir au final 266 éléments et 1 463 nœuds.

4.2 ETAPE #2 - GÉNÉRATION DU MAILLAGE EN ÉLÉMENTS FINIS

Une fois le *Supermesh* finalisé, l'algorithme de génération de maillage peut être exécuté afin de construire le maillage.

FEFLOW® 6.1 permet l'utilisation de plusieurs algorithmes tels que *Advancing Front*, *Triangle*, *Gridbuilder*... Chacun de ces algorithmes dispose de propriétés, d'avantages et d'inconvénients différents. Le lecteur pourra se référer aux livres blancs édités par FEFLOW® pour davantage d'informations sur ces algorithmes.

L'algorithme utilisé pour la construction du maillage du modèle est l'algorithme *Triangle*¹⁰ développé par J.R. SHEWCHUK (University of California, Berkeley, 2005). Ses principaux avantages sont liés à sa rapidité de calcul et à sa faculté à gérer des compositions géométriques complexes tandis qu'il présente l'inconvénient de générer un certain nombre de triangles avec angles obtus (ce qui peut être corrigé par des contraintes imposés sur les angles, moyennant un certain coût CPU¹¹).

¹⁰ Disponible gratuitement à l'adresse <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>

¹¹ Central Processing Unit

Un critère de raffinement est imposé au droit des divers éléments.

Le maillage final est composé d'éléments triangulaires composés chacun de 3 nœuds et dont les dimensions varient de l'ordre de 1 000 m (dans le polygone le plus éloigné de la zone d'intérêt) jusqu'à 3 m au droit des ouvrages et autres points d'intérêt au sein de la Région de Bruxelles-Capitale. Au sein de cette dernière, les éléments font au maximum 50 à 60 m de côté.

La **FIGURE 4-2** illustre la répartition spatiale (en 2 dimensions) du maillage généré par l'algorithme *Triangle*.

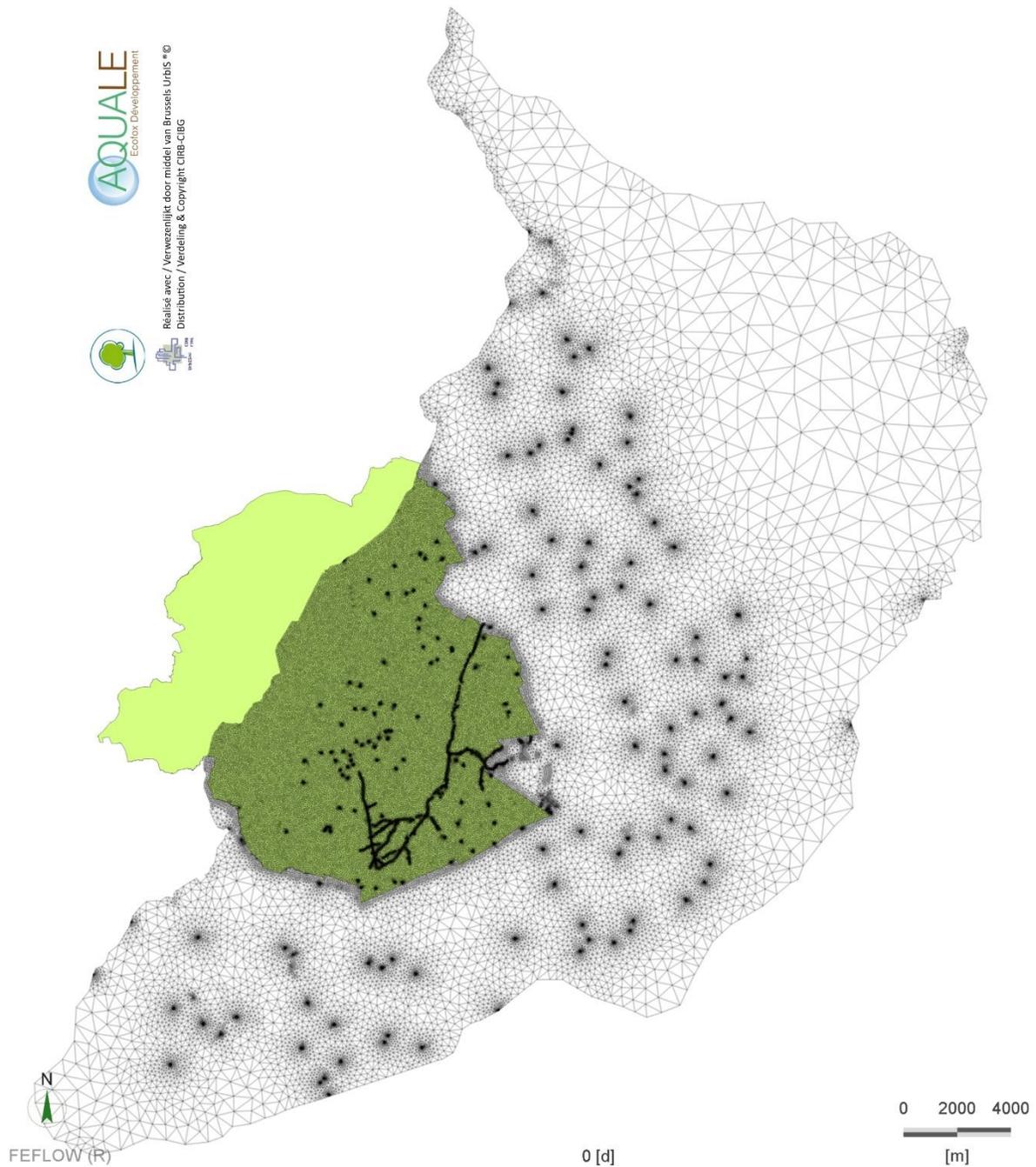


Figure 4-2 : Etape #2 – génération du maillage en éléments finis

La **FIGURE 4-3** présente un zoom sur le maillage de la zone d'intérêt.

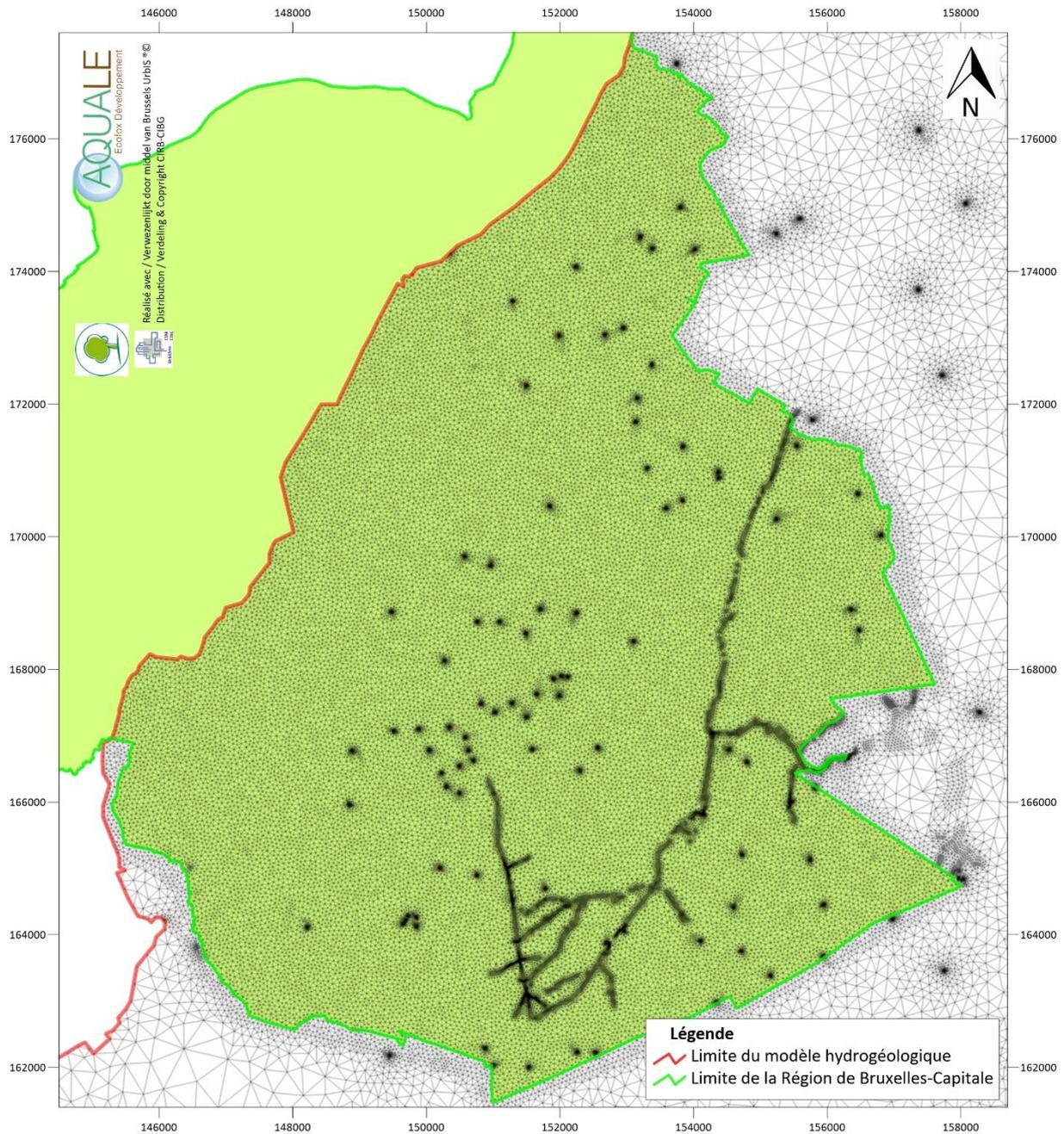


Figure 4-3 : Etape #2 – zoom sur le maillage en éléments

Le maillage 3D est ensuite construit sur la base du modèle géologique construit par le SGB. Comme cela a été décrit au **CHAPITRE 3**, le modèle compte 5 Layers séparées chacune par une *Slice* (le modèle compte dès lors 6 Slices, la première correspond à la topographie et la dernière au sommet du Membre de Saint-Maur). Le modèle 3D comporte 801 140 éléments de type prismes triangulaires et composés chacun de 6 nœuds (pour un total de 483 084 nœuds).

Le modèle numérique de terrain généré après maillage est présenté à la **FIGURE 4-4**. L'échelle verticale est exagérée 20 fois pour une meilleure visualisation. L'altitude de la surface topographique est comprise entre 139 m (au Sud de la zone modélisée) et 5 m (à l'extrémité Nord du modèle).

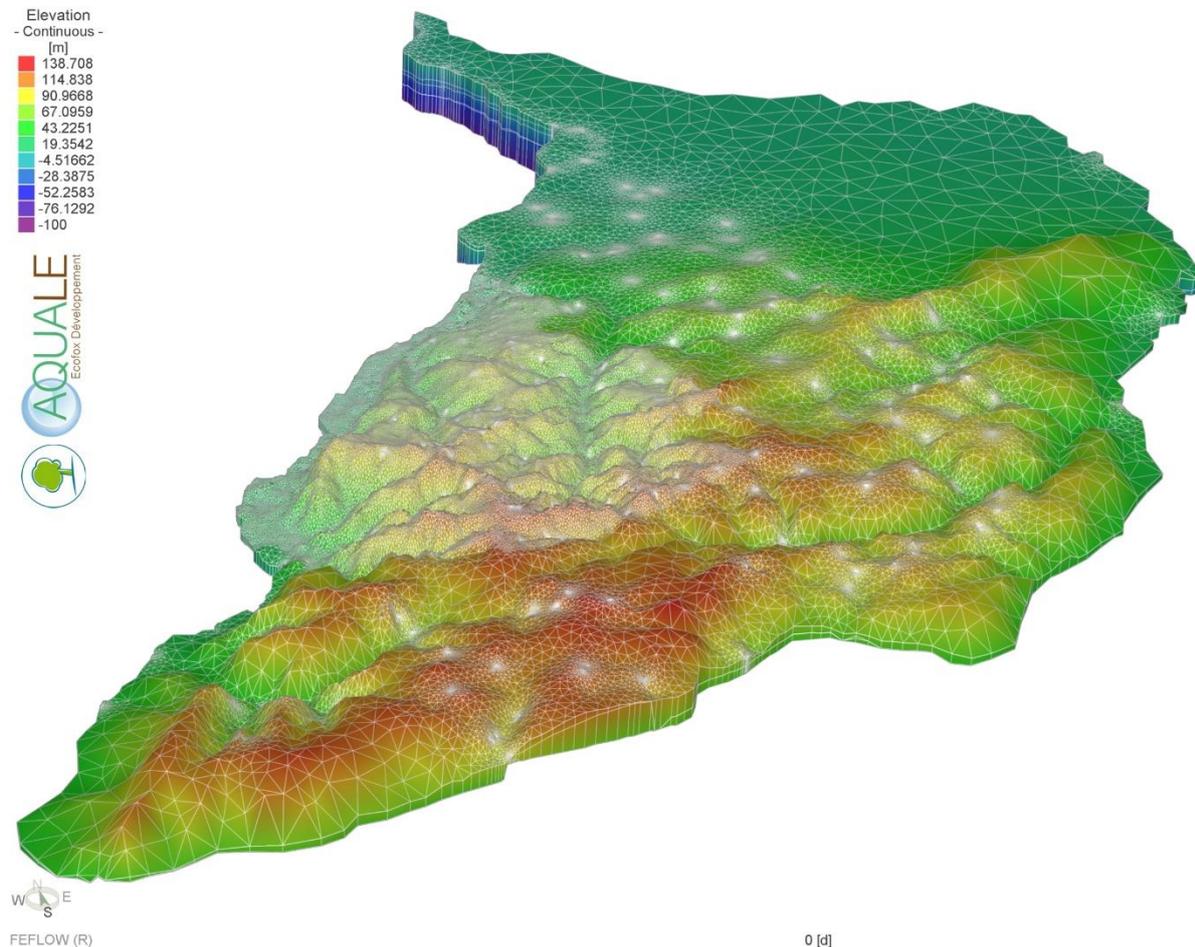


Figure 4-4 : Modèle numérique de terrain généré après maillage

4.3 ETAPE #3 - DÉFINITION DU TYPE DE PROBLÈME

FEFLOW® 6.1 permet à la fois de simuler des écoulements de flux et du transport de masse ou de chaleur,

- en milieu saturé, variablement saturé et/ou insaturé ;
- en régime permanent et/ou transitoire ;
- en 2 dimensions (2D) ou 3 dimensions (3D).

La définition du type de problème à simuler dépend de l'objectif de l'étude.

Le modèle numérique vise à reproduire en régime permanent deux situations piézométriques récentes (mai – juin 2013 et novembre 2013), en s'appuyant sur le jeu de données issues du monitoring mis en place dans le cadre de cette étude, puis à valider la calibration en régime transitoire sur les années 2009 à 2013.

Dès lors, le type de problème sera défini pour un fonctionnement :

- en **flux** uniquement (le transport n'est pas étudié) ;
- en milieu **saturé** ;

en régime **permanent** dans un premier temps (calibration sur les deux campagnes récentes de mai – juin et novembre 2013) et en régime **transitoire** dans un second temps (calibration sur l'année 2013 complète), avec validation sur les années 2009 à 2013. La définition du type de problème peut être adaptée à tout moment en fonction des objectifs à atteindre. Quand cela est possible, il est cependant conseillé de simplifier le problème à son strict minimum requis afin de ne pas alourdir inutilement le modèle numérique (par exemple, la définition de paramètres tels que le degré de saturation des terrains en zone vadose ou la dispersivité des terrains n'apparaît pas requis à ce stade dès lors que le modèle n'est pas utilisé en milieu non saturé ou afin de simuler un transport de polluant).

4.4 ETAPE #4 - DÉFINITION DES CONDITIONS AUX LIMITES

4.4.1 DÉFINITION DES LIMITES EXTERNES

4.4.1.1 FRONTIÈRES LATÉRALES – CONDITION DE DIRICHLET, NIVEAU D'EAU IMPOSÉ

Les potentiels imposés sont assignés comme suit, en fonction de l'évolution du plan d'eau des rivières / ruisseaux :

- le long de la Senne de + 38 à + 2 m sur son tracé depuis l'amont vers l'aval ;
- le long de la Dyle de + 28 à + 2 m sur son tracé depuis l'amont vers l'aval ;
- le long de la Lasne, de + 58 à + 29 m sur son tracé depuis l'amont vers l'aval ;
- le long de l'Argentine, de + 96 à + 59 m sur son tracé depuis l'amont vers l'aval ;
- le long du Hain, de + 76 à + 41 m sur son tracé depuis l'amont vers l'aval ;
- entre le point le plus en amont du Hain (+ 76 m) et le point de source de l'Argentine (+ 96 m), des niveaux d'eau légèrement plus élevés.

Les conditions de Dirichlet sont imposées sur toutes les couches en bordure du modèle. Les mêmes valeurs sont imposées pour les deux périodes de calibration en régime permanent. Elles restent identiques en régime transitoire.

Les **FIGURES 4-5 et 4-6** ci-dessous illustrent l'ajout des conditions aux frontières latérales du modèle. Les cercles bleus symbolisent les potentiels imposés. La ligne horizontale au-dessus des cercles signifie que les potentiels imposés sont contraints par un flux maximum. Le flux maximum imposé pour chaque nœud est de $0 \text{ m}^3/\text{j}$, c'est-à-dire que seul un débit négatif est autorisé à travers ces nœuds. Un débit négatif correspond à un débit sortant du modèle. Si le potentiel imposé n'est pas compatible avec un flux sortant du modèle (parce que le niveau de la nappe se trouve à un niveau plus bas que le potentiel imposé), alors le potentiel imposé est désactivé et la frontière devient imperméable. Seule la portion de limite située entre le Hain et l'Argentine n'est pas contrainte par un débit sortant uniquement. En effet, sur cette portion, il est considéré que l'eau peut entrer ou sortir du modèle.

En réalité, il est possible / probable que certaines portions de cours d'eau soient infiltrantes. Cependant, puisque l'on sait que le contexte est drainant dans sa globalité, il est préférable d'utiliser cette contrainte permettant d'obtenir effectivement un contexte global drainant et de laisser la liberté au modèle d'adapter le niveau de l'eau

dans les zones où la contrainte n'est pas respectée. A l'inverse, si cette contrainte n'est pas utilisée, le niveau d'eau imposé restera constant quelque soit le comportement de la nappe à proximité, ce qui fait que le modèle est d'autant plus guidé / influencé par les niveaux d'eau imposés. L'utilisation de cette contrainte sur les niveaux d'eau imposés permet donc d'accorder un degré de liberté plus grand au modèle. L'étude de sensibilité présentée au **CHAPITRE 6** est également menée sur les niveaux d'eau imposés.

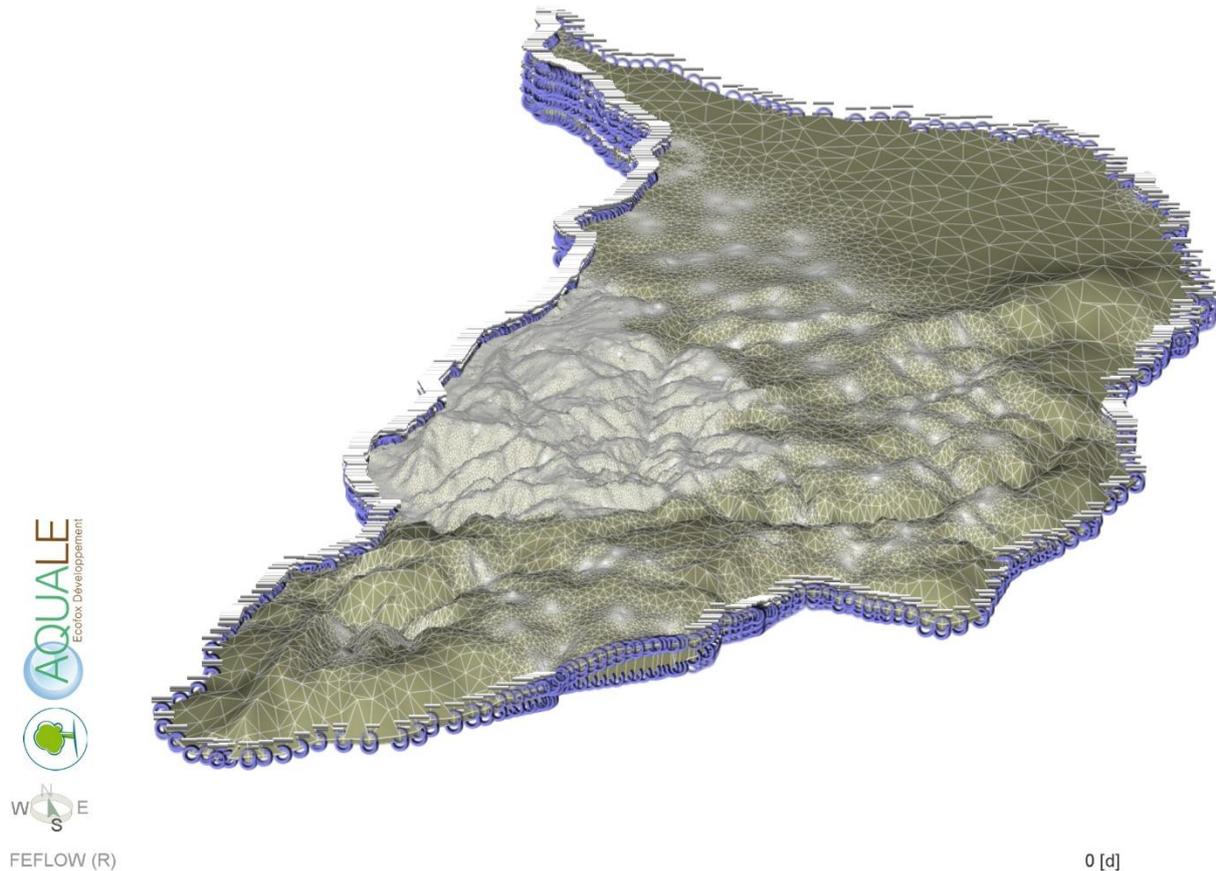


Figure 4-5 : Potentiels imposés le long des frontières extérieures (Vue vers le Nord)

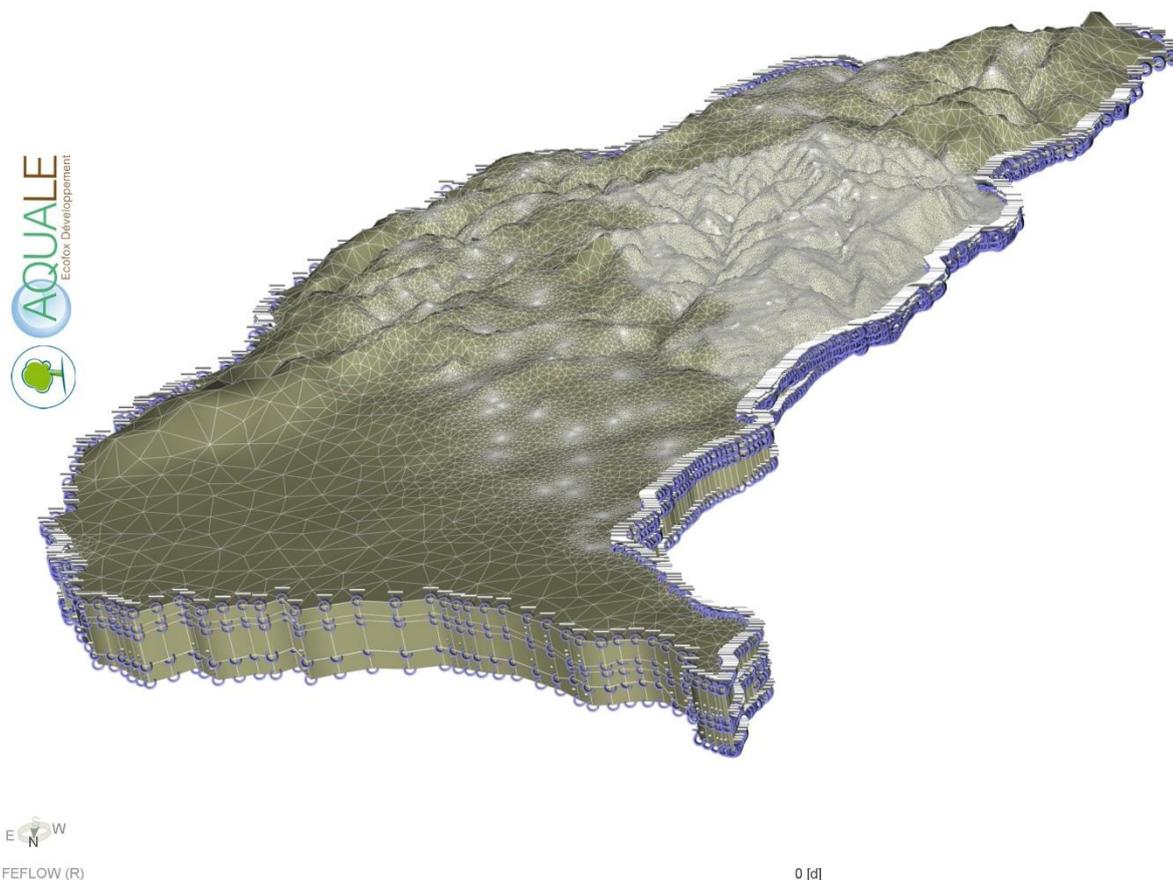


Figure 4-6 : Potentiels imposés le long des frontières extérieures (Vue vers le Sud)

Dans la partie Nord du modèle, en présence des Membres d'Ursel et d'Asse, la connexion entre les aquifères profonds et le réseau hydrographique (en particulier la Dyle qui constitue la limite Nord) n'est plus évidente. Les niveaux d'eau imposés le long de cette frontière pour les couches inférieures aux Membres d'Ursel et d'Asse restent cependant valables. Le débit sortant par cette frontière du modèle ne sera simplement pas considéré comme alimentant la Dyle mais comme un écoulement à part entière au sein des aquifères captifs.

4.4.1.2 LIMITE SUPÉRIEURE - INFILTRATION

Plusieurs sources de données ont été prises en considération pour la définition de l'infiltration.

Ces sources sont :

- les données de pluviométrie disponibles auprès des stations météorologiques situées à l'intérieur ou à proximité de la zone modélisée. Les stations suivantes ont été prises en considération :
 - o Neder-Over-Heembeek (Station MétéoBelgique) ;
 - o Braine-l'Alleud (Station MétéoBelgique) ;
 - o Uccle (Station IRM) ;

- Sainte-Gudule (Station Flowbru) ;
- Flagey (Station Flowbru) ;
- Bemel (Station Flowbru) ;
- Avant-port (Station Flowbru) ;
- Voets (Station Flowbru) ;
- Dépôt communal (Station Flowbru) ;
- Ecluse d’Anderlecht (Station Flowbru) ;
- Kinsendael (Station Flowbru) ;
- Paelinckx (Station Flowbru) ;
- Roodebeek (Station Flowbru) ;
- Hippocrate (Station Flowbru) ;
- Nord (Station Flowbru).

La présence de 15 stations à l’intérieur ou à proximité directe du modèle permet de comparer les données issues de chacune des stations et d’en confirmer la bonne cohérence. Les bilans de Thornthwaite (**ANNEXE 2**) ont été réalisés pour l’année 2013 sur chacune de ces stations et pour les années 1999 à 2013 à la station IRM d’Uccle pour déterminer la quantité d’eau utile (qui correspond à l’infiltration et au ruissellement). Ces bilans sont entre autres basés sur la température de l’air. Vu que la température est connue uniquement aux stations de Neder-Over-Heembeek, Braine-l’Alleud et Uccle, la température d’Uccle est utilisée comme référence aux autres stations.

Annexe 2 : Bilans de Thornthwaite sur l’année 2013 aux différentes stations pluviométriques

- un rapport de l’IRM réalisé pour le compte de Bruxelles Environnement (M. Journée, C. Tricot, K. Verhulst, R. Hamdi, Didier Dehem, Réseau de pluviomètres : validation des données, répartition des précipitations et projet d’étude : « Changement climatique et ressource en eau, IRM, rapport final, septembre 2014) ;
- la cartographie de la recharge en Région Flamande réalisée par Meyus, Y., D. Adyns, S. T. Woldeamlak, O. Batelaan, and F. De Smedt (2004), Opbouw van een Vlaams Grondwatervoedingsmodel : Eindrapport. Technical Report 81pp, AMINAL, afdeling Water.

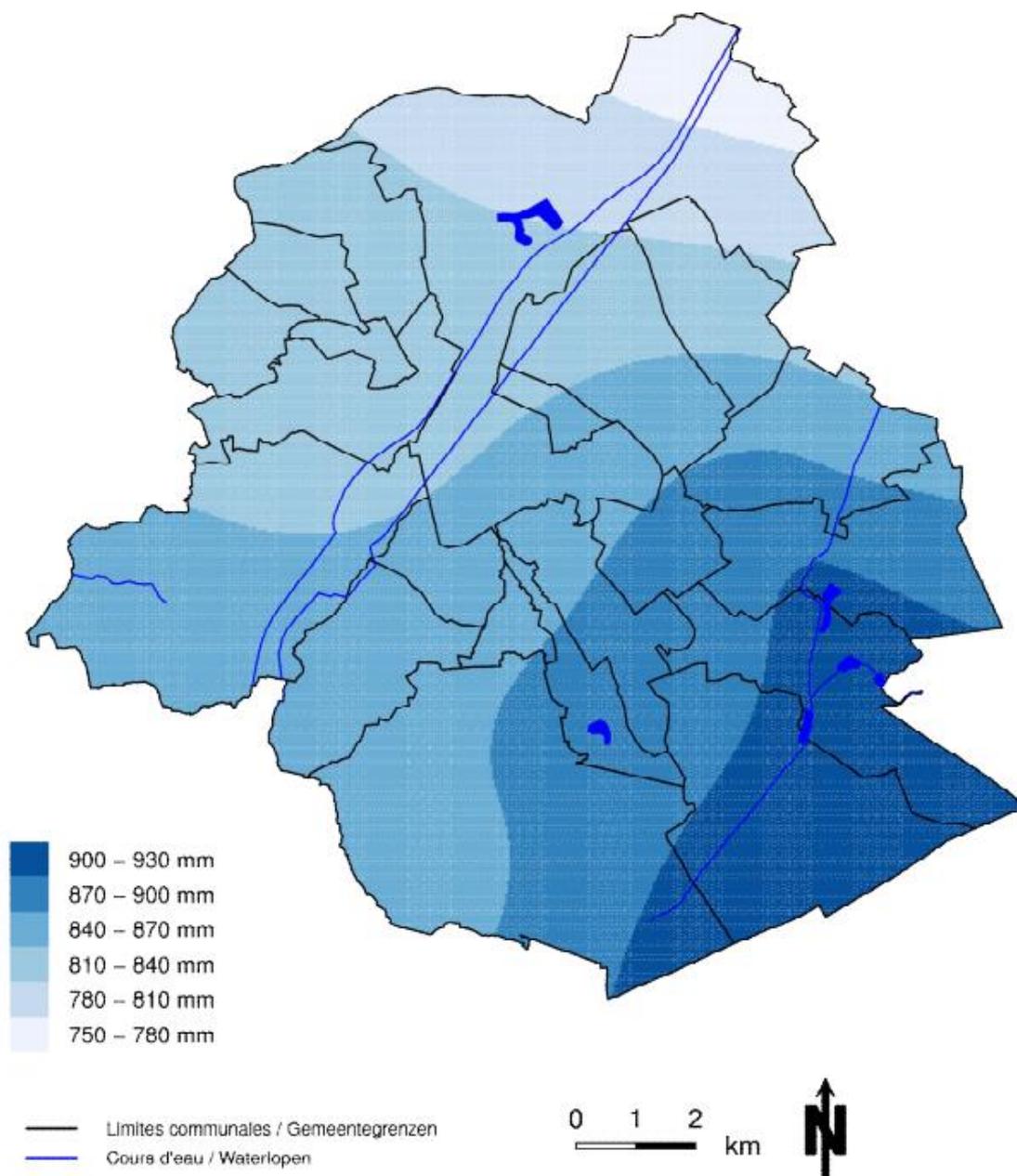
4.4.1.2.1 EVALUATION DE L’INFILTRATION EN RÉGIME PERMANENT

4.4.1.2.1.1 Calcul de l’eau utile et variabilité spatiale des précipitations

La donnée de base indispensable au calcul de l’eau utile est la pluviométrie. Cette dernière est variable dans le temps et l’espace. Puisque le modèle couvre une superficie très importante, la variation de pluviométrie peut potentiellement être élevée.

A ce titre, les **FIGURES 4-7 à 4-11**¹² reprises ci-dessous illustrent la variation spatiale de la pluviométrie au sein de la Région de Bruxelles-Capitale pour les années 1999 à 2010, d’abord pour une année entière puis pour les différentes saisons.

¹² Ces figures sont issues d’un rapport de l’IRM réalisé pour le compte de Bruxelles Environnement (M. Journée, C. Tricot, K. Verhulst, R. Hamdi, Didier Dehem, Réseau de pluviomètres : validation des données, répartition des précipitations et projet d’étude : « Changement climatique et ressource en eau, IRM, rapport final, septembre 2014).



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

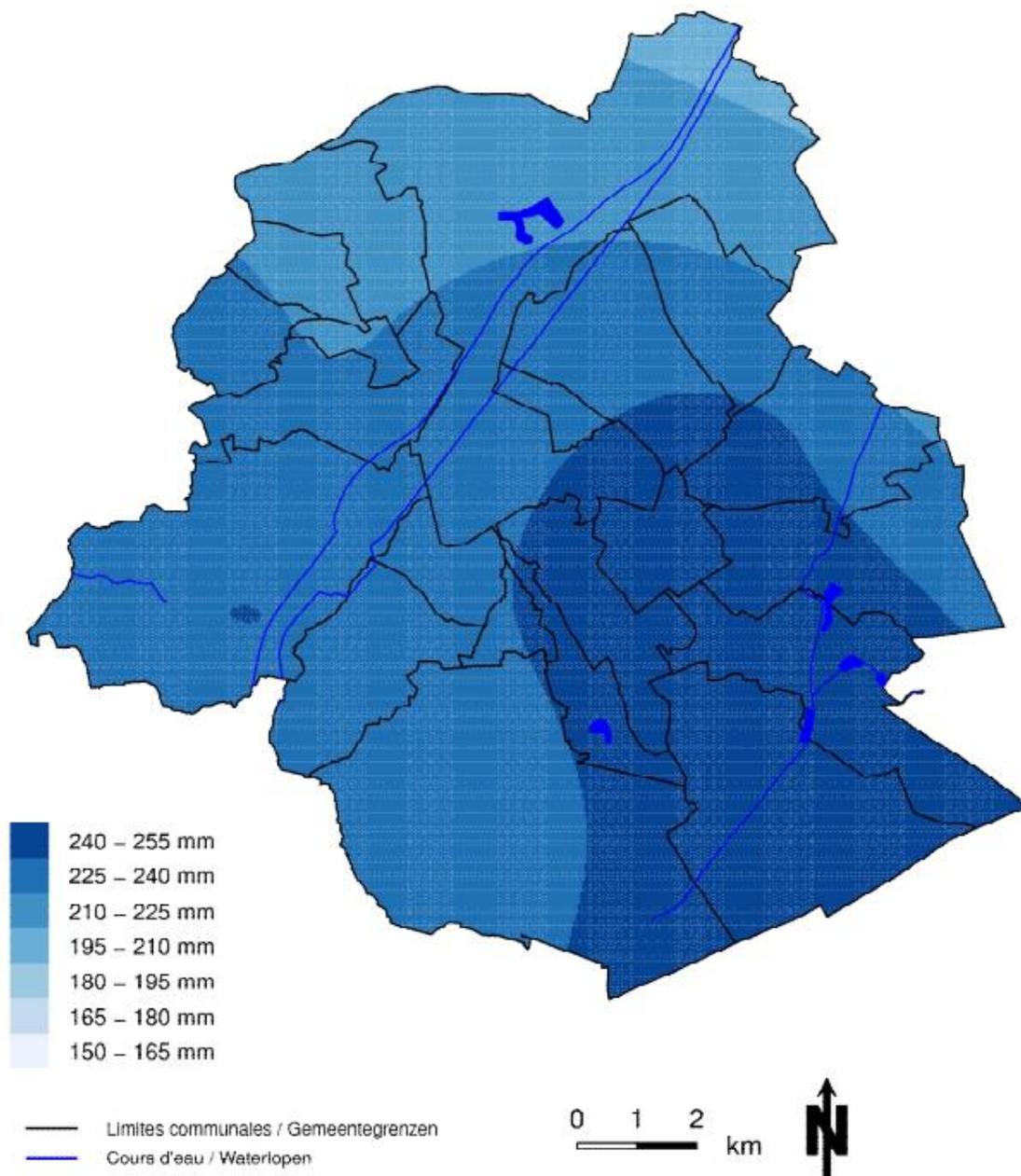
Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS 00 – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS 00 – Verdeling & Copyright CIRB



Figure 4-7 : Précipitations annuelles moyennes sur la période 1999 – 2010 en Région de Bruxelles-Capitale (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement)



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

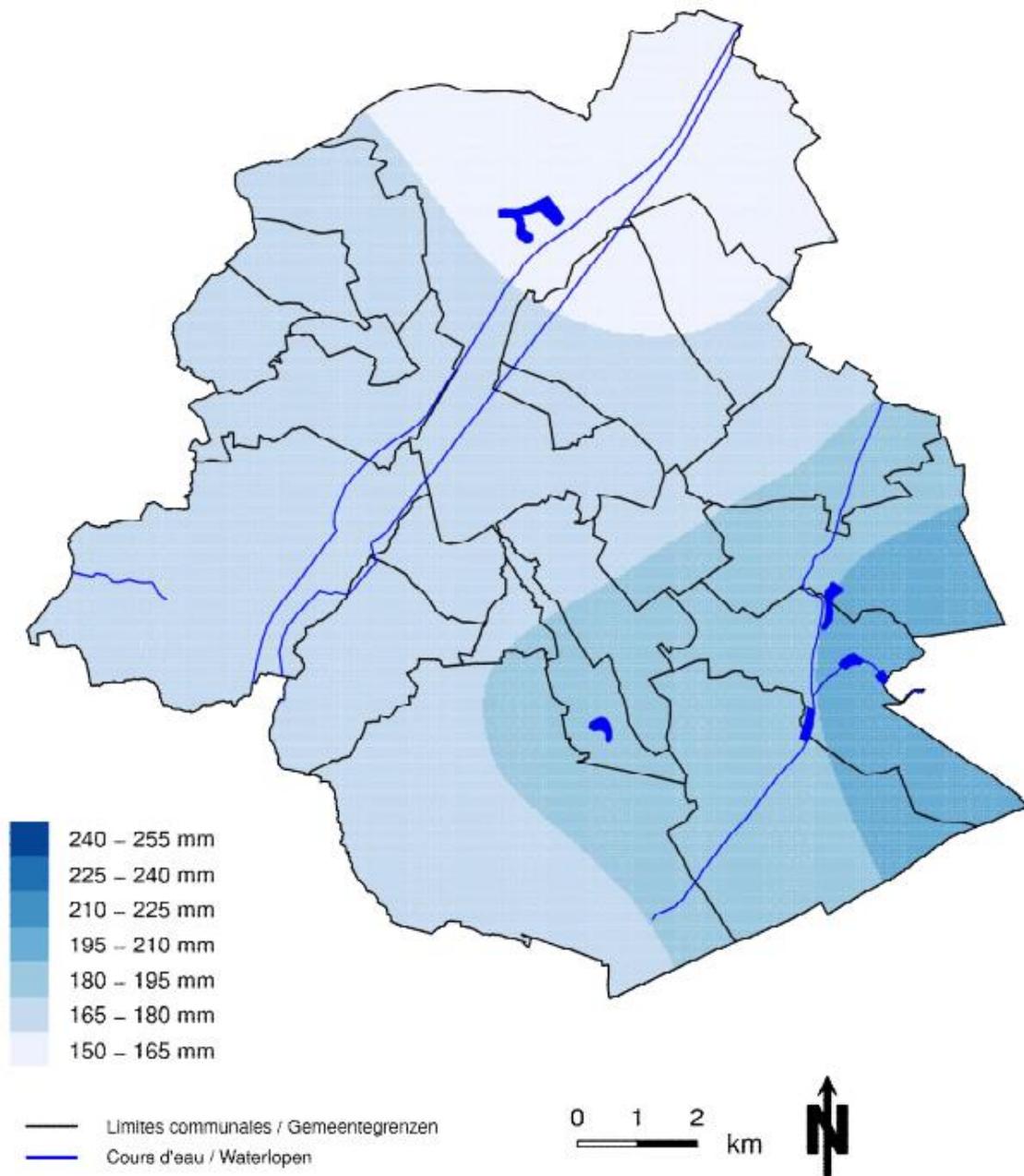
Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIRB



Figure 4-8 : Précipitations hivernales moyennes sur la période 1999 – 2010 en Région de Bruxelles-Capitale (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement)



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

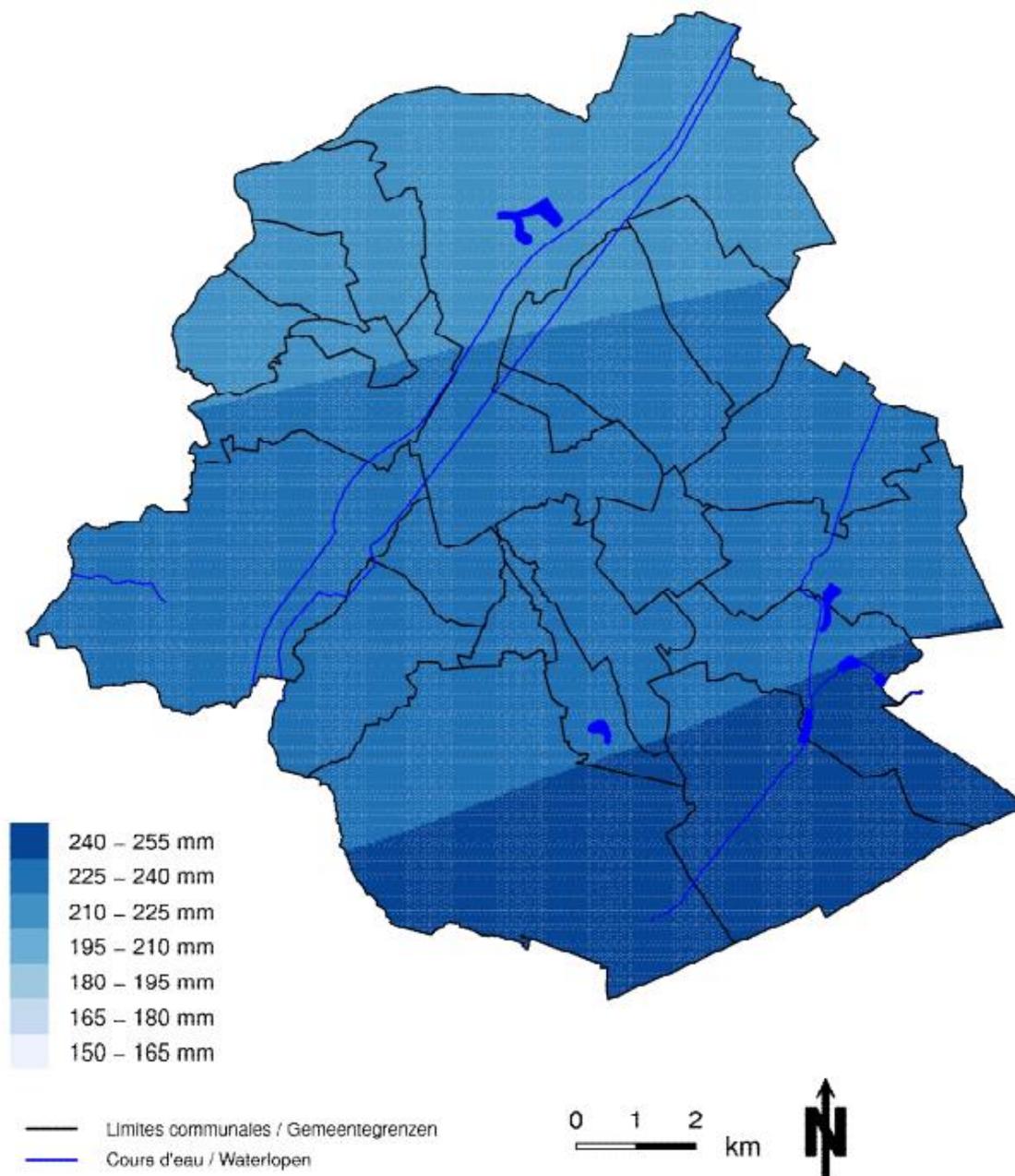
Bron: neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie: IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie: KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIRB



Figure 4-9 : Précipitations printanières moyennes sur la période 1999 – 2010 en Région de Bruxelles-Capitale (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement)



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

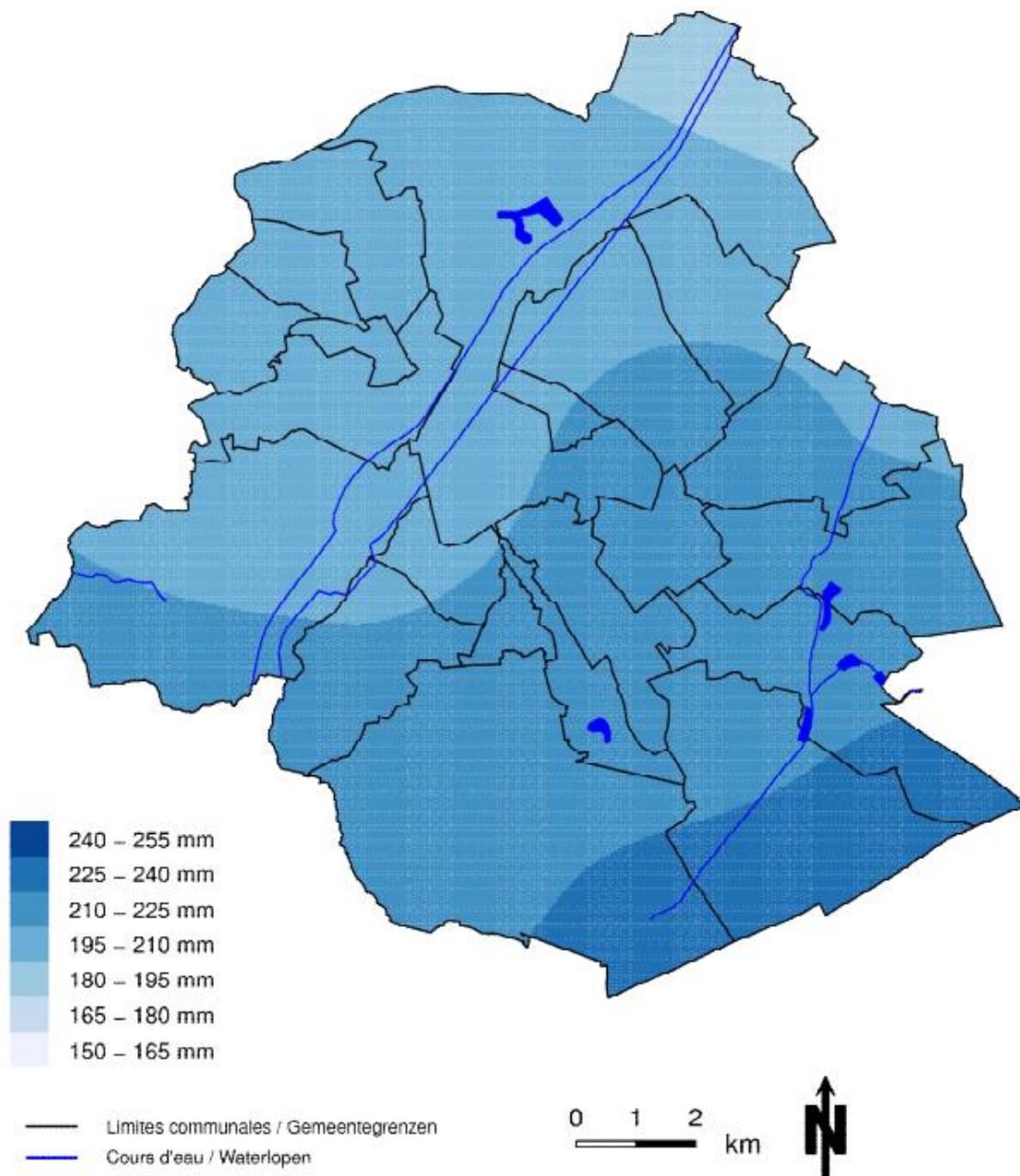
Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIRB



Figure 4-10 : Précipitations estivales moyennes sur la période 1999 – 2010 en Région de Bruxelles-Capitale (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement)



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdoling & Copyright CIRB



Figure 4-11 : Précipitations automnales moyennes sur la période 1999 – 2010 en Région de Bruxelles-Capitale (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement)

Il apparaît que la pluviométrie diminue depuis le Sud-Est vers le centre de la région puis vers le Nord, que ce soit pour les saisons individuellement ou en moyenne sur l'année entière. De plus, la différence entre les précipitations maximales mesurées au Sud et minimales mesurées au Nord sont en moyenne de 150 mm, soit environ 15 % des précipitations maximales.

Si cette variation spatiale existe au niveau de la Région de Bruxelles-Capitale, il est évident qu'elle sera d'autant plus grande sur la zone couverte par le modèle hydrogéologique.

Le **TABLEAU 4-1** ci-dessous reprend l'eau utile calculée pour les différentes stations pluviométriques durant l'année 2013. Au vu des chroniques piézométriques qui montrent une très grande stabilité des niveaux d'eau au sein de la *nappe du Bruxellien*, il est jugé que l'influence des précipitations sur les niveaux de la nappe n'est pas ponctuelle à court terme mais est tamponnée et joue un rôle à plus long terme. Pour cette raison, la moyenne de l'eau utile sur l'année 2013 est utilisée comme référence pour la suite de l'interprétation des données pluviométriques.

Station	Janv (mm)	Fév (mm)	Mars (mm)	Avr (mm)	Mai (mm)	Juin (mm)	Juil (mm)	Août (mm)	Sept (mm)	Oct (mm)	Nov (mm)	Déc (mm)	Somme (mm)
Neder-Over-Heembeek	41.6	40.8	24.6	0	25.8	0	0	0	0	0	0	0	132.9
Braine-L'Alleud	0	12.2	19.7	0	0	0	0	0	0	0	0	4.9	36.8
Uccle	51.9	52.7	43.0	0	58.1	0	0	0	0	0	0	30.1	235.8
Sainte-Gudule	33.1	31.0	36.0	11.1	43.2	0	0	0	0	0	0	0	154.5
Flagey	41.3	33.9	28.8	0	33.1	0	0	0	0	0	0	0	137.2
Bemel	51.8	40.9	25.9	0	23.2	0	0	0	0	0	0	28.7	170.6
Avant-port	33.2	49.4	18.0	0	42.6	0	0	0	0	0	0	1.9	145.2
Voets	56.0	44.3	32.7	0	52.0	0	0	0	0	0	0	53.4	238.5
Dépôt communal	46.6	41.9	32.7	0	48.7	0	0	0	0	0	0	10.8	180.8
Ecluse Anderlecht	46.7	44.3	31.5	0	50.9	0	0	0	0	0	0	27.8	201.3
Kinsendael	41.8	41.1	32.0	0	35.6	0	0	0	0	0	0	0	150.6
Paelinckx	46.7	44.3	31.5	0	50.9	0	0	0	0	0	0	27.8	201.3
Roodebeek	41.3	37.5	25.6	0	40.7	0	0	0	0	0	0	21.8	167.0
Hippocrate	32.4	28.7	21.3	0	45.7	0	0	0	0	0	0	0	128.2
Nord	32.0	30.2	24.1	0	48.9	0	0	0	0	0	0	37.6	172.9

Tableau 4-1 : Eau utile calculée aux stations pluviométriques pour l'année 2013

Il apparaît que l'eau utile calculée aux différentes stations varie entre 36.8 mm (à Braine-l'Alleud) et 238.5 mm à la station de Voets. L'eau utile calculée pour la majorité des stations est comprise entre 128 et 202 mm pour l'année 2013. En écartant les stations en dehors de cet intervalle (3 sur les 15), la moyenne de l'eau utile est de 161.8 mm pour l'année 2013, soit 0.44 mm/jour.

4.4.1.2.1.2 Prise en considération de la géomorphologie

De ces 0.44 mm/jour, il faut évaluer la part qui s'infiltre et la part qui ruisselle sur la base d'un coefficient d'infiltration qui dépend essentiellement de :

- la nature du sol ;
- l'urbanisation ;
- la couverture végétale ;
- la pente.

Pour la détermination de ces zones, deux approches ont été utilisées et comparées.

Dans un premier temps (approche retenue dans le cadre du premier rapport intermédiaire **R-2014-026**), quatre zones caractérisées par un coefficient d'infiltration spécifique ont été définies au sein du modèle hydrogéologique sur la base de l'imagerie satellite de la zone d'étude (analyse visuelle de la carte Google Earth et définition des zones à main levée). Les 4 zones étaient les suivantes :

- zone fortement urbanisée caractérisée par un coefficient d'infiltration très faible (entre 20 et 25 %) ;
- zone moyennement urbanisée caractérisée par un coefficient d'infiltration faible (entre 25 et 30 %) ;
- zone de forêts caractérisée par un coefficient d'infiltration moyen (entre 70 et 80 %) ;
- zone de prairies, parcs et jardins caractérisée par un coefficient d'infiltration élevé (entre 75 et 85 %).

Cette zonation est illustrée à la **FIGURE 4-12** ci-dessous. Puisque cette méthode était basée sur une valeur d'eau utile moyenne (moyenne temporelle et spatiale), la variation spatiale de pluviométrie (donnée source) n'était pas prise en considération à ce stade. La figure est une cartographie de la répartition spatiale des coefficients d'infiltration.

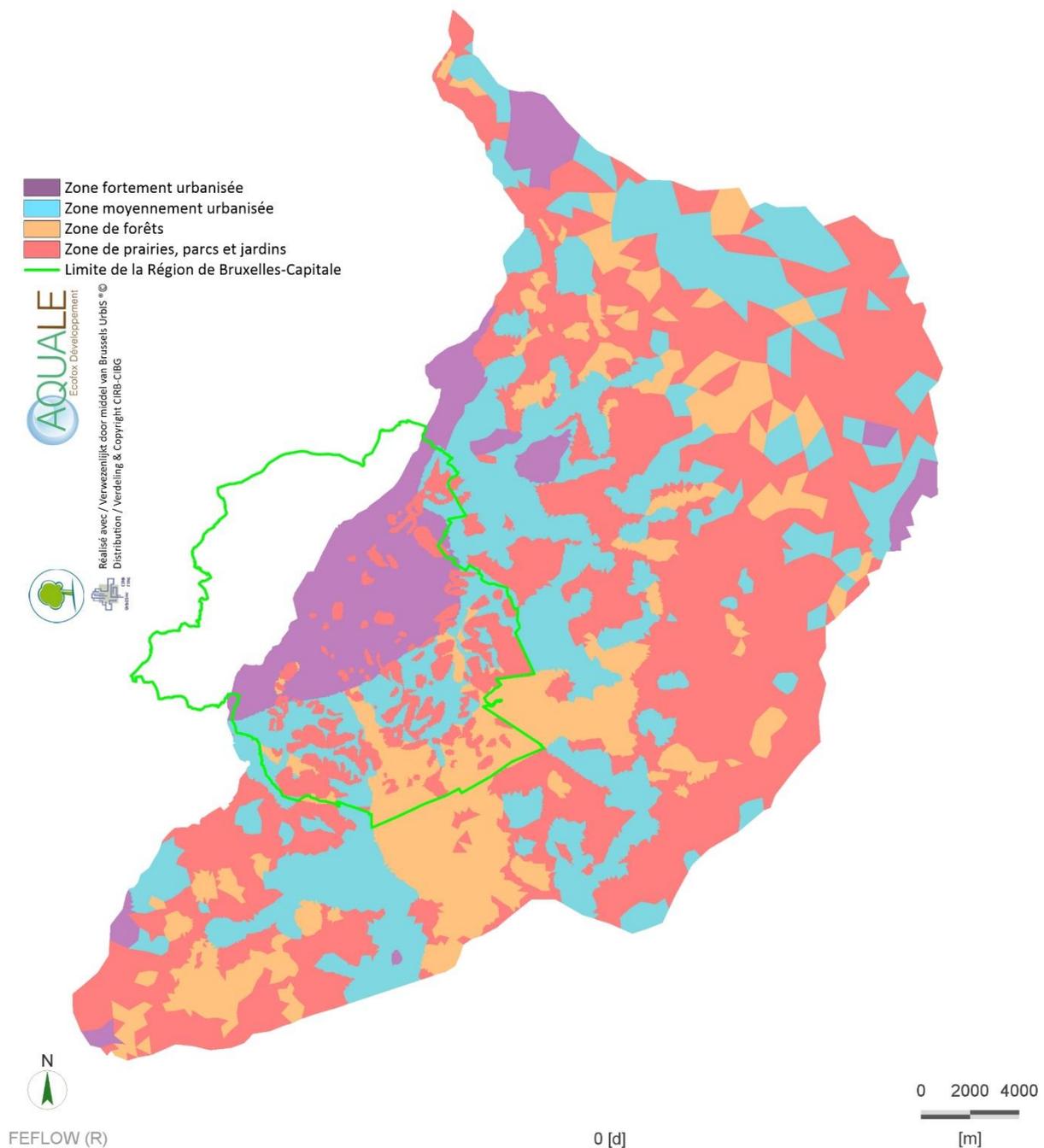


Figure 4-12 : Zonage de l'infiltration

Dans un second temps et dans le but d'améliorer la zonation définie ci-dessus, il a été décidé de se baser sur la cartographie réalisée par Meyus et al. (2004)¹³ dont un extrait est repris à la **FIGURE 4-13**.

¹³ Meyus, Y., D. Adyns, S. T. Woldeamlak, O. Batelaan, and F. De Smedt (2004), *Opbouw van een Vlaams Grondwatervoedingsmodel : Eindrapport*. Technical Report 81pp, AMINAL, afdeling Water.

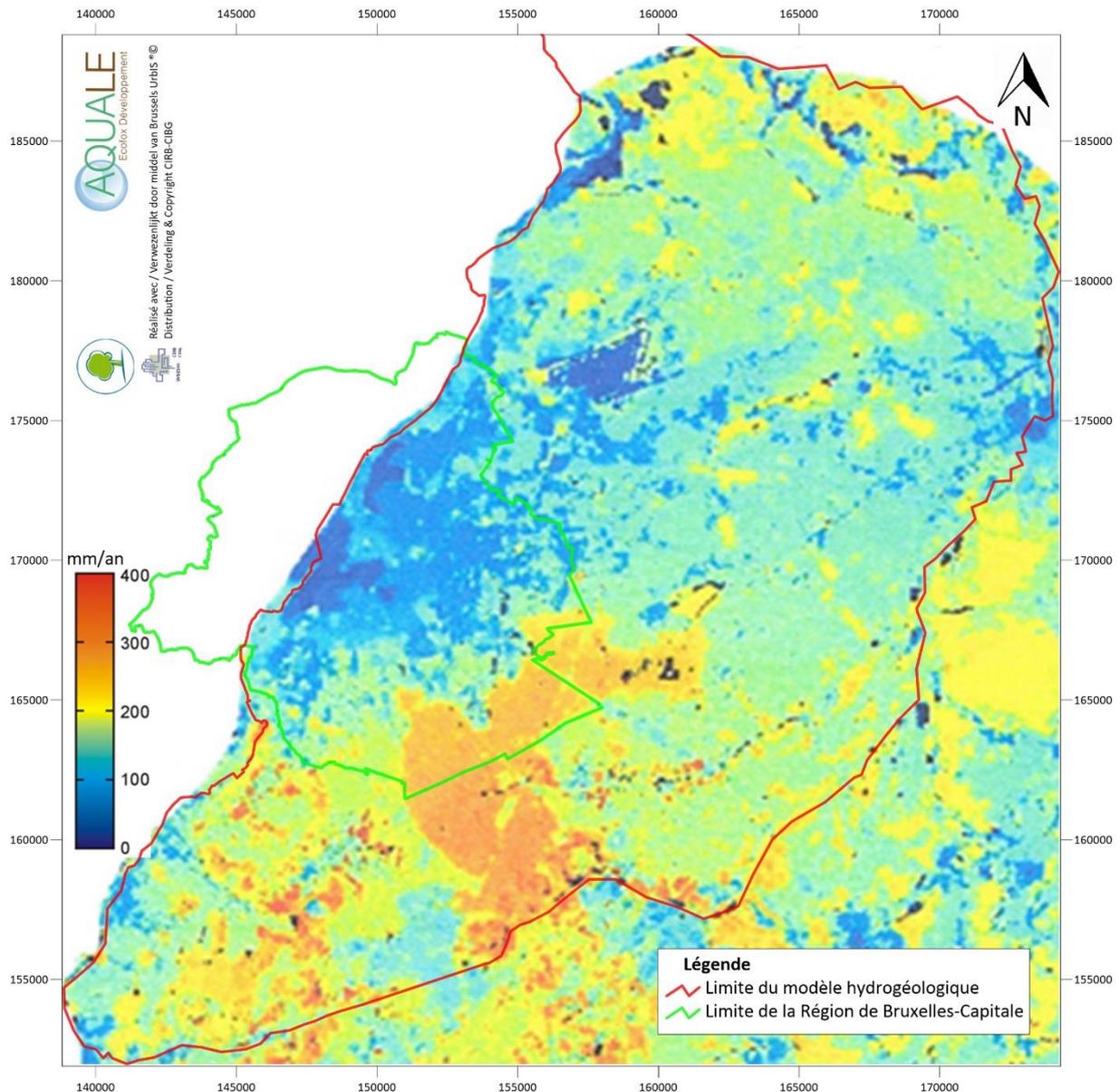


Figure 4-13 : Infiltration annuelle (d'après Meyus et al. (2004))

Selon Luk Peeters¹⁴ (2010), l'estimation de la recharge la plus détaillée et complète résulte de l'étude menée par l'équipe qui a développé le modèle hydrogéologique de la Région Flamande (Meyus et al., 2004). La recharge est estimée sur la base d'un système de traitement de données géographiques détaillé, en régime permanent, et comprenant un modèle de balance des masses de l'eau souterraine (WetSpass). Les cartes de précipitations géoréférencées sont utilisées comme données d'entrée dans ce modèle, ce qui constitue une plus-value importante par rapport à la première solution évoquée ci-dessus. Sur la base des données suivantes :

- l'utilisation du terrain ;
- la topographie ;
- la pente du terrain ;

¹⁴ Groundwater and geochemical modelling of the unconfined Brussels aquifer, Katholieke Universiteit Leuven, Luk Peeters, 2010

- la profondeur de l'eau souterraine ;
- la texture du sol ;

les quantités d'eau évapotranspirée, ruisselante et infiltrante sont calculées en prenant en considération des paramètres de la littérature.

La méthodologie WetSpaas a été testée par le biais d'un certain nombre d'expériences sur des lysimètres (dispositif permettant d'étudier et de mesurer l'évolution de l'eau dans un sol naturel, agricole, forestier, expérimental ou pollué). Les résultats des calculs sont validés après comparaison avec les flux observés en Flandres.

En repartant de cette cartographie, la zonation illustrée à la **FIGURE 4-12** a été affinée (par traitement visuel) pour finalement compter 7 zones d'infiltration différente :

- infiltration minimum ;
- infiltration très faible ;
- infiltration faible ;
- infiltration moyenne ;
- infiltration élevée ;
- infiltration très élevée ;
- infiltration maximum.

Cette zonation est illustrée à la **FIGURE 4-14**.

L'infiltration imposée au modèle est, dans certaines zones, supérieure à l'eau utile estimée via les bilans de Thornthwaite réalisés aux différentes stations de mesures pluviométriques. En concertation avec l'IBGE, la cartographie de Meyus est cependant jugée la plus fiable pour l'estimation de l'infiltration sur le sommet du modèle.

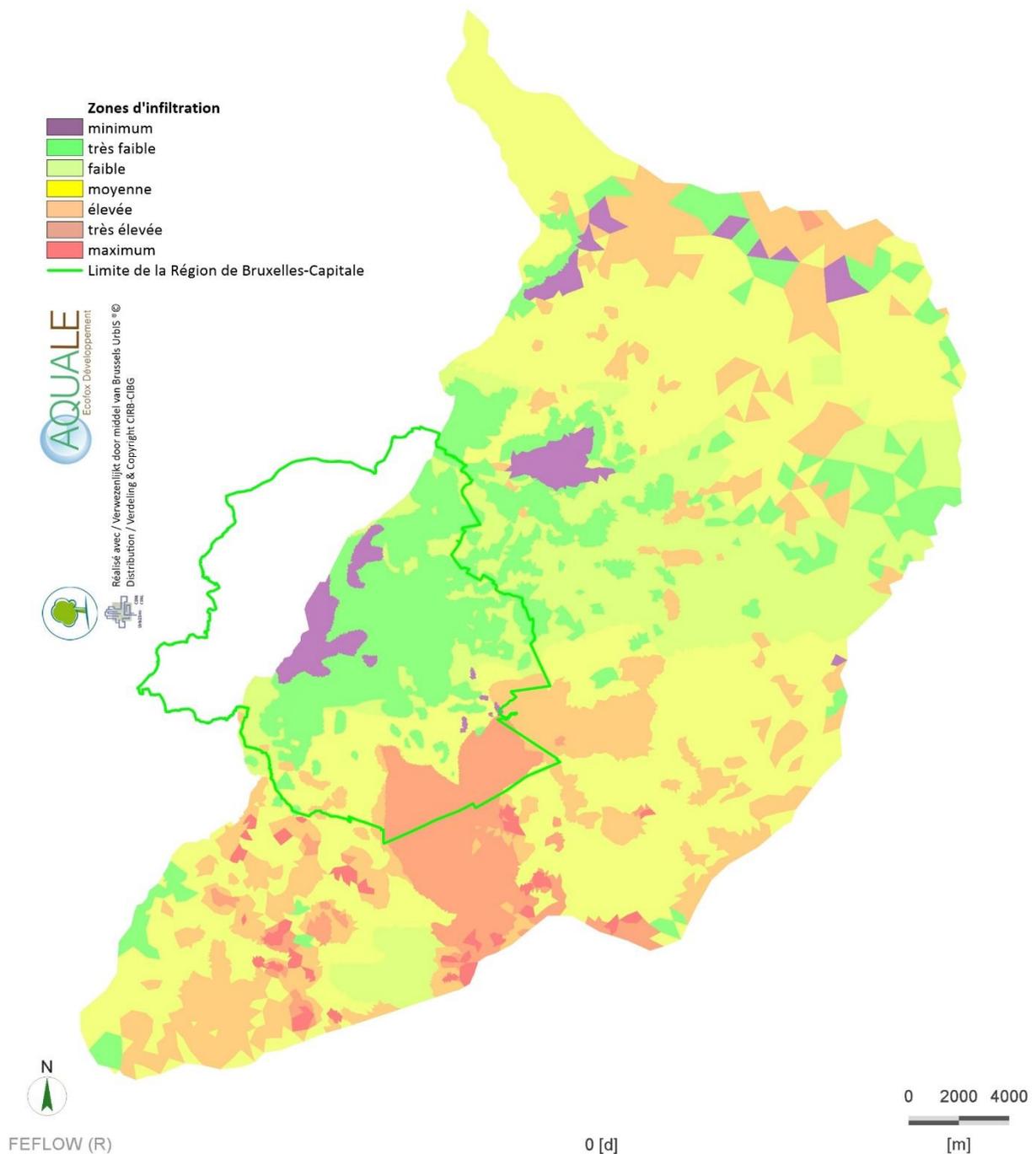


Figure 4-14 : Zonage de l'infiltration au sein de la zone modélisée (d'après Meyus et al. (2004))

Les deux zonages ont de nombreux points communs.

L'infiltration ne peut être imposée définitivement lors de la phase de conceptualisation du modèle. En effet, le modélisateur doit se laisser l'opportunité de l'adapter, dans une fourchette raisonnable, lors de la phase de calibration du modèle. Pour cette raison, l'infiltration définie à ce stade peut être légèrement adaptée en cours de construction du modèle, l'idée générale étant de respecter la zonation définie ci-dessus.

4.4.1.2.2.1 Etude du contexte climatique pour la période 2009 - 2013

La **FIGURE 4-15** montre l'évolution de la pluviométrie et de l'eau utile mensuelles durant les années 2009 à 2013 à la station IRM d'Uccle.

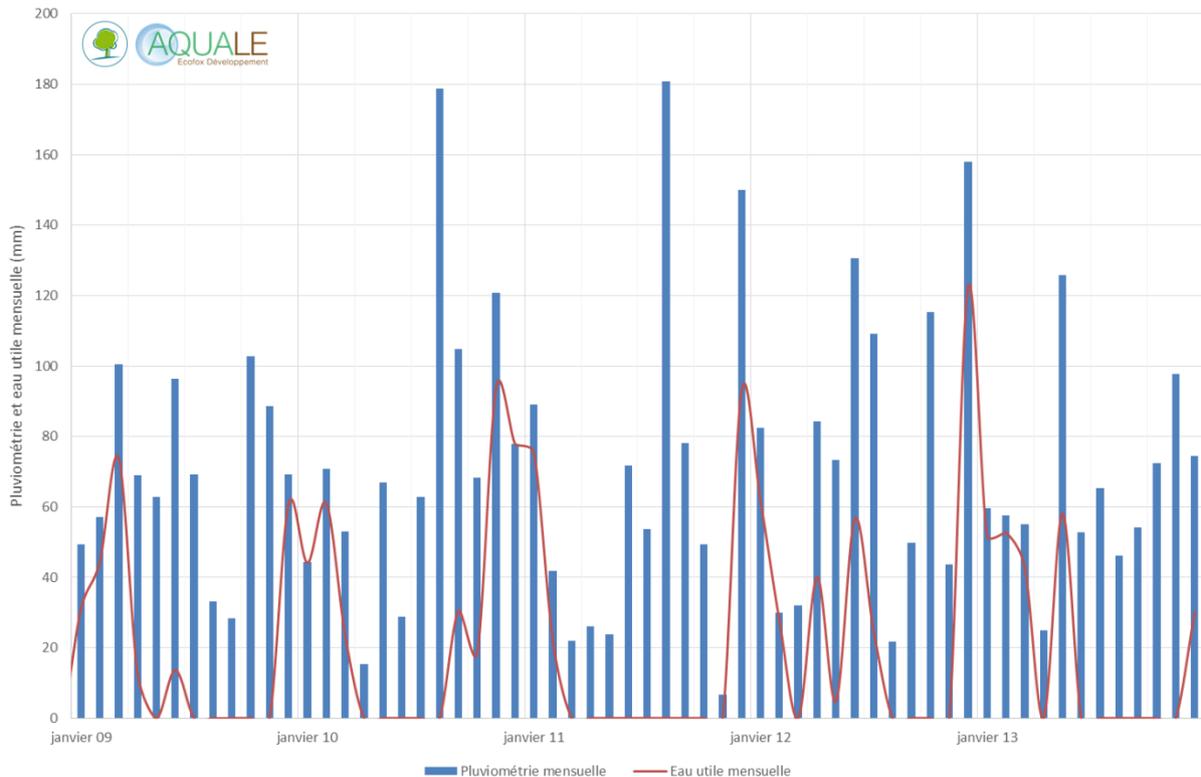


Figure 4-15 : Evolution de la pluviométrie et de l'eau utile mensuelle à la station IRM d'Uccle entre 2009 et 2013

Ce graphique permet d'identifier les périodes d'infiltrations élevée et faible.

Les périodes d'infiltration élevée (> 40 mm d'eau utile par mois) sont les suivantes :

- février 2009 à mars 2009 ;
- décembre 2009 à février 2010 ;
- novembre 2010 à janvier 2011 ;
- décembre 2011 à janvier 2012 ;
- juin 2012 ;
- décembre 2012 à mars 2013 ;
- mai 2013.

Il apparaît donc clairement que la période d'infiltration élevée a lieu du mois de décembre aux mois de février / mars.

Les périodes d'infiltration faible (eau utile = 0 mm) sont les suivantes :

- mai 2009 ;
- juillet 2009 à novembre 2009 ;
- avril 2010 à août 2010 ;
- mars 2011 à novembre 2011 ;
- mars 2012 ;
- août 2012 à novembre 2012 ;
- avril 2013 ;
- juin 2013 à novembre 2013.

Il apparaît donc clairement que la période d'infiltration faible a lieu du mois d'avril au mois de novembre.

En observant en parallèle les courbes piézométriques présentées aux **FIGURES 3-13 à 3-22**, on peut estimer le temps de réponse de l'aquifère aux variations d'eau utile. Pour ce faire, les seules courbes pouvant être utilisées sont celles qui résultent d'un suffisamment grand nombre de données et qui présentent un comportement saisonnier :

- 2-0424b ;
- 2-0018 ;
- 2-0419b ;
- Erasmus ;
- Pz20 ;
- Régent ;
- Ferme Fond Roy.

Pour ces piézomètres, les périodes de hautes eaux sont identifiées aux périodes suivantes :

- en avril 2009 ;
- en mars – avril 2010 ;
- en février – mars 2011 ;
- en 2012, le point haut est observé à des dates assez variables d'un piézomètre à l'autre, globalement compris entre février et mai 2012 ;
- en 2013, le point haut est observé à des dates assez variables d'un piézomètre à l'autre, globalement compris entre février et mai 2013.

Il apparaît que la période des hautes eaux correspond au printemps.

Le décalage entre les hautes eaux observées dans ces piézomètres et les périodes d'infiltration élevée peut dès lors être calculé :

- en 2009 :
 - o période d'infiltration élevée étalée sur 2 mois ;
 - o hautes eaux étalées sur 1 mois ;
 - o décalage temporel : 1 à 2 mois ;
- en 2010 :
 - o période d'infiltration élevée étalée sur 3 mois ;
 - o hautes eaux étalées sur 2 mois ;
 - o décalage temporel : 3 à 4 mois ;
- en 2011 :
 - o période d'infiltration élevée étalée sur 3 mois ;
 - o hautes eaux étalées sur 2 mois ;
 - o décalage temporel : 3 à 4 mois ;
- en 2012 :
 - o période d'infiltration élevée étalée sur 2 mois (suivie de 2 mois isolés d'infiltration modérée / élevée) ;

- hautes eaux étalées sur 4 mois ;
- décalage temporel : 2 à 3 mois ;
- en 2013 :
 - période d'infiltration élevée étalée sur 4 mois (suivie de 1 mois isolé d'infiltration élevée) ;
 - hautes eaux étalées sur 4 mois ;
 - décalage temporel : 2 à 3 mois.

Il apparaît que :

- la durée de la période de hautes eaux peut varier d'une année à l'autre ;
- plus la période d'infiltration élevée est étalée dans le temps, plus le décalage temporel entre l'infiltration et la réaction piézométrique est élevé et plus la période de hautes eaux sera étalée dans le temps également ;
- en 2012 et 2013, l'infiltration est plus irrégulière, les basses eaux et hautes eaux sont moins distinctes.

De la même manière, pour ces mêmes piézomètres, les périodes de basses eaux sont les suivantes :

- de septembre à novembre 2009 ;
- en juillet – août 2010 (et, pour certains ouvrages, en octobre 2010) ;
- en novembre – décembre 2011 (et, pour certains ouvrages, en juillet 2011) ;
- entre septembre et novembre 2012 ;
- en septembre – octobre 2013.

Il apparaît que la période des basses eaux correspond à l'automne.

Le décalage entre les basses eaux observées dans ces piézomètres et le début des périodes d'infiltration faible peut dès lors être calculé :

- en 2009 :
 - période d'infiltration faible étalée sur 6 mois ;
 - basses eaux étalées sur 3 mois ;
 - décalage temporel : 4 à 5 mois ;
- en 2010 :
 - période d'infiltration faible étalée sur 5 mois ;
 - basses eaux étalées sur 2 mois (mais certains ouvrages montrent une piézométrie basses eaux 2 mois après) ;
 - décalage temporel : 3 à 4 mois ;
- en 2011 :
 - période d'infiltration faible étalée sur 9 mois ;
 - basses eaux étalées sur 2 mois (mais certains ouvrages montrent une piézométrie basses eaux 4 mois avant) ;
 - décalage temporel : 7 à 8 mois (excepté pour certains ouvrages pour lesquels le décalage est de 3 à 4 mois) ;
- en 2012 :
 - période d'infiltration faible étalée sur 4 mois (avec infiltration modérée les 3 mois qui précédent) ;
 - basses eaux étalées sur 3 mois ;
 - décalage temporel : 5 à 6 mois (par rapport au début de la période d'infiltration modérée) ;
- en 2013 :
 - période d'infiltration faible étalée sur 5 mois (avec infiltration modérée les 2 mois qui précédent) ;
 - basses eaux étalées sur 2 mois ;
 - décalage temporel : 3 à 4 mois.

Il apparaît que :

- la durée de la période de basses eaux varie peu d'une année à l'autre, elle est toujours comprise entre 2 et 3 mois ;
- plus la période d'infiltration faible est étalée dans le temps, plus le décalage temporel entre l'infiltration et la réaction piézométrique est élevé et plus la période de basses eaux sera étalée dans le temps également ;
- en 2011, la période d'infiltration faible est très longue, la réaction piézométrique est moins synchrone dans les piézomètres ;
- en 2012 et 2013, l'infiltration est plus irrégulière, les basses eaux et hautes eaux sont moins distinctes.

En ce qui concerne le temps de réaction de l'aquifère aux sollicitations pluviométriques, il peut être conclu que :

- les périodes d'infiltration élevée sont centrées sur l'hiver ;
- les périodes de hautes eaux sont centrées sur le printemps ;
- les périodes d'infiltration faible sont centrées sur l'été ;
- les périodes de basses eaux sont centrées sur l'automne ;
- globalement, il y a donc un décalage compris entre 2 et 4 mois entre l'événement pluviométrique et sa conséquence sur l'aquifère ;
- plus une période d'infiltration élevée ou faible est étalée dans le temps, plus le décalage avec la réaction de l'aquifère sera grand et plus la période de hautes eaux ou de basses eaux consécutive sera longue ;
- durant les années 2011 à 2013, les observations sont moins claires.

4.4.1.2.2.2 Etude du contexte climatique à long terme

A titre indicatif, en comparaison à l'évolution de l'eau utile à long terme (depuis 1990), les 5 années de référence constituent plutôt une période d'infiltration moyenne. Le **TABLEAU 4-2** reprend l'évolution de l'eau utile annuelle pour les années 1990 à 2013. Il précise également s'il s'agit d'une année d'eau utile faible, moyenne ou élevée en comparant l'eau utile de l'année avec les percentiles 25 et 75 ainsi que la médiane calculés sur les 24 années de référence.

Année	Eau utile annuelle (mm)	< P25 (183 mm)	P25 < < MED (303 mm)	MED < < P75 (341 mm)	P75 <
1990	334			X	
1991	322			X	
1992	425				X
1993	335			X	
1994	361				X
1995	321			X	
1996	267		X		
1997	150	X			
1998	400				X
1999	336			X	
2000	258		X		
2001	525				X

Année	Eau utile annuelle (mm)	< P25 (183 mm)	P25 < < MED (303 mm)	MED < < P75 (341 mm)	P75 <
2002	512				X
2003	161	X			
2004	284		X		
2005	108	X			
2006	147	X			
2007	120	X			
2008	119	X			
2009	236		X		
2010	350				X
2011	190		X		
2012	338			X	
2013	236		X		

Tableau 4-2 : Evolution de l'eau utile annuelle entre 1990 et 2013 (mm) (Source des données pluviométriques : IRM)

Il apparaît que l'eau utile peut varier assez fortement d'une année à l'autre. Le maximum observé est de 525 mm en 2001. Le minimum observé est de 108 mm en 2005. Sur le long terme, il apparaît que :

- la période couvrant les années 1990 à 1995 est une période d'eau utile très élevée (avec une moyenne annuelle de 350 mm sur six ans) ;
- la période couvrant les années 1996 et 1997 est une période d'eau utile faible (avec une moyenne annuelle de 209 mm sur deux ans) ;
- la période couvrant les années 1998 à 2002 est une période d'eau utile très élevée (avec une moyenne annuelle de 406 mm) sur cinq ans ;
- la période couvrant les années 2003 à 2008 est une période d'eau utile faible (avec une moyenne annuelle de 156 mm sur six ans) ;
- la période couvrant les années 2009 à 2013 est une période d'eau utile intermédiaire (avec une moyenne annuelle de 270 mm sur cinq ans).

La période de référence pour la calibration en régime transitoire est caractérisée par une eau utile assez variable dans le temps. Il s'agit par ailleurs d'un contexte intermédiaire par rapport aux extrêmes faibles entre 2003 et 2008 et élevés entre 1998 et 2002.

Afin de confirmer ces observations, la **FIGURE 4-16** ci-après illustre l'évolution de l'eau utile totale entre décembre et mars pour les années 1991 à 2013. L'axe horizontal est placé au niveau de la moyenne de l'eau utile sur la période. Il est ainsi très aisé de visualiser les années d'eau utile élevée / faible.

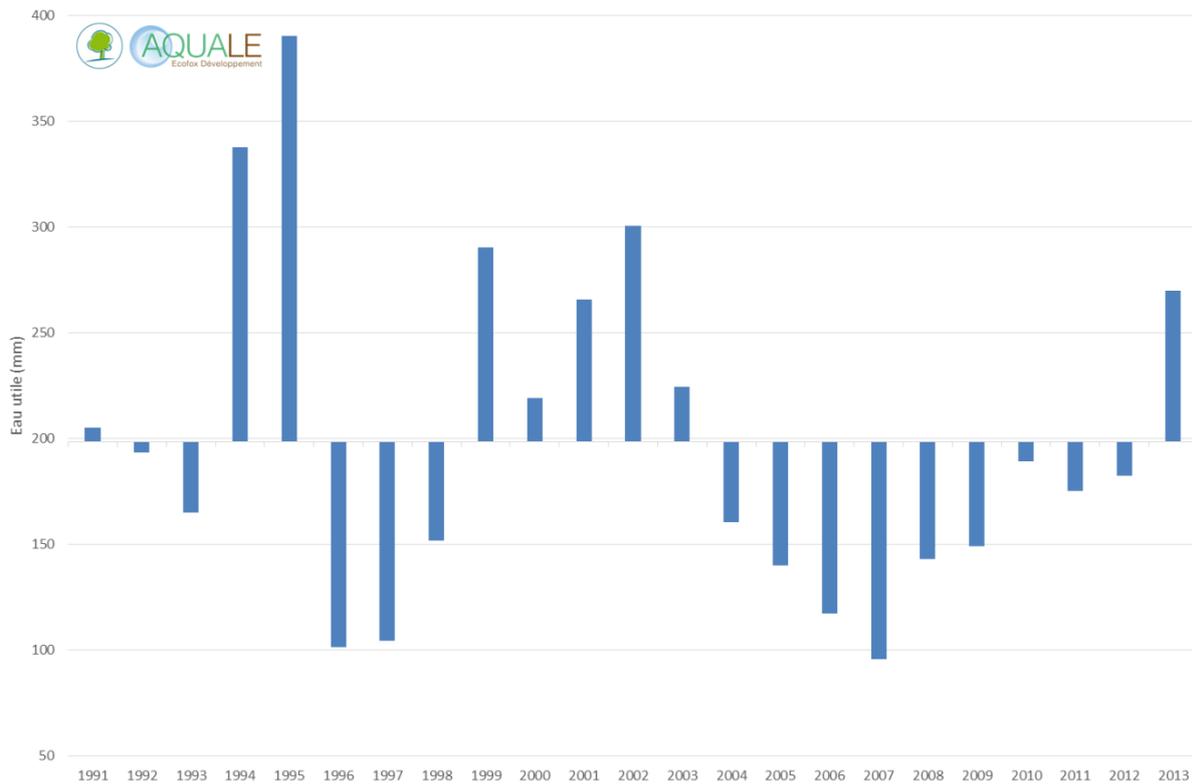


Figure 4-16 : Evolution de l'eau utile cumulée de décembre à mars pour les années 1991 à 2013 (la valeur indiquée est calculée en prenant la somme des valeurs mensuelles calculées entre le mois de décembre de l'année précédente et le mois de mars de l'année en cours)

Les FIGURES 4-17 à 4-19 illustrent l'impact de l'eau utile à long terme (1990 – 2013¹⁵) pour quelques ouvrages piézométriques de la Région de Bruxelles Capitale. Les flèches colorées, dans la partie supérieures des figures, indiquent la tendance de l'eau utile. Il apparaît que, globalement, la piézométrie à long terme est bien corrélée à l'eau utile (très visible en particulier pour la période allant de 1998 à 2002 avec une infiltration très élevée suivie de la période allant de 2003 à 2008 avec une infiltration très faible). Finalement, la période 2009 – 2013 est caractérisée par un relatif équilibre.

¹⁵ Seules les données de la période 2009 à 2013 ont été validées par Bruxelles Environnement.

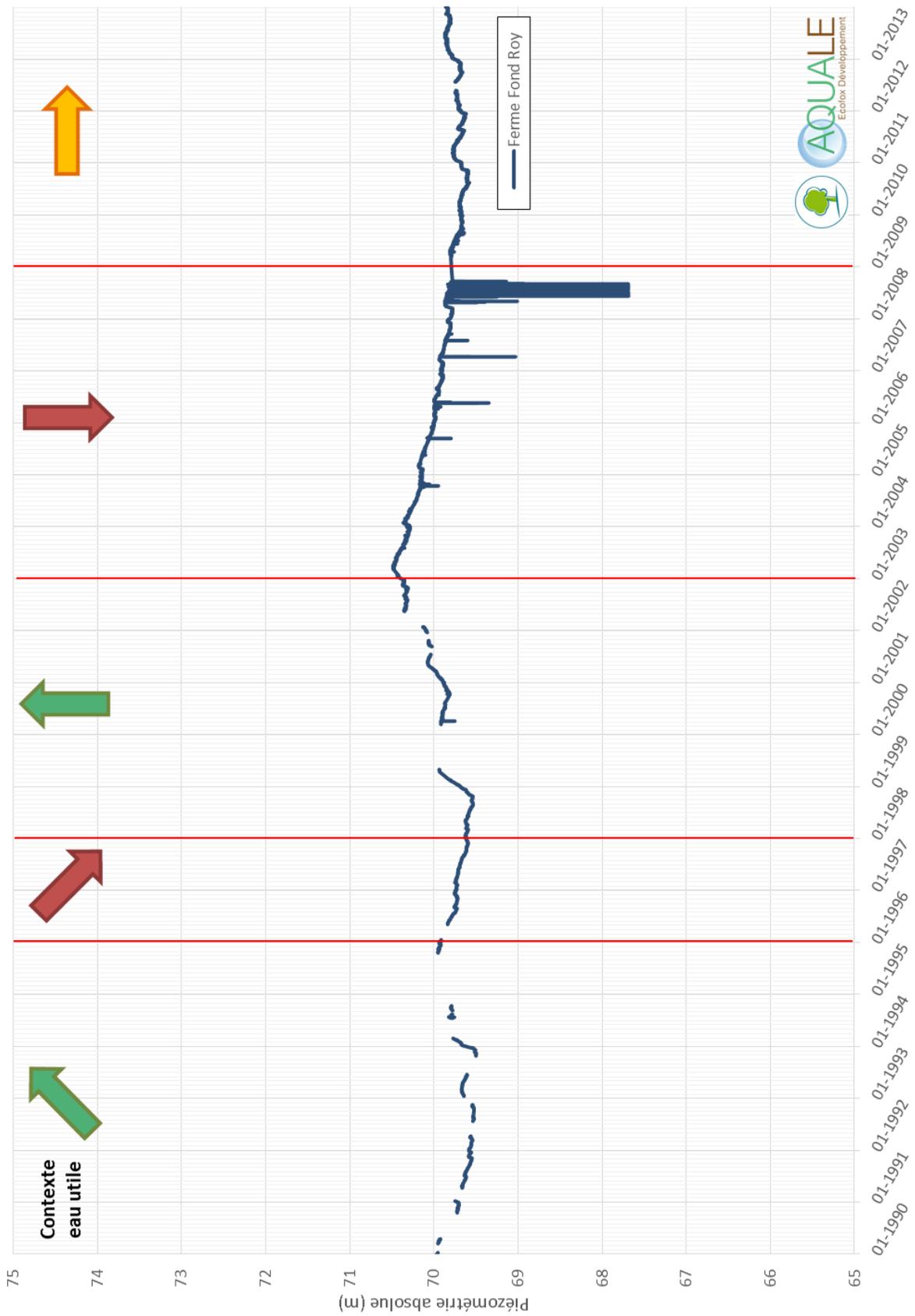


Figure 4-17 : Impact de l'eau utile à très long terme sur le piézomètre Ferme Fond Roy

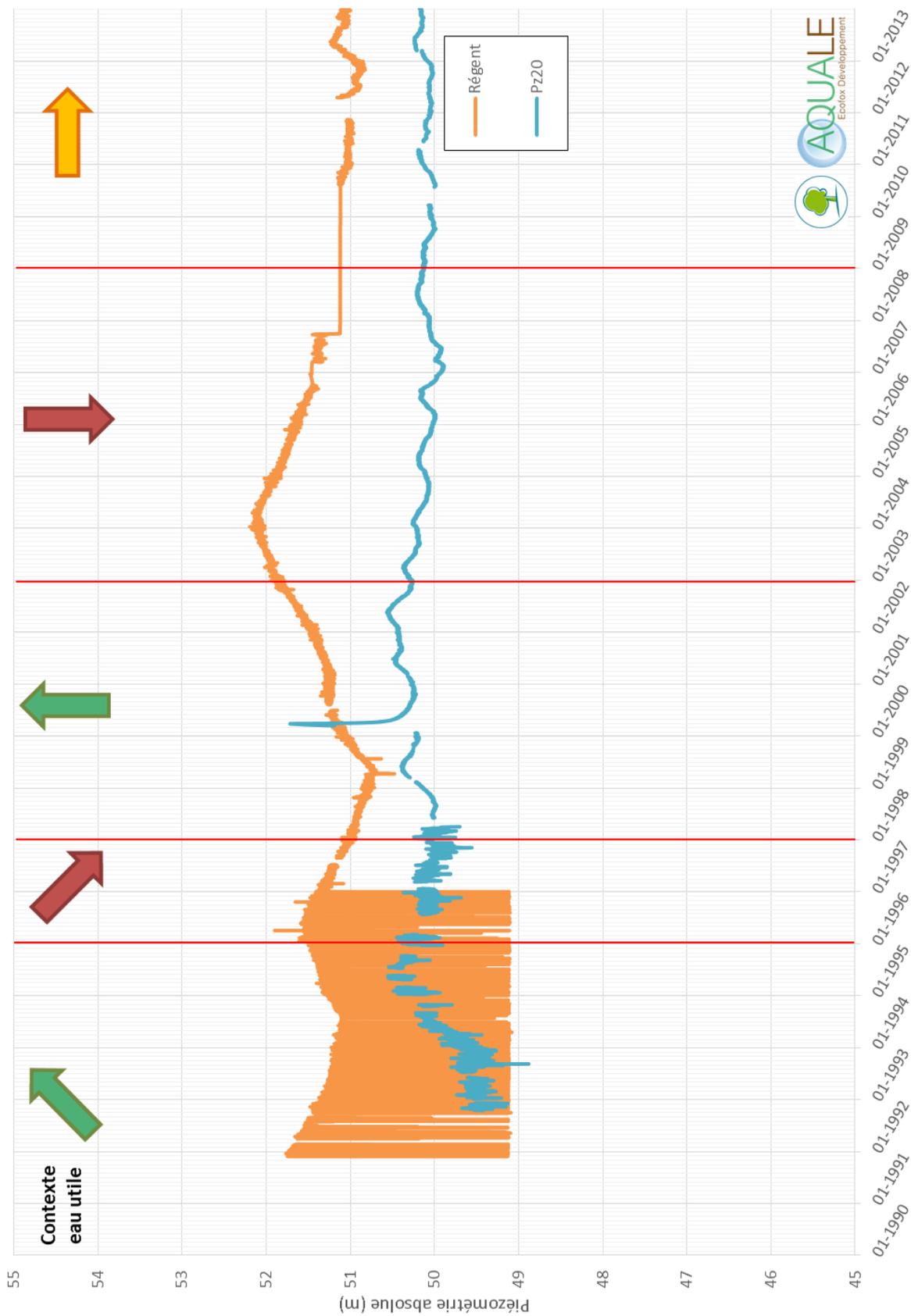


Figure 4-18 : Impact de l'eau utile à très long terme sur les piézomètres Régent et Pz20

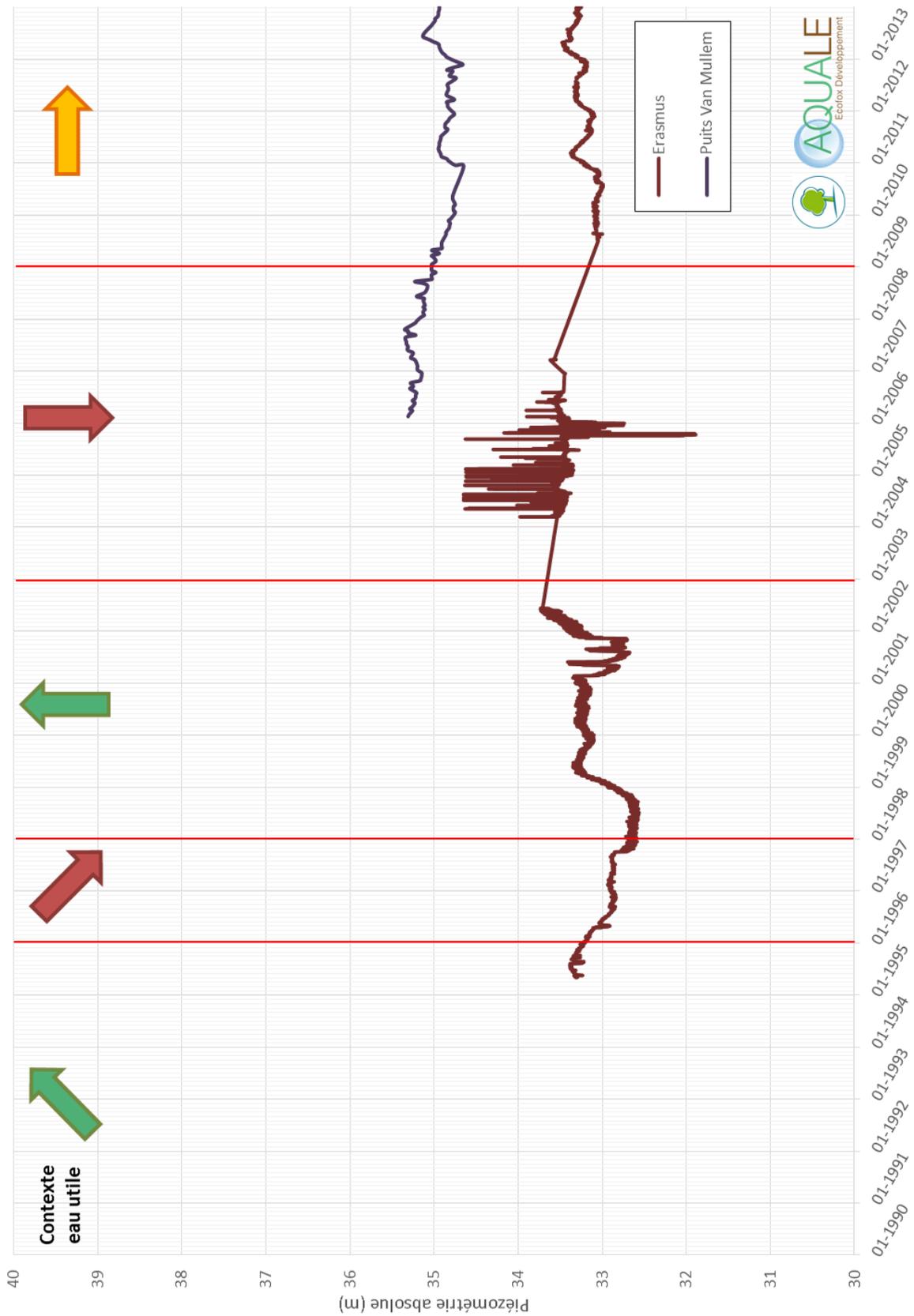


Figure 4-19 : Impact de l'eau utile à très long terme sur les piézomètres Erasmus et Van Mullem

4.4.1.2.2.3 Etude du contexte climatique à très long terme

Les FIGURES 4-20 à 4-23 ainsi que les commentaires (*en italique*) qui suivent sont repris d'un rapport de l'IRM (IRM, septembre 2014¹⁶). Elles illustrent l'évolution des précipitations cumulées par saison de 1901 à 2014.

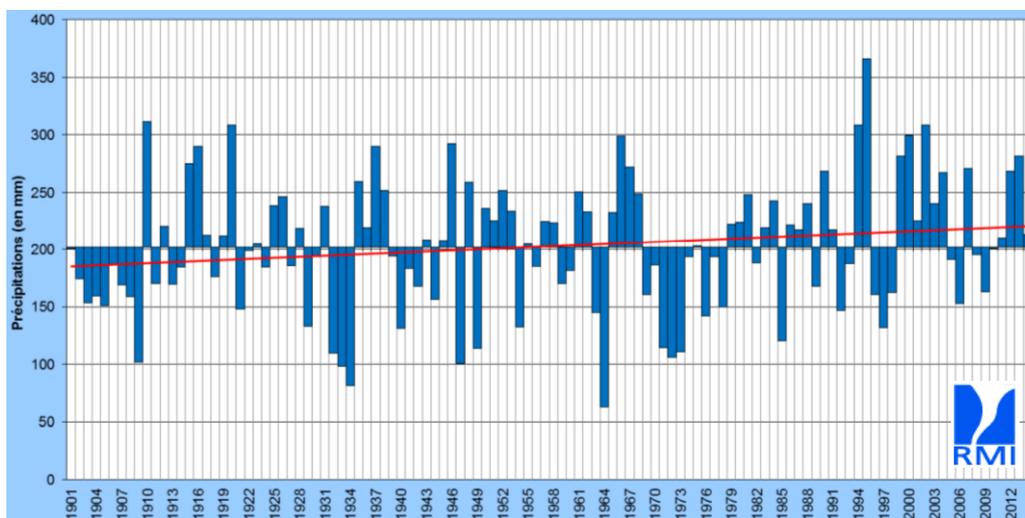


Figure 4-20 : Précipitations hivernales (les trois mois consécutifs de décembre à février) à Uccle sur la période 1901 – 2014 (en mm). L'année reprise sur le graphique est celle de la fin de la période des trois mois consécutifs. Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (202.8 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement)

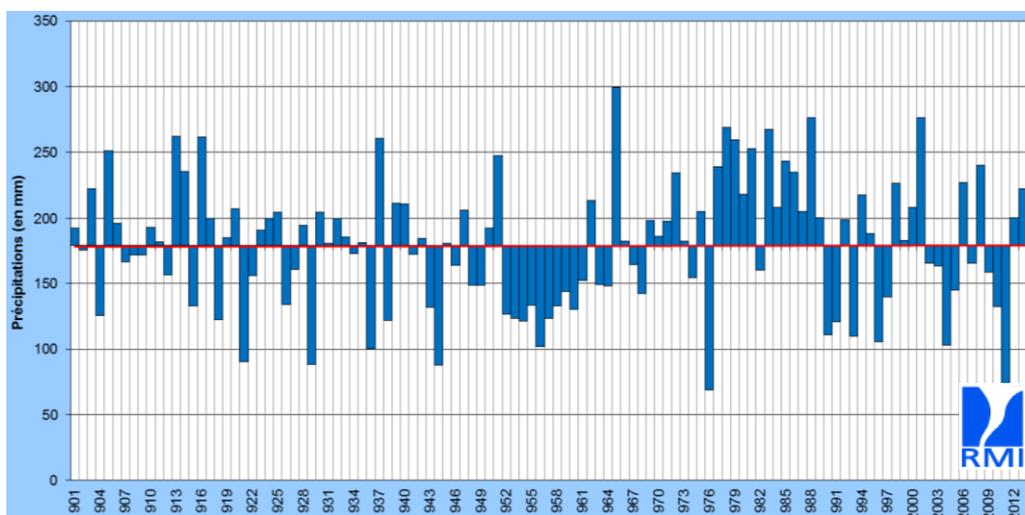


Figure 4-21 : Précipitations printanières (mars – mai) à Uccle sur la période 1901 – 2014 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (178.5 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période (droite quasi horizontale, dans ce cas) (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement)

¹⁶ Ces figures sont issues d'un rapport de l'IRM réalisé pour le compte de Bruxelles Environnement (M. Journée, C. Tricot, K. Verhulst, R. Hamdi, Didier Dehem, Réseau de pluviomètres : validation des données, répartition des précipitations et projet d'étude : « Changement climatique et ressource en eau, IRM, rapport final, septembre 2014)

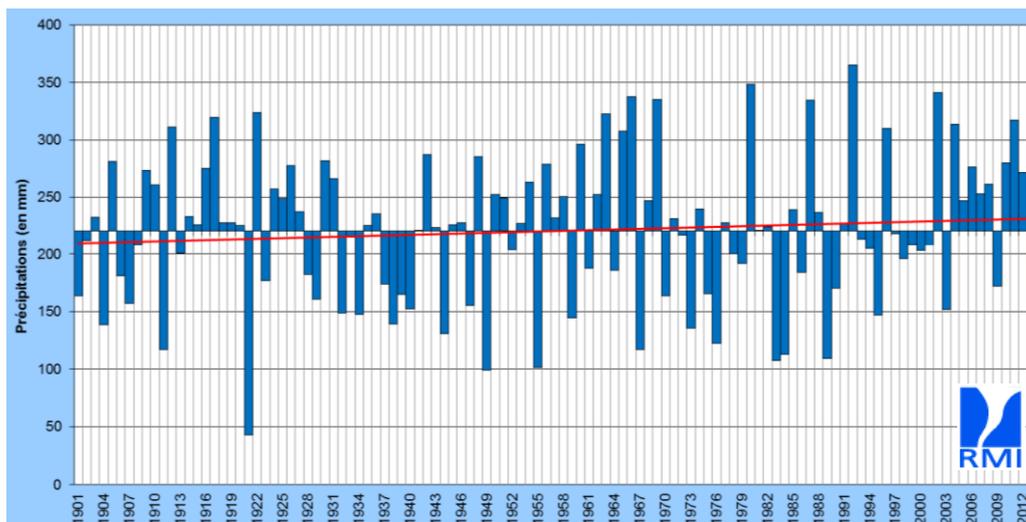


Figure 4-22 : Précipitations estivales (juin – août) à Uccle sur la période 1901 – 2013 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (220.5 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement)

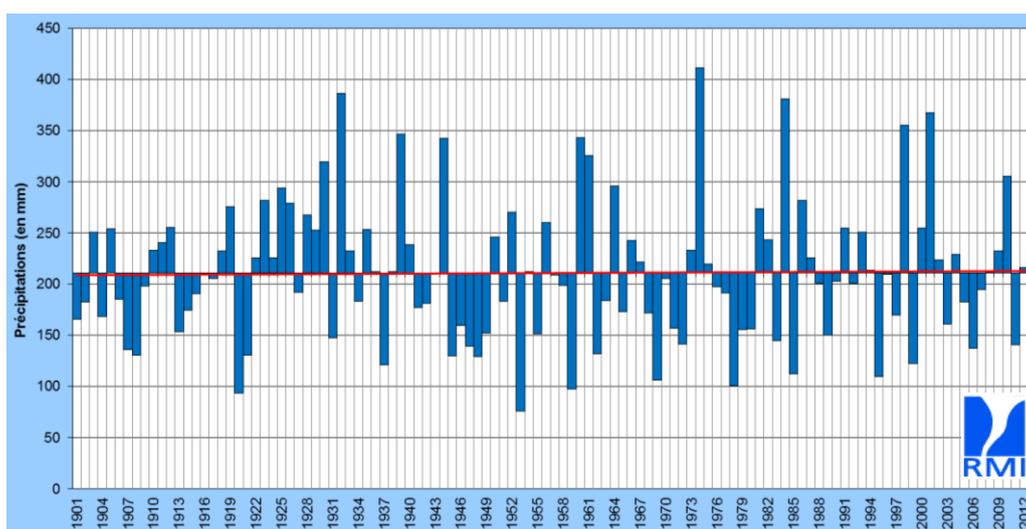


Figure 4-23 : Précipitations automnales (septembre – novembre) à Uccle sur la période 1901 – 2013 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (210.7 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période (droite quasi horizontale, dans ce cas) (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement)

A l'échelle séculaire, entre le début du 20^e siècle et l'année 2014, les cumuls saisonniers des précipitations à Uccle présentent soit une tendance globale à la hausse (environ 18 % en hiver et 8 % en été), soit (quasi) pas de tendance (au printemps et en automne).

Ces résultats globaux doivent être cependant relativisés dans la mesure où la variabilité interannuelle (et sur des périodes de quelques années) des cumuls est importante. De ce fait, les significations statistiques des tendances à la hausse sont relativement faibles.

Contrairement au réchauffement significatif observé en région bruxelloise depuis le début du 20^e siècle, on peut conclure que l'on observe jusqu'ici qu'une évolution relativement faible pour les cumuls de précipitations à l'échelle de la saison ou de l'année depuis le début du 20^e siècle. A plus petites échelles temporelles, on note cependant des variations parfois importantes des cumuls d'une année à l'autre, ou d'un groupe d'années à l'autre, au cours d'une décennie ou d'une décennie à l'autre.

4.4.1.2.2.4 Conséquence pour le modèle

L'infiltration imposée en régime transitoire résulte de la cartographie de Meyus combinée avec la variation temporelle de l'eau utile calculée à la station IRM d'Uccle (le régime transitoire est réalisé avec un pas de temps d'un mois). Ainsi, l'infiltration imposée se situe dans la gamme des valeurs proposées par la cartographie de Meyus mais varie de la même manière que varie l'eau utile à la station d'Uccle (les données de cette station sont donc utilisées pour calculer un coefficient de pondération variable dans le temps des valeurs de Meyus). Ce coefficient d'infiltration est calculé en prenant le rapport entre :

- d'une part, l'eau utile mensuelle (calculée à la station IRM d'Uccle par le bilan de Thornthwaite) pour le mois à simuler ;
- et d'autre part, l'eau utile annuelle (calculée à la station IRM d'Uccle par le bilan de Thornthwaite) pour l'année 2013.

Au **CHAPITRE 3.3.2.2**, différentes zones ont été définies pour prendre en compte les différents types de comportement piézométrique (en particulier, les variations temporelles différentes en fonction des endroits). Comme cela est défini dans ce chapitre, la variation temporelle d'infiltration imposée est le résultat de moyennes mensuelle, bimensuelle ou annuelle.

4.4.1.2.3 COMPOSANTE ADDITIONNELLE – EVALUATION DE L'APPORT EN PROVENANCE DES RÉSEAUX D'ÉGOUTTAGE ET DE DISTRIBUTION

Spécialement au droit de la Région de Bruxelles-Capitale très fortement urbanisée et où l'infiltration de l'eau de pluie est faible, il est important de prendre en considération les pertes en provenance du réseau d'égouttage et de la distribution publique de l'eau potable.

La station d'épuration Sud, d'une capacité de 360 000 équivalent-habitants, recueille les eaux résiduaires urbaines de la partie Sud de la Région de Bruxelles-Capitale ainsi que d'une partie du territoire des communes flamandes limitrophes. La station Nord, d'une capacité de 1 100 000 équivalent-habitants recueille les eaux résiduaires urbaines des sous-bassins d'eaux usées Nord et Woluwe ainsi que d'une partie du territoire des communes flamandes limitrophes.

Les stations d'épuration traitent donc l'eau des bruxellois et des habitants de certaines communes flamandes de la périphérie (**FIGURE 4-24**).

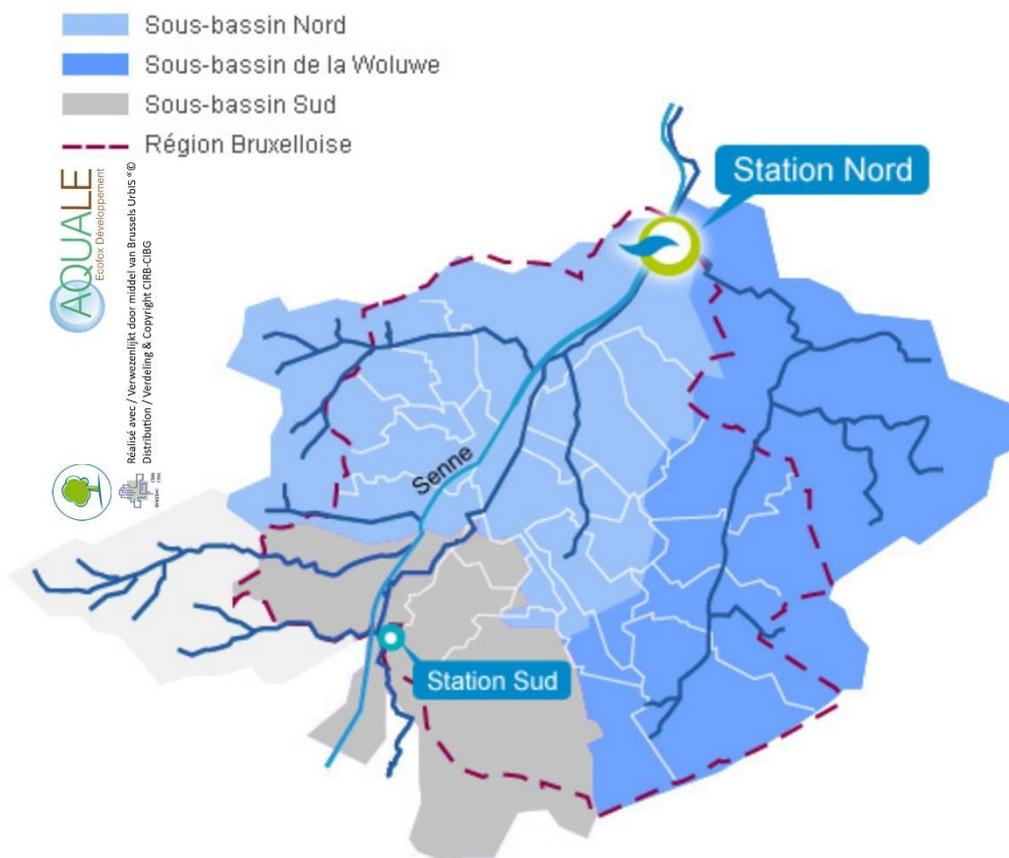


Figure 4-24 : Périmètre concerné par les stations d'épuration Sud et Nord de la Région de Bruxelles-Capitale (Source : AQUIRIS)

Le débit d'eau passant par les stations d'épuration Sud et Nord de Bruxelles-Capitale en 2013 est en moyenne de $350\,535\text{ m}^3/\text{j}$ ¹⁷. Selon l'étude *Inventaire des émissions vers les eaux de surface* réalisée en 2014 par le VITO¹⁸ pour l'IBGE, la perte depuis le réseau d'égouttage est estimée à 4 % (chiffre originellement quantifié en région flamande et dont la valeur est arbitraire : « expert judgment »). Le flux d'eau d'environ $350\,535\text{ m}^3/\text{j}$ représenterait donc 96 % du débit réel dans les conduites avant fuite, soit potentiellement $365\,141\text{ m}^3/\text{j}$ s'il n'y avait pas de fuites. Il y aurait ainsi environ $14\,600\text{ m}^3/\text{j}$ de fuites au sein de la Région de Bruxelles-Capitale et de sa périphérie depuis le réseau d'égouttage. Le modèle couvre 171 km^2 de la zone concernée par les stations d'épuration Sud et Nord, soit environ 65 % de la superficie totale concernée par les deux stations. Le débit de fuite pour la zone incluse dans le modèle est ramené à $9\,570\text{ m}^3/\text{j}$.

De plus, selon le rapport d'activité 2013 d'Hydrobru (Intercommunale bruxelloise de distribution et d'assainissement d'eau), la consommation totale d'eau du réseau public de distribution en 2013 pour la Région était de $59\,805\,851\text{ m}^3$, soit une consommation totale théorique d'environ $163\,851\text{ m}^3/\text{j}$. Toujours selon Hydrobru, la fraction de débit non facturée (pertes et usage fait par les pompiers) serait de 13 % environ en 2013. En négligeant l'usage fait par les pompiers, le flux d'eau d'environ $163\,851\text{ m}^3/\text{j}$ représenterait donc seulement 87 % du débit réel dans les conduites avant fuite, soit potentiellement $188\,334\text{ m}^3/\text{j}$ s'il n'y avait pas de fuites. Il y aurait ainsi environ $24\,483\text{ m}^3/\text{j}$ de fuites au sein de la Région de Bruxelles-Capitale depuis le réseau de

¹⁷ Source : Donnée Flowbru

¹⁸ Vlaams Instelling voor Technologisch Onderzoek

distribution d'eau. Le modèle couvre environ 110 km² de la Région de Bruxelles-Capitale, soit environ 68 % de sa superficie, le débit de fuite pour la zone d'intérêt est ramené à 16 700 m³/j.

Au total, l'infiltration supplémentaire au droit de la Ville de Bruxelles serait donc d'environ 26 270 m³/j.

A ce sujet, une étude de Bruxelles Environnement dont le rapport a été publié en février 2011¹⁹, propose les éléments suivants :

- *selon Vivaqua, pour le réseau de distribution, les pertes seraient évaluées à environ 6 % du volume distribué, soit 4 millions de m³/an environ ;*
- *Les pertes du réseau d'égouttage n'ont pas été chiffrées mais elles sont probablement beaucoup plus importantes étant donné la vétusté d'environ un tiers du réseau d'égouttage.*

Sur cette base, si l'on estime que « *beaucoup plus importantes* » signifie « au « moins 50 % de plus », alors on obtiendrait un total d'environ 10 Mm³/an (4 + 6) ou 27 400 m³/j (pour l'ensemble de la Région).

Ces deux approches aboutissent donc à des résultats comparables (même ordre de grandeur).

Au sein du modèle, l'infiltration précédemment estimée est dès lors augmentée dans la Région de Bruxelles-Capitale excepté dans les zones de vallées où le réseau d'égouttage est plutôt jugé drainant et le réseau de distribution peu infiltrant. La cartographie de l'infiltration finalement imposée au modèle en régime permanent (qui sert également de base pour l'infiltration en régime transitoire) qui combine la carte de Meyus et l'apport des fuites des réseaux d'adduction de l'eau est présentée à la **FIGURE 4-25**.

¹⁹ RIE du projet de programme de mesures PGE, Rapport sur les incidences environnementales du projet de programme de mesures accompagnant le plan de gestion de l'eau de la Région de Bruxelles-Capitale, 2011, Bruxelles Environnement

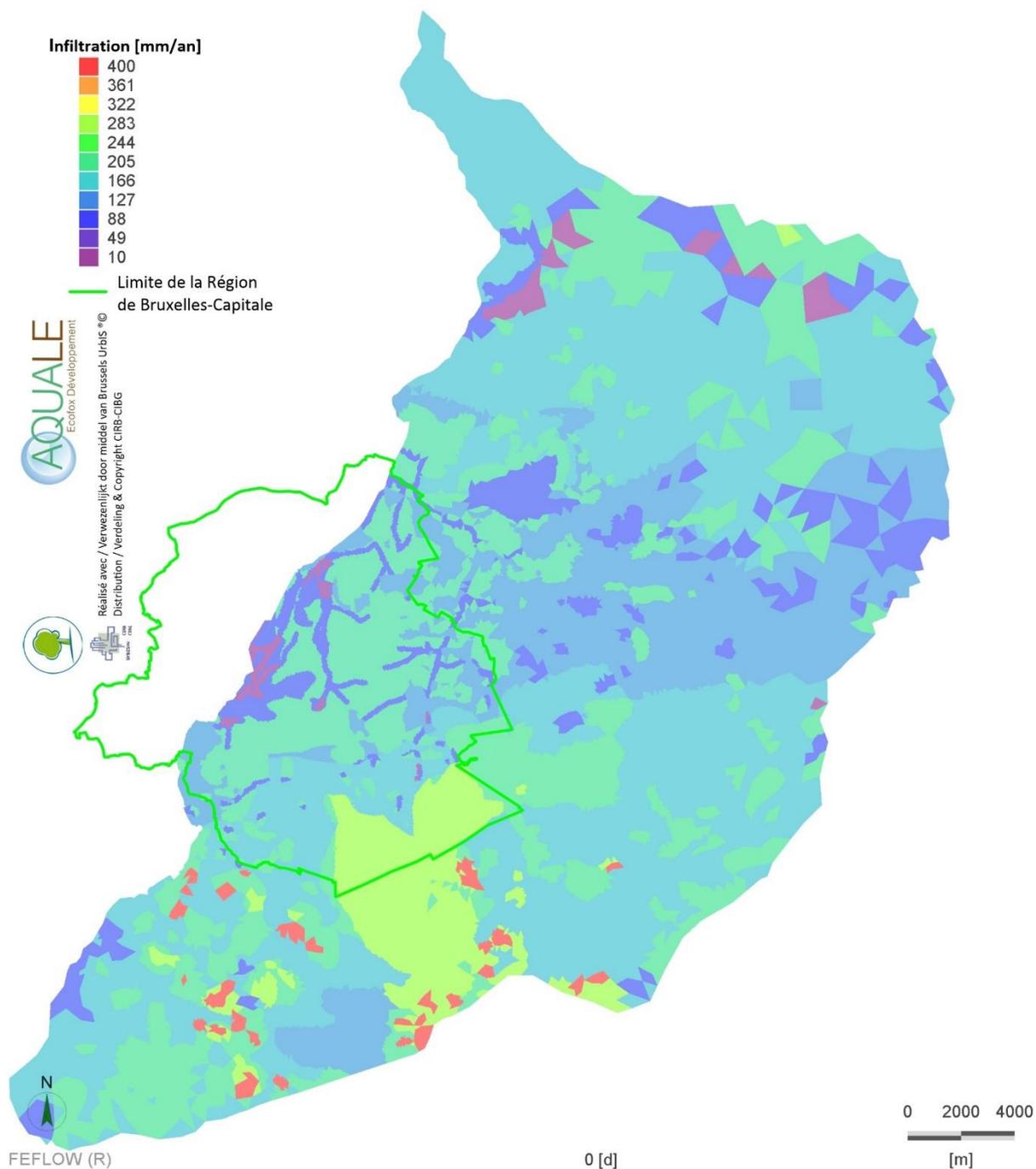


Figure 4-25 : Infiltration imposée au modèle hydrogéologique en régime permanent

4.4.1.2.4 REMARQUE IMPORTANTE

Il convient de remarquer que l'incertitude sur l'infiltration à imposer au modèle est assez importante. En effet, les sources d'imprécision suivantes peuvent être citées :

- erreur lors de la prise des mesures de pluviométrie ;
- erreur lors de leur encodage ;

- erreur liée à l'approximation des bilans de Thornthwaite ;
- erreur liée à l'utilisation d'une température non mesurée en chaque station ;
- erreur liée au choix du coefficient d'infiltration choisi par zone ;
- erreur liée sur l'estimation du pourcentage de fuite ;
- erreur liée à la répartition des fuites (en particulier, les fuites depuis les réseaux d'égouttage et de distribution des eaux ne sont pas prises en considération pour les Régions Flamande et Wallone).

Ainsi, l'infiltration finalement imposée au modèle est jugée acceptable à partir du moment où elle se situe dans une gamme de valeurs acceptable compte tenu des sources d'informations et qu'elle permet par ailleurs d'obtenir à la fois une piézométrie bien calibrée et des débits de sortie réalistes.

4.4.1.3 LIMITE INFÉRIEURE – CONDITION DE NEUMANN, FLUX IMPOSÉ

La limite inférieure est représentée dans le modèle numérique par une condition de 2^e type (Neumann) avec un flux nul, c'est-à-dire que la base du modèle est considérée comme une frontière imperméable.

4.4.2 DÉFINITION DES LIMITES INTERNES

4.4.2.1 COURS D'EAU – CONDITION DE DIRICHLET, NIVEAU D'EAU IMPOSÉ

La zone modélisée est majoritairement couverte (voir **FIGURE 3-1**) par les bassins versants :

- de la Senne à l'Ouest ;
- de la Dyle au Nord-Est ;
- de la Lasne au Sud-Est ;
- de l'Argentine et du Hain au Sud ;
- de la Woluwe, de l'Ijse et de la Voer à l'intérieur de zone modélisée.

Les cours d'eau peuvent être considérés comme étant en équilibre (bien que cet équilibre soit non-continu et limité par la présence d'argiles alluviales ou plus ponctuellement d'aménagements paysagers) avec la *nappe du Bruxellien* et peuvent être valablement représentés dans le modèle numérique par une condition de 1^{er} type (Dirichlet) avec un potentiel imposé le long de leur tracé et correspondant à la cote de leur plan d'eau (à défaut de levé topographique disponible, la cote du plan d'eau est définie arbitrairement comme étant située 1.50 m sous la cote fournie par le modèle SRTM / LIDAR). Les mêmes valeurs sont imposées pour les deux périodes de calibration en régime permanent et en régime transitoire.

Ces potentiels imposés sont placés sur la slice supérieure du modèle, au niveau de la surface topographique. Ils drainent donc en premier lieu les formations les plus superficielles. Il y aura également drainage des couches plus profondes sauf si une couche intermédiaire suffisamment peu perméable permet d'empêcher l'écoulement vers les ruisseaux.

La **FIGURE 4-26** ci-dessous illustre la prise en considération des cours d'eau majeurs internes au modèle. La très grande majorité des ruisseaux est prise en considération. Les étangs artificiels isolés du réseau hydrographique ne sont pas pris en considération.

Les cercles bleus symbolisent les potentiels imposés. La ligne horizontale au-dessus des cercles signifie que les potentiels imposés sont contraints par un flux maximum. Le flux maximum imposé pour chaque nœud est de $0 \text{ m}^3/\text{j}$, c'est-à-dire que seul un débit négatif est autorisé à travers ces nœuds. Un débit négatif correspond à un débit sortant du modèle. Si le potentiel imposé n'est pas compatible avec un flux sortant du modèle (parce que le niveau de la nappe se trouve à un niveau plus bas que le potentiel imposé), alors le potentiel imposé est désactivé et le ruisseau n'est plus connecté à la nappe.

En réalité, il est possible / probable que certaines portions de cours d'eau soient infiltrantes. Cependant, puisque l'on admet que le contexte est drainant dans sa globalité, il est préférable d'utiliser cette contrainte permettant d'obtenir effectivement un contexte global drainant et de laisser la liberté au modèle d'adapter le niveau de l'eau dans les zones où la contrainte n'est pas respectée. A l'inverse, si cette contrainte n'est pas utilisée, le niveau d'eau imposé restera constant quelque soit le comportement de la nappe à proximité, ce qui fait que le modèle est d'autant plus guidé / influencé par les niveaux d'eau imposés. L'utilisation de cette contrainte sur les niveaux d'eau imposés permet donc d'accorder un degré de liberté plus grand au modèle. L'étude de sensibilité présentée au **CHAPITRE 6** est également menée sur les niveaux d'eau imposés.

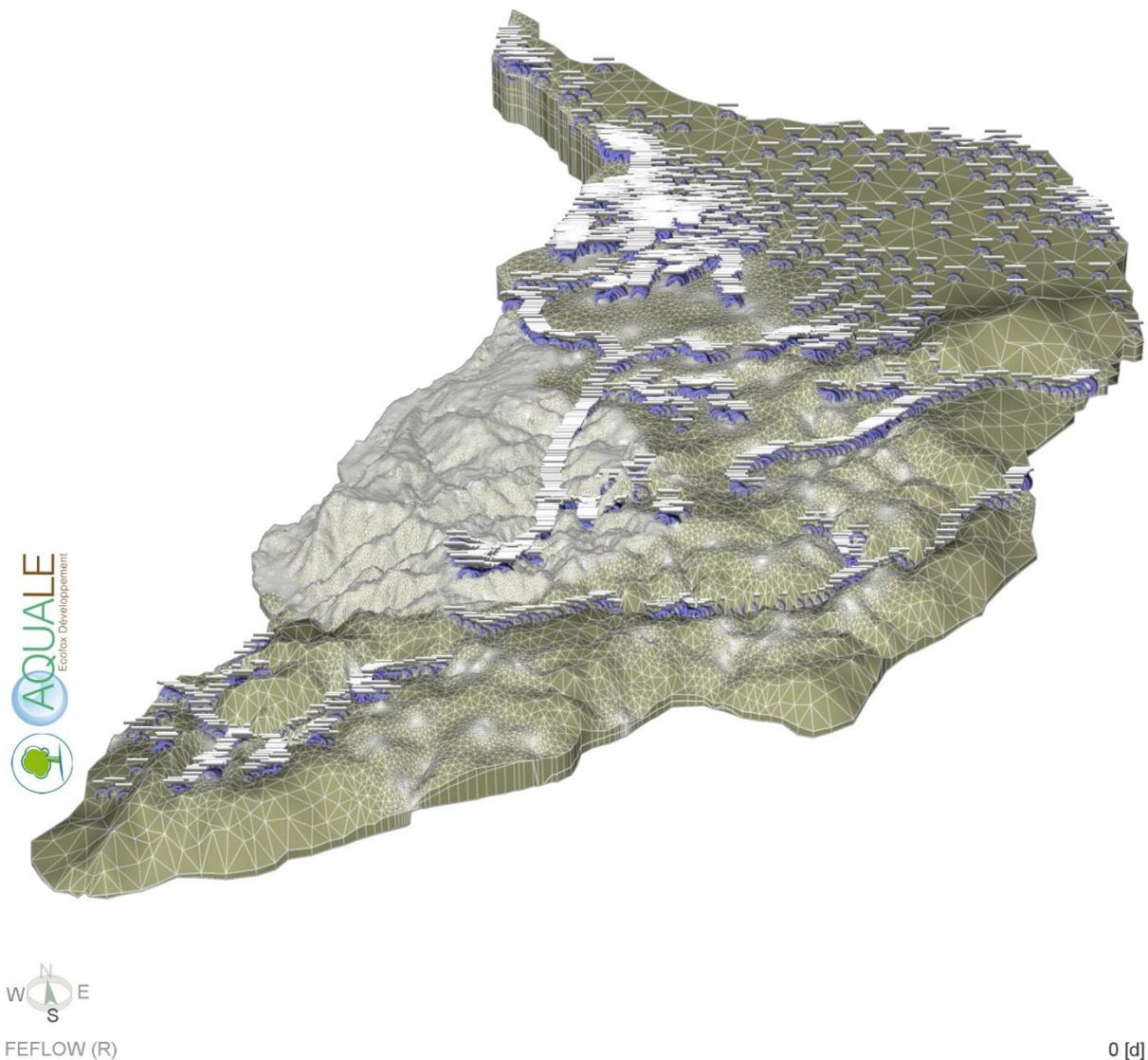


Figure 4-26 : Potentiels imposés sur les ruisseaux / rivières à l'intérieur de la zone modélisée

4.4.2.2 COLLECTEURS – CONDITION DE DIRICHLET, NIVEAU D’EAU IMPOSÉ

La **FIGURE 4-27** ci-dessous illustre la prise en considération des collecteurs majeurs internes au modèle. Il s’agit des grands collecteurs SGBE acheminant les eaux usées vers les stations d’épuration. Les mêmes valeurs sont imposées pour les deux périodes de calibration en régime permanent et en régime transitoire.

Les cercles bleus symbolisent les potentiels imposés. La ligne horizontale au-dessus des cercles signifie que les potentiels imposés sont contraints par un flux maximum. Le flux maximum imposé pour chaque nœud est de $0 \text{ m}^3/\text{j}$, c’est-à-dire que seul un débit négatif est autorisé à travers ces nœuds. Un débit négatif correspond à un débit sortant du modèle. Si le potentiel imposé n’est pas compatible avec un flux sortant du modèle (parce que le niveau de la nappe se trouve à un niveau plus bas que le potentiel imposé), alors le potentiel imposé est désactivé et le collecteur n’est plus connecté à la nappe.

Les niveaux d’eau imposés ont été adaptés durant la phase de calibration. Leur cote est globalement comprise entre 1 et 5 m sous le niveau topographique.

En réalité, il est connu que certaines portions des collecteurs sont infiltrantes. Cependant, puisque l’on sait que le contexte est drainant dans sa globalité, il est préférable d’utiliser cette contrainte permettant d’obtenir effectivement un contexte global drainant et de laisser la liberté au modèle d’adapter le niveau de l’eau dans les zones où la contrainte n’est pas respectée. A l’inverse, si cette contrainte n’est pas imposée par le modélisateur, le niveau d’eau imposé restera constant quelque soit le comportement de la nappe à proximité, ce qui fait que le modèle est d’autant plus guidé / influencé par les niveaux d’eau imposés. L’utilisation de cette contrainte sur les niveaux d’eau imposés permet donc d’accorder un degré de liberté plus grand au modèle. L’étude de sensibilité présentée au **CHAPITRE 6** est également menée sur les niveaux d’eau imposés.

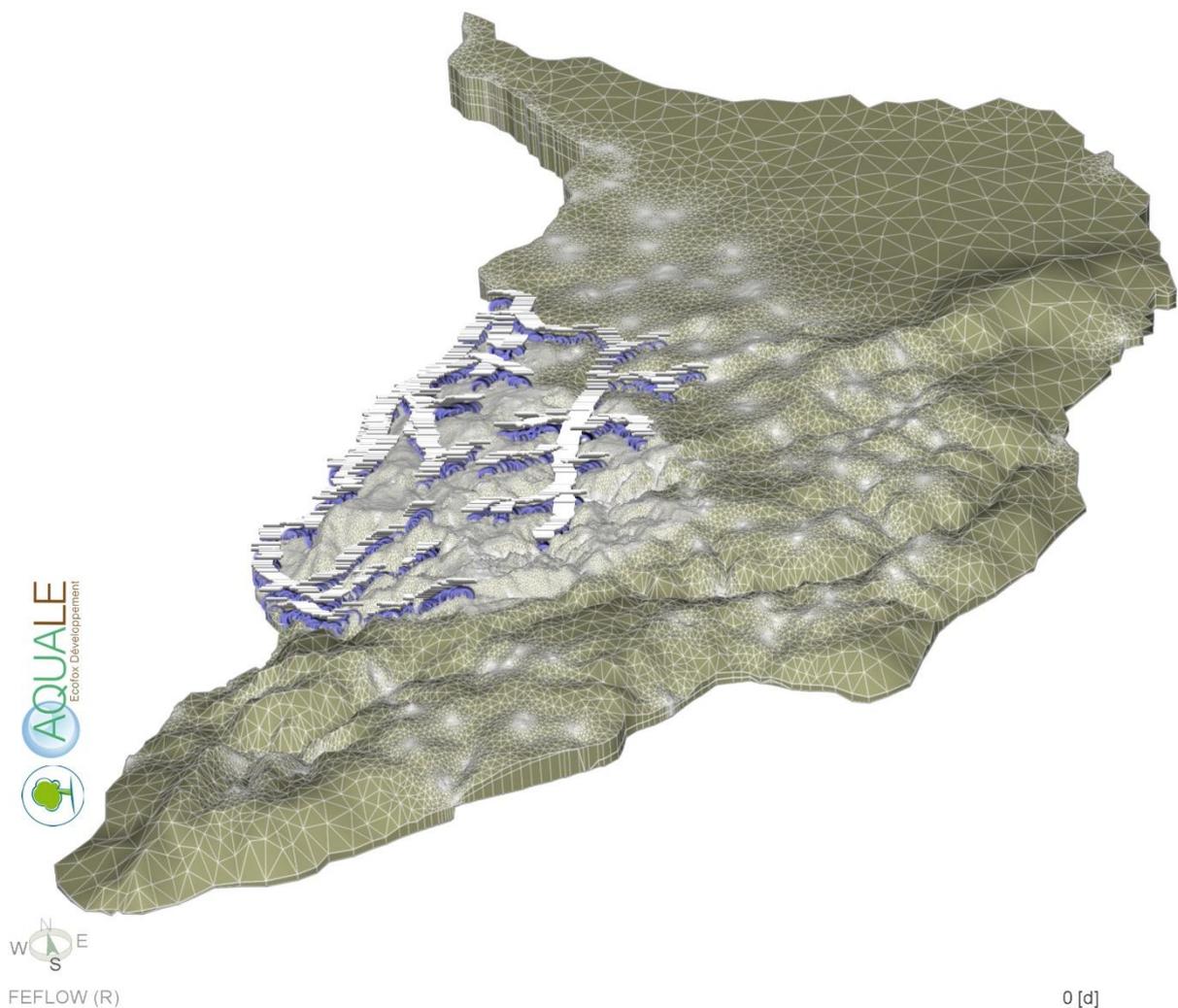


Figure 4-27 : Potentiels imposés sur les collecteurs majeurs à l'intérieur de la zone modélisée

4.4.2.3 CAPTAGES ET GALERIES – CONDITIONS « MULTILAYER WELL » ET DE DIRICHLET, NIVEAU D'EAU IMPOSÉ

Dans la zone modélisée, de nombreux puits de captages ainsi qu'une galerie captante sont répertoriés.

4.4.2.3.1 PUIXS DE CAPTAGE

4.4.2.3.1.1 En régime permanent

Pour la calibration en régime permanent, les informations suivantes sont disponibles au sujet des débits prélevés dans les divers puits localisés au sein de la zone modélisée :

- En Région de Bruxelles-Capitale :

- les débits déclarés en 2013 (données fournies par l'IBGE) ;
- à défaut, les débits déclarés en 2012 (données fournies par l'IBGE) ;
- En Région Flamande (via deux fichiers de données distincts) :
 - les débits déclarés en 2013 pour les puits au sein desquels le volume annuel prélevé est supérieur à 30 000 m³ (données fournies par la VMM) ;
 - les débits déclarés en 2013 pour les puits au sein desquels le volume annuel prélevé est inférieur à 30 000 m³ (données fournies par la VMM) ;
- En Région Wallone :
 - les débits déclarés en 2013 (données issues de la base de données Dix-Sous) ;
 - à défaut, les débits autorisés en 2013 (données issues de la base de données Dix-Sous).

Il est important de noter que les données fournies par la VMM présentent quelques incohérences. En effet, le fichier de référence pour les puits au sein desquels le volume annuel prélevé est inférieur à 30 000 m³ contient également des informations sur les puits ne respectant pas cette dernière condition. Pour ces puits, le débit déclaré ne correspond pas toujours au débit renseigné dans le fichier spécifique aux puits à débit élevé. Par cohérence, il a été décidé de se fier au fichier spécifique aux puits à débit élevé. Puisque ces incohérences concernent principalement des puits éloignés de la Région de Bruxelles-Capitale, l'impact est relativement faible sur les résultats de modélisation.

En l'absence de données plus précises, les mêmes valeurs sont imposées pour les deux périodes de calibration en régime permanent.

Les captages dans les *nappes superficielle, du Bruxellien et de l'Yprésien* ont été pris en considération. Les débits pris en compte sont repris dans les **TABLEAUX 4-3 à 4-5** et illustrés sur les **FIGURES 4-28 à 4-30** ci-dessous, respectivement pour les *nappes superficielle, du Bruxellien et de l'Yprésien*. La nature des données disponibles y est également spécifiée.

Le **TABLEAU 4-3** reprend les débits imposés dans la *nappe superficielle*. La **FIGURE 4-28** illustre la prise en compte de ces débits dans le modèle numérique.

Ouvrage	X [m]	Y [m]	Débit imposé [m ³ /j]	Source et nature de la donnée
1775	169331	170098	1 300.22	VMM / débit annuel déclaré 2013
Z2000926	167375	180286	1.74	
1775	169981	170840	534.25	
capt_5319	154486	169615	1.42	IBGE / débit annuel déclaré 2013
capt_5490	152458	175634	16.94	
Collège St Pierre_Drain	147956	166151	4.45	
capt_5376	150178	173337	1.83	IBGE / débit annuel déclaré 2012

Tableau 4-3 : Débits de pompage imposés dans la *nappe superficielle* en régime permanent

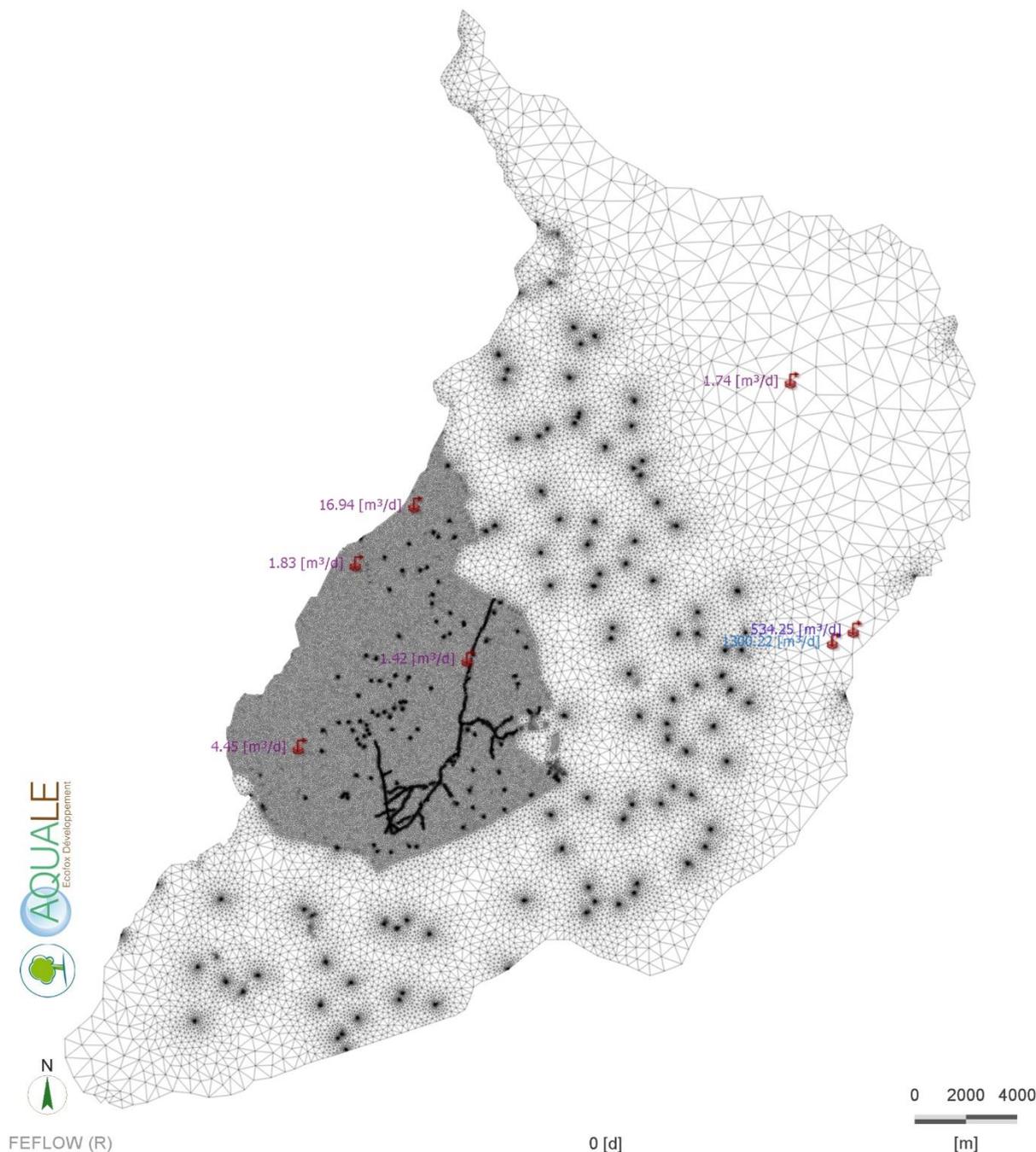


Figure 4-28 : Débits de pompage imposés dans la *nappe superficielle* en régime permanent

Il apparaît dans le **TABLEAU 4-3** que sur les 7 ouvrages de captage dans la *nappe superficielle*, 4 sont situés en Région de Bruxelles-Capitale. Pour ces 4 ouvrages, le volume annuel réellement pompé est connu dans 3 ouvrages en 2013 et repris de l'année 2012 pour un ouvrage. Pour les 3 ouvrages extérieurs à la Région de Bruxelles-Capitale, le débit imposé est le débit déclaré fourni par la VMM.

Le débit total de prélèvement calculé dans la *nappe superficielle* est de 1 861 m³/j dont :

- 25 m³/j en Région de Bruxelles-Capitale ;

- 1 836 m³/j en Région Flamande.

Le **TABLEAU 4-4** reprend les débits imposés dans la *nappe du Bruxellien*. La **FIGURE 4-29** illustre la prise en compte de ces débits dans le modèle numérique.

Ouvrage	X [m]	Y [m]	Débit imposé [m ³ /j]	Source et nature de la donnée
Z2000493	159049	187788	0.60	VMM / débit annuel déclaré 2013
1677	172784	178377	0.18	
552	167252	165461	0.93	
GW157	158620	182570	0.11	
VLB-2/2563	166073	167926	1.22	
1700	169616	176985	0.89	
2085	164951	163864	1.65	
Z2000506	160150	170785	3.38	
VLB-2/3149	159462	160078	0.14	
451	161189	159213	4.84	
VLB-2/2849	167794	172782	0.74	
VLB-2/2652	170830	178857	2.47	
1988	144937	160163	0.22	
VLB-gw2-2356	164330	186730	1.00	
VLB-KL2/2394	165250	174215	2.52	
602	169518	170897	2.81	
1928	144026	157503	0.73	
VLB-1/2895	158826	179044	3.55	
VB-2/3267	162492	168002	4.49	
GW 305	163022	165946	1.91	
Z2000133	164450	162110	2.92	
2165	167248	180610	1.72	
VLB-1/3197	161803	184292	5.02	
1594	166754	174572	8.04	
949	167371	180422	1.47	
VLB-2/2624	165767	163147	4.92	
VLB-2/2863	168541	172777	0.68	
2008	163064	161556	2.93	
VLB-2/29	170084	176756	3.35	
vlb-gw2-2529	170391	181956	3.85	
883	159394	172430	5.85	
1825	159643	172908	6.04	
VLB-2/2929	169169	182618	0.13	
1946	172130	178592	3.58	
1384	155591	174808	21.43	
LIM-2/2546b	163164	160358	0.98	

Ouvrage	X [m]	Y [m]	Débit imposé [m ³ /j]	Source et nature de la donnée
lim-1/3160	160795	168988	5.69	VMM / débit annuel déclaré 2013
VLB-2/3097	165347	162882	8.41	
VLB-2213/1	172583	174270	10.66	
GW 321	160566	163286	0.28	
1952	165422	167856	3.59	
VLB-gw1-2427	162271	167032	7.42	
1674	158037	164841	6.43	
VLB-1/2650	168901	169430	5.04	
655bis	159179	174046	4.59	
VLB-2/2733	156975	164235	2.67	
VLB-1/3153	149992	156901	8.57	
VLB-2/2448	151770	159020	157.05	
vlb-gw1-2548	161471	186852	6.53	
VLB-2/2705	166814	167315	4.22	
1351	173367	178215	1.20	
1771	157290	178310	20.69	
1663	155727	181482	8.30	
1827	158280	167360	16.22	
VLB-2229/2	164324	180121	58.43	
VLB-1/3005/a	171594	175111	265.38	
ANT-gw1/2132	159983	187864	70.70	
VLB-gw1-2383	173250	179261	516.38	
1962	157362	173738	540.52	
VLB-1/3109	158179.5	162160	1 051.36	
14246	148169.5	159771.5	1 368.75	
1717	167545	172072	675.93	
1706	169969	172489	739.56	
1712	166640	171719	1 545.96	
1734	172296	178084	1 410.76	
1777	163250	160100	739.99	
1777	163200	164260	1 901.67	
9000197	168935	183994	3 993.33	
9000199	164522	169899	4 201.90	
9000066	168848	178596	2 545.73	
1612	155240	174580	84.26	
VLB-2046	156429	178211	153.35	
VLB-1/3017	167809	176665	35.95	
VLB-1/2692	166781.4	184032	1 478.24	
VLB-gw1-2363	171864	179847	580.24	
capt_5239	149882	167110	2.79	IBGE / débit annuel déclaré 2012
capt_5359	150759	168727	4.11	

Ouvrage	X [m]	Y [m]	Débit imposé [m ³ /j]	Source et nature de la donnée
capt_2225	150817	167492	3.89	IBGE / débit annuel déclaré 2012
capt_5234	150956	169571	1.46	
Lavoir Casernes	151491	168553	1.55	
Aquamatic	151583	166801	2.19	
Lavoir Wappers	151845	170473	0.87	
capt_3586	151988	167613	9.23	
capt_5240	152236	174085	0.75	
capt_5295	152246	168862	4.08	
Lavoir DPF Roodebeek	153303	171045	2.84	
Blanchisserie Ste Catherine	154375	170900	4.59	
capt_5471	156352	168911	6.28	
capt_736	149510	167080	6.09	
Institut Fond Roy	149845	164128	16.95	
Champs captant VIVAQUA_9 puits	150491.23	166549.35	931.06	
capt_5425	150757.31	164901.01	25.76	
Wellington	150882	162291	2.41	
capt_5454	151093	168729	2.45	
capt_716	151284	167500	13.22	
capt_5328	151647	167637	13.59	
capt_5307	151780	164700	9.21	
capt_3938	152670	173059	11.63	
capt_5452	152945	173160	2.83	
Lavoir Nivelles	153100	168434	3.64	
capt_5401	153130	171744	0.97	
Car Wash Kennedy	153200	174533	0.53	
Lavoir Cimetière Evere	153374	172605	8.44	
Cerisiers	153588	170440	2.72	
capt_5218	153839	171370	1.01	
capt_3007	154372	170984	1.42	
Lavoir Ste Alix	156478	168600	3.7	RW / débit annuel autorisé
39/3/5/004	149474	154717	400	
39/3/2/002	149621	154884	301.37	
39/3/5/003	149790	154280	375	
39/3/2/006	150253	155511	3.29	
39/3/3/005	151990	156490	20	
39/3/3/001	151860	156240	13.77	RW / débit annuel déclaré 2013
39/3/3/003	153250	156050	12.55	
31/8/8/001	156710	160110	48.9	
31/8/8/002	156720	160115	12.7	

Tableau 4-4 : Débits de pompage imposés dans la nappe du Bruxellien en régime permanent

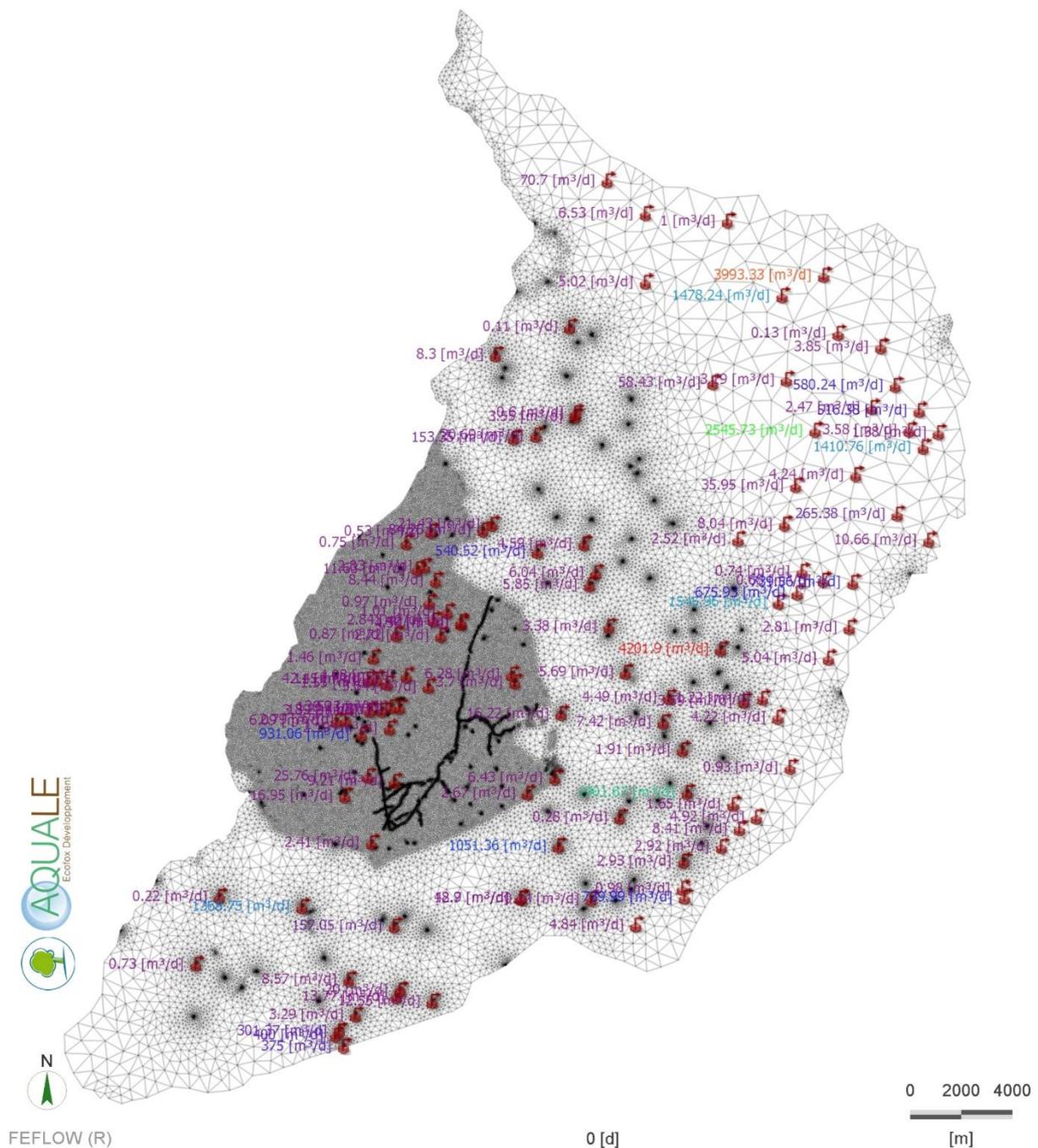


Figure 4-29 : Débits de pompage imposés dans la nappe du Bruxellien en régime permanent

Il apparaît dans le **TABLEAU 4-4** que 116 captages sont repris dans la *nappe du Bruxellien*. Sur ces 116 captages, 32 se trouvent en Région de Bruxelles-Capitale et pour 19 d’entre eux, les débits déclarés en 2013 sont connus. Pour les 84 ouvrages extérieurs à la Région de Bruxelles-Capitale (75 se trouvant en Région Flamande et 9 en Région Wallonne), le débit imposé est issu des données de la VMM ou de la base de données Dix-Sous.

Le débit total prélevé dans la *nappe du Bruxellien* est de 26 633 m³/j, dont :

- 1 102 m³/j en Région de Bruxelles-Capitale ;
- 24 343 m³/j en Région Flamande ;
- 1 188 m³/j en Région Wallonne.

La très grande majorité des pompages se trouvent donc en Région Flamande. Plus on s'éloigne de la zone d'intérêt qu'est la Région de Bruxelles-Capitale et moins leur influence sera importante sur la zone d'intérêt.

Le **TABLEAU 4-5** reprend les débits imposés dans la *nappe de l'Yprésien*. La **FIGURE 4-30** illustre la prise en compte de ces débits dans le modèle numérique.

Ouvrage	X [m]	Y [m]	Débit imposé [m ³ /j]	Source et nature de la donnée
1428	143925	159080	25.69	VMM / débit annuel déclaré 2013
VLB 2/2938	161415	164004	14.67	
VLB-1/2918	166640	168580	6.57	
vlb-gw1-2493	153200	177800	0.03	
VLB-2/2499	154409	180932	2.08	
VLB-gw1-1992	166356	182865	0.04	
ANT-037/GW1	157460	190995	10.08	
capt_5241	148159	166989	4.52	IBGE / débit annuel déclaré 2013
capt_5275	147781	167238	4.45	
capt_1302	148760	168192	2.25	
capt_5210	147882	168976	1.35	
capt_3106	152800	169339	4.29	
capt_5432	154564	170336	0.68	
capt_5333	154814	170382	12.24	
Lavoir Colas Roodebeek	153975	170890	6.53	
capt_5377	151607	171735	2.26	
Lavoir Sleenckx	150884	173797	4.65	
capt_5447	153335	166471	2.93	
Puits Mahaut	152303	166489	4.41	IBGE / débit annuel déclaré 2012
capt_5247	153938	167362	8.72	
capt_5237	148001	168499	1.49	
capt_5232	150182	168670	1.98	

Tableau 4-5 : Débits de pompage imposés dans la *nappe de l'Yprésien* en régime permanent

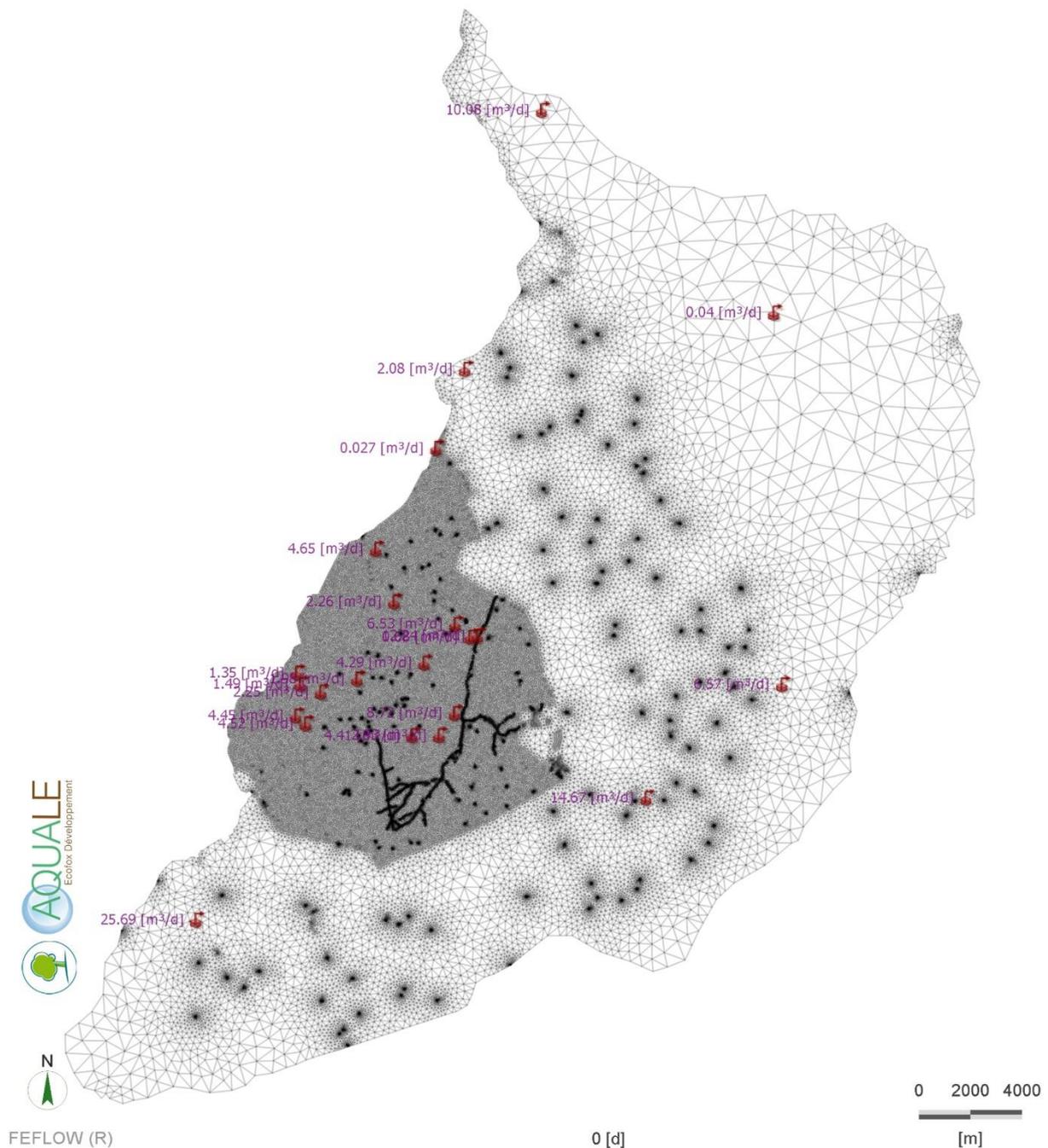


Figure 4-30 : Débits de pompage imposés dans la nappe de l'Yprésien en régime permanent

Il apparaît dans le **TABLEAU 4-5** que 22 captages sont repris dans la nappe de l'Yprésien. Sur ces 22 captages, 15 se trouvent en Région de Bruxelles-Capitale et pour 12 d'entre eux, les débits déclarés en 2013 sont connus. Pour les 7 ouvrages extérieurs à la Région de Bruxelles-Capitale (tous en Région Flamande), le débit imposé est issu des données de la VMM.

Le débit total de prélèvement calculé dans la *nappe de l'Yprésien* est de $122 \text{ m}^3/\text{j}$, dont :

- $63 \text{ m}^3/\text{j}$ en Région de Bruxelles-Capitale ;

- 59 m³/j en Région Flamande.

Le débit prélevé dans la *nappe de l'Yprésien* est négligeable par rapport au débit prélevé dans la *nappe du Bruxellien*. Le débit prélevé dans la *nappe superficielle* est intermédiaire mais également assez faible par rapport au Bruxellien.

4.4.2.3.1.2 En régime transitoire

Les débits déclarés annuellement en Région de Bruxelles-Capitale sont connus pour la période 2009 – 2013.

En Région Flamande, l'ensemble des données concernant les volumes prélevés dans les puits pour les années 2009 à 2012 est encore actuellement en cours de synthétisation par la VMM et devrait être disponible en début d'année 2016. A ce jour, seuls les débits annuels relatifs aux captages autorisés à capter plus de 30 000 m³/an sont connus sur la période 2009-2013. Pour les puits dont le débit autorisé est inférieur à 30 000 m³/an, ce sont dès lors les débits autorisés qui sont imposés au modèle pour les années 2009 à 2013.

En Région Wallonne, les débits déclarés annuellement pour la période 2009 – 2013 sont disponibles via la base de données Dix-Sous. Si, pour certains ouvrages, cette donnée n'est pas renseignée, ce sont les débits autorisés qui seront imposés au modèle.

Les **TABLEAUX 4-6 à 4-8** reprennent respectivement pour les *nappes superficielle*, du *Bruxellien* et de *l'Yprésien* les débits imposés pour la période de référence. La nature des données disponibles y est également spécifiée par le code couleur suivant :

- en **vert**, les débits annuels déclarés ;
- en **orange**, les débits annuels autorisés.

Ouvrage	Débit imposé [m ³ /j]				
	2009	2010	2011	2012	2013
capt_5319	2.56	1.70	1.77	1.60	1.42
capt_5376	2.50	2.95	0.75	1.83	1.83
capt_5490	0.00	0.00	0.00	15.36	16.94
CollègeStPierre_Drain	1.92	0.00	0.00	0.00	4.45
1775	0.00	436.23	339.08	852.07	534.25
1775	0.00	790.33	617.74	1132.85	1300.22
GW/124	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
ANT-gw2/2020	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
ANT-gw2/2036	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
Z2000926	2.74	2.74	2.74	2.74	1.74
1134	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
1374bis	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37

Tableau 4-6 : Débits de pompage imposés dans la *nappe superficielle* en régime transitoire

Ouvrage	Débit imposé [m ³ /j]				
	2009	2010	2011	2012	2013
Strasbourg	1.37	0.00	0.00	0.00	0.00
capt_2225	3.33	4.43	4.47	3.89	3.89
capt_3007	2.81	1.88	1.78	1.57	1.42
capt_3586	35.85	32.67	18.24	9.23	9.23
capt_3938	32.48	27.59	16.04	12.25	11.63
capt_5218	2.44	2.30	2.01	1.77	1.01
capt_5220	0.90	0.82	0.67	0.00	0.00
capt_5234	2.32	2.43	2.35	1.46	1.46
capt_5239	2.99	2.75	2.77	2.79	2.79
capt_5240	2.15	1.40	1.32	0.75	0.75
capt_5269	25.22	7.74	2.54	0.00	0.00
capt_5269	16.66	18.04	7.91	0.00	0.00
capt_5295	4.60	4.19	4.07	4.08	4.08
capt_5307	11.64	9.60	11.90	8.16	9.21
capt_5328	6.22	6.94	8.14	9.81	13.59
capt_5359	0.38	1.10	4.11	4.11	4.11
capt_5401	0.87	1.36	0.91	0.89	0.97
capt_5425	12.18	10.47	38.12	36.93	25.76
capt_5452	0.00	0.41	2.10	2.36	2.83
capt_5454	0.00	3.32	4.57	3.13	2.45
capt_5471	0.00	0.00	0.00	6.28	6.28
capt_716	11.36	11.04	11.20	13.18	13.22
capt_736	9.12	10.96	9.90	7.96	6.09
capt_5222	4.96	2.24	0.00	0.00	0.00
Aquamatic	3.52	3.11	2.37	2.19	2.19
BlanchisserieSteCatherine	3.69	4.01	4.39	4.59	4.59
CarWashKennedy	0.60	0.57	0.53	0.59	0.53
Cerisiers	5.97	4.06	2.12	2.73	2.72
InstitutFondRoy	22.20	27.66	16.04	17.54	16.95
ChampsCaptantVIVAQUA_9puits	variations mensuelles				
LavoirCasernes	1.88	1.80	1.68	1.55	1.55
LavoirCimetièreEvere	13.06	13.09	8.99	8.18	8.44
LavoirDPFRoodebeek	3.71	3.25	2.33	2.84	2.84
LavoirNivelles	3.31	3.69	3.55	3.02	3.64
LavoirSteAlix	5.33	5.62	4.27	3.92	3.70
LavoirTilleul	3.58	3.73	3.60	1.82	0.00
LavoirWappers	0.90	1.06	0.97	0.87	0.87
Wellington	2.38	3.87	4.35	3.23	2.41
LIM-2/2546b	0.00	0.00	7.95	7.95	0.98
9000197	0.00	3073.58	3215.05	3018.95	3993.33
9000199	0.00	4010.01	4109.68	3991.34	4201.90
9000066	0.00	666.14	1970.33	2349.52	2545.73
VLB-1/2895	0.00	0.00	4.11	4.11	3.55
VLB-2320/1	6759.24	5911.24	5070.68	0.00	0.00
VLB-1/2825	0.00	0.00	16.16	16.16	16.16
VLB-1/3153	0.00	0.00	0.00	0.00	8.57
VLB-1/3017	137.87	159.36	161.34	112.70	35.95
VLB-1/3109	972.22	0.00	1640.30	0.00	1051.36

Ouvrage	Débit imposé [m ³ /j]				
	2009	2010	2011	2012	2013
VLB-gw1-2427	10.14	10.14	10.14	10.14	7.42
VLB-gw1-2324	4.52	4.52	4.52	4.52	0.00
VLB-gw1-2383	547.54	566.76	440.89	393.23	516.38
VLB-gw1-2363	823.37	1076.05	984.33	684.19	580.24
VLB-2/2705	0.00	0.00	19.18	19.18	4.22
VLB-1/2650	0.00	0.00	12.05	12.05	5.04
VLB-1/2692	1363.11	1515.75	1624.10	1761.29	1478.24
vlb-gw1-2548	0.00	16.44	16.44	16.44	6.53
VLB-KL2/2226	2.19	2.19	2.19	2.19	0.00
VLB-1/2605	0.00	0.00	38.36	38.36	0.00
lim-1/3160	0.00	0.00	0.00	0.00	5.69
VLB-1/3200	0.00	0.00	0.00	0.00	38.90
VLB-1/3005/b	0.00	0.00	0.00	356.16	0.00
VLB-1/3005/a	0.00	0.00	0.00	13.70	265.38
VLB-2046	20.58	125.56	158.08	149.05	153.35
14246	1173.25	1077.79	1303.50	1374.60	1368.75
2085	2.07	2.07	2.07	2.07	1.65
2097	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37
2170	72.00	72.00	72.00	72.00	72.00
1952	10.00	10.00	10.00	10.00	3.59
1962	17.43	0.66	0.17	60.49	540.52
2008	6.58	6.58	6.58	6.58	2.93
VLB-kl1/2215	10.96	10.96	10.96	10.96	10.96
VLB-2213/1	9.59	9.59	9.59	9.59	10.66
1523	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27
1476	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
1446	495.89	495.89	495.89	495.89	495.89
1612	102.91	84.21	100.47	85.37	84.26
1677	0.33	0.33	0.33	0.33	0.18
1825	6.85	6.85	6.85	6.85	6.04
1777	0.00	0.00	684.10	589.52	739.99
1777	0.00	1837.78	1822.14	1825.18	1901.67
1819	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34
1717	0.00	952.73	791.49	757.40	675.93
1712	0.00	0.00	1583.51	1537.82	1545.96
1706	0.00	774.02	801.33	692.45	739.56
1734	0.00	2087.66	1814.34	1403.54	1410.76
1709	0.00	1340.00	1330.70	1219.56	0.00
ANT-gw1/2132	141.01	99.03	77.41	56.66	70.70
Z2000493	0.77	0.77	0.77	0.77	0.60
1283	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1663	41.10	41.10	41.10	41.10	8.30
VLB-gw2-2203	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17
655bis	13.15	13.15	13.15	13.15	4.59
883	6.85	6.85	6.85	6.85	5.85
1539	9.59	9.59	9.59	9.59	9.59
Z2000506	2.16	2.16	2.16	2.16	3.38

Ouvrage	Débit imposé [m ³ /j]				
	2009	2010	2011	2012	2013
Z2000768	8.22	8.22	8.22	8.22	8.22
495	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
GW305	4.11	4.11	4.11	4.11	1.91
1827	41.10	41.10	41.10	41.10	16.22
VLB-2/3267	0.00	0.00	0.00	0.00	4.49
915	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66
357	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
GW157	1.37	1.37	1.37	1.37	0.11
1771	27.40	27.40	27.40	27.40	20.69
548	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19
VLB-2/2562	0.00	20.55	20.55	20.55	20.55
1940	68.49	68.49	68.49	68.49	68.49
GW321	10.00	10.00	10.00	10.00	0.28
GW341	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64
Z2000042	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64
Z2000054	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37
Z2000133	4.11	4.11	4.11	4.11	2.92
Z2000125	2.74	2.74	2.74	2.74	0.00
451	2.74	2.74	2.74	2.74	4.84
1674	10.96	10.96	10.96	10.96	6.43
VLB-2/2733	0.00	0.00	13.70	13.70	2.67
VLB-2/3149	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14
VLB-2/2448	0.00	16.44	16.44	16.44	157.05
ANT-gw2/5748	0.00	0.00	10.96	10.96	10.96
1384	7.40	7.40	7.40	7.40	21.43
1351	19.18	19.18	19.18	19.18	1.20
437	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16
2/1883	13.15	13.15	13.15	13.15	13.15
VLB-2/3075	0.00	0.00	0.00	4.66	4.66
1594	5.48	5.48	5.48	5.48	8.04
387	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
VLB-KL2/2394	3.01	3.01	3.01	3.01	2.52
VLB-1/3034	0.00	0.00	0.00	4.93	4.93
VLB-2/2975	0.00	0.00	0.00	1.92	1.92
1462	21.92	21.92	21.92	21.92	0.00
768	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
359	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
VLB-2229/2	61.64	61.64	61.64	61.64	58.43
VLB-2/2624	0.00	6.03	6.03	6.03	4.92
VLB-2/2563	0.00	1.37	1.37	1.37	1.22
VLB-2/3097	0.00	0.00	0.00	0.00	8.41
552	1.23	1.23	1.23	1.23	0.93
VLB-2/2652	0.00	0.00	2.74	2.74	2.47
VLB-2/29	6.58	6.58	6.58	6.58	3.35
1700	1.64	1.64	1.64	1.64	0.89
949	5.48	5.48	5.48	5.48	1.47
1583	10.25	10.25	10.25	10.25	10.25
1272	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96

Ouvrage	Débit imposé [m ³ /j]				
	2009	2010	2011	2012	2013
1170	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
1946	6.85	6.85	6.85	6.85	3.58
2165	4.11	4.11	4.11	4.11	1.72
VLB-1/3166	0.00	0.00	0.00	0.00	1.64
VLB-2/3087	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VLB-2/2929	0.00	0.00	0.00	6.85	0.13
VLB-2/2756	0.00	0.00	5.07	5.07	5.07
vlb-gw2-2529	0.00	6.84	6.84	6.84	3.85
1457	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
ANT-gw2/4506	11.20	11.20	11.20	11.20	11.20
VLB-gw2-2356	3.01	3.01	3.01	3.01	1.00
VLB-1/3197	0.00	0.00	0.00	0.00	5.02
404	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92
960	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
602	3.29	3.29	3.29	3.29	2.81
VLB-2/2849	0.00	0.00	0.00	2.74	0.74
VLB-2/2863	0.00	0.00	0.00	6.03	0.68
VLB-2184/2	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88
VLB-2/2776	0.00	0.00	4.93	4.93	0.00
1963	0.82	0.82	0.82	0.82	0.00
1988	3.01	3.01	3.01	3.01	0.22
1928	3.84	3.84	3.84	3.84	0.73
39/3/2/006	0.00	0.00	0.00	0.00	3.29
39/3/2/002	153.29	108.74	106.97	100.75	92.39
39/3/5/004	264.39	300.33	254.36	172.58	190.77
39/3/5/003	484.50	473.32	510.76	500.61	536.96
39/3/2/005	0.00	8.22	8.22	0.00	0.00
39/3/3/001	27.15	35.79	3.62	2.71	13.77
39/3/3/005	2.02	1.65	1.88	2.80	14.25
31/8/8/002	17.03	18.47	14.22	27.71	12.70
31/8/8/001	16.87	17.33	19.15	36.59	48.90
39/3/3/003	0.00	0.00	0.00	0.00	12.55

Tableau 4-7 : Débits de pompage imposés dans la *nappe du Bruxellien* en régime transitoire

Ouvrage	Débit imposé [m ³ /j]				
	2009	2010	2011	2012	2013
capt_1302	2.48	2.32	2.43	2.39	2.25
capt_3106	7.32	8.34	9.73	5.84	4.29
capt_5210	3.25	2.71	2.12	1.30	1.35
capt_5232	2.22	2.00	2.04	1.98	1.98
capt_5237	2.22	1.93	1.76	1.49	1.49
capt_5241	4.32	5.27	5.17	5.10	4.52
capt_5247	5.60	5.21	4.26	8.72	8.72
capt_5275	4.95	3.73	4.63	3.38	4.45
capt_5333	14.74	12.37	9.36	14.17	12.24

Ouvrage	Débit imposé [m ³ /j]				
	2009	2010	2011	2012	2013
capt_5377	2.99	7.44	3.70	2.93	2.26
capt_5420	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00
capt_5432	0.88	0.63	1.03	0.82	0.68
capt_5447	0.00	0.03	0.03	0.00	2.93
PuitsMahaut	5.57	5.45	5.22	5.10	4.41
LavoirColasRoodebeek	1.44	0.82	4.29	6.64	6.53
LavoirSleeckx	0.00	0.00	0.00	1.00	4.65
VLB-1/2918	0.00	0.00	0.00	12.60	6.57
vlb-gw1-2493	0.00	0.27	0.27	0.27	0.03
VLB-gw1-1992	54.79	54.79	54.79	54.79	0.04
1428	8.22	8.22	8.22	8.22	25.69
432	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
VLB-2/2499	0.00	9.40	9.40	9.40	2.08
VLB2/2938	0.00	0.00	0.00	61.87	14.67
ANT-037/GW1	10.96	10.96	10.82	10.96	10.08
Z2001049	5.48	5.48	5.48	5.48	5.48
1890	5.48	5.48	5.48	5.48	5.48

Tableau 4-8 : Débits de pompage imposés dans la nappe de l'Yprésien en régime transitoire

4.4.2.3.2 GALERIE VIVAQUA

En plus des captages, une galerie drainante de Vivaqua est utilisée pour capter de l'eau dans le Bruxellien. Un suivi des niveaux d'eau dans la galerie en différents puits témoins a été opéré de manière régulière jusqu'au 5 janvier 2011. Ces puits témoins ainsi que la galerie drainante sont localisés sur la **FIGURE 4-31**. Une coupe géologique illustrative est reprise à la **FIGURE 4-32**.

Cinq puits témoins sont répartis le long de la galerie, depuis le Sud vers le Nord :

- serrement du Fort-Jaco ;
- serrement du Caporal ;
- serrement du Maréchal ;
- serrement des Genêts ;
- serrement du Lac.

Malheureusement, le suivi des niveaux d'eau en ces points n'a pas été réalisé durant la période de calibration. La **FIGURE 4-33** reprend l'évolution des niveaux d'eau dans les puits témoins. Il y apparaît que le niveau a assez peu évolué durant les 11 années de mesures. En effet, l'amplitude de la variation maximale observée sur cette période est d'environ 1 m pour les puits témoins Fort-Jaco et Caporal, d'environ 90 cm pour le puits témoin Maréchal et d'environ 40 cm pour les puits témoins des Genêts et du Lac.

Actuellement, les serrements ne sont plus manipulables. La galerie est entièrement noyée. Une pompe est située au point le plus aval de la galerie et envoie l'eau vers le réseau de distribution. Une partie n'est pas pompée mais est envoyée vers la *Jauge Louise*. Le débit total passant au point le plus bas de la galerie est connu. Il s'agit de la somme :

- du débit pompé envoyé vers le réseau de distribution et mesuré par un compteur ;
- et du débit non pompé et reversé vers la *Jauge Louise*, mesuré par l'intermédiaire d'un déversoir.

Ainsi, dans la réalité, la galerie joue bien le rôle d'axe drainant puisqu'il s'agit toujours bien d'une zone d'écoulement préférentiel. Cela dit, il ne convient pas de répartir sur toute la longueur de la galerie des niveaux d'eau imposés puisque les serremments agissent sur le débit et le niveau d'eau le long de la galerie (la galerie ne constitue pas à proprement parler une « sortie » de l'aquifère sur toute sa longueur). Un niveau d'eau a donc été imposé au point le plus bas de la galerie (à hauteur du déversoir). Ce niveau d'eau imposé est le même pour les deux périodes de référence en régime permanent ainsi qu'en régime transitoire.

L'axe drainant a été reproduit par l'intermédiaire d'une conductivité hydraulique très élevée. La **FIGURE 4-34** illustre la conceptualisation de la galerie dans le modèle numérique.

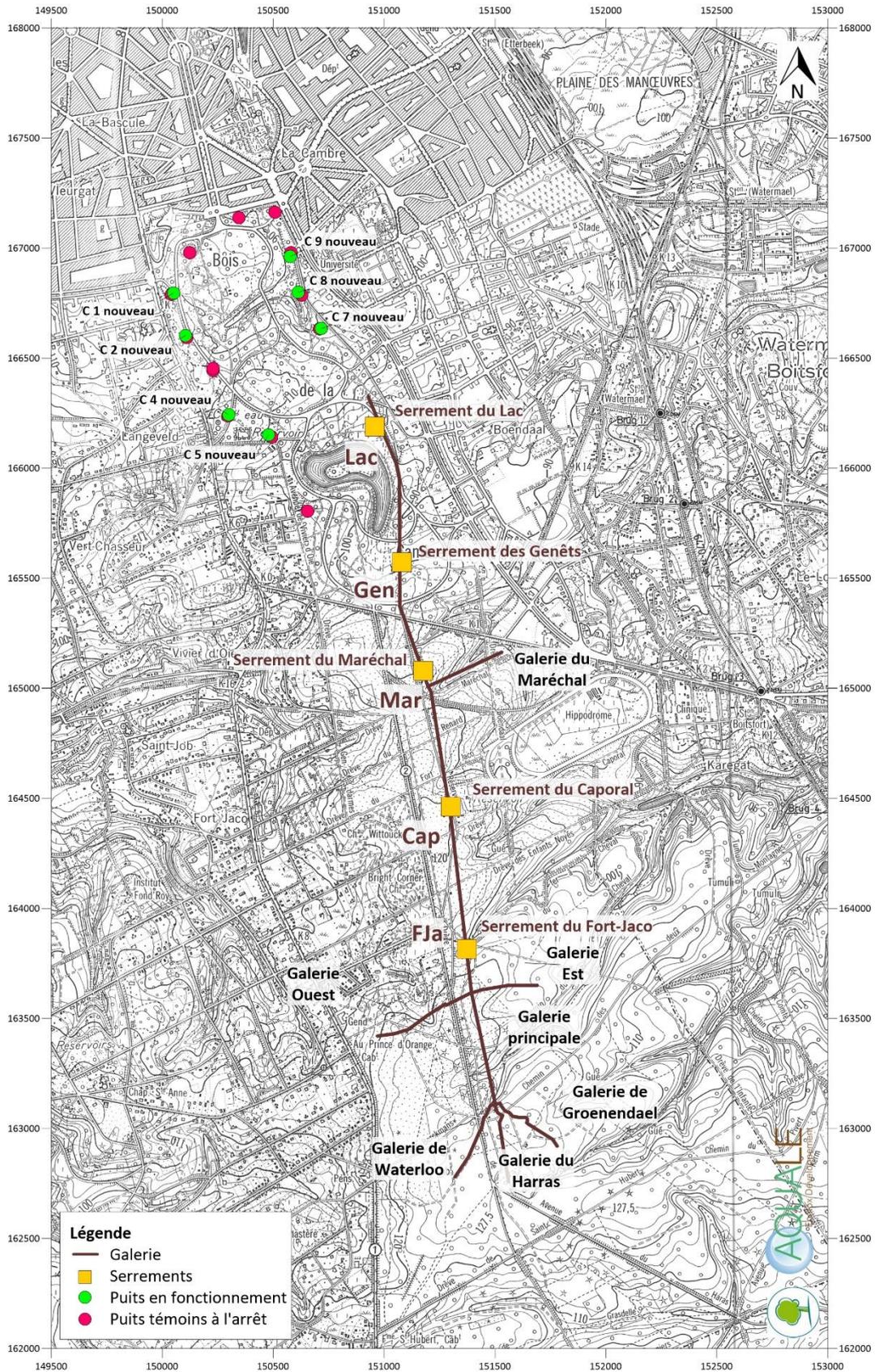


Figure 4-31 : Galerie Vivaqua et puits témoins

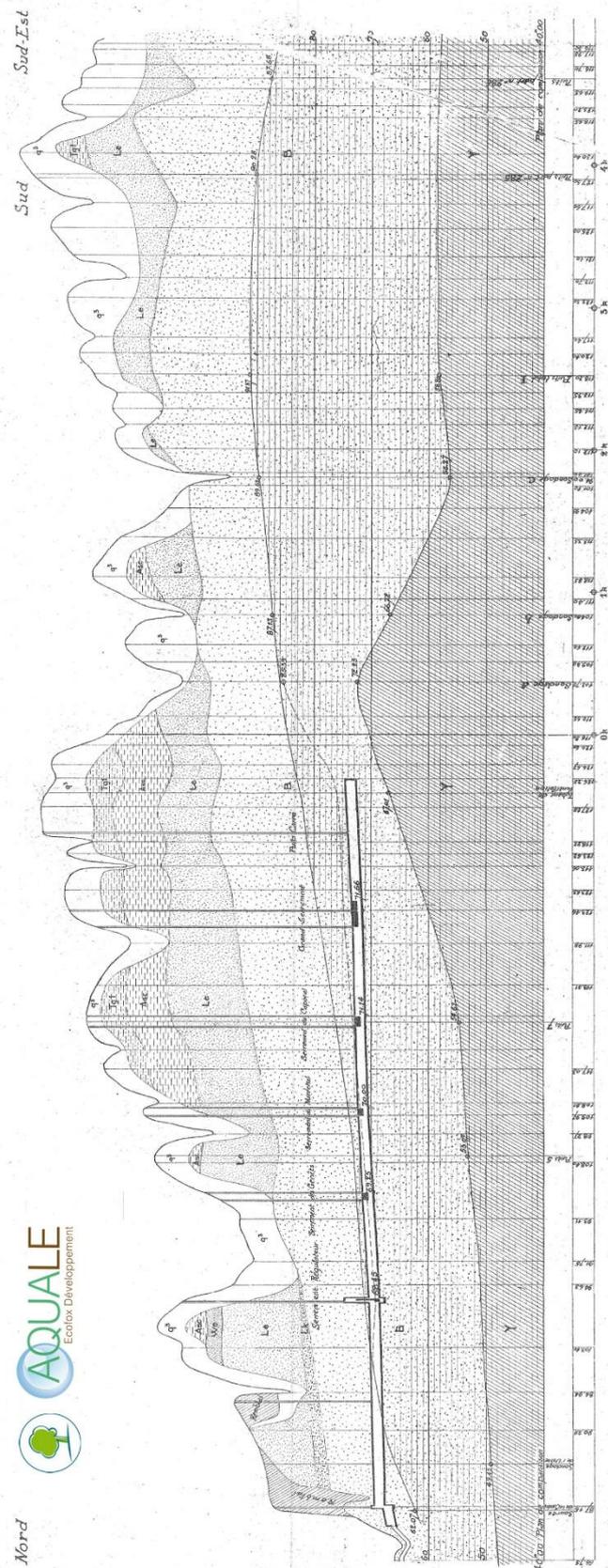


Figure 4-32 : Coupe de la galerie Vivaqua et de ses puits témoins (Ville de Bruxelles, Service des Eaux, 1915)

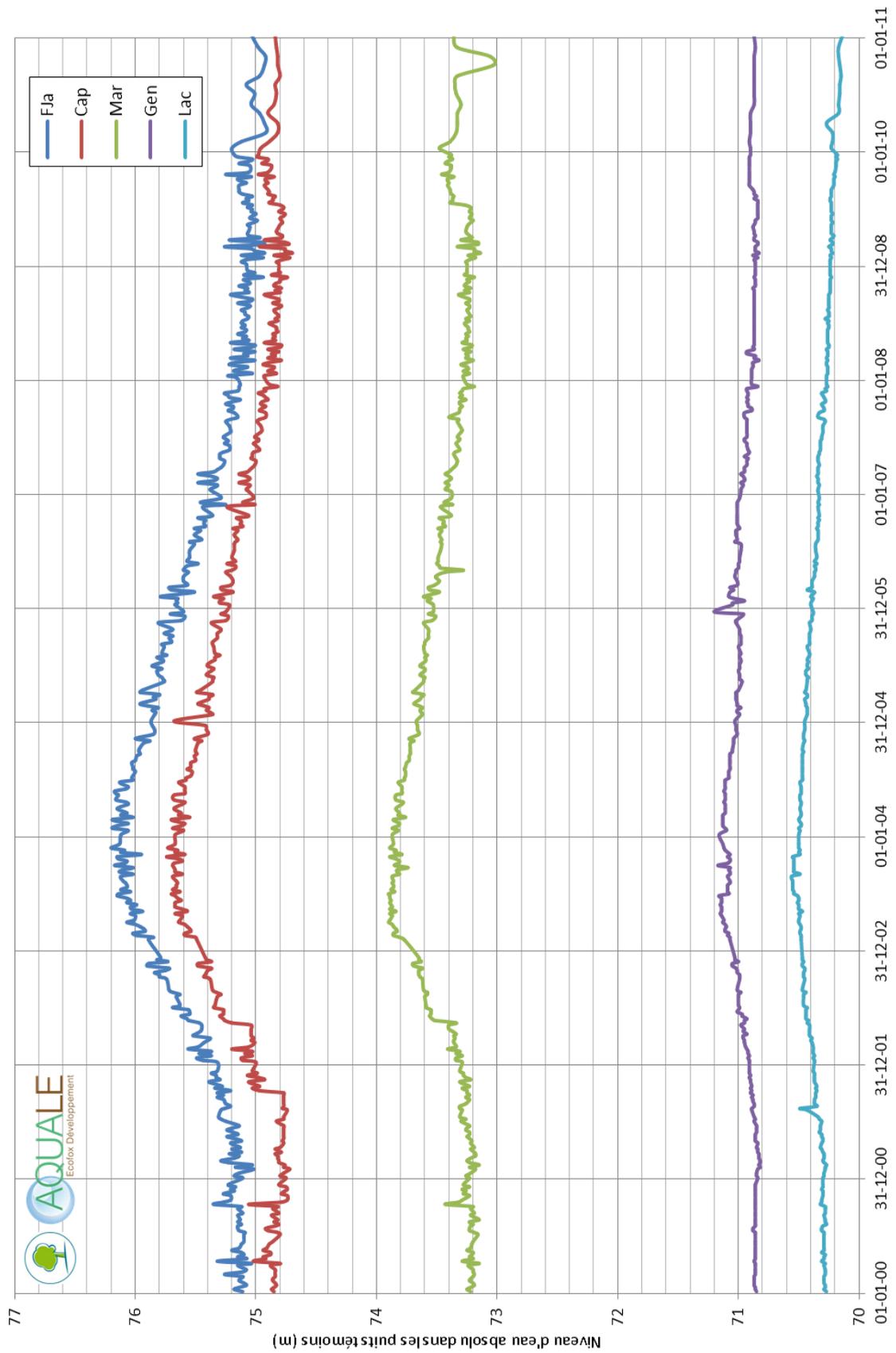


Figure 4-33 : Evolution du niveau d'eau absolu dans les puits témoins de la galerie captante Vivaqua (Source : VIVAQUA)

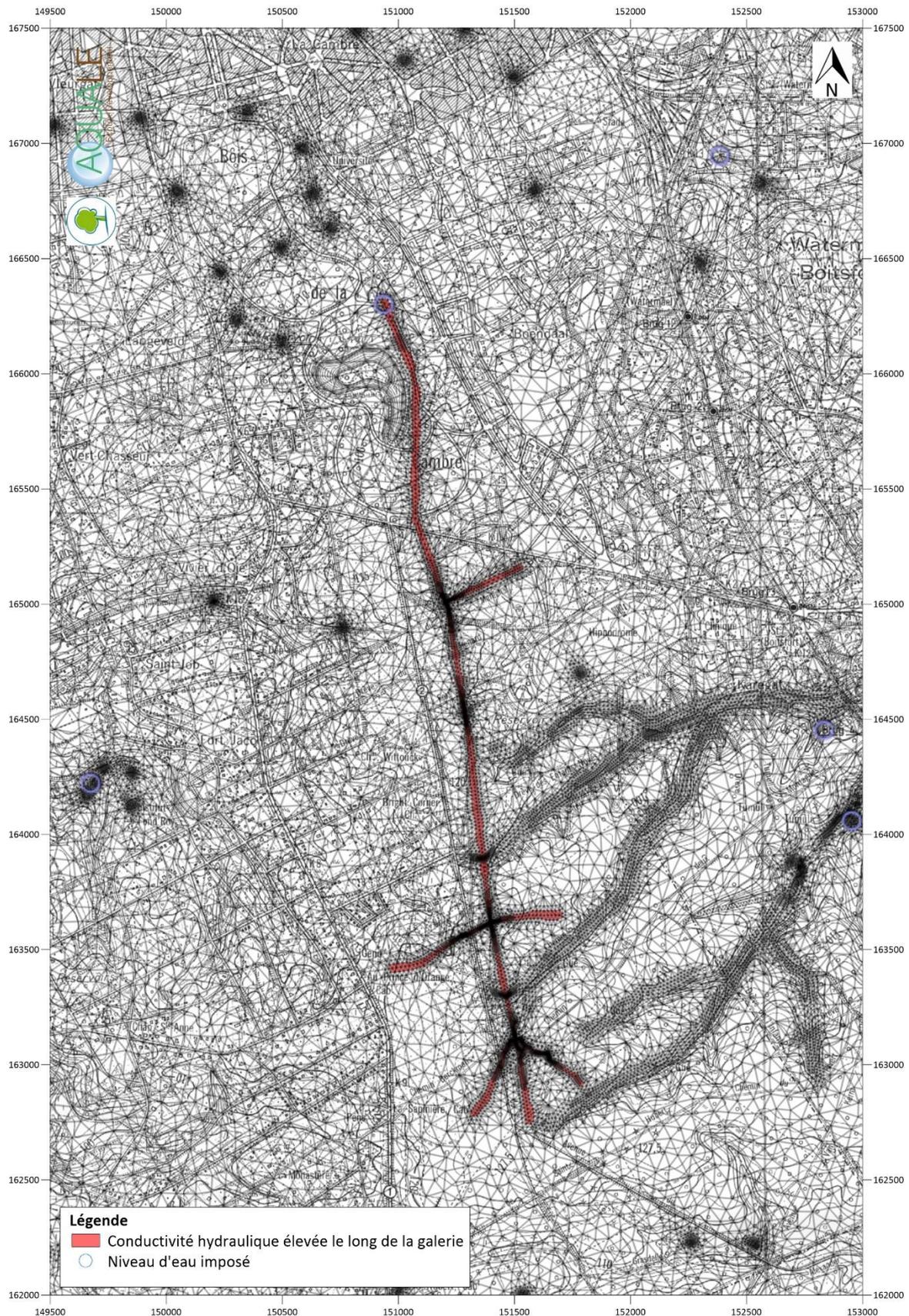


Figure 4-34 : Galerie Vivaqua dans le modèle numérique

4.4.2.4 SOURCES – CONDITION DE DIRICHLET, NIVEAU D'EAU IMPOSÉ

Les sources prises en compte dans le modèle sont reprises au **TABLEAU 4-9** ci-dessous.

Nom de la source	X [m]	Y [m]	Z [m]	Nappe concernée
Source Collège St-Pierre	148043.70	166081.22	52.21	Bruxellien
Source Defré	148858.89	165967.03	60.75	
Source des enfants noyés	152799.09	164454.80	77.33	
Source du Sylvain	156263.92	166643.28	66.86	
Source Empereur	156023.85	166566.17	64.49	
Source Félix Haps	151222.69	169346.42	52.74	
Source Fond Roy	149675.37	164229.11	67.67	
Source Fontaine de l'Amour	151452.97	172310.46	39.71	
Source Jardin Jean Massart	154724.88	167024.33	54.63	
Source Keelbeek	154068.08	176317.55	20.70	
Source Kinsendael	148110.96	163900.27	54.35	
Source Parc Ter Coigne	152398.59	166943.13	67.30	
Source Stade Falon	155681.11	170323.51	49.55	
Source Trois Fontaines	155470.67	166204.45	64.33	
Source Vuylbeek	152951.48	164060.73	73.82	
Source du Calvaire	146835.90	167336.09	28.50	Yprésien

Tableau 4-9 : Sources prises en considération dans le modèle numérique

Les sources sont représentées dans le modèle numérique par une condition de 1^{er} type (Dirichlet) avec un potentiel imposé au droit de la source et correspondant à la cote topographique. La condition de 1^{er} type sur le potentiel imposé est couplée à une contrainte imposant la mise en veille de la condition de potentiel si le débit correspondant n'est pas sortant. En pratique, cela revient à autoriser les sources à drainer la nappe lorsque celle-ci atteint au minimum la cote des sources et à considérer les sources comme déconnectées de la nappe lorsque cette dernière est rabattue sous la cote des sources (ces dernières ne débitent plus).

La **FIGURE 4-35** illustre la prise en considération des sources dans le modèle numérique pour la *nappe du Bruxellien*. Une figure n'est pas présentée spécifiquement pour la source de la *nappe de l'Yprésien*.

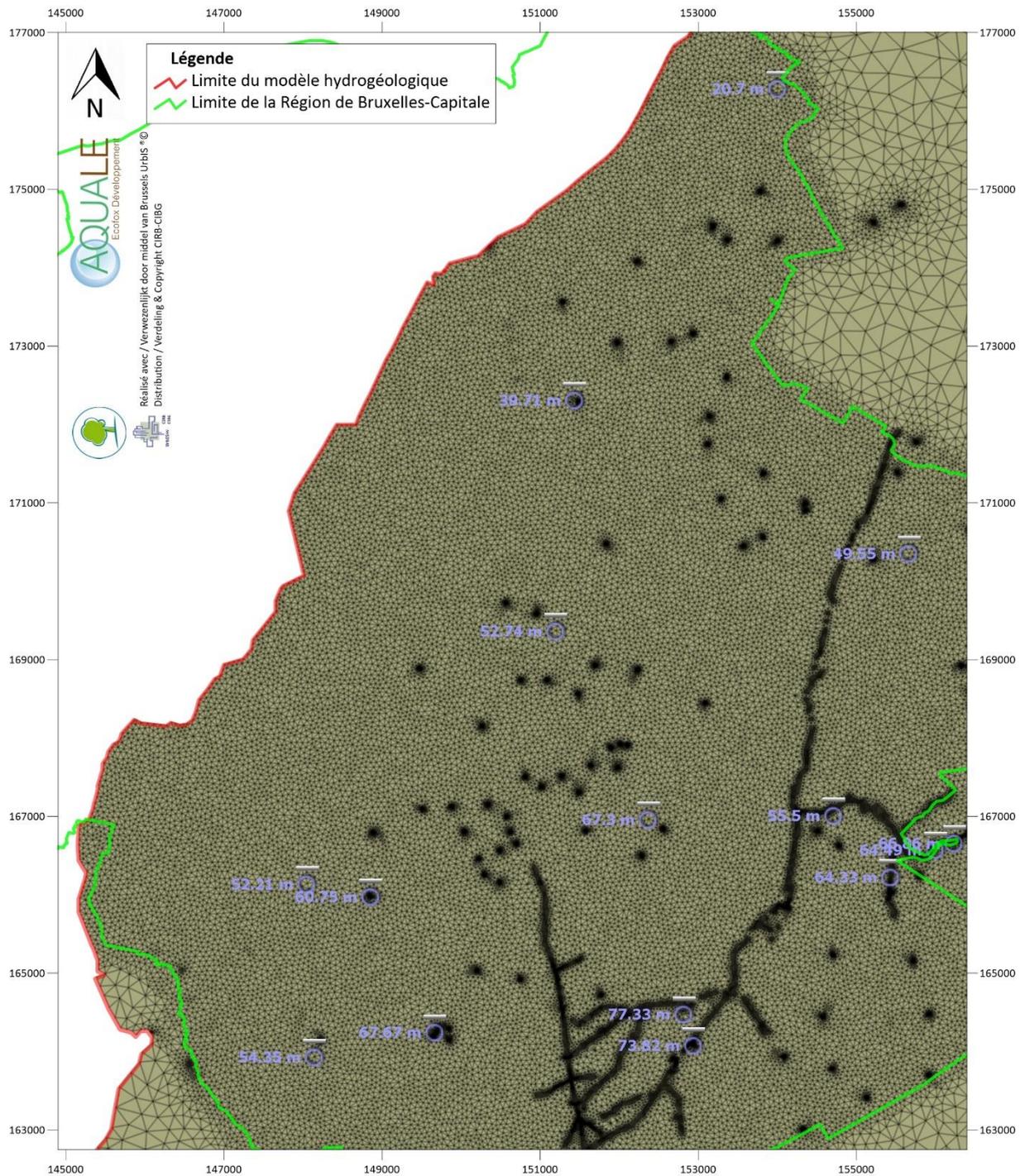


Figure 4-35 : Sources de la nappe du Bruxellien dans le modèle numérique

5 CALIBRATION DU MODÈLE

Les étapes #5, #6, #7 et #8 sont différentes pour les deux périodes de calibration en régime permanent et pour le régime transitoire. Dans les sous-chapitres présentés ci-après, les différences entre les deux périodes de calibration en régime permanent et pour la calibration en régime transitoire seront clairement mentionnées.

Bien que les deux périodes de référence (mai – juin 2013 et novembre 2013) soient reproduites par le biais d'une seule simulation en régime permanent, plusieurs ajustements ont été réalisés lors du processus de calibration entre ces deux périodes. Le modèle a ainsi été calibré sur la première période avant d'être testé sur la seconde. Pour reproduire aussi bien que possible les deux périodes, des ajustements sur les paramètres suivants ont été réalisés :

- le champ de conductivité hydraulique ;
- le champ d'infiltration ;
- les niveaux d'eau imposés.

Les corrections et améliorations apportées par la prise en considération de la seconde période de référence ne sont pas détaillées dans le présent rapport puisqu'il s'agit d'un processus inhérent au développement du modèle.

Seul le résultat final est présenté ci-après. Ce résultat final en régime permanent propose une seule version du modèle caractérisée par :

- un champ unique de conductivité hydraulique puisque les propriétés intrinsèques du sol n'évoluent pas ;
- un champ unique d'infiltration puisque le contexte climatique / piézométrique n'indique pas qu'une variation de ce champ est utile pour la reproduction des deux piézométries ;
- un champ unique de débit prélevé au sein des captages puisque seul le débit annuel est connu.

Le modèle finalement obtenu en régime transitoire est caractérisé, en plus, par :

- un champ d'infiltration variable dans le temps ;
- un champ de débit prélevé variable dans le temps ;
- un champ de porosité efficace unique puisque les propriétés intrinsèques du sol n'évoluent pas ;
- un champ de coefficient d'emmagasinement unique puisque les propriétés intrinsèques du sol n'évoluent pas.

Le modèle en régime transitoire couvre la période allant de janvier 2009 à décembre 2013 inclus. Le pas de temps utilisé pour la calibration en régime transitoire est d'un mois.

5.1 ETAPE #5 - DÉFINITION DES POINTS D'OBSERVATION

Les points d'observations pris en compte dans le modèle sont placés aux nœuds au droit desquels le modélisateur souhaite observer les résultats des variables simulées telles que :

- les variables primaires (charge hydraulique / piézométrie, concentration, température) ;
- les dérivées des variables primaires (pression, degré de saturation, degré d'humidité, flux entrant ou sortant, vitesses de Darcy, transfert de masse ou de chaleur, élévation des couches).

En pratique, les points d'observations sont définis au droit des piézomètres (observation de la piézométrie simulée) et permettent de définir un scatterplot (graphique permettant de comparer les piézométries simulées et mesurées et de juger de l'état de calibration de la piézométrie).

Les collecteurs, sources, galeries, rivières et ruisseaux (observation des débits simulés entrants ou sortants du modèle) sont observés par l'intermédiaire du bilan hydrogéologique.

L'observation des variables simulées peut se faire ponctuellement (régime permanent) ou sur un laps de temps plus important (régime transitoire).

5.1.1 OBSERVATION DE LA PIÉZOMÉTRIE

5.1.1.1 EN RÉGIME PERMANENT

Les **TABLEAUX 5-1, 5-2 et 5-3** ci-après présentent les points d'observation pris en compte pour la calibration de la piézométrie de mai – juin 2013 et de novembre 2013. Ils reprennent leurs coordonnées de même que la piézométrie de référence pour cette période (respectivement pour la *nappe superficielle*, la *nappe du Bruxellien* et la *nappe de l'Yprésien*). Les points d'observation sont par ailleurs également présentés à l'aide de petits drapeaux aux **FIGURES** :

- **5-1 et 5-2** pour la *nappe superficielle*, respectivement pour la campagne de mai – juin 2013 et la campagne de novembre 2013 ;
- **5-3 et 5-4** pour la *nappe du Bruxellien*, respectivement pour la campagne de mai – juin 2013 et la campagne de novembre 2013 ;
- **5-5 et 5-6** pour la *nappe de l'Yprésien*, respectivement pour la campagne de mai – juin 2013 et la campagne de novembre 2013.

La piézométrie de référence utilisée est la moyenne des mesures réalisées en chaque point durant la période de référence. Les mesures étant très constantes, l'erreur commise en prenant une moyenne est *a priori* négligeable. Pour le piézomètre 723/63/4, une mesure a été exclue pour la période de mai – juin 2013 compte tenu de son caractère aberrant par rapport aux autres mesures. La moyenne utilisée comme référence pour l'ouvrage Aquamatic est entachée d'une erreur car la sonde de mesure automatique équipant l'ouvrage est régulièrement hors de l'eau, auquel cas la mesure de référence reprise dans les chroniques est la hauteur de la sonde. De ce fait, la moyenne utilisée est une surestimation du niveau d'eau. Le piézomètre Pz Mahaut a été exclu du processus de calibration étant donné que les mesures y sont entachées d'une erreur importante liée à la variation importante et très fréquente du niveau d'eau dans cet ouvrage. Enfin, le piézomètre LAVP030 (crépiné dans le Quaternaire) n'est pas pris en considération car il se situe à proximité de la bordure Est du modèle dans une zone très localement impactée par une instabilité numérique.

L'erreur acceptable sur la piézométrie dépend de la proximité du piézomètre observé par rapport à la zone d'intérêt (Région de Bruxelles-Capitale) et de la nappe concernée (la précision à obtenir étant plus élevée pour la *nappe du Bruxellien* que pour les *nappes superficielle et de l'Yprésien*). Ainsi, les erreurs acceptables seront de :

- 5 m dans la *nappe superficielle* ;
- 2.5 m dans la *nappe du Bruxellien* et légèrement plus pour les points éloignés de la zone d'intérêt ;
- 5 m dans la *nappe de l'Yprésien*.

Une erreur de 5 m est acceptée dans les *nappes superficielle et de l'Yprésien*. L'objectif pour ces deux nappes est surtout de bien représenter les gradients et direction d'écoulement afin de prendre en compte leur influence sur les écoulements dans la *nappe du Bruxellien*.

L'amplitude de l'erreur acceptable a été définie en prenant en considération les différentes sources d'imprécisions déjà évoquées.

Il est important de noter que l'erreur acceptable définie ci-dessus n'est pas le critère de base permettant de juger si la calibration est satisfaisante ou non. En effet, cette fourchette d'erreur acceptable est plutôt indicative et permet au modélisateur d'évaluer l'évolution du processus de calibration. Etant donné l'existence de nombreuses sources d'imprécisions (sur les mesures piézométriques, sur les débits de pompage imposés, sur l'infiltration imposée...) et le caractère régional du modèle et de ses objectifs, il n'est pas jugé utile de chercher à reproduire les niveaux d'eau avec plus de précisions (il s'agirait d'une « *fausse précision* »).

Piézomètre	X [m]	Y [m]	Piézométrie de référence pour mai – juin 2013 [m]	Piézométrie de référence pour novembre 2013 [m]
2-0010	165350.1	186225.8	6.49	5.99
2-0107	163045	187595	5.66	5.56
2-0424b	160639	186224	8.83	8.12
700/21/1	143269.2	160792.2	25.88	
700/32/2	142164	158158.7	46.70	
700/75/3	144612.5	160030.9	56.09	
700/75/6	146295.6	157004.1	65.31	
722/21/1	170980.9	184170.4	8.48	
722/21/4	166538.4	185125.6	6.77	
722/34/1	170759.1	182157	12.69	
722/73/3	169422.7	180118.1	17.43	
723/73/9	167123.7	182035.1	13.89	
724/21/1	159318.3	187816.1	6.92	
727/21/1	163315.9	187727.6	5.61	
III-016	149846.92	172728.89	17.71	17.69
N/71/1	164916.7	178139.9	20.94	
N/73/1	161659.6	184024.5	10.30	
N/73h/4r	162688.5	170545.1	59.31	
VIII-139	147590.78	169133.75	16.83	16.86
Car-Wash 2000	147285.44	169038.89	16.25	

Tableau 5-1 : Points d'observation dans la *nappe superficielle*

La variation piézométrique entre les deux périodes de référence est de 24 cm en moyenne. Il apparaît dès lors que les deux périodes de référence représentent un contexte piézométrique très proche.

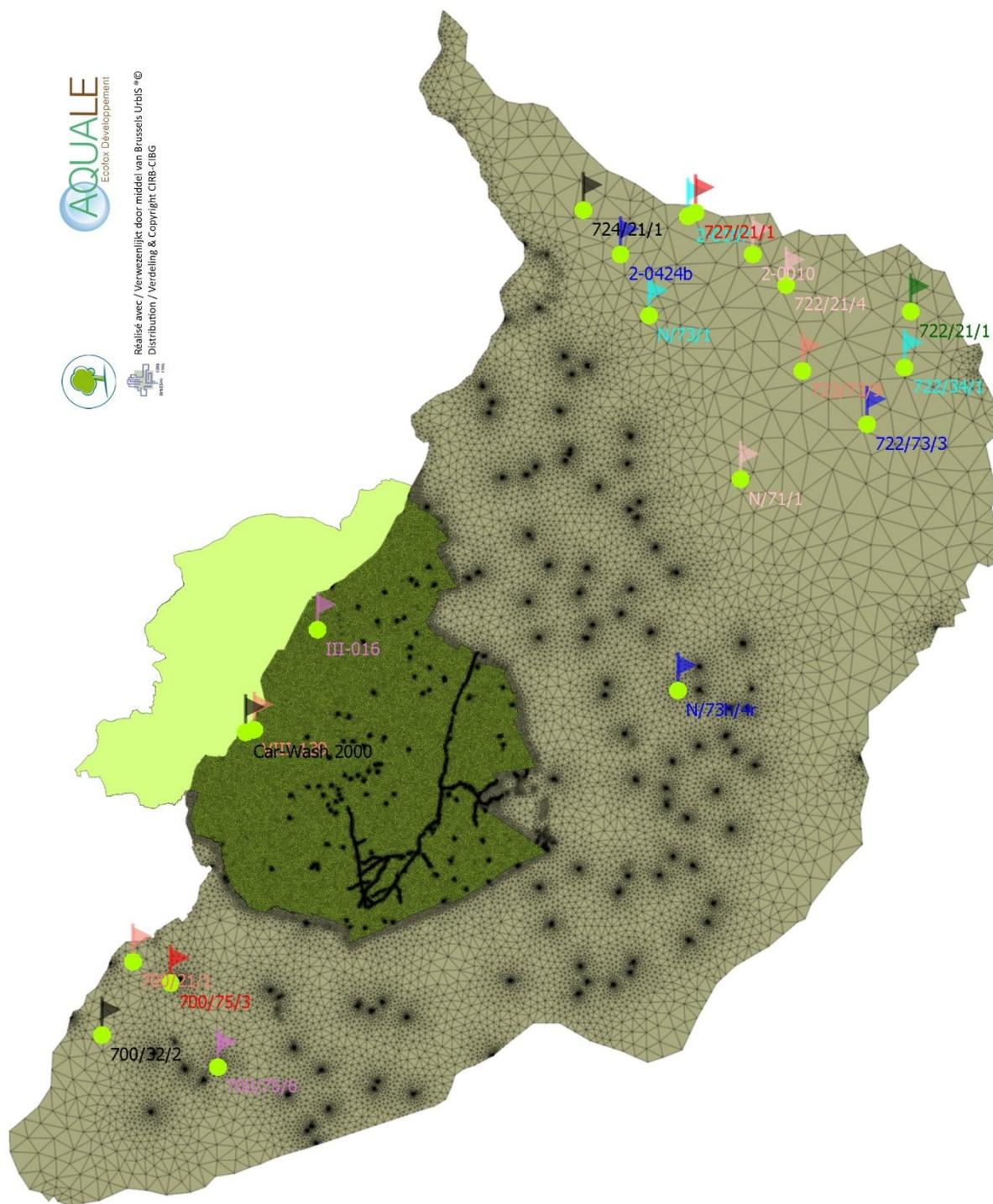


Figure 5-1 : Points d'observation dans la *nappe superficielle* pour la période de mai – juin 2013

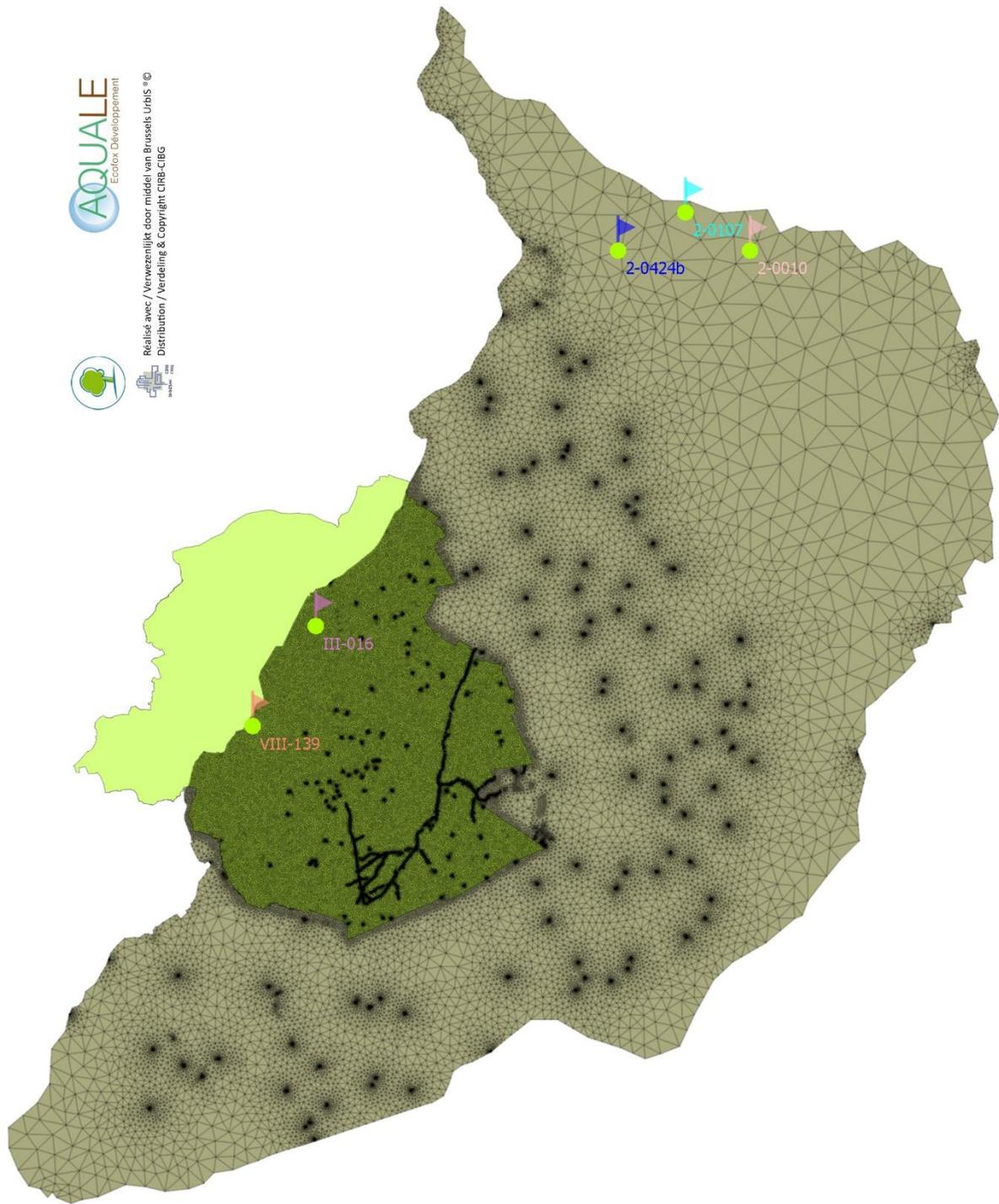


Figure 5-2 : Points d'observation dans la *nappe superficielle* pour la période de novembre 2013

Piézomètre	X [m]	Y [m]	Piézométrie de référence pour mai – juin 2013 [m]	Piézométrie de référence pour novembre 2013 [m]
2-0009	163749	162234	57.72	57.73
2-0018	172172	182569.9	10.71	10.19
2-0073	168703	174665	36.47	36.53
2-0109	159858	177887	29.21	29.15
2-0114	153030	158805	92.30	92.35
2-0419b	155955	180524	15.33	14.92
2-0420b	160082	170389	63.10	62.97
2-0424b	160639	186224	7.53	6.97
2-0430	166516	167019	49.66	49.55
2-0431	157749	163462	73.15	73.14
700/73/1	149008	157710.1	88.01	
702/71/1	149445.4	162179.9	78.01	
703/71/3	157719.8	172444.5	42.77	
703/73/3	159436.6	174958.7	44.46	
703/73/5	161730.8	172638.7	56.11	
710/71/3	164949.1	161771.2	55.26	
710/71/4	164146.8	161242.4	53.17	
710/73/1	166382.9	163593.3	53.97	
711/71/1	166673.7	167701	48.30	
711/71/4	165910.8	165046.9	49.03	
711/72/1	164738.3	168387.5	57.16	
711/73/3	164591.7	165568.6	59.03	
711/73/5	163961.5	162911.5	54.53	
711/73/7	164071	166942.9	62.27	
711/73/8	167779.2	168190.3	42.76	
713/63/2	167252.6	173208.2	41.73	
713/63/4	165671.9	172901	46.57	
713/71/1	165164.9	169928.3	50.65	
713/72/3	163442.3	171409.5	56.90	
713/72/4	166913.2	172899.2	42.86	
713/73/10	166479.8	170963.7	45.69	
713/73/2	163416.3	168542.4	59.36	
713/73/7	167662.8	170995.7	41.71	
713/73/9	164383.5	168899.8	55.86	
722/63/2	167953.8	175429.8	35.54	
722/73/3	169422.7	180118.1	17.39	
723/63/1	161015.4	174195.4	50.33	
723/63/4	166788.2	174432.8	39.96	
723/73/14	163584	183567.1	10.68	

Piézomètre	X [m]	Y [m]	Piézométrie de référence pour mai – juin 2013 [m]	Piézométrie de référence pour novembre 2013 [m]
723/73/16	162713.8	178235.8	26.41	
723/73/3	163058.8	177551.4	30.50	
723/73/4	165284.2	176617.2	30.39	
724/71/1	160703.1	180489.2	13.84	
724/73/1	162035.9	178054	27.89	
724/73/4	161850.5	181636.6	12.72	
724/73/5	160643.1	184031.4	9.17	
Aquamatic	151583	166801	68.86	69.02
Bonne-Odeur	155939.869	163674.452	74.39	74.41
Bonniers	154342.651	162985.256	81.89	81.93
C 1 ancien	150040.98	166789.36	65.51	
C 11	150345.11	167138.13	65.69	
C 3 ancien	150228.81	166444.65	66.83	
C 4 ancien	150295.71	166236.66	67.19	
C 5 ancien	150492.26	166141.24	67.36	
C 7 ancien	150708.76	166632.60	66.14	
C 8 ancien	150627.75	166785.37	66.71	
C 9 ancien	150581.43	166978.48	66.28	
Erasmus	151293.376	173568.124	33.40	33.28
Ferme Fond Roy	149848.192	164268.33	69.86	69.86
Hof-ter-Musschen	155538.731	171380.725	43.35	43.15
N/71/1	164916.7	178139.9	20.93	
N/71h/2	161168	167325.4	68.81	
N/73h/4r	162688.5	170545.1	59.30	
N/75h/3	143920.6	155405	87.88	
Puits Van Mullem	153801.141	174978.082	35.09	34.95
Pz 20	150571.169	169712.046	50.17	49.93
Régent	153156.71	172101.818	51.18	51.06
Soignes - S1	151530	162000	86.77	86.95
Soignes - S10	155739.33	165132.16	73.35	73.43
Soignes - S12	149692.632	164226.098	67.58	67.58
Soignes - S2	152258.46	162235.94	85.72	85.86
Soignes - S4	152692.971	163884.841	78.50	78.38
Soignes - S7	154710.416	163757.02	78.06	78.06
Soignes - S8	154594.781	164420.048	74.51	74.60
Soignes - T19	151000.43	162030.061	86.45	86.41
Soignes - T22	152535	162225	86.39	86.56
Soignes - T25	154103.145	163911.452	77.02	77.01
Soignes - T27	155152.116	163387.21	78.99	79.02

Piézomètre	X [m]	Y [m]	Piézométrie de référence pour mai – juin 2013 [m]	Piézométrie de référence pour novembre 2013 [m]
Soignes - T30	154724.065	165213.045	68.09	68.16
Soignes - T31	155456.446	166005.72	66.04	66.02
Soignes - T33	155948.543	164456.141	75.70	75.81
Soignes - T36	149724.87	164287.521	68.50	68.49
VI-037	156454.949	170657.79	53.55	53.53
Strasbourg	154151.985	165815.821	38.93	38.67
Voets	155816.584	166218.766	66.57	67.55

Tableau 5-2 : Points d'observation dans la *nappe du Bruxellien*

La variation piézométrique entre les deux périodes de référence est de 12 cm en moyenne. Il apparaît dès lors que les deux périodes de référence représentent un contexte piézométrique très proche.

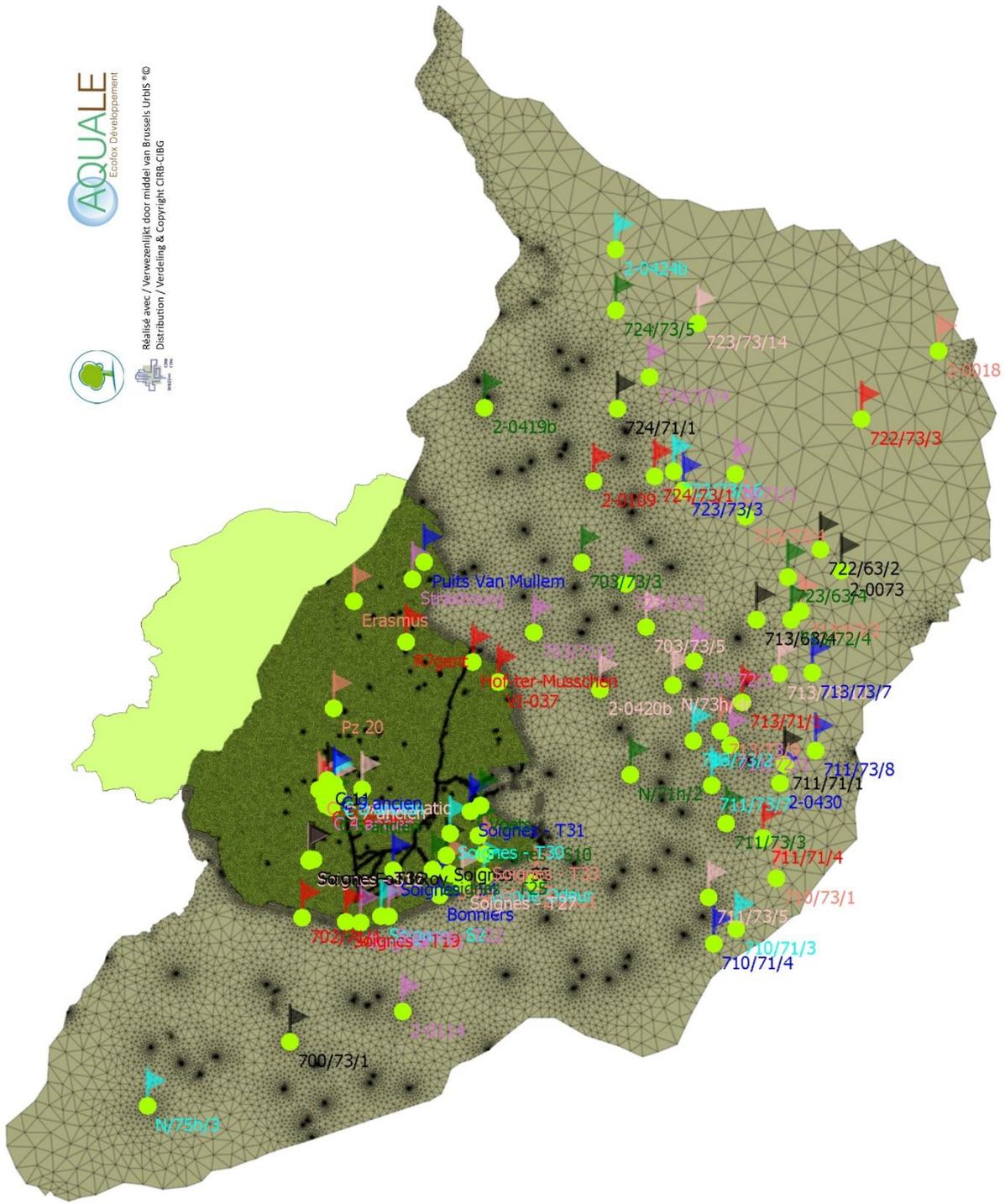


Figure 5-3 : Points d'observation dans la nappe du Bruxellien pour la période de mai – juin 2013

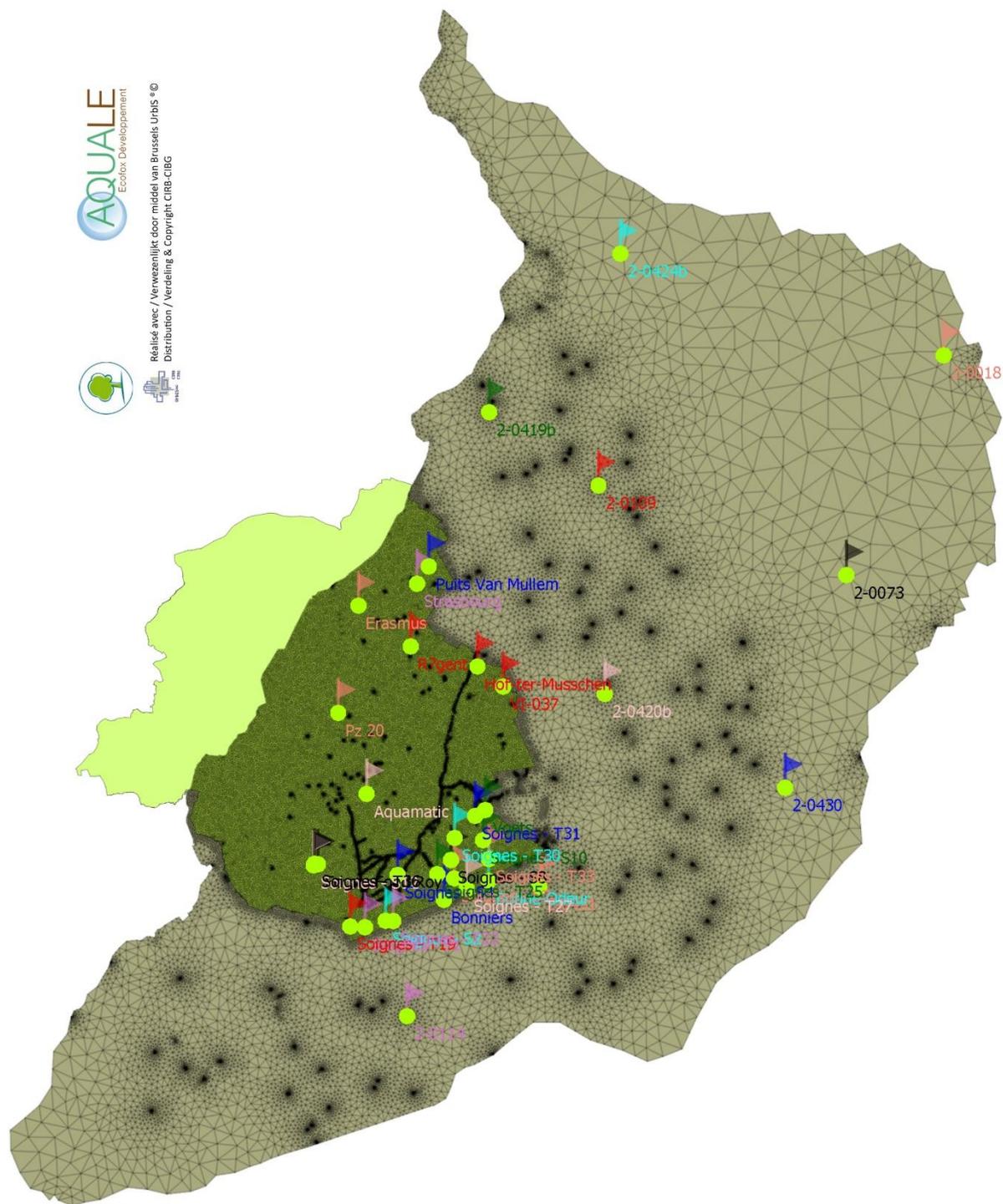


Figure 5-4 : Points d'observation dans la nappe du Bruxellien pour la période de novembre 2013

Piézomètre	X [m]	Y [m]	Piézométrie de référence pour mai – juin 2013 [m]	Piézométrie de référence pour novembre 2013 [m]
2-0419b	155955	180524	13.45	13.21
700/71/4	145159	159871.4	67.825	
700/73/1	149008	157710.1	89.85	
700/75/3	144612.5	160030.9	55.11	
703/71/3	157719.8	172444.5	42.8	
710/71/4	164146.8	161242.4	49.27	
711/73/3	164591.7	165568.6	57.99	
711/73/5	163961.5	162911.5	52.48	
711/73/8	167779.2	168190.3	42.6	
713/63/2	167252.6	173208.2	41.72	
713/72/4	166913.2	172899.2	42.87	
N/75h/3	143920.6	155405	87.37	

Tableau 5-3 : Points d'observation dans la nappe de l'Yprésien

Seul le piézomètre 2-0419b a fait l'objet d'un relevé piézométrique durant la période de novembre 2013. La variation piézométrique entre les deux périodes de référence pour cet ouvrage est de 24 cm. Il apparaît dès lors que, comme pour les deux autres nappes, les deux périodes de référence représentent un contexte piézométrique très proche.

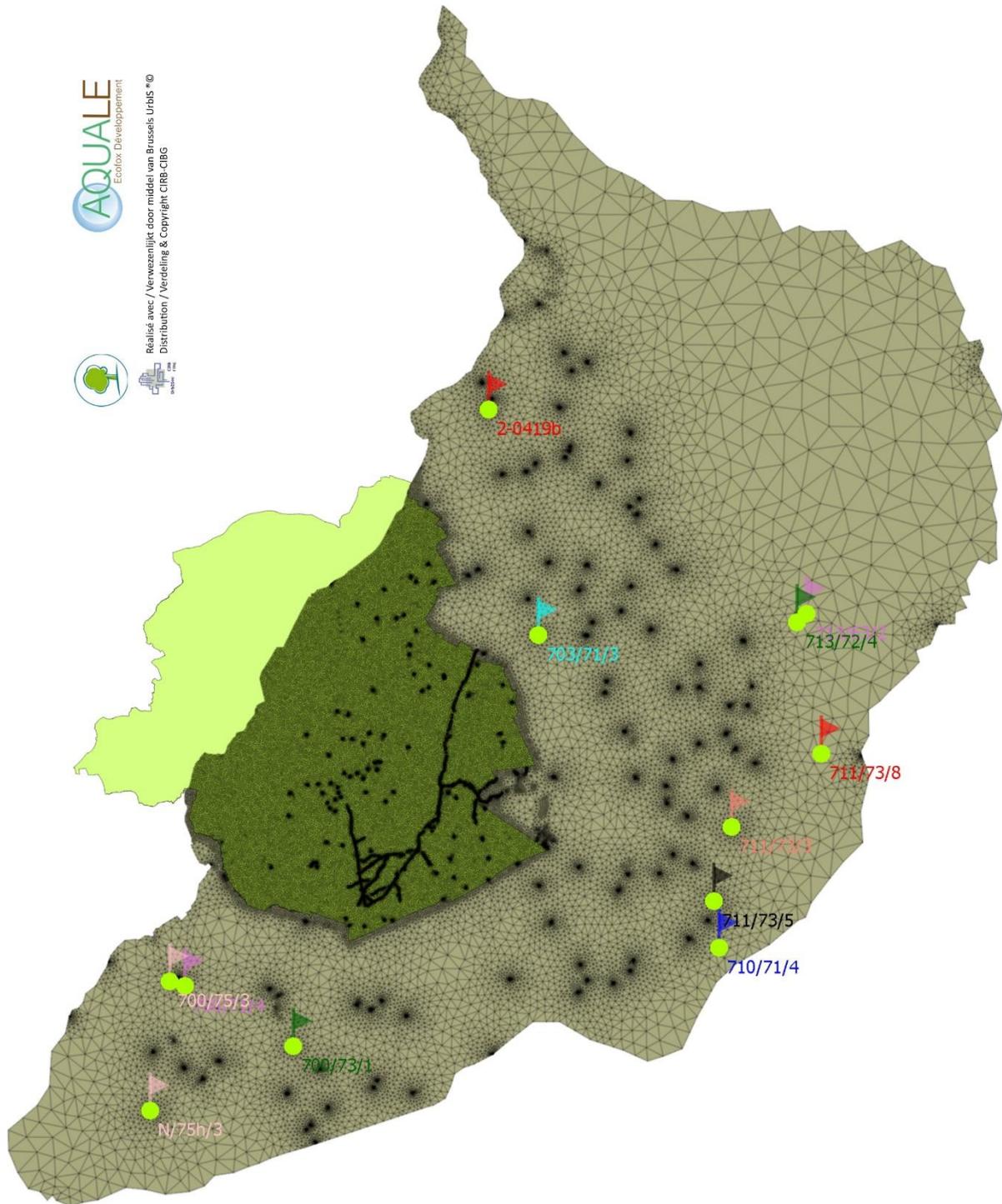


Figure 5-5 : Points d'observation dans la nappe de l'Yprésien pour la période de mai – juin 2013

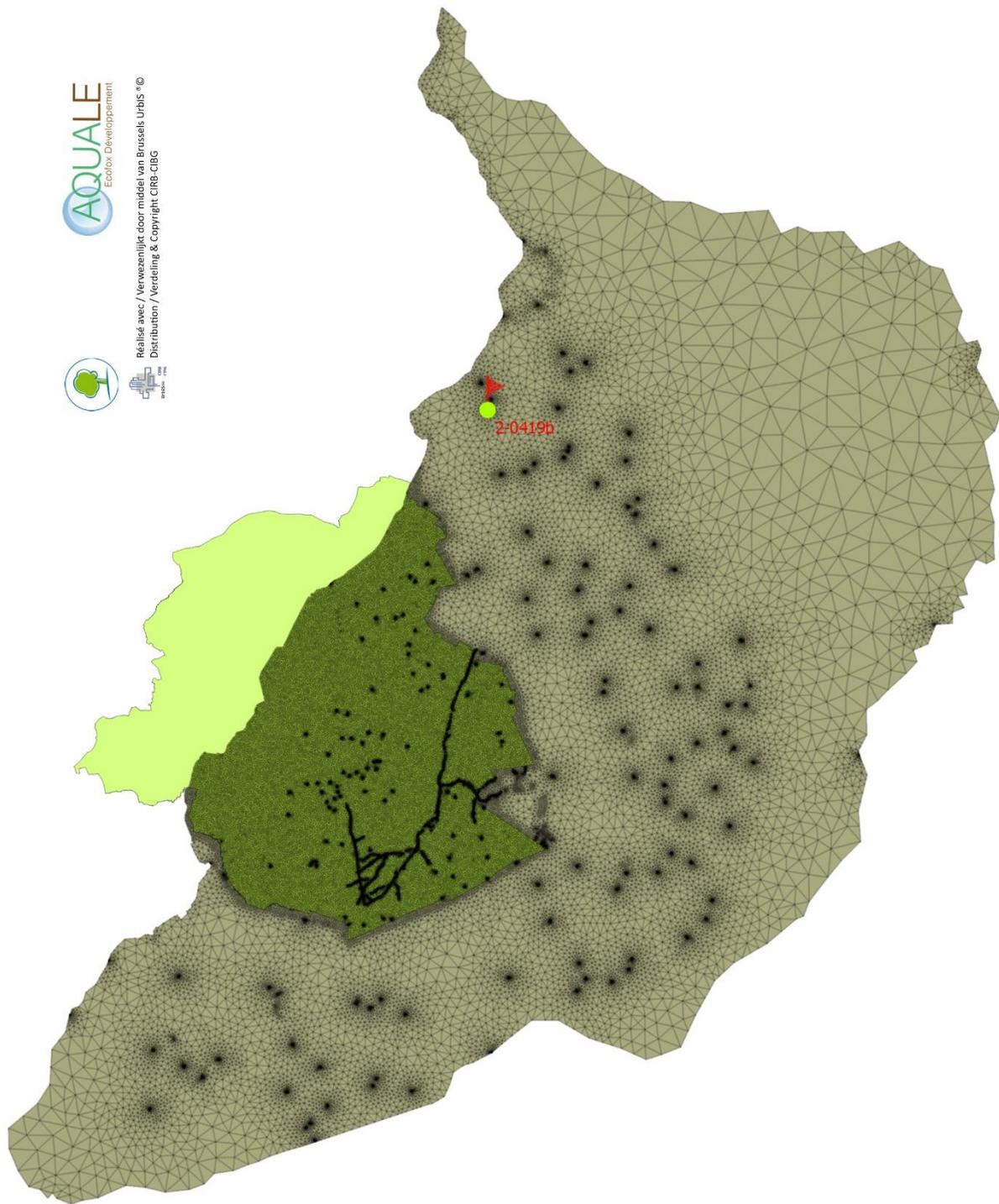


Figure 5-6 : Points d'observation dans la nappe de l'Yprésien pour la période de novembre 2013

Etant donné que les deux contextes piézométriques de référence pour la calibration en régime permanent sont très proches, il est à ce stade jugé très probable que les opérations de calibration pour la première période permettent de reproduire correctement la seconde période.

Pour mieux comprendre l'évolution des niveaux piézométriques au sein de la zone d'intérêt, les quelques figures reprises ci-dessous (**FIGURES 5-7 à 5-11**) présentent l'évolution des niveaux d'eau dans quelques piézomètres équipés d'une sonde de relevé automatique au sein de la *nappe du Bruxellien*. Sur chacune des figures, les deux périodes de référence sont mises en évidence.

La **FIGURE 5-7** reprend l'évolution de quelques piézomètres situés en Région de Bruxelles-Capitale pour l'année 2013. Cette figure illustre qu'à l'échelle de la Région, la piézométrie est quasiment constante durant l'année 2013.

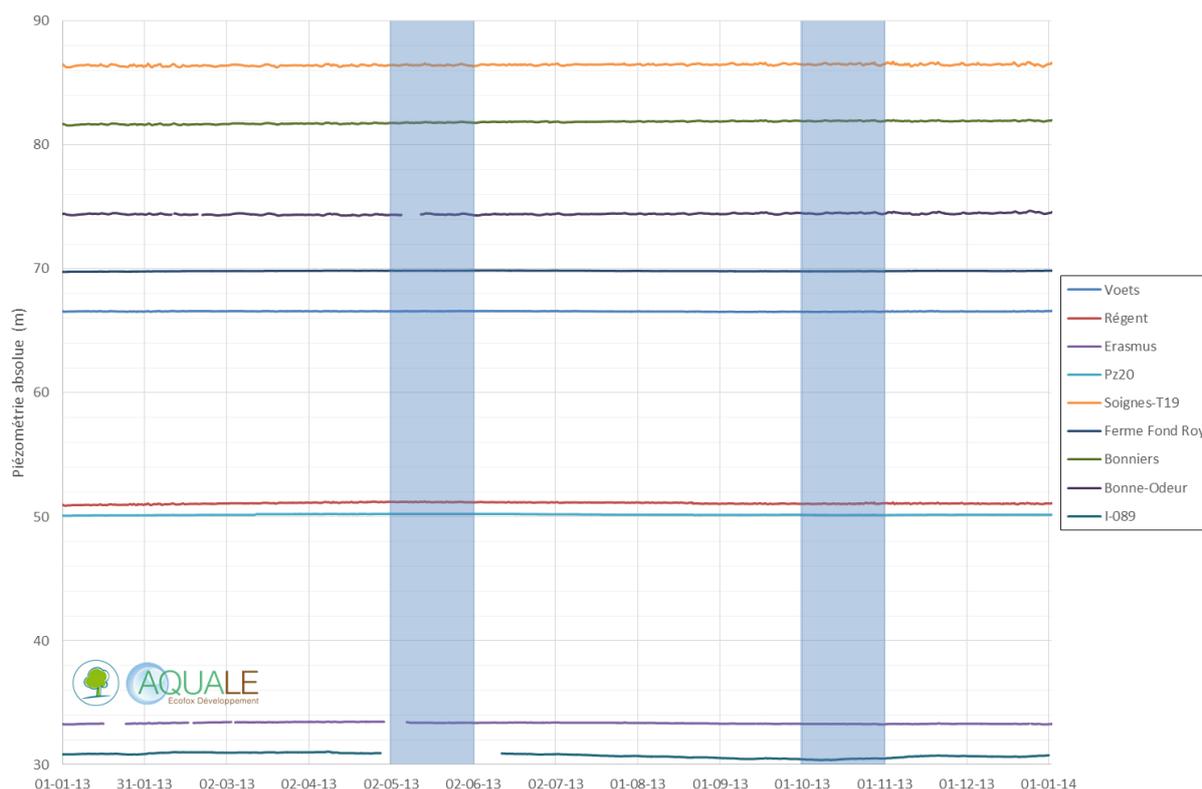


Figure 5-7 : Evolution de la piézométrie de la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale au sein de quelques ouvrages équipés d'une sonde de mesure automatique

Les **FIGURES 5-8 à 5-11** reprennent l'évolution piézométrique au sein de ces mêmes piézomètres en se focalisant sur une plage de piézométrie (axe vertical des graphiques) plus restreinte afin de mieux appréhender l'évolution locale.

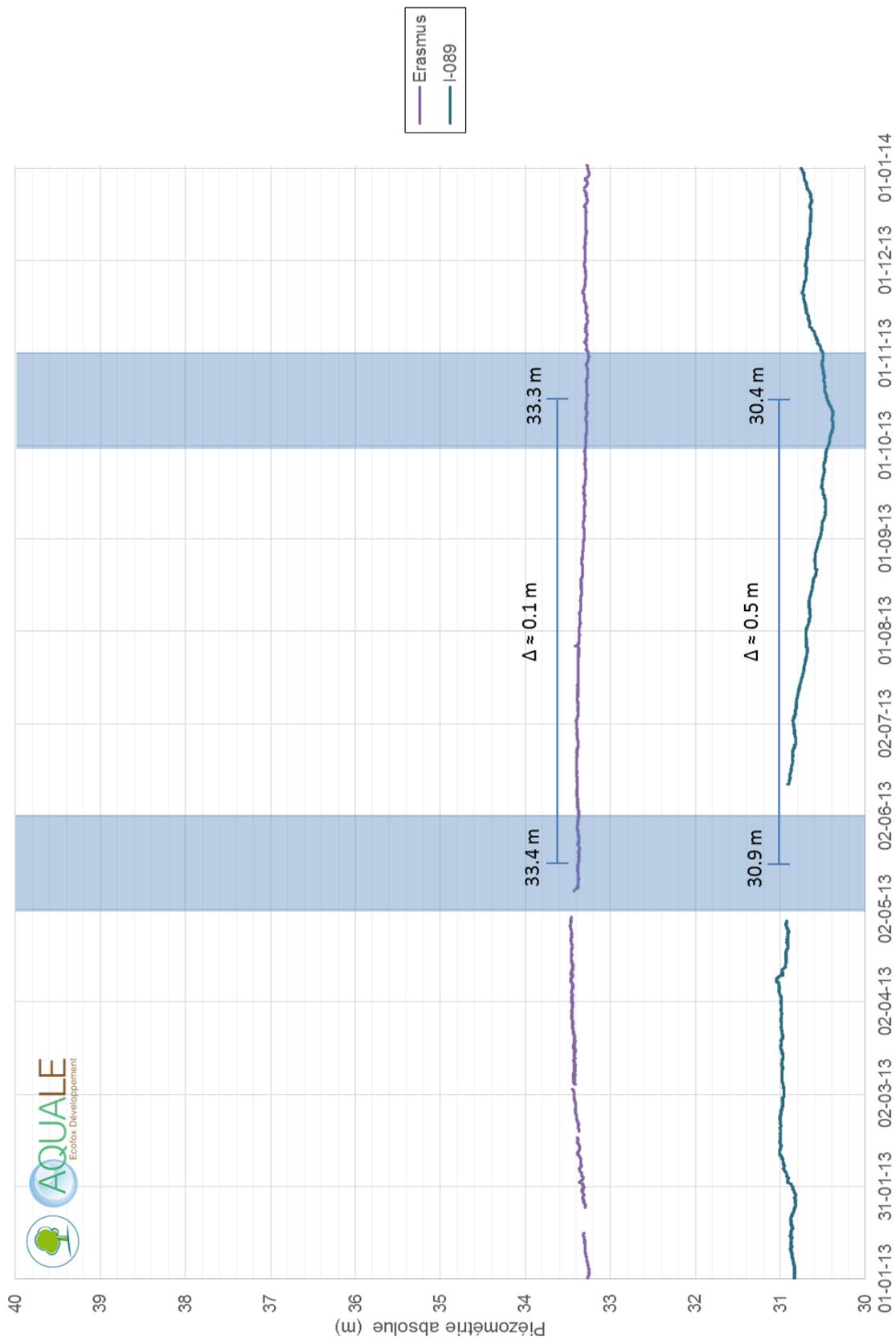


Figure 5-8 : Evolution de la piézométrie de la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale au sein des piézomètres Erasmus et I-089 (plage de piézométrie de 30 à 40 m)

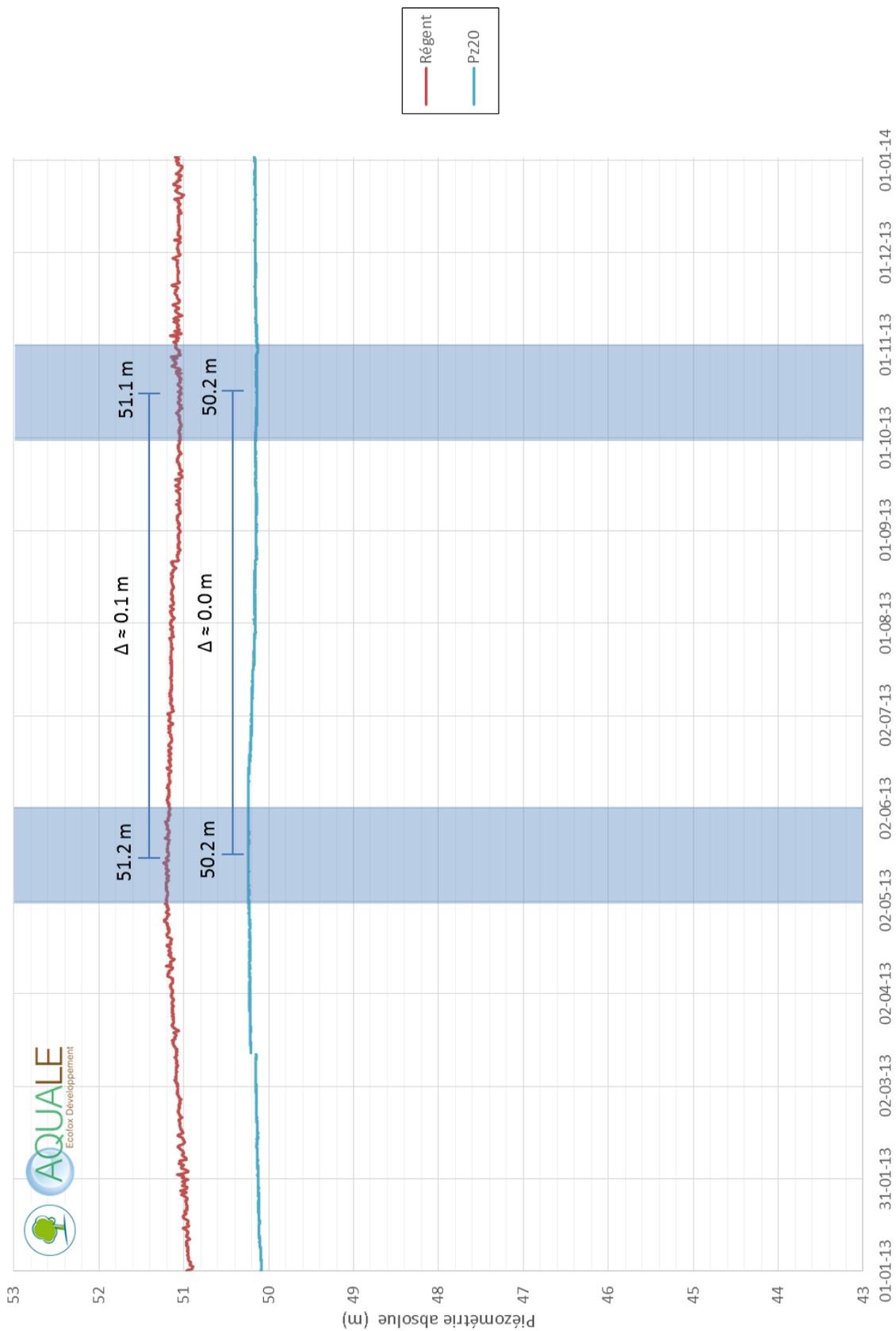


Figure 5-9 : Evolution de la piézométrie de la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale au sein des piézomètres Régent et Pz20 (plage de piézométrie de 43 à 53 m)

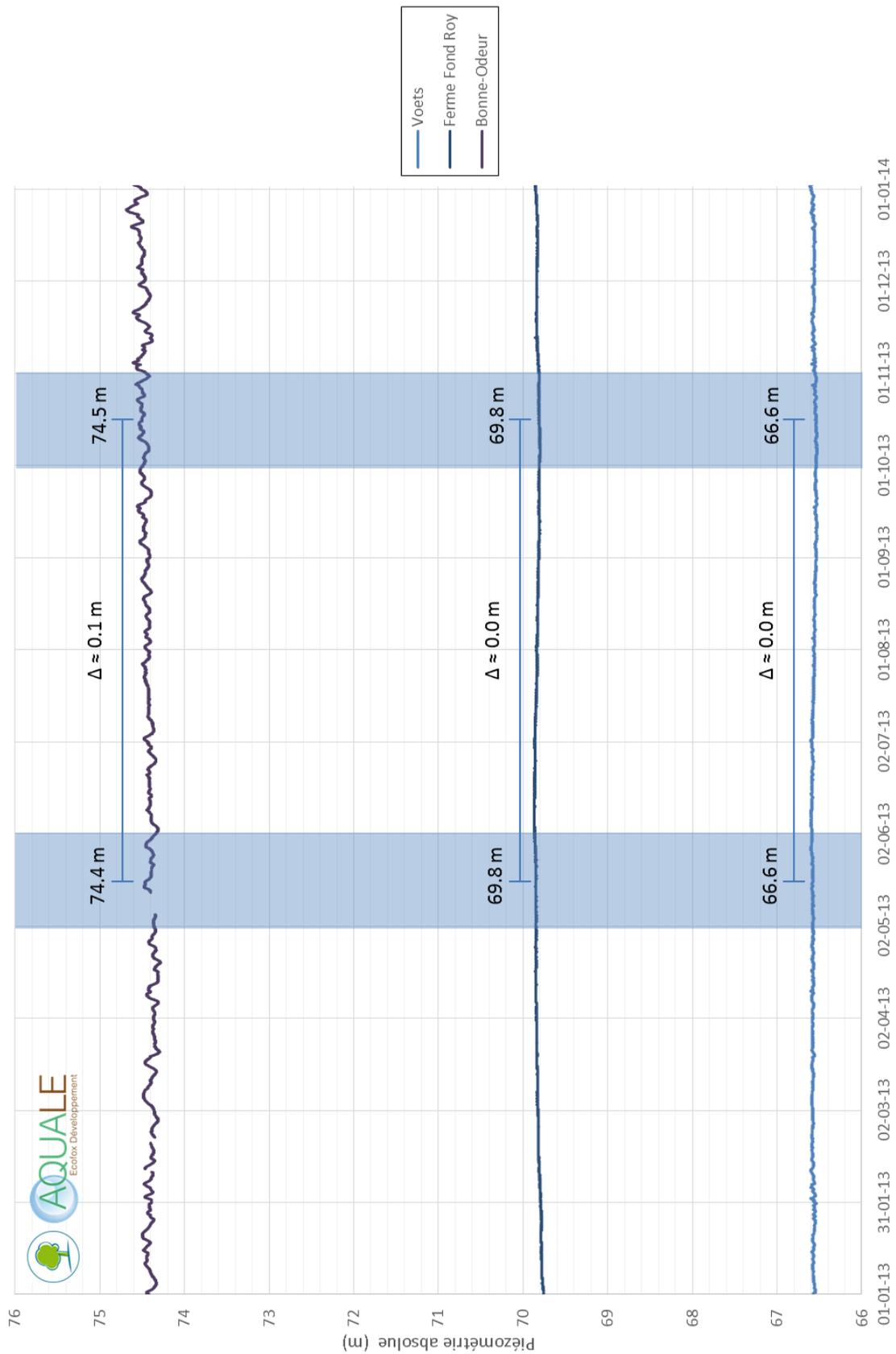


Figure 5-10 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Bruxellien en Région de Bruxelles-Capitale au sein des piézomètres Voets, Ferme Fond Roy et Bonne-Odeur (plage de piézométrie de 66 à 76 m)

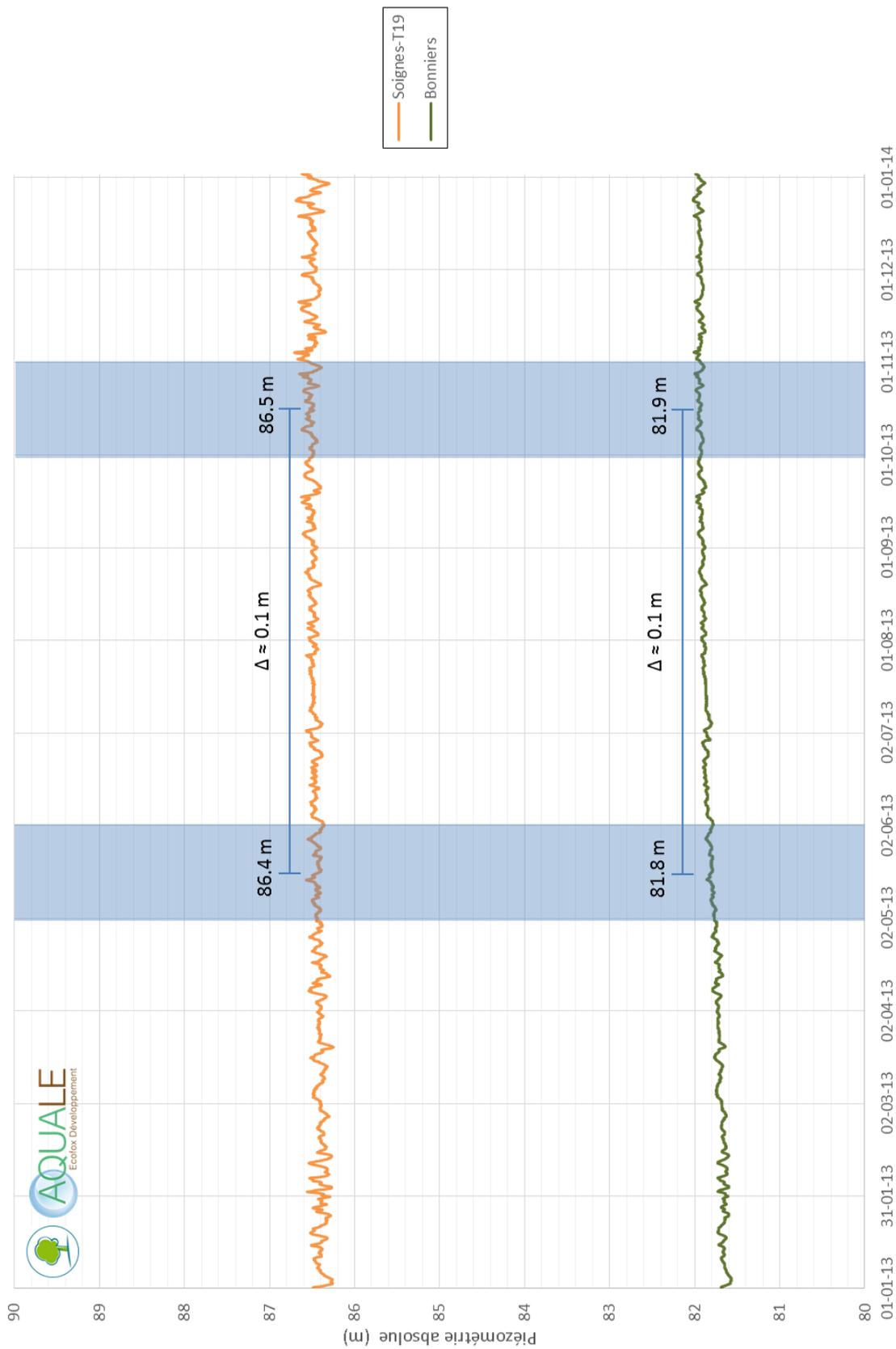


Figure 5-11 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Bruxellien en Région de Bruxelles-Capitale au sein des piézomètres Soignes-T19 et Bonniers (plage de piézométrie de 80 à 90 m)

Ces 4 dernières figures illustrent également la constance de la piézométrie durant l'année 2013. Ainsi, le choix de ces deux périodes comme référence ne peut pas être jugé comme étant un mauvais choix puisqu'il est bien représentatif de la piézométrie générale durant l'année 2013.

5.1.1.2 EN RÉGIME TRANSITOIRE

Pour le régime transitoire, tous les points d'observations définis pour la période mai – juin 2013 en régime permanent sont conservés. Après simulations des cinq années de référence (2009 – 2013), la piézométrie simulée en mois par mois au droit de chaque point d'observation ainsi défini peut être exportée et comparée aux évolutions mesurées dans ces piézomètres (voir **FIGURES 3-13 à 3-22**). Seuls les piézomètres faisant l'objet d'un suivi suffisamment régulier sont pris en considération pour la vérification de la calibration en régime transitoire. Ceux-ci sont listés ci-après :

- 2-0424b ;
- 2-0018 ;
- 2-0419b ;
- 724/71/1 ;
- 724/73/4 ;
- 713/73/7 ;
- 713/63/4 ;
- 711/73/7 ;
- Strasbourg ;
- Puits van Mullem ;
- Erasmus ;
- Hof-Ter-Musschen ;
- Régent ;
- Pz20 ;
- VI-037 ;
- Voets ;
- Ferme Fond-Roy ;
- Bonne-Odeur ;
- Bonniers ;
- Soignes-S1 ;
- Soignes-S2 ;
- Soignes-S4 ;
- Soignes-S7 ;
- Soignes-S8 ;
- Soignes-T19 ;
- Soignes-T25.

5.1.2 OBSERVATION DES DÉBITS

L'objectif est de pouvoir comparer les débits sortant du modèle par l'intermédiaire des sources, galeries, collecteurs, rivières et ruisseaux aux débits réellement drainés.

5.1.2.1 OBSERVATION DU DÉBIT AUX SOURCES

Les mesures ont été réalisées aux dates suivantes :

- 25/10/2012 ;
- 7/02/2013 ;
- 20/11/2013 ;
- 18/04/2014 et 22/04/2014 ;
- 28/08/2014.

Afin de comprendre l'évolution des débits mesurés aux différentes sources et de déterminer le débit de référence pour chacune d'entre elles pour les périodes de calibration, celles-ci sont individuellement passées en revue ci-après.

Source Collège Saint-Pierre

Cette source a été observée mais n'a pas été jaugée.

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 148 044 m ; Y = 166 081 m.

Source Defré

Cette source a été observée et jaugée à plusieurs reprises.

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 148 859 m ; Y = 165 967 m.

Les résultats des différents jaugeages sont les suivants :

- 72 m³/j mesuré le 25/10/2012 ;
- 60 m³/j mesuré le 7/02/2013 ;
- 64 m³/j mesuré le 20/11/2013 ;
- 75 m³/j mesuré le 18/04/2014 ;
- 68 m³/j mesuré le 28/08/2014.

Ces mesures illustrent que le débit varie assez faiblement durant l'année. Il est globalement compris entre 60 et 75 m³/j. La moyenne des mesures est de 68 m³/j. L'écart moyen des mesures par rapport à leur moyenne est de 7 %. Sur la base de ces mesures, il n'apparaît pas que le débit est clairement différent entre le printemps et l'automne. La moyenne des mesures est dès lors utilisée comme référence pour les deux périodes de calibration.

Source des enfants noyés

Cette source a été observée mais n'a pas été jaugée.

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 152 799 m ; Y = 164 455 m.

Source du Sylvain

Cette source a été observée et jaugée à plusieurs reprises. Deux photos de la source sont reprises aux **FIGURES 5-12 et 5-13**.

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 156 264 m ; Y = 166 643 m.

Les résultats des différents jaugeages sont les suivants :

- 384 m³/j mesuré le 25/10/2012 ;
- 293 m³/j mesuré le 7/02/2013 ;
- 319 m³/j mesuré le 20/11/2013 ;
- 337 m³/j mesuré le 18/04/2014 ;
- 236 m³/j mesuré le 28/08/2014.

Ces mesures illustrent que le débit varie assez faiblement durant l'année. Il est globalement compris entre 236 et 384 m³/j. La moyenne des mesures est de 314 m³/j. L'écart moyen des mesures par rapport à leur moyenne est de 13 %. Sur la base de ces mesures, il n'apparaît pas que le débit est clairement différent entre le printemps et l'automne. La moyenne des mesures est dès lors utilisée comme référence pour les deux périodes de calibration.



Figure 5-12 : Source du Sylvain – photo 1 (7 février 2013)



Figure 5-13 : Source du Sylvain – photo 2 (7 février 2013)

Source de l'Empereur

Cette source a été observée et jaugée à plusieurs reprises. Une photo de la source est reprise à la **FIGURE 5-14**.



Figure 5-14 : Source de l'Empereur (25 octobre 2012)

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 156 024 m ; Y = 166 566 m.

Les résultats des différents jaugeages sont les suivants :

- 720 m³/j mesuré le 25/10/2012 ;
- 730 m³/j mesuré le 7/02/2013 ;
- 1 123 m³/j mesuré le 20/11/2013 ;
- 1 319 m³/j mesuré le 18/04/2014 ;
- 809 m³/j mesuré le 28/08/2014.

Ces mesures illustrent que le débit varie durant l'année. Il est globalement compris entre 720 et 1 319 m³/j. La moyenne des mesures est de 940 m³/j. L'écart moyen des mesures par rapport à leur moyenne est de 24 %. Sur la base de ces mesures, il n'apparaît pas que le débit est clairement différent entre le printemps et l'automne (les mesures sont trop peu nombreuses pour pouvoir l'affirmer). La moyenne des mesures est dès lors utilisée comme référence pour les deux périodes de calibration, en gardant à l'esprit que l'écart par rapport à la moyenne est susceptible d'être relativement élevé.

Source Félix Haps

Cette source a été observée et jaugée à plusieurs reprises.

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 151 223 m ; Y = 169 346 m.

Les résultats des différents jaugeages sont les suivants :

- 25 m³/j mesuré le 20/11/2013 ;
- 10 m³/j mesuré le 22/04/2014 ;
- 12 m³/j mesuré le 28/08/2014.

Ces mesures illustrent que le débit varie durant l'année. Il est globalement compris entre 10 et 25 m³/j. La moyenne des mesures est de 16 m³/j. L'écart moyen des mesures par rapport à leur moyenne est de 42 %. Sur la base de ces mesures, il n'apparaît pas que le débit est clairement différent entre le printemps et l'automne (les mesures sont trop peu nombreuses pour pouvoir l'affirmer). La moyenne des mesures est dès lors utilisée comme référence pour les deux périodes de calibration, en gardant à l'esprit que l'écart par rapport à la moyenne est susceptible d'être relativement élevé (dans ce cas-ci, puisqu'il s'agit d'un débit très faible, l'influence sur les résultats de modélisation sera de toute façon négligeable).

Source Fond Roy

Cette source a été observée et jaugée à plusieurs reprises.

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 149 675 m ; Y = 164 229 m.

Les résultats des différents jaugeages sont les suivants :

- 18 m³/j mesuré le 25/10/2012 ;
- 26 m³/j mesuré le 7/02/2013 ;
- 75 m³/j mesuré le 20/11/2013 ;
- 44 m³/j mesuré le 18/04/2014 ;
- 48 m³/j mesuré le 28/08/2014.

Ces mesures illustrent que le débit varie durant l'année. Il est globalement compris entre 18 et 75 m³/j. La moyenne des mesures est de 42 m³/j. L'écart moyen des mesures par rapport à leur moyenne est de 38 %. Sur la base de ces mesures, il n'apparaît pas que le débit est clairement différent entre le printemps et l'automne (les mesures sont trop peu nombreuses pour pouvoir l'affirmer). La moyenne des mesures est dès lors utilisée comme référence pour les deux périodes de calibration, en gardant à l'esprit que l'écart par rapport à la moyenne est susceptible d'être relativement élevé.

Source Fontaine de l'Amour

Cette source a été observée et jaugée à plusieurs reprises.

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 151 453 m ; Y = 172 310 m.

Les résultats des différents jaugeages sont les suivants :

- 8 m³/j mesuré le 25/10/2012 ;
- 9 m³/j mesuré le 7/02/2013 ;
- 83 m³/j mesuré le 20/11/2013 ;
- 56 m³/j mesuré le 22/04/2014 ;
- 32 m³/j mesuré le 28/08/2014.

Ces mesures illustrent que le débit varie durant l'année. La différence entre les deux premières mesures (8 et 9 m³/j) et les trois mesures suivantes (83, 56 et 32 m³/j) est de plus assez élevée. Le débit est globalement compris entre 8 et 83 m³/j. La moyenne des mesures est de 38 m³/j. L'écart moyen des mesures par rapport à leur moyenne est de 68 %. Sur la base de ces mesures, il n'apparaît pas que le débit est clairement différent entre le printemps et l'automne (les mesures sont trop peu nombreuses pour pouvoir l'affirmer). La moyenne des mesures est dès lors utilisée comme référence pour les deux périodes de calibration, en gardant à l'esprit que l'écart par rapport à la moyenne est susceptible d'être relativement élevé.

Source Jardin Jean Massart

Cette source a été observée mais n'a pas été jaugée.

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 154 725 m ; Y = 167 024 m.

Source Keelbeek

Cette source a été observée et jaugée à plusieurs reprises.

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 154 068 m ; Y = 176 318 m.

Les résultats des différents jaugeages sont les suivants :

- 58 m³/j mesuré le 20/11/2013 ;
- 43 m³/j mesuré le 22/04/2014 ;
- 68 m³/j mesuré le 28/08/2014.

Ces mesures illustrent que le débit varie durant l'année. Il est globalement compris entre 43 et 68 m³/j. La moyenne des mesures est de 56 m³/j. L'écart moyen des mesures par rapport à leur moyenne est de 16 %. Sur la base de ces mesures, il n'apparaît pas que le débit est clairement différent entre le printemps et l'automne (les mesures sont trop peu nombreuses pour pouvoir l'affirmer). La moyenne des mesures est dès lors utilisée comme référence pour les deux périodes de calibration.

Source Kinsendael

Cette source a été observée et jaugée à plusieurs reprises.

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 148 111 m ; Y = 163 900 m.

Les résultats des différents jaugeages sont les suivants :

- 74 m³/j mesuré le 25/10/2012 ;
- 67 m³/j mesuré le 7/02/2013 ;
- 62 m³/j mesuré le 20/11/2013 ;
- 60 m³/j mesuré le 18/04/2014 ;
- 59 m³/j mesuré le 28/08/2014.

Ces mesures illustrent que le débit varie peu durant l'année. Il est globalement compris entre 59 et 74 m³/j. La moyenne des mesures est de 65 m³/j. L'écart moyen des mesures par rapport à leur moyenne est de 8 %. Sur la base de ces mesures, il n'apparaît pas que le débit est clairement différent entre le printemps et l'automne (les mesures sont trop peu nombreuses pour pouvoir l'affirmer). La moyenne des mesures est dès lors utilisée comme référence pour les deux périodes de calibration.

Source Parc Ter Coigne

Cette source a été observée mais n'a pas été jaugée.

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 152 399 m ; Y = 166 943 m.

Source Stade Falon

Cette source a été observée et jaugée à plusieurs reprises.

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 155 681 m ; Y = 170 324 m.

Les résultats des différents jaugeages sont les suivants :

- 20 m³/j mesuré le 25/10/2012 ;
- 47 m³/j mesuré le 7/02/2013 ;
- 118 m³/j mesuré le 20/11/2013 ;
- 34 m³/j mesuré le 22/04/2014.

Ces mesures illustrent que le débit varie durant l'année. Il est globalement compris entre 20 et 118 m³/j. La moyenne des mesures est de 55 m³/j. L'écart moyen des mesures par rapport à leur moyenne est de 58 %. Sur la base de ces mesures, il n'apparaît pas que le débit est clairement différent entre le printemps et l'automne (les mesures sont trop peu nombreuses pour pouvoir l'affirmer). La moyenne des mesures est dès lors utilisée

comme référence pour les deux périodes de calibration, en gardant à l'esprit que l'écart par rapport à la moyenne est susceptible d'être relativement élevé.

Source Trois Fontaines

Cette source a été observée et jaugée à plusieurs reprises. Une photo de la source est reprise à la **FIGURE 5-15**.



Figure 5-15 : Source Trois Fontaines (7 février 2013)

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 155 471 m ; Y = 166 204 m.

Les résultats des différents jaugeages sont les suivants :

- 288 m³/j mesuré le 25/10/2012 ;
- 379 m³/j mesuré le 7/02/2013 ;
- 685 m³/j mesuré le 20/11/2013 ;
- 591 m³/j mesuré le 18/04/2014 ;
- 465 m³/j mesuré le 28/08/2014.

Ces mesures illustrent que le débit varie durant l'année. Il est globalement compris entre 288 et 685 m³/j. La moyenne des mesures est de 482 m³/j. L'écart moyen des mesures par rapport à leur moyenne est de 26 %. Sur la base de ces mesures, il n'apparaît pas que le débit est clairement différent entre le printemps et l'automne (les mesures sont trop peu nombreuses pour pouvoir l'affirmer). La moyenne des mesures est dès lors utilisée

comme référence pour les deux périodes de calibration, en gardant à l'esprit que l'écart par rapport à la moyenne est susceptible d'être relativement élevé.

Source Vuylbeek

Cette source a été observée et jaugée à plusieurs reprises.

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 152 951 m ; Y = 164 061 m.

Les résultats des différents jaugeages sont les suivants :

- 59 m³/j mesuré le 25/10/2012 ;
- 51 m³/j mesuré le 7/02/2013 ;
- 73 m³/j mesuré le 20/11/2013 ;
- 46 m³/j mesuré le 18/04/2014 ;
- 61 m³/j mesuré le 28/08/2014.

Ces mesures illustrent que le débit varie peu durant l'année. Il est globalement compris entre 46 et 73 m³/j. La moyenne des mesures est de 58 m³/j. L'écart moyen des mesures par rapport à leur moyenne est de 13 %. Sur la base de ces mesures, il n'apparaît pas que le débit est clairement différent entre le printemps et l'automne (les mesures sont trop peu nombreuses pour pouvoir l'affirmer). La moyenne des mesures est dès lors utilisée comme référence pour les deux périodes de calibration.

Source du Calvaire

Cette source a été observée mais n'a pas été jaugée.

Elle est située aux coordonnées suivantes :

X = 146 836 m ; Y = 167 336 m.

Synthèse

L'objectif sera donc d'atteindre l'ordre de grandeur du débit moyen sortant de ces sources. Le **TABLEAU 5-4** reprend les débits moyens mesurés pour les sources. Certaines d'entre elles n'ont pas été jaugées (indiquées par un point d'interrogation dans le tableau ci-dessous) mais uniquement observées à cause d'une impossibilité technique (faible débit, faible section d'écoulement, difficulté d'accès...). Il sera vérifié que le débit sortant par ces sources est d'un ordre de grandeur comparable à celui des autres sources.

Nom de la source	Débit de référence pour la période de mai – juin 2013 [m ³ /j]	Débit de référence pour la période de novembre 2013 [m ³ /j]	Nature de la donnée utilisée comme référence	Nappe concernée
Source Collège St-Pierre	?	?	/	Bruxellien
Source Defré	68	68	moyenne	
Source des enfants noyés	?	?	/	
Source du Sylvain	314	314	moyenne	
Source de l'Empereur	940	940	moyenne*	
Source Félix Haps	16	16	moyenne	
Source Fond Roy	42	42	moyenne	
Source Fontaine de l'Amour	38	38	moyenne	
Source Jardin Jean Massart	?	?	/	
Source Keelbeek	56	56	moyenne	
Source Kinsendael	65	65	moyenne	
Source Parc Ter Coigne	?	?	/	
Source Stade Falon	55	55	moyenne	
Source Trois Fontaines	482	482	moyenne*	
Source Vuylbeek	58	58	moyenne	
Source du Calvaire	?	?	/	Yprésien

* la moyenne est à utiliser avec précautions car il s'agit d'un débit relativement élevé (> 250 m³/j) et l'écart moyen des mesures par rapport à cette moyenne est supérieur à 20 % de la moyenne

Tableau 5-4 : Débits des sources

Il apparaît donc que la moyenne des mesures est la meilleure référence pour évaluer l'état de calibration en régime permanent comme en régime transitoire. Pour les sources de l'Empereur et Trois Fontaines, un écart plus grand par rapport à la moyenne est autorisé étant donné la variabilité des mesures utilisées pour calculer la moyenne.

Notons enfin que les débits caractérisant ces sources sont négligeables en comparaison avec les débits drainés par les ruisseaux et les collecteurs. Leur reproduction est donc jugée non prioritaire dès lors qu'une imprécision existe sur les débits drainés par les ruisseaux et collecteurs, et que cette imprécision est équivalente voire supérieure aux débits mesurés pour les sources. En régime transitoire, seules les sources à débit élevé (les sources du Sylvain, de l'Empereur, Trois Fontaines et Vuylbeek) seront prises en considération dans la vérification.

5.1.2.2 OBSERVATION DU DÉBIT DE LA GALERIE

La totalité du débit passant à travers la galerie, appelé *débit exhauré*, est subdivisé en deux rejets :

- le *débit distribué* mesuré tous les jours depuis l'année 2000 ;
- le *débit rejeté en décharge* mesuré mensuellement depuis l'année 2008.

Le débit exhauré est donc connu mensuellement pour les années 2009 à 2013. Le **TABLEAU 5-5** reprend l'évolution du débit exhauré par la galerie Vivaqua durant les années 2009 à 2013.

Mois	Période du relevé	Relevé de compteur [m ³]	Débit journalier moyen [m ³ /j]
Janvier 2009	01/01/2009 au 01/02/2009	166516	5204
Février 2009	02/02/2009 au 01/03/2009	143218	5115
Mars 2009	02/03/2009 au 29/03/2009	143282	5117
Avril 2009	30/03/2009 au 03/05/2009	180269	5151
Mai 2009	04/05/2009 au 07/06/2009	179661	5133
Juin 2009	08/06/2009 au 05/07/2009	143140	5112
Juillet 2009	06/07/2009 au 02/08/2009	143423	5122
Août 2009	03/08/2009 au 30/08/2009	143766	5135
Septembre 2009	31/08/2009 au 27/09/2009	141637	5058
Octobre 2009	28/09/2009 au 25/10/2009	140362	5013
Novembre 2009	26/10/2009 au 29/11/2009	174859	4996
Décembre 2009	30/11/2009 au 31/12/2009	158688	4959
Janvier 2010	01/01/2010 au 31/01/2010	162253	5234
Février 2010	01/02/2010 au 28/02/2010	145871	5210
Mars 2010	01/03/2010 au 28/03/2010	151567	5413
Avril 2010	29/03/2010 au 02/05/2010	191428	5469
Mai 2010	03/05/2010 au 30/05/2010	152841	5459
Juin 2010	31/05/2010 au 04/07/2010	189294	5408
Juillet 2010	05/07/2010 au 01/08/2010	150690	5382
Août 2010	02/08/2010 au 29/08/2010	151626	5415
Septembre 2010	30/08/2010 au 26/09/2010	150847	5387
Octobre 2010	27/09/2010 au 24/10/2010	150902	5389
Novembre 2010	25/10/2010 au 28/11/2010	188433	5384
Décembre 2010	29/11/2010 au 31/12/2010	176586	5351
Janvier 2011	01/01/2011 au 30/01/2011	162254	5408
Février 2011	31/01/2011 au 27/02/2011	150244	5366
Mars 2011	28/02/2011 au 03/04/2011	188025	5372
Avril 2011	04/04/2011 au 01/05/2011	151466	5410
Mai 2011	02/05/2011 au 29/05/2011	150550	5377
Juin 2011	30/05/2011 au 03/07/2011	186950	5341
Juillet 2011	04/07/2011 au 31/07/2011	150046	5359
Août 2011	01/08/2011 au 28/08/2011	145483	5196
Septembre 2011	29/08/2011 au 25/09/2011	150950	5391
Octobre 2011	26/09/2011 au 23/10/2011	147618	5272
Novembre 2011	24/10/2011 au 27/11/2011	187000	5343
Décembre 2011	28/11/2011 au 31/12/2011	180350	5304
Janvier 2012	01/01/2012 au 29/01/2012	151347	5219

Mois	Période du relevé	Relevé de compteur [m ³]	Débit journalier moyen [m ³ /j]
Février 2012	30/01/2012 au 04/03/2012	187421	5355
Mars 2012	05/03/2012 au 01/04/2012	150139	5362
Avril 2012	02/04/2012 au 06/05/2012	188359	5382
Mai 2012	07/05/2012 au 03/06/2012	150961	5391
Juin 2012	04/06/2012 au 01/07/2012	141762	5063
Juillet 2012	02/07/2012 au 29/07/2012	158436	5658
Août 2012	30/07/2012 au 02/09/2012	188428	5384
Septembre 2012	03/09/2012 au 30/09/2012	150871	5388
Octobre 2012	01/10/2012 au 04/11/2012	174017	4972
Novembre 2012	05/11/2012 au 02/12/2012	148493	5303
Décembre 2012	03/12/2012 au 31/12/2012	150804	5200
Janvier 2013	01/01/2013 au 03/02/2013	181066	5325
Février 2013	04/02/2013 au 03/03/2013	151512	5411
Mars 2013	04/03/2013 au 07/04/2013	188771	5393
Avril 2013	08/04/2013 au 05/05/2013	152077	5431
Mai 2013	06/05/2013 au 02/06/2013	154166	5506
Juin 2013	03/06/2013 au 30/06/2013	155728	5562
Juillet 2013	01/07/2013 au 04/08/2013	192987	5514
Août 2013	05/08/2013 au 01/09/2013	155525	5554
Septembre 2013	02/09/2013 au 29/09/2013	154000	5500
Octobre 2013	30/09/2013 au 03/11/2013	193651	5533
Novembre 2013	04/11/2013 au 01/12/2013	153777	5492
Décembre 2013	02/12/2013 au 31/12/2013	169218	5641

Tableau 5-5 : Evolution du débit exhauré par la galerie Vivaqua entre 2009 et 2013

L'évolution du débit est également représentée graphiquement à la **FIGURE 5-16** ci-dessous.

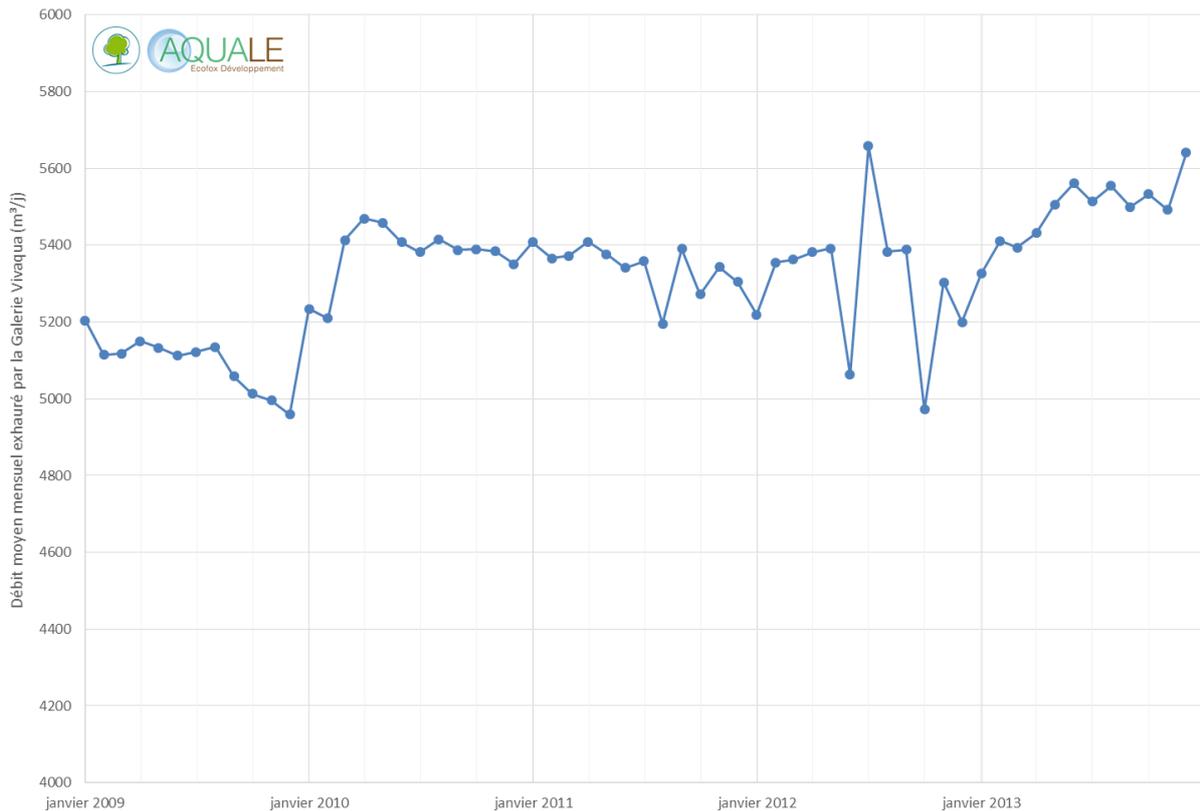


Figure 5-16 : Evolution du débit moyen mensuel exhauré par la galerie Vivaqua entre 2009 et 2013 (m³/j)

Le débit moyen journalier est très constant. Pour la période de mai – juin 2013, le débit journalier moyen est de 5 534 m³/j. Pour la période de novembre 2013, le débit journalier moyen est de 5 492 m³/j.

L’objectif en régime permanent sera donc de se rapprocher de ces valeurs.

En régime transitoire, l’objectif sera de reproduire un débit assez constant, proche des valeurs mesurées.

5.1.2.3 OBSERVATION DU DÉBIT DES RIVIÈRES ET RUISSEAUX

Afin de pouvoir évaluer la bonne qualité du modèle, il est également essentiel de vérifier que les débits drainés par les ruisseaux sont compatibles avec les observations dans la réalité.

Pour déterminer le débit de drainage des rivières, il est nécessaire de réaliser des bilans sur ces différentes rivières. Pour cela, les données de l’ensemble des stations de jaugeage des rivières concernées ont été étudiées.

La **FIGURE 5-17** ci-dessous reprend les stations de jaugeage prises en considération pour les bilans. Chaque station est représentée par un carré orange. L’indication à côté de chaque carré reprend :

- le nom de la rivière concernée, en lettres majuscules ;
- le lieu de la prise de mesure ;
- la source de la mesure (Aqualim, Aquale, Flowbru ou Waterinfo).

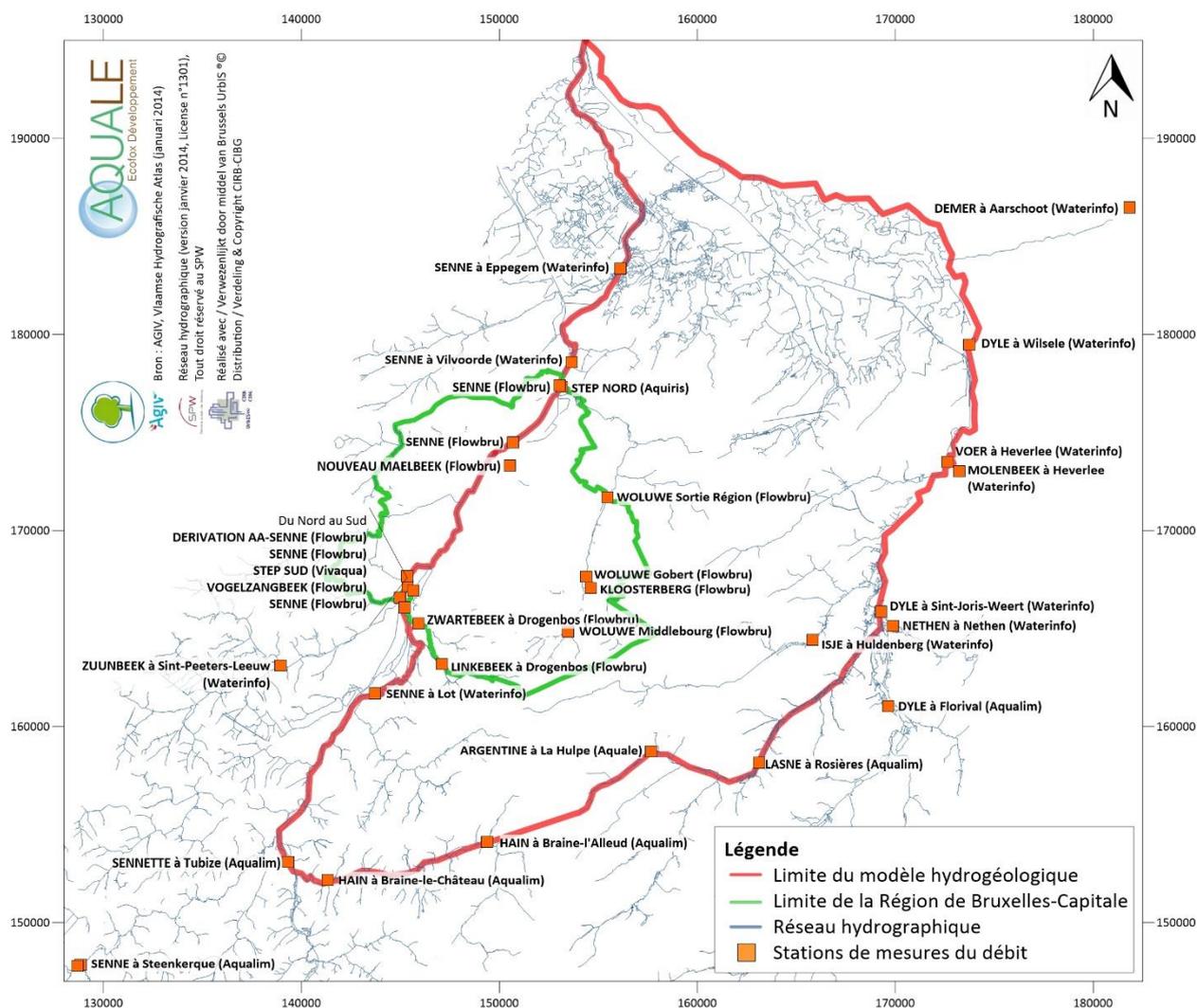


Figure 5-17 : Stations de jaugeage prises en considération pour la réalisation des bilans hydrographiques

Ce chapitre est subdivisé en 3 parties :

- d'abord, un bref descriptif du contexte géologique des vallées de la Région de Bruxelles-Capitale est présenté ;
- ensuite, les bilans sont réalisés pour l'année 2013 (année de référence pour la calibration en régime permanent) ;
- enfin, l'évolution des débits dans les rivières est étudiée pour la période 2009 – 2013 qui fait l'objet de la calibration en régime transitoire.

Les dépôts Quaternaires présents en Région de Bruxelles-Capitale sont principalement caractérisés par :

- des argiles alluviales : argiles fines incluant des passes sableuses et tourbeuses ;
- des limons alluviaux : sous les argiles alluviales, d'origine probablement éolienne et remaniés par les eaux courantes ;
- des sables et graviers alluviaux : sables très grossiers et graviers avec des lentilles de matériaux fins incluant rarement de la tourbe ;
- des limons de plateaux et versants : loess, limon sableux d'origine éolienne.

Les argiles alluviales sont présentes en couche superficielle dans la vallée de la Senne, sur une largeur de 1 500 m et sur des épaisseurs pouvant atteindre 10 m. Elles sont également présentes dans la vallée du Molenbeek sur une épaisseur de 6 m.

Les limons alluviaux sont présents aléatoirement sous les argiles alluviales de la Senne et dans la vallée du Maelbeek jusqu'à 18 m d'épaisseur.

Les sables et graviers alluviaux sont présents en bandes continues sous les argiles et limons alluviaux en vallée de la Senne et peuvent atteindre des épaisseurs de 10 m. Dans la vallée du Maelbeek, leur épaisseur peut atteindre 8 m.

Enfin, les limons de plateaux et versants recouvrent et adoucissent tout le relief tertiaire avec une épaisseur plus importante sur le versant occidental (jusqu'à 16 m).

La **FIGURE 5-18** ci-dessous illustre le contexte décrit ci-dessus en vallée de la Senne.

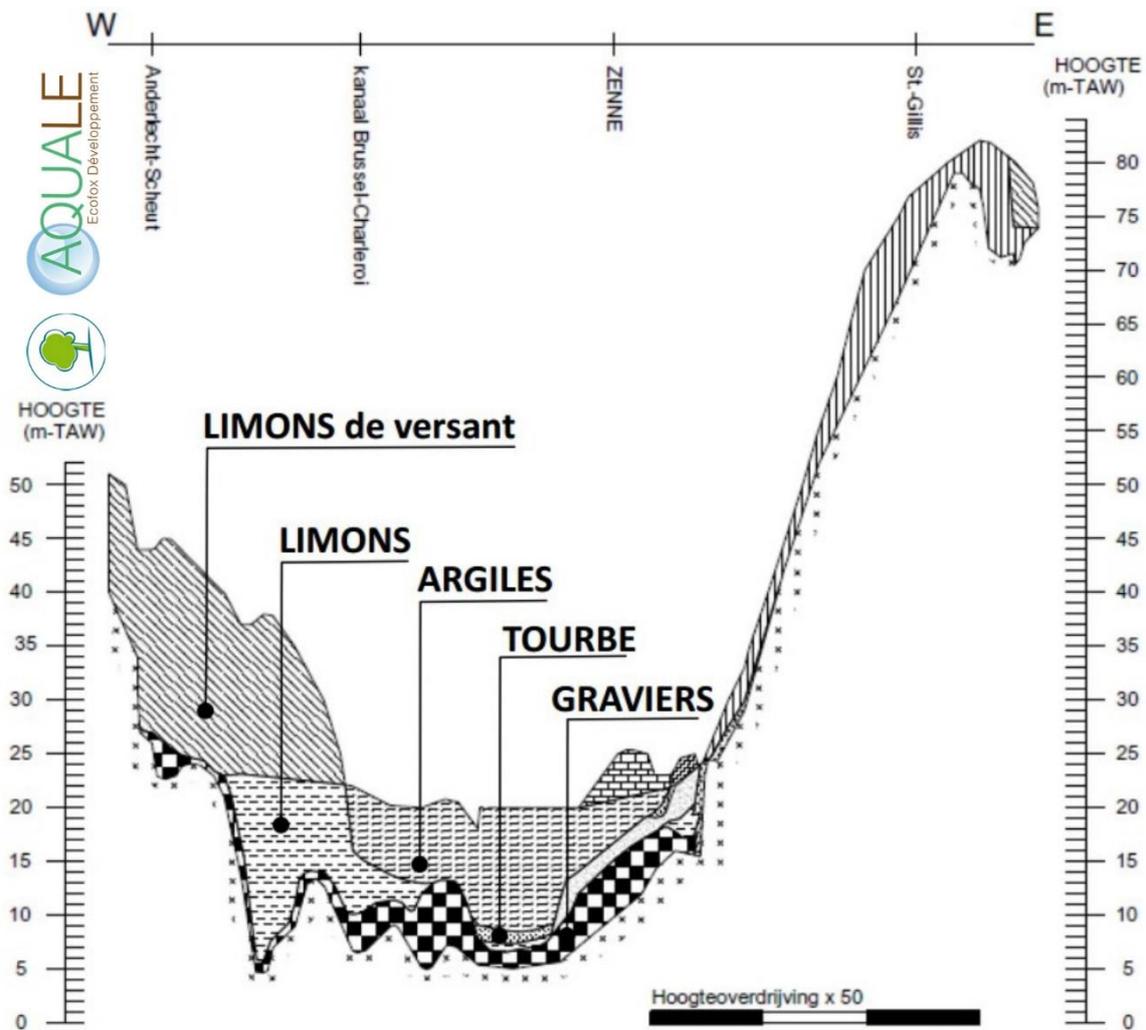


Figure 5-18 : Coupe géologique des dépôts du Quaternaire en vallée de la Senne (ULB, 2013)

Compte tenu de la nature de ces alluvions, il est à ce stade considéré que le drainage des eaux souterraines par le réseau hydrographique en Région de Bruxelles-Capitale doit être assez limité. En effet, la conductivité hydraulique des couches décrites ci-avant, et en particulier des argiles alluviales, doit être faible. Elle n'autorise dès lors que des débits de drainage relativement faibles.

5.1.2.3.2 EN RÉGIME PERMANENT

5.1.2.3.2.1 Bilan sur la Senne

En particulier pour la Senne qui reçoit, en Région de Bruxelles-Capitale, les eaux en provenance des stations d'épuration, collecteurs et affluents, la **FIGURE 5-19** ci-dessous reprend schématiquement les apports et retraits d'eau vers et depuis la Senne.

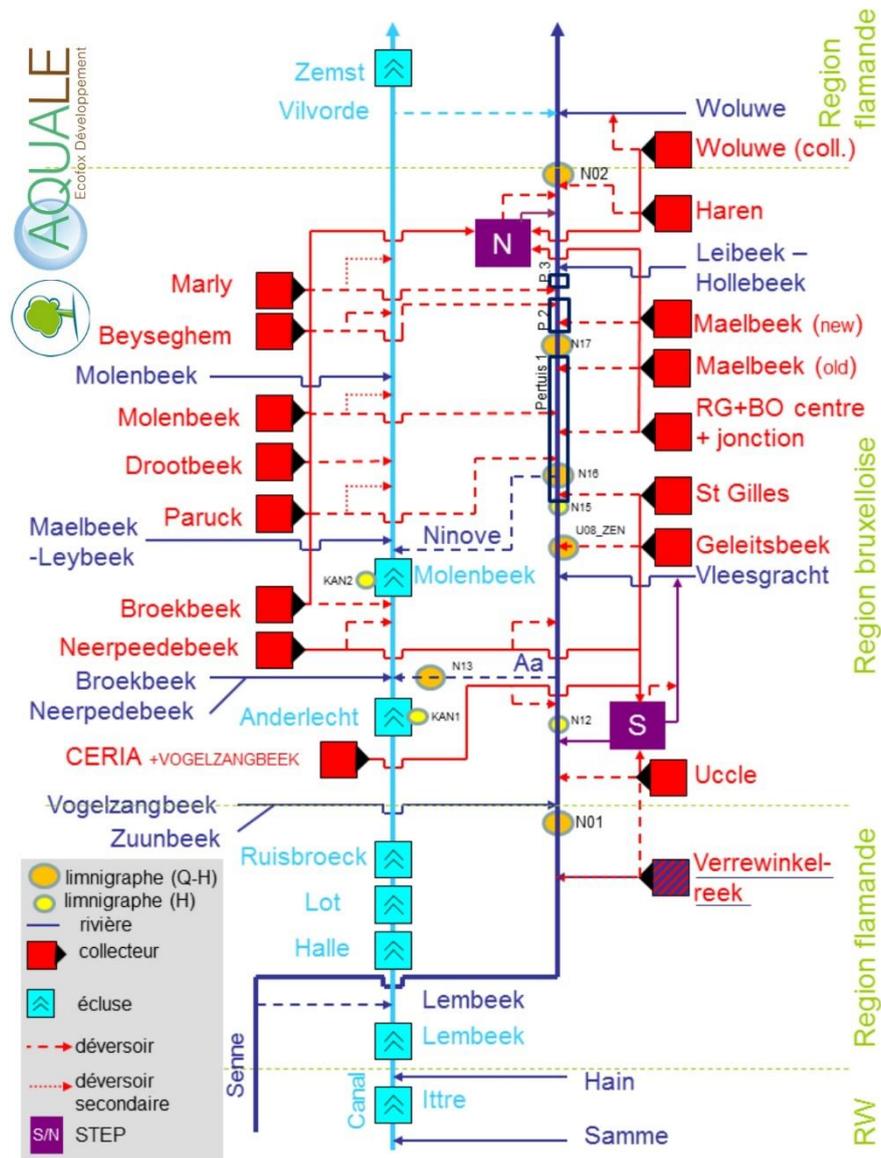


Figure 5-19 : Représentation schématique des apports et retraits d'eau pour la Senne en Région de Bruxelles-Capitale et aux alentours²⁰

Sur la base de ce schéma, un bilan entre les différents points de mesures du débit de la Senne a été réalisé sur l'année 2013. Le **TABLEAU 5-6** reprend l'ensemble des mesures de débit pour la Senne, ses apports et ses retraits. Lorsqu'il n'y a pas de mesures disponibles, la case est barrée. Les stations de mesure dans la Senne sont notées en gras. La valeur des apports est notée en vert et la valeur des retraits est notée en rouge.

²⁰ Source : Bruxelles Environnement

Stations	Débits moyens en 2013 [m ³ /j]			Source de la donnée
	Senne	Apports	Retraits	
Station Lot/Senne	287 963			Waterinfo
Senne IN N01	363 736			Flowbru
Vogelzangbeek Entrée Région		5 297		Flowbru
Zuunbeek		45 880		Waterinfo
Collecteur Uccle (déversoir secondaire)		//////////		
STEP SUD - Traitement bio		55 363		IBGE
STEP SUD - Traitement temps pluie		3 157		IBGE
N12 – Senne Viangros	//////////			
Collecteur CERIA + Vogelzangbeek (déversoir secondaire)		//////////		
Dérivation Senne vers Canal pertuis droit			31 453	Flowbru
Dérivation Senne vers Canal pertuis gauche			39 914	Flowbru
Collecteur Neerpeedebeek (déversoir secondaire)		//////////		
Vleesgracht		//////////		
U08_ZEN – Forest Paepsem	422 729			Flowbru
Collecteur Geleitsbeek (déversoir secondaire)		470		Flowbru
N15 - Senne Vétérinaire	//////////			
Collecteur Saint-Gilles (déversoir secondaire)		//////////		
Dérivation Ninove			//////////	
N16	//////////			
Collecteur Paruck (déversoir secondaire)		6 998		Flowbru
Collecteur RG+BO centre + jonction (déversoir secondaire)		//////////		
Collecteur Molenbeek (déversoir secondaire)		//////////		
Collecteur Maelbeek (old) (déversoir secondaire)		//////////		
N17 - Senne ELIA	530 823			Flowbru
Déversoir U24 Nouveau Maelbeek		10 271		Flowbru
Collecteur Beyseghem (déversoir secondaire)		//////////		
Collecteur Marly (déversoir secondaire)		717		Flowbru
Leibeek - Hollebeek		//////////		
STEP NORD - Traitement bio		274 976		IBGE
STEP NORD - Traitement temps pluie		16 071		IBGE
STEP NORD - by pass		0		IBGE
STEP NORD - Déversement Senne		967		IBGE
Collecteur Haren (déversoir secondaire)		//////////		
Senne OUT N02	691 690			Flowbru
Woluwe		14 429		Flowbru
Station Vilvoorde Senne	649 401			Waterinfo
Station Epegem Senne	786 046			Waterinfo

Tableau 5-6 : Mesures de débit dans la Senne, dans ses apports et ses retraits pour l'année 2013

Il apparaît directement qu'une source importante d'erreur est l'absence de mesure en de nombreux points. De plus, les débits sont au mieux mesurés avec 10 % d'erreur. Les problèmes liés à la sédimentation et aux effets d'engorgement à l'aval des sites de mesure (« effet d'aval ») dégradent encore plus la précision de la mesure de débit.

Si l'on considère à présent les différents tronçons séparant deux stations de mesure en Senne consécutives, il apparaît que l'évaluation de l'apport des nappes est très complexe voire inenvisageable.

En effet, entre les stations Lot et Senne IN N01, le débit augmente de 75 800 m³/j en l'absence d'un apport d'eau de surface. Il y aurait donc potentiellement 75 800 m³/j en provenance des nappes.

Pour le second tronçon, entre les stations Senne IN N01 et U08_ZEN (Forest Paepsem), le débit de la Senne augmente d'environ 59 000 m³/j alors que la balance des apports et des retraits est de 38 000 m³/j (en direction de la Senne). Il y aurait donc potentiellement 21 000 m³/j en provenance des nappes et autres apports non mesurés.

En continuant à progresser vers le Nord, le débit de la Senne augmente de 108 000 m³/j environ entre les stations U08_Zen (Forest Paepsem) et N17 (Senne ELIA) alors que la balance des apports et retraits est d'environ 7 000 m³/j. Compte tenu de la grande quantité d'apports dont le débit n'est pas connu, il n'est pas possible d'estimer l'éventuel part de l'augmentation du débit de la Senne liée à l'apport des nappes.

Le tronçon suivant entre les stations N17 (Senne ELIA) et Senne OUT N02 est caractérisé par une augmentation de débit d'environ 161 000 m³/j alors que la balance des apports et retraits est d'environ 303 000 m³/j. A l'inverse des trois premiers tronçons, une trop grande quantité d'eau serait reversée dans la Senne par rapport à l'impact mesuré sur son débit, d'autant plus que d'autres apports sont répertoriés et que leur débit n'est pas pris en considération.

Au Nord de la Région de Bruxelles-Capitale, entre les stations Senne OUT N02 et Vilvoorde Senne, il y aurait une diminution du débit de la Senne d'environ 42 000 m³/j alors que la balance des apports et retraits est positive et évaluée à 14 000 m³/j.

Pour le dernier tronçon, entre les stations de Vilvoorde et d'Eppegem, une nouvelle augmentation de débit est mesurée à hauteur de 136 000 m³/j environ. Cette augmentation ne serait *a priori* pas liée à des apports d'eau de surface et il y aurait donc à nouveau un potentiel de drainage des nappes.

Si le bilan est réalisé sur l'ensemble du tronçon de la Senne en Région de Bruxelles-Capitale, il apparaît que la Senne voit son débit augmenter d'environ 328 000 m³/j alors que la balance des apports et retraits est évaluée à 348 000 m³/j. Sur ce tronçon, une trop grande quantité d'eau serait reversée dans la Senne par rapport à l'impact mesuré sur son débit, d'autant plus que d'autres apports sont répertoriés et que leur débit n'est pas pris en considération.

En conclusion, sur la base de ces données, il semble impossible d'évaluer avec précision le débit de drainage des nappes par la Senne. Il semblerait en effet que les erreurs sur les bilans (liées à la prise des mesures et à l'absence de mesure pour certains apports / retraits) couvrent le signal recherché.

Sur la base des informations apportées par l'IBGE, il convient de prendre en considération qu'un certain nombre d'apports tel que le ruissellement de surface particulièrement favorisé en zone urbaine ne sont effectifs qu'en temps de pluie (au moment de la pluie ou dans les 2 à 3 heures qui suivent), à savoir les déversoirs et les traitements temps de pluie des stations d'épuration par exemple. Si l'on réalise le bilan en ne considérant que les jours sans pluie, il est ainsi possible de s'affranchir de l'erreur de mesure (ou de non mesure) liée à ces aspects. A cette fin, le même bilan a été réalisé sur le mois d'avril 2007 durant lequel il n'avait pas plu (d'après les enregistrements de la station météorologique d'Uccle). Le **TABLEAU 5-7** reprend le bilan pour le mois d'avril 2007.

Stations	Débits moyens en avril 2007 [m ³ /j]			Source de la donnée
	Senne	Apports	Retraits	
Station Lot/Senne	168 886			Waterinfo
Senne IN N01	193 545			Flowbru
Vogelzangbeek Entrée Région		//////////		
Zuunbeek		10 446		Waterinfo
Collecteur Uccle (déversoir secondaire)		//////////		
STEP SUD - Traitement bio		//////////		
STEP SUD - Traitement temps pluie		0		IBGE
N12 – Senne Viangros	//////////			
Collecteur CERIA + Vogelzangbeek (déversoir secondaire)		//////////		
Dérivation Senne vers Canal pertuis droit			//////////	
Dérivation Senne vers Canal pertuis gauche			//////////	
Collecteur Neerpeedebeek (déversoir secondaire)		//////////		
Vleesgracht		//////////		
U08_ZEN – Forest Paepsem	223 776			Flowbru
Collecteur Geleitsbeek (déversoir secondaire)		10 325		Flowbru
N15 - Senne Vétérinaire	//////////			
Collecteur Saint-Gilles (déversoir secondaire)		//////////		
Dérivation Ninove			//////////	
N16	//////////			
Collecteur Paruck (déversoir secondaire)		24 909		Flowbru
Collecteur RG+BO centre + jonction (déversoir secondaire)		//////////		
Collecteur Molenbeek (déversoir secondaire)		//////////		
Collecteur Maelbeek (old) (déversoir secondaire)		//////////		
N17 - Senne ELIA	300 672			Flowbru
Déversoir U24 Nouveau Maelbeek		40 262		Flowbru
Collecteur Beyseghem (déversoir secondaire)		//////////		
Collecteur Marly (déversoir secondaire)		//////////		
Leibeek - Hollebeek		//////////		
STEP NORD - Traitement bio		198 347		IBGE
STEP NORD - Traitement temps pluie		23 980		IBGE
STEP NORD - by pass		//////////		
STEP NORD - Déversement Senne		//////////		
Collecteur Haren (déversoir secondaire)		//////////		
Senne OUT N02	525 597			Flowbru
Woluwe		//////////		
Station Vilvoorde Senne	449 971			Waterinfo
Station Eppegem Senne	476 893			Waterinfo

Tableau 5-7 : Mesures de débit dans la Senne, dans ses apports et ses retraits pour le mois d'avril 2007

Les observations sont les mêmes globalement. La prise en considération de ce mois non pluvieux ne permet pas d'obtenir plus de précision dans l'estimation de l'apport des nappes. En particulier, une inconnue supplémentaire existe du fait que plusieurs stations de mesure n'étaient pas encore en fonctionnement en avril 2007.

Si le débit de drainage ne peut être évalué avec précision, il apparaît sur la base de cette analyse qu'il doit être relativement faible par rapport aux autres apports sans quoi une imprécision sur les mesures des apports n'induirait pas la couverture du signal. Ceci est par ailleurs cohérent avec l'analyse qualitative des alluvions des vallées de la Région de Bruxelles-Capitale (présentée au **CHAPITRE 5.1.2.3.1**).

En première approche, il est à ce stade considéré que l'augmentation du débit de la Senne liée au drainage des nappes situées de son côté Est est inférieure ou égale à 5 % de l'augmentation totale du débit de la Senne. Cela revient à considérer que sur le tronçon situé en Région de Bruxelles-Capitale, le drainage des nappes ne devrait pas dépasser 5 % de 328 000 m³/j, soit 16 400 m³/j en moyenne pour l'année 2013. Sur l'ensemble du tronçon considéré pour la limite Ouest du modèle, le débit de drainage ne devrait pas dépasser 58 810 m³/j en moyenne sur l'année 2013 (calculé au prorata de la longueur considérée).

Si l'on distingue les deux périodes de calibration, l'augmentation de débit entre l'entrée et la sortie de la Région de Bruxelles-Capitale est de 392 878 m³/j durant les mois de mai et juin 2013 et de 432 080 m³/j durant le mois de novembre 2013. Ainsi, si l'on estime que le débit de drainage ne doit pas dépasser 5 % de cette augmentation, cela revient à considérer que le débit de drainage maximum par la Senne au sein de la Région de Bruxelles-Capitale est de 19 600 m³/j en mai – juin 2013 et de 21 600 m³/j en novembre 2013. Sur l'ensemble du tronçon considéré pour la limite Ouest du modèle, le débit de drainage ne devrait pas dépasser 70 400 m³/j en mai – juin 2013 et 77 500 en novembre 2013 (calculé au prorata de la longueur considérée). On voit sur la base de ce premier exemple qu'il n'y a pas lieu de distinguer les deux périodes de calibration pour déterminer la valeur maximale de débit de drainage admissible (la différence entre les deux valeurs admissibles est faible en comparaison avec l'incertitude que l'on a sur ces valeurs).

5.1.2.3.2.2 Bilan sur la frontière Est – Argentine, Lasne, Dyle

Les stations de mesures suivantes sont localisées sur la frontière Est, de l'amont à l'aval :

- sur l'Argentine, à La Hulpe ;
- sur la Lasne, à Rosières ;
- sur la Dyle à Sint-Joris-Weert ;
- sur la Dyle à Wilsele.

A nouveau, le bilan réalisé est difficile à interpréter. Le **TABLEAU 5-8** reprend, comme précédemment pour la Senne, les mesures de débit concernant la frontière Est et ses affluents. Seuls les affluents principaux sont repris dans **TABLEAU 5-8**.

Stations	Débits moyens en 2013 [m ³ /j]			Source de la donnée
	Frontière Est	Apports	Retraits	
Swift - Argentine	21 600			Aquale
Fontaine des Ducs		//////////		
La Maserine		//////////		
La Lasne		//////////		
Ruisseau du château		//////////		

Stations	Débits moyens en 2013 [m ³ /j]			Source de la donnée
	Frontière Est	Apports	Retraits	
Ruisseau du Fletry		//////////		
Rosières - Lasne	86 358			Aqualim
Ruisseau de Champles		//////////		
Ruisseau du Pré Maillard		//////////		
Ruisseau des Sept Bonniers de Bilande		//////////		
Vossebeek		//////////		
Loop		//////////		
Florival - Dyle		332 107		Aqualim
Nethen - Nethen		22 884		Aqualim
Sint-Joris-W - Dyle	412 367			Waterinfo
Vaalbeek		//////////		
Leigracht		//////////		
Huldenberg - Isje		40 046		Waterinfo
Heverlee - Voer		22 782		Waterinfo
Heverlee - Molenbeek		19 001		Waterinfo
Canal Louvain - Dyle			//////////	
Wilsele - Dyle	426 148			Waterinfo
Vunt		//////////		
Demer		1 141 500		Waterinfo

Tableau 5-8 : Mesures de débit le long de la frontière Est, dans ses apports et ses retraits

Entre les deux premières stations, situées sur l'Argentine à La Hulpe et sur la Lasne à Rosières, une augmentation de débit de 65 000 m³/j environ est mesurée. Il n'est pas aisé de déterminer la part d'augmentation liée au drainage des nappes car les nombreux affluents situés entre les deux stations ne sont pas jaugés. En particulier, l'augmentation de débit est certainement liée à l'apport de la Lasne elle-même, dont le débit à l'embouchure avec l'Argentine doit être supérieur à 20 000 m³/j.

Sur le second tronçon, entre les stations de Rosières sur la Lasne et de Sint-Joris-Weert sur la Dyle, le débit augmente d'environ 326 000 m³/j. Cependant, l'apport des deux principaux affluents à la frontière (la Dyle et la Nethen) est évalué à 355 000 m³/j. Il y aurait donc un apport d'eau trop important par rapport à l'impact mesuré sur le débit le long de la frontière Est, et ce d'autant plus que les débits des deux affluents pris en considération sous-estiment probablement l'apport réel à l'embouchure car les stations sont placées en amont des embouchures et que, par ailleurs, d'autres affluents ne sont pas répertoriés et que leur débit n'est pas pris en considération.

L'observation est la même pour le troisième tronçon le long duquel le débit augmenterait d'environ 14 000 m³/j alors que les apports sous-estimés des affluents seraient de 82 000 m³/j.

La conclusion est la même que pour la Senne. Sur la base de ces données, il semble impossible d'évaluer avec précision le débit de drainage des nappes par les rivières qui composent la frontière Est. Il semblerait en effet que les erreurs sur les bilans (liées à la prise des mesures et à l'absence de mesure pour certains apports / retraits) couvrent le signal recherché.

Ainsi, pour la Dyle, si le débit de drainage ne peut être évalué avec précision, il apparaît sur la base de cette analyse qu'il doit être relativement faible par rapport aux autres apports sans quoi une imprécision sur les mesures des apports n'induirait pas la couverture du signal. En première approche et compte tenu de

l'imprécision des données disponibles, il est difficile d'évaluer l'ordre de grandeur du débit de drainage des nappes par la Dyle. Cependant, compte tenu du contexte hydrogéologique caractérisé par un écoulement dirigé majoritairement vers le Nord, il est supposé que le débit de drainage par la Dyle doit être inférieur à celui de la Senne.

Pour la Lasne et l'Argentine, il est supposé que l'apport par drainage des nappes représente une part plus importante de l'augmentation des débits car les affluents et les rejets directs y sont moins nombreux.

Ainsi, pour l'Argentine, étant donné que :

- le débit mesuré à la station de La Hulpe sur l'Argentine est estimé à environ 21 600 m³/j ;
- les apports par drainage sont considérés comme majoritaires pour ce tronçon car il y a peu d'affluents ou de rejets anthropiques sur le tronçon considéré ;
- le modèle ne considère que les apports depuis le côté Nord ;
- les apports par le côté Sud sont probablement les plus importants compte tenu de l'orientation globale des écoulements dans la zone,

il est considéré que le débit de drainage simulé par le modèle ne doit pas dépasser 40 % du débit mesuré à la station de La Hulpe, soit au maximum 8 640 m³/j.

De la même manière, pour la Lasne, étant donné que :

- l'augmentation de débit entre les stations de La Hulpe et de Rosières est estimée à environ 65 000 m³/j ;
- il y a, entre ces deux stations, un apport d'au moins 20 000 m³/j de la Lasne (on suppose que le débit de la Lasne avant apport de l'Argentine était au moins égale au débit de l'Argentine) ;
- il y a, entre ces deux stations, d'autres apports par des affluents majoritairement depuis le Sud ;
- le modèle ne considère que les apports depuis le côté Nord ;
- les apports par le côté Sud sont probablement les plus importants compte tenu de l'orientation globale des écoulements dans la zone,

il est considéré que le débit de drainage simulé par le modèle ne doit pas dépasser 30 % de l'augmentation de débit observée dont on a déjà retiré un apport de 30 000 m³/j estimé pour la Lasne, soit un débit de drainage de maximum 10 500 m³/j.

5.1.2.3.2.3 Bilan sur le Hain

Deux stations de référence mesurent le débit du Hain à Braine-l'Alleud et Braine-le-Château. Le **TABLEAU 5-9** ci-dessous reprend les mesures de débit du Hain.

Stations	Débits moyens en 2013 [m ³ /j]			Source de la donnée
	Hain	Apports	Retraits	
Hain à Braine-l'Alleud	24 262			Aqualim
Ruisseau du Fourcon		//////////		
Ruisseau des Vertes Voies		//////////		
Ruisseau Le Ham		//////////		
Ruisseau du Valek		//////////		
Ruisseau du Bois de Hautmont		//////////		
Ruisseau du Village		//////////		

Stations	Débits moyens en 2013 [m ³ /j]			Source de la donnée
	Hain	Apports	Retraits	
Ruisseau du Minon		//////////		
Ruisseau du Drabe		//////////		
Ruisseau du Bois du Foyau		//////////		
L'Ermitage		//////////		
Ruisseau des Catty		//////////		
La Maison Blanche		//////////		
Derrière Les Monts		//////////		
Hain à Braine-le-Château	44 735			Aqualim

Tableau 5-9 : Mesures de débit le long du Hain, dans ses apports et ses retraits

Comme pour les autres frontières, il est difficile d'évaluer la part de l'augmentation du débit liée au drainage compte tenu de l'absence de précision sur les apports en provenance des affluents.

Sur le tronçon compris entre les deux stations, de nombreux affluents sont présents, répartis équitablement entre le côté Nord et le côté Sud.

Etant donné que :

- l'augmentation de débit entre les stations de Braine-l'Alleud et Braine-le-Château est estimée à environ 20 500 m³/j ;
- les apports par drainage sont considérés comme majoritaires pour ce tronçon ;
- le modèle ne considère que les apports depuis le côté Nord ;
- les apports par le côté Sud sont probablement les plus importants compte tenu de l'orientation globale des écoulements dans la zone,

il est considéré que le débit de drainage simulé par le modèle ne doit pas dépasser 40 % de l'augmentation de débit observée, soit au maximum 8 200 m³/j.

5.1.2.3.2.4 Bilan sur la Woluwe

Un bilan est réalisé sur la Woluwe grâce aux trois stations Flowbru installées sur son cours (**TABLEAU 5-10**). Le premier tronçon, entre les stations de Middlebourg et de Gobert, est caractérisé par une augmentation de débit de 7 700 m³/j environ ; ce qui correspond à l'apport en provenance du Rode mesuré à la station Kloosterberg. Sur le second tronçon, entre les stations de mesures de Gobert et Sortie région, il y a une augmentation de débit d'environ 6 400 m³/j (compte tenu d'un débit de 10 980 m³/j à Gobert et de 17 331 m³/j à la sortie de la Région). Ce bilan n'a pas été réalisé sur toute l'année 2013 comme pour les autres rivières car les données pour la Woluwe ne sont disponibles que pour les mois d'octobre à décembre 2013 à la sortie de la Région de Bruxelles-Capitale (la station à la sortie de la Région est active depuis le début du mois d'octobre 2013).

Stations	Débits moyens entre octobre et décembre 2013 [m ³ /j]			Source de la donnée
	Woluwe	Apports	Retraits	
Woluwe Middlebourg	3 309			Flowbru
Rode Kloosterberg		7 100		Flowbru
Woluwe Gobert	10 980			Flowbru
Woluwe Sortie Région	17 331			Flowbru

Tableau 5-10 : Mesures de débit le long de la Woluwe, dans ses apports et ses retraits

Selon les résultats de l'étude hydrogéologique du bassin versant de la Woluwe²¹, il apparaît par ailleurs que ce cours d'eau est drainant sur la quasi-totalité de son parcours.

Un des objectifs du modèle étant d'évaluer les échanges entre la nappe des sables du Bruxellien et la Woluwe, le modèle ne sera pas calibré sur le débit drainé par la Woluwe. Cette sortie du modèle est considérée comme un résultat. Son adéquation avec l'augmentation de débit mesurée sera toutefois vérifiée.

Il est cependant important de considérer à ce stade que le drainage de la nappe dans la vallée de la Woluwe doit être également fortement impacté par le collecteur de la Woluwe (voir **CHAPITRE 5.1.2.4**).

5.1.2.3.2.5 Bilan sur la Voer

Un bilan ne peut être réalisé sur la Voer dès lors qu'il n'y a qu'une seule station de mesures, située à proximité de l'embouchure avec la Dyle. Cette station se situe à Heverlee.

Le débit moyen de l'année 2013 de la Voer à Heverlee est de 22 800 m³/j. Le débit total de drainage en amont de cette station doit donc être inférieur à cette valeur.

5.1.2.3.2.6 Bilan sur l'Ijse

Un bilan ne peut être réalisé sur l'Ijse dès lors qu'il n'y a qu'une seule station de mesures. Cette station se situe à Huldenberg.

Le débit moyen de l'année 2013 de l'Ijse à Huldenberg est de 26 700 m³/j. Le débit total de drainage en amont de cette station doit donc être inférieur à cette valeur.

5.1.2.3.2.7 Bilan sur les autres rivières et ruisseaux à l'intérieur du modèle

Sur la base de l'ensemble des bilans réalisés, il apparaît que l'estimation du débit de drainage des nappes par les rivières est complexe, bien que de nombreuses stations de mesures existent et que les données sont enregistrées avec des pas de temps réduits sur de longues périodes.

²¹ Tools for integrated water management of the Woluwe catchment : hydrogeological model and ecological indicators for sustainable management of the river-pond system (Blue plan), Prof. F. H. DE SMEDT, PhD E. RIMAVICIUTE, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel, 2003

Pour les autres rivières et ruisseaux à l'intérieur du modèle, aucune station de jaugeage n'existe et l'exercice des bilans ne peut donc pas être réalisé.

De ce fait, pour calibrer le modèle, l'ordre de grandeur des débits sortants des rivières sera vérifié et validé afin de contraindre au mieux le modèle hydrogéologique.

5.1.2.3.3 EN RÉGIME TRANSITOIRE

On l'a vu dans les pages précédentes, il est très difficile de réaliser des bilans précis pour estimer la part du drainage par les rivières. Cette interprétation est d'autant plus complexe à réaliser dès lors que l'on considère son évolution dans le temps.

Les différentes rivières sont tout de même passées en revue ci-après pour tenter de dégager des observations utiles à la calibration en régime transitoire. Toutefois, il est considéré que l'apport par drainage des nappes est plutôt un apport constant masqué dans le bruit de fond de l'augmentation totale du débit des rivières liée quant à elle à la somme des apports anthropiques, des affluents, du ruissellement et du drainage des nappes.

5.1.2.3.3.1 La Senne

L'évolution du débit de la Senne est étudiée entre les stations situées à l'entrée et à la sortie de la Région Bruxelles-Capitale. L'augmentation moyenne mensuelle du débit de la Senne entre ces deux stations est présentée à la **FIGURE 5-20**.

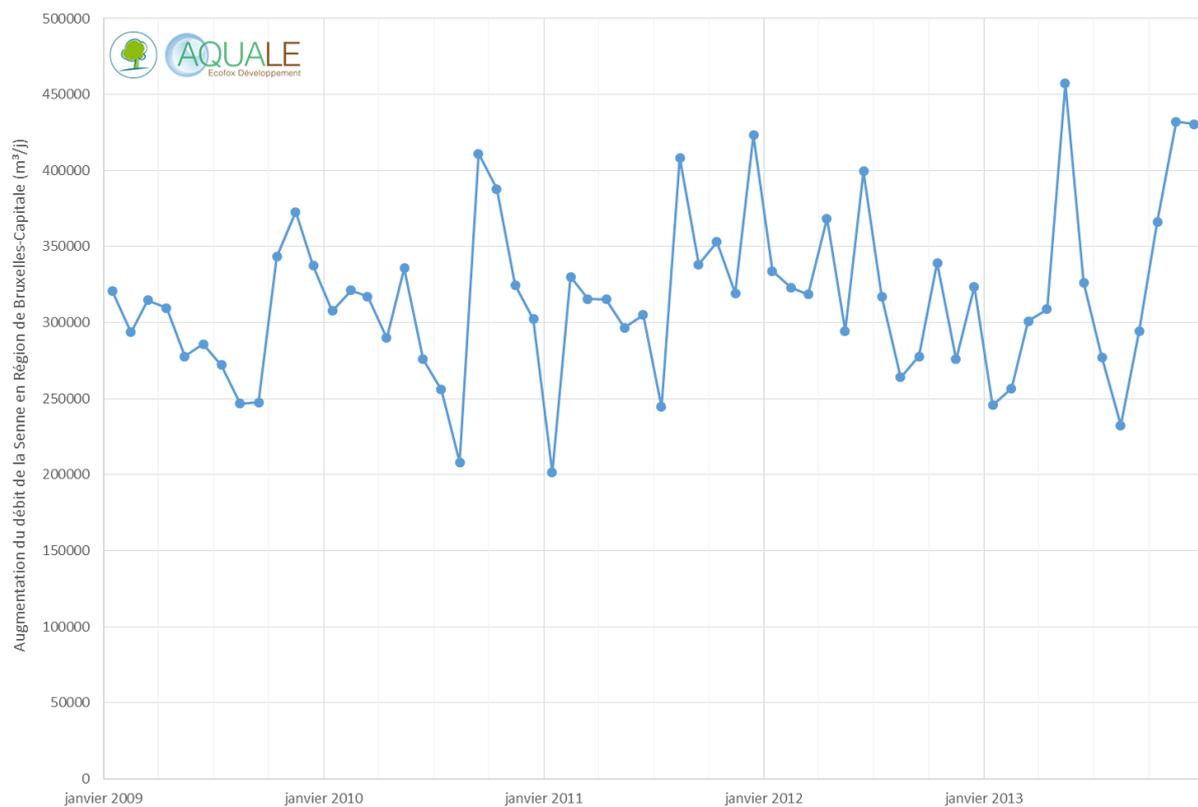


Figure 5-20 : Evolution de l'augmentation moyenne mensuelle du débit de la Senne entre l'entrée et la sortie de la Région de Bruxelles-Capitale (en m³/j)

Il apparaît que l'augmentation du débit entre ces deux stations est assez variable dans le temps. Elle varie globalement entre 200 000 et 450 000 m³/j, la très grande majorité des valeurs étant située entre 250 000 et 350 000 m³/j.

Pour rappel, cette augmentation est très majoritairement liée aux apports directs liés aux rejets anthropiques ou en provenance des collecteurs (voir à ce sujet les observations réalisées dans le **CHAPITRE 5.1.2.3.2**).

5.1.2.3.3.2 La frontière Est – Argentine, Lasne, Dyle

L'évolution du débit de la Dyle est étudiée entre les stations de Sint-Joris-Weert et de Wilsele. L'augmentation moyenne mensuelle du débit de la Dyle entre ces deux stations est présentée à la **FIGURE 5-21**.

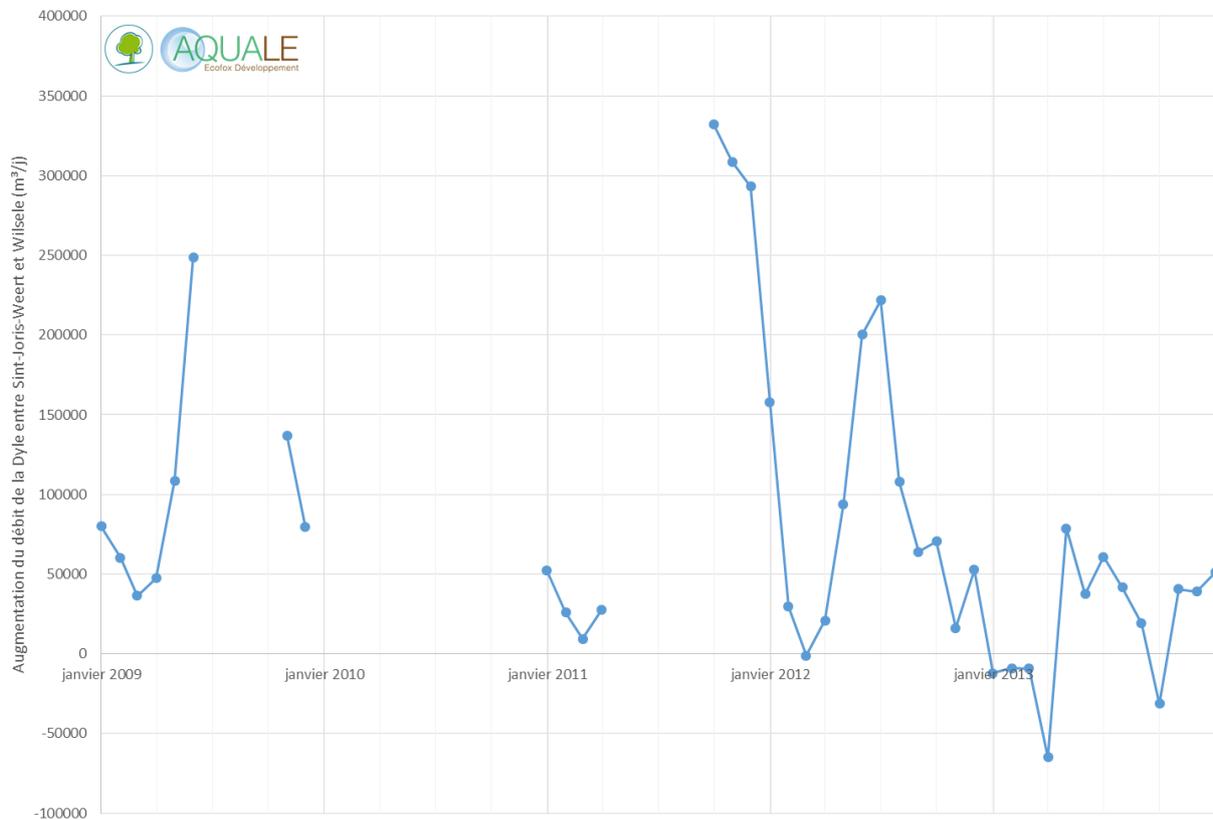


Figure 5-21 : Evolution de l'augmentation moyenne mensuelle du débit de la Dyle entre Sint-Joris-Weert et Wilsele (en m³/j)

Il apparaît que l'augmentation du débit entre ces deux stations est assez variable dans le temps. Elle varie globalement entre - 60 000 et 350 000 m³/j, la très grande majorité des valeurs étant située entre 0 et 100 000 m³/j. La présence de valeurs négatives démontre encore une fois que les mesures sont imprécises dès lors qu'une augmentation du débit de la Dyle est attendue entre ces deux sections.

Pour rappel, cette augmentation est très majoritairement liée aux apports de la Voer et de la Lasne (voir à ce sujet les observations réalisées dans le **CHAPITRE 5.1.2.3.2**).

5.1.2.3.3.3 Le Hain

L'évolution du débit du Hain est étudiée entre les stations de Braine-l'Alleud et de Braine-le-Château uniquement pour la période allant de juin à décembre 2013 (car la station de Braine-l'Alleud a été ouverte en juin 2013). L'augmentation moyenne mensuelle du débit du Hain entre ces deux stations est présentée à la **FIGURE 5-22**.



Figure 5-22 : Evolution de l'augmentation moyenne mensuelle du débit du Hain entre Braine-l'Alleud et Braine-le-Château (en m³/j)

Il apparaît que l'augmentation du débit entre ces deux stations est assez variable dans le temps. Elle varie globalement entre 5 000 et 40 000 m³/j, la très grande majorité des valeurs étant située entre 0 et 15 000 m³/j.

Pour rappel, cette augmentation est très majoritairement liée aux apports des affluents répartis équitablement entre les flancs Nord et Sud de la vallée du Hain (voir à ce sujet les observations réalisées dans le **CHAPITRE 5.1.2.3.2**).

5.1.2.3.3.4 La Woluwe

L'évolution du débit de la Woluwe et de ses affluents est étudiée aux différentes stations Flowbru disponibles, à savoir :

- Woluwe à Middlebourg ;
- Rode à Kloosterberg ;
- Woluwe à Gobert ;
- Woluwe à la sortie de la Région de Bruxelles-Capitale.

D'amont en aval, quatre tronçons sont analysés séparément :

- le tronçon de Woluwe situé en amont de la station Middlebourg (1) ;
- le tronçon de Rode situé en amont de la station Kloosterberg (2) ;
- le tronçon de Woluwe situé en amont de la station Gobert mais en aval des stations Kloosterberg et Middlebourg (3) ;
- le tronçon de Woluwe situé en amont de la sortie de la Région de Bruxelles-Capitale mais en aval de la station Gobert (4).

Ces quatre tronçons sont représentés sur la **FIGURE 5-23** ci-dessous.

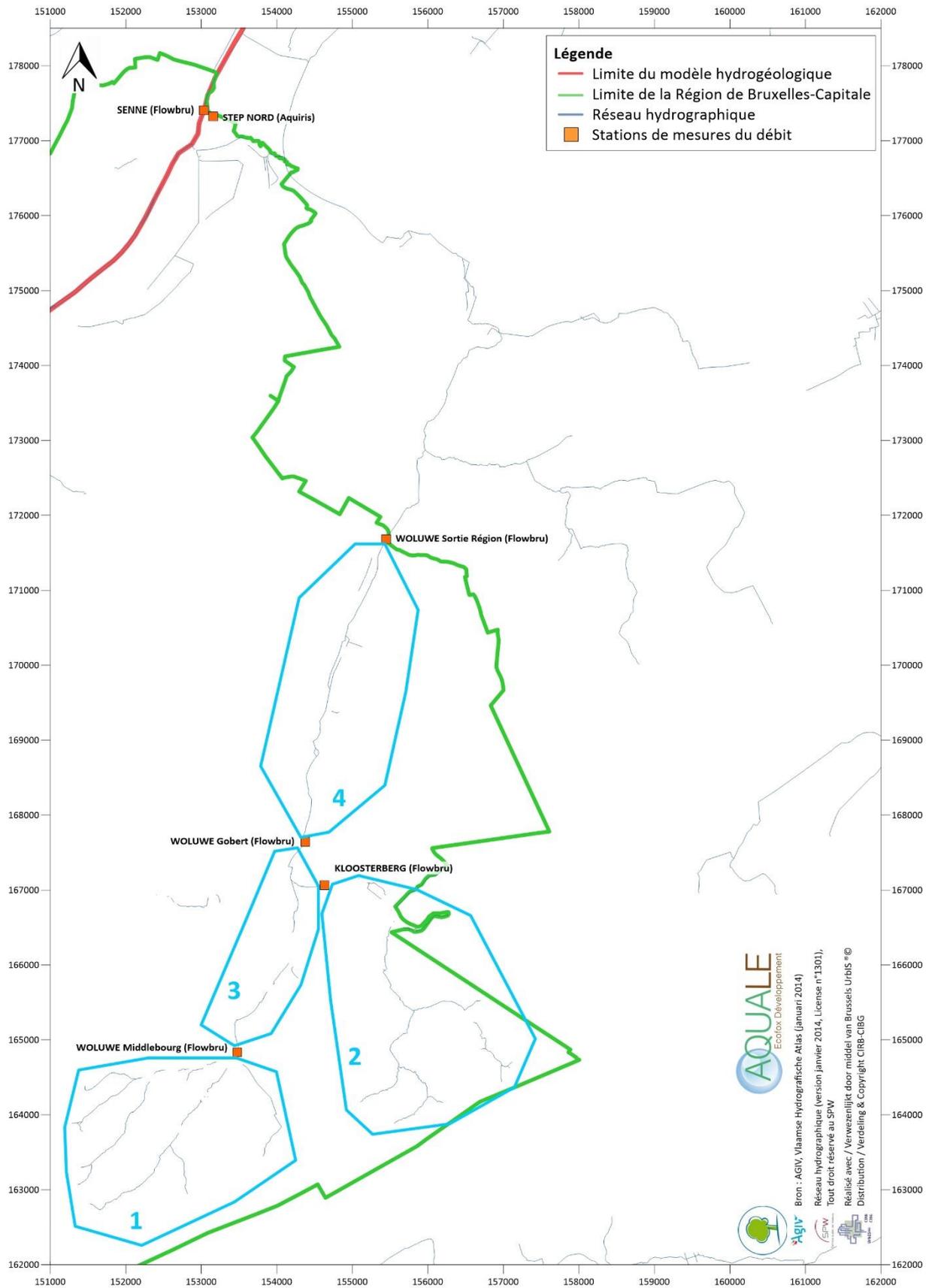


Figure 5-23 : Tronçons de Woluwe étudiés pour le régime transitoire

TRONÇON 1

Le débit potentiellement drainé par le tronçon 1 est au maximum équivalent au débit mesuré à la station de Middlebourg dont l'évolution est présentée à la **FIGURE 5-24**.

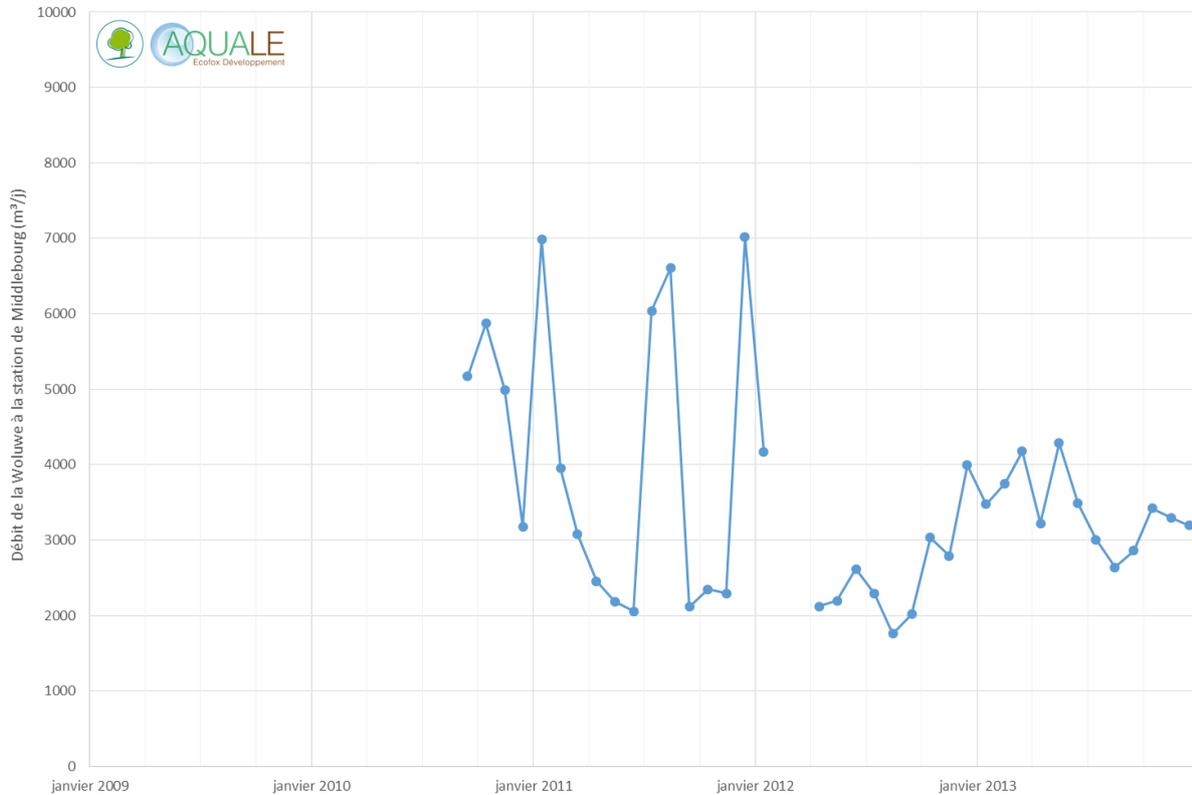


Figure 5-24 : Débit moyen mensuel de la Woluwe à la station de Middlebourg (m³/j)

Puisque le niveau piézométrique des *nappes superficielle* et *du Bruxellien* varie peu dans le temps à proximité de la Woluwe, il est considéré que l'apport par drainage des nappes varie peu également. Si cet apport par drainage est constant et forcément inférieur au débit mesuré à la station de Middlebourg, il ne doit pas dépasser 2 500 m³/j (la grande majorité des mesures étant supérieure à cette valeur).

TRONÇON 2

Le débit potentiellement drainé par le tronçon 2 est au maximum équivalent au débit mesuré à la station de Kloosterberg dont l'évolution est présentée à la **FIGURE 5-25**.

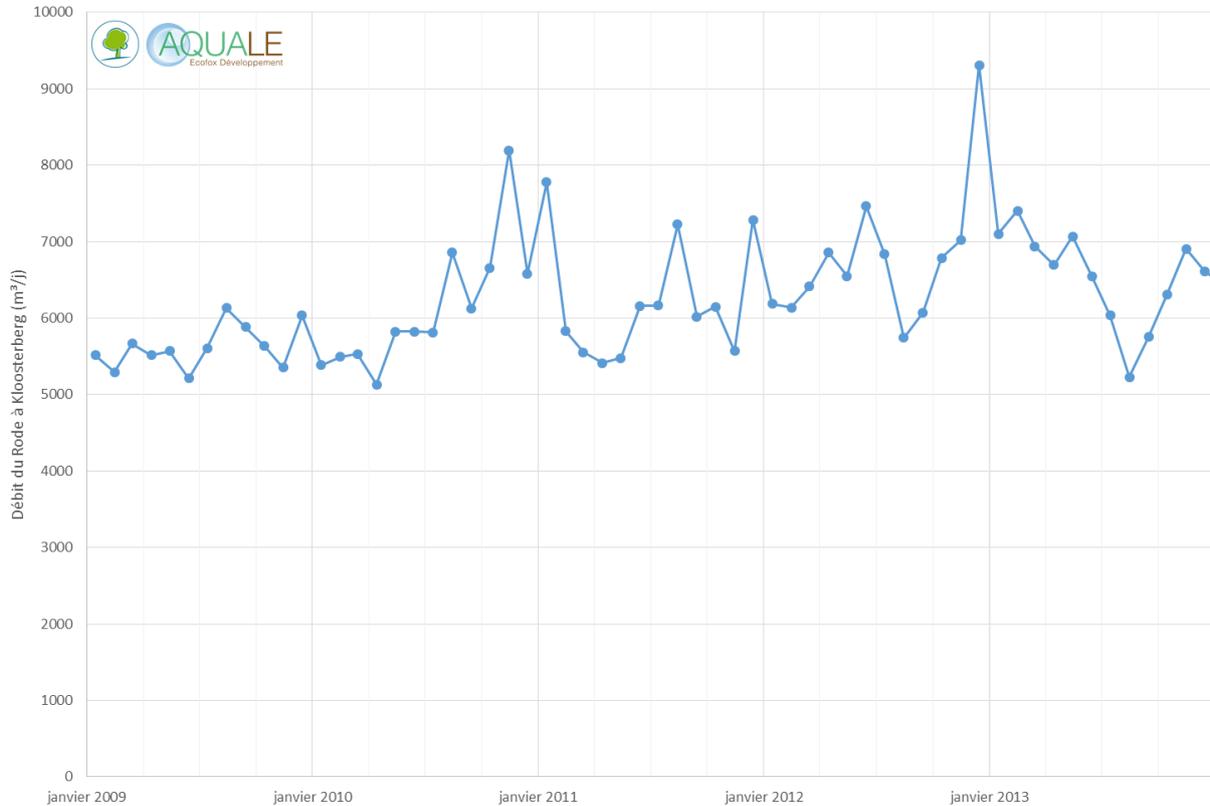


Figure 5-25 : Débit moyen mensuel du Rode à la station de Kloosterberg (m³/j)

Puisque le niveau piézométrique des *nappes superficielle* et *du Bruxellien* varie peu dans le temps à proximité de la Woluwe, il est considéré que l'apport par drainage des nappes varie peu également. Si cet apport par drainage est constant et forcément inférieur au débit mesuré à la station de Kloosterberg, il ne doit pas dépasser 5 500 m³/j (la grande majorité des mesures étant supérieure à cette valeur).

TRONÇON 3

Le débit potentiellement drainé par le tronçon 3 est au maximum équivalent à l'augmentation de débit mesurée entre la station Gobert et les stations Middlebourg et Kloosterberg dont l'évolution est présentée à la **FIGURE 5-26**.

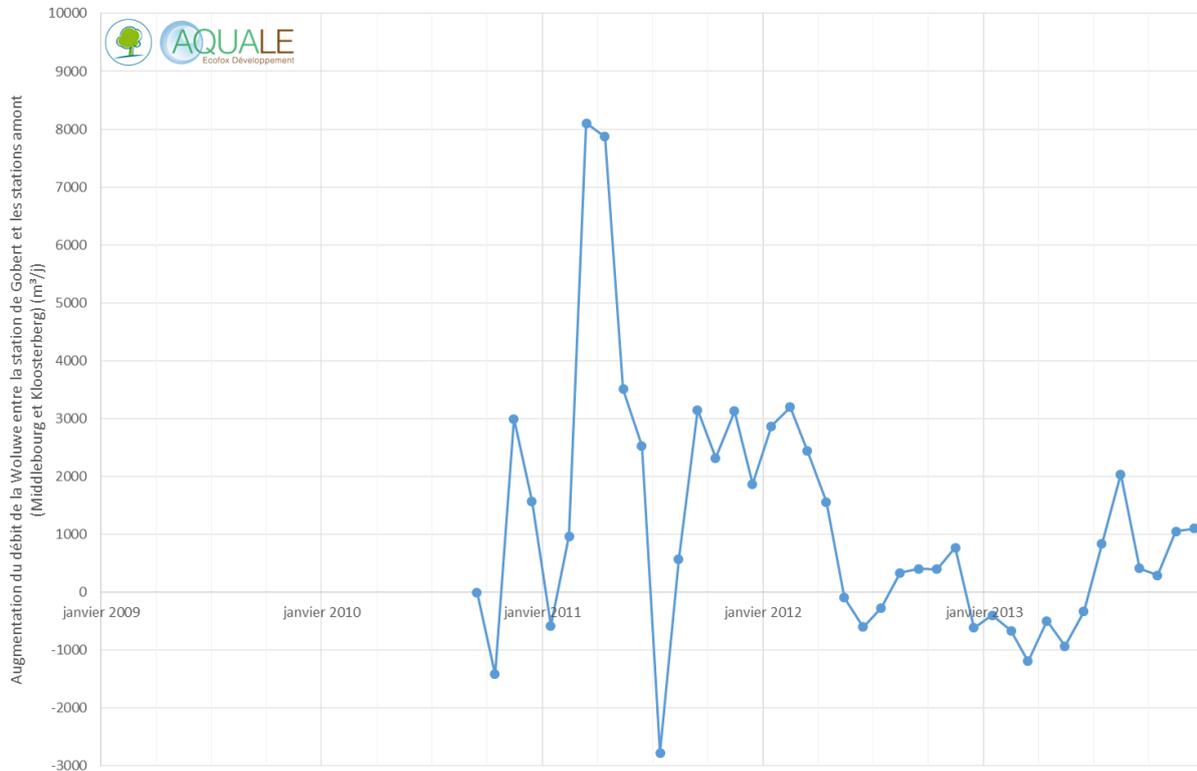


Figure 5-26 : Augmentation du débit de la Woluwe entre la station de Gobert et les stations amont (Middlebourg et Kloosterberg) (m³/j)

Puisque le niveau piézométrique des *nappes superficielle* et du *Bruxellien* varie peu dans le temps à proximité de la Woluwe, il est considéré que l'apport par drainage des nappes varie peu également. Il apparaît sur le graphique ci-dessus que le débit de la Woluwe à la station de Gobert n'est pas toujours supérieur à la somme des débits mesurés en amont. L'augmentation de débit lié au drainage est donc considérée comme très faible voire même nulle.

Cette observation semble logique dès lors que ce tronçon est également caractérisé par la présence du collecteur de la Woluwe, situé à une cote inférieure, et drainant la majorité des eaux de la nappe dans la zone (voir **CHAPITRE 5.1.2.4**). S'il y a drainage des nappes par la rivière, ce drainage est de toute façon négligeable par rapport au drainage par le collecteur et le modèle ne pourra distinguer la part du drainage liée à la rivière du drainage total lié au collecteur.

TRONÇON 4

Le débit potentiellement drainé par le tronçon 4 est au maximum équivalent à l'augmentation de débit mesurée entre la station Gobert et la station Sortie Région dont l'évolution est présentée à la **FIGURE 5-27**. Les données à la sortie de la Région étant disponible depuis début 2014 seulement, le graphique est présenté à titre informatif pour la période 2014 – 2015.

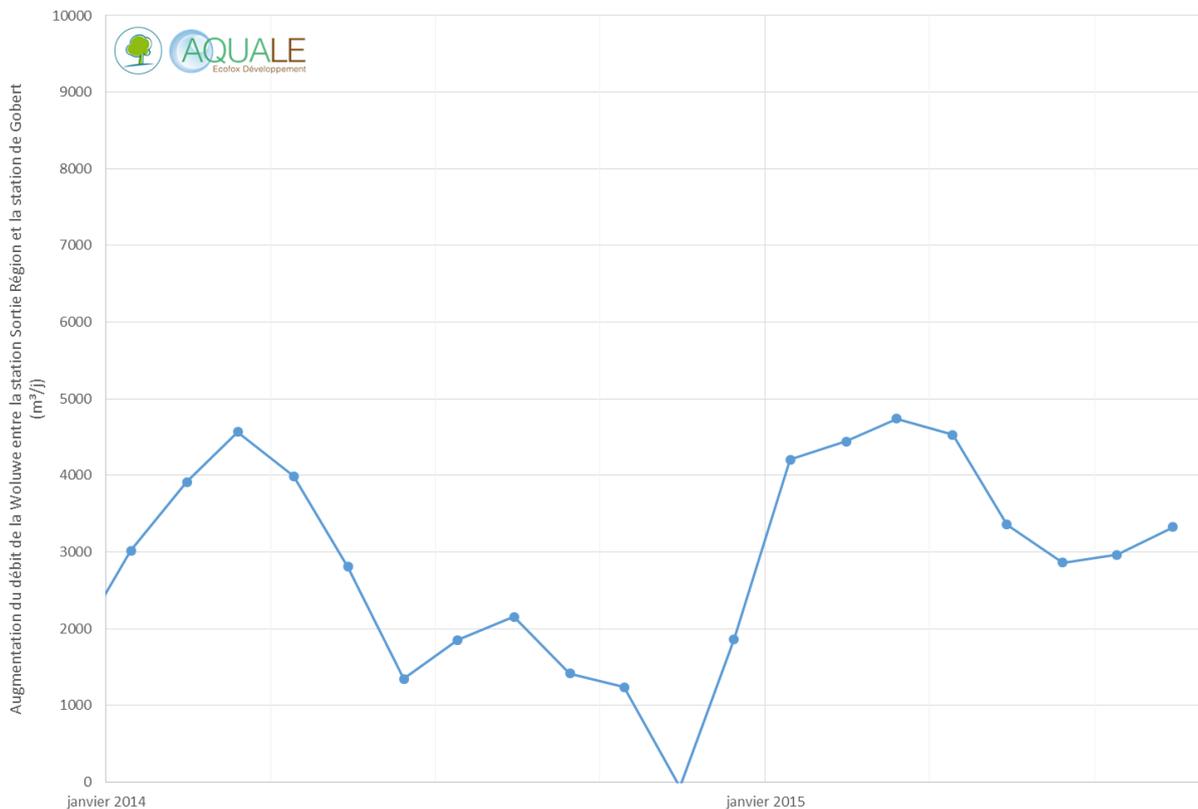


Figure 5-27 : Augmentation du débit de la Woluwe entre la station Sortie Région et la station de Gobert (m³/j)

Puisque le niveau piézométrique des *nappes superficielle* et du *Bruxellien* varie peu dans le temps à proximité de la Woluwe, il est considéré que l'apport par drainage des nappes varie peu également. Il apparaît sur le graphique ci-dessus que le débit de la Woluwe à la station Sortie Région n'est pas toujours supérieur au débit mesuré à la station de Gobert. L'augmentation de débit lié au drainage est donc considérée comme très faible voire même nulle.

Cette observation semble logique dès lors que ce tronçon est également caractérisé par la présence du collecteur de la Woluwe, situé à une cote inférieure, et drainant la majorité des eaux de la nappe dans la zone (voir **CHAPITRE 5.1.2.4**). S'il y a drainage des nappes par la rivière, ce drainage est de toute façon négligeable par rapport au drainage par le collecteur et le modèle ne pourra distinguer la part du drainage liée à la rivière du drainage total lié au collecteur.

L'évolution du débit de la Voer est étudiée à la station d'Heverlee et est présentée à la **FIGURE 5-28**.

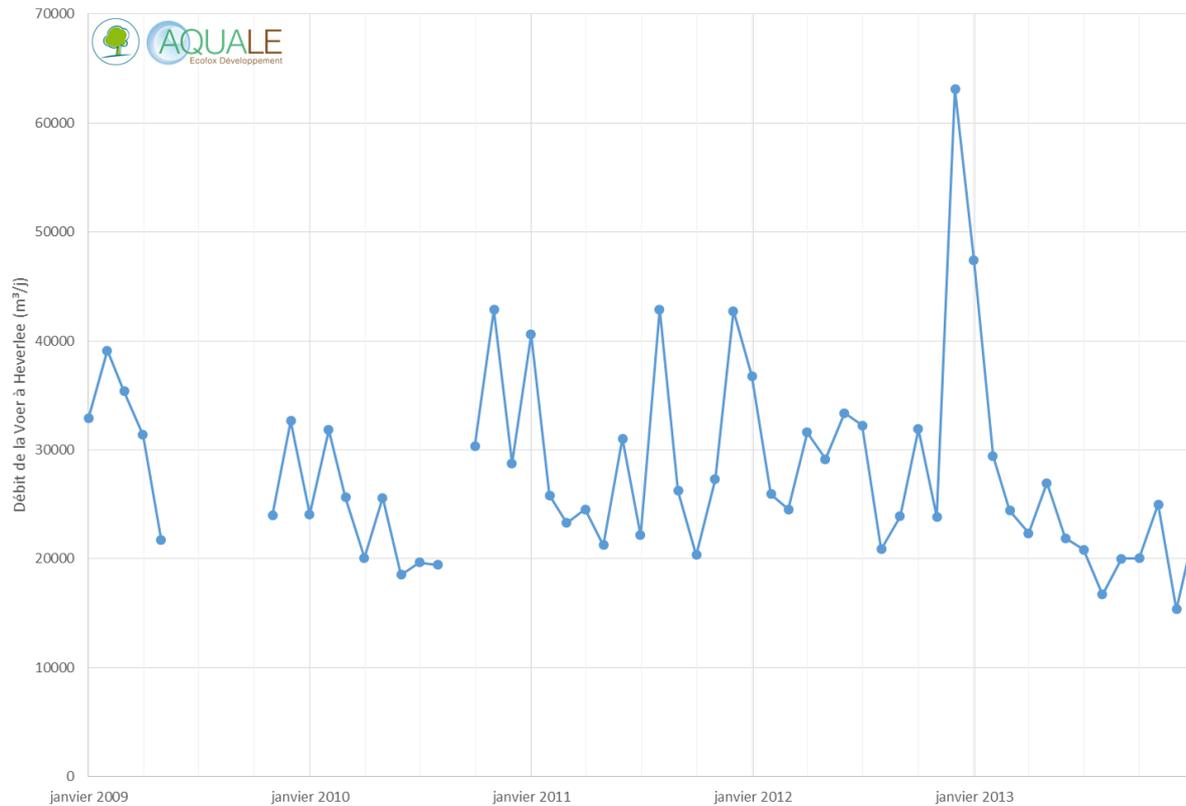


Figure 5-28 : Débit moyen mensuel de la Voer à Heverlee (en m³/j)

Il apparaît que le débit est assez variable dans le temps. Il varie globalement entre 15 000 et 60 000 m³/j, la très grande majorité des valeurs étant située entre 20 000 et 30 000 m³/j.

Pour rappel, la Voer étant située entièrement dans le modèle, il est considéré que le débit de drainage doit de toute façon être inférieur au débit mesuré de la rivière à son embouchure avec la Dyle (voir à ce sujet les observations réalisées dans le **CHAPITRE 5.1.2.3.2**).

Puisque le niveau piézométrique des *nappes superficielle* et du *Bruxellien* varie peu dans le temps à proximité de la Voer, il est considéré que l'apport par drainage des nappes varie peu également. Si cet apport par drainage est constant et forcément inférieur au débit mesuré à la station d'Heverlee, il ne doit pas dépasser 20 000 m³/j.

L'évolution du débit de l'Ijse est étudiée à la station d'Huldenberg et est présentée à la **FIGURE 5-29**.

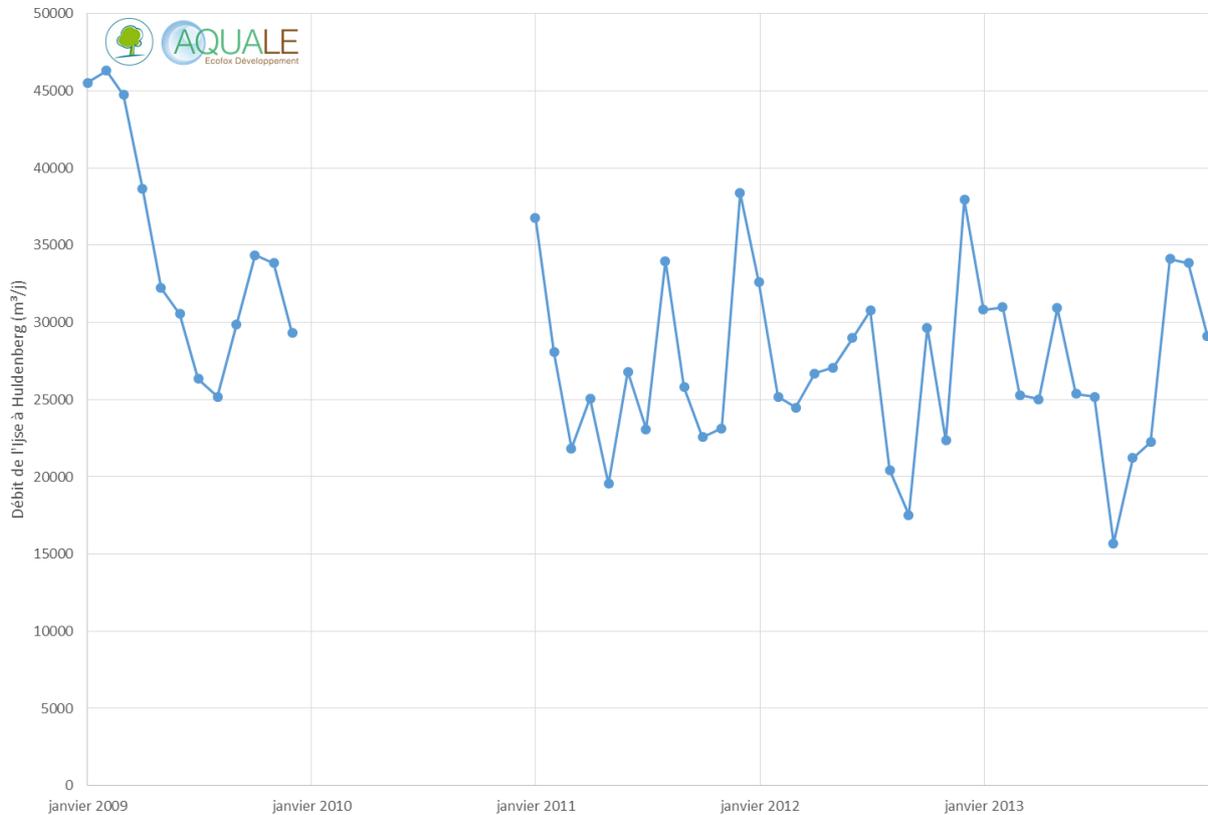


Figure 5-29 : Débit moyen mensuel de l'Ijse à Huldenberg (en m³/j)

Il apparaît que le débit est assez variable dans le temps. Il varie globalement entre 15 000 et 40 000 m³/j, la très grande majorité des valeurs étant située entre 20 000 et 30 000 m³/j.

Pour rappel, l'Ijse étant située entièrement dans le modèle, il est considéré que le débit de drainage doit de toute façon être inférieur au débit mesuré de la rivière à son embouchure avec la Dyle (voir à ce sujet les observations réalisées dans le **CHAPITRE 5.1.2.3.2**).

Puisque le niveau piézométrique des *nappes superficielle* et *du Bruxellien* varie peu dans le temps à proximité de l'Ijse, il est considéré que l'apport par drainage des nappes varie peu également. Si cet apport par drainage est constant et forcément inférieur au débit mesuré à la station d'Huldenberg, il ne doit pas dépasser 20 000 m³/j.

5.1.2.4 OBSERVATION DU DÉBIT DES COLLECTEURS EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE

5.1.2.4.1 INTRODUCTION

Les réflexions sont menées uniquement sur les collecteurs ayant un impact sur les eaux souterraines en rive droite de la Senne. Les collecteurs situés en rive gauche ne sont pas considérés.

Le réseau de collecteurs peut être divisé en 5 sous-réseaux :

- le collecteur de la Woluwe ;
- le collecteur Emissaire Uccle Sud ;
- le collecteur industriel ;
- le collecteur Maelbeek ;
- le collecteur Emissaire rive droite.

Ces 5 réseaux sont repris sur la **FIGURE 5-30** ci-dessous.

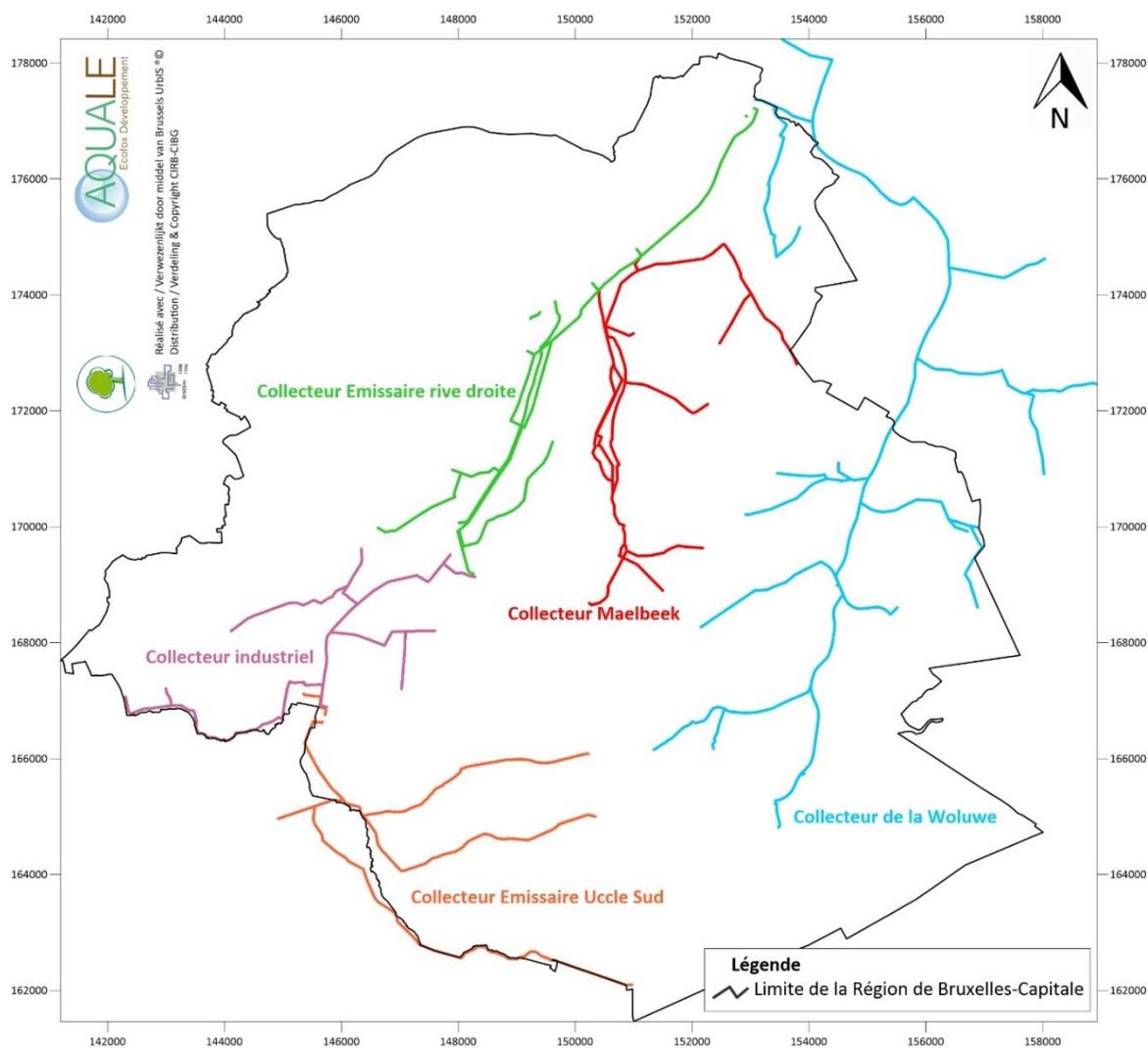


Figure 5-30 : Collecteurs pris en considération

L'évolution des débits peut donc être étudiée dans ces 5 sous-réseaux.

5.1.2.4.2 COLLECTEUR DE LA WOLUWE

Quatre stations de mesure sont disposées le long du collecteur de la Woluwe. D'amont en aval, il s'agit de :

- la station Watermaelbeek ;
- la station Roodebeek ;
- la station Woluwe Sortie Région ;
- la station STEP Nord – Woluwe collecteur.

La **FIGURE 5-31** ci-dessous illustre la localisation de ces stations.

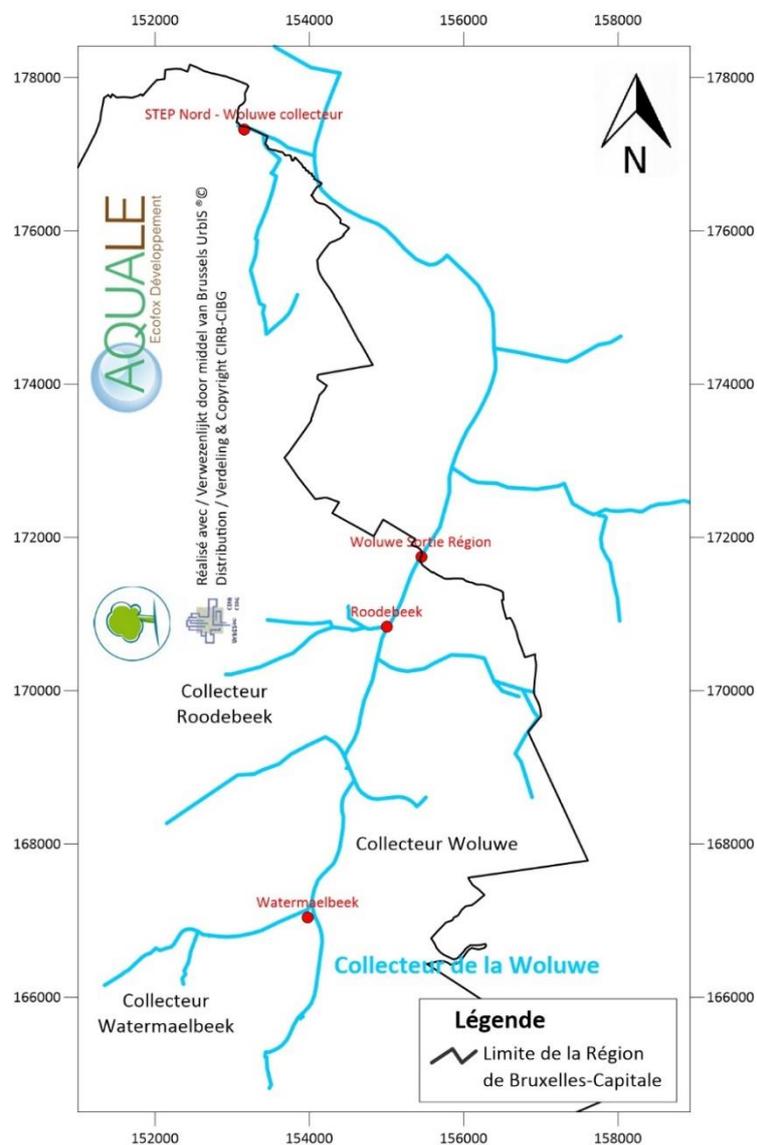


Figure 5-31 : Collecteur de la Woluwe

Le sens d'écoulement va du Sud vers le Nord selon l'axe principal. Les quelques ramifications orientées Ouest – Est entraînent l'eau en direction de l'axe principal.

Les débits parasites ont été évalués pour ces différentes stations en prenant deux périodes de référence :

- le mois d'avril 2007 caractérisé par l'absence de précipitations ;
- le mois de juin 2013, première période de référence pour la calibration en régime permanent.

Les débits parasites sont les débits mesurés quotidiennement entre 4 et 6 heures du matin, alors que les perturbations anthropiques sont minimales. Ces débits parasites sont jugés comme étant représentatifs de l'apport en provenance des eaux souterraines.

Le tableau suivant (**TABLEAU 5-11**) reprend les différentes observations.

X	Y	Station	Collecteur concerné	Collecteur principal	Débit parasite avril 2007 (l/s)	Débit parasite mai 2013 (l/s)
153980	167040	Watermaelbeek	Watermaelbeek	Woluwe	30	35
155003	170833	Roodebeek	Roodebeek	Woluwe	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit
155448	171745	Woluwe Coll. Sortie Région	Woluwe	Woluwe	510	500
153155	177326	STEP Nord - Woluwe collecteur	Woluwe	Woluwe	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit

Tableau 5-11 : Observations du débit parasite sur le collecteur de la Woluwe

Les conclusions suivantes peuvent être émises :

- le tronçon en amont de la station Watermaelbeek est caractérisé par un débit de drainage d'environ 30 l/s, soit 2 600 m³/j ;
- tout le tronçon situé en amont de la station Woluwe Coll. Sortie Région (à l'exception du collecteur Watermaelbeek) est caractérisé par un débit de drainage d'environ 470 l/s (500 – 30), soit 41 000 m³/j.

5.1.2.4.3 COLLECTEUR EMISSAIRE UCCLE SUD

Sept stations de mesure sont disposées le long du collecteur Emissaire Uccle Sud. D'amont en aval, il s'agit de :

- la station Drogenbos – Station de pompage ;
- la station Drogenbos - Collecteur ;
- la station Saint-Job (Geleitsbeek d'Uccle) ;
- la station Stalle (Ukkelbeek) ;
- la station Zwartebeek ;
- la station Emissaire Uccle Sud ;
- la station STEP Sud – Entrée Uccle.

La **FIGURE 5-32** ci-dessous illustre la localisation de ces stations.

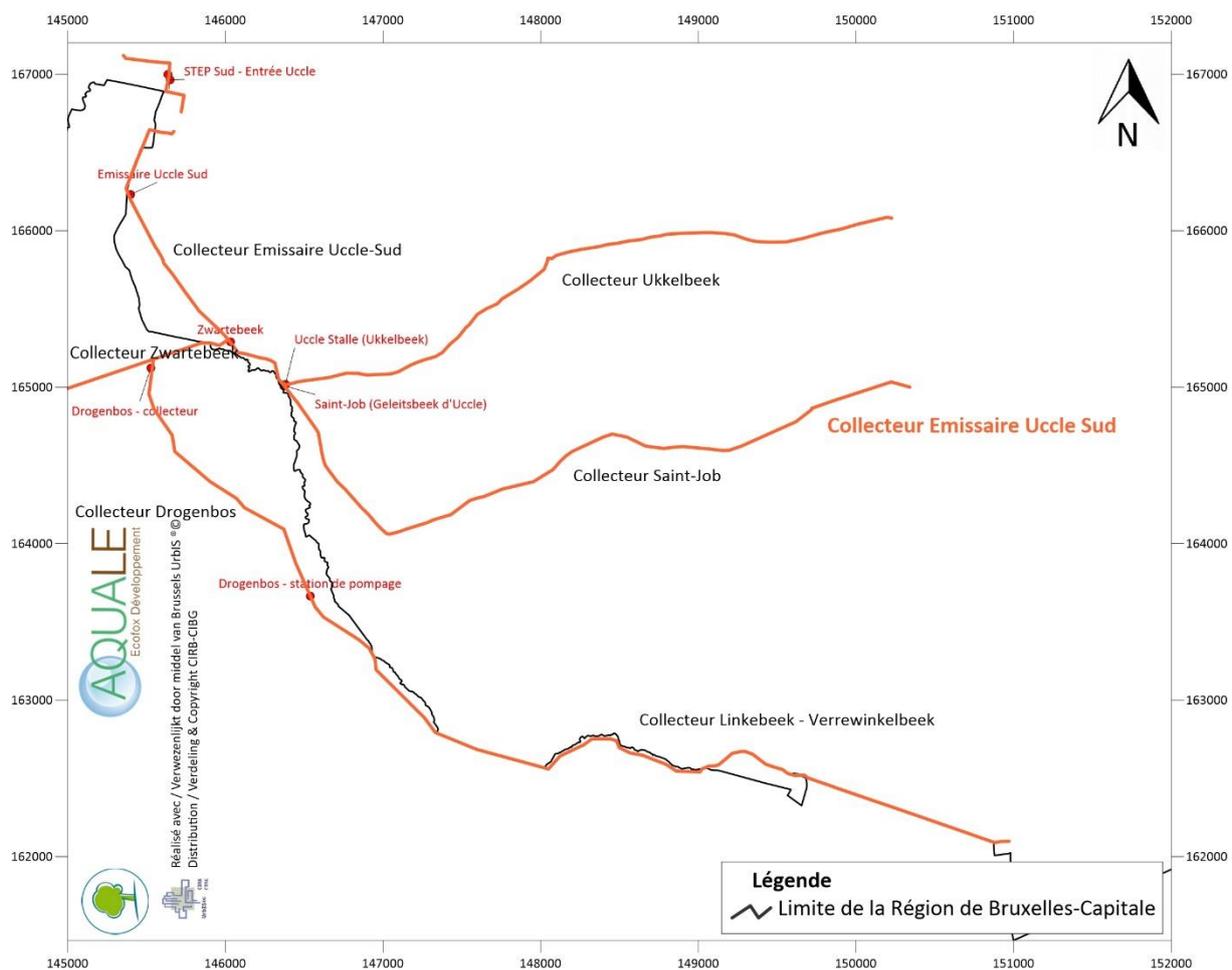


Figure 5-32 : Collecteur Emissaire Uccle Sud

Le sens d'écoulement va de l'Est vers l'Ouest. Les trois collecteurs (Linkebeek – Verrewinkelbeek, Saint-Job et Ukkelbeek) entraînent l'eau en direction de l'Ouest et la rejettent dans le collecteur principal Emissaire Uccle-Sud. Ce dernier collecteur entraîne l'eau vers le Nord jusqu'à la STEP Sud.

Les débits parasites ont été évalués pour les mêmes périodes et selon la même méthode.

Le tableau suivant (TABLEAU 5-12) reprend les différentes observations.

X	Y	Station	Collecteur concerné	Collecteur principal	Débit parasite avril 2007 (l/s)	Débit parasite mai 2013 (l/s)
146539	163666	Drogenbos - station de pompage	Linkebeek - Verrewinkelbeek	Drogenbos	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit
145526	165122	Drogenbos - collecteur	Drogenbos	Drogenbos	41 (période 2007 – 2010)	pas de mesure de débit
146373	165008	Saint-Job (Geleitsbeek d'Uccle)	Saint-Job	Emissaire Uccle Sud	77	80
146381	165017	Uccle Stalle (Ukkelbeek)	Ukkelbeek	Emissaire Uccle Sud	70	pas de mesure de débit
146035	165288	Zwartebeek	Zwartebeek	Emissaire Uccle Sud	pas de mesure de débit fiable	pas de mesure de débit fiable
145398	166231	Emissaire Uccle Sud	Emissaire Uccle Sud	Emissaire Uccle Sud	Mesure non fiable	pas de mesure de débit
145649	166964	STEP Sud - Entrée Uccle	Emissaire Uccle Sud	Emissaire Uccle Sud	153 (période 2007 – 2010)	pas de mesure de débit

Tableau 5-12 : Observations du débit parasite sur le collecteur Emissaire Uccle Sud

Les conclusions suivantes peuvent être émises :

- le collecteur Drogenbos (et sa partie amont « Linkebeek – Verrewinkelbeek ») le plus au Sud en amont de la station Drogenbos - Collecteur est caractérisé par un débit de drainage d'environ 40 l/s, soit 3 500 m³/j ;
- le collecteur Saint-Job en amont de la station Saint-Job est caractérisé par un débit de drainage d'environ 80 l/s, soit 6 900 m³/j ;
- le collecteur Ukkelbeek en amont de la station Uccle Stalle est caractérisé par un débit de drainage d'environ 70 l/s, soit 6 000 m³/j ;
- la station Zwartebeek ne présente pas de mesure de débit fiable ;
- la station Emissaire Uccle Sud devrait au moins présenter un débit correspondant à la somme des débits des stations Drogenbos, Saint-Job et Uccle Stalle, soit 41 + 77 + 70 = 188 l/s mais ce n'est pas le cas ;
- la station STEP Sud – Entrée Uccle reprend l'ensemble du débit du collecteur Emissaire Uccle Sud, soit 153 l/s (ou 13 200 m³/j), ce qui est inférieur à la somme des débits des trois stations précitées (Drogenbos, Saint-Job, Uccle Stalle). La différence pourrait être due aux erreurs de mesure. Cela indiquerait cependant que le drainage sur le tronçon le plus aval est assez faible vu qu'on n'observe pas d'augmentation de débit.

5.1.2.4.4 COLLECTEUR INDUSTRIEL

Huit stations de mesure sont disposées le long du collecteur Industriel. D'amont en aval, il s'agit de :

- la station Fonsny Saint-Gilles ;
- la station Neerpedebeek Biestebroek ;
- la station Boulevard industriel - Collecteur ;
- la station Pont de Luttre ;
- la station Geleitsbeek ;

- la station Forest – Vanne automatique ;
- la station Collecteur Ceria ;
- la station STEP Sud – Entrée Anderlecht.

La **FIGURE 5-33** ci-dessous illustre la localisation de ces stations.

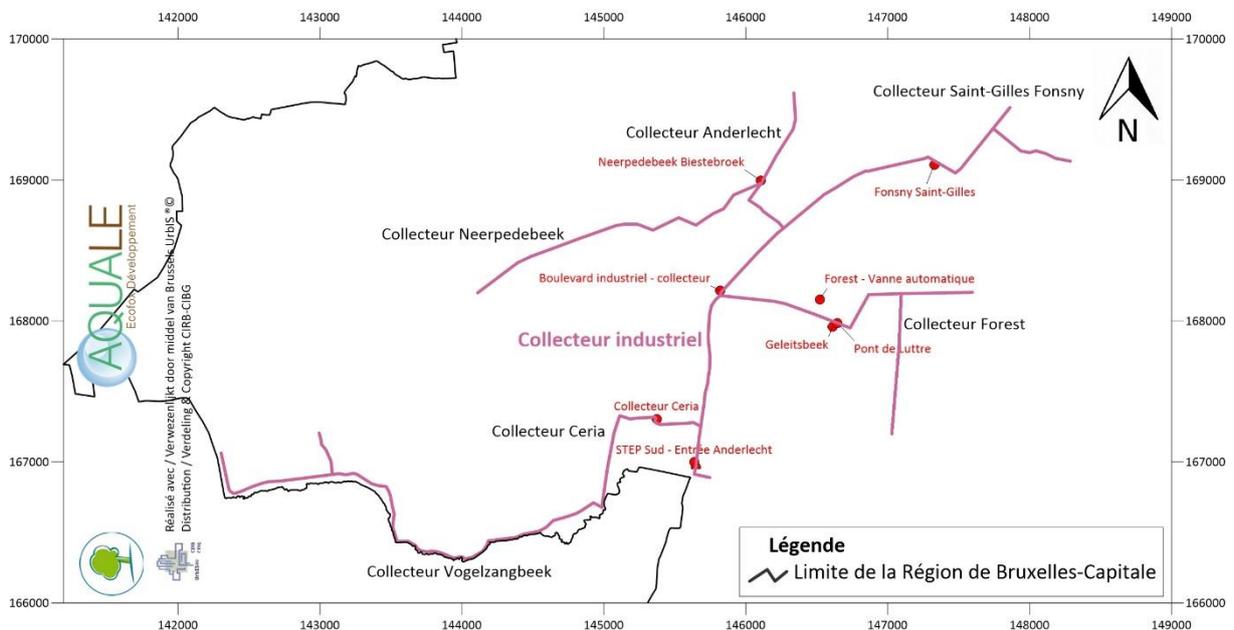


Figure 5-33 : Collecteur industriel

Trois collecteurs situés en rive gauche de la Senne entraînent l’eau de l’Ouest vers l’Est, il s’agit des collecteurs Anderlecht, Neerpedebeek et Vogelzangbeek. Ces trois collecteurs déversent leur eau dans le collecteur industriel.

Deux collecteurs situés en rive droite de la Senne entraînent l’eau de l’Est vers l’Ouest, il s’agit des collecteurs Saint-Gilles Fonsny et Forest. Ces deux collecteurs déversent leur eau dans le collecteur industriel.

Le collecteur industriel entraîne l’eau du Nord vers le Sud jusqu’à la STEP Sud.

Les débits parasites ont été évalués pour les mêmes périodes et selon la même méthode.

Le tableau suivant (**TABLEAU 5-13**) reprend les différentes observations.

X	Y	Station	Collecteur concerné	Collecteur principal	Débit parasite avril 2007 (l/s)	Débit parasite mai 2013 (l/s)
147328	169108	Fonsny Saint-Gilles	Collecteur industriel	Collecteur industriel	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit
146314	169628	Broekbeek collecteur	Collecteur Anderlecht	Collecteur industriel	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit

X	Y	Station	Collecteur concerné	Collecteur principal	Débit parasite avril 2007 (l/s)	Débit parasite mai 2013 (l/s)
146105	168996	Neerpedebeek Biestebroek	Collecteur Neerpedebeek	Collecteur industriel	44	pas de mesure de débit
145820	168216	Boulevard industriel - collecteur	Collecteur industriel	Collecteur industriel	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit
146646	167985	Pont de Luttre	Forest	Collecteur industriel	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit
146611	167960	Geleitsbeek	Forest	Collecteur industriel	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit
146522	168154	Forest – Vanne automatique	Forest	Collecteur industriel	37	pas de mesure de débit
145372	167306	Collecteur Ceria	Ceria	Collecteur industriel	5	pas de mesure de débit
145637	166998	STEP Sud - Entrée Anderlecht	Collecteur industriel	Collecteur industriel	0	138

Tableau 5-13 : Observations du débit parasite sur le collecteur industriel

Les conclusions suivantes peuvent être émises :

- la station Fonsny Saint-Gilles n'enregistre pas de mesure de débit, il est donc impossible d'évaluer le débit drainé en amont de cette station (collecteur Saint-Gilles Fonsny) ;
- le collecteur Neerpedebeek est caractérisé par un débit de drainage d'environ 44 l/s, soit 3 800 m³/j ;
- le débit de drainage du collecteur Anderlecht n'est pas connu puisqu'aucune station de mesure n'est placée sur ce collecteur ;
- le débit de drainage du collecteur Forest en amont de la station Boulevard Paepsem est d'environ 37 l/s, soit 3 200 m³/j ;
- le collecteur Ceria (et sa partie amont, le collecteur Vogelzangbeek) en amont de la station Ceria est caractérisé par un débit de drainage d'environ 5 l/s, soit 400 m³/j ;
- le débit mesuré à la station STEP Sud – Entrée Anderlecht est représentatif du drainage sur l'ensemble des tronçons constituant le collecteur industriel. Sachant qu'un débit d'environ 44 l/s provient du collecteur Neerpedebeek, qu'un débit d'environ 37 l/s provient du collecteur Forest et qu'un débit d'environ 5 l/s provient du collecteur Ceria, le débit de drainage du collecteur industriel (et des tronçons de collecteurs secondaires situés en aval des stations respectives) devrait être d'environ 52 l/s (138 – 44 – 37 – 5), soit 4 500 m³/j.

5.1.2.4.5 COLLECTEUR MAELBEEK

Quatorze stations de mesure sont disposées le long du collecteur Maelbeek. D'amont en aval, il s'agit de :

- la station Broebelaar ;
- la station Belliard Entrée ;
- la station Belliard Sortie ;
- la station Nouveau Maelbeek - Livingstone ;
- la station Ancien Maelbeek – Rue Metsys ;

- la station Ancien Maelbeek – Verboekhoven 1 ;
- la station Ancien Maelbeek – Verboekhoven 2 ;
- la station Nouveau Maelbeek – Avenue Voltaire ;
- la station Vergote - Waelhem ;
- la station Nouveau Maelbeek – Verboekhoven ;
- la station Nouveau Maelbeek – Amont Kerkebeek ;
- la station Kerkebeek Houtweg ;
- la station Kerkebeek Carli ;
- la station Emissaire STEP Nord.

La **FIGURE 5-34** ci-dessous illustre la localisation de ces stations.

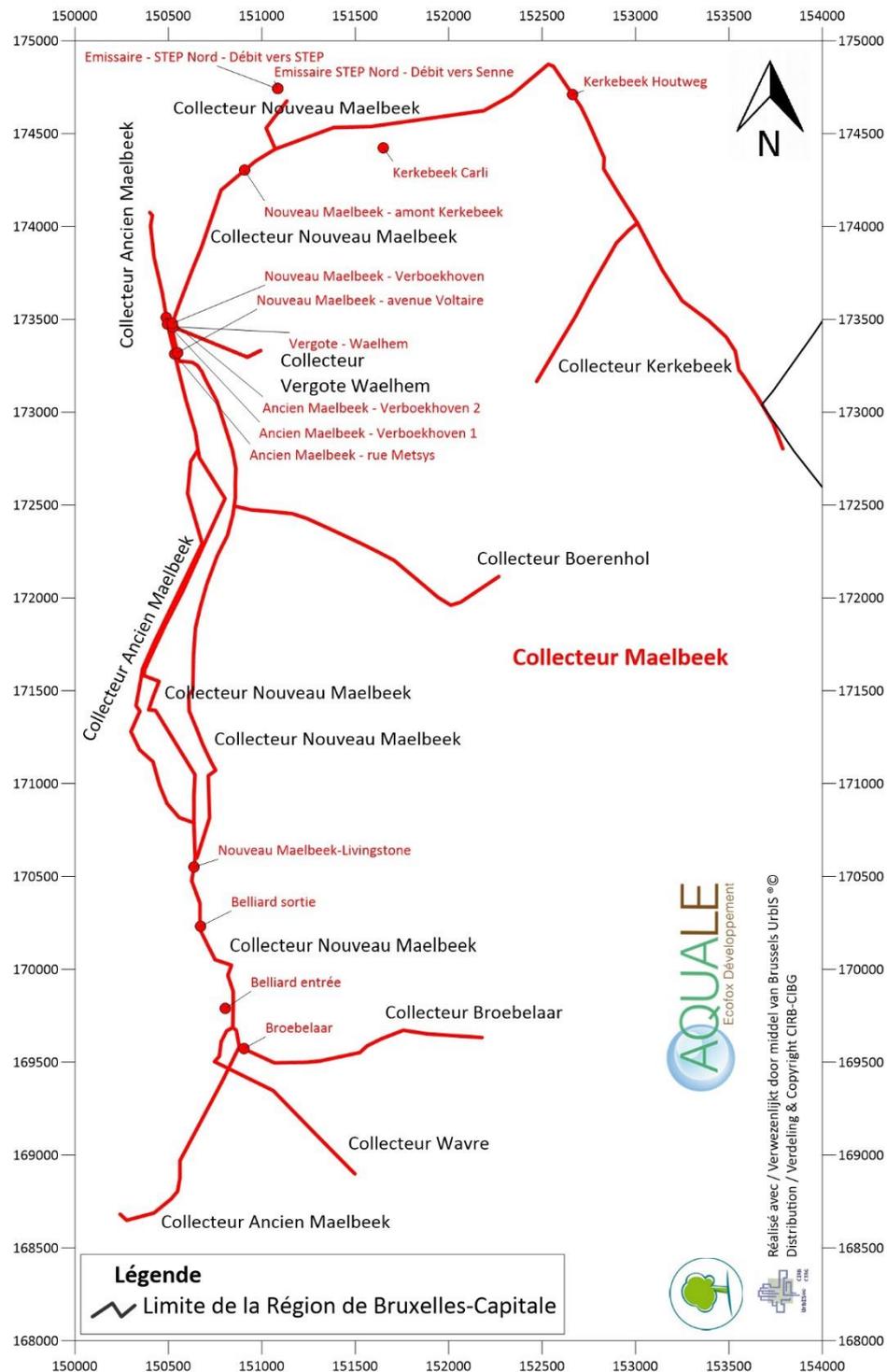


Figure 5-34 : Collecteur Maelbeek

Trois collecteurs sont situés à l'extrémité Sud du réseau : les collecteurs Broebelaar, Wavre et Ancien Maelbeek. Ils entraînent l'eau vers un point de rassemblement légèrement en amont de la station Belliard Entrée. Sur un court tronçon, l'eau est ensuite acheminée via un seul collecteur appelé Nouveau Maelbeek.

Ensuite, sur une assez longue portion, le collecteur est divisé en trois tronçons parallèles : deux d'entre eux s'appellent Nouveau Maelbeek alors que le troisième s'appelle Ancien Maelbeek. Le collecteur Boerenhol entraîne les eaux depuis l'Est vers l'Ouest et les déverse dans le collecteur Nouveau Maelbeek situé le plus à l'Est.

Le collecteur Nouveau Maelbeek poursuit son trajet vers le Nord et les eaux du collecteur Vergotte Waelhem viennent s'y déverser.

Le collecteur Ancien Maelbeek poursuit quant à lui son trajet vers le Nord et vient se greffer sur le collecteur principal Emissaire Nord Rive Droite (voir ci-après).

Le collecteur Kerkebeek entraîne les eaux depuis le Sud vers le Nord dans un premier temps puis un coude entraîne les eaux vers l'Ouest pour rejoindre le collecteur Nouveau Maelbeek en aval de la station Kerkebeek Carli.

Finalement, le collecteur Nouveau Maelbeek entraîne ses eaux vers la STEP Nord.

Les débits parasites ont été évalués pour les mêmes périodes et selon la même méthode.

Le tableau suivant (**TABLEAU 5-14**) reprend les différentes observations.

X	Y	Station	Collecteur concerné	Collecteur principal	Débit parasite avril 2007 (l/s)	Débit parasite mai 2013 (l/s)
150905	169575	Broebelaar	Broebelaar	Ancien / Nouveau Maelbeek	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit
150803	169789	Belliard entrée	Nouveau Maelbeek amont	Ancien / Nouveau Maelbeek	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit
150671	170232	Belliard sortie	Nouveau Maelbeek amont	Ancien / Nouveau Maelbeek	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit
150636	170551	Nouveau Maelbeek-Livingstone	Nouveau Maelbeek amont	Ancien / Nouveau Maelbeek	pas de mesure de débit	110
150533	173313	Ancien Maelbeek - rue Metsys	Ancien Maelbeek	Ancien Maelbeek	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit
150496	173475	Ancien Maelbeek - Verboekhoven 1 (amont liaison ancien / nouveau)	Ancien Maelbeek	Ancien Maelbeek	pas de mesure de débit	70
150489	173510	Ancien Maelbeek - Verboekhoven 2 (aval liaison ancien / nouveau)	Ancien Maelbeek	Ancien Maelbeek	pas de mesure de débit	55

X	Y	Station	Collecteur concerné	Collecteur principal	Débit parasite avril 2007 (l/s)	Débit parasite mai 2013 (l/s)
150548	173320	Nouveau Maelbeek - avenue Voltaire	Nouveau Maelbeek	Nouveau Maelbeek	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit
150525	173460	Vergote - Waelhem (branchement avec le nouveau Maelbeek)	Vergote - Waelhem	Nouveau Maelbeek	pas de mesure de débit	150
150521	173478	Nouveau Maelbeek - Verboekhoven (amont liaison ancien / nouveau)	Nouveau Maelbeek	Nouveau Maelbeek	pas de mesure de débit	300
150907	174302	Nouveau Maelbeek - amont Kerkebeek	Nouveau Maelbeek	Nouveau Maelbeek	240	240
152662	174710	Kerkebeek Houtweg	Kerkebeek	Nouveau Maelbeek	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit
151649	174423	Kerkebeek Carli	Kerkebeek	Nouveau Maelbeek	pas de mesure de débit	18
151084	174741	Emissaire - STEP Nord - Débit vers STEP	Emissaire rive droite	Emissaire rive droite	pas de mesure de débit	500 (mesure d'avril – mai 2013 car la mesure de juin semble éronnée)

Tableau 5-14 : Observations du débit parasite sur le collecteur Maelbeek

Les conclusions suivantes peuvent être émises :

- puisque la première mesure de débit est réalisée à la station Nouveau Maelbeek Livingstone, il peut être estimé que le débit drainé sur l'ensemble des tronçons en amont est d'environ 110 l/s, soit 9 500 m³/j ; la distinction entre les débits drainés par les trois collecteurs Ancien Maelbeek Amont, Wavre et Broebelaar n'est pas possible ;
- les deux stations Ancien Maelbeek – Verboekhoven illustre qu'une partie du débit mesuré à la station Nouveau Maelbeek Livingstone est acheminée dans le collecteur Ancien Maelbeek (une partie seulement, vu que le débit en amont est déjà de 110 l/s alors qu'on a 70 et 55 l/s aux stations Ancien Maelbeek Verboekhoven) ;
- la station Ancien Maelbeek Verboekhoven 2, la plus en aval, est caractérisée par un débit plus faible que la station Ancien Maelbeek Verboekhoven 1, cela doit être lié à une imprécision sur les mesures ;

- l'apport spécifique en provenance du collecteur Boerenhol ne peut pas être estimé ;
- le débit drainé par le collecteur Vergote Waelhem est d'environ 150 l/s, soit 13 000 m³/j. Cela semble très élevé au vu de la longueur de ce collecteur ;
- le débit mesuré à la station Nouveau Maelbeek Verboekhoven (300 l/s) est considéré comme moins fiable que le débit mesuré à la station Nouveau Maelbeek – amont Kerkebeek (240 l/s, soit 21 000 m³/j), c'est donc ce dernier débit qui est utilisé comme référence pour l'évaluation du drainage ;
- si on ne cherche pas à distinguer l'impact des trois tronçons parallèles (2 x Nouveau Maelbeek et Ancien Maelbeek), on peut considérer, compte tenu d'un débit amont à Livingstone de 110 l/s et d'un débit en sortie de 300 l/s (environ 60 l/s mesurés dans l'Ancien Maelbeek Verboekhoven (entre 55 et 70 selon les deux stations de mesure) et 240 l/s mesurés dans le Nouveau Maelbeek – amont Kerkebeek), un drainage d'environ 190 l/s, soit 16 400 m³/j sur l'ensemble des collecteurs situés entre Livingstone et la station Nouveau Maelbeek – amont Kerkebeek ;
- le débit mesuré à la station Kerkebeek Carli indique que le tronçon amont du collecteur Kerkebeek est caractérisé par un débit de drainage d'environ 18 l/s, soit 1 600 m³/j ;
- le débit mesuré en entrée de la STEP Nord provient du collecteur Maelbeek mais aussi du collecteur Emissaire rive droite décrit ci-après. Le débit éventuellement drainé sur la dernière portion du collecteur Maelbeek sera estimé après intégration des débits du collecteur Emissaire rive droite.

5.1.2.4.6 COLLECTEUR EMISSAIRE RIVE DROITE

Quatre stations de mesure sont disposées le long du collecteur Emissaire rive droite. D'amont en aval, il s'agit de :

- la station Jonction Place de la Constitution ;
- la station Rue Masui ;
- la station Rue Gaucheret ;
- la station Emissaire STEP Nord.

La **FIGURE 5-35** ci-dessous illustre la localisation de ces stations.

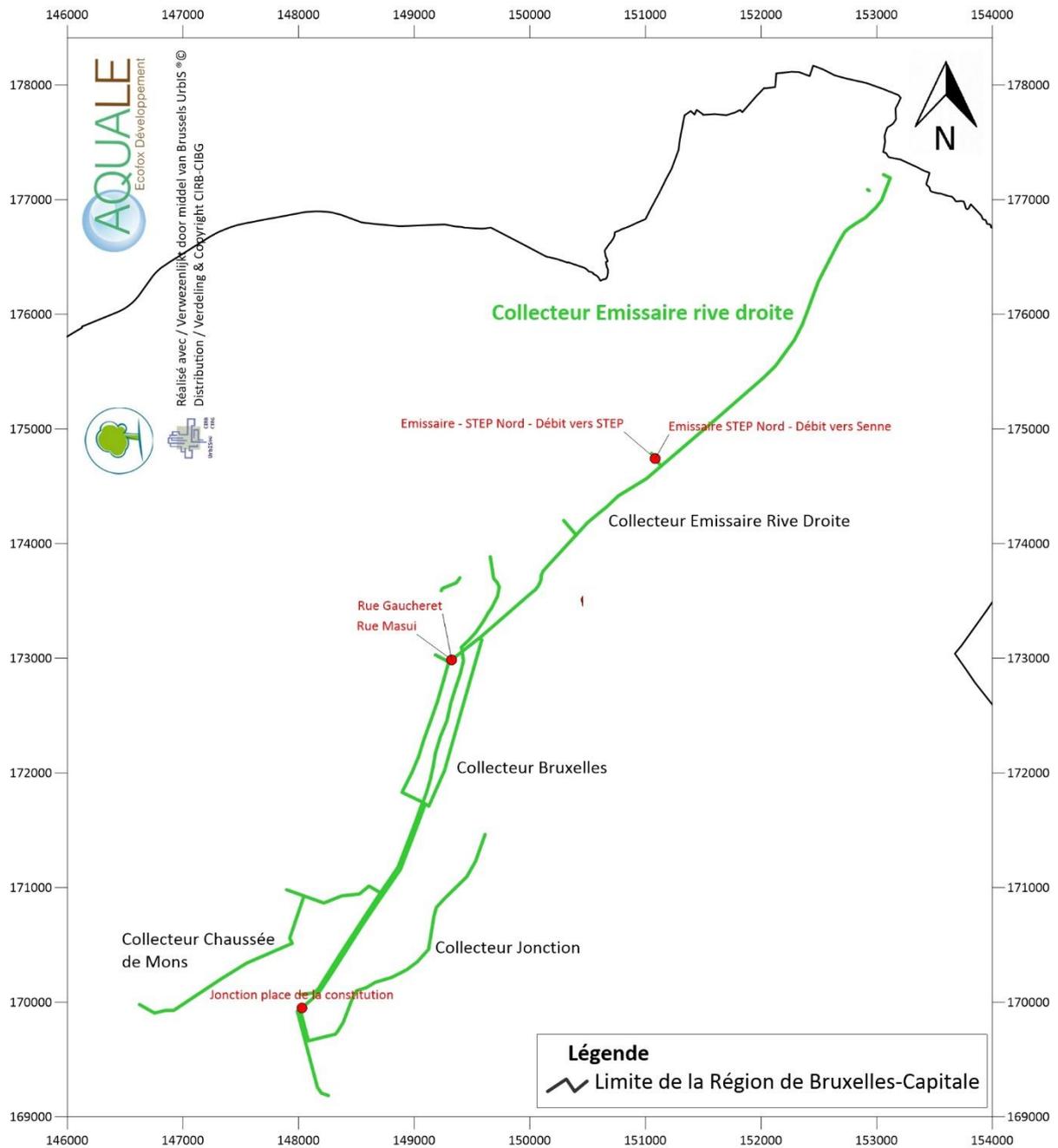


Figure 5-35 : Collecteur Emissaire rive droite

Les collecteurs Chaussée de Mons et Jonction acheminent l'eau en direction du collecteur principal. Une fois dans ce collecteur principal, l'eau est acheminée depuis le Sud vers le Nord jusqu'à la STEP Nord.

Les débits parasites ont été évalués pour les mêmes périodes et selon la même méthode.

Le tableau suivant (**TABLEAU 5-15**) reprend les différentes observations.

X	Y	Station	Collecteur concerné	Collecteur principal	Débit parasite avril 2007 (l/s)	Débit parasite mai 2013 (l/s)
148030	169948	Jonction place de la constitution	Collecteur BXL	Emissaire rive droite	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit
149324	172987	Rue Masui	Emissaire rive droite	Emissaire rive droite	58	pas de mesure de débit
149324	172987	Rue Gaucheret	Emissaire rive droite	Emissaire rive droite	pas de mesure de débit	pas de mesure de débit
151084	174741	Emissaire - STEP Nord - Débit vers STEP	Emissaire rive droite	Emissaire rive droite	pas de mesure de débit	500 (mesure d'avril – mai 2013 car la mesure de juin semble éronnée)

Tableau 5-15 : Observations du débit parasite sur le collecteur Emissaire rive droite

Les conclusions suivantes peuvent être émises :

- la seule mesure de débit avant la STEP Nord est réalisée à la station Rue Masui, dans une zone où le collecteur principal est subdivisé en 3 collecteurs parallèles. La mesure à la station Rue Masui apporte donc peu d'informations sur le débit de drainage en amont.
- le débit d'entrée à la STEP Nord est d'environ 500 l/s, soit 43 000 m³/j. Les apports à cette station proviennent :
 - o du collecteur Nouveau Maelbeek + Kerkebeek : apport compris entre 250 et 300 l/s, soit 22 000 et 26 000 m³/j ;
 - o du collecteur Ancien Maelbeek : apport d'environ 60 l/s, soit 5 200 m³/j ;
 - o du collecteur Emissaire Rive droite : apport connu à la station Masui d'environ 58 l/s, soit 5 000 m³/j ;

Il est dès lors difficile d'évaluer le débit de drainage sur les tronçons arrivant à la STEP Nord. On peut estimer que le débit de drainage total sur le collecteur Emissaire rive droite, le tronçon d'Ancien Maelbeek en aval de la station Verboekhoven 2 et le tronçon de Nouveau Maelbeek en aval de la station Nouveau Maelbeek – amont Kerkebeek doit être compris entre 150 et 200 l/s (500 – 275 – 60), soit 13 000 et 17 000 m³/j.

5.1.2.4.7 SYNTHÈSE CONCERNANT LES COLLECTEURS EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE

La **FIGURE 5-36** ci-dessous reprend de manière synthétique l'estimation des débits de drainage sur l'ensemble des collecteurs en Région de Bruxelles-Capitale.

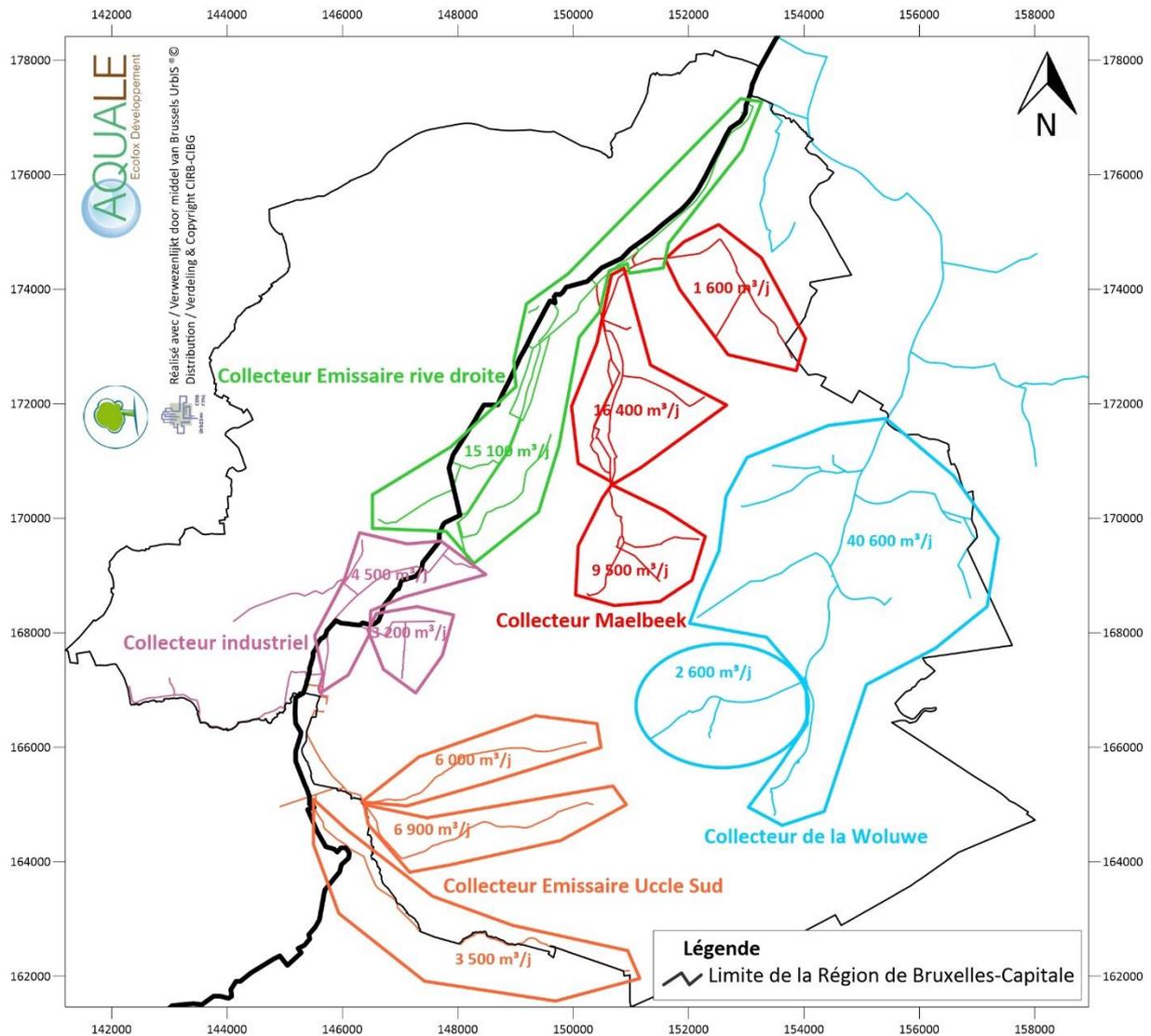


Figure 5-36 : Débits drainés par les collecteurs en Région de Bruxelles-Capitale

Tous ces collecteurs sont localisés à l'intérieur du modèle, à l'exception d'une bonne partie du collecteur industriel qui drainerait environ 4 500 m³/j et du collecteur Chaussée de Mons (partie amont du collecteur Emissaire rive droite).

Si on retranche, aux débits de drainage estimés, les parties de collecteurs situées en rive gauche de la Senne, les débits estimés peuvent être réduits au prorata de la longueur du collecteur concerné.

Ainsi, pour le collecteur industriel, le débit de 4 500 m³/j est lié à un collecteur dont la longueur totale est de 6.4 km, dont 3 km situés en dehors du modèle. On considérera donc qu'un débit de 2 300 m³/j est potentiellement drainé par le tronçon du collecteur situé à l'intérieur de la zone modélisée.

De la même manière, pour le collecteur Emissaire Nord Rive Droite, le débit de 15 100 m³/j est lié à un collecteur dont la longueur totale est de 22.5 km, dont 2.1 km situés en dehors du modèle. On considérera donc qu'un débit de 13 800 m³/j est potentiellement drainé par le tronçon du collecteur situé à l'intérieur de la zone modélisée.

La **FIGURE 5-36** présentée ci-dessus peut donc être adaptée de la manière suivante (**FIGURE 5-37**).

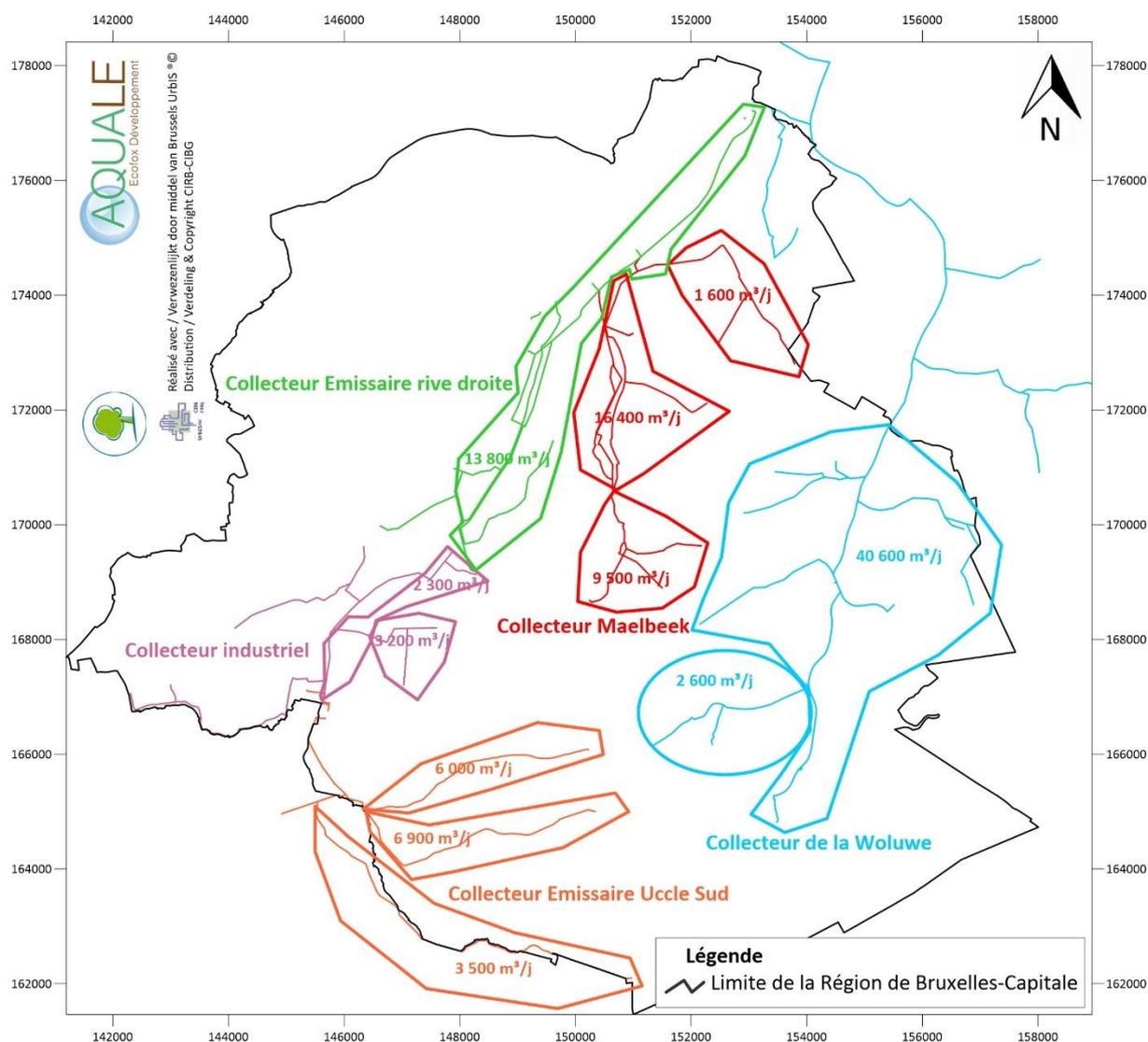


Figure 5-37 : Débits drainés par les collecteurs en rive droite de la Senne en Région de Bruxelles-Capitale

Le potentiel de drainage des différents collecteurs peut être ramené à un débit drainé par unité de longueur.

Le **TABLEAU 5-16** ci-après reprend, pour chaque unité de drainage identifiée sur la carte ci-dessus, le débit drainé par km de collecteur.

Collecteur	Débit drainé (m ³ /j)	Longueur (km)	Débit drainé par km (m ³ /j/km)
Drogenbos	3 500	7.1	493
Saint-Job	6 900	4.8	1 438
Ukkelbeek	6 000	4.2	1 429

Collecteur	Débit drainé (m ³ /j)	Longueur (km)	Débit drainé par km (m ³ /j/km)
Forest	3 200	2.3	1 391
Industriel	2 300	3.0	767
Woluwe	40 600	19.6	2 071
Watermaelbeek	2 600	3.9	667
Maelbeek amont	9 500	4.9	1 939
Maelbeek aval	16 400	11.8	1 390
Kerkebeek	1 600	4.5	356
Emissaire rive droite	13 800	22.2	622

Tableau 5-16 : Débit drainé par km de collecteur

Il apparaît que le débit drainé par km de tronçon est assez variable selon la zone où l'on se trouve.

Au total, les collecteurs draineraient environ 106 400 m³/j (et ce, sans considérer le tronçon aval de la Woluwe, situé hors de la Région de Bruxelles-Capitale, mais drainant fort probablement un débit de l'ordre de 27 000 m³/j selon Wollast et al.²²). Avec ce dernier tronçon, on obtient donc un débit total drainé de 133 400 m³/j.

Les mesures de débits dans les collecteurs sont basées en grande majorité sur des mesures de niveaux d'eau dont on déduit des débits sur base de courbes de tarage (relation Q-H). Ces courbes de tarage sont des relations empiriques entre la hauteur d'eau H et le débit Q déterminées par des campagnes de mesures lors desquelles un débitmètre (mesurant entre autres la vitesse moyenne de l'écoulement) est placé pour la durée de la campagne en parallèle du capteur de niveau d'eau. Trois conditions sont nécessaires pour obtenir une bonne courbe de tarage, il faut :

- (1) que la campagne de mesures ait permis de couvrir suffisamment la gamme des débits possibles ;
- (2) que la relation Q-H soit unique (c'est-à-dire qu'elle ne présente pas d'hystérèse lié à des phénomènes d'engorgement aval) ;
- (3) que la relation soit stable dans le temps (c'est-à-dire que ni le niveau de fond ni la géométrie en général de l'ouvrage n'évoluent au cours du temps).

Les première et deuxième conditions sont difficiles à rencontrer pour les plus grosses crues, mais pour les faibles débits, il n'y a *a priori* pas de problème. La troisième condition peut être plus problématique, en particulier pour les faibles débits, puisque des phénomènes d'envasement du collecteur peuvent modifier le niveau de fond de l'écoulement. Suite à la sédimentation, le niveau de fond se relève, les niveaux d'eau sont par conséquent plus hauts qu'en situation normale. Le débit qui leur est associé par la courbe de tarage (qui considère une situation sans envasement) est alors exagérément haut. Selon une estimation faite sur la base de son retour d'expérience (aucune autre donnée pertinente n'étant disponible), le Département Eau de Bruxelles Environnement considère que, dans de bonnes conditions de terrain, l'erreur d'estimation des débits par relation Q-H tourne autour de 10 %. Dans les collecteurs, on estime à 20 % l'erreur liée à la courbe Q-H. Pour les débits les plus faibles, l'erreur peut croître jusqu'à 50%.

Dans le présent cas, on estime que l'erreur est obligatoirement une surestimation. Puisqu'il s'agit des débits très faibles, cette erreur peut atteindre 50 % de la mesure. Dès lors, au lieu de considérer que le débit de drainage total est de 133 400 m³/j, il y a lieu de considérer qu'il sera compris entre 66 700 et 133 400 m³/j (entre 50 et 100 % de la valeur mesurée). De plus, la mesure du débit parasite est forcément influencée par un apport anthropique, même en période de nuit, lié à l'utilisation des électro-ménagers en période creuse ou encore lié

²² Réseau de surveillance des écoulements et des charges polluantes dans les collecteurs d'amenée à la future station d'épuration de Bruxelles – Nord, Rapport final, octobre 1992, Université Libre de Bruxelles, Laboratoire de Traitement des Eaux et Pollution

au fonctionnement 24h/24 de certaines entreprises. Il est considéré, sur la base de l'expérience d'Aquale et du Département Eau de Bruxelles Environnement (aucune autre donnée pertinente n'étant disponible), que cet apport anthropique est compris entre 10 et 20 %. La fourchette de débit drainé qui était de 66 700 et 133 400 m³/j peut dès lors être revue. Si l'on diminue de 20 % la limite inférieure, on obtient 53 000 m³/j. Si on diminue de 10 % la limite supérieure, on obtient 120 000 m³/j. En arrondissant nos estimations, il apparaît dès lors que le débit drainé par les collecteurs en Région de Bruxelles-Capitale (y inclus le tronçon du collecteur Woluwe en Région Flamande) doit être compris entre 50 000 et 120 000 m³/j. Cette estimation intègre le drainage du collecteur Haren pour lequel aucune mesure Flowbru n'est disponible. Selon l'étude Wollast et al., il est cependant très faible (entre 1 700 et 2 600 m³/j).

Les valeurs estimées pour les différents collecteurs sont très proches des valeurs par ailleurs estimées dans le cadre d'une étude réalisée par l'IBGE en février 2011²³.

Enfin, un dernier article, rédigé par de Ville²⁴, indique que sur une base annuelle, environ 35 % du volume total traité quotidiennement par la station d'épuration Nord de Bruxelles correspond à des eaux claires parasites avec environ 65.000 m³/jour en été et 150.000 m³/jour en hiver. Sur la base des données présentées dans cet article, il semblerait que l'étude est réalisée sur les jours de temps sec uniquement.

En se basant sur cette estimation de 35 % et en utilisant l'historique des relevés d'eau entrant dans les stations d'épuration Sud et Nord de Bruxelles, on peut dès lors vérifier l'estimation réalisée sur la base des données Flowbru.

Pour la station d'épuration Nord, le débit moyen journalier par temps sec (une journée complète caractérisée par une pluviométrie de 0 mm à la station d'Uccle) en provenance des collecteurs de la rive droite sur les années 2007 à 2013 est de 166 972 m³/j (ce débit est assez constant d'une année à l'autre – à titre d'information, il est de 158 529 m³/j pour l'année 2013). En prenant 35 % de ce débit pour l'évaluation du débit parasite, on obtient 58 440 m³/j.

De la même manière pour la station d'épuration Sud, le débit moyen journalier par temps sec en provenance des collecteurs de la rive droite sur les années 2010 à 2013 est de 34 439 m³/j (ce débit est assez constant d'une année à l'autre – à titre d'information, il est de 34 657 m³/j pour l'année 2013). En prenant 35 % de ce débit pour l'évaluation du débit parasite, on obtient 12 054 m³/j.

En sommant les débits parasites des deux stations, on obtient dès lors un débit total de 70 500 m³/j. Ce débit est bien inclus dans la fourchette préalablement estimée (50 000 à 120 000 m³/j).

Si la méthode décrite par de Ville est considérée comme une bonne approximation, nous pouvons également considérer que le débit finalement estimé, même s'il tient compte uniquement des jours sans pluie, est partiellement impacté par les lendemains de pluie. Dès lors, les 70 500 m³/j sont considérés comme une limite supérieure probable du drainage par les collecteurs.

On conclut dès lors cette estimation en réduisant notre fourchette de valeurs admissibles pour le drainage par les collecteurs aux valeurs comprises entre 50 000 et 70 000 m³/j.

²³ RIE du projet de programme de mesures PGE, Rapport sur les incidences environnementales du projet de programme de mesures accompagnant le plan de gestion de l'eau de la Région de Bruxelles-Capitale, Bruxelles Environnement, Février 2011

²⁴ Data-mining analysis of in-sewer infiltration patterns : seasonal characteristics of clearwater seepage into Brussels main sewers, N. de Ville, H.M. Le et M.A. Verbanck, Mars 2014

5.1.2.5 SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS DES DÉBITS

L'observation des débits se fait à de multiples échelles :

- au niveau des sources ;
- dans la galerie Vivaqua ;
- dans les principaux ruisseaux ;
- dans les collecteurs.

Les débits mis en jeu couvrent une très large gamme de valeurs et de nombreuses incertitudes sur ces valeurs existent. Une synthèse des valeurs à reproduire est reprise ci-dessous dans le **TABLEAU 5-17**. Ce tableau reprend l'ensemble des valeurs à reproduire ou, plus généralement, les gammes de valeurs jugées acceptables pour une bonne calibration du modèle hydrogéologique.

Dans le cadre du régime permanent, ce sont ces valeurs qui doivent être reproduites.

Dans le cadre du régime transitoire, les débits sortants du modèle seront comparés aux chroniques de débits des rivières, collecteurs et galerie pour la période 2009 – 2013. Les gammes de valeurs reprises dans le tableau ci-dessous représentent bien les gammes de valeurs acceptables également pour le régime transitoire. Le débit des sources n'est pas vérifié en régime transitoire dès lors que celles-ci ont un impact négligeable. Cette dernière remarque n'est pas valable pour les sources du Sylvain, de l'Empereur, Trois Fontaines et Vuylbeek, qui sont bien prises en considération au niveau du drainage par les tronçons amont de la Woluwe.

Pour les rivières, une valeur maximale de drainage a souvent été estimée. A défaut de connaître la valeur minimale acceptable, un débit de 10 % de la valeur maximale est défini comme valeur minimale. Pour les tronçons amont de la Woluwe, le débit minimal autorisé est de 80 % de la valeur maximale autorisée dès lors qu'il est supposé que le débit de ces tronçons est grandement lié à l'apport des nappes. En effet, il apparaît dans les différentes chroniques de débits de la Woluwe que le débit de la rivière augmente fortement sur les tronçons les plus amont et nettement moins sur le tronçon aval. Cela est lié à la présence du collecteur de la Woluwe dans la partie avale. Si le collecteur provoque l'absence d'augmentation du débit de la rivière dans la partie avale, c'est parce que le débit est surtout influencé par le drainage de la nappe plutôt que par des déversements directs ou par le ruissellement de surface (sans quoi le débit de la rivière continuerait à augmenter dans sa partie avale). Ceci est d'autant plus vrai que l'infiltration est élevée en amont de la Woluwe.

Type	Nom	Valeur à reproduire (m ³ /j)
Source	Source Defré	Environ 68
Source	Source du Sylvain*	Environ 314
Source	Source de l'Empereur*	Environ 940
Source	Source Félix Haps	Environ 16
Source	Source Fond Roy	Environ 42
Source	Source Fontaine de l'Amour	Environ 38
Source	Source Keelbeek	Environ 56
Source	Source Kinsendael	Environ 65
Source	Source Stade Falon	Environ 55
Source	Source Trois Fontaines*	Environ 482
Source	Source Vuylbeek*	Environ 58
Galerie	Galerie Vivaqua	Entre 5 200 et 5 600
Rivière	Senne (tout le tronçon formant la limite Ouest du modèle)	Entre 7 000 et 70 000
Rivière	Dyle (tout le tronçon formant la limite Est du modèle)	Entre 5 000 et 50 000

Type	Nom	Valeur à reproduire (m ³ /j)
Rivière	Argentine (tout le tronçon formant la limite Sud du modèle)	Entre 860 et 8 600
Rivière	Lasne (tout le tronçon formant la limite Sud du modèle)	Entre 1 000 et 10 500
Rivière	Hain (tout le tronçon formant la limite Sud du modèle)	Entre 820 et 8 200
Rivière	Woluwe (en amont de Middlebourg)	Entre 1 800 et 2 200
Rivière	Rode (en amont de Kloosterberg)	Entre 4 400 et 5 500
Rivière	Woluwe (en amont de Gobert mais en aval de Kloosterberg et Middlebourg)	Proche de 0
Rivière	Woluwe (en amont de la sortie Région mais en aval de Gobert)	Proche de 0
Rivière	Voer	Entre 2 000 et 20 000
Rivière	Ijse	Entre 2 000 et 20 000
Collecteurs	Tous les collecteurs	Entre 50 000 et 70 000
Collecteurs	Collecteurs vers STEP Nord	Entre 43 000 et 58 000
Collecteurs	Collecteurs vers STEP Sud	Entre 7 000 et 12 000

* le débit des 3 sources majeures (Sylvain, Empereur, Trois Fontaines) est à intégrer dans le débit drainé par le Rode en amont de Kloosterberg. Lors de la vérification de l'état de calibration, ces débits des sources ne seront donc pas à ajouter au débit autorisé pour le Rode. Cette remarque est valable également pour la Source Vuylbeek qui sera intégrée dans le débit drainé par la Woluwe en amont de Middlebourg.

Tableau 5-17 : Synthèse de l'observation des débits

Ces valeurs sont donc obtenues grâce à l'ensemble des interprétations présentées dans les pages précédentes. Il apparaît que certaines valeurs sont négligeables (les débits de quelques sources) par rapport à d'autres (drainage par le réseau hydrographique et les collecteurs).

Les valeurs à reproduire pour les collecteurs sont des valeurs globales car l'imprécision liée à la méthode d'évaluation est trop importante. Il ne convient donc pas de reproduire les débits individuellement estimés pour chaque collecteur.

5.2 ETAPE #6 - DÉFINITION DES PARAMÈTRES D'ÉCOULEMENT

Les formations prises en compte dans le modèle conceptuel sont regroupées selon diverses unités hydrogéologiques au sein desquelles les formations possèdent un comportement hydrogéologique similaire. Ainsi, pour la zone modélisée, les unités hydrogéologiques suivantes (5 unités pour notre modèle) sont conceptualisées, depuis les terrains les plus récents vers les terrains les plus anciens :

- *nappe superficielle* :
 - o séries du Holocène et Pléistocène ;
 - o formations de Diest et Sint-Huilbrechts-Hern ;
 - o Formation de Maldegem (Membre de Zomergem) bien que la formation constitue un aquiclude d'argile grise et gris-bleue, elle n'est présente que partiellement sur la zone modélisée ;
 - o Formation de Maldegem (Membre d'Onderdale) ;

- aquiclude comprenant la Formation de Maldegem (Membres d'Ursel et d'Asse) ;
- *nappe du Bruxellien*, comprenant les formations de:
 - o Maldegem (Membre de Wemmel) ;
 - o Lede ;
 - o Bruxelles ;
- aquiclude comprenant la Formation de Gent (Membre de Merelbeke) ;
- *nappe de l'Yprésien* comprenant les formations de :
 - o Tielt ;
 - o Kortrijk (membres d'Aalbeke et de Moen).

Ces cinq unités hydrogéologiques distinctes sont prises en compte séparément, chacune ayant des propriétés hydrogéologiques et paramètres hydrodynamiques différents. Les formations intégrées au sein d'une même unité hydrogéologique possèdent un comportement hydrogéologique globalement commun. Néanmoins, elles peuvent présenter localement de très grandes variabilités de leurs paramètres hydrodynamiques, entre formations différentes mais également au sein d'une même formation (comme en attestent en particulier les valeurs de conductivité hydraulique déterminées par pompage d'essai).

Puisque le modèle est constitué de cinq Layers qui représentent un total de neuf formations géologiques dont certaines sont à leur tour subdivisées en membres, une subdivision du modèle par groupe de cellules a été réalisée pour tenir compte des différentes lithologies rencontrées :

- Quaternaire uniquement ;
- Quaternaire et Sint-Huilbrechts-Hern ;
- Quaternaire, Sint-Huilbrechts-Hern et Diest ;
- Quaternaire et Onderdale ;
- Quaternaire, Onderdale et Zomergem ;
- Ursel et Asse ;
- Bruxellien uniquement ;
- Bruxellien et Lede ;
- Bruxellien, Lede et Wemmel ;
- Merelbeke ;
- Moen uniquement ;
- Moen et Aalbeke ;
- Moen, Aalbeke et Tielt.

La **FIGURE 5-38** illustre, à titre d'exemple, cette subdivision en zones de propriétés équivalentes au sein de la Layer 3.

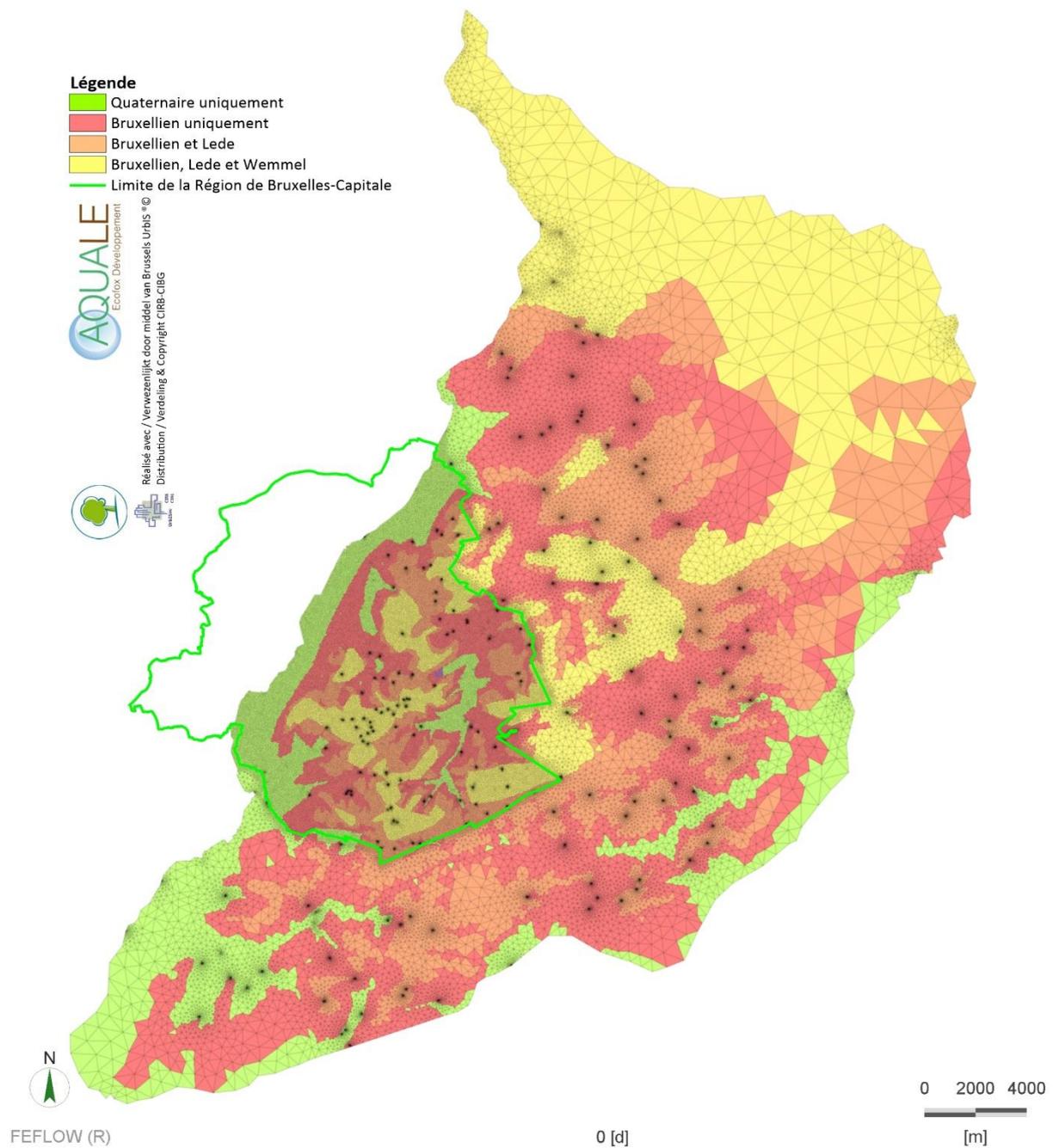


Figure 5-38 : Subdivision en zones de propriétés équivalentes au sein de la Layer 3

5.2.1 CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

Les conductivités hydrauliques imposées aux différentes zones du modèle sont reprises au **TABLEAU 5-18** ci-dessous.

Zones	K_{xx} [m/s]	K_{yy} [m/s]	K_{zz} [m/s]
Quaternaire uniquement	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-6}
Quaternaire et Sint-Huilbrechts-Hern	8×10^{-6}	8×10^{-6}	8×10^{-7}
Quaternaire, Sint-Huilbrechts-Hern et Diest	2×10^{-5}	2×10^{-5}	2×10^{-6}
Quaternaire et Onderdale	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-6}
Quaternaire, Onderdale et Zomergem	7×10^{-6}	7×10^{-6}	7×10^{-7}
Ursel-et-Asse	1×10^{-7}	1×10^{-7}	1×10^{-8}
Bruxellien uniquement	6.6×10^{-5}	6.6×10^{-5}	6.6×10^{-6}
Bruxellien et Lede	2.6×10^{-5}	2.6×10^{-5}	2.6×10^{-6}
Bruxellien, Lede et Wemmel	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-6}
Merelbeke	1.2×10^{-8}	1.2×10^{-8}	1.2×10^{-9}
Moen uniquement	2.9×10^{-5}	2.9×10^{-5}	2.9×10^{-6}
Moen et Aalbeke	2.6×10^{-5}	2.6×10^{-5}	2.6×10^{-6}
Moen, Aalbeke et Tielt	1.8×10^{-5}	1.8×10^{-5}	1.8×10^{-6}

Tableau 5-18 : Conductivités hydrauliques imposées aux zones de propriétés équivalentes du modèle

Il est important de noter que ces valeurs sont assignées aux zones de propriétés équivalentes mais que des adaptations des paramètres sont réalisées localement en cours de calibration. Ainsi, à titre d'exemple, la conductivité hydraulique des cellules de *Bruxellien uniquement* atteint localement 6×10^{-4} m/s au Sud de la Région de Bruxelles-Capitale en amont de la galerie Vivaqua, 2×10^{-4} en Région de Bruxelles-Capitale en amont de la Woluwe, 1.3×10^{-4} m/s à proximité de la Lasne en bordure Est du modèle ou encore 1.3×10^{-6} m/s en Région de Bruxelles-Capitale, à proximité de la Senne.

Les conductivités hydrauliques imposées au modèle hydrogéologique sont déterminées sur la base de pompage d'essai réalisés au sein des formations concernées ou issues d'études plus générales réalisées à plus grande échelle²⁵.

²⁵ Rapport grondwatermodel Zijdeweverijstraat te Vorst, C1116 / D001, Universoil, 30 juin 2010
 Complément d'étude de risque, étude d'assainissement, Vincotte, Septembre 2006
 Bruxelles, Angle de l'Avenue Bénés et du Château, Smet-Boring, Septembre 2013
 Logements Molenbeek Saint Jean, Rue de Bonne, Smet-Boring, 13 mai 2013
 Forêt de Soignes, aquifère du Bruxellien, J. Chaboteaux
 Stroomgebiedbeheerplannen voor Schelde en Maas 2016-2021, Grondwatersysteemspecifiek deel
 Brulandkrijtsysteem, Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid, Juillet 2014
 Stroomgebiedbeheerplan voor de Schelde 2016-2021, Grondwatersysteemspecifiek deel Centraal Vlaams
 Systeem, Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid, Juillet 2014
 Opbouw van een Vlaams Grondwatervoedingsmodel, Deelrapport 1, Centraal Vlaams Grondwatersysteem,
 Onderzoeksopdracht voor het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en
 Infrastructuur, Administratie Milieu, Natuur, Land en Waterbeheer, AMINAL, afdeling Water, 18 mai 2004

5.2.2 POROSITÉ EFFICACE

Les données publiées sur la porosité efficace des sables du Bruxellien sont rares. Haecon²⁶ (2007) propose une valeur régionale de 0.15. Selon Ruthy et Dassargues²⁷ (2001), la porosité efficace des sables est comprise entre 0.035 et 0.058. Ces valeurs sont obtenues à partir de l'interprétation d'un essai de traçage.

Dans le modèle, une porosité de 0.035 a été imposée à toutes les cellules à l'exception :

- des zones correspondants aux Membres d'Ursel et d'Asse, pour lesquels une porosité de 0.01 est imposée ;
- d'une zone de Quaternaire située au Nord de la Région de Bruxelles-Capitale, pour laquelle une porosité de 0.07 est imposée.

Cette zonation très simple résulte de la calibration en régime transitoire.

Elle fera l'objet, au même titre que les autres paramètres d'entrée du modèle, de l'étude de sensibilité (**CHAPITRE 6**) afin de vérifier l'impact de modifications de ce paramètre sur les résultats de modélisation.

5.2.3 COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT

Selon Luk Peeters²⁸ (2010), des essais de pompage réalisés dans les puits de production situés au Nord de la zone d'étude ont donné un coefficient d'emménagement spécifique moyen de $2.17 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$.

Dans le modèle, cette valeur a été imposée à l'ensemble des cellules.

Cette zonation très simple résulte de la calibration en régime transitoire.

Elle fera l'objet, au même titre que les autres paramètres d'entrée du modèle, de l'étude de sensibilité (**CHAPITRE 6**) afin de vérifier l'impact de modifications de ce paramètre sur les résultats de modélisation.

5.3 ETAPE #7 – VISUALISATION DES RÉSULTATS

5.3.1 CALIBRATION EN RÉGIME PERMANENT – PÉRIODE DE MAI-JUIN 2013

La calibration de la piézométrie est réalisée en prenant comme référence les niveaux d'eau mesurés ou estimés dans les piézomètres repris dans les **TABLEAUX 5-1, 5-2 et 5-3** ci-avant (**CHAPITRE 5.1.1**).

Les **TABLEAUX 5-19 à 5-21** ci-dessous présentent, respectivement pour les *nappes superficielle, du Bruxellien et de l'Yprésien*, les valeurs mesurées et simulées au droit des divers points d'observation ainsi que la différence

²⁶ Haecon, 2007, Ontwikkelen van regionale modellen ten behoeve van het Vlaamse Grondwater Model (VGM) in GMS/MODFLOW : Perceel nr. 3: Brulandkrijtmodel. Technical report, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Dept. Leefmilieu en Infrastructuur, Administratie Milieu-, Natuur-, Land- en Waterbeheer, Afdeling Water.

²⁷ Ruthy, I. and A. Dassargues: 2001, Carte hydrogéologique de Wallonie : 40/5-6 Chastre-Gembloux. Notice Explicative. Technical report, Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement.

²⁸ Groundwater and geochemical modelling of the unconfined Brussels aquifer, Katholieke Universiteit Leuven, Luk Petters, 2010

entre les deux valeurs (négative si la valeur simulée est inférieure à la valeur mesurée et positive dans le cas inverse). Les erreurs indiquées en **vert** sont celles qui respectent les critères précédemment établis alors que celles qui sont reprises en **rouge** les dépassent.

Les **FIGURES 5-39 à 5-41** reprennent, respectivement pour les *nappes superficielle, du Bruxellien et de l'Yprésien*, la cartographie des erreurs. De la même manière, la jauge est **verte** lorsque l'erreur respecte les critères et **rouge** dans le cas inverse. Les jauges indiquent également le sens de l'erreur et son amplitude.

Piézomètre	X [m]	Y [m]	Piézométrie de référence pour mai – juin 2013 [m]	Piézométrie simulée pour mai – juin 2013 [m]	Erreur [m]
2-0010	165350.1	186225.8	6.49	7.53	1.0
2-0107	163045	187595	5.66	6.78	1.1
2-0424b	160639	186224	8.83	13.79	5.0
700/21/1	143269.2	160792.2	25.88	29.56	3.7
700/32/2	142164	158158.7	46.70	47.71	1.0
700/75/3	144612.5	160030.9	56.09	54.75	-1.3
700/75/6	146295.6	157004.1	65.31	65.46	0.2
722/21/1	170980.9	184170.4	8.48	11.06	2.6
722/21/4	166538.4	185125.6	6.77	8.20	1.4
722/34/1	170759.1	182157	12.69	13.25	0.6
722/73/3	169422.7	180118.1	17.43	17.72	0.3
723/73/9	167123.7	182035.1	13.89	15.43	1.5
724/21/1	159318.3	187816.1	6.92	8.47	1.5
727/21/1	163315.9	187727.6	5.61	6.19	0.6
III-016	149846.92	172728.89	17.71	17.66	-0.1
N/71/1	164916.7	178139.9	20.94	21.80	0.9
N/73/1	161659.6	184024.5	10.30	10.99	0.7
N/73h/4r	162688.5	170545.1	59.31	59.24	-0.1
VIII-139	147590.78	169133.75	16.83	18.74	1.9
Car-Wash 2000	147285.44	169038.89	16.25	18.31	2.1

Tableau 5-19 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la *nappe superficielle* pour la période de mai – juin 2013

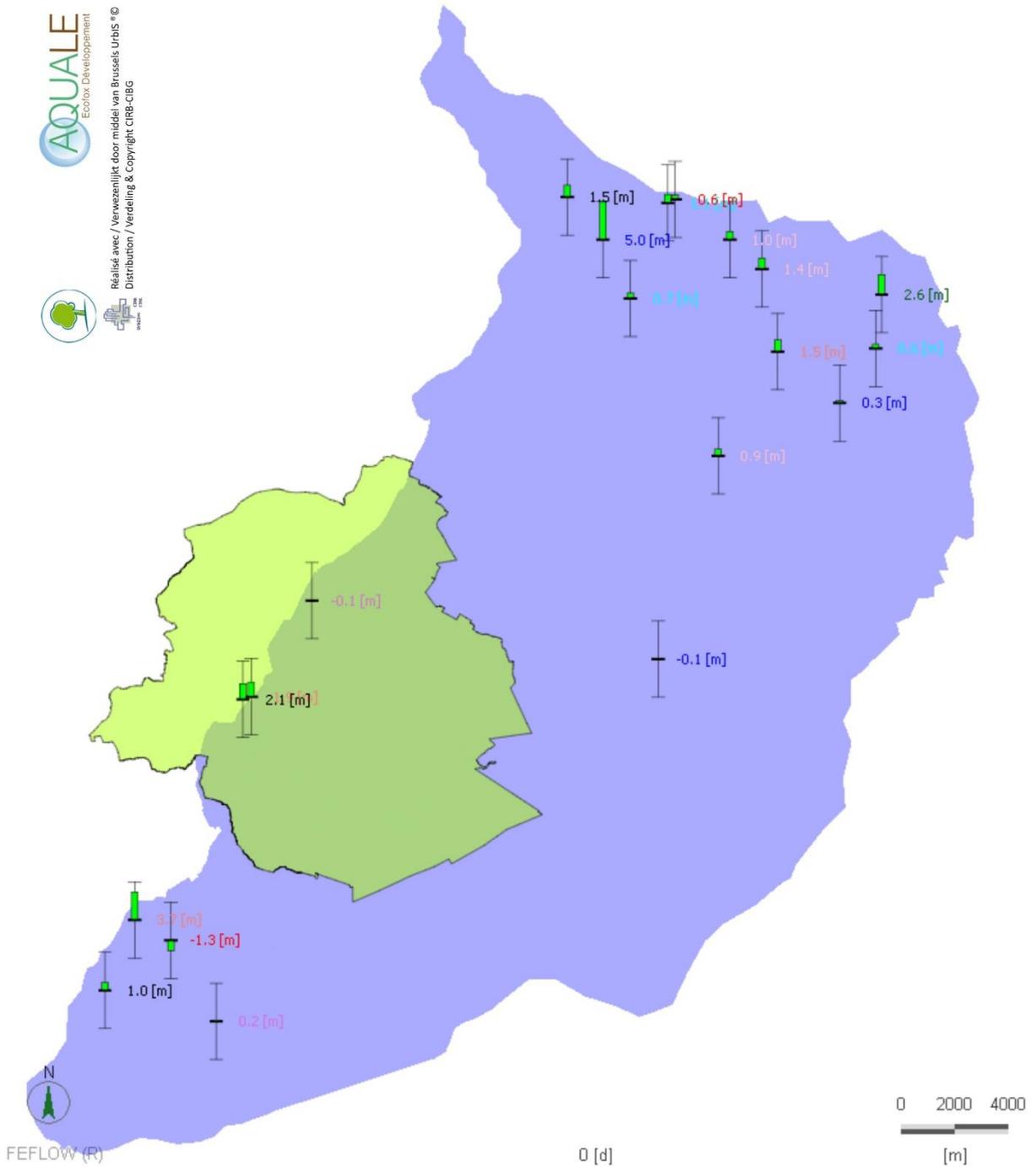


Figure 5-39 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la *nappe superficielle* pour la période de mai – juin 2013

Piézomètre	X [m]	Y [m]	Piézométrie de référence pour mai – juin 2013 [m]	Piézométrie simulée pour mai – juin 2013 [m]	Erreur [m]
2-0009	163749	162234	57.72	56.09	-1.6
2-0018	172172	182569.9	10.71	11.17	0.5
2-0073	168703	174665	36.47	38.31	1.8
2-0109	159858	177887	29.21	27.19	-2.0
2-0114	153030	158805	92.30	90.06	-2.2
2-0419b	155955	180524	15.33	14.25	-1.1
2-0420b	160082	170389	63.10	64.89	1.8
2-0424b	160639	186224	7.53	9.17	1.6
2-0430	166516	167019	49.66	49.50	-0.2
2-0431	157749	163462	73.15	75.35	2.2
700/73/1	149008	157710.1	88.01	90.09	2.1
702/71/1	149445.4	162179.9	78.01	79.64	1.6
703/71/3	157719.8	172444.5	42.77	42.99	0.2
703/73/3	159436.6	174958.7	44.46	44.15	-0.3
703/73/5	161730.8	172638.7	56.11	55.93	-0.2
710/71/3	164949.1	161771.2	55.26	54.05	-1.2
710/71/4	164146.8	161242.4	53.17	55.80	2.6
710/73/1	166382.9	163593.3	53.97	48.46	-5.5
711/71/1	166673.7	167701	48.30	48.85	0.5
711/71/4	165910.8	165046.9	49.03	49.94	0.9
711/72/1	164738.3	168387.5	57.16	55.57	-1.6
711/73/3	164591.7	165568.6	59.03	56.57	-2.5
711/73/5	163961.5	162911.5	54.53	54.49	0.0
711/73/7	164071	166942.9	62.27	60.46	-1.8
711/73/8	167779.2	168190.3	42.76	43.49	0.7
713/63/2	167252.6	173208.2	41.73	41.91	0.2
713/63/4	165671.9	172901	46.57	46.20	-0.4
713/71/1	165164.9	169928.3	50.65	48.79	-1.9
713/72/3	163442.3	171409.5	56.90	55.18	-1.7
713/72/4	166913.2	172899.2	42.86	42.69	-0.2
713/73/10	166479.8	170963.7	45.69	45.33	-0.4
713/73/2	163416.3	168542.4	59.36	59.57	0.2
713/73/7	167662.8	170995.7	41.71	41.87	0.2
713/73/9	164383.5	168899.8	55.86	54.52	-1.3
722/63/2	167953.8	175429.8	35.54	36.84	1.3
722/73/3	169422.7	180118.1	17.39	17.49	0.1
723/63/1	161015.4	174195.4	50.33	49.23	-1.1
723/63/4	166788.2	174432.8	39.96	40.38	0.4
723/73/14	163584	183567.1	10.68	11.57	0.9

Piézomètre	X [m]	Y [m]	Piézométrie de référence pour mai – juin 2013 [m]	Piézométrie simulée pour mai – juin 2013 [m]	Erreur [m]
723/73/16	162713.8	178235.8	26.41	26.63	0.2
723/73/3	163058.8	177551.4	30.50	30.34	-0.2
723/73/4	165284.2	176617.2	30.39	30.95	0.6
724/71/1	160703.1	180489.2	13.84	14.08	0.2
724/73/1	162035.9	178054	27.89	28.16	0.3
724/73/4	161850.5	181636.6	12.72	13.03	0.3
724/73/5	160643.1	184031.4	9.17	8.57	-0.6
Aquamatic	151583	166801	68.86	69.09	0.2
Bonne-Odeur	155939.869	163674.452	74.39	76.55	2.2
Bonniers	154342.651	162985.256	81.89	80.43	-1.5
C 1 ancien	150040.98	166789.36	65.51	65.82	0.3
C 11	150345.11	167138.13	65.69	66.60	0.9
C 3 ancien	150228.81	166444.65	66.83	66.38	-0.4
C 4 ancien	150295.71	166236.66	67.19	67.78	0.6
C 5 ancien	150492.26	166141.24	67.36	68.40	1.0
C 7 ancien	150708.76	166632.60	66.14	67.38	1.2
C 8 ancien	150627.75	166785.37	66.71	66.68	0.0
C 9 ancien	150581.43	166978.48	66.28	66.99	0.7
Erasmus	151293.376	173568.124	33.40	32.00	-1.4
Ferme Fond Roy	149848.192	164268.33	69.86	70.53	0.7
Hof-ter-Musschen	155538.731	171380.725	43.35	42.37	-1.0
N/71/1	164916.7	178139.9	20.93	21.80	0.9
N/71h/2	161168	167325.4	68.81	70.27	1.5
N/73h/4r	162688.5	170545.1	59.30	59.24	-0.1
N/75h/3	143920.6	155405	87.88	87.81	-0.1
Puits Van Mullem	153801.141	174978.082	35.09	33.88	-1.2
Pz 20	150571.169	169712.046	50.17	50.44	0.3
Régent	153156.71	172101.818	51.18	53.22	2.0
Soignes - S1	151530	162000	86.77	85.58	-1.2
Soignes - S10	155739.33	165132.16	73.35	72.26	-1.1
Soignes - S12	149692.632	164226.098	67.58	69.42	1.8
Soignes - S2	152258.46	162235.94	85.72	84.90	-0.8
Soignes - S4	152692.971	163884.841	78.50	79.84	1.3
Soignes - S7	154710.416	163757.02	78.06	77.58	-0.5
Soignes - S8	154594.781	164420.048	74.51	73.60	-0.9
Soignes - T19	151000.43	162030.061	86.45	85.08	-1.4
Soignes - T22	152535	162225	86.39	85.27	-1.1
Soignes - T25	154103.145	163911.452	77.02	77.38	0.4
Soignes - T27	155152.116	163387.21	78.99	77.82	-1.2

Piézomètre	X [m]	Y [m]	Piézométrie de référence pour mai – juin 2013 [m]	Piézométrie simulée pour mai – juin 2013 [m]	Erreur [m]
Soignes - T30	154724.065	165213.045	68.09	68.46	0.4
Soignes - T31	155456.446	166005.72	66.04	66.94	0.9
Soignes - T33	155948.543	164456.141	75.70	75.19	-0.5
Soignes - T36	149724.87	164287.521	68.50	69.48	1.0
VI-037	156454.949	170657.79	53.55	53.87	0.3
Strasbourg	154151.985	165815.821	38.93	38.53	-0.4
Voets	155816.584	166218.766	66.57	67.52	1.0

Tableau 5-20 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la *nappe du Bruxellien* pour la période de mai – juin 2013

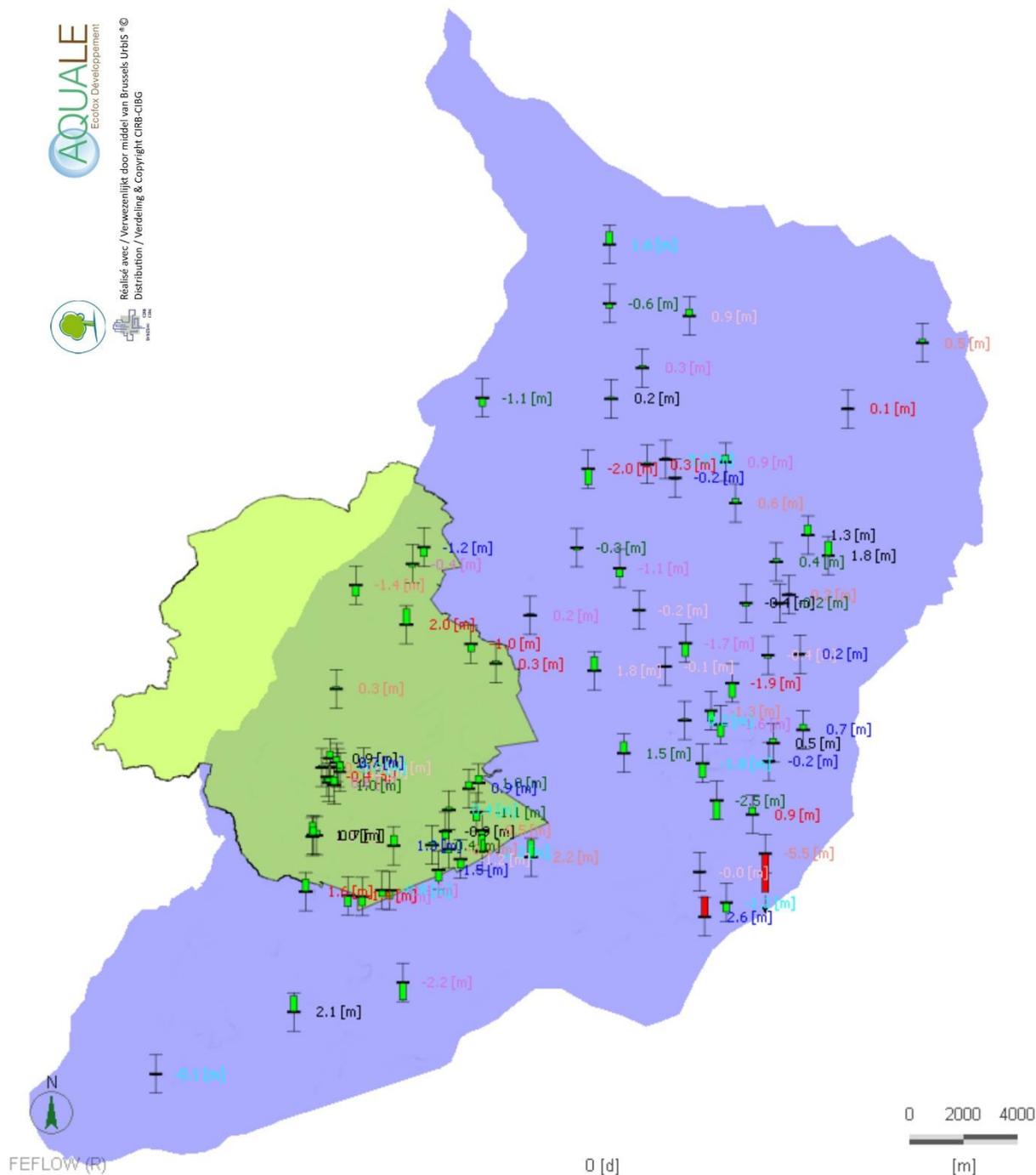


Figure 5-40 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la *nappe du Bruxellien* pour la période de mai – juin 2013

Piézomètre	X [m]	Y [m]	Piézométrie de référence pour mai – juin 2013 [m]	Piézométrie simulée pour mai – juin 2013 [m]	Erreur [m]
2-0419b	155955	180524	13.45	14.23	0.8
700/71/4	145159	159871.4	67.82	70.73	2.9
700/73/1	149008	157710.1	89.85	90.08	0.2
700/75/3	144612.5	160030.9	55.11	54.42	-0.7
703/71/3	157719.8	172444.5	42.80	42.98	0.2
710/71/4	164146.8	161242.4	49.27	55.80	6.5
711/73/3	164591.7	165568.6	57.99	56.55	-1.4
711/73/5	163961.5	162911.5	52.48	54.47	2.0
711/73/8	167779.2	168190.3	42.60	43.44	0.8
713/63/2	167252.6	173208.2	41.72	41.87	0.2
713/72/4	166913.2	172899.2	42.87	42.67	-0.2
N/75h/3	143920.6	155405	87.37	87.68	0.3

Tableau 5-21 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans *la nappe de l'Yprésien* pour la période de mai – juin 2013

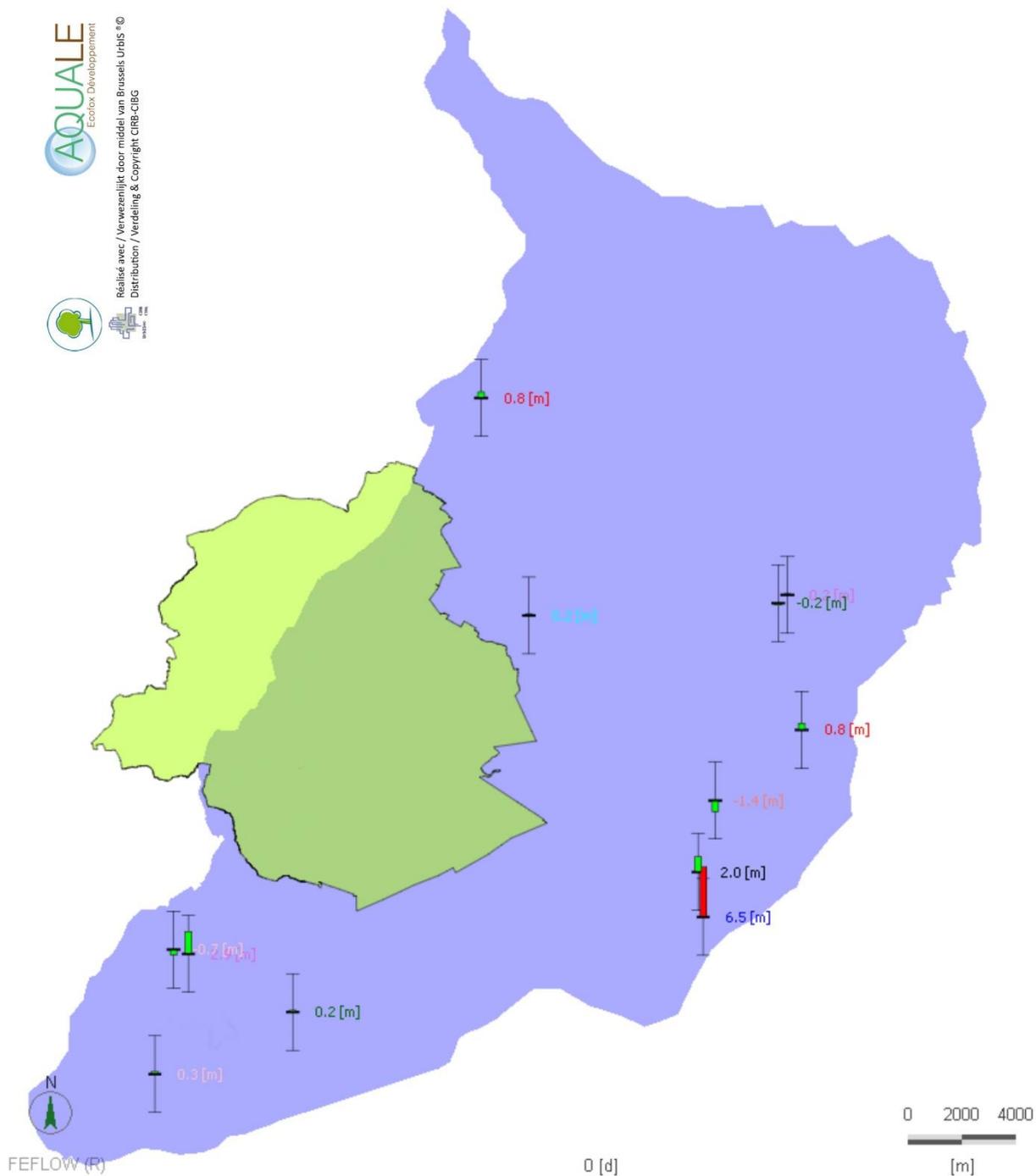


Figure 5-41 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la *nappe de l'Yprésien* pour la période de mai – juin 2013

Il apparaît que la très grande majorité des niveaux d'eau mesurés dans les piézomètres des trois nappes sont bien reproduits. En effet, les critères sont respectés pour :

- tous les ouvrages crépinés dans la *nappe superficielle* ;
- 83 ouvrages crépinés dans la *nappe du Bruxellien* sur les 85 ouvrages de référence ;
- tous les ouvrages crépinés dans la *nappe de l'Yprésien* sauf 1.

Dans les sables du Bruxellien, les deux ouvrages moins bien reproduits se situent hors de la zone d'intérêt, à proximité de la limite Est du modèle.

Le diagramme de dispersion (*scatterplot*) permet de comparer les valeurs de piézométrie mesurées (en abscisse) aux valeurs de piézométrie simulée (en ordonnée). L'écartement des mesures par rapport à la droite à 45° permet de se rendre compte de la qualité de la calibration.

Le diagramme de dispersion prenant en compte l'ensemble des points d'observation est présenté à la **FIGURE 5-42**. Les points situés dans le couloir formé par les deux lignes rouges sont caractérisés par un écart inférieur à +/- 2.5 m entre les valeurs mesurées et simulées (pour rappel, on avait estimé qu'une erreur de 2.5 m serait acceptable pour les points de la *nappe du Bruxellien* alors qu'une erreur de 5 m serait acceptable pour les points des *nappes superficielle et de l'Yprésien*).

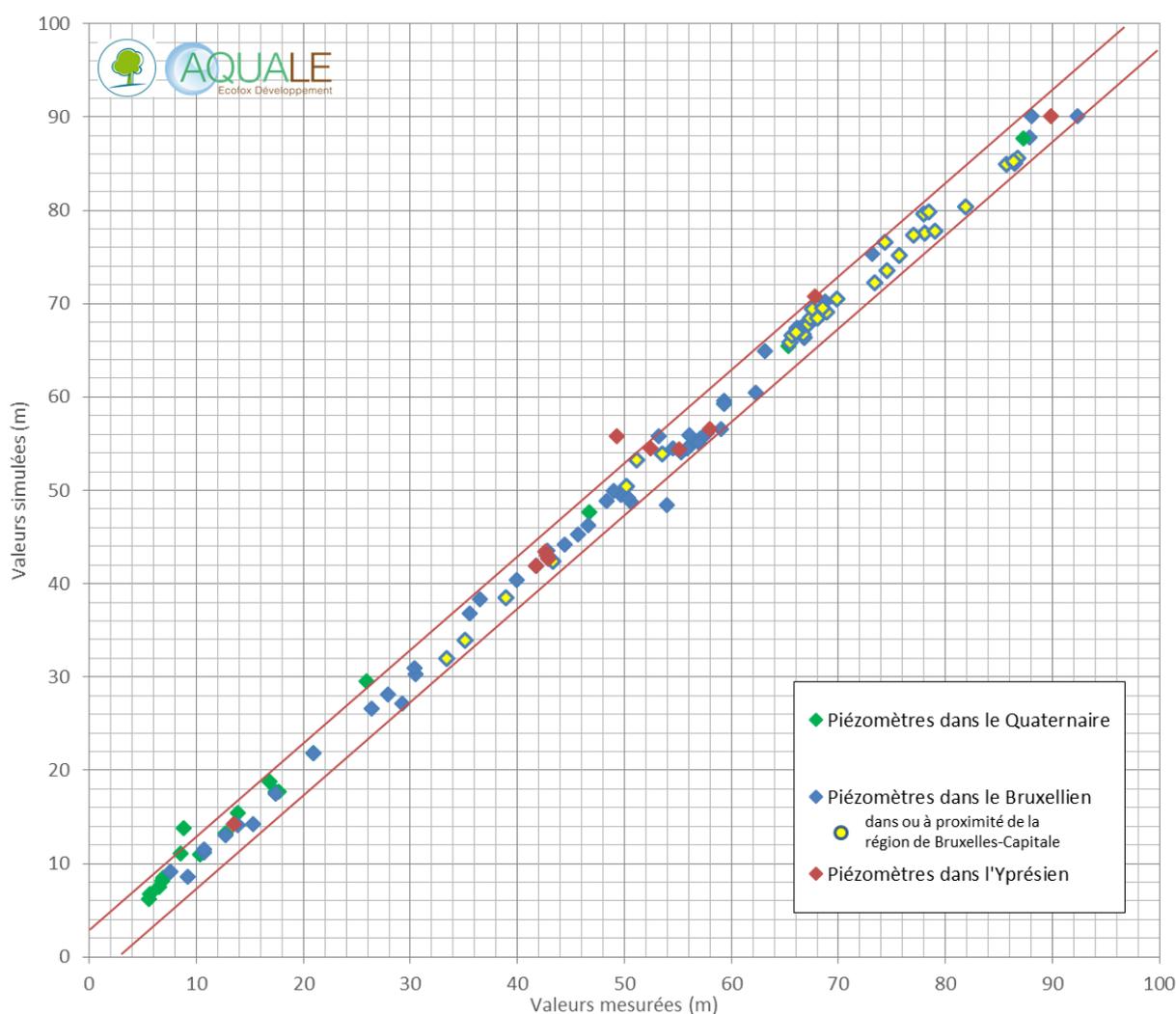


Figure 5-42 : Diagramme de dispersion (*scatterplot*) de l'ensemble des points d'observation pour la période de mai – juin 2013

Les indicateurs de calibration²⁹ classiquement pris en compte pour juger de la qualité du modèle sont les suivants :

- Pour la *nappe superficielle* :
 - o SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 6.64 % ;
 - o SRMS (Scaled Root Mean Square) : 3.06 % ;
 - o CD (Coefficient of Determination) : 0.94 ;
- Pour la *nappe du Bruxellien* :
 - o SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 2.35 % ;
 - o SRMS (Scaled Root Mean Square) : 1.52 % ;
 - o CD (Coefficient of Determination) : 1.00 ;
- Pour la *nappe de l'Yprésien* :
 - o SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 3.06 % ;
 - o SRMS (Scaled Root Mean Square) : 2.91 % ;
 - o CD (Coefficient of Determination) : 1.02 ,

ce qui peut être jugé vraiment très bon.

Si l'on prend en considération uniquement les points situés en Région de Bruxelles-Capitale ou à proximité directe (dans un rayon de 2 km), les indicateurs de calibration du Bruxellien sont les suivants :

- SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 1.15 % ;
- SRMS (Scaled Root Mean Square) : 1.31 % ;
- CD (Coefficient of Determination) : 1.02,

ce qui peut être jugé excellent.

5.3.2 CALIBRATION EN RÉGIME PERMANENT – PÉRIODE DE NOVEMBRE 2013

La calibration de la piézométrie est réalisée en prenant comme référence les niveaux d'eau mesurés ou estimés dans les piézomètres repris dans les **TABLEAUX 5-1, 5-2 et 5-3** ci-avant (**CHAPITRE 5.1.1**).

Les **TABLEAUX 5-22 à 5-24** ci-dessous présentent, respectivement pour les *nappes superficielle, du Bruxellien et de l'Yprésien*, les valeurs mesurées et simulées au droit des divers points d'observation ainsi que la différence entre les deux valeurs (négative si la valeur simulée est inférieure à la valeur mesurée et positive dans le cas inverse). Les erreurs indiquées en **vert** sont celles qui respectent les critères précédemment établis alors que celles qui sont reprises en **rouge** les dépassent.

Les **FIGURES 5-43 à 5-45** reprennent, respectivement pour les *nappes superficielle, du Bruxellien et de l'Yprésien*, la cartographie des erreurs. De la même manière, la jauge est **verte** lorsque l'erreur respecte les critères et **rouge** dans le cas inverse. Les jauges indiquent également le sens de l'erreur et son amplitude.

²⁹ Pour une très bonne calibration, les valeurs classiquement à atteindre sont < 5 % (SRMFS et SRMS) et ± 1 (CD)

Piézomètre	X [m]	Y [m]	Piézométrie de référence pour novembre 2013 [m]	Piézométrie simulée pour novembre 2013 [m]	Erreur [m]
2-0010	165350.1	186225.8	5.99	7.53	1.5
2-0107	163045	187595	5.56	6.78	1.2
2-0424b	160639	186224	8.12	13.79	5.7
III-016	149846.92	172728.89	17.69	17.66	0.0
VIII-139	147590.78	169133.75	16.86	18.74	1.9

Tableau 5-22 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la *nappe superficielle* pour la période de novembre 2013

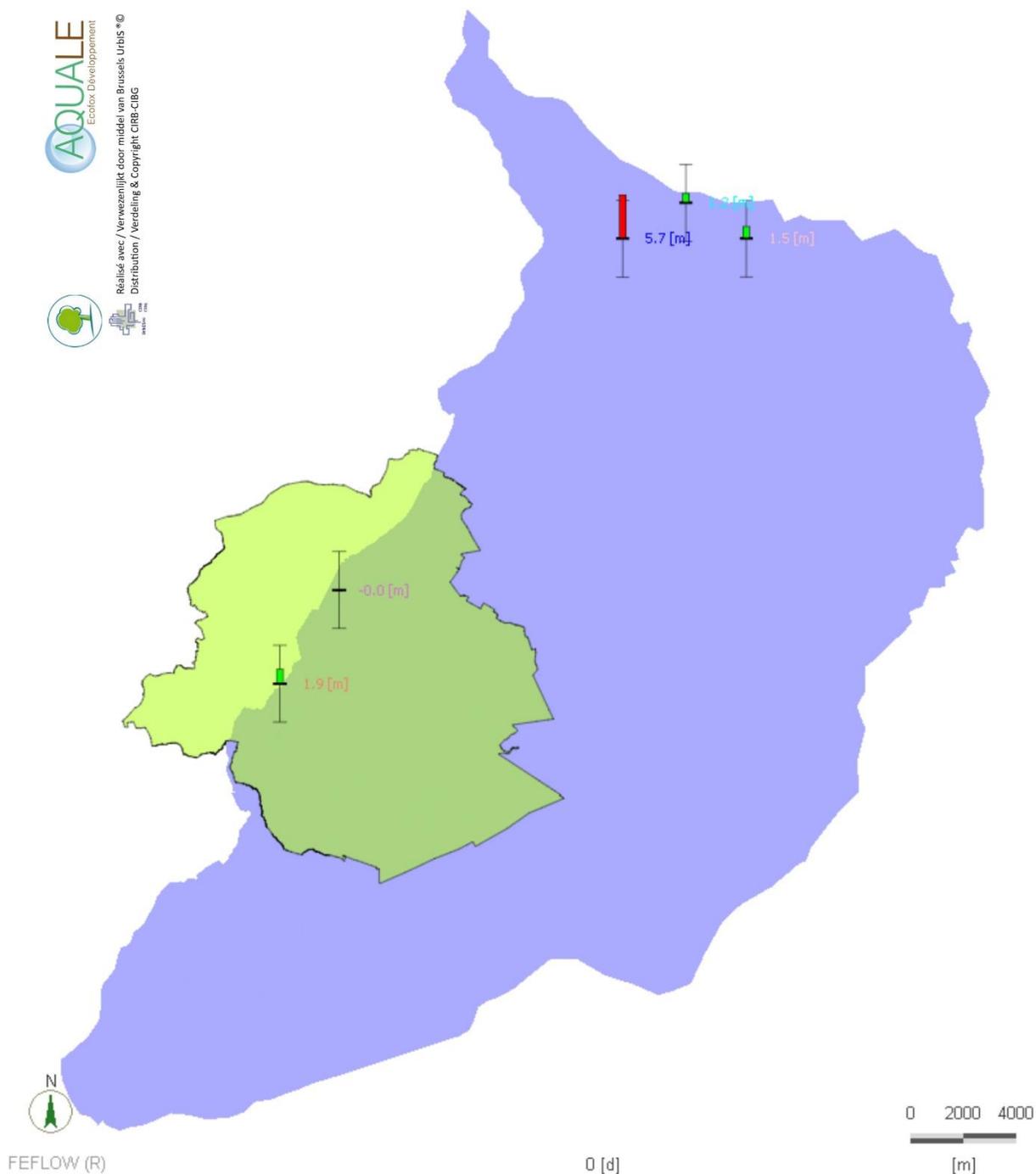


Figure 5-43 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la *nappe superficielle* pour la période de novembre 2013

Piézomètre	X [m]	Y [m]	Piézométrie de référence pour novembre 2013 [m]	Piézométrie simulée pour novembre 2013 [m]	Erreur [m]
2-0009	163749	162234	57.73	56.09	-1.6
2-0018	172172	182569.9	10.19	11.17	1.0
2-0073	168703	174665	36.53	38.31	1.8
2-0109	159858	177887	29.15	27.19	-2.0
2-0114	153030	158805	92.35	90.06	-2.3
2-0419b	155955	180524	14.92	14.25	-0.7
2-0420b	160082	170389	62.97	64.89	1.9
2-0424b	160639	186224	6.97	9.17	2.2
2-0430	166516	167019	49.55	49.50	-0.1
2-0431	157749	163462	73.14	75.35	2.2
Aquamatic	151583	166801	69.02	69.09	0.1
Bonne-Odeur	155939.869	163674.452	74.41	76.55	2.1
Bonniers	154342.651	162985.256	81.93	80.43	-1.5
Erasmus	151293.376	173568.124	33.28	32.00	-1.3
Ferme Fond Roy	149848.192	164268.33	69.86	70.53	0.7
Hof-ter-Musschen	155538.731	171380.725	43.15	42.37	-0.8
Puits Van Mullem	153801.141	174978.082	34.95	33.88	-1.1
Pz 20	150571.169	169712.046	49.93	50.44	0.5
Régent	153156.71	172101.818	51.06	53.22	2.2
Soignes - S1	151530	162000	86.95	85.58	-1.4
Soignes - S10	155739.33	165132.16	73.43	72.26	-1.2
Soignes - S12	149692.632	164226.098	67.58	69.42	1.8
Soignes - S2	152258.46	162235.94	85.86	84.90	-1.0
Soignes - S4	152692.971	163884.841	78.38	79.84	1.5
Soignes - S7	154710.416	163757.02	78.06	77.58	-0.5
Soignes - S8	154594.781	164420.048	74.60	73.60	-1.0
Soignes - T19	151000.43	162030.061	86.41	85.08	-1.3
Soignes - T22	152535	162225	86.56	85.27	-1.3
Soignes - T25	154103.145	163911.452	77.01	77.38	0.4
Soignes - T27	155152.116	163387.21	79.02	77.82	-1.2
Soignes - T30	154724.065	165213.045	68.16	68.46	0.3
Soignes - T31	155456.446	166005.72	66.02	66.94	0.9
Soignes - T33	155948.543	164456.141	75.81	75.19	-0.6
Soignes - T36	149724.87	164287.521	68.49	69.48	1.0
VI-037	156454.949	170657.79	53.53	53.87	0.3
Strasbourg	154151.985	165815.821	38.67	38.53	-0.1
Voets	155816.584	166218.766	67.55	67.52	0.0

Tableau 5-23 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la nappe du Bruxellien pour la période de novembre 2013

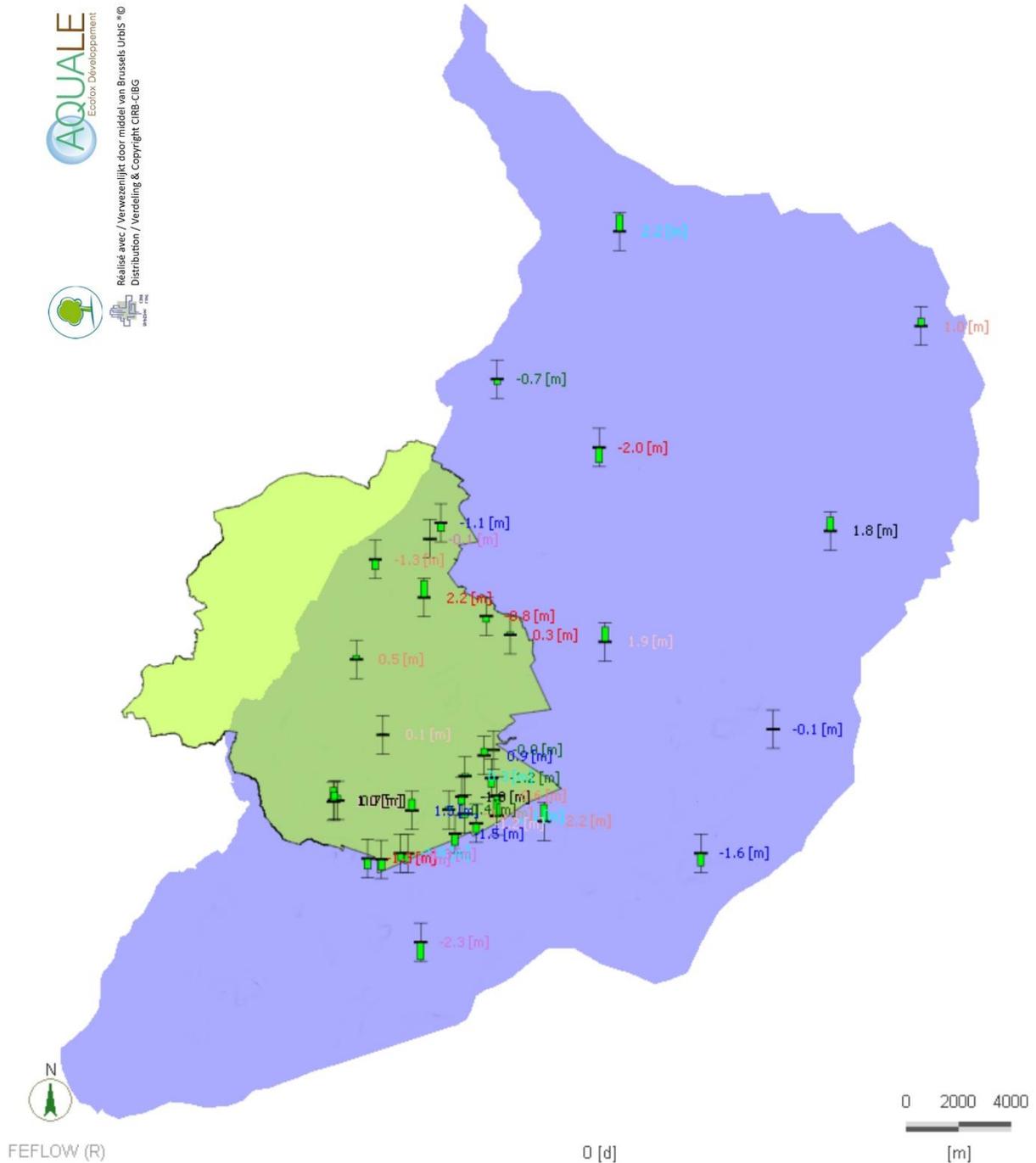


Figure 5-44 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la *nappe du Bruxellien* pour la période de novembre 2013

Piézomètre	X [m]	Y [m]	Piézométrie de référence pour novembre 2013 [m]	Piézométrie simulée pour novembre 2013 [m]	Erreur [m]
2-0419b	155955	180524	13.21	14.23	1.0

Tableau 5-24 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la *nappe de l'Yprésien* pour la période de novembre 2013

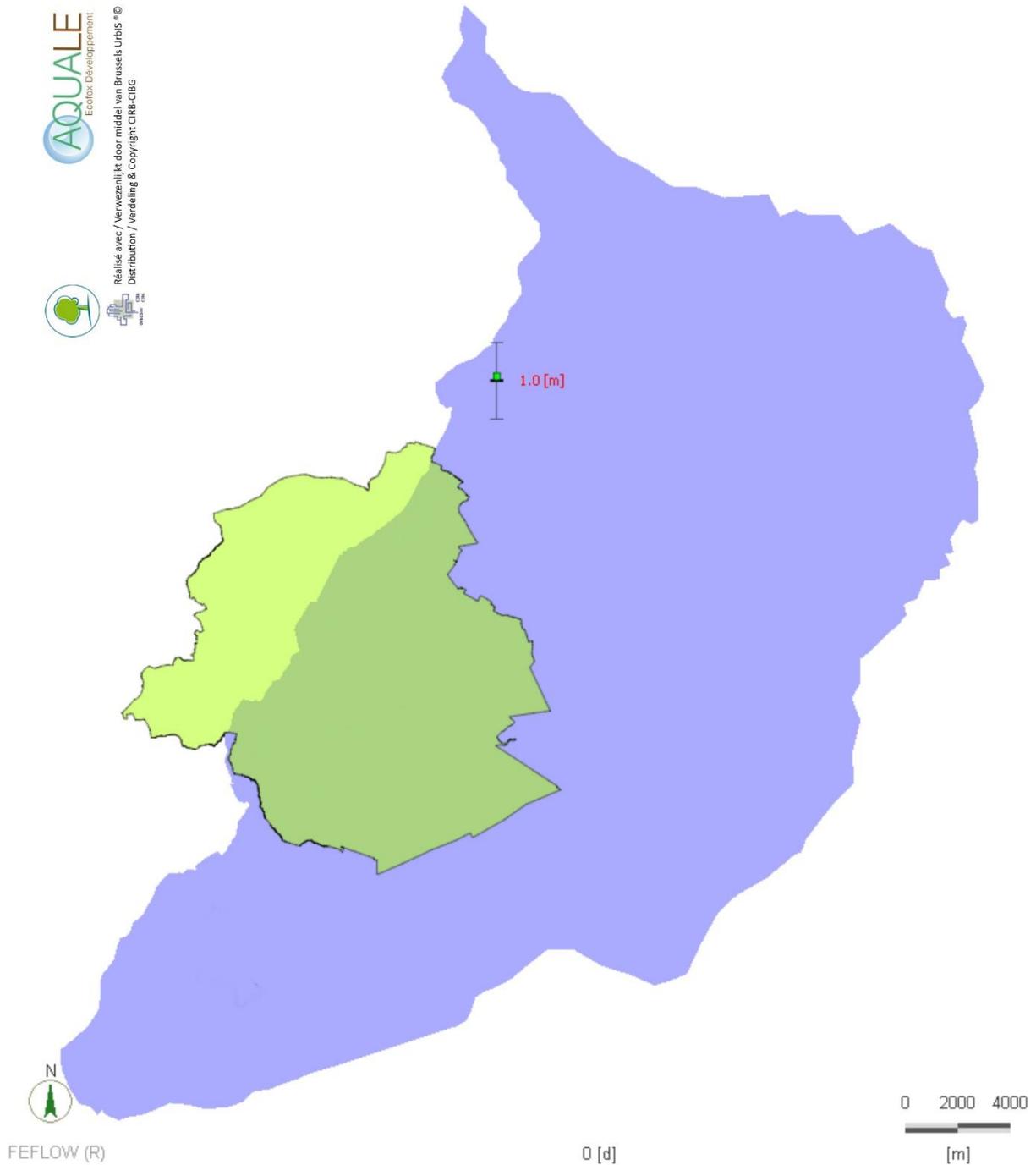


Figure 5-45 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la *nappe de l'Yprésien* pour la période de novembre 2013

Il apparaît que la très grande majorité des niveaux d'eau mesurés dans les piézomètres des trois nappes sont bien reproduits. En effet, les critères sont respectés pour :

- tous les ouvrages crépinés dans la *nappe superficielle* sauf 1 ;
- tous les ouvrages crépinés dans la *nappe du Bruxellien* ;
- tous les ouvrages crépinés dans la *nappe de l'Yprésien*.

Le diagramme de dispersion (*scatterplot*) permet de comparer les valeurs de piézométrie mesurées (en abscisse) aux valeurs de piézométrie simulée (en ordonnée). L'écartement des mesures par rapport à la droite à 45° permet de se rendre compte de la qualité de la calibration.

Le diagramme de dispersion prenant en compte l'ensemble des points d'observation est présenté à la **FIGURE 5-46**. Les points situés dans le couloir formé par les deux lignes rouges sont caractérisés par un écart inférieur à +/- 2.5 m entre les valeurs mesurées et simulées (pour rappel, on avait estimé qu'une erreur de 2.5 m serait acceptable pour les points de la *nappe du Bruxellien* alors qu'une erreur de 5 m serait acceptable pour les points des *nappes superficielle et de l'Yprésien*).

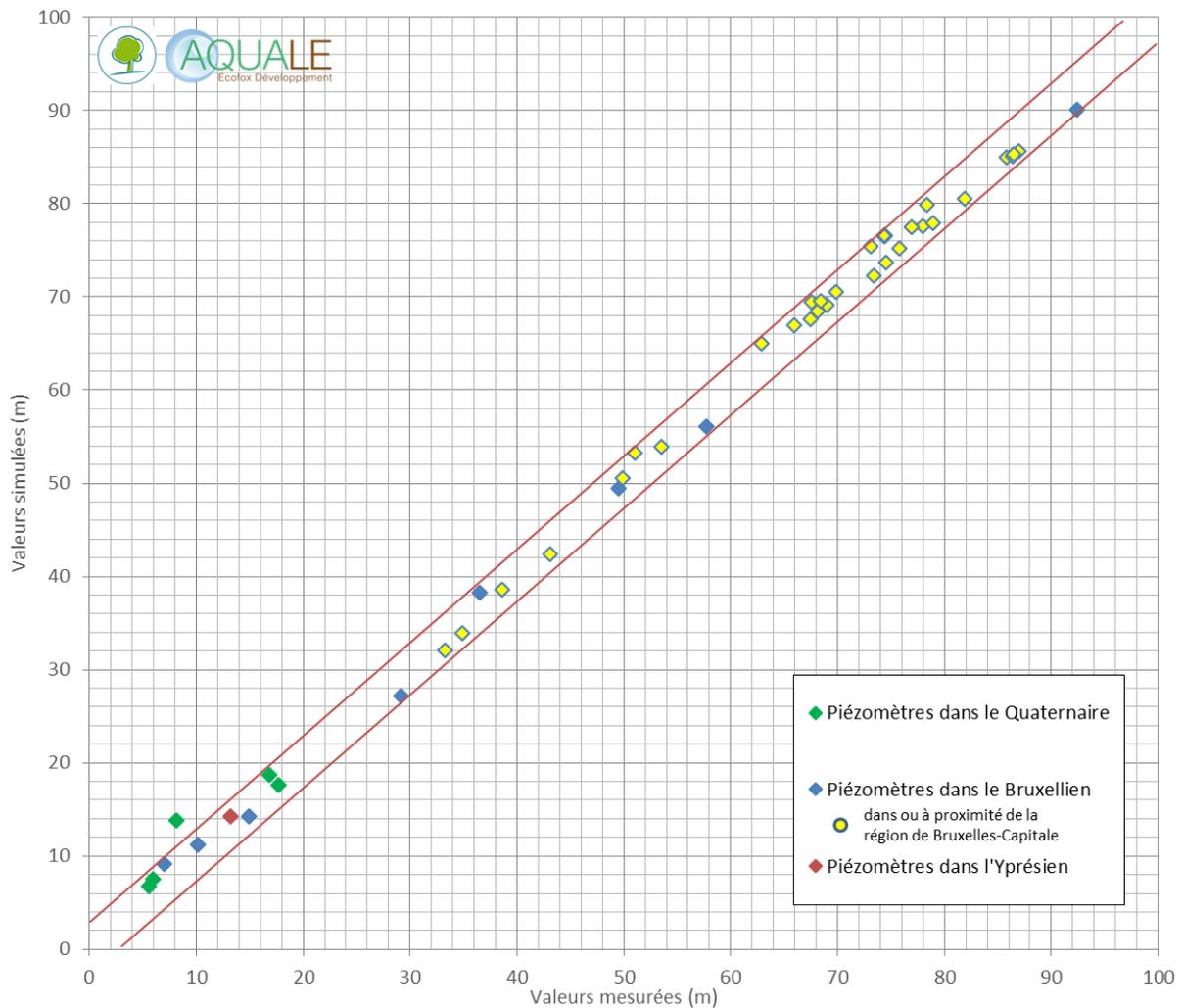


Figure 5-46 : Diagramme de dispersion (*scatterplot*) de l'ensemble des points d'observation pour la période de novembre 2013

Les indicateurs de calibration³⁰ classiquement pris en compte pour juger de la qualité du modèle sont les suivants :

- Pour la *nappe superficielle* :
 - o SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 18.02 % ;
 - o SRMS (Scaled Root Mean Square) : 9.81 % ;
 - o CD (Coefficient of Determination) : 0.65 ;
- Pour la *nappe du Bruxellien* :
 - o SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 4.23 % ;
 - o SRMS (Scaled Root Mean Square) : 1.54 % ;
 - o CD (Coefficient of Determination) : 0.98 ;
- Pour la *nappe de l'Yprésien*, puisqu'il n'y a qu'un point de mesure, les indices ne peuvent pas être calculés.

Cela peut être jugé très bon.

Si l'on prend en considération uniquement les points situés en Région de Bruxelles-Capitale ou à proximité directe (dans un rayon de 2 km), les indicateurs de calibration du Bruxellien sont les suivants :

- SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 1.35 % ;
- SRMS (Scaled Root Mean Square) : 1.38 % ;
- CD (Coefficient of Determination) : 0.99,

ce qui peut être jugé excellent.

5.3.3 CALIBRATION ET VALIDATION EN RÉGIME TRANSITOIRE – PÉRIODE DE 2009 À 2013

Bien qu'il était prévu de réaliser la calibration en régime transitoire sur l'année 2013 et une validation en régime transitoire sur la période couvrant les années 2009 à 2013, il a été décidé de réaliser directement la calibration sur la période 2009 à 2013. Cela n'a aucune incidence sur les résultats de l'étude puisque, dans les deux cas, le modèle est contraint par les mesures piézométriques et de débits disponibles pour la période 2009 – 2013.

Comme expliqué au **CHAPITRE 5.1.1.2**, seuls les piézomètres faisant l'objet d'un suivi suffisamment régulier sont pris en considération pour la vérification de la calibration en régime transitoire. Ceux-ci sont rappelés ci-après, par gamme de hauteur piézométrique absolue :

- Entre 0 et 20 m :
 - o 2-0424b ;
 - o 2-0018 ;
 - o 2-0419b ;
 - o 724/71/1 ;
 - o 724/73/4 ;
- Entre 20 et 40 m :
 - o Strasbourg ;
 - o Puits van Mullem ;
 - o Erasmus ;
- Entre 40 et 60 m :

³⁰ Pour une très bonne calibration, les valeurs classiquement à atteindre sont < 5 % (SRMFS et SRMS) et ± 1 (CD)

- 713/73/7 ;
- 713/63/4 ;
- Hof-Ter-Musschen ;
- Régent ;
- Pz20 ;
- VI-037 ;
- Entre 60 et 80 m :
 - 711/73/7 ;
 - Voets ;
 - Ferme Fond-Roy ;
 - Bonne-Odeur ;
 - Soignes-S4 ;
 - Soignes-S7 ;
 - Soignes-S8 ;
 - Soignes-T25 ;
- Entre 80 et 100 m :
 - Bonniers ;
 - Soignes-S1 ;
 - Soignes-S2 ;
 - Soignes-T19.

Si la calibration en régime permanent a permis de vérifier que le modèle était capable de reproduire la piézométrie du Bruxellien et sa *variabilité spatiale*, la calibration en régime transitoire a pour objectif de vérifier que le modèle est capable de reproduire la *variabilité temporelle* de la piézométrie du Bruxellien. Ainsi, les écarts de piézométrie identifiés dans les **TABLEAUX 5-19 à 5-24** sont toujours présents en régime transitoire. Il s'agit plutôt de vérifier que le *type de variation temporelle* (voir à ce sujet le **CHAPITRE 3.3.2.2**) est bien reproduit pour les différents piézomètres.

Les **FIGURES 5-47 à 5-51** présentent l'évolution de la piézométrie mesurée (lignes discontinues) et de la piézométrie simulée en régime transitoire (lignes continues) pour les gammes de hauteur piézométrique absolue allant de 0 à 20 m, 20 à 40 m, 40 à 60 m, 60 à 80 m et 80 à 100 m respectivement.

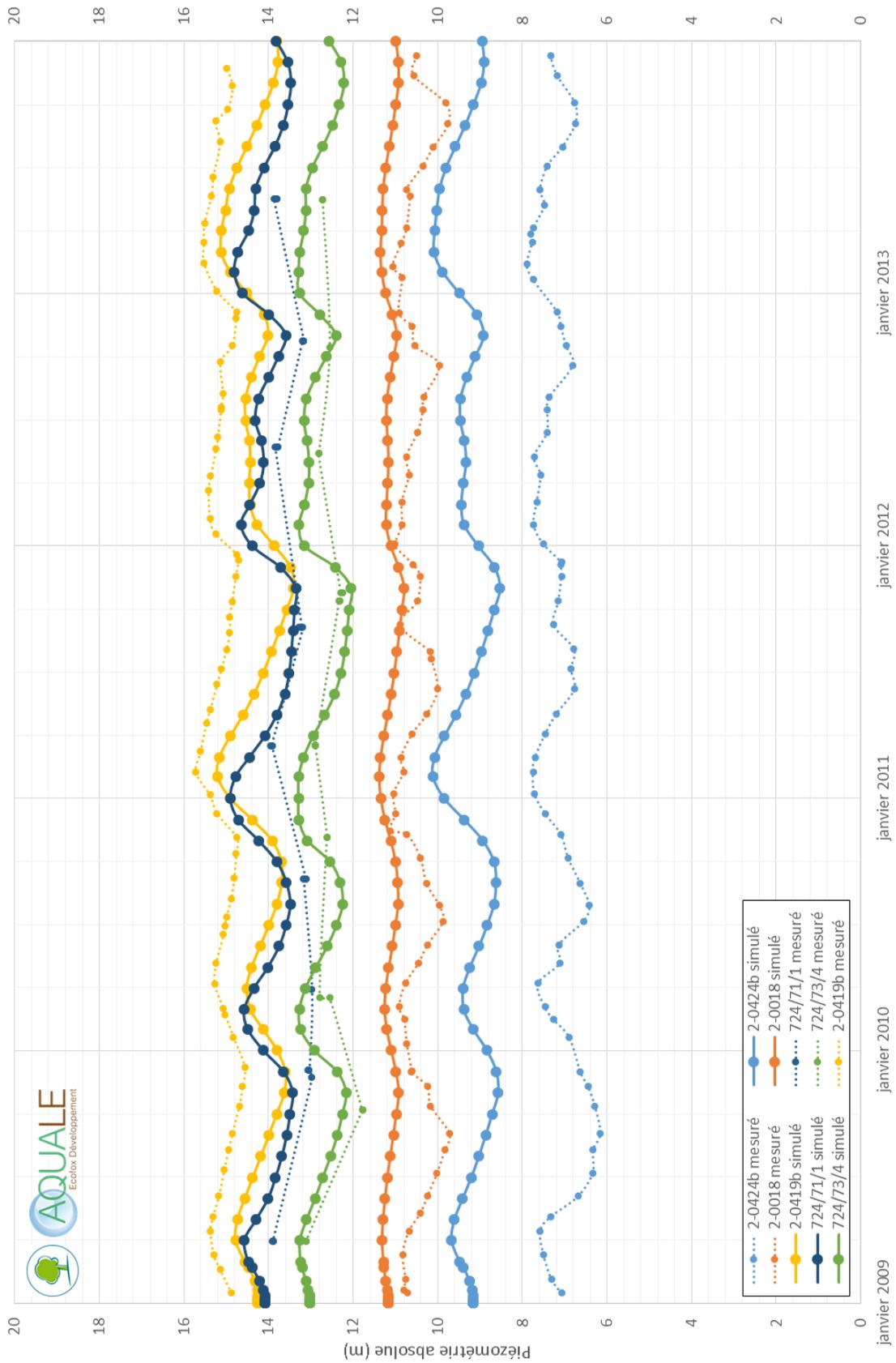


Figure 5-47 : Piézométrie mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 0 à 20 m



Figure 5-48 : Piézométrie mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 20 à 40 m

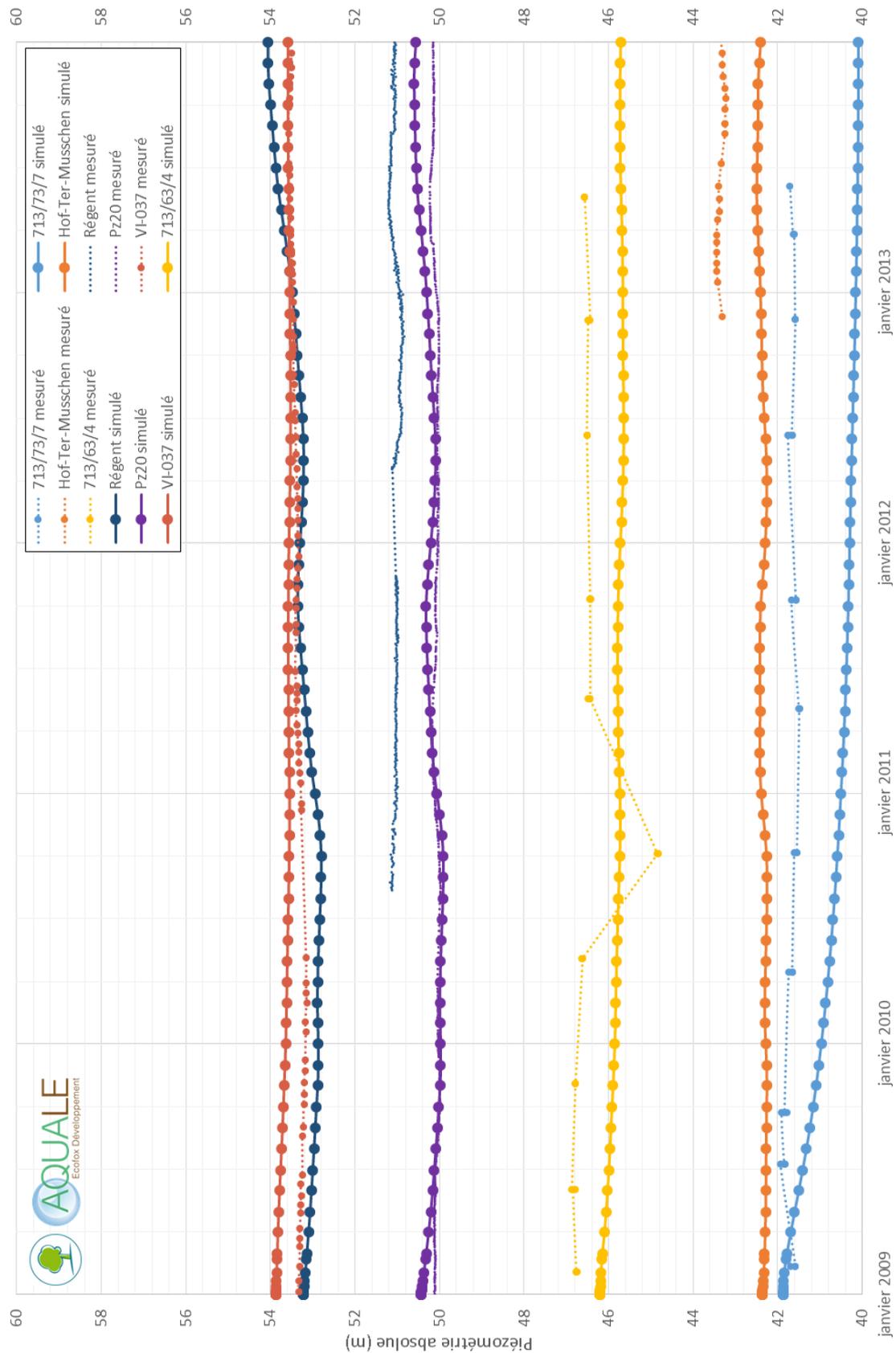


Figure 5-49 : Piézométrie mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 40 à 60 m

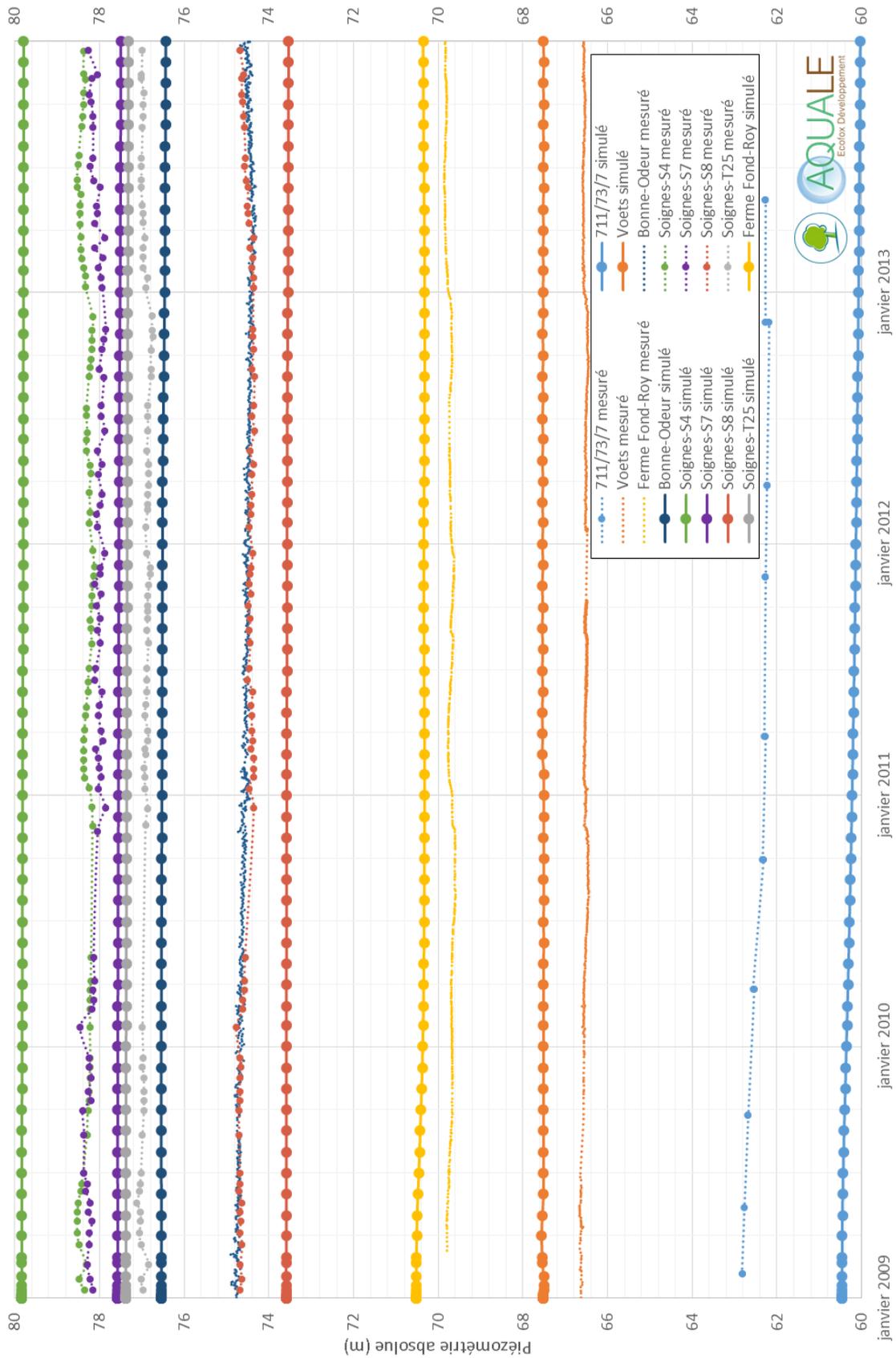


Figure 5-50 : Piézométrie mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 60 à 80 m

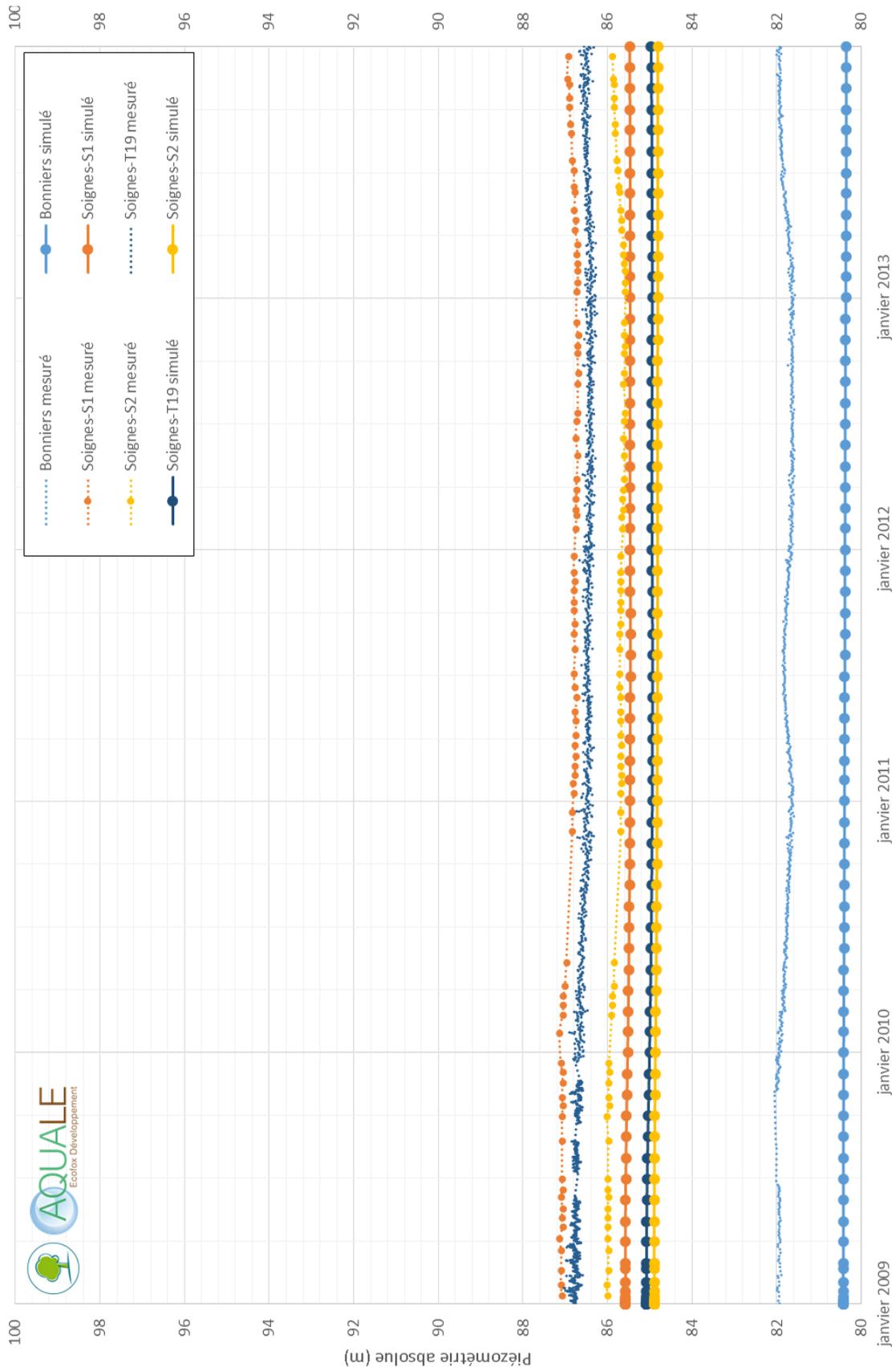


Figure 5-51 : Piézométrie mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 80 à 100 m

De manière générale, il convient de garder à l'esprit que le trait pointillé entre les points de mesures ne représente pas l'allure réelle de la piézométrie mais une interpolation linéaire entre deux données. Cette remarque est d'autant plus importante que deux mesures successives sont fortement espacées dans le temps.

Les observations proposées suite à l'analyse des différentes figures sont reprises ci-après. Les observations sont focalisées sur la variation temporelle de la piézométrie et non sur la valeur absolue de piézométrie qui a plutôt fait l'objet de la calibration en régime permanent. Les piézomètres sont repris avec un code couleur permettant de distinguer les piézomètres dont le niveau d'eau est **bien reproduit** de ceux dont le niveau est **moins bien reproduit** et de ceux dont le niveau d'eau n'est **pas du tout bien reproduit** :

- Entre 0 et 20 m (**FIGURE 5-47**) :
 - o **2-0424b** : les courbes des piézométries mesurée et simulée sont quasiment parallèles sur toute la durée des mesures. On reproduit bien, en particulier, le très haut piézométrique de début 2011 et l'effet saisonnier moins marqué en 2012 ;
 - o **2-0018** : la piézométrie simulée est caractérisée par une amplitude de variation saisonnière plus faible que celle de la piézométrie mesurée. Ce piézomètre est donc moins bien reproduit, probablement à cause d'un effet lissant (lié au drainage) de la frontière située juste à proximité ;
 - o **2-0419b** : les courbes des piézométries mesurée et simulée sont quasiment parallèles sur toute la durée des mesures. On reproduit bien, en particulier, le très haut piézométrique de début 2011 et l'effet saisonnier moins marqué en 2012 ;
 - o **724/71/1** : ce piézomètre est caractérisé par un nombre de mesures assez faible. Les données sont très bien reproduites, à l'exception d'une mesure réalisée en mars 2012 ;
 - o **724/73/4** : ce piézomètre est caractérisé par un nombre de mesures assez faible. Les données sont très bien reproduites ;
- Entre 20 et 40 m (**FIGURE 5-48**) :
 - o **Strasbourg** : la période couverte par les mesures pour ce piézomètre est assez courte (fin 2012 – 2013). L'allure est très bien reproduite jusqu'à mi-2013 puis moins bien reproduite pour la seconde moitié de l'année 2013 ;
 - o **Puits van Mullem** : l'allure est très bien reproduite jusqu'à la fin de l'année 2012 puis moins bien reproduite pour l'année 2013 ;
 - o **Erasmus** : l'allure est très bien reproduite jusqu'à la fin de l'année 2012 puis moins bien reproduite pour l'année 2013 ;
- Entre 40 et 60 m (**FIGURE 5-49**) :
 - o **713/73/7** : la piézométrie est moins bien reproduite pour ce piézomètre puisque les valeurs simulées diminuent progressivement durant toute la période étudiée alors que la piézométrie mesurée dans ce piézomètre est plutôt stable ;
 - o **713/63/4** : ce piézomètre est caractérisé par un nombre de mesures assez faible. Les données sont très bien reproduites, à l'exception d'une mesure réalisée en octobre 2010 ;
 - o **Hof-Ter-Musschen** : la période couverte par les mesures pour ce piézomètre est assez courte (fin 2012 – 2013). L'allure est très bien reproduite sur cette période ;
 - o **Régent** : l'allure est très bien reproduite jusqu'à la fin de l'année 2012 puis moins bien reproduite pour l'année 2013 ;
 - o **Pz20** : l'allure très stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée ;
 - o **VI-037** : l'allure très stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée ;
- Entre 60 et 80 m (**FIGURE 5-50**) :
 - o **711/73/7** : la piézométrie est très bien reproduite. On reproduit bien le caractère très légèrement descendant sur les années 2009 et 2010 puis stable sur les années 2011 à 2013 ;
 - o **Voets** : l'allure très stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée ;
 - o **Ferme Fond-Roy** : l'allure très stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée ;

- **Bonne-Odeur** : l'allure très stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée ;
- **Soignes-S4** : l'allure très stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée ;
- **Soignes-S7** : l'allure très stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée ;
- **Soignes-S8** : l'allure très stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée ;
- **Soignes-T25** : l'allure très stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée ;
- Entre 80 et 100 m (**FIGURE 5-51**) :
 - **Bonniers** : la très faible variation saisonnière n'est pas reproduite pour ce piézomètre puisque la piézométrie simulée est très stable ;
 - **Soignes-S1** : l'allure très stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée ;
 - **Soignes-S2** : l'allure très stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée ;
 - **Soignes-T19** : l'allure très stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée.

Le code couleur utilisé dans la liste ci-dessus est reproduit sur la **FIGURE 5-52** ci-dessous qui illustre la qualité de la calibration en régime transitoire.

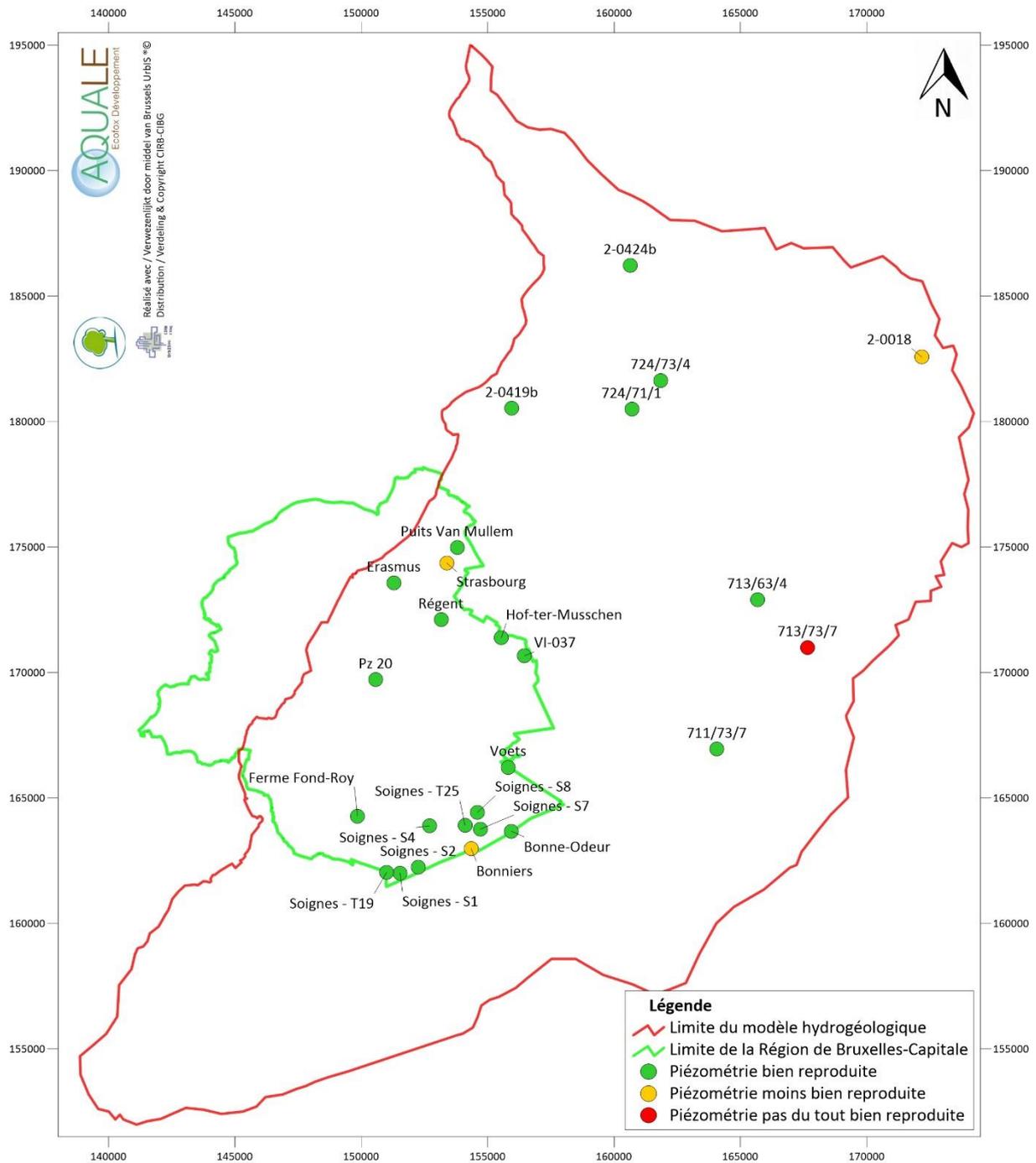


Figure 5-52 : Qualité de la calibration en régime transitoire

Il apparaît, grâce à cette dernière figure, que de nombreux points de contrôle de la calibration sont localisés dans la zone d'intérêt. Seuls deux points situés dans cette zone d'intérêt sont moins bien reproduits, à savoir le piézomètre Strasbourg et le piézomètre Bonniers.

Concernant le piézomètre Strasbourg, la période couverte par les données est assez courte (fin 2012 – 2013) et seule la première moitié de la période couverte est bien reproduite. Pour la seconde moitié de l'année 2013, l'allure piézométrique n'est pas très bien reproduite. En effet, durant cette période, le niveau d'eau mesuré est

très légèrement descendant, alors que le niveau d'eau simulé est très légèrement montant. Les amplitudes de variation sont cependant très faibles.

Concernant le piézomètre Bonniers, la très faible variation piézométrique saisonnière mesurée n'est pas reproduite. En effet, la simulation résulte en un comportement très stable du niveau piézométrique dans cette zone.

Globalement, la qualité de la calibration en régime transitoire est jugée très bonne.

5.4 ETAPE #8 – BILAN HYDROGÉOLOGIQUE

5.4.1 CALIBRATION EN RÉGIME PERMANENT – PÉRIODE DE MAI – JUIN 2013

La calibration a également porté sur les débits entrants et sortants du modèle hydrogéologique.

Dans ce chapitre, les débits simulés sont comparés aux débits mesurés (ou estimés).

5.4.1.1 BILAN GLOBAL

Le bilan global permet de vérifier que le modèle parvient bien à un état d'équilibre après simulation. Il permet par ailleurs de visualiser les débits globaux entrant et sortant du modèle. La **FIGURE 5-53** ci-dessous illustre ce bilan global.

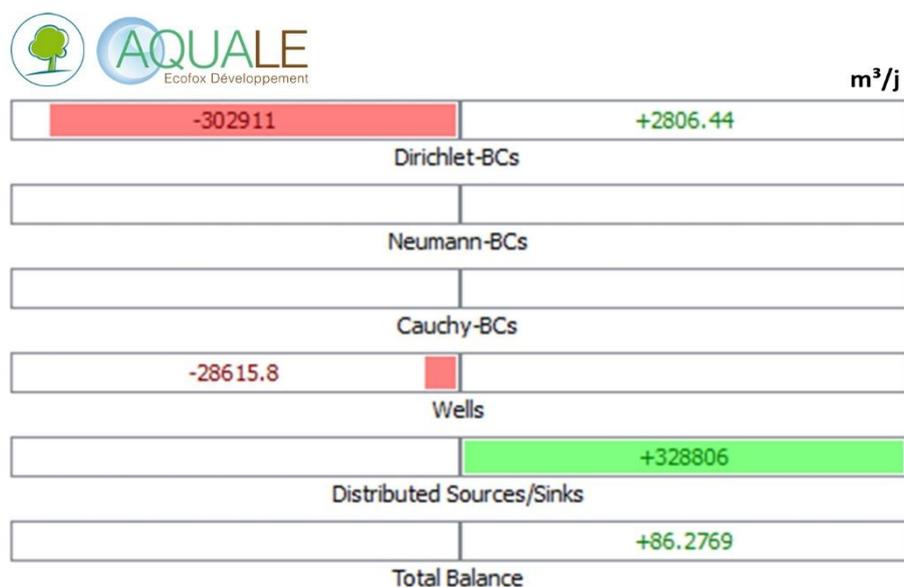


Figure 5-53 : Bilan global en m³/j en régime permanent pour la période de mai – juin 2013

Il apparaît sur cette figure que la balance totale est bien très proche de zéro. Le modèle parvient donc bien à un état global d'équilibre. Les sorties sont représentées par un signe négatif et en rouge (colonne de gauche). Les entrées sont représentées par un signe positif et en vert (colonne de droite).

La sortie majeure est liée aux conditions de Dirichlet (les niveaux d'eau imposés). Il s'agit des rivières, des collecteurs, des sources et de la galerie Vivaqua. Les puits (Wells) constituent également une sortie non négligeable mais de plus faible ampleur.

L'entrée majeure est l'eau météorique qui s'infiltré et l'eau en provenance des fuites des réseaux d'adduction (ces deux composantes sont reprises dans *Distributed sources/sinks* dans la figure ci-dessus). Les niveaux d'eau imposés constituent une entrée secondaire négligeable par rapport à l'infiltration de surface. Il s'agit de l'entrée à la limite Sud du modèle, entre les points de source du Hain et de l'Argentine.

5.4.1.2 ETAT DE CALIBRATION

Le **TABLEAU 5-25** reprend les débits mesurés (ou estimés) et les débits simulés pour la période de mai – juin 2013.

Type	Nom	Valeur à reproduire (m ³ /j)	Valeur simulée (m ³ /j)
Source	Source Defré	Environ 68	0
Source	Source du Sylvain*	Environ 314	360
Source	Source de l'Empereur*	Environ 940	610
Source	Source Félix Haps	Environ 16	50
Source	Source Fond Roy	Environ 42	70
Source	Source Fontaine de l'Amour	Environ 38	30
Source	Source Keelbeek	Environ 56	0
Source	Source Kinsendael	Environ 65	280
Source	Source Stade Falon	Environ 55	20
Source	Source Trois Fontaines*	Environ 482	250
Source	Source Vuylbeek*	Environ 58	40
Galerie	Galerie Vivaqua	Entre 5 200 et 5 600	5 300
Rivière	Senne (tout le tronçon formant la limite Ouest du modèle)	Entre 7 000 et 70 000	19 600
Rivière	Dyle (tout le tronçon formant la limite Est du modèle)	Entre 5 000 et 50 000	17 500
Rivière	Argentine (tout le tronçon formant la limite Sud du modèle)	Entre 860 et 8 600	8 700
Rivière	Lasne (tout le tronçon formant la limite Sud du modèle)	Entre 1 000 et 10 500	10 600
Rivière	Hain (tout le tronçon formant la limite Sud du modèle)	Entre 820 et 8 200	9 700
Rivière	Woluwe (en amont de Middlebourg)	Entre 1 800 et 2 500	2 200 (y inclus source Vuylbeek)
Rivière	Rode (en amont de Kloosterberg)	Entre 4 400 et 5 500	5 700 (y inclus sources du Sylvain, de l'Empereur et Trois Fontaines)

Type	Nom	Valeur à reproduire (m ³ /j)	Valeur simulée (m ³ /j)
Rivière	Woluwe (en amont de Gobert mais en aval de Kloosterberg et Middlebourg)	Proche de 0	0
Rivière	Woluwe (en amont de la sortie Région mais en aval de Gobert)	Proche de 0	0
Rivière	Voer	Entre 2 000 et 20 000	7 600
Rivière	Ijse	Entre 2 000 et 20 000	29 300
Collecteurs	Tous les collecteurs	Entre 50 000 et 70 000	65 000
Collecteurs	Collecteurs vers STEP Nord	Entre 43 000 et 58 000	50 600
Collecteurs	Collecteurs vers STEP Sud	Entre 7 000 et 12 000	14 500

Tableau 5-25 : Comparaison des débits mesurés (ou estimés) et simulés en régime permanent pour la période mai – juin 2013

Il apparaît que la majorité des débits sortants du modèle sont assez bien reproduits. L'ordre de grandeur du débit des points de sortie est bien conservé, bien que dans de nombreux cas, le débit simulé soit très légèrement supérieur à la limite maximale fixée. La **FIGURE 5-54** ci-dessous illustre graphiquement la reproduction des débits.

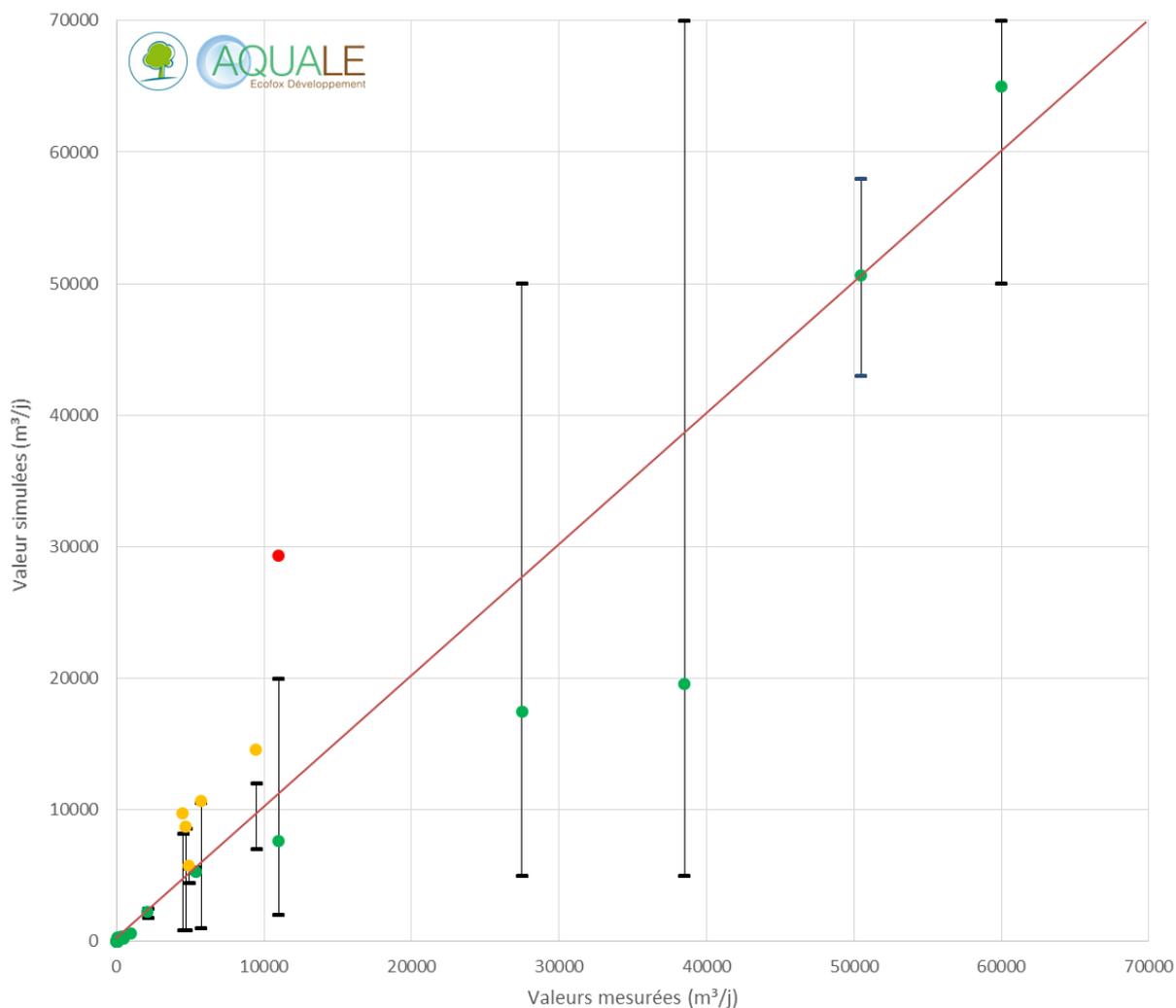


Figure 5-54 : Diagramme de dispersion (scatterplot) de l'ensemble des débits sortants pour la période de mai – juin 2013

Comme cela a été très largement abordé au **CHAPITRE 5.1.2**, les débits sortant du modèle ne sont pas connus avec une grande précision. Des fourchettes de valeurs acceptables ont été définies sur la base de différents critères. La droite à 45° dessinée sur la **FIGURE 5-54** ne peut pas être considérée, comme ce fut le cas pour les scatterplots relatifs à la reproduction des niveaux d'eau, comme la référence à atteindre. L'objectif n'est pas d'obtenir un alignement des points sur cette droite. En effet, sur cette figure, la fourchette de valeurs autorisées pour chaque sortie du modèle est représentée par une ligne verticale noire. Il faut donc comprendre le graphique comme ceci :

- lorsque la valeur simulée est située entre les deux extrémités du segment de droite vertical noir, alors la valeur simulée apparaît en vert et dans ce cas, il peut être considéré que le débit reproduit est bon ;
- lorsque la valeur simulée est située à proximité directe d'une extrémité du segment de droite vertical noir, alors la valeur simulée apparaît en orange et dans ce cas, il peut être considéré que le débit reproduit est acceptable, compte tenu du fait que :
 - o les fourchettes de valeurs limites ont été définies de manière assez arbitraire ;
 - o la localisation des points de sortie est la plupart du temps éloignée de la Région de Bruxelles-Capitale ;

- lorsque la valeur simulée est située largement en dehors du segment de droite vertical noir, alors la valeur simulée apparaît en rouge et dans ce cas, il peut être considéré que le débit est mal reproduit.

Chaque segment de droite noir est centré sur la droite à 45°. Cela signifie que cette droite à 45° a été définie en considérant que la valeur à atteindre était la moyenne entre la limite inférieure et la limite supérieure de la fourchette de valeurs acceptables.

La figure illustre que les débits sortants principaux sont bien reproduits. En effet, les 4 sorties majeures (tous les collecteurs, collecteurs vers STEP Nord, Senne, Dyle) sont reproduites dans la fourchette de valeurs acceptables définie.

La seule et unique sortie mal reproduite est l'Ijse dont le débit de drainage simulé semble surestimé dès lors que la limite maximale autorisée pour cette rivière était de 20 000 m³/j et que la sortie du modèle au droit de cette rivière atteint 29 300 m³/j. Le point suivant, correspondant au débit sortant par la Voer, est bien reproduit.

En poursuivant vers les valeurs plus basses, il apparaît que les sorties suivantes sont presque toutes légèrement surestimées. Il s'agit des sorties suivantes :

- les collecteurs vers la STEP Sud : 14 500 m³/j alors que la limite supérieure estimée est de 12 000 m³/j (+ 2 500 m³/j) ;
- la Lasne : 10 600 m³/j alors que la limite supérieure estimée est de 10 500 m³/j (+ 100 m³/j) ;
- le Hain : 9 700 m³/j alors que la limite supérieure estimée est de 8 200 m³/j (+ 1 500 m³/j) ;
- l'Argentine : 8 700 m³/j alors que la limite supérieure estimée est de 8 600 m³/j (+ 100 m³/j) ;
- le Rode : 5 700 m³/j alors que la limite supérieure estimée est de 5 500 m³/j (+ 200 m³/j) ;
- la Woluwe en amont de Middlebourg : 2 200 m³/j alors que la limite supérieure estimée est de 2 500 m³/j.

En ce qui concerne les collecteurs vers la STEP Sud, il est considéré que la valeur simulée est acceptable compte tenu de l'imprécision inhérente à la méthode d'estimation. De plus, le débit global sortant par l'ensemble des collecteurs est correctement reproduit.

Pour la Lasne et l'Argentine, la différence entre la limite supérieure et la valeur simulée est très faible et on peut dès lors considérer que la valeur simulée est acceptable, d'autant plus que ces sorties sont éloignées de la zone d'intérêt.

Concernant le Hain, l'erreur commise est un peu plus importante mais considérée également comme acceptable dès lors que cette sortie n'est pas jugée comme impactant fortement les débits au droit de la Région de Bruxelles-Capitale.

Enfin, en ce qui concerne le Rode, l'imprécision sur le débit est liée à la configuration extrêmement complexe de la zone caractérisée à la fois par la présence du collecteur de la Woluwe et par la rivière de la Woluwe. Ainsi, il n'est pas exclu qu'une partie du débit associé à ces deux tronçons de rivière (Woluwe amont Middlebourg et Rode amont Kloosterberg) soit en réalité partiellement inclus dans le débit drainé par le collecteur de la Woluwe. Ce collecteur drainant énormément d'eau (voir [CHAPITRE 5.1.2](#)), il peut être considéré qu'un ajout de 200 m³/j n'entraîne pas une surestimation du débit drainé par le collecteur de la Woluwe. Dès lors, les 200 m³/j de dépassement pour le Rode peuvent être considérés comme acceptables.

Le même graphique peut être réalisé en prenant en considération uniquement les sorties d'eau situées dans la zone d'intérêt qu'est la Région de Bruxelles-Capitale ([FIGURE 5-55](#)).

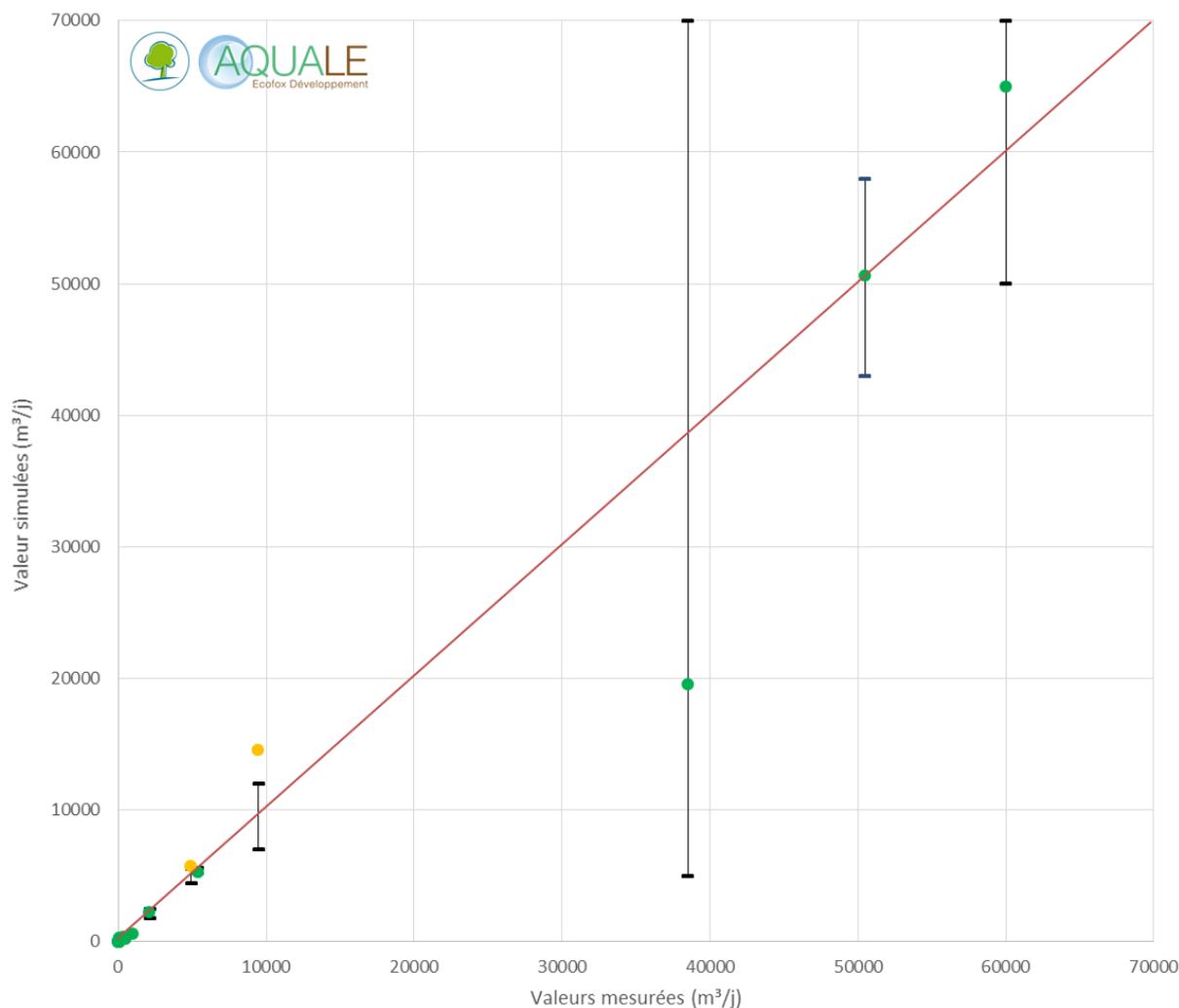


Figure 5-55 : Diagramme de dispersion (scatterplot) des débits sortants en Région de Bruxelles-Capitale pour la période de mai – juin 2013

Ce graphique confirme que la majorité des points sont bien reproduits avec une petite surestimation pour les collecteurs vers la STEP Sud et le Rode en amont de Kloosterberg.

Le débit de sortie le mieux documenté est celui de la Galerie Vivaqua. Celui-ci est parfaitement bien reproduit (point vert à 5 300 m³/j).

Le débit des sources est négligeable en comparaison des autres sorties. Celles-ci sont représentées par les points verts situés à proximité de l'origine des axes.

La calibration des débits en régime permanent pour la période de mai – juin 2013 est donc considérée comme acceptable dès lors que :

- les débits les plus importants sont bien reproduits puisque la valeur simulée se situe dans la fourchette de valeurs acceptables ;
- pour les débits intermédiaires, la valeur simulée est souvent très proche de l'extrémité supérieure de la fourchette de valeurs acceptables ;
- les débits faibles sont reproduits avec un bon ordre de grandeur.

5.4.2 CALIBRATION EN RÉGIME PERMANENT – PÉRIODE DE NOVEMBRE 2013

Puisque la même simulation a été utilisée comme référence pour les deux périodes, tous les résultats ne sont pas répétés ci-dessous pour la période de novembre 2013.

5.4.2.1 BILAN GLOBAL

Voir **CHAPITRE 5.4.1.1.**

5.4.2.2 ETAT DE CALIBRATION

Voir **CHAPITRE 5.4.1.2.**

5.4.3 CALIBRATION ET VALIDATION EN RÉGIME TRANSITOIRE – PÉRIODE DE 2009 À 2013

Bien qu'il était prévu de réaliser la calibration en régime transitoire sur l'année 2013 et une validation en régime transitoire sur la période couvrant les années 2009 à 2013, il a été décidé de réaliser directement la calibration sur la période 2009 à 2013. Cela n'a aucune incidence sur les résultats de l'étude puisque, dans les deux cas, le modèle est contraint par les mesures piézométriques et de débits disponibles pour la période 2009 – 2013.

Les différentes sorties suivantes sont suivies pour vérifier la qualité de la calibration en régime transitoire :

- tous les collecteurs ;
- la Senne ;
- l'Ijse ;
- la Voer ;
- la Woluwe en amont de Middlebourg ;
- le Rode en amont de Kloosterberg ;
- la Galerie Vivaqua.

Les débits des autres rivières (Dyle, Lasne, Argentine, Hain) jugés peu impactants sur la zone d'intérêt, ne sont pas repris pour vérifier la calibration en régime transitoire. Le débit des sources n'est pas vérifié non plus dès lors que ces sorties sont négligeables par rapport aux autres sorties.

Dans les pages qui suivent, les échelles verticales des graphiques sont choisies de manière à pouvoir comparer aisément les débits sortant des différents points de sortie (de 0 à 500 000 m³/j pour les collecteurs et la Senne, de 0 à 70 000 m³/j pour l'Ijse et la Voer ; de 0 à 10 000 m³/j pour la Woluwe, le Rode et la Galerie Vivaqua).

5.4.3.1 TOUS LES COLLECTEURS

La **FIGURE 5-56** ci-dessous illustre l'évolution du débit drainé par les collecteurs simulée par le modèle hydrogéologique ainsi que l'évolution du débit total entrant aux stations d'épuration.

Il apparaît que le débit simulé varie assez peu dans le temps. Il reste toujours bien inférieur aux débits entrants dans les STEP, ce qui est obligatoire. Le débit de drainage simulé peut être jugé comme bon.

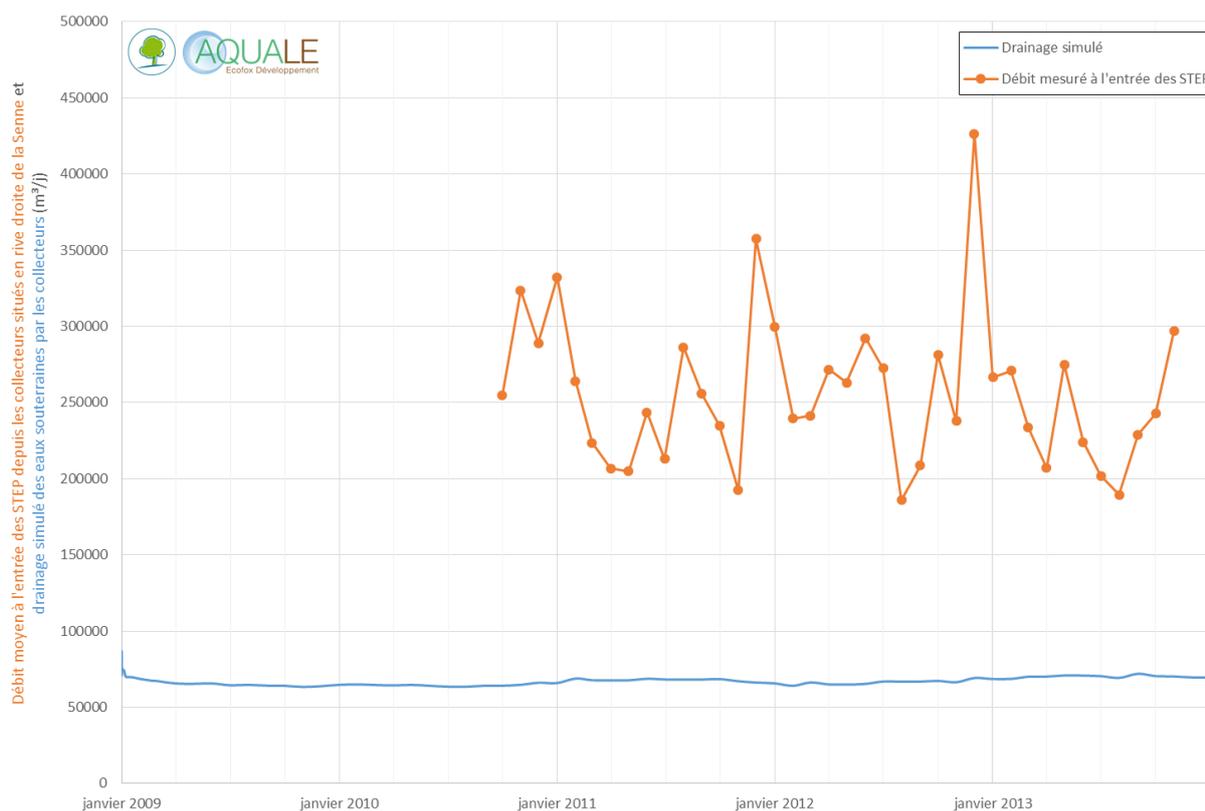


Figure 5-56 : Evolution du débit de drainage par les collecteurs en Région de Bruxelles-Capitale simulé en régime transitoire

5.4.3.2 LA SENNE

La **FIGURE 5-57** ci-dessous illustre l'évolution du débit drainé par la Senne simulée en région de Bruxelles-Capitale (rive Est) ainsi que l'augmentation du débit de la Senne mesurée entre l'entrée et la sortie de la Région. Pour rappel, cette augmentation est très majoritairement liée aux apports directs liés aux rejets anthropiques ou en provenance des collecteurs.

Il apparaît très clairement que l'augmentation de débit liée au drainage des eaux souterraines représente une part négligeable dans l'augmentation du débit de la Senne. Le débit de drainage simulé peut être jugé comme bon.

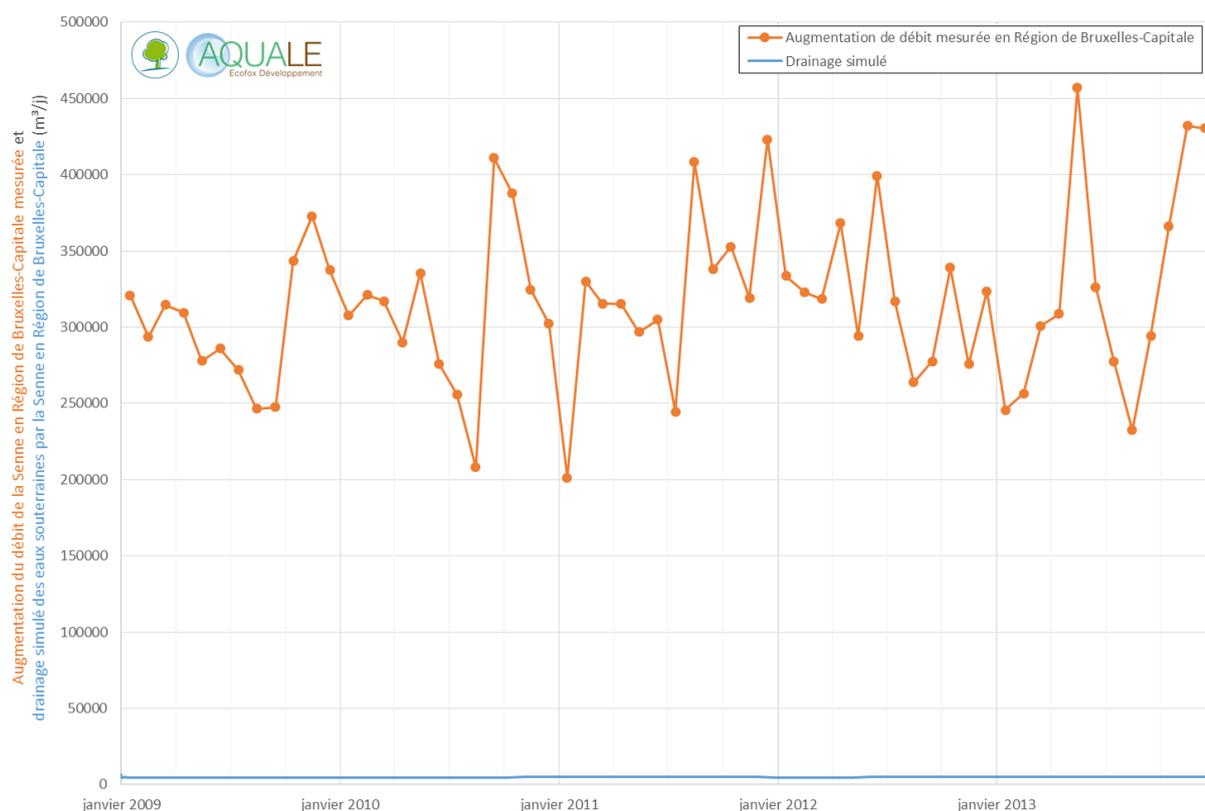


Figure 5-57 : Evolution du débit de drainage par la Senne en Région de Bruxelles-Capitale simulé en régime transitoire

5.4.3.3 L'IJSE

La **FIGURE 5-58** ci-dessous illustre l'évolution du débit drainé par l'Ijse simulée en amont de la station d'Huldenberg ainsi que le débit de l'Ijse mesuré à cette station. Pour rappel, l'Ijse étant située entièrement dans le modèle, il est considéré que le débit de drainage doit de toute façon être inférieur au débit mesuré de la rivière à son embouchure avec la Dyle. Puisque le niveau piézométrique des *nappes superficielle* et du *Bruxellien* varie peu dans le temps à proximité de l'Ijse, il est considéré que l'apport par drainage des nappes varie peu également. Si cet apport par drainage est constant et forcément inférieur au débit mesuré à la station d'Huldenberg, il ne doit pas dépasser 20 000 m³/j.

Il apparaît sur cette figure que le débit simulé est globalement trop élevé. Cette tendance confirme les observations réalisées dans le cadre de la calibration en régime permanent. Le débit sortant par la Dyle est donc trop élevé bien qu'il soit inférieur au débit mesuré durant quelques mois. Il est jugé que cette imprécision n'impacte pas négativement les résultats de la modélisation en Région de Bruxelles-Capitale. Le débit de drainage simulé diminue légèrement dans le temps.

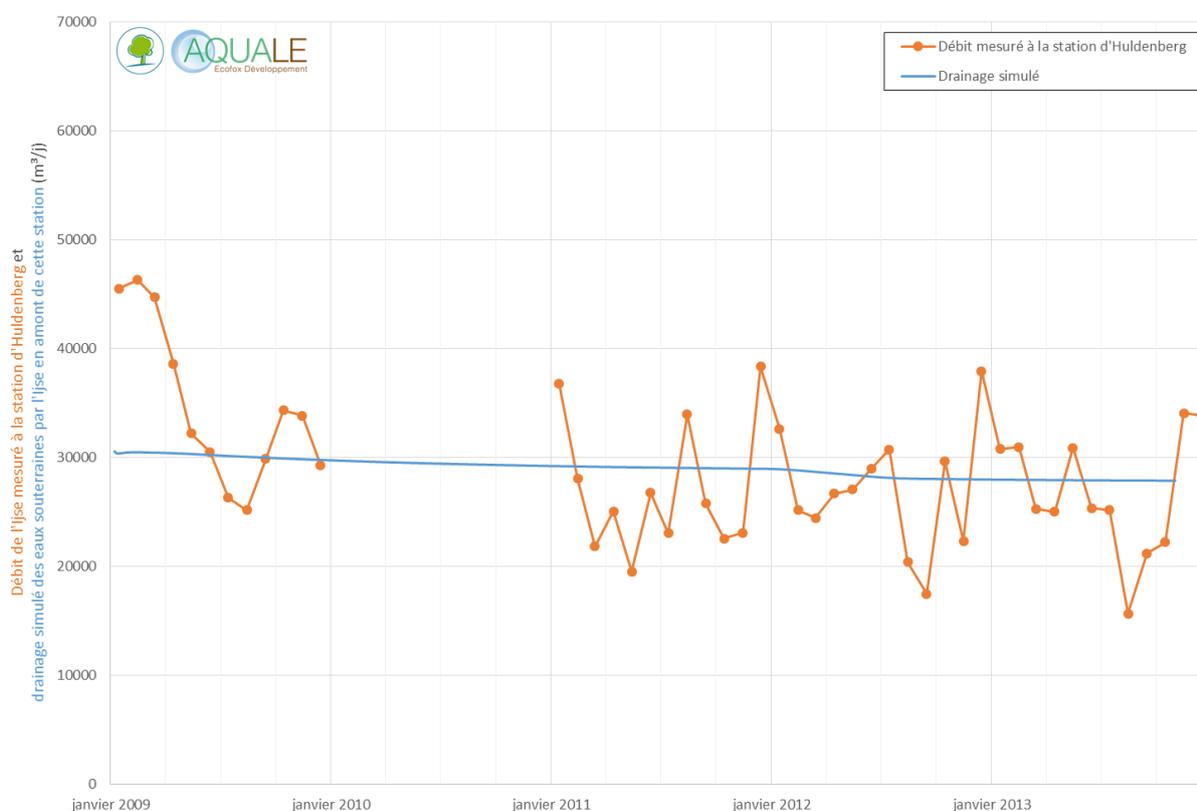


Figure 5-58 : Evolution du débit de drainage par l'Ijse en amont d'Huldenberg simulé en régime transitoire

5.4.3.4 LA VOER

La **FIGURE 5-59** ci-dessous illustre l'évolution du débit drainé par la Voer simulée en amont de la station d'Heverlee ainsi que le débit de la Voer mesuré à cette station. Pour rappel, la Voer étant située entièrement dans le modèle, il est considéré que le débit de drainage doit de toute façon être inférieur au débit mesuré de la rivière à son embouchure avec la Dyle. Puisque le niveau piézométrique des *nappes superficielle* et du *Bruxellien* varie peu dans le temps à proximité de la Voer, il est considéré que l'apport par drainage des nappes varie peu également. Si cet apport par drainage est constant et forcément inférieur au débit mesuré à la station d'Heverlee, il ne doit pas dépasser 20 000 m³/j.

Il apparaît que le débit de drainage simulé est bien inférieur au débit total mesuré. Il diminue légèrement durant l'année 2009 puis devient constant comme attendu. Le débit de drainage simulé peut donc être jugé comme bon. Entre juin 2010 et mars 2012, une oscillation du débit sortant est visible (oscillation entre 4 700 et 5 000 m³/j un mois sur deux). Cette oscillation, de très faible ampleur, est liée à une instabilité numérique.

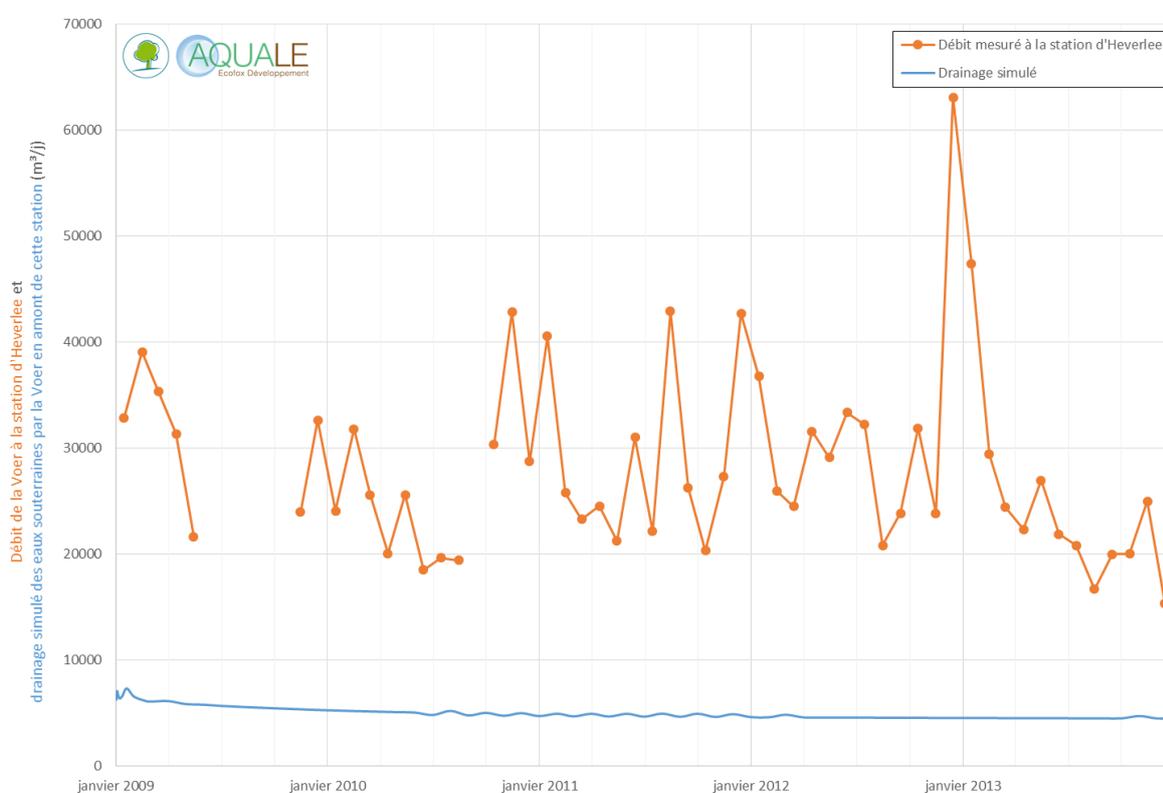


Figure 5-59 : Evolution du débit de drainage par la Voer en amont d'Heverlee simulé en régime transitoire

5.4.3.5 LA WOLUWE EN AMONT DE MIDDLEBOURG

La **FIGURE 5-60** ci-dessous illustre l'évolution du débit drainé par la Woluwe simulée en amont de la station de Middlebourg ainsi que le débit de la Woluwe mesuré à cette station. Pour rappel, puisque le niveau piézométrique des *nappes superficielle* et du *Bruxellien* varie peu dans le temps à proximité de la Woluwe, il est considéré que l'apport par drainage des nappes varie peu également. Si cet apport par drainage est constant et forcément inférieur au débit mesuré à la station de Middlebourg, il ne doit pas dépasser 2 200 m³/j.

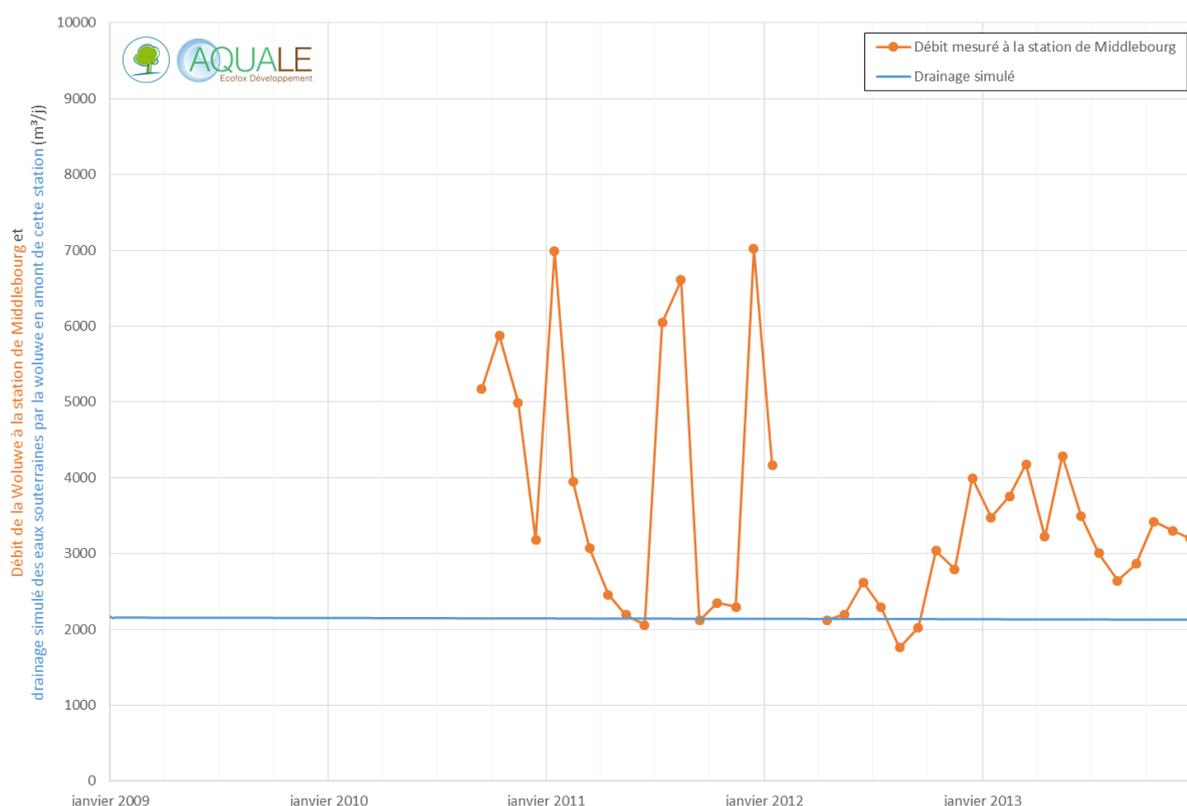


Figure 5-60 : Evolution du débit de drainage par la Woluwe en amont de Middlebourg simulé en régime transitoire

Bien que le débit simulé dépasse durant un total de 5 mois le débit mesuré de la Woluwe, le débit de drainage simulé peut être jugé comme bon dès lors qu'il est presque toujours inférieur au débit mesuré et qu'il est constant dans le temps, comme attendu.

5.4.3.6 LE RODE EN AMONT DE KLOOSTERBERG

La **FIGURE 5-61** ci-dessous illustre l'évolution du débit drainé par le Rode simulée en amont de la station de Kloosterberg ainsi que le débit du Rode mesuré à cette station. Pour rappel, puisque le niveau piézométrique des nappes superficielle et du Bruxellien varie peu dans le temps à proximité de la Woluwe, il est considéré que l'apport par drainage des nappes varie peu également. Si cet apport par drainage est constant et forcément inférieur au débit mesuré à la station de Kloosterberg, il ne doit pas dépasser 5 500 m³/j.

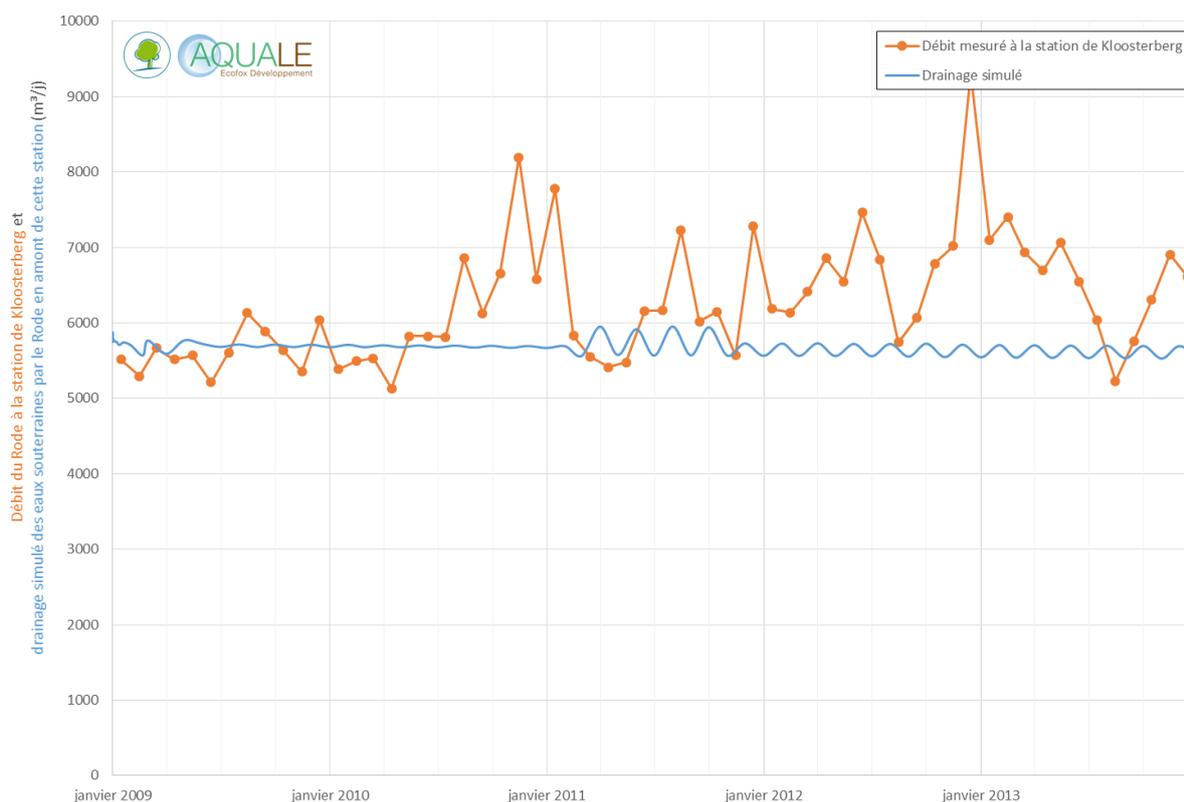


Figure 5-61 : Evolution du débit de drainage par le Rode en amont de Kloosterberg simulé en régime transitoire

Bien que le débit simulé dépasse durant quelques mois le débit mesuré du Rode, le débit de drainage simulé peut être jugé comme bon dès lors qu'il est presque toujours inférieur au débit mesuré et qu'il est constant dans le temps, comme attendu. A partir de février 2011, une oscillation du débit sortant est visible (oscillation entre 5 500 et 5 700 m³/j un mois sur deux). Cette oscillation, de très faible ampleur, est liée à une instabilité numérique.

5.4.3.7 LA GALERIE VIVAQUA

La **FIGURE 5-62** ci-dessous illustre l'évolution du débit drainé par la Galerie Vivaqua simulée ainsi que le débit mesuré en sortie de la galerie.

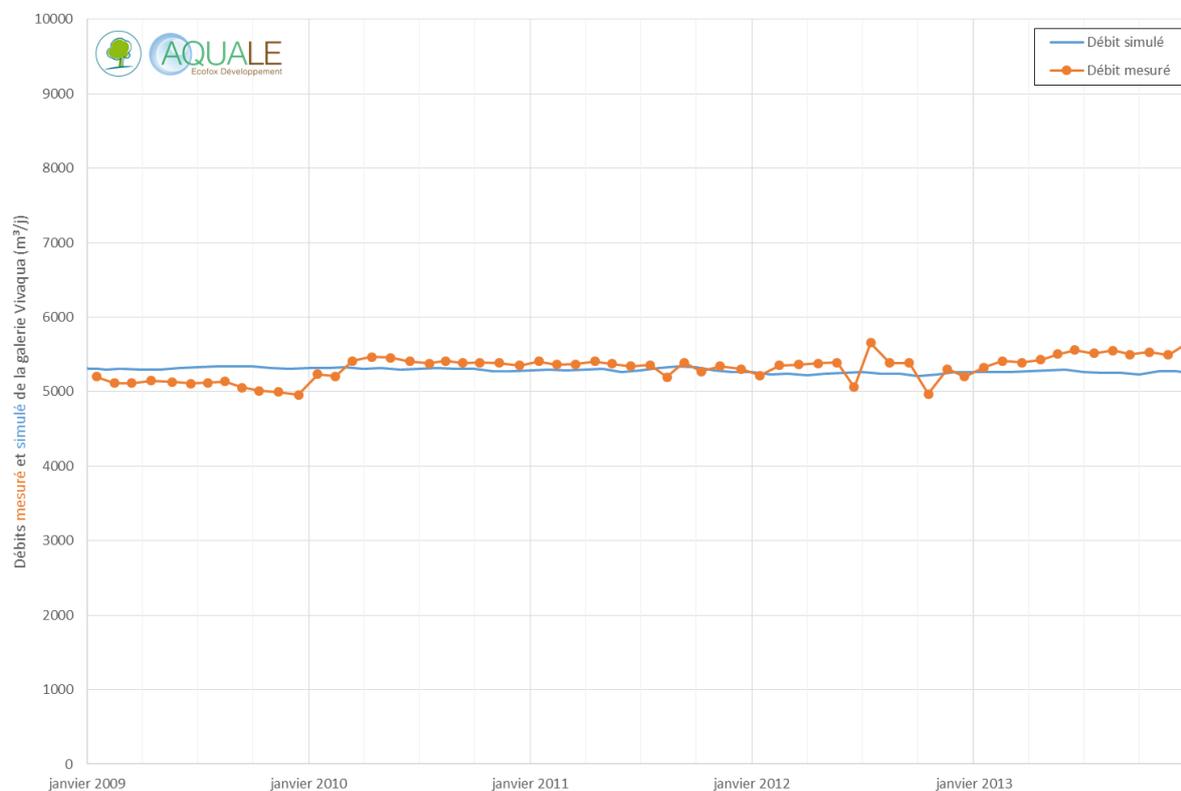


Figure 5-62 : Evolution du débit de la Galerie vivaqua simulé en régime transitoire

Le débit simulé peut être jugé comme très bon dès lors qu'il est très proche de la valeur mesurée.

5.5 CONCLUSION GÉNÉRALE SUR L'ÉTAT DE CALIBRATION DU MODÈLE HYDROGÉOLOGIQUE

La calibration a été réalisée :

- en régime permanent sur les périodes de mai – juin 2013 et de novembre 2013 ;
- en régime transitoire sur la période couvrant les années 2009 et 2013.

Pour vérifier l'état de calibration, la bonne reproduction des niveaux d'eau des *nappes superficielles*, du *Bruxellien* et de l'*Yprésien* et la bonne reproduction des débits prélevés dans le *Bruxellien* ont été vérifiées.

EN RÉGIME PERMANENT

En ce qui concerne la reproduction des niveaux d'eau, les indicateurs de calibration³¹ classiquement pris en compte pour juger de la qualité du modèle sont les suivants pour la période de mai-juin 2013 :

- Pour la *nappe superficielle* :
 - o SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 6.64 % ;
 - o SRMS (Scaled Root Mean Square) : 3.06 % ;
 - o CD (Coefficient of Determination) : 0.94 ;
- Pour la *nappe du Bruxellien* :
 - o SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 2.35 % ;
 - o SRMS (Scaled Root Mean Square) : 1.52 % ;
 - o CD (Coefficient of Determination) : 1.00 ;
- Pour la *nappe de l'Yprésien* :
 - o SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 3.06 % ;
 - o SRMS (Scaled Root Mean Square) : 2.91 % ;
 - o CD (Coefficient of Determination) : 1.02 ,

ce qui peut être jugé vraiment très bon.

En prenant en considération uniquement les points situés en Région de Bruxelles-Capitale ou à proximité directe (dans un rayon de 2 km), les indicateurs de calibration du Bruxellien sont les suivants :

- SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 1.15 % ;
- SRMS (Scaled Root Mean Square) : 1.31 % ;
- CD (Coefficient of Determination) : 1.02,

ce qui peut être jugé excellent.

En ce qui concerne la reproduction des débits, celle-ci est considérée comme acceptable dès lors que :

- les débits les plus importants sont bien reproduits puisque la valeur simulée se situe dans la fourchette de valeurs acceptables ;
- pour les débits intermédiaires, la valeur simulée est souvent très proche de l'extrémité supérieure de la fourchette de valeurs acceptables ;
- les débits faibles sont reproduits avec un bon ordre de grandeur.

EN RÉGIME TRANSITOIRE

En ce qui concerne la reproduction des niveaux d'eau, la qualité de la calibration en régime transitoire est jugée très bonne dès lors que seuls deux piézomètres (Bonnières et Strasbourg) sur les 18 situés dans la zone d'intérêt sont caractérisés par des niveaux d'eau moins bien reproduits.

En ce qui concerne la reproduction des débits, la qualité de la calibration en régime transitoire est jugée comme bonne dès lors que seul le débit drainé par l'Ijse semble fortement surestimé alors que les autres débits simulés sont jugés bons compte tenu des mesures disponibles.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au vu des observations reprises ci-dessus, le modèle est considéré comme très bien calibré et apte à répondre aux objectifs suivants :

³¹ Pour une très bonne calibration, les valeurs classiquement à atteindre sont < 5 % (SRMFS et SRMS) et ± 1 (CD)

- estimer les ressources disponibles ;
- quantifier les échanges d'eau souterraine avec la Région Flamande.

Toutefois, compte-tenu du contexte particulier de la vallée de la Woluwe caractérisé par :

- la présence d'une rivière et d'un collecteur superposés ;
- un débit drainé par le collecteur méconnu dans la réalité et très largement supérieur au débit drainé par les eaux de surface de la Woluwe ;
- des échanges très complexes et méconnus entre ce collecteur et la rivière ;

il est considéré que le modèle ne peut que partiellement mettre en évidence les interactions pouvant exister entre la masse d'eau souterraine du Bruxellien et les eaux de surface de la Woluwe. En effet, l'incertitude caractérisant le drainage de la nappe par le collecteur couvre totalement la gamme de débit drainé par les eaux de surface, ce qui induit, forcément, une imprécision sur les résultats.

6 ETUDE DE SENSIBILITÉ

La sensibilité est étudiée sur les différents paramètres d'entrée du modèle, à savoir :

- l'infiltration ;
- la conductivité hydraulique ;
- les débits de prélèvement par pompage ;
- les niveaux d'eau imposés au droit des rivières et collecteurs ;
- la porosité ;
- le coefficient d'emménagement.

L'impact d'une variation imposée sur les quatre premiers paramètres listés ci-dessus est étudié en régime permanent. L'impact d'une variation imposée sur les deux derniers paramètres listés ci-dessus est étudié en régime transitoire.

Les variations imposées aux paramètres sont réalisées dans des gammes de valeurs jugées acceptables. Dans ce cadre, l'évolution de l'indicateur de calibration SRMS est évidemment suivie. Pour rappel, cet indicateur est de 1.52 % pour l'ensemble des piézomètres crépinés dans la *nappe du Bruxellien* de la zone modélisée dans le cadre de la calibration en régime permanent sur la période de mai 2013.

L'objectif est, à ce stade, de déterminer la sensibilité du modèle vis-à-vis des paramètres d'entrée.

A l'issue de la présente étude de sensibilité, les gammes de variations acceptables pour les différents paramètres pourront être évaluées. L'incertitude sur les différents paramètres d'entrée sera également quantifiée.

6.1 INFILTRATION ET CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

L'influence de la variation de ces paramètres est étudiée en régime permanent sur la période de mai 2013. Sur ces deux paramètres, les coefficients multiplicateurs suivants sont imposés :

- 0.50 ;
- 0.75 ;
- 1.00 ;
- 1.25 ;
- 1.50.

Ces coefficients sont appliqués sur l'infiltration comme sur la conductivité hydraulique et selon toutes les combinaisons possibles. Dès lors, 25 simulations (5 x 5) sont réalisées. La **FIGURE 6-1** ci-dessous illustre l'évolution de l'indicateur de qualité de la calibration en régime permanent en fonction de l'évolution de l'infiltration et de la conductivité hydraulique. La zone de calibration acceptable est délimitée par la courbe de SRMS à 2.5 %. Les gammes de valeurs pour lesquelles le débit des rivières devient trop élevé ou trop faible sont également identifiées.

Sur cette figure, la zone en vert représente la zone de variation acceptable des paramètres. En dehors de cette zone :

- soit les niveaux d'eau sont mal reproduits (en progressant vers la droite ou vers la gauche, le SRMS devient trop élevé) ;

- soit les débits sont mal reproduits (en progressant vers le bas ou vers le haut, les débits drainés par les différents exutoires sortent des marges acceptables).

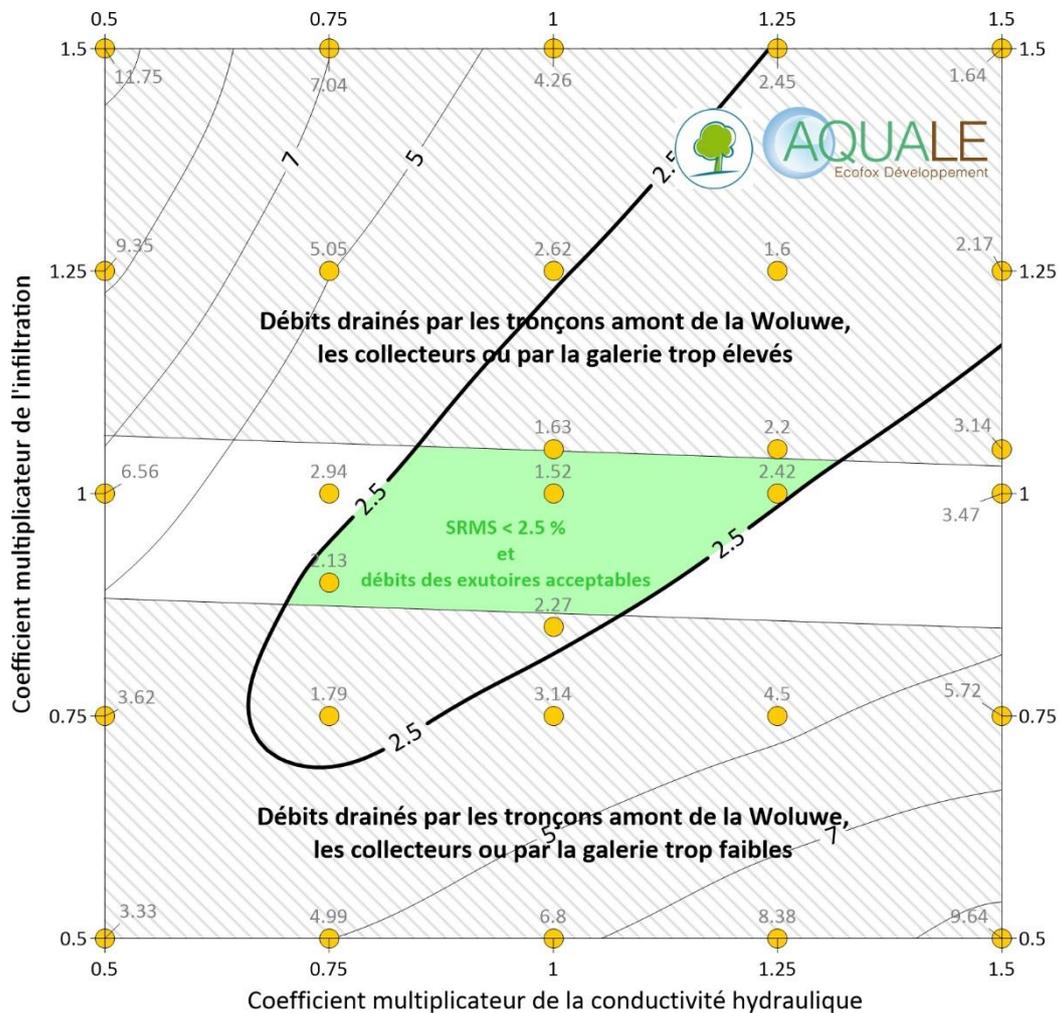


Figure 6-1 : Graphique de l'étude de sensibilité sur l'infiltration et la conductivité hydraulique

Les points jaunes sur cette figure représentent les différentes simulations réalisées dans le cadre de l'étude de sensibilité. Le chiffre grisé juste à côté représente le SRMS de la simulation correspondante. Il apparaît que la simulation de calibration, située au centre (coefficients multiplicateurs égaux à 1 pour les deux paramètres), est bien la simulation qui permet d'obtenir le SRMS le plus bas. Plus de 25 simulations ont finalement été réalisées afin de positionner précisément les limites acceptables.

Il apparaît également sur cette figure que l'infiltration imposée au modèle se situe plutôt dans la partie haute des valeurs d'infiltration acceptable. En effet, la zone verte s'étend largement plus vers le bas, soit vers une réduction de l'infiltration.

Il peut être déduit de cette observation que l'infiltration imposée au modèle semble adéquate mais dans la tranche élevée des valeurs acceptables. Cette éventuelle surestimation serait cependant faible et ne peut être

confirmée sur la base de l'ensemble des données à disposition. L'infiltration imposée au modèle est le meilleur ajustement possible en tenant compte des données disponibles et du processus de calibration.

Cette figure indique par ailleurs que la conductivité hydraulique imposée au modèle est du bon ordre de grandeur. En effet, à infiltration constante (selon les lignes horizontales 0.75, 1 ou 1.25), il apparaît que le SRMS devient rapidement trop élevé en cas d'augmentation (vers la droite) ou de diminution (vers la gauche) de la conductivité hydraulique.

Le modèle est assez sensible aux variations de ces paramètres et il conviendra d'évaluer l'incertitude sur les résultats liés à l'incertitude sur ces paramètres.

6.2 DÉBITS PRÉLEVÉS PAR POMPAGE

L'influence des débits prélevés par pompage devrait être assez faible au point de vue régional compte tenu du débit relativement faible prélevé par les puits, en comparaison avec l'impact des collecteurs, rivières, ruisseaux et galerie...

A l'inverse, il est clair que les débits prélevés par pompage ont une influence locale importante sur le niveau de la nappe. Le modèle hydrogéologique n'a cependant pas été calibré pour représenter correctement ces effets locaux, compte tenu des nombreuses inconnues subsistant sur les débits prélevés et du caractère régional du modèle.

A titre indicatif, des simulations sont réalisées en considérant une variation de l'ensemble des débits prélevés par les points de pompage au sein de la *nappe du Bruxellien*. Les coefficients multiplicateurs suivants sont imposés :

- 0.3 ;
- 0.6 ;
- 2.0 ;
- 3.0.

L'impact sur les niveaux d'eau simulés et sur le SRMS est observé.

Le **TABLEAU 6-1** ci-dessous reprend les SRMS calculés dans les différents cas de figure.

Cas	SRMS (%)
Débits x 0.3	1.87
Débits x 0.6	1.66
Référence	1.52
Débits x 2.0	3.07
Débits x 3.0	6.32

Tableau 6-1 : Sensibilité du modèle vis-à-vis des débits prélevés par pompage

Il apparaît que le SRMS est très faiblement impacté en cas de diminution des débits prélevés. Cela est lié au fait que les débits mis en jeu sont faibles et perturbent donc peu la calibration. L'impact est plus important pour les deux dernières simulations puisque la modification de débit prélevé est plus importante.

Les FIGURES 6-2 à 6-5 illustrent l'impact à la baisse ou à la hausse sur le niveau de la nappe étudiée.

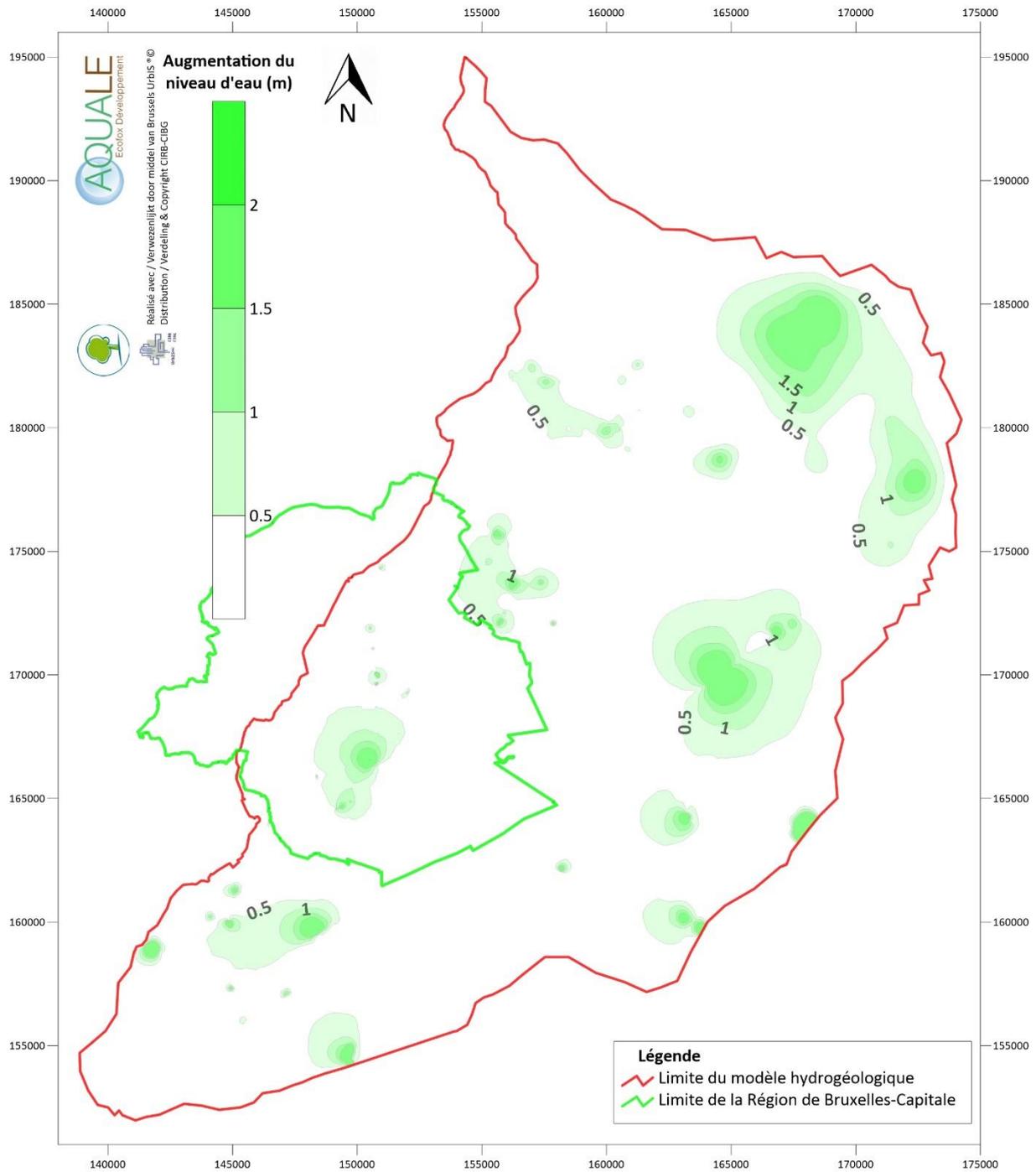


Figure 6-2 : Augmentation du niveau d'eau simulé lorsque le débit prélevé par pompage est de 30 % du débit imposé dans le cadre de la calibration en régime permanent

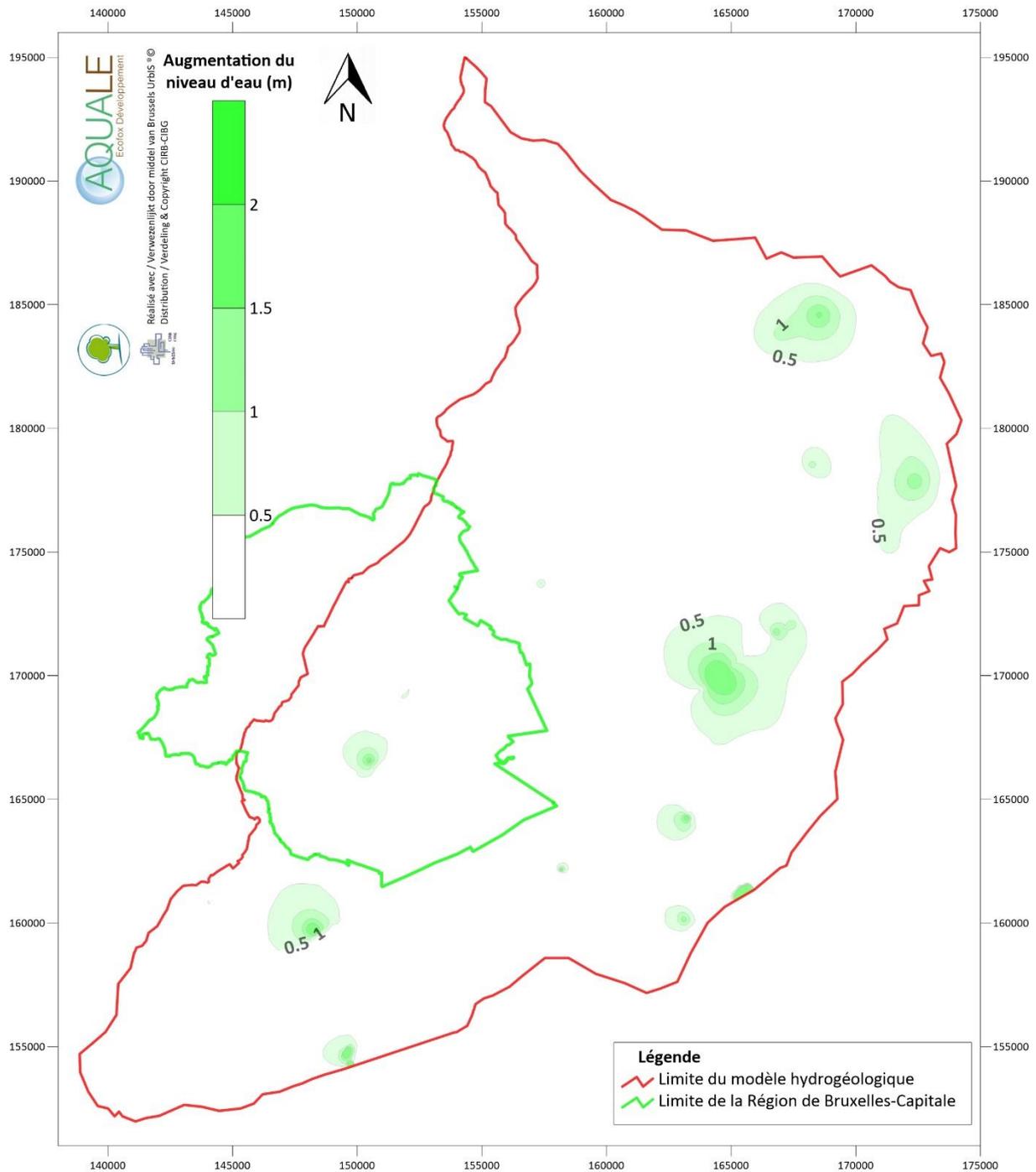


Figure 6-3 : Augmentation du niveau d'eau simulé lorsque le débit prélevé par pompage est de 60 % du débit imposé dans le cadre de la calibration en régime permanent

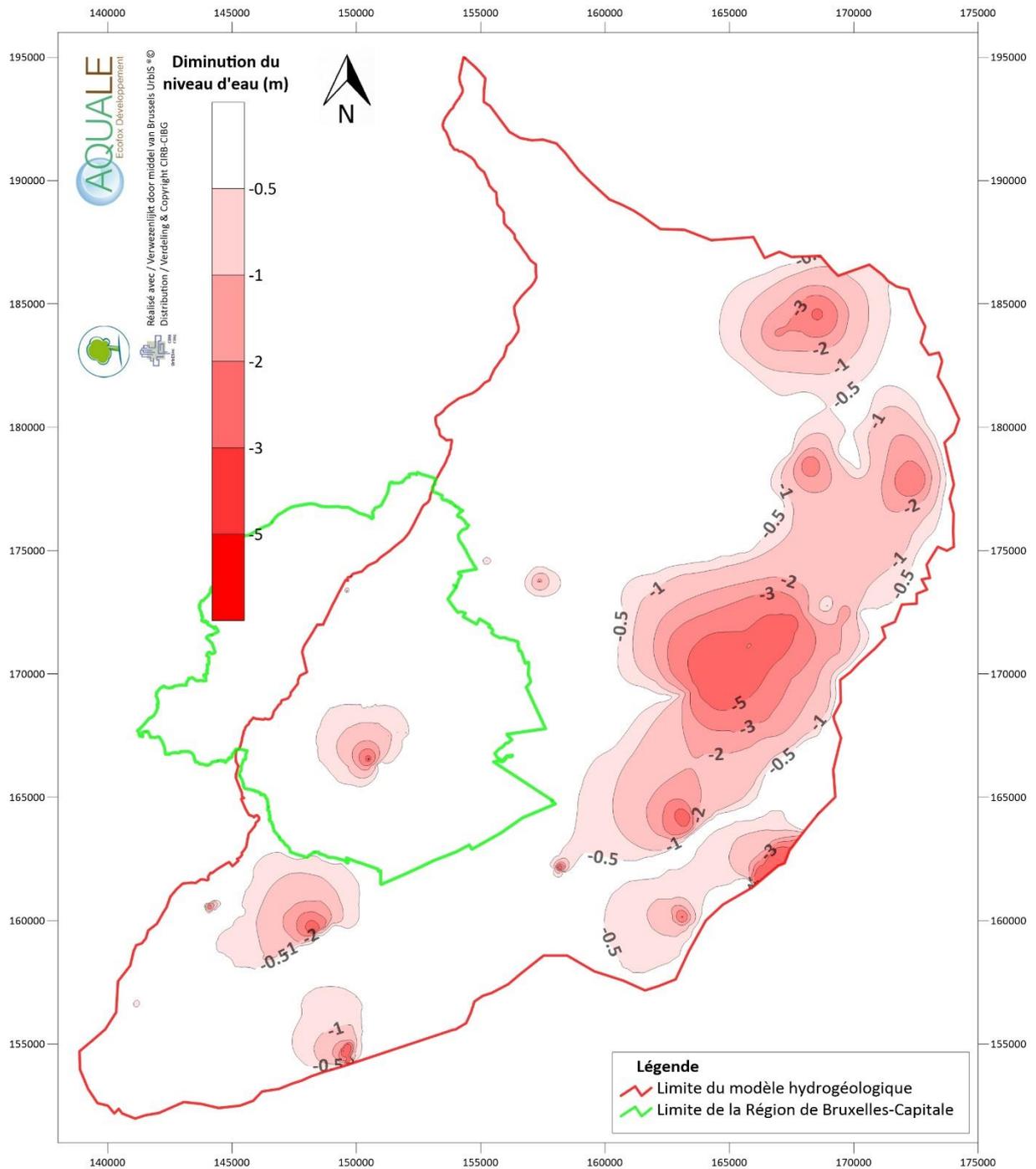


Figure 6-4 : Diminution du niveau d'eau simulé lorsque le débit prélevé par pompage est de 200 % du débit imposé dans le cadre de la calibration en régime permanent

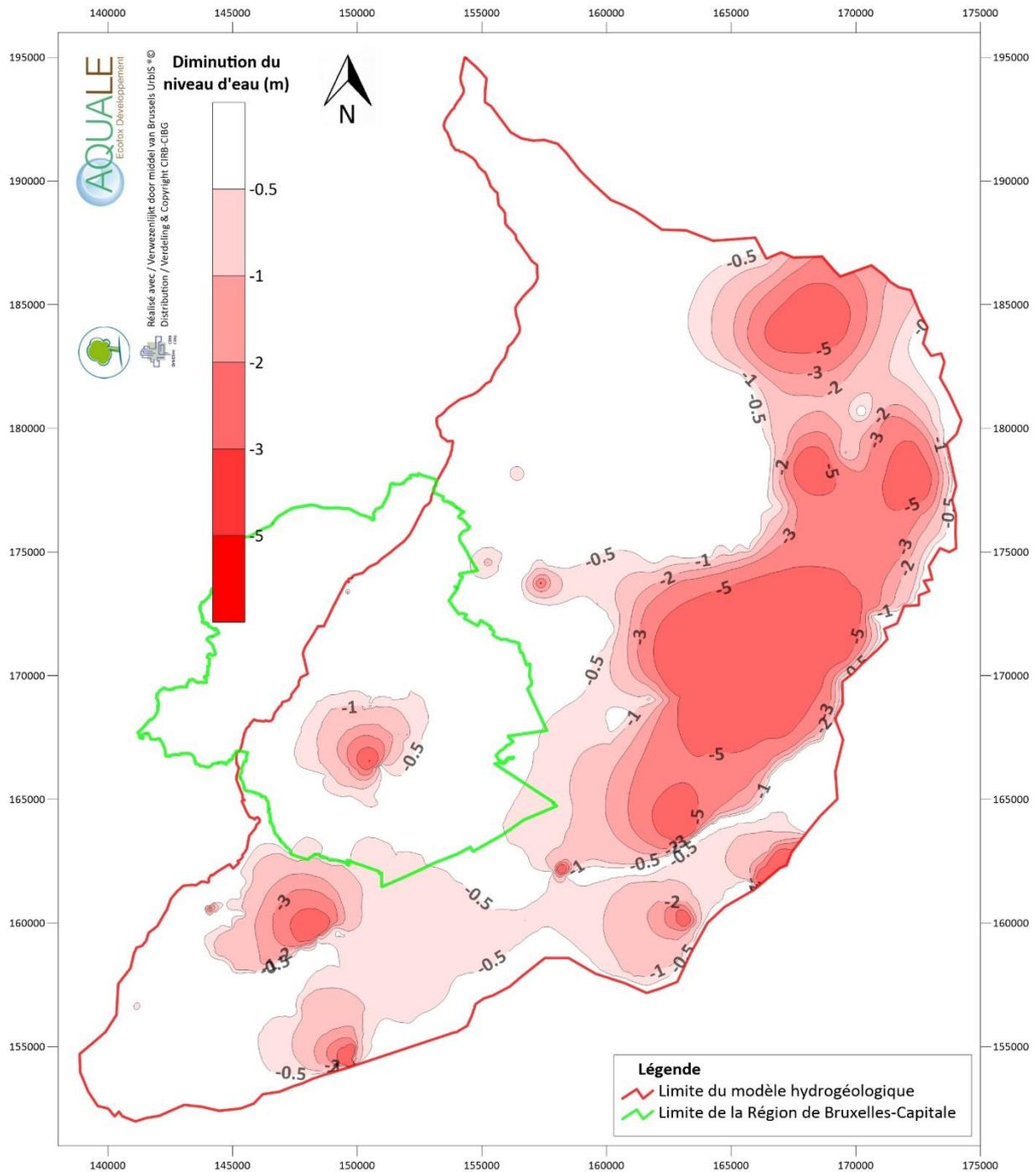


Figure 6-5 : Diminution du niveau d'eau simulé lorsque le débit prélevé par pompage est de 300 % du débit imposé dans le cadre de la calibration en régime permanent

Ces figures illustrent également l'impact plus important pour les deux dernières simulations. Cet impact est surtout visible dans la partie Est du modèle, là où des puits de pompage à débit élevé sont présents.

La sensibilité du modèle vis-à-vis des débits de prélèvement par pompage est plus faible que vis-à-vis de l'infiltration et de la conductivité hydraulique. Cela est lié au fait que les puits de pompage prélèvent une quantité d'eau assez faible annuellement par rapport au volume d'eau prélevé / drainé par les ruisseaux, collecteurs et

galerie. Cet impact est faible également sur les débits des exutoires vu que ceux-ci sont d'un ou de deux ordres de grandeur plus élevés que les débits des puits.

Localement, cet impact n'est pas du tout négligeable. Une augmentation du débit de prélèvement dans les puits voire l'ajout de nouveaux puits aura un effet potentiellement important.

6.3 NIVEAUX D'EAU IMPOSÉS AU DROIT DES RIVIÈRES ET COLLECTEURS

Le niveau d'eau des rivières est connu avec une précision variable en fonction des zones (dans ou en dehors de Bruxelles), du contexte (rivière couverte ou à ciel ouvert), de l'encaissement propre de la rivière par rapport à la topographie environnante... Le niveau d'eau rabattu à proximité des collecteurs est encore moins bien connu dès lors que l'on sait que les collecteurs jouent un rôle drainant important sans pour autant créer un rabattement du niveau de la nappe jusqu'au niveau des collecteurs.

Des simulations sont réalisées en considérant une variation de l'ensemble des niveaux d'eau imposés au droit des rivières et collecteurs. Ces niveaux sont modifiés selon le protocole suivant :

- - 2 m ;
- - 1 m ;
- + 1 m ;
- + 2 m.

Une simulation additionnelle est ensuite réalisée en diminuant de 2 m les niveaux d'eau imposés au droit des collecteurs qui ont une influence importante dans la zone d'intérêt.

Diminuer un niveau d'eau imposé revient à diminuer la hauteur absolue d'un exutoire. A l'inverse, augmenter un niveau d'eau imposé revient à augmenter la hauteur absolue d'un exutoire.

L'impact sur les niveaux d'eau simulés, les débits drainés par ces rivières et collecteurs ainsi que sur le SRMS est observé.

Le **TABLEAU 6-2** ci-dessous reprend les SRMS calculés dans les différents cas de figure. Il reprend aussi le débit drainé par les collecteurs et les tronçons amont de la Woluwe, indicateurs de la qualité de la calibration en Région de Bruxelles-Capitale.

Cas	SRMS (%)	Débit drainé par les collecteurs (m ³ /j)	Débit drainé par la Woluwe en amont de Middlebourg (m ³ /j)	Débit drainé par la Rode en amont de Kloosterberg (m ³ /j)
		[50 000 – 70 000 m ³ /j]	[180 – 1 800 m ³ /j]	[500 – 5 000 m ³ /j]
NEI - 2 m	2.52	67 000	2 300	5 400
NEI - 1 m	1.90	66 000	2 200	5 400
Référence	1.52	65 000	2 200	5 700
NEI + 1 m	1.90	64 000	2 300	6 000
NEI + 2 m	2.63	63 000	2 300	6 000
NEI - 2 m collecteurs	1.75	74 000	1 700	4 300

Tableau 6-2 : Sensibilité du modèle vis-à-vis des niveaux d'eau imposés au droit des rivières et collecteurs

Il apparaît dans ce tableau que le SRMS est assez peu impacté par les variations de niveaux d'eau imposés. Les débits évoluent assez peu également dès lors que l'ensemble des niveaux d'eau imposés sont modifiés.

L'impact de modifications des niveaux d'eau pourrait être plus important pour une rivière / un collecteur en particulier si celui-ci était le seul à faire l'objet d'une modification (voir simulation NEI – 2 m collecteurs). En effet, il apparaît dans la dernière simulation que la seule modification du niveau des collecteurs entraîne une très forte augmentation du débit drainé par ceux-ci et une forte diminution du débit drainé par les exutoires les plus proches.

Cela signifie que, globalement, une erreur uniforme sur l'ensemble des niveaux d'eau imposés n'a que très peu d'impact sur la calibration des débits du modèle. A l'inverse, une erreur variable ou localisée sur une rivière / un collecteur voire un tronçon de rivière / collecteur a plus d'incidences sur les débits des exutoires proches. Etant donné qu'une telle modification a un impact fort sur les débits drainés par les collecteurs, les résultats de simulations donnent rapidement des valeurs de débits drainés sortant des gammes de valeurs acceptables. Il est donc jugé très peu probable qu'une telle erreur soit commise sur les niveaux d'eau imposés.

Les **FIGURES 6-6 à 6-10** illustrent l'impact à la baisse ou à la hausse sur le niveau de la nappe étudiée. Globalement, il apparaît que le niveau de la nappe monte ou descend de 1 à 2 m selon l'ampleur de la modification apportée aux niveaux d'eau imposés. Cette modification est visible sur la totalité de la zone modélisée si tous les niveaux d'eau imposés sont modifiés. Elle est par contre limitée à la Région de Bruxelles-Capitale dans le cas où seuls les collecteurs sont modifiés.

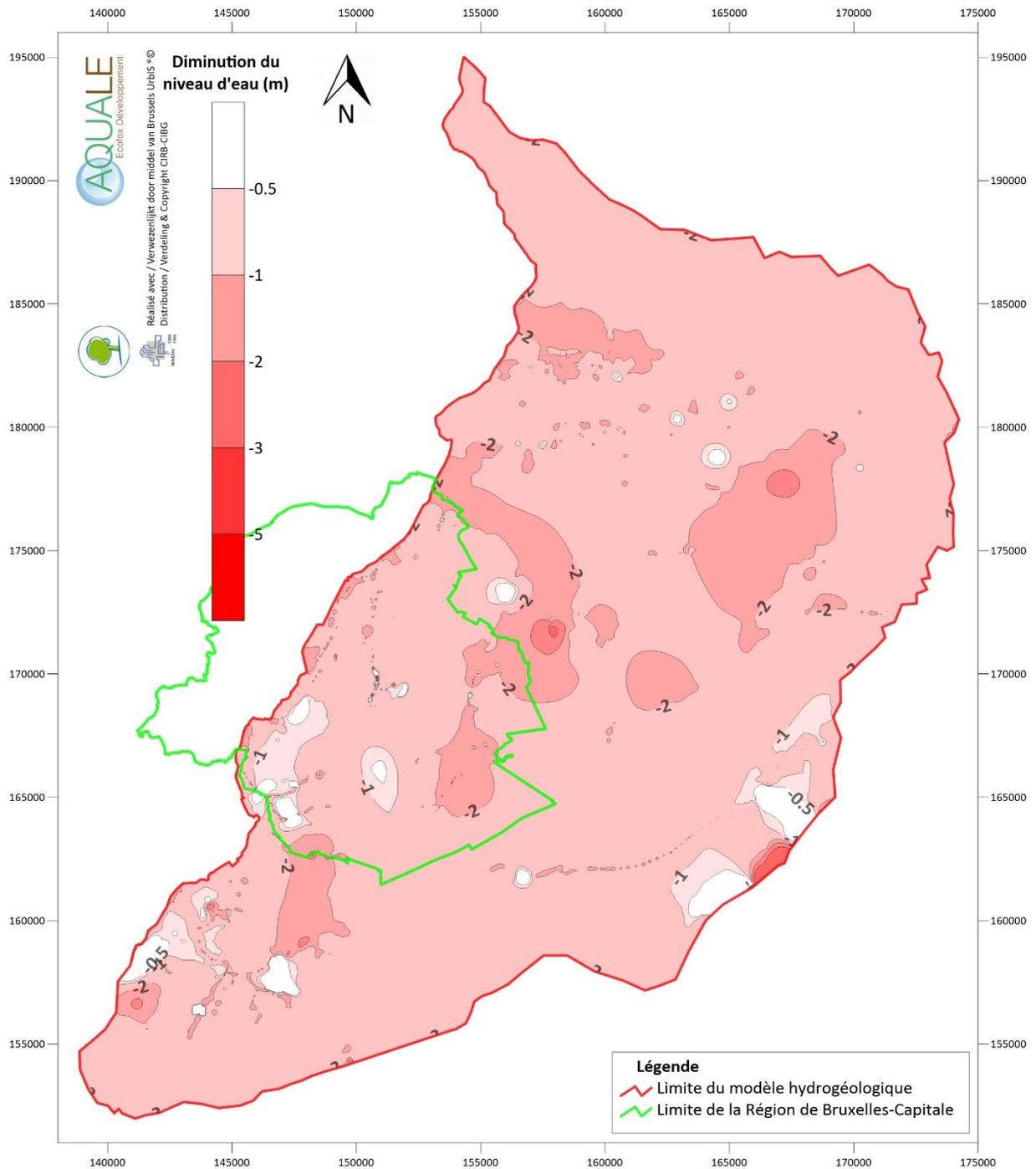


Figure 6-6 : Diminution du niveau d'eau simulé lorsque les niveaux d'eau imposés sont diminués de 2 m sur l'ensemble des rivières et collecteurs dans le cadre de la calibration en régime permanent

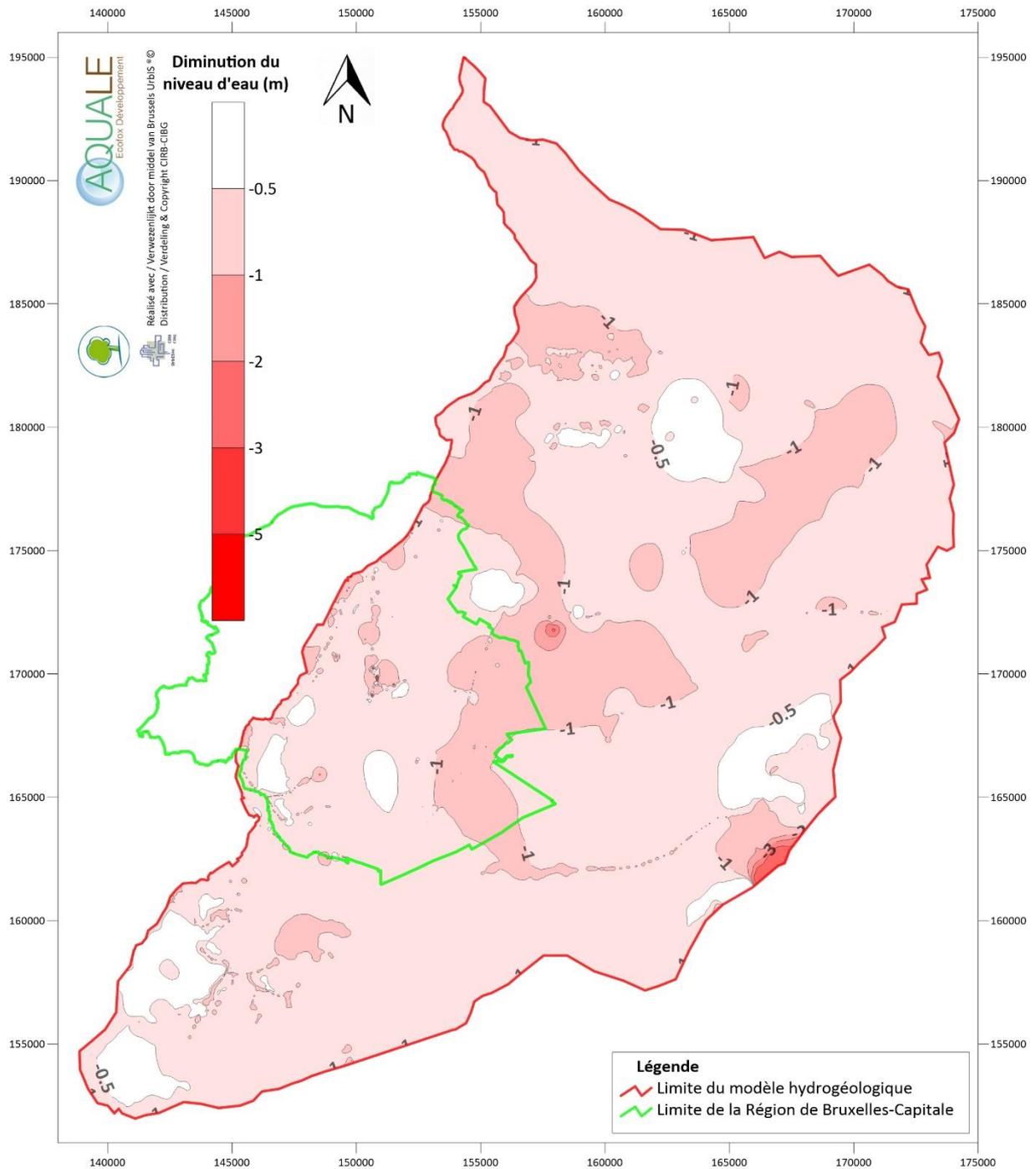


Figure 6-7 : Diminution du niveau d'eau simulé lorsque les niveaux d'eau imposés sont diminués de 1 m sur l'ensemble des rivières et collecteurs dans le cadre de la calibration en régime permanent

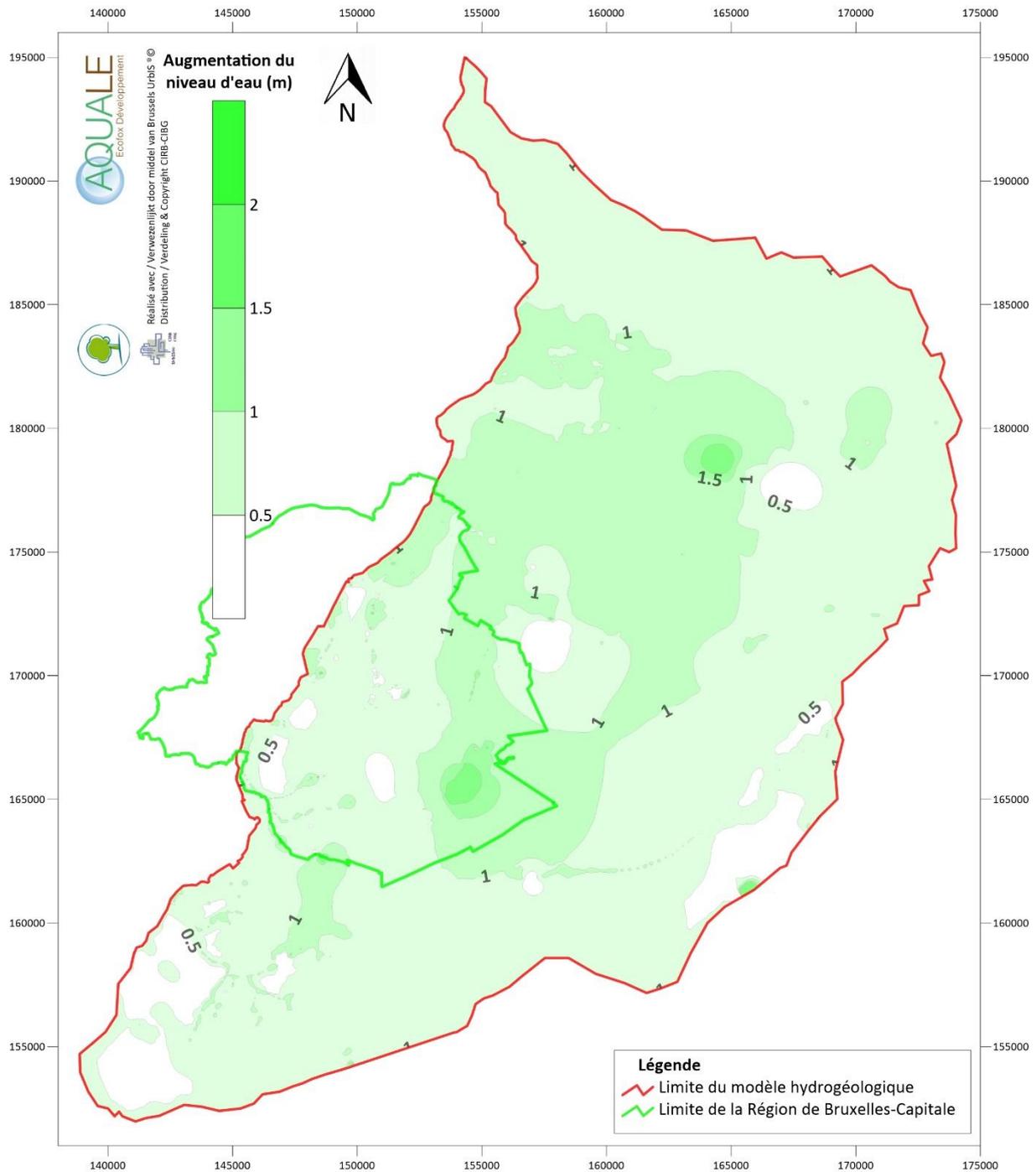


Figure 6-8 : Augmentation du niveau d'eau simulé lorsque les niveaux d'eau imposés sont augmentés de 1 m sur l'ensemble des rivières et collecteurs dans le cadre de la calibration en régime permanent

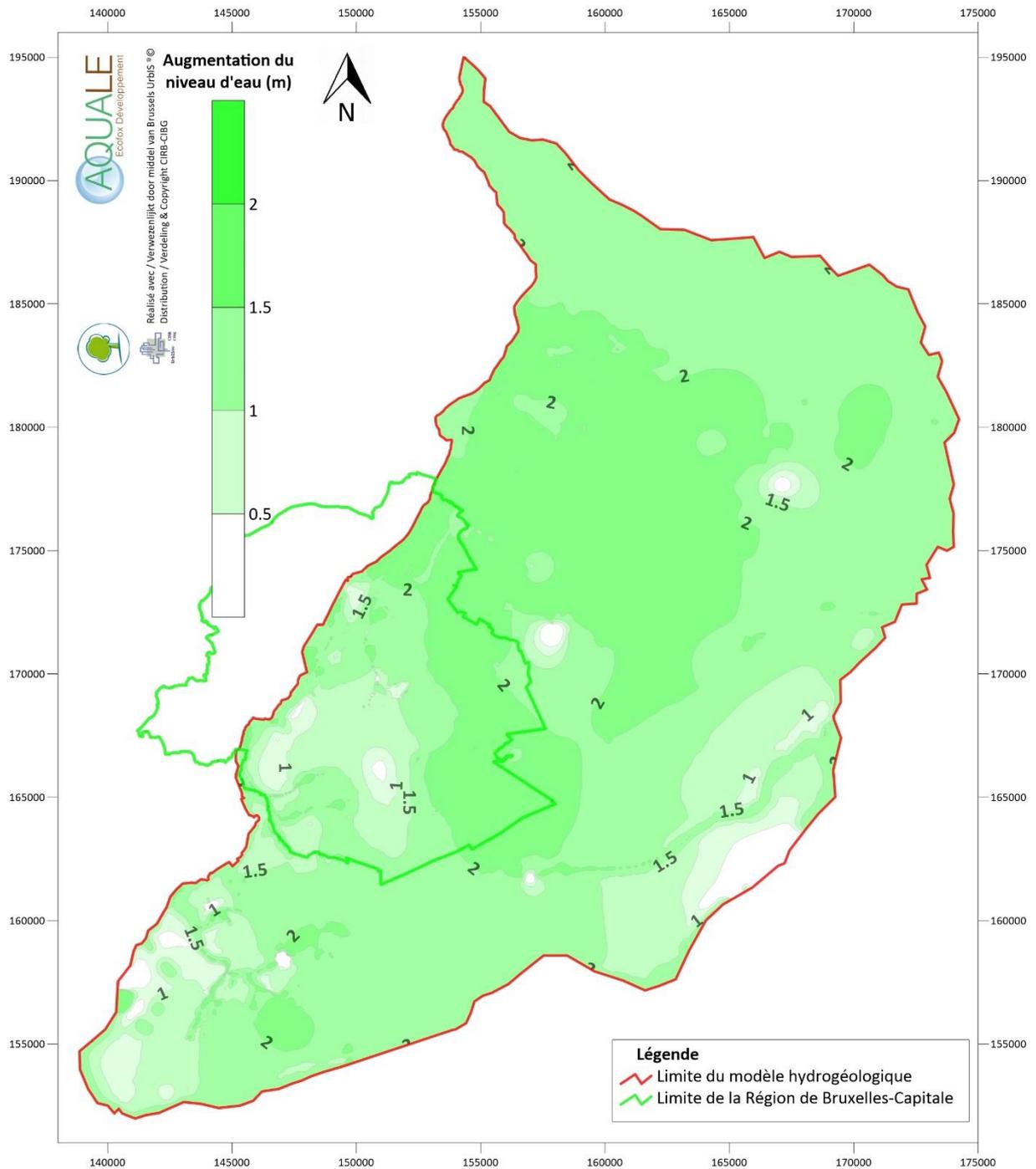


Figure 6-9 : Augmentation du niveau d'eau simulé lorsque les niveaux d'eau imposés sont augmentés de 2 m sur l'ensemble des rivières et collecteurs dans le cadre de la calibration en régime permanent

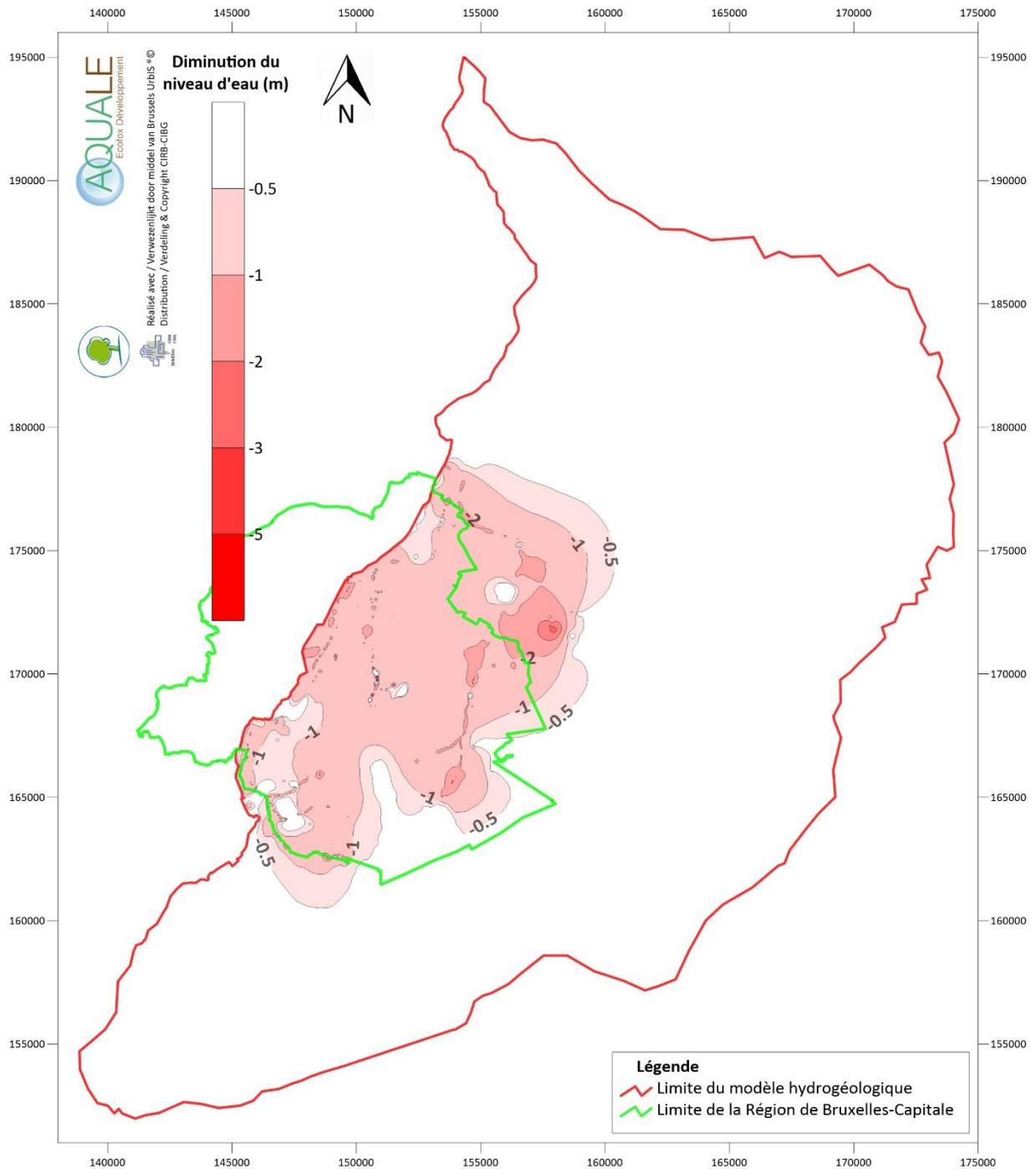


Figure 6-10 : Diminution du niveau d'eau simulé lorsque les niveaux d'eau imposés sont diminués de 2 m sur l'ensemble des collecteurs dans le cadre de la calibration en régime permanent

6.4 POROSITÉ

L'impact de la modification de la porosité doit être évalué en régime transitoire. Les coefficients multiplicateurs suivants sont successivement imposés pour ce paramètre :

- 0.2 ;
- 0.5 ;
- 2 ;
- 5.

La simulation en régime transitoire est analysée sur deux années, à savoir 2009 et 2010. L'évolution de la piézométrie est observée pour trois ouvrages de référence :

- Pz20 (**FIGURE 6-11**) ;
- VI-037 (**FIGURE 6-12**) ;
- 2-0419b (**FIGURE 6-13**).

Ces figures illustrent que :

- la porosité influence fortement l'amplitude des variations temporelles de piézométrie ;
- la piézométrie est d'autant plus sensible dans les zones de fort battement piézométrique (voir **FIGURE 6-13**, piézomètre 2-0419b) ;
- dans les zones où la variation temporelle est faible, l'impact d'une modification de porosité est nettement plus faible ;
- le champ de porosité appliqué dans le cadre de la calibration en régime transitoire représente le meilleur compromis pour la reproduction des niveaux d'eau en régime transitoire sur la période 2009 – 2013.

Ces graphiques montrent également que modifier localement la porosité permet de reproduire des amplitudes de variations saisonnières variables. Ainsi, augmenter la porosité atténue l'amplitude de la variation de la piézométrie et diminuer la porosité provoque l'effet inverse. En effet, l'augmentation de la porosité sous-entend une augmentation de l'espace disponible pour l'eau et dès lors une variation moins importante du niveau d'eau de la nappe suite à un apport ou un retrait d'eau. Inversement, une diminution de la porosité provoque une diminution de l'espace disponible pour l'eau et dès lors une variation plus grande du niveau d'eau de la nappe suite à une sollicitation.

Vu le peu de connaissance sur ce paramètre, il a été préféré de conserver un champ de porosité globalement homogène et d'agir sur la variation temporelle de l'infiltration pour reproduire les amplitudes de variation piézométrique variables spatialement.

Etant donné le caractère globalement très stable du niveau d'eau dans la zone d'intérêt, il est jugé que la porosité définie à 3.5 % pour les sables pourrait être légèrement augmentée, jusqu'à 10 à 15 %. Les **FIGURES 6-12 et 6-13** montrent d'ailleurs que l'impact d'une telle modification (porosité x 5) n'est pas élevé sur la piézométrie. Cette adaptation de porosité n'est cependant pas acceptable pour la partie Nord de la zone modélisée (voir **FIGURE 6-11**) car celle-ci est caractérisée par une amplitude de variation nettement plus élevée. Si effectivement il s'avère que la porosité doit être augmentée, un zonage de ce paramètre devra être réalisé pour conserver les amplitudes de variation caractéristiques de la zone Nord du modèle.

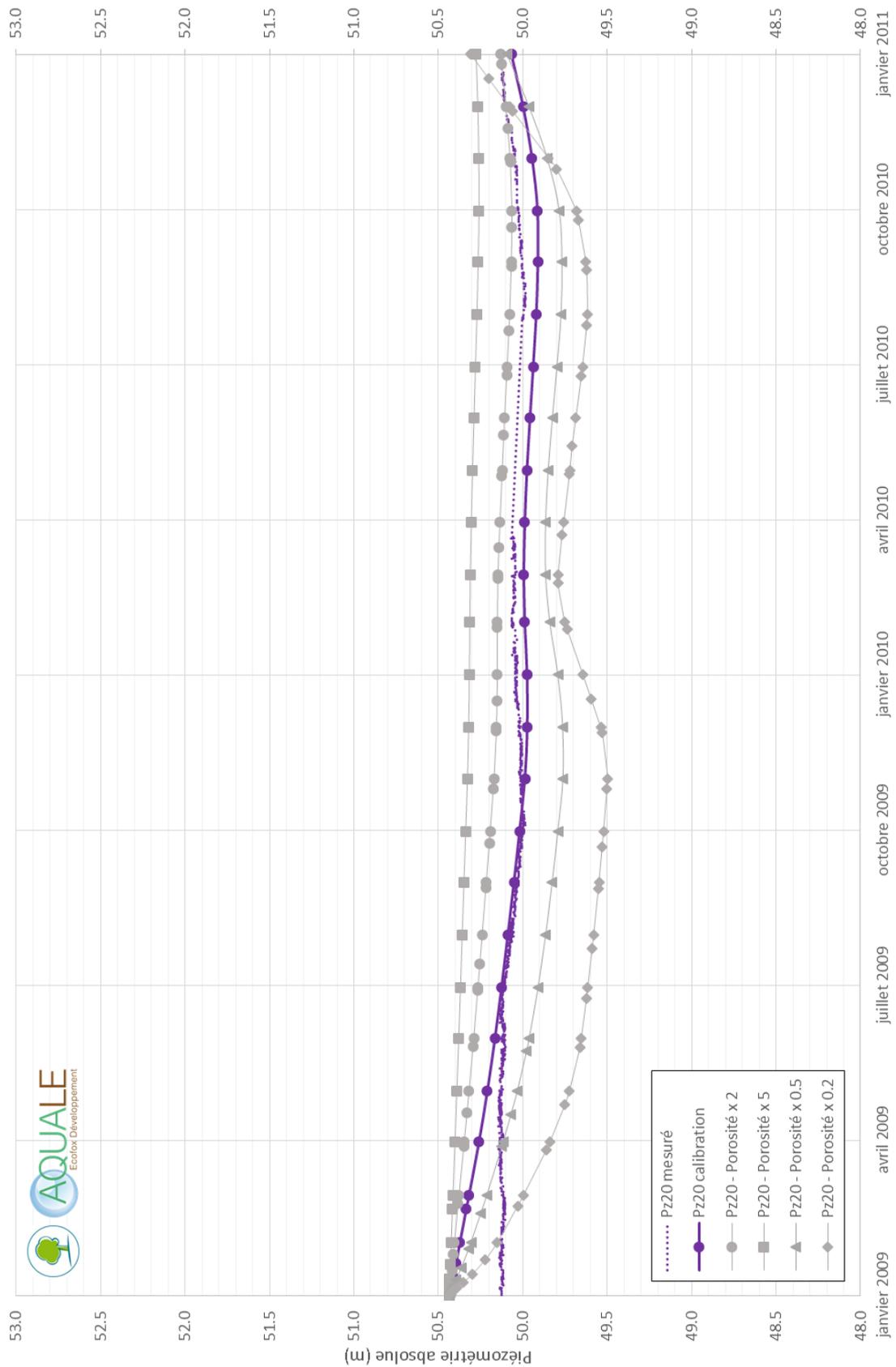


Figure 6-11 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage Pz20 pour différentes valeurs de porosité

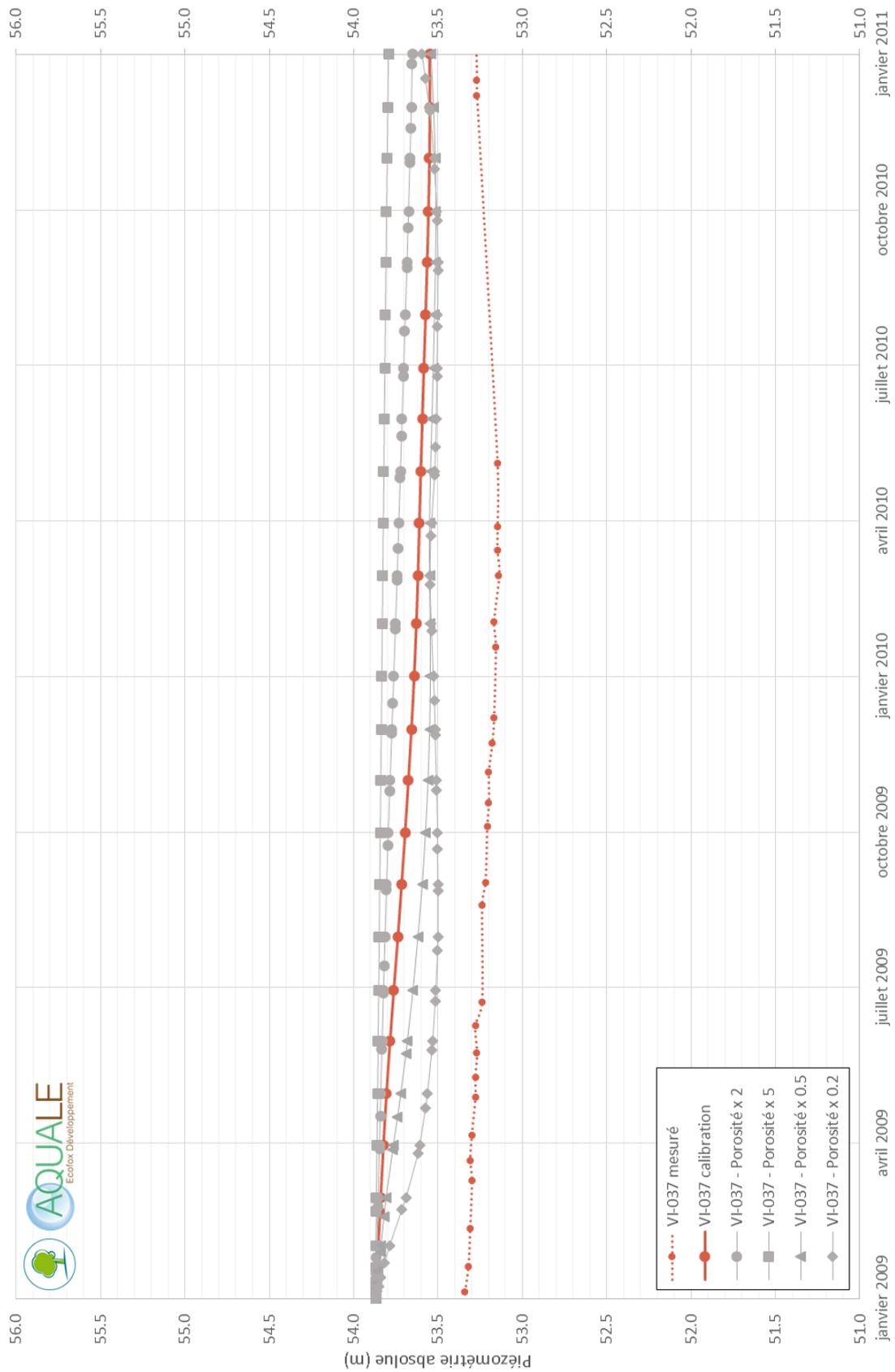


Figure 6-12 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage VI-037 pour différentes valeurs de porosité

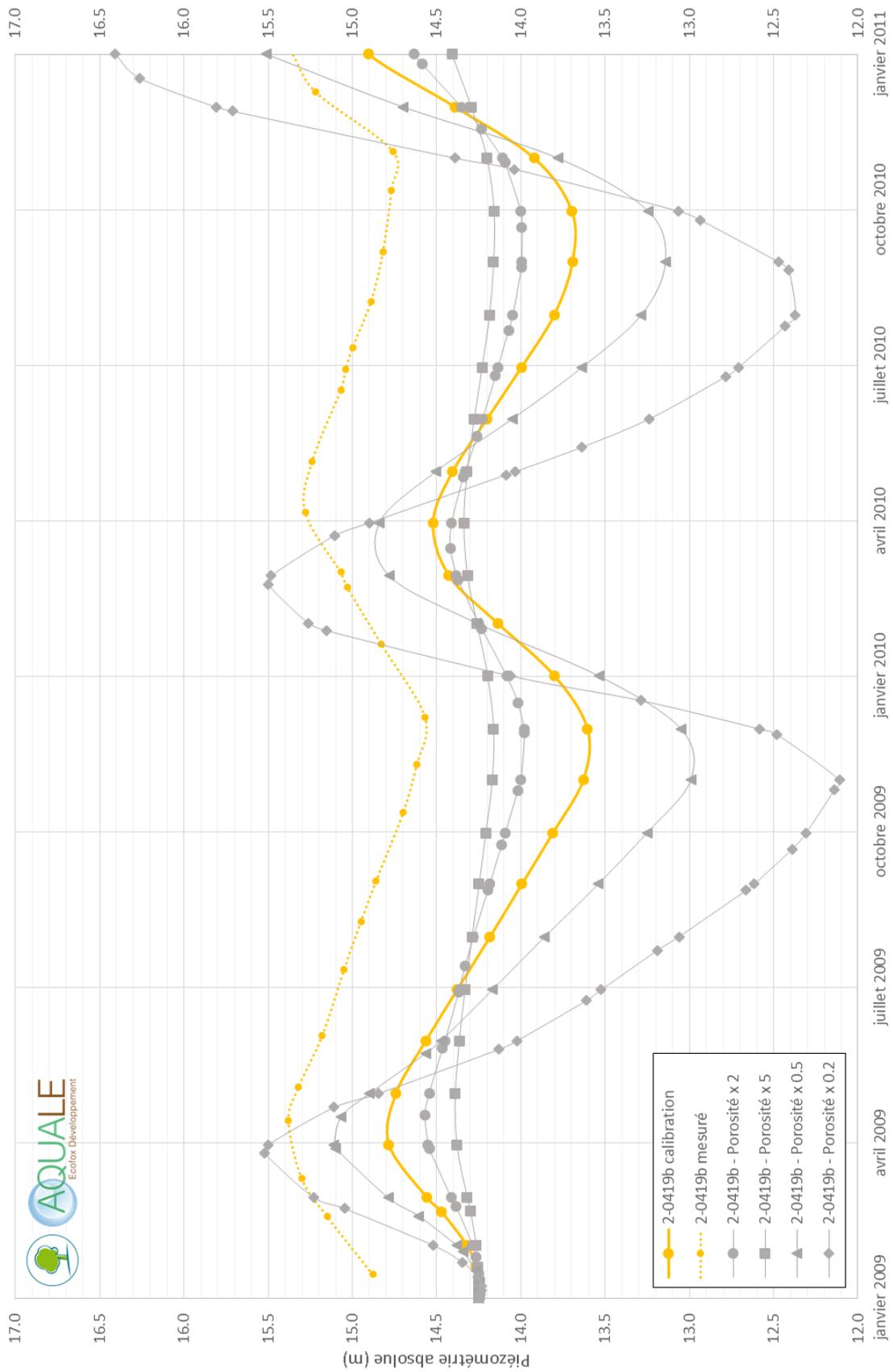


Figure 6-13 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage 2-0419b pour différentes valeurs de porosité

L'impact de la variation de la porosité a également été évalué sur les débits drainés par les exutoires suivants :

- les collecteurs (**FIGURE 6-14**) ;
- le tronçon amont de la Woluwe en amont de la station Middlebourg (**FIGURE 6-15**) ;
- le tronçon de Rode en amont de la station de Kloosterberg (**FIGURE 6-16**) ;
- la galerie Vivaqua (**FIGURE 6-17**).

Il apparaît très clairement sur ces différentes figures que les débits en Région de Bruxelles-Capitale sont très peu impactés par les variations de porosité (± 5 % pour les collecteurs, ± 1 % pour le tronçon de Woluwe, ± 2 % pour le tronçon de Rode, ± 3 % pour la galerie Vivaqua).

Le modèle est donc peu sensible vis-à-vis de ce paramètre, en comparaison notamment de la sensibilité élevée vis-à-vis de l'infiltration et de la conductivité hydraulique.

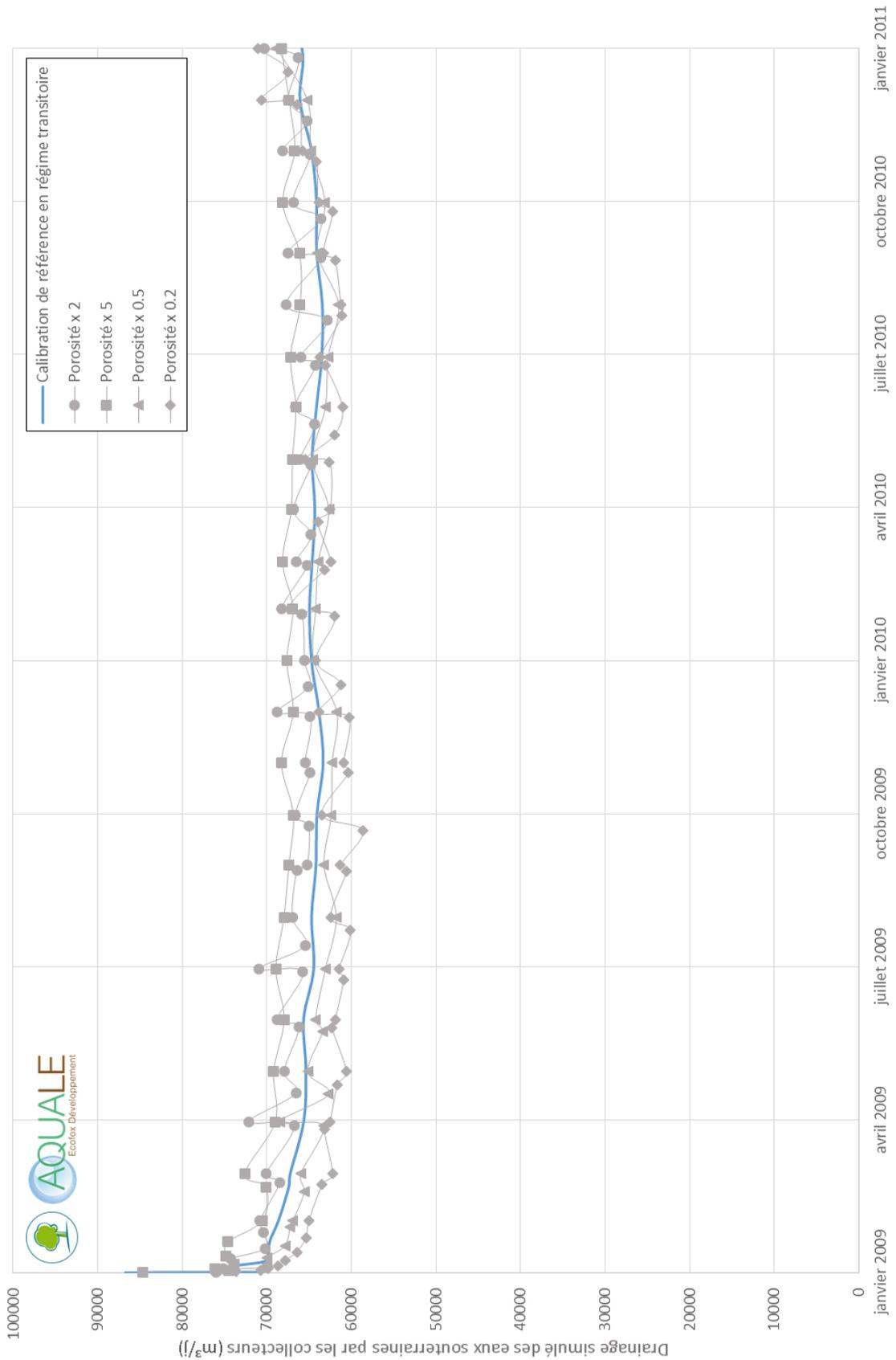


Figure 6-14 : Variation du débit drainé par les collecteurs pour différentes valeurs de porosité

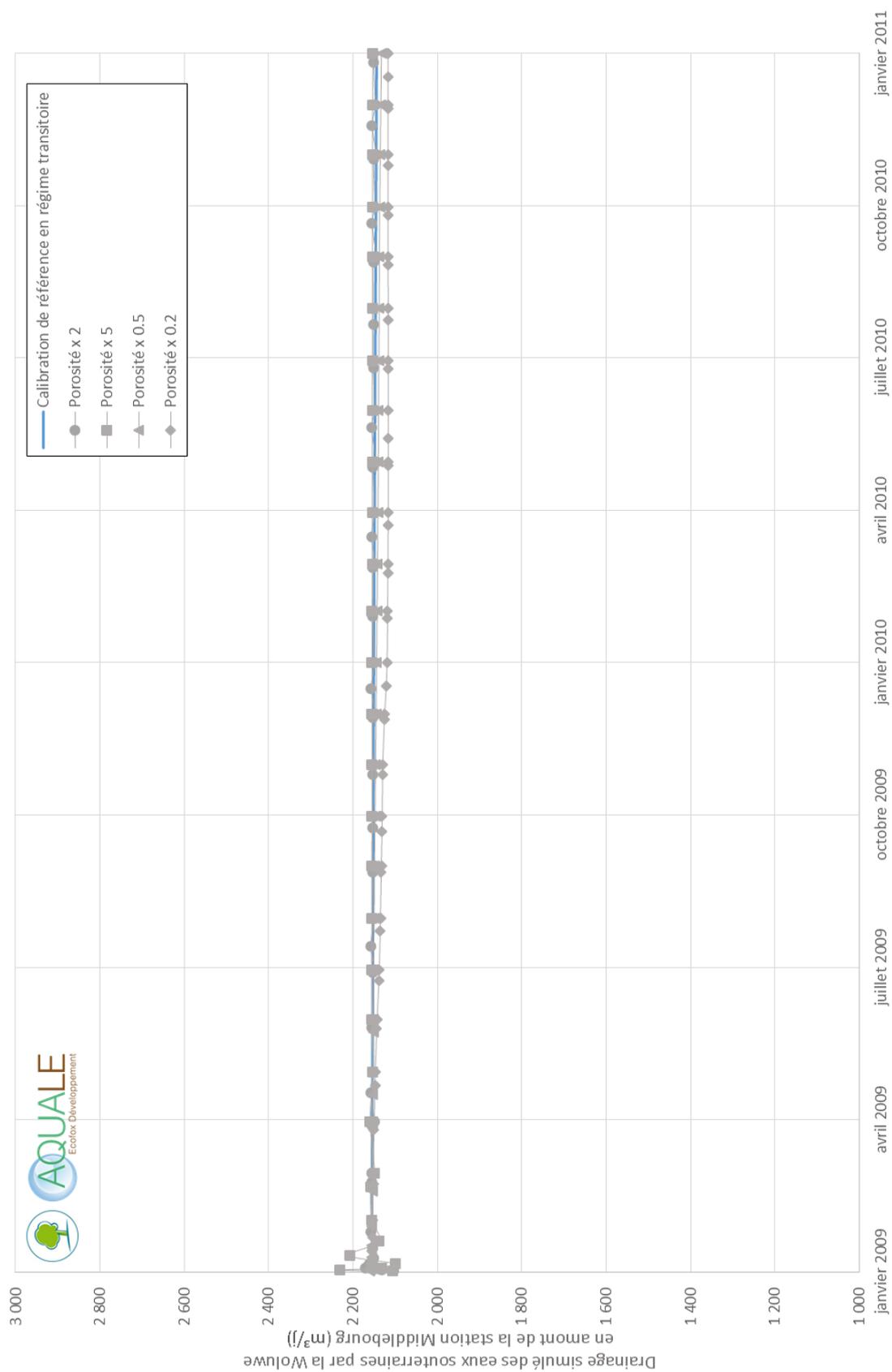


Figure 6-15 : Variation du débit drainé par le tronçon de la Woluwe en amont de la station de Middlebourg pour différentes valeurs de porosité

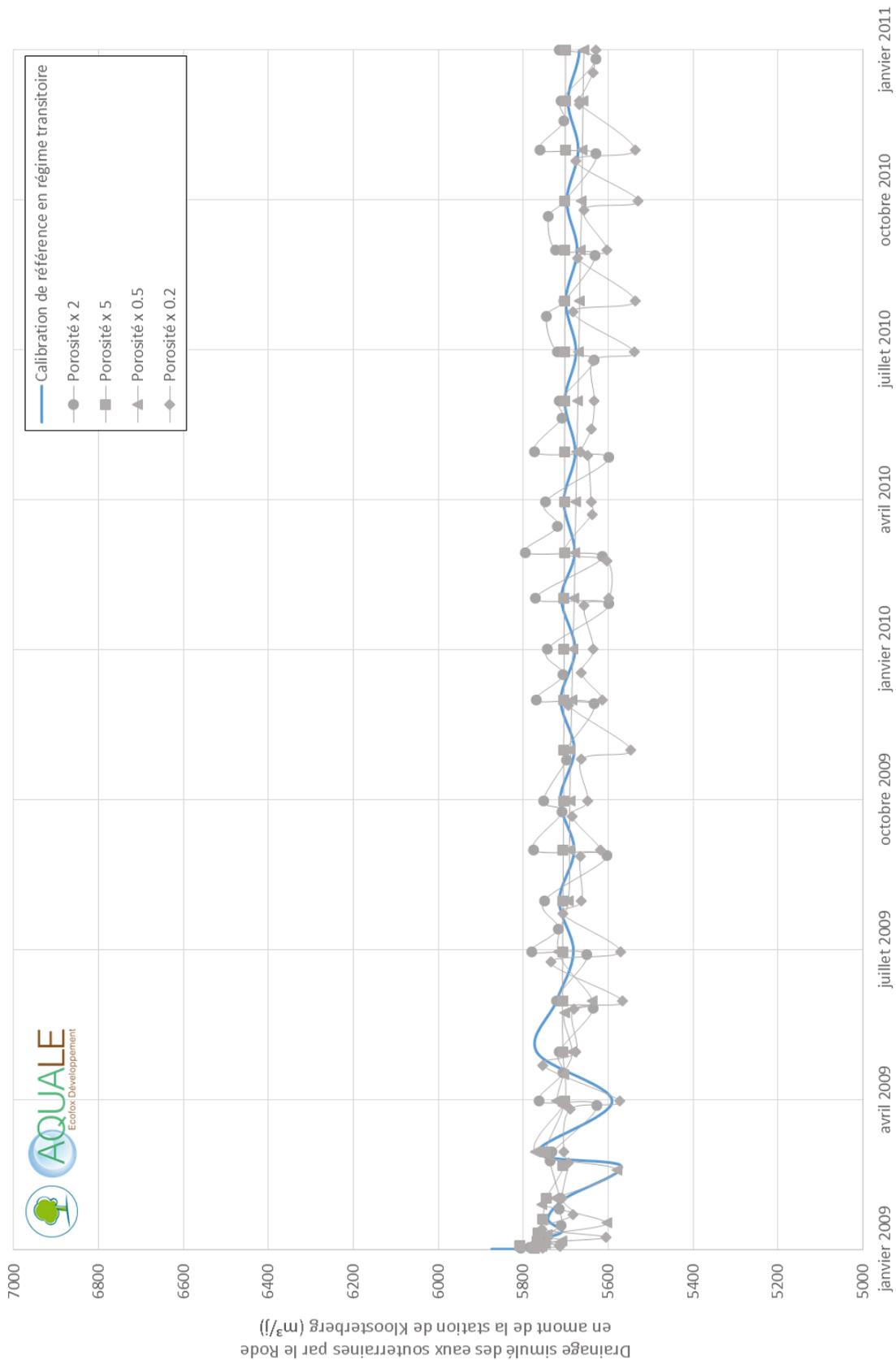


Figure 6-16 : Variation du débit drainé par le tronçon du Rode en amont de la station de Kloosterberg pour différentes valeurs de porosité

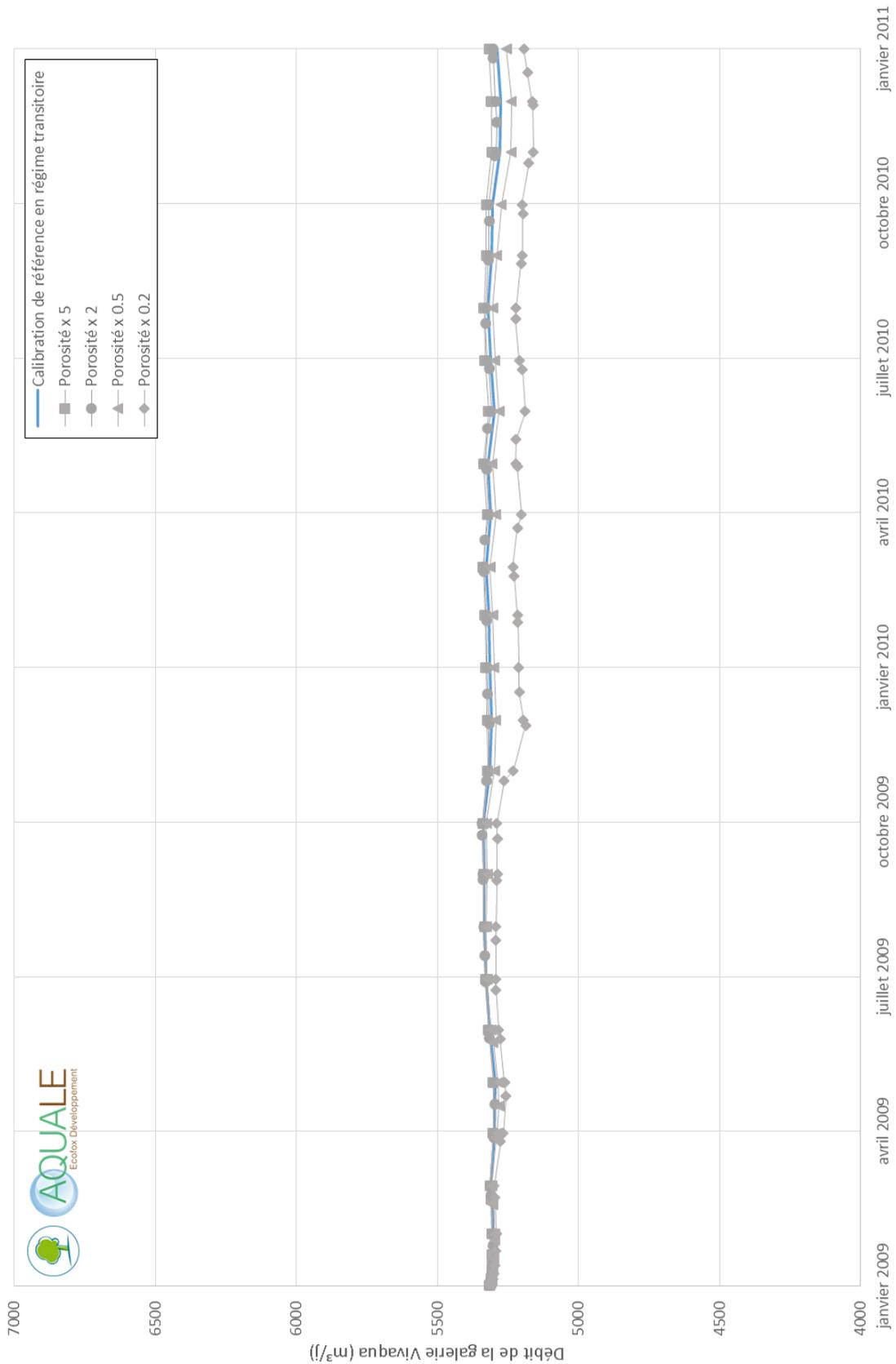


Figure 6-17 : Variation du débit drainé par la galerie Vivaqua pour différentes valeurs de porosité

6.5 COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT

L'impact de la modification du coefficient d'emménagement doit être évalué en régime transitoire. Les coefficients multiplicateurs suivants sont successivement imposés pour ce paramètre :

- 0.2 ;
- 0.5 ;
- 2 ;
- 5.

La simulation en régime transitoire est analysée sur deux années, à savoir 2009 et 2010. L'évolution de la piézométrie est observée pour trois ouvrages de référence :

- Pz20 (**FIGURE 6-18**) ;
- VI-037 (**FIGURE 6-19**) ;
- 2-0419b (**FIGURE 6-20**).

Ces figures illustrent la faible sensibilité du modèle hydrogéologique aux variations du coefficient d'emménagement. En effet, malgré des variations importantes, le niveau d'eau des piézomètres de référence varie très peu. Cela sous-entend dès lors qu'assigner une autre valeur de coefficient d'emménagement au modèle n'impactera pas négativement la calibration.

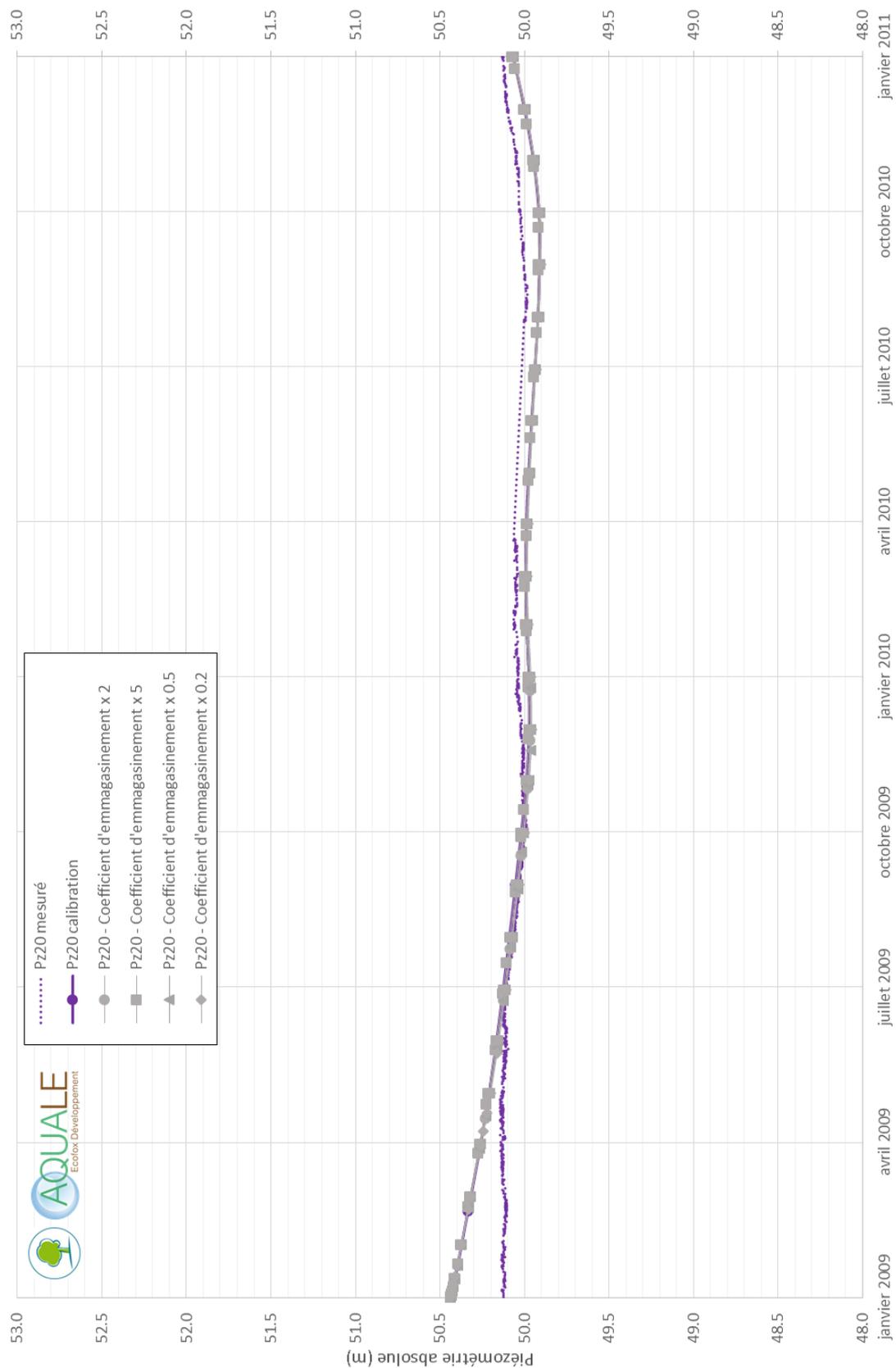


Figure 6-18 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage Pz20 pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement

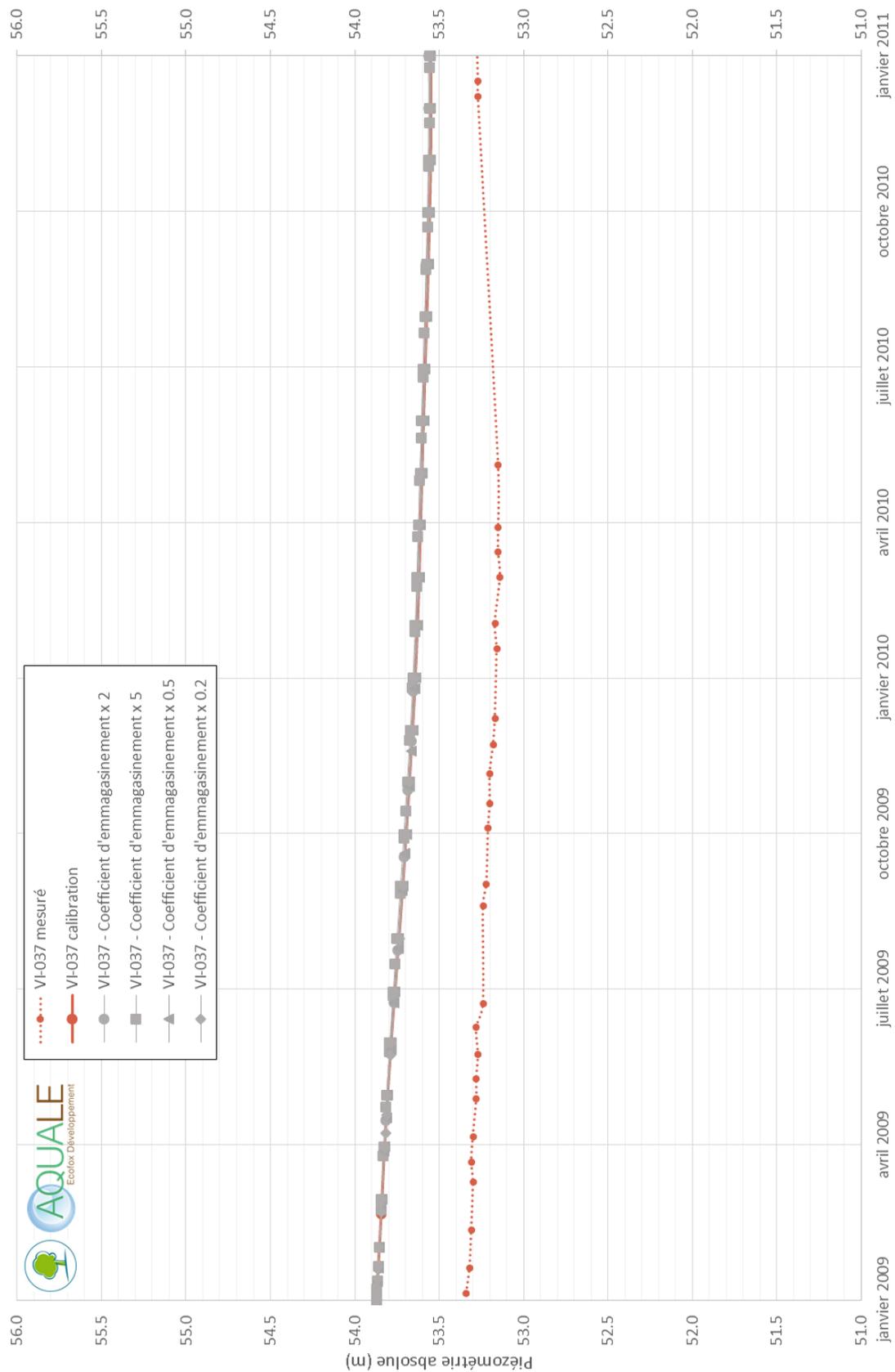


Figure 6-19 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage VI-037 pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement

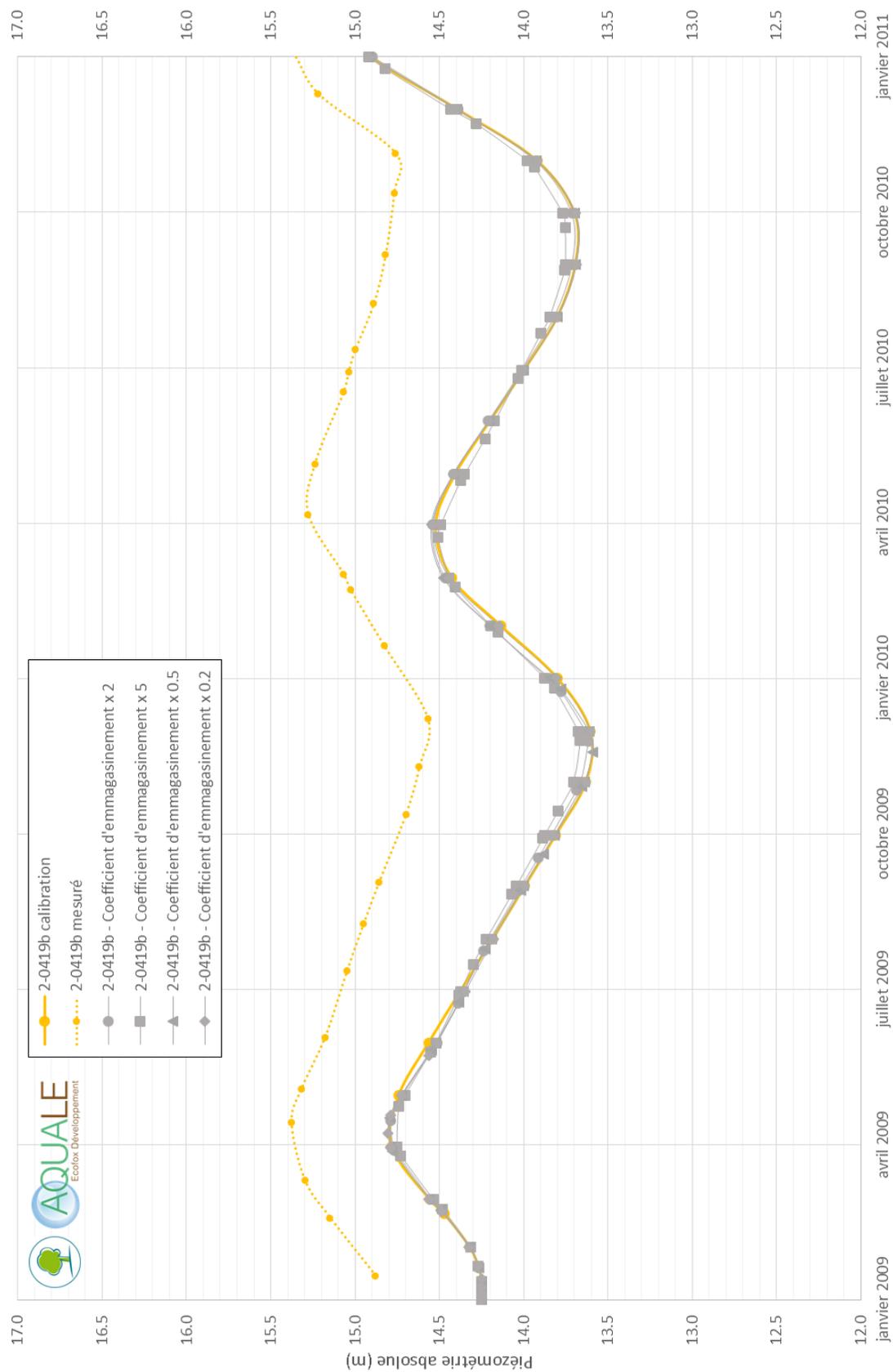


Figure 6-20 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage 2-0419b pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement

L'impact de la variation du coefficient d'emmagasinement a également été évalué sur les débits drainés par les exutoires suivants :

- les collecteurs (**FIGURE 6-21**) ;
- le tronçon amont de la Woluwe en amont de la station Middlebourg (**FIGURE 6-22**) ;
- le tronçon de Rode en amont de la station de Kloosterberg (**FIGURE 6-23**) ;
- la galerie Vivaqua (**FIGURE 6-24**).

Il apparaît très clairement sur ces différentes figures que les débits en Région de Bruxelles-Capitale sont très peu impactés par les variations de coefficient d'emmagasinement ($\pm 2\%$ pour les collecteurs, $\pm 0\%$ pour le tronçon de Woluwe, $\pm 4\%$ pour le tronçon de Rode, $\pm 0\%$ pour la galerie Vivaqua).

Le modèle est donc très peu sensible vis-à-vis de ce paramètre, en comparaison notamment de la sensibilité élevée vis-à-vis de l'infiltration et de la conductivité hydraulique.

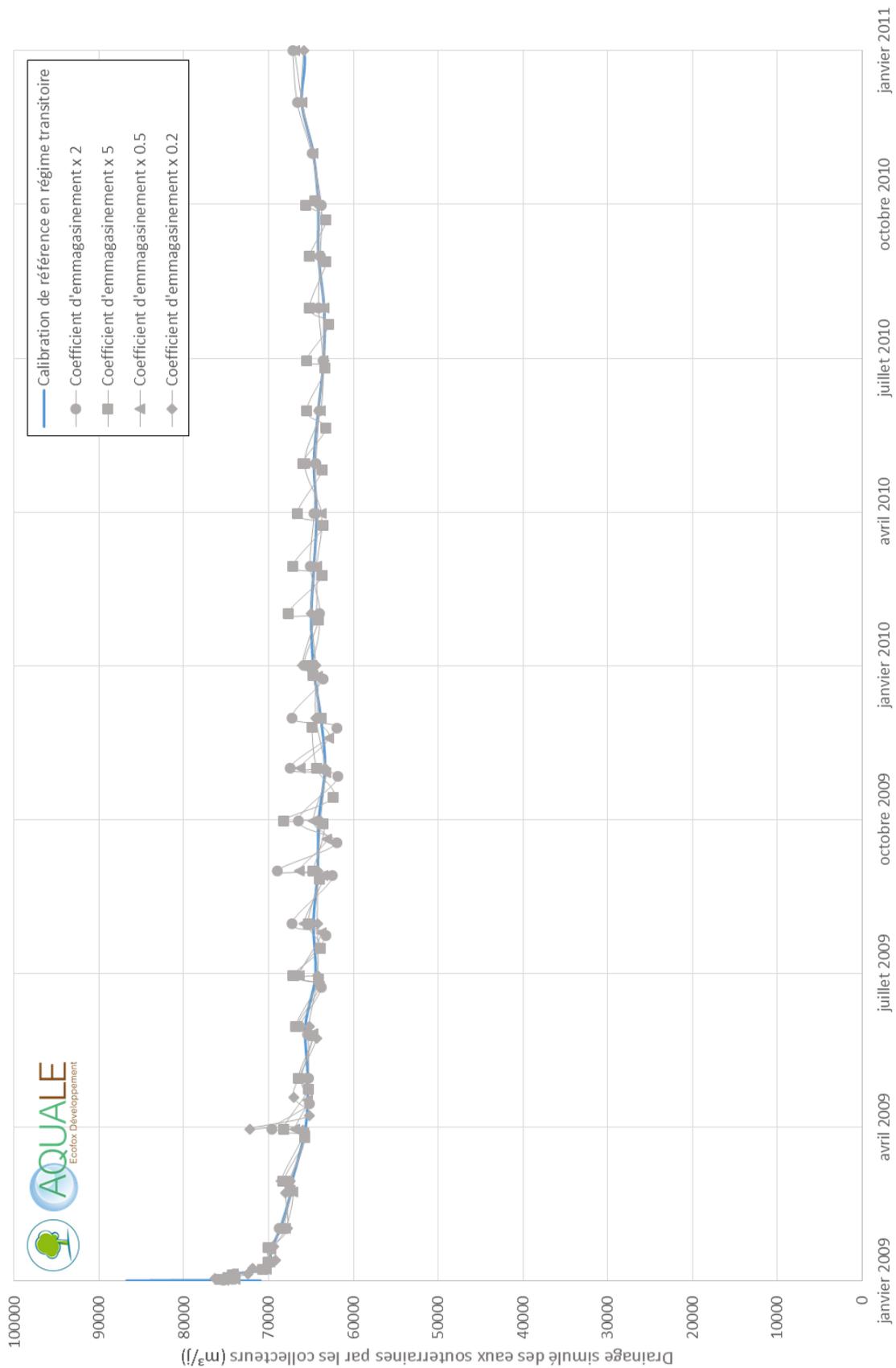


Figure 6-21 : Variation du débit drainé par les collecteurs pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement

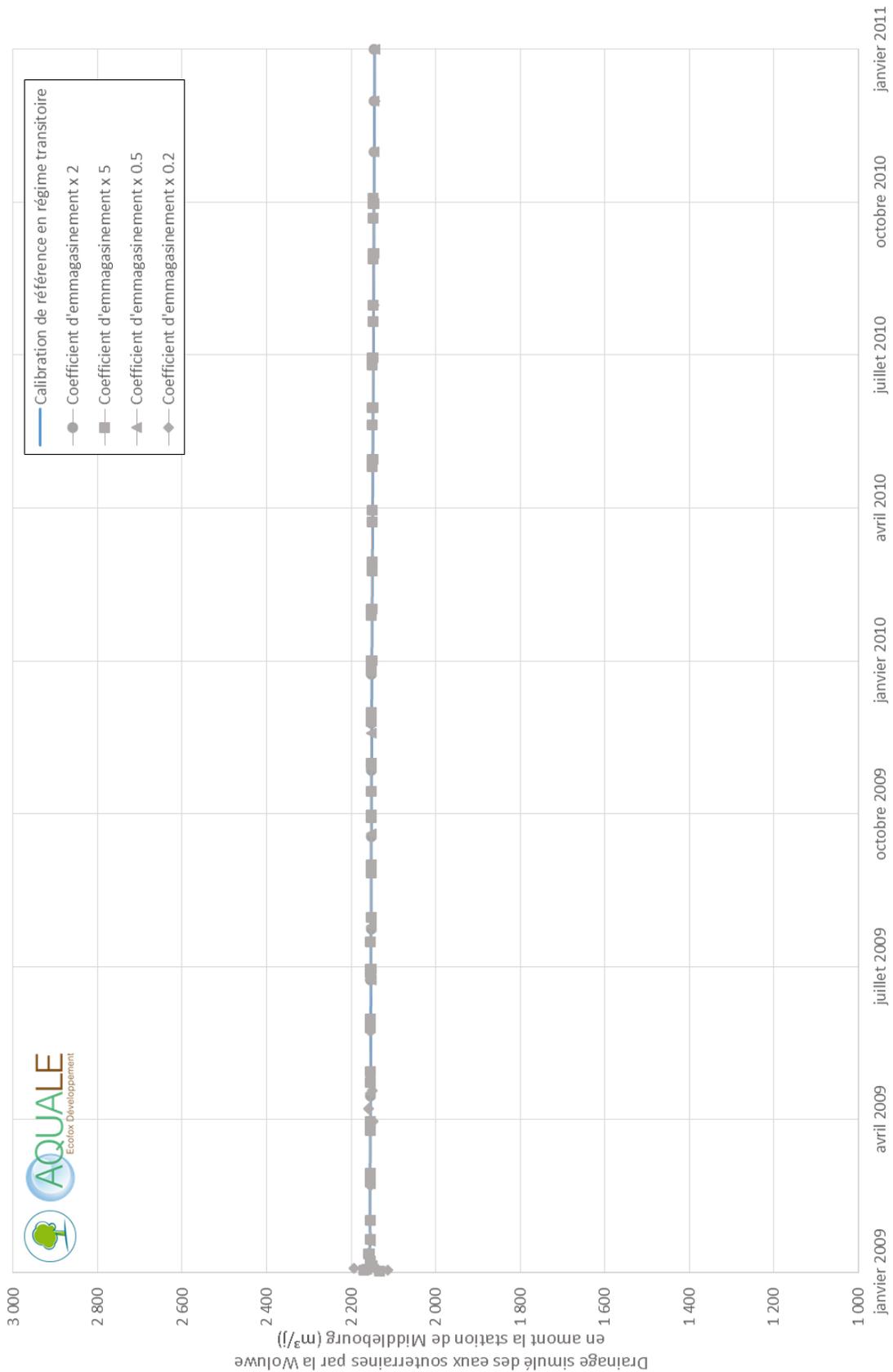


Figure 6-22 : Variation du débit drainé par le tronçon de la Woluwe en amont de la station de Middlebourg pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement

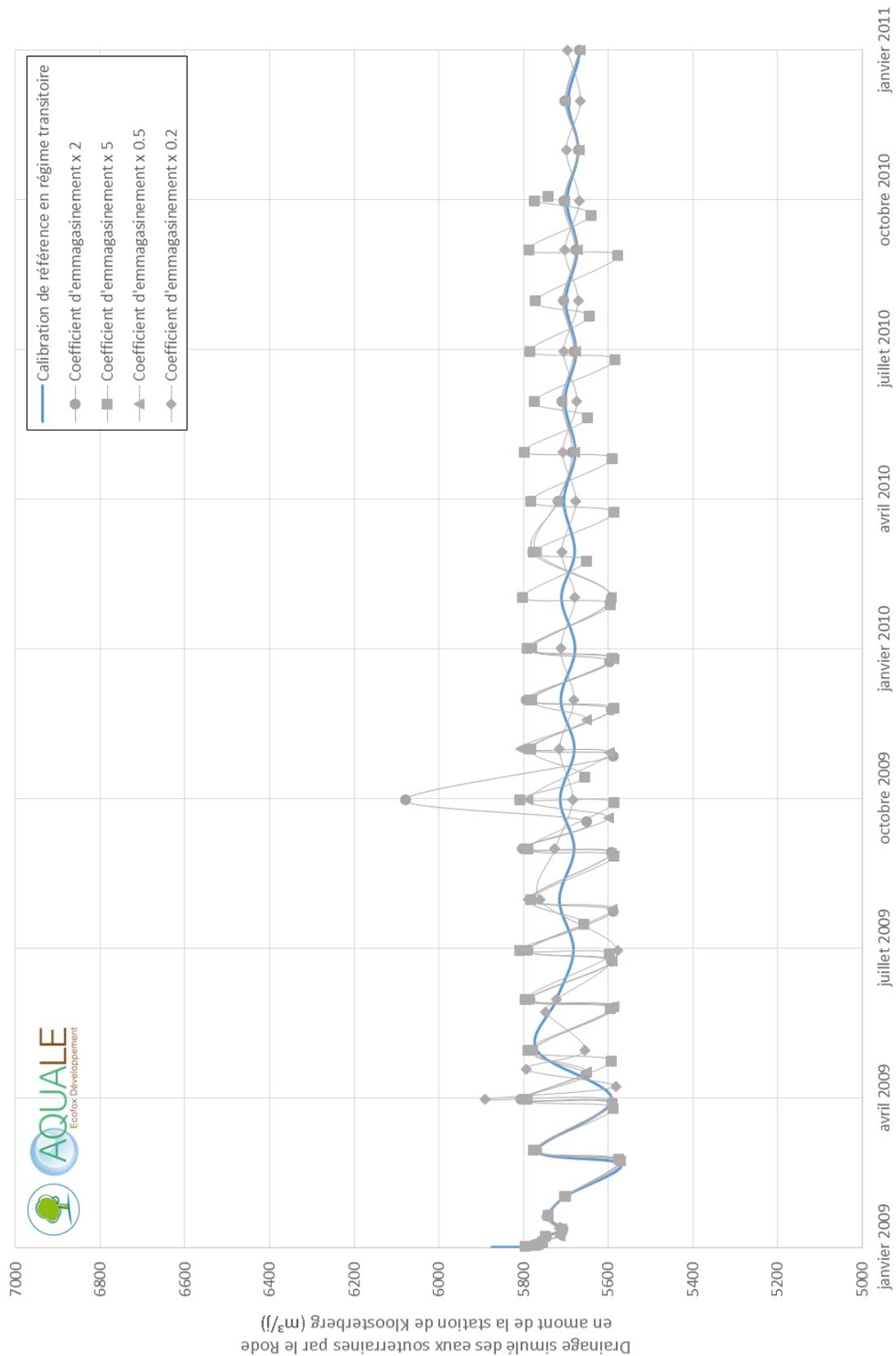


Figure 6-23 : Variation du débit drainé par le tronçon du Rode en amont de la station de Kloosterberg pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement

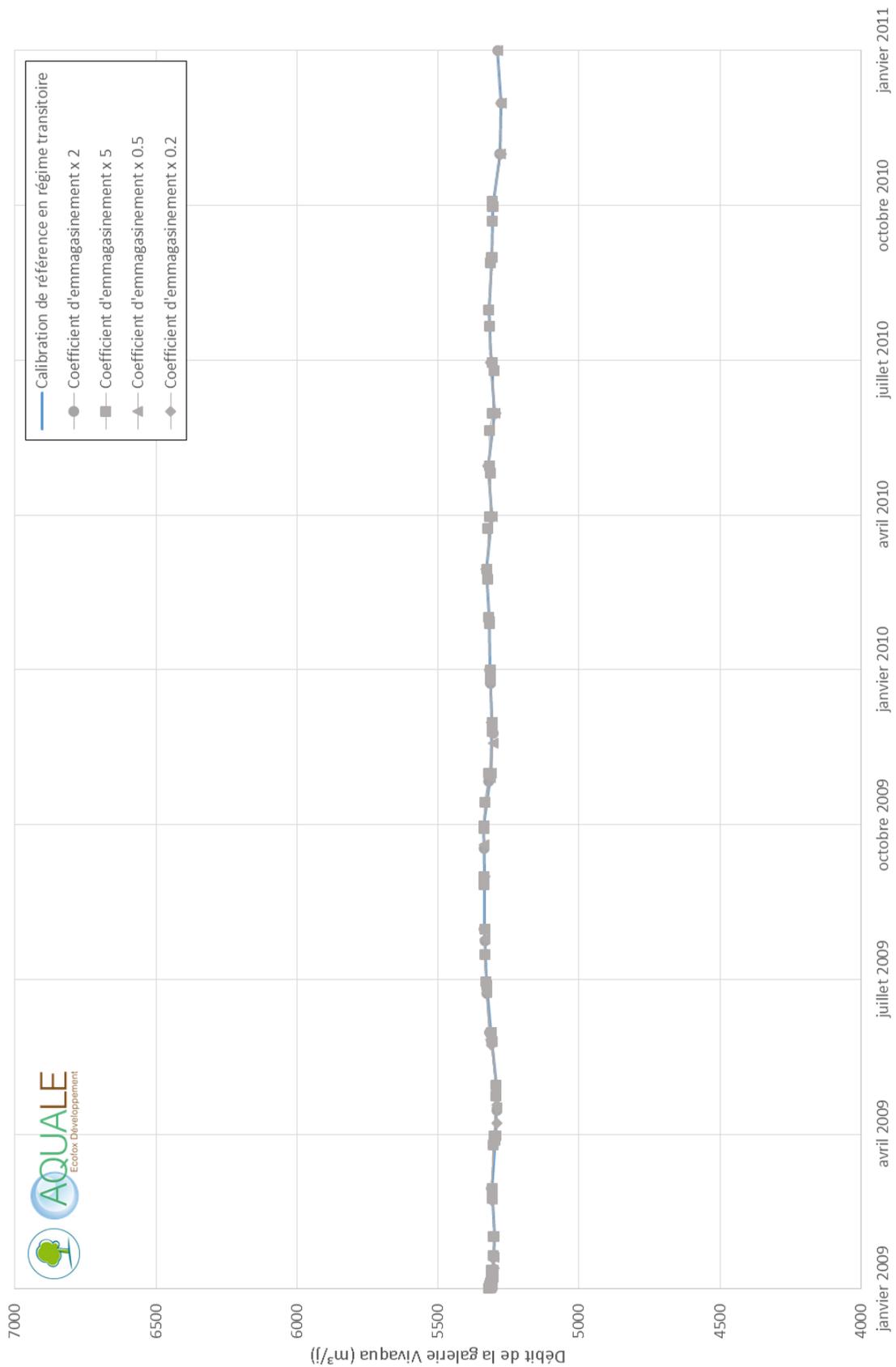


Figure 6-24 : Variation du débit drainé par la galerie Vivaqua pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement

6.6 CONCLUSION GÉNÉRALE DE L'ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

L'étude de sensibilité a été réalisée sur bon nombre de paramètres d'entrée du modèle hydrogéologique, à savoir :

- l'infiltration ;
- la conductivité hydraulique ;
- les débits prélevés par pompage ;
- les niveaux d'eau imposés aux rivières et collecteurs ;
- la porosité ;
- le coefficient d'emmagasinement.

Les impacts de modifications de ces paramètres ont été évalués sur :

- la piézométrie ;
- les débits ;
- l'indicateur de qualité SRMS.

Cette étude de sensibilité a démontré que :

- la sensibilité à l'infiltration est élevée : une augmentation ou une diminution de l'infiltration provoque une augmentation assez rapide de l'indicateur de qualité SRMS (soit un impact prononcé sur la piézométrie) et provoque également une sortie rapide de la gamme acceptable des débits drainés par les rivières et collecteurs. Bien que ce paramètre soit relativement bien documenté (historique de l'eau utile calculée via les bilans de Thornthwaite à la station IRM d'Uccle, carte de la recharge de Meyus...), il reste très difficile d'évaluer précisément l'infiltration réelle. L'étude de sensibilité tend à prouver que l'infiltration réelle doit se situer dans une gamme de valeurs allant de - 14 % à + 5 % de la valeur imposée au modèle hydrogéologique (de manière à rester dans la zone verte définie à la **FIGURE 6-1**). L'incertitude sur ce paramètre devra être prise en considération dans l'évaluation des résultats de l'étude au **CHAPITRE 7**.
- la sensibilité à la conductivité hydraulique est élevée : une augmentation ou une diminution de la conductivité hydraulique provoque une augmentation assez rapide de l'indicateur de qualité SRMS (soit un impact prononcé sur la piézométrie). Ce paramètre est relativement bien documenté via les rapports d'études hydrogéologiques de la Flandre et via les résultats de pompages d'essai synthétisés par l'IBGE. Le champ de conductivité hydraulique finalement imposé au modèle hydrogéologique est le résultat de la prise en compte de ces sources de données et du processus de calibration. Cependant, des hétérogénéités de plus ou moins grandes tailles doivent exister mais ne peuvent être prises en considération dans le modèle dès lors qu'aucune donnée ne permet de les localiser. L'étude de sensibilité tend à prouver que la conductivité hydraulique réelle doit se situer dans une gamme de valeurs allant de - 30 % à + 32 % de la valeur imposée au modèle hydrogéologique (de manière à rester dans la zone verte définie à la **FIGURE 6-1**). L'incertitude sur ce paramètre devra être prise en considération dans l'évaluation des résultats de l'étude au **CHAPITRE 7**.
- la sensibilité au débit prélevé par pompage est faible : une augmentation ou diminution importante des débits prélevés par pompage est nécessaire pour provoquer une augmentation importante de l'indicateur de qualité SRMS (soit un impact prononcé sur la piézométrie). Ce paramètre est relativement bien documenté au sein de la Région de Bruxelles-Capitale mais les volumes déclarés ne sont pas toujours connus en Flandres et en Wallonie. L'influence des débits prélevés par pompage sur le modèle hydrogéologique et ses résultats présentés au **CHAPITRE 7** est jugée négligeable. Cette conclusion n'est cependant pas valable localement (à proximité des puits qui feraient l'objet de modifications importantes de débit).

- la sensibilité aux niveaux d'eau imposés sur les rivières et collecteurs est faible : une augmentation ou diminution importante des niveaux d'eau imposés est nécessaire pour provoquer une augmentation importante de l'indicateur de qualité SRMS (soit un impact prononcé sur la piézométrie) ou un impact important sur les débits aux exutoires. Ce paramètre est susceptible d'être affecté d'une certaine erreur dès lors que la hauteur d'eau des rivières et collecteurs n'est pas toujours connue (rivières couvertes, niveau de la nappe rabattu au droit des collecteurs assez mal connu...). L'influence des niveaux d'eau imposés au droit des rivières et collecteurs sur le modèle hydrogéologique et ses résultats présentés au **CHAPITRE 7** est jugée négligeable.
- la sensibilité à la porosité dépend de la variabilité temporelle de l'infiltration : dans les zones où l'infiltration varie rapidement et fortement (dans la partie Nord du modèle), une modification de la porosité impacte assez fortement la piézométrie. Inversement, dans la zone d'intérêt (Région de Bruxelles-Capitale) et, plus généralement, dans les parties centrale et Sud du modèle, une modification de la porosité influence assez peu la piézométrie. Ce paramètre est assez mal connu et documenté. L'influence de la porosité sur le modèle hydrogéologique et ses résultats présentés au **CHAPITRE 7** est jugée négligeable.
- la sensibilité au coefficient d'emménagement est très faible : une modification de ce paramètre n'impacte quasiment pas la calibration du modèle. Ce paramètre est assez mal connu et documenté. L'influence du coefficient d'emménagement sur le modèle hydrogéologique et ses résultats présentés au **CHAPITRE 7** est jugée négligeable.

De ces observations, il est conclu que les résultats présentés au **CHAPITRE 7** ci-après doivent tenir compte de l'incertitude existant sur les paramètres d'entrée qui influencent la calibration et les débits des exutoires. L'influence des débits prélevés par pompage, des niveaux d'eau imposés aux rivières et collecteurs, de la porosité et du coefficient d'emménagement étant largement inférieure à celle de l'infiltration et de la conductivité hydraulique, il est clair que **c'est l'incertitude existant sur ces deux derniers paramètres qui doit être prise en considération pour évaluer l'incertitude sur les résultats présentés au prochain chapitre.**

Dès lors, tous les scénarii présentés au **CHAPITRE 7** seront accompagnés d'une évaluation de l'incertitude vers le haut et vers le bas. Les simulations permettant d'évaluer l'incertitude sur les résultats sont matérialisées par les sommets du losange vert telles que présentés à la **FIGURE 6-25** ci-dessous (**A, B, C et D**).

Les caractéristiques de ces différentes simulations seront donc les suivantes :

- **cas A** : infiltration x 1.05 et conductivité hydraulique x 0.85 ;
- **cas B** : infiltration x 1.03 et conductivité hydraulique x 1.32 ;
- **cas C** : infiltration x 0.86 et conductivité hydraulique x 1.08 ;
- **cas D** : infiltration x 0.88 et conductivité hydraulique x 0.70.

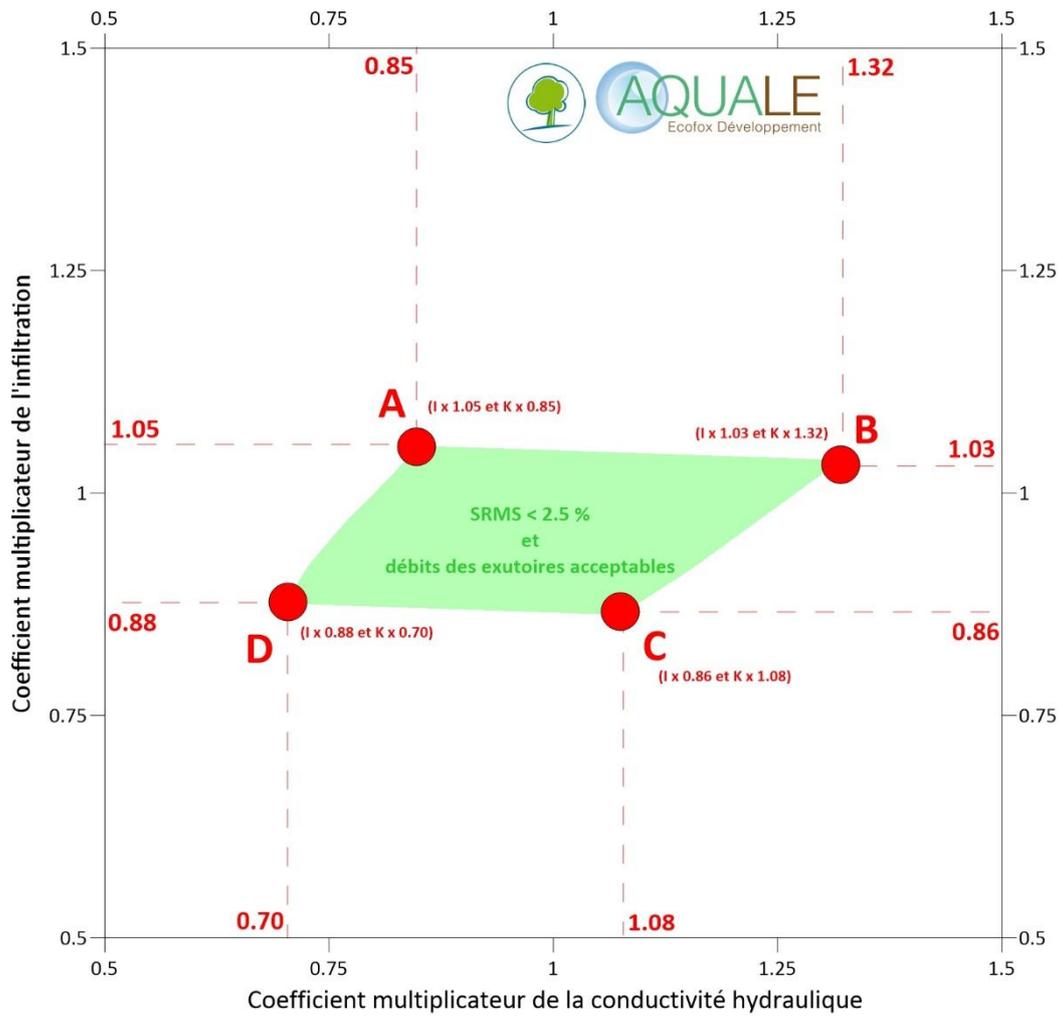


Figure 6-25 : Détermination des simulations à réaliser pour l'évaluation de l'incertitude sur les résultats

7 SIMULATIONS ET RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

7.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats de l'étude.

Il est donc focalisé exclusivement sur la Région de Bruxelles-Capitale, zone d'intérêt de l'étude.

Les objectifs du modèle précédemment énoncés sont repris ci-dessous (avec indication du chapitre reprenant les résultats associés) :

- estimer les ressources disponibles (**CHAPITRE 7.2**) ;
- quantifier les échanges d'eau souterraine avec la Région Flamande (**CHAPITRE 7.3**) ;
- mettre en évidence les interactions pouvant exister entre la masse d'eau souterraine du Bruxellien et les eaux de surface de la Woluwe (**CHAPITRE 7.4**).

7.1.1 DÉFINITION DES SCÉNARIIS

Pour répondre à ces objectifs, plusieurs scénariis sont réalisés dans les conditions suivantes :

- en régime permanent, avec une infiltration calculée sur la base de l'eau utile moyenne à très long terme et avec un volume prélevé par les puits en Région de Bruxelles-Capitale :
 - o identique à celui de 2013 (**SCÉNARIO N°1**) ;
 - o augmenté de 50 % par rapport à 2013 (**SCÉNARIO N°2**) ;
 - o augmenté de 100 % par rapport à 2013 (**SCÉNARIO N°3**) ;
- en régime transitoire sur une période de cinq années, avec une infiltration représentative d'une alimentation faible et avec un volume prélevé par les puits en Région de Bruxelles-Capitale :
 - o identique à celui de 2013 (**SCÉNARIO N°4**) ;
 - o augmenté de 50 % par rapport à 2013 (**SCÉNARIO N°5**) ;
 - o augmenté de 100 % par rapport à 2013 (**SCÉNARIO N°6**) ;
- en régime transitoire sur une période de cinq années, avec une infiltration représentative d'une alimentation élevée et avec un volume prélevé par les puits en Région de Bruxelles-Capitale :
 - o identique à celui de 2013 (**SCÉNARIO N°7**) ;
 - o augmenté de 50 % par rapport à 2013 (**SCÉNARIO N°8**) ;
 - o augmenté de 100 % par rapport à 2013 (**SCÉNARIO N°9**).

Chacun de ces scénariis sera accompagné de simulations visant à évaluer l'incertitude sur les résultats.

Ces différents scénariis sont présentés schématiquement à la **FIGURE 7-1**.

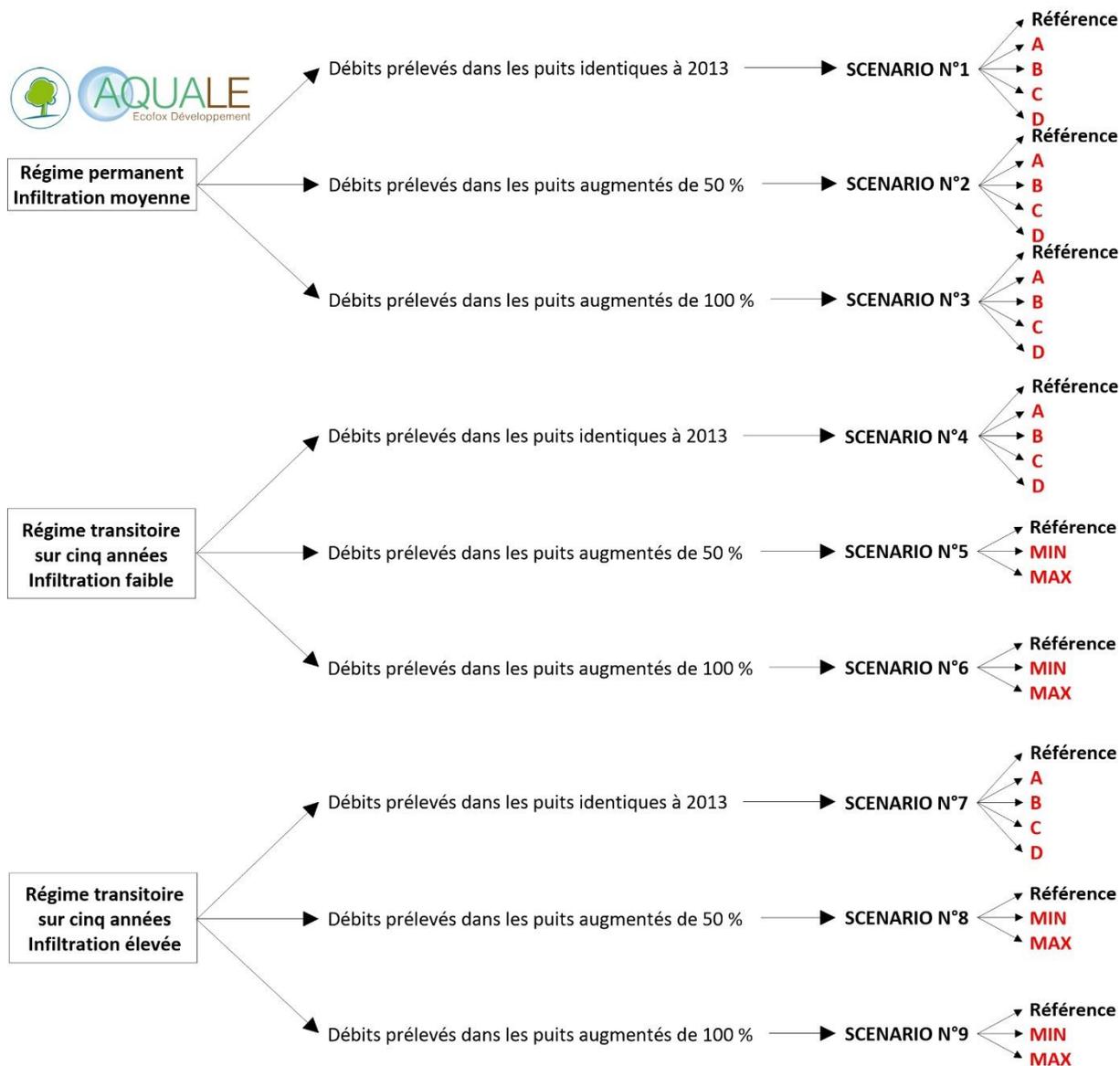


Figure 7-1 : Scénarii réalisés dans le cadre de la présente étude

7.1.2 ESTIMATION DE L'INFILTRATION DE RÉFÉRENCE POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARII

7.1.2.1 SCÉNARII N°1 À 3 – INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE SITUATION MOYENNE

Pour les **SCÉNARII N°1 à 3**, il est nécessaire de déterminer le niveau d'infiltration moyen à très long terme.

Une infiltration a été imposée au modèle dans le cadre de la calibration. Comme cela a été largement détaillé dans les **CHAPITRES 3 et 4**, cette infiltration résulte du couplage de deux sources de données :

- la carte de Meyus référencée dans la thèse de Luk Peeters est la donnée de base qui a permis de définir la variabilité spatiale de l'infiltration et le niveau d'infiltration pour l'année 2013 ;
- les données IRM de la station d'Uccle et les bilans de Thornthwaite réalisés ont permis de définir la variabilité temporelle de l'infiltration (sous la forme d'un coefficient multiplicateur en comparant l'infiltration calculée pour l'année 2013 à celle des autres années pour cette station).

Dès lors, puisque les **SCÉNARII N°1 à 3** sont réalisés en régime permanent, il convient d'adapter l'infiltration imposée au modèle en régime permanent pour représenter un contexte d'infiltration moyenne.

La valeur de pluviométrie pour l'année 2013 mesurée à la station IRM d'Uccle est 786 mm. L'eau utile calculée pour l'année 2013 à cette station est de 236 mm.

Si l'on se réfère aux **FIGURES 4-20 à 4-23** (voir les légendes de ces quatre figures) du **CHAPITRE 4.4.1.2.2.3**, il apparaît que la pluviométrie moyenne annuelle à Uccle sur les années 1900 à 2014 est de 812.5 mm, soit 3 % au-dessus de la pluviométrie de 2013.

Cependant, la tendance sur ces 115 années de mesures est clairement à la hausse. La moyenne de la pluviométrie sur les 25 dernières années est d'ailleurs de 865 mm, soit 10 % au-dessus de la pluviométrie de 2013.

Enfin, une troisième approche consiste à considérer la moyenne de l'eau utile calculée à la station IRM d'Uccle pour les années 1990 à 2013 (**CHAPITRE 4.4.1.2.2.2**). Celle-ci est de 285 mm, soit 21 % au-dessus de l'eau utile de 2013.

Les fuites des réseaux d'égouttage et de distribution étant plus constantes dans le temps, elles jouent un effet de lissage sur l'infiltration par rapport à ces variations météorologiques.

Sur la base de ces considérations, les **SCÉNARII N°1 à 3** sont réalisés en imposant une infiltration augmentée de 10 % par rapport à l'infiltration imposée pour la calibration en régime permanent. Cette infiltration est considérée comme étant l'infiltration annuelle moyenne représentative des 20 à 30 prochaines années. La bonne estimation de cette infiltration sera aisément vérifiée dès lors que le **SCÉNARIO N°1** devrait provoquer une remontée des niveaux d'eau n'excédant pas 1 à 2 m (voir les chroniques piézométriques mesurées durant ces 25 dernières années) par rapport à la situation de 2013 si la recharge est bien évaluée.

7.1.2.2 SCÉNARII N°4 À 6 – INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE PÉRIODE DE RECHARGE FAIBLE

Dans ce cas de figure, le régime permanent ne peut être utilisé dès lors que ce niveau d'infiltration ne peut pas excéder quelques années.

Les scénarii considèrent donc une piézométrie initiale telle que celle simulée par le **SCÉNARIO N°1**, soit une piézométrie représentative d'une situation moyenne dans le contexte de prélèvement par captage de l'année 2013. Ensuite, une infiltration faible est imposée sur le toit du modèle durant cinq années, période jugée longue mais réaliste pour évaluer les impacts de ce *worstcase* piézométrique.

Pour l'infiltration, l'approche consiste à considérer les moyennes de l'eau utile calculée et de la pluviométrie mesurée à la station IRM d'Uccle pour les années 2005 à 2008 (**CHAPITRE 4.4.1.2.2.2**) et de les comparer à l'eau utile et la pluviométrie représentative du contexte moyen.

L'eau utile moyenne pour les années 2005 à 2008 est de 123 mm, soit 53 % en-dessous. Ce pourcentage semble très surestimé dès lors que la sensibilité du modèle à la recharge est assez élevée et qu'une telle diminution de l'infiltration sur une période de cinq années provoquerait une diminution trop forte des niveaux d'eau non conforme aux mesures réalisées entre 2005 et 2008.

Une seconde approche consiste à comparer la pluviométrie mesurée pour les années 2005 à 2008 (722 mm) à la pluviométrie moyenne de ces 25 dernières années (865 mm) jugée comme un bon estimateur de la recharge moyenne pour les **SCÉNARII N° 1 à 3**. La pluviométrie des années 2005 à 2008 est ainsi inférieure de 17 % à la pluviométrie des 25 dernières années.

Les fuites des réseaux d'égouttage et de distribution étant plus constantes dans le temps, elles jouent un effet de lissage sur l'infiltration par rapport à ces variations météorologiques. De plus, le ruissellement est plus important dans le cas de précipitations élevées par rapport aux périodes de précipitations faibles, ce qui réduit encore les écarts entre l'eau utile caractéristique d'une période de recharge faible et d'une période de recharge moyenne ou élevée.

Sur la base de ces considérations, les **SCÉNARII N°4 à 6** sont réalisés en imposant une infiltration diminuée de 25 % par rapport à l'infiltration imposée pour les **SCÉNARII N°1 à 3**. Cette infiltration est considérée comme étant l'infiltration annuelle moyenne représentative de période de recharge très faible et réaliste. La bonne estimation de cette infiltration sera aisément vérifiée dès lors que le **SCÉNARIO N°4** devrait provoquer une diminution des niveaux d'eau n'excédant pas 1 à 2 m par rapport à la situation moyenne simulée par le **SCÉNARIO N°1** si la recharge est bien évaluée.

7.1.2.3 SCÉNARII N°7 À 9 – INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE PÉRIODE DE RECHARGE ÉLEVÉE

De la même manière et par symétrie autour de la moyenne, les **SCÉNARII N°7 à 9** sont réalisés en imposant une infiltration augmentée de 25 % par rapport à l'infiltration imposée pour les **SCÉNARII N°1 à 3**. Cette infiltration est considérée comme étant l'infiltration annuelle moyenne représentative de période de recharge très élevée et réaliste. La bonne estimation de cette infiltration sera aisément vérifiée dès lors que le **SCÉNARIO N°7** devrait provoquer une augmentation des niveaux d'eau n'excédant pas 1 à 2 m par rapport à la situation moyenne simulée par le **SCÉNARIO N°1** si la recharge est bien évaluée.

7.2 ESTIMATION DES RESSOURCES DISPONIBLES

7.2.1 GÉNÉRALITÉS

7.2.1.1 LÉGISLATION EUROPÉENNE

La Directive 2000/60/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau reprend une série de principes à respecter pour la bonne gestion des eaux de surface et des eaux souterraines.

En particulier, les objectifs environnementaux définis à l'Article 4, pour les eaux souterraines, sont les suivants :

- les États membres mettent en œuvre les mesures nécessaires pour prévenir ou limiter le rejet de polluants dans les eaux souterraines et pour prévenir la détérioration de l'état de toutes les masses d'eau souterraines ;
- les États membres protègent, améliorent et restaurent toutes les masses d'eau souterraines, assurent un équilibre entre les captages et le renouvellement des eaux souterraines afin d'obtenir un bon état des masses d'eau souterraines, conformément aux dispositions de l'annexe V, au plus tard quinze ans après la date d'entrée en vigueur de la présente directive ;
- les États membres mettent en œuvre les mesures nécessaires pour inverser toute tendance à la hausse, significative et durable, de la concentration de tout polluant résultant de l'impact de l'activité humaine afin de réduire progressivement la pollution des eaux souterraines.

La ressource disponible en eau souterraine est définie à l'Article 2 comme *le taux moyen annuel à long terme de la recharge totale de la masse d'eau souterraine moins le taux annuel à long terme de l'écoulement requis pour atteindre les objectifs de qualité écologique des eaux de surface associées fixés à l'article 4, afin d'éviter toute diminution significative de l'état écologique de ces eaux et d'éviter toute dégradation significative des écosystèmes terrestres associés.*

Le bon état quantitatif est défini au point 2.1.2 de l'Annexe V de la Directive :

Le niveau de l'eau souterraine dans la masse d'eau souterraine est tel que le taux annuel moyen de captage à long terme ne dépasse pas la ressource disponible de la masse souterraine.

En conséquence, le niveau de l'eau souterraine n'est pas soumis à des modifications anthropogéniques telles qu'elles:

- *empêcheraient d'atteindre les objectifs environnementaux déterminés au titre de l'article 4 pour les eaux de surface associées,*
- *entraîneraient une détérioration importante de l'état de ces eaux,*
- *occasionneraient des dommages importants aux écosystèmes terrestres qui dépendent directement de la masse d'eau souterraine*

et des modifications de la direction d'écoulement dues à des modifications du niveau peuvent se produire temporairement, ou continuellement dans une zone limitée, mais n'occasionnent pas d'invasion d'eau salée ou autre et ne montrent aucune tendance durable et clairement identifiée induite par une action anthropogénique dans la direction d'écoulement qui soit susceptible d'entraîner de telles invasions.

Les documents « Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC) » :

- Guidance Document N°15 – Guidance on groundwater Monitoring ;
- Guidance Document N°26 – Guidance on risk assessment and the use of conceptuels models for groundwater ;

servent également de référence dans le cadre de la gestion des eaux souterraines.

7.2.1.2 LÉGISLATION BRUXELLOISE

Les textes légaux suivants établissent les règles concernant les eaux souterraines en Région de Bruxelles-Capitale :

- l'Ordonnance du 20 octobre 2006 établissant un cadre pour la politique de l'eau transposant la Directive Cadre Eau (2000/60/EC) ;

- 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 présentant la délimitation des masses d'eau souterraine.

L'Article 5 de l'Ordonnance du 20 octobre 2006 définit le bon état d'une eau souterraine comme *l'état atteint par une masse d'eau souterraine lorsque son état quantitatif et son état chimique sont au moins « bons » au sens de l'annexe III de l'Ordonnance*. Le bon état quantitatif des eaux souterraines est défini au point 2.1.2 de l'Annexe III. Cette définition est la même que celle proposée au niveau Européen.

La définition de la ressource disponible d'eau souterraine ne diffère pas de la définition reprise dans la Directive du Parlement Européen.

L'Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 10 juin 2010 se focalise sur le bon état chimique des eaux souterraines mais n'aborde pas leur bon état quantitatif.

7.2.1.3 DÉMARCHE

Afin d'estimer les ressources disponibles, la démarche suivante est adoptée :

- analyse des données historiques : étude à très long terme de l'évolution des niveaux d'eau mesurés dans les piézomètres de la Région de Bruxelles-Capitale et ce afin d'évaluer les niveaux d'exploitation récent et actuel de la masse d'eau ;
- utilisation du modèle hydrogéologique : simulations pour déterminer l'augmentation acceptable du débit des captages dans des conditions d'alimentation normale, faible et élevée.

7.2.2 ETUDE À TRÈS LONG TERME DES NIVEAUX D'EAU MESURÉS DANS LES PIÉZOMÈTRES DE LA RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE

La **FIGURE 7-2** ci-dessous illustre l'évolution de la piézométrie mesurée en suivi automatique dans la nappe des sables du Bruxellien en Région de Bruxelles-Capitale. La période couverte est très longue pour la majorité des piézomètres (à savoir environ 25 ans).

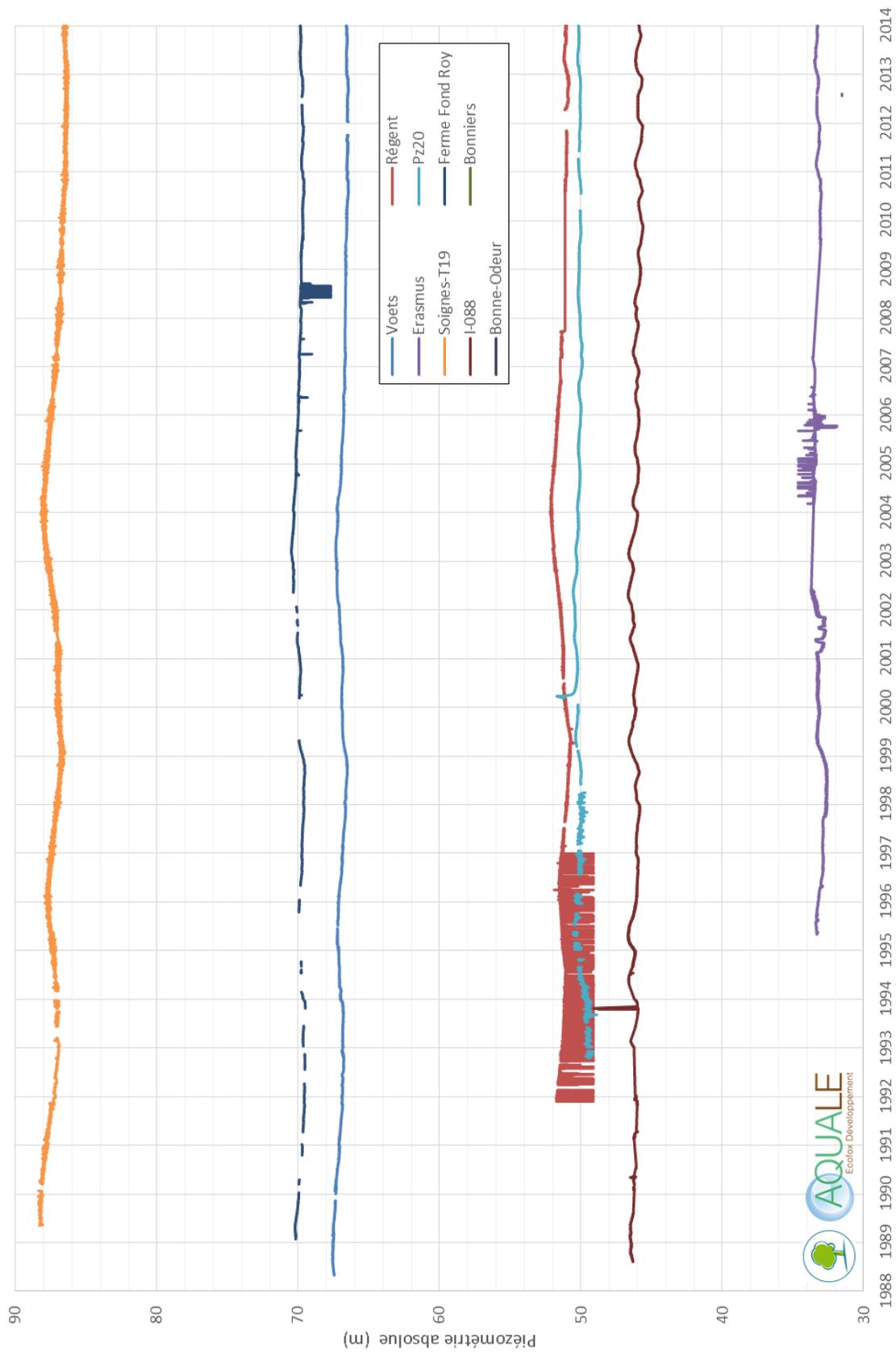


Figure 7-2 : Evolution de la piézométrie mesurée automatiquement à très long terme (1988 – 2014)

Il apparaît que :

- globalement, la piézométrie générale semble être assez constante à très long terme ;
- le piézomètre Soignes-T19 est caractérisé par une piézométrie qui varie entre 86.5 et 88.5 m, la chronique piézométrique montre trois périodes de haut piézométrie (1989 – 1992, 1995 – 1997, 2002 – 2006) et trois périodes de bas piézométrie (1992 – 1995, 1997 – 2002, 2006 – 2014) ; les creux piézométriques sont de plus en plus longs et bas ; la tendance générale pour ce piézomètre est donc une légère baisse d'environ 0.5 m sur ces 25 dernières années, cette tendance est surtout visible lors des creux piézométriques ;
- le piézomètre Bonniers est caractérisé par une piézométrie qui varie entre 81.5 et 84 m, la chronique piézométrique montre trois périodes de haut piézométrie (1988 – 1992, 1994 – 1997, 2002 – 2006) et trois périodes de bas piézométrie (1992 – 1994, 1997 – 2002, 2006 – 2014) ; bien que le dernier creux piézométrique (2006 – 2014) soit de plus longue durée que les précédents, la tendance générale est une stabilité piézométrique sur ces 25 dernières années ;
- le piézomètre Bonne-Odeur est caractérisé par une piézométrie qui varie entre 74.5 et 76.5 m, la chronique piézométrique montre trois périodes de haut piézométrie (1988 – 1992, 1995 – 1998, 2002 – 2006) et trois périodes de bas piézométrie (1992 – 1995, 1998 – 2002, 2006 – 2014) ; les creux piézométriques sont de plus en plus longs et bas ; la tendance générale pour ce piézomètre est donc une légère baisse d'environ 0.5 m sur ces 25 dernières années, cette tendance est surtout visible lors des creux piézométriques ;
- le piézomètre Ferme Fond-Roy est caractérisé par une piézométrie qui varie entre 69.5 et 70.5 m, la chronique piézométrique montre trois périodes de haut piézométrie (1988 – 1991, 1994 – 1997, 2001 – 2007) et trois périodes de bas piézométrie (1991 – 1994, 1997 – 2001, 2007 – 2014) ; bien que le dernier creux piézométrique (2007 – 2014) soit de plus longue durée que les précédents, la tendance générale est une stabilité piézométrique sur ces 25 dernières années ;
- le piézomètre Voets est caractérisé par une piézométrie qui varie entre 66.5 et 67.5 m, la chronique piézométrique montre trois périodes de haut piézométrie (1988 – 1991, 1994 – 1997, 2001 – 2005) et trois périodes de bas piézométrie (1991 – 1994, 1997 – 2001, 2005 – 2014) ; les creux piézométriques sont de plus en plus longs et bas ; la tendance générale pour ce piézomètre est donc une légère baisse d'environ 0.3 m sur ces 25 dernières années, cette tendance est surtout visible lors des creux piézométriques ;
- le piézomètre Régent est caractérisé par une piézométrie qui varie entre 50.5 et 52 m, la chronique piézométrique montre trois périodes de haut piézométrie (1992 – 1993, 1995 – 1997, 2000 – 2007) et trois périodes de bas piézométrie (1993 – 1995, 1997 – 2000, 2007 – 2014) ; bien que le dernier creux piézométrique (2007 – 2014) soit de plus longue durée que les précédents, la tendance générale est une stabilité piézométrique sur ces 25 dernières années ;
- le piézomètre Pz20 est caractérisé par une piézométrie qui varie entre 49.5 et 50.5 m, la chronique piézométrique montre une variabilité saisonnière plus importante, la tendance générale est une stabilité piézométrique sur ces 25 dernières années ;
- le piézomètre I-088 (situé de l'autre côté de la Senne) est caractérisé par une piézométrie qui varie entre 45.5 et 47 m, la chronique piézométrique montre trois périodes de haut piézométrie (1988 – 1990, 1994 – 1996, 1999 – 2004) et trois périodes de bas piézométrie (1990 – 1994, 1996 – 1999, 2004 – 2014) ; la chronique piézométrique montre une variabilité saisonnière plus importante ; les creux piézométriques sont de plus en plus longs et bas ; la tendance générale pour ce piézomètre est donc une légère baisse d'environ 0.3 m sur ces 25 dernières années, cette tendance est surtout visible lors des creux piézométriques ;
- le piézomètre Erasmus est caractérisé par une piézométrie qui varie entre 32.5 et 34 m, la chronique piézométrique montre une variabilité saisonnière plus importante, la tendance générale est une stabilité piézométrique sur ces 20 dernières années.

La **FIGURE 7-3** ci-dessous illustre l'évolution de la piézométrie mesurée manuellement dans la nappe des sables du Bruxellien en Région de Bruxelles-Capitale. La période couverte est très longue pour la majorité des piézomètres (à savoir environ 12 ans) mais un peu plus réduite que pour les piézomètres suivis automatiquement.

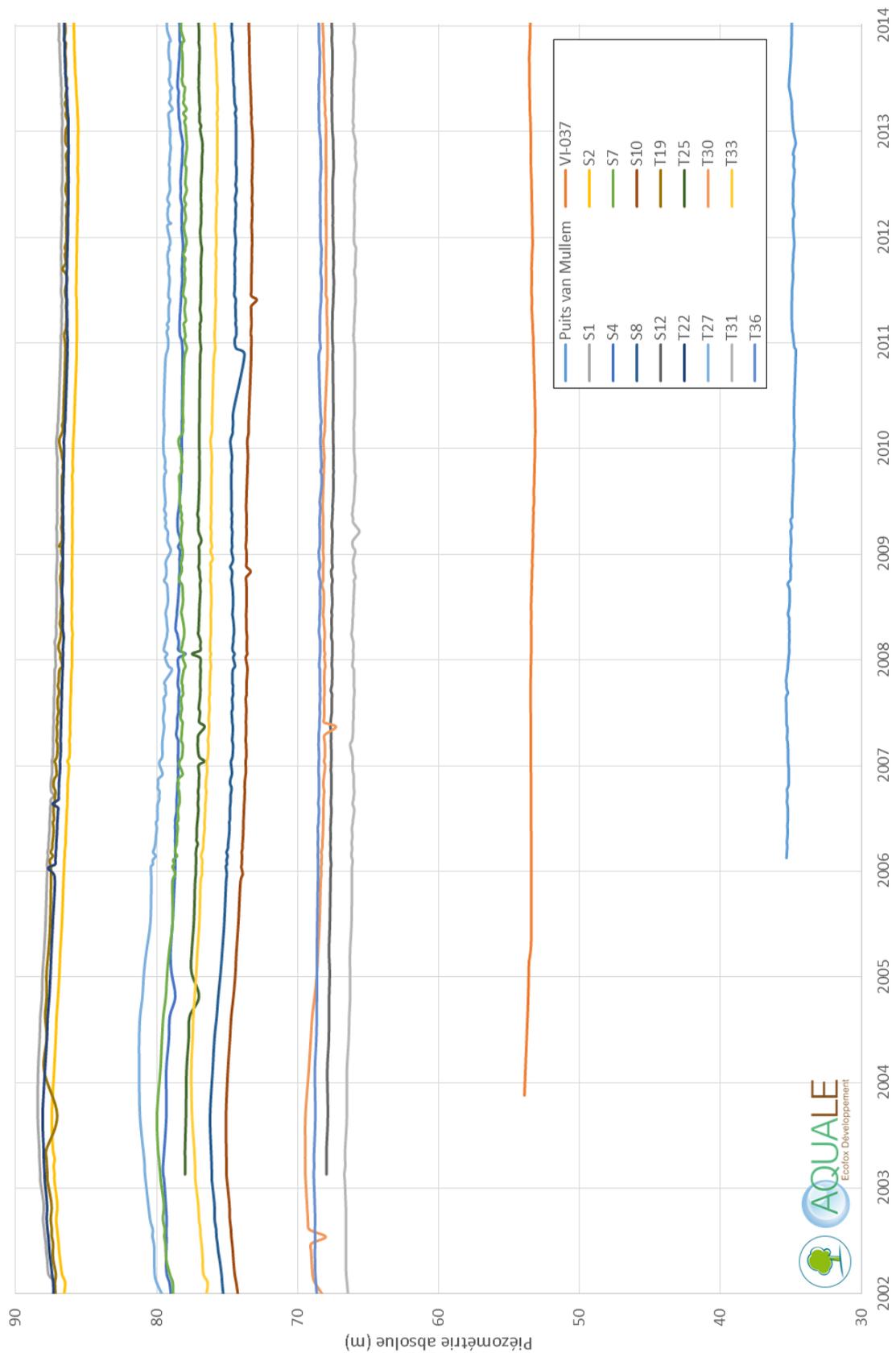


Figure 7-3 : Evolution de la piézométrie mesurée manuellement à très long terme (2002 – 2014)

Il apparaît que :

- globalement, la piézométrie générale semble être assez constante à très long terme ;
- pour les différents piézomètres, la chronique piézométrique montre une période de haut piézométrique (2002 – 2007) et une période de bas piézométrique (2007 – 2014) ; une remontée est perceptible à partir de l'année 2013 ; le bas et le haut piézométrique correspondent bien aux variations observées sur les courbes de mesures automatiques mais la période couverte par ces mesures n'est pas suffisante pour déterminer s'il y a une diminution, une stabilité ou une augmentation à long terme ;
- le piézomètre Soignes-T19 suivi par sonde automatique et par relevé manuel permet de faire le lien entre les **FIGURES 7-2 et 7-3** ; ainsi, l'évolution piézométrique des ouvrages Soignes-S1, S2, S4, S7, S8, S10, T19, T22, T25, T27, T30, T33 et du puits van Mullem est identique, les courbes de suivi manuel sont globalement parallèles, les observations faites sur la courbe de suivi automatique (soit sur 25 ans) du piézomètre Soignes-T19 peuvent donc être *a priori* transposées aux autres piézomètres, qui seraient donc également caractérisés par une légère baisse d'environ 0.5 m sur ces 25 dernières années ;
- les piézomètres Soignes-S12, T31, T36 et le piézomètre VI-037 sont caractérisés par une allure piézométrique plus proche de celle du piézomètre Voets suivi automatiquement durant 25 années ; ils sont caractérisés par une diminution plus lente du niveau piézométrique durant ces dernières années, soit une légère baisse d'environ 0.3 m sur ces 25 dernières années.

La **FIGURE 7-4** ci-dessous reprend la localisation des différents piézomètres dont l'évolution du niveau d'eau est présentée dans les **FIGURES 7-2 et 7-3**. Les ouvrages caractérisés par une diminution du niveau d'eau d'environ 0.5 m sur les 25 dernières années sont regroupés dans la partie Sud de la Région de Bruxelles-Capitale. Les ouvrages caractérisés par une diminution du niveau d'eau d'environ 0.3 m sur les 25 dernières années sont regroupés dans la partie centrale de la Région de Bruxelles-Capitale. Les ouvrages caractérisés par un niveau d'eau stable sur les 25 dernières années sont regroupés dans la partie Nord de la Région de Bruxelles-Capitale. Les ouvrages Bonniers, Ferme Fond-Roy et Puits van Mullem ne respectent pas cette subdivision géographique.

Cette très légère tendance à la baisse peut être liée :

- soit à une augmentation des volumes prélevés dans la nappe ;
- soit à une diminution des apports vers la nappe, elle-même liée à :
 - o une diminution de la pluviométrie ;
 - o une augmentation de l'évapotranspiration (suite à une augmentation de la température) ;
 - o une augmentation du ruissellement (suite à une augmentation de l'urbanisation) ;
- soit à la combinaison des deux phénomènes simultanément.

Sur la base des observations réalisées aux **CHAPITRES 4.4.1.2.2.2 et 4.4.1.2.2.3** (étude du contexte climatique à long terme et à très long terme), il apparaît assez clair que la période couvrant les années 2003 à 2014 est caractérisée par une eau utile plutôt faible, ce qui provoque inévitablement une diminution du niveau de la nappe. Ce creux piézométrique est plus long et plus important que les précédents du fait de la durée de cette période d'eau utile plus faible.

L'augmentation des volumes prélevés n'est cependant pas à exclure mais il est probable que le facteur principal de la diminution du niveau d'eau soit la durée de la période de faible eau utile.

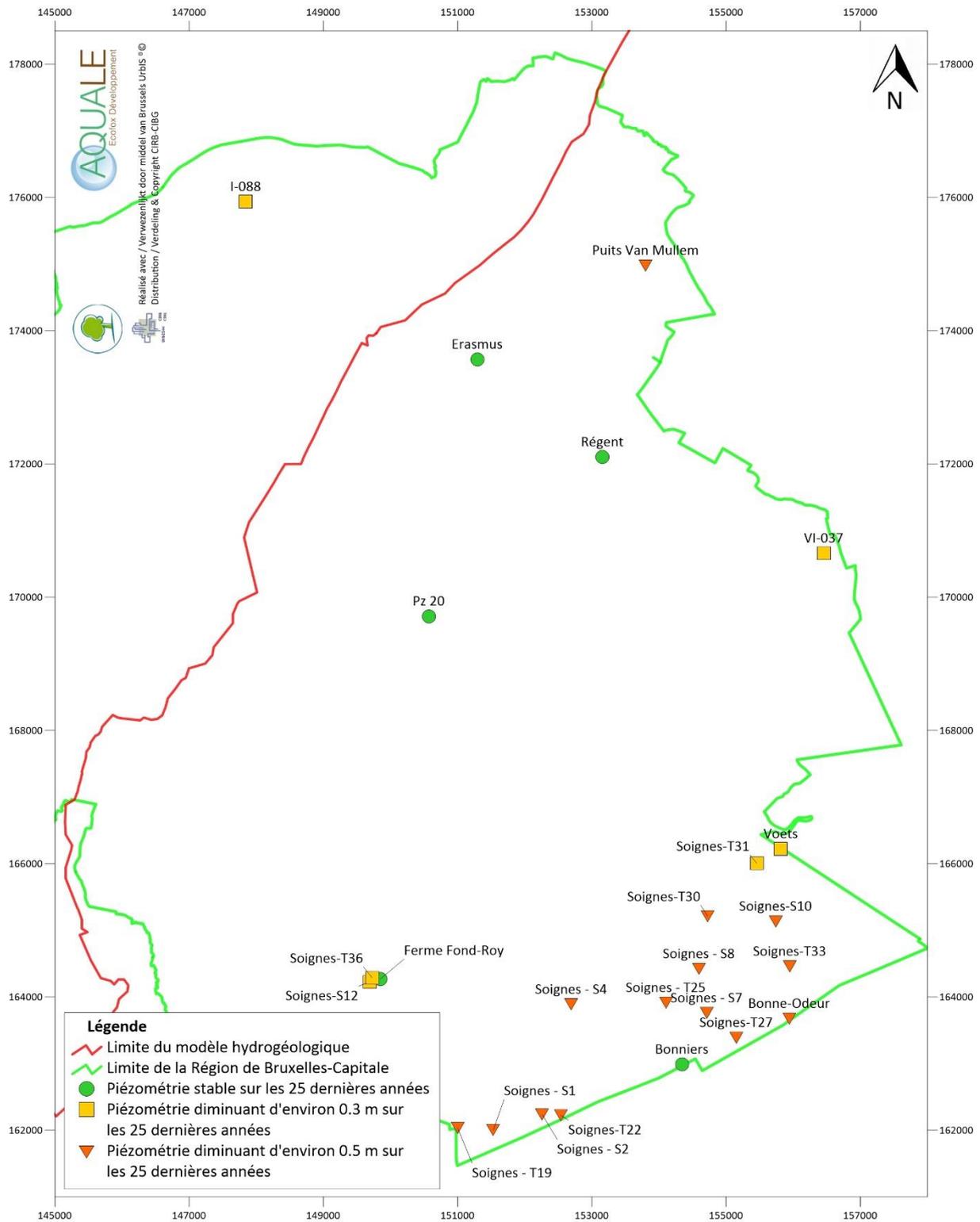


Figure 7-4 : Evolution de la piézométrie à très long terme en Région de Bruxelles-Capitale

Les volumes prélevés annuellement dans la *nappe du Bruxellien* sont connus en Région de Bruxelles-Capitale pour la période couvrant les années 2009 à 2013 :

- en 2009 : 430 000 m³ (dont 335 000 m³ par le champ captant de Vivaqua) ;
- en 2010 : 416 000 m³ (dont 329 000 m³ par le champ captant de Vivaqua) ;
- en 2011 : 405 000 m³ (dont 328 000 m³ par le champ captant de Vivaqua) ;
- en 2012 : 454 000 m³ (dont 387 000 m³ par le champ captant de Vivaqua) ;
- en 2013 : 406 000 m³ (dont 344 000 m³ par le champ captant de Vivaqua).

A l'échelle de la zone modélisée, la variation est la suivante :

- en 2009, 5.6 Mm³ avec principalement 2.5 Mm³ via le puits VLB-2320/1 en bordure de Dyle, à environ 18 km au Nord-Est de la Région de Bruxelles-Capitale ;
- en 2010, 10.5 Mm³ avec principalement :
 - o 2.2 Mm³ via le puits VLB-2320/1 en bordure de Dyle, à environ 18 km au Nord-Est de la Région de Bruxelles-Capitale ;
 - o 1.5 Mm³ via le puits 9000199 dans la partie centrale du modèle à environ 7.5 km à l'Est de la Région de Bruxelles-Capitale ;
 - o 1.1 Mm³ via le puits 9000197 dans la partie Nord du modèle à environ 17 km de la Région de Bruxelles-Capitale ;
- en 2011, 12.1 Mm³ avec principalement :
 - o 1.9 Mm³ via le puits VLB-2320/1 en bordure de Dyle, à environ 18 km au Nord-Est de la Région de Bruxelles-Capitale ;
 - o 1.5 Mm³ via le puits 9000199 dans la partie centrale du modèle à environ 7.5 km à l'Est de la Région de Bruxelles-Capitale ;
 - o 1.2 Mm³ via le puits 9000197 dans la partie Nord du modèle à environ 17 km de la Région de Bruxelles-Capitale ;
- en 2012, 9.4 Mm³ avec principalement :
 - o 1.5 Mm³ via le puits 9000199 dans la partie centrale du modèle à environ 7.5 km à l'Est de la Région de Bruxelles-Capitale ;
 - o 1.1 Mm³ via le puits 9000197 dans la partie Nord du modèle à environ 17 km de la Région de Bruxelles-Capitale ;
- en 2013, 9.9 Mm³ avec principalement :
 - o 1.5 Mm³ via le puits 9000199 dans la partie centrale du modèle à environ 7.5 km à l'Est de la Région de Bruxelles-Capitale ;
 - o 1.5 Mm³ via le puits 9000197 dans la partie Nord du modèle à environ 17 km de la Région de Bruxelles-Capitale.

L'augmentation importante entre 2009 et 2010 est liée à la mise en service des puits 9000197 et 9000199 mais également de nombreux autres puits dont le débit annuel est supérieur à 0.5 Mm³. La diminution observée entre 2011 et 2012 est principalement liée à l'arrêt du puits VLB-2320/1.

Le volume total prélevé en Région de Bruxelles-Capitale varie assez faiblement durant ces 5 dernières années, d'autant plus si on le compare aux volumes prélevés au sein de la zone modélisée.

Cette variation est également très faible en comparaison avec les volumes drainés, en Région de Bruxelles-Capitale, par :

- la Galerie Vivaqua :
 - o en 2009 : 1.9 Mm³ ;
 - o en 2010 : 2.0 Mm³ ;
 - o en 2011 : 1.9 Mm³ ;
 - o en 2012 : 1.9 Mm³ ;
 - o en 2013 : 2.0 Mm³ ;

- les tronçons amont de la Woluwe : environ 2.9 Mm³ ;
- les collecteurs : environ 24 Mm³.

Ces derniers volumes sont drainés naturellement par la galerie, la Woluwe et les collecteurs. L'évolution du volume prélevé en galerie est donc un indicateur de la quantité d'eau disponible en amont de la galerie. Cette quantité d'eau semble augmenter légèrement depuis 2009, ce qui est en accord avec la tendance observée sur l'ensemble des courbes piézométriques à (très) long terme (**FIGURES 7-1 et 7-2**) qui montrent un début de remontée piézométrique durant ces dernières années (bien que l'on soit, globalement, toujours dans une période de piézométrie basse).

7.2.3 SIMULATIONS

Pour les différentes simulations, les impacts suivants sont observés :

- l'impact sur les niveaux d'eau en Région de Bruxelles-Capitale ;
- l'impact sur les débits drainés par les ruisseaux, les collecteurs et la Galerie Vivaqua.

Si l'eau souterraine drainée par les collecteurs ne représente pas à proprement parler une « ressource », le débit transitant vers ceux-ci est tout de même un bon indicateur du niveau des nappes et du volume d'eau disponible.

Un tableau de synthèse des résultats est présenté au **CHAPITRE 7.2.4**.

7.2.3.1 SCÉNARII N°1 À 3 – RÉGIME PERMANENT, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE SITUATION MOYENNE

7.2.3.1.1 SCÉNARIO 1 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE IDENTIQUE À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-5** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°1**.

La **FIGURE 7-6** présente l'augmentation du niveau piézométrique dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°1** par rapport au niveau de la nappe simulé en régime permanent pour l'année 2013.

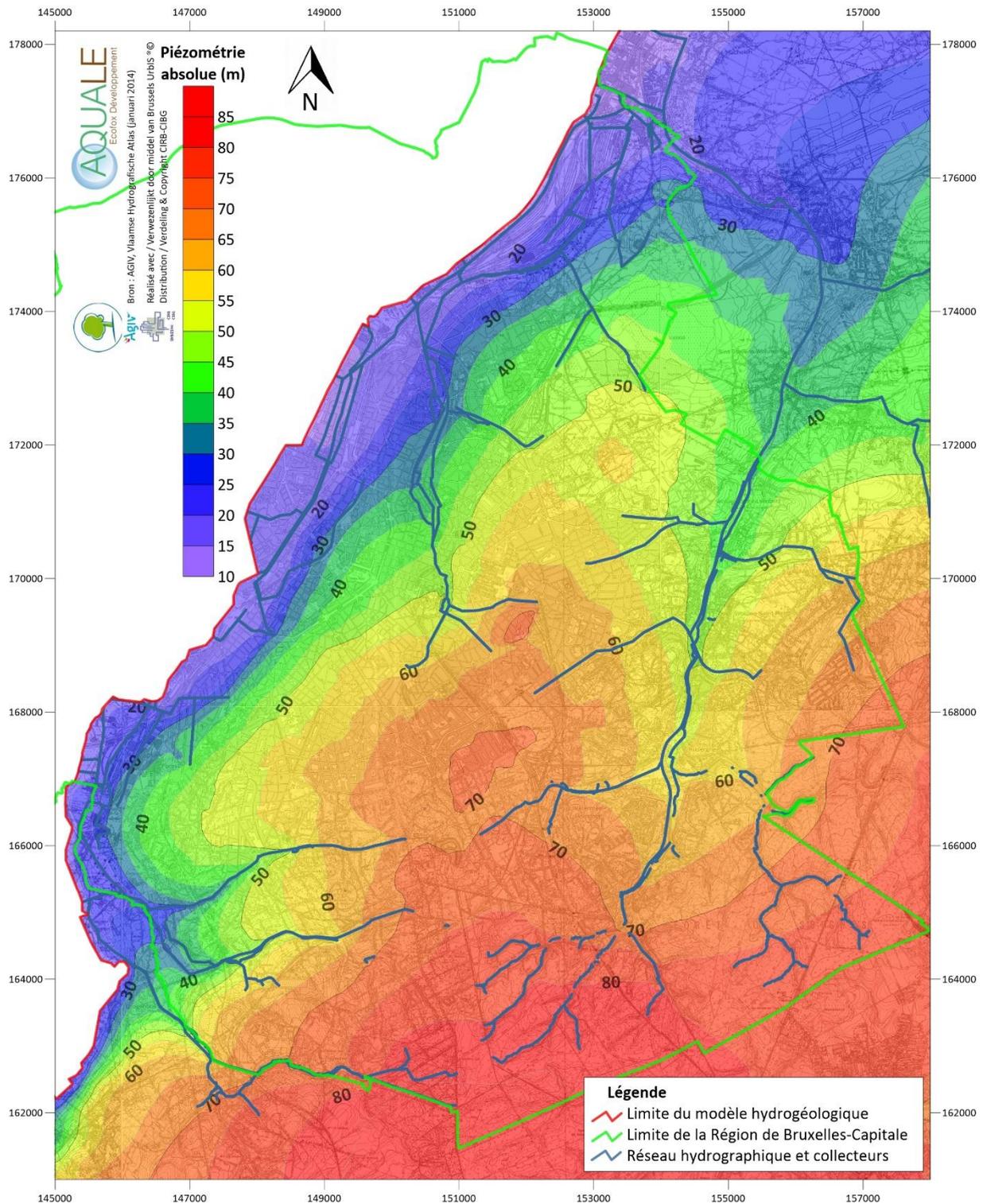


Figure 7-5 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°1

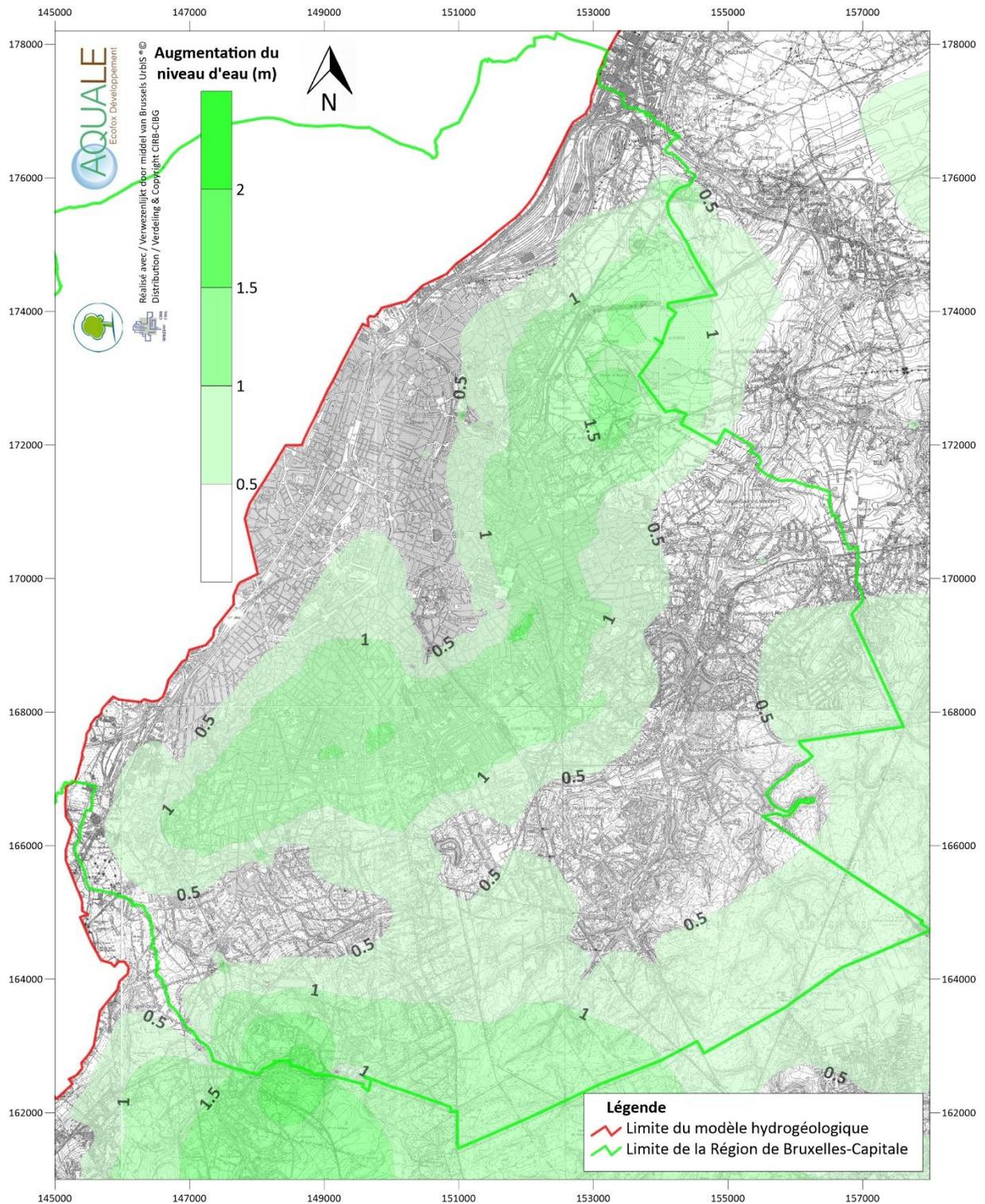


Figure 7-6 : Augmentation du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence de l'année 2013 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°1

Il apparaît sur la **FIGURE 7-5** que le niveau de la nappe diminue depuis le Sud vers le Nord et en direction des rivières et collecteurs. L'eau rentre dans la Région par la frontière Sud et accessoirement par la frontière Est et en sort par la Senne, la Woluwe, les collecteurs et accessoirement à travers la frontière Nord.

La **FIGURE 7-6** est intéressante pour estimer l'impact de l'infiltration sur le niveau de la nappe. Cette figure indique que, par rapport à l'année 2013, un retour à une infiltration légèrement plus élevée (augmentée de 10 %), permet de remonter légèrement les niveaux d'eau de la nappe. La remontée est assez faible dans les vallées de la Senne et de la Woluwe puisque ces vallées agissent comme des drains. Elle atteint 0.5, 1.0 voire localement 1.5 m en certaines zones plus éloignées des exutoires. Les observations réalisées sur les **FIGURES 7-2 et 7-3** ont démontré que le niveau d'eau dans les différents piézomètres a varié globalement avec une amplitude de 2 m durant les 25 dernières années. Ainsi, l'infiltration annuelle moyenne imposée dans ce **SCÉNARIO N°1** permet de récupérer les niveaux d'eau moyens de ces dernières années, ce qui semble confirmer que le niveau actuel d'exploitation de la nappe est durable.

En ce qui concerne les débits de sortie en Région de Bruxelles-Capitale, ce **SCÉNARIO N°1** donne les estimations suivantes :

- la Galerie Vivaqua : 2.2 Mm³/an (soit une augmentation d'environ 10 % par rapport à l'année 2013) ;
- les tronçons amont de la Woluwe : environ 3.3 Mm³ (soit une augmentation d'environ 14 % par rapport à l'année 2013) ;
- les collecteurs : environ 26 Mm³ (soit une augmentation d'environ 8 % par rapport à l'année 2013).

Les débits de sortie augmentent forcément avec l'augmentation du débit d'entrée.

Ce **SCÉNARIO N°1** tend à démontrer que :

- dans des conditions d'infiltration normale (moyenne), le niveau d'eau de la nappe devrait légèrement remonter en Région de Bruxelles-Capitale et revenir ainsi au niveau des années 1980 ;
- dans des conditions d'infiltration normale (moyenne), le débit drainé par les collecteurs, la galerie Vivaqua et le réseau hydrographique devrait augmenter (proportionnellement à l'augmentation d'infiltration).

Puisque ce **SCÉNARIO N°1** fait office de référence absolue pour la piézométrie moyenne attendue dans des conditions normales moyennes d'infiltration, les **SCÉNARIO N°2 et 3** seront étudiés en comparant leurs résultats aux résultats du **SCÉNARIO N°1**. L'impact d'une augmentation des volumes prélevés par les puits de captage apparaîtra dès lors de manière évidente.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.6**, à savoir :

- **cas A** : infiltration x 1.05 et conductivité hydraulique x 0.85 ;
- **cas B** : infiltration x 1.03 et conductivité hydraulique x 1.32 ;
- **cas C** : infiltration x 0.86 et conductivité hydraulique x 1.08 ;
- **cas D** : infiltration x 0.88 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le **TABLEAU 7-1** ci-dessous reprend les variations des débits sortant par la Galerie Vivaqua, les tronçons amont de la Woluwe et les collecteurs pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Galerie Vivaqua	+ 14 %	- 14 %	- 21 %	+ 4 %	[- 21 à + 14 %]
Tronçons amont de la Woluwe	+ 10 %	- 7 %	- 23 %	- 9 %	[- 23 à + 10 %]
Collecteurs	+ 1 %	+ 8 %	- 11 %	- 17 %	[- 17 à + 8 %]

Tableau 7-1 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°1

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°1**, les débits sortants par ces trois exutoires sont :

- compris entre 1.7 et 2.5 Mm³/an pour la Galerie Vivaqua ;
- compris entre 2.5 et 3.6 Mm³/an pour les tronçons amont de la Woluwe ;
- compris entre 22 et 28 Mm³/an pour les collecteurs.

7.2.3.1.2 SCÉNARIO 2 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 50 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-7** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°2**.

La **FIGURE 7-8** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°2** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°1**.

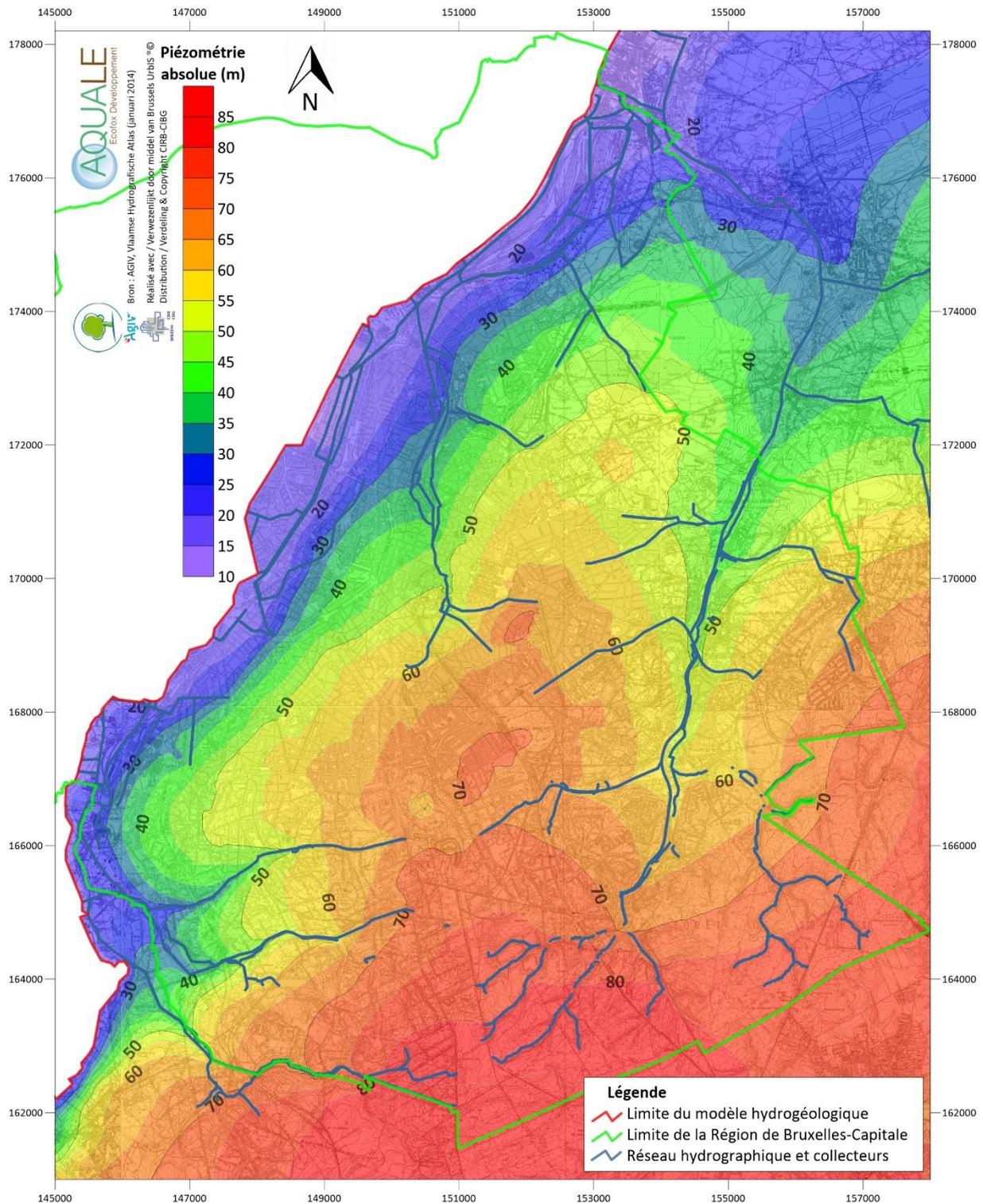


Figure 7-7 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°2

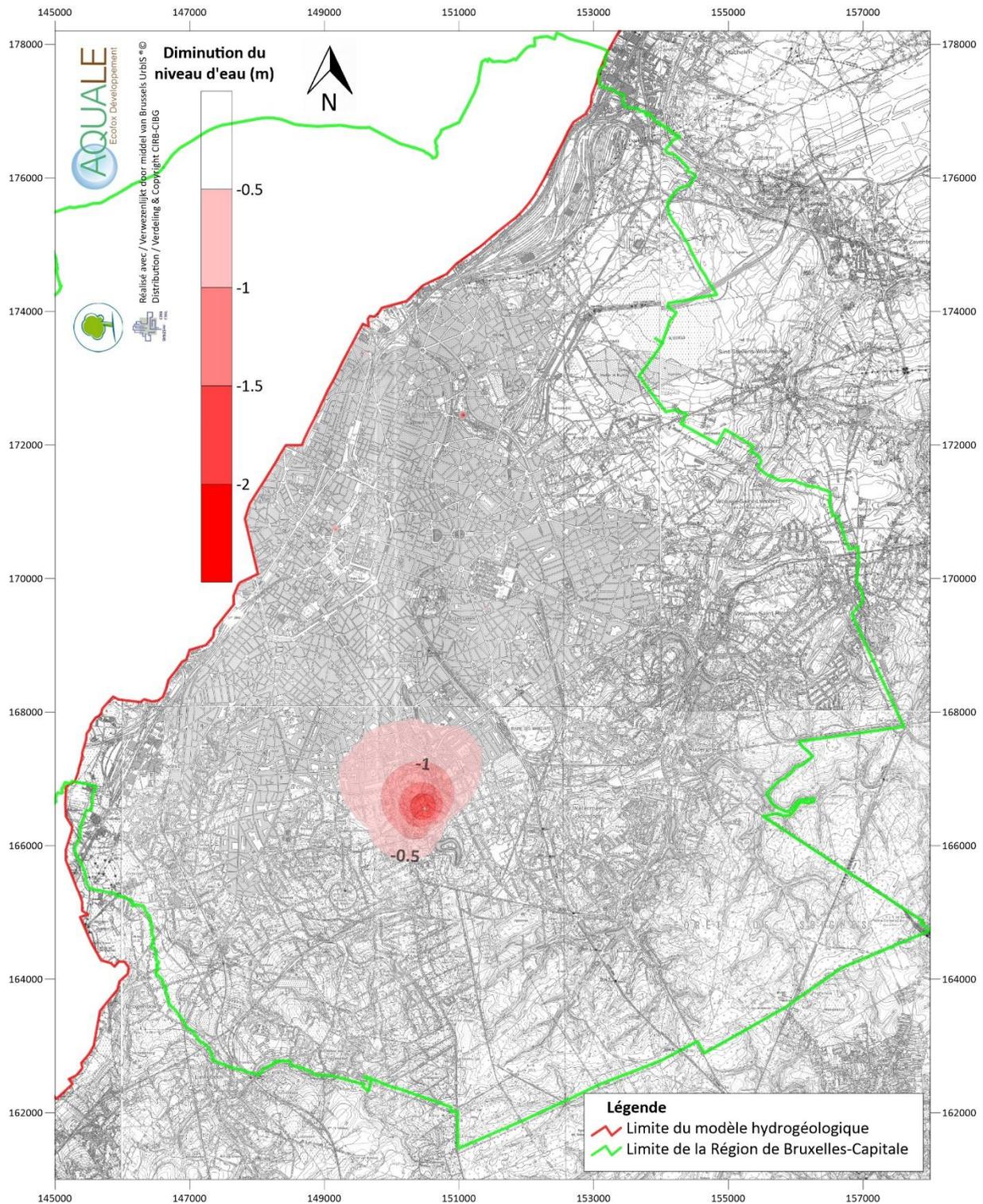


Figure 7-8 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°2

Il apparaît sur la **FIGURE 7-7** qu'il n'y a *a priori* pas de modifications visibles par rapport au **SCÉNARIO N°1**.

La **FIGURE 7-8** est intéressante pour estimer l'impact de l'augmentation de 50 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale sur le niveau de la nappe. Cette figure indique que, par rapport au **SCÉNARIO N°1**, cette augmentation du débit prélevé aurait une incidence mineure et surtout très localisée sur le niveau de la *nappe du Bruxellien*. En effet, si un rabattement est visible, il est relativement léger et il ne s'étend pas sur une zone importante. Evidemment, c'est l'augmentation de 50 % du débit du champ captant Vivaqua (principal point d'extraction d'eau par pompage de la nappe en Région de Bruxelles-Capitale) qui a le plus d'effet sur le niveau de la nappe. D'autres rabattements sont visibles mais de manière très ponctuelle autour des puits de pompage.

En ce qui concerne les débits de sortie en Région de Bruxelles-Capitale, ce **SCÉNARIO N°2** donne les estimations suivantes :

- la Galerie Vivaqua : 2.1 Mm³/an (soit une diminution d'environ 5 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les tronçons amont de la Woluwe : environ 3.3 Mm³ (soit une variation très faible par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les collecteurs : environ 26 Mm³ (soit une variation très faible par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

Puisque les débits de sortie augmentent à travers les puits situés en Région de Bruxelles-Capitale, il est logique que les autres débits de sortie diminuent. Cependant, cette diminution est très faible compte tenu des débits mis en jeu par les puits.

Ce **SCÉNARIO N°2** tend à démontrer que :

- dans des conditions d'infiltration normale (moyenne), le niveau d'eau général de la nappe serait assez peu impacté en cas d'augmentation de 50 % des débits pompés dans la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale ;
- cette première remarque n'est pas valable localement puisqu'en cas d'augmentation du débit de pompage (ou, *a fortiori*, en cas d'ajout d'un nouveau puits), le niveau d'eau diminuera plus ou moins fortement en fonction du débit mis en jeu ;
- dans des conditions d'infiltration normale (moyenne), le débit drainé par les collecteurs, la galerie Vivaqua et le réseau hydrographique devrait diminuer très légèrement (de façon négligeable) en cas d'augmentation de 50 % des débits pompés dans la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale. Cette observation est la conséquence du fait que le volume total prélevé annuellement par les puits est d'un ordre de deux ordres de grandeurs inférieur aux débits drainés par, d'une part, la galerie Vivaqua et la Woluwe, et d'autre part, les collecteurs.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.6**, à savoir :

- **cas A** : infiltration x 1.05 et conductivité hydraulique x 0.85 ;
- **cas B** : infiltration x 1.03 et conductivité hydraulique x 1.32 ;
- **cas C** : infiltration x 0.86 et conductivité hydraulique x 1.08 ;
- **cas D** : infiltration x 0.88 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le **TABLEAU 7-2** ci-dessous reprend les variations des débits sortant par la Galerie Vivaqua, les tronçons amont de la Woluwe et les collecteurs pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Galerie Vivaqua	+ 16 %	- 17 %	- 23 %	+ 6 %	[- 23 à + 16 %]
Tronçons amont de la Woluwe	+ 10 %	- 7 %	- 23 %	- 9 %	[- 23 à + 10 %]
Collecteurs	+ 0 %	+ 8 %	- 11 %	- 17 %	[- 17 à + 8 %]

Tableau 7-2 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°2

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°2**, les débits sortants par ces trois exutoires sont :

- compris entre 1.6 et 2.4 Mm³/an pour la Galerie Vivaqua ;
- compris entre 2.5 et 3.6 Mm³/an pour les tronçons amont de la Woluwe ;
- compris entre 22 et 28 Mm³/an pour les collecteurs.

7.2.3.1.3 SCÉNARIO 3 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 100 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-9** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°3**.

La **FIGURE 7-10** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°3** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°1**.

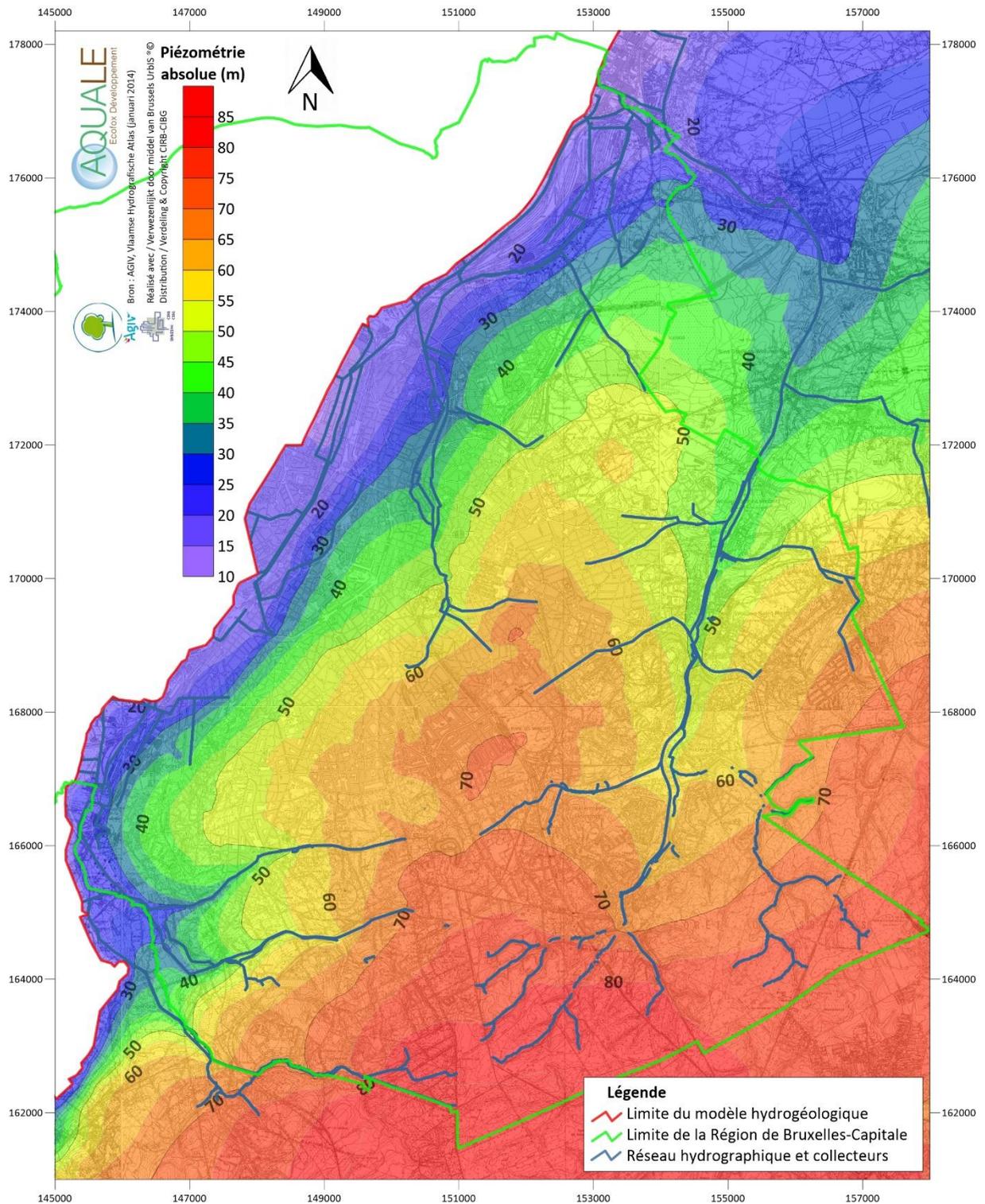


Figure 7-9 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°3

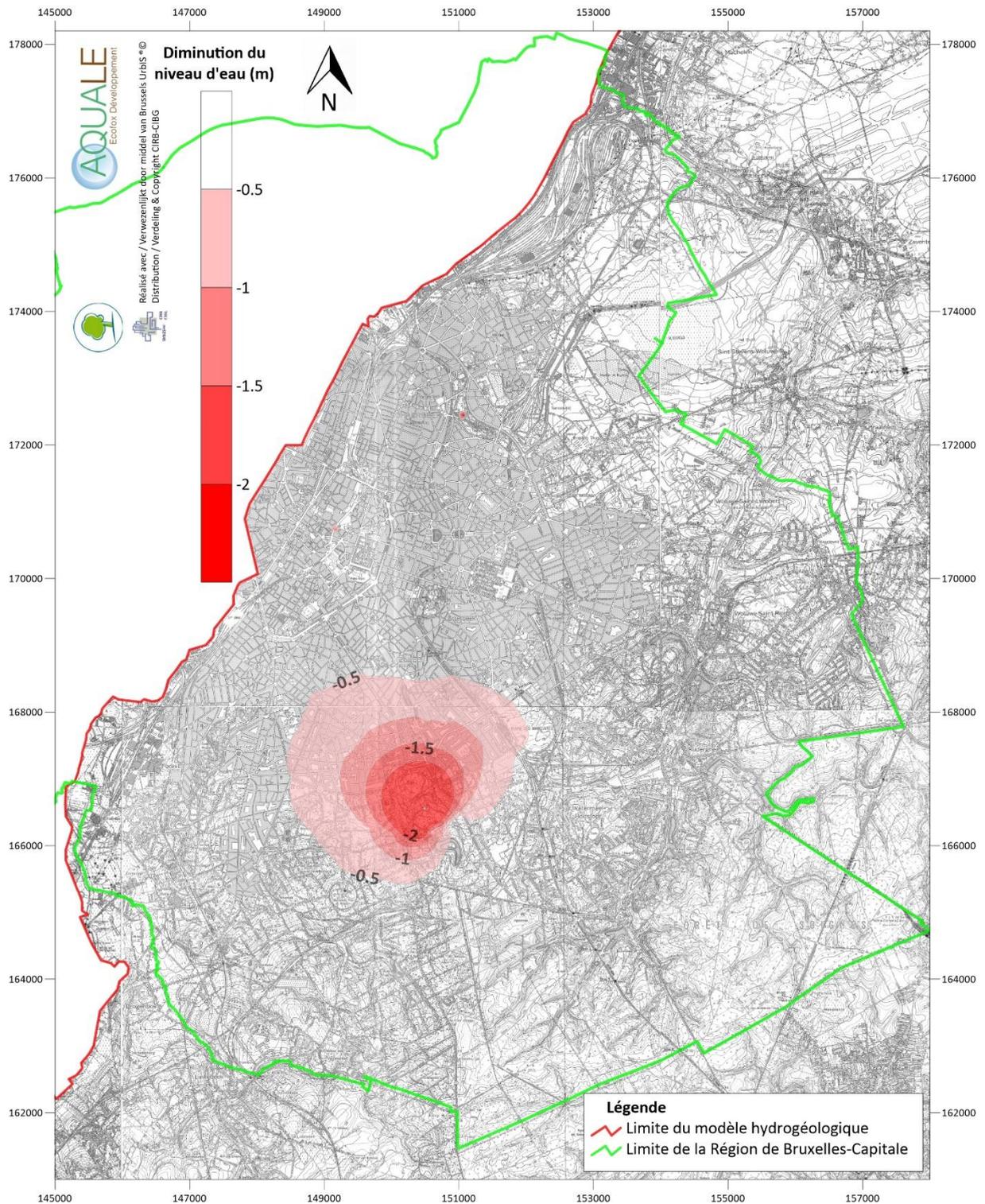


Figure 7-10 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°3

Il apparaît sur la **FIGURE 7-9** qu'il n'y a *a priori* pas de modifications visibles par rapport aux **SCÉNARIO N°1 et 2**.

La **FIGURE 7-10** est intéressante pour estimer l'impact de l'augmentation de 100 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale sur le niveau de la nappe. Cette figure indique que, par rapport au **SCÉNARIO N°1**, cette augmentation du débit prélevé aurait une incidence toujours mineure et toujours très localisée sur le niveau de la *nappe du Bruxellien*. En effet, le rabattement visible à la **FIGURE 7-8 (SCÉNARIO N°2)** a augmenté, que ce soit en termes d'intensité ou en termes de distance par rapport au point de pompage, mais il reste relativement léger et il ne s'étend toujours pas sur une zone importante.

En ce qui concerne les débits de sortie en Région de Bruxelles-Capitale, ce **SCÉNARIO N°3** donne les estimations suivantes :

- la Galerie Vivaqua : 2 Mm³/an (soit une diminution d'environ 10 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les tronçons amont de la Woluwe : environ 3.3 Mm³ (soit une variation très faible par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les collecteurs : environ 26 000 000 m³ (soit une variation très faible par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

Puisque les débits de sortie augmentent à travers les puits situés en Région de Bruxelles-Capitale, il est logique que les autres débits de sortie diminuent. Cependant, cette diminution est très faible compte tenu des débits mis en jeu par les puits.

Ce **SCÉNARIO N°3** tend à démontrer que :

- dans des conditions d'infiltration normale (moyenne), le niveau d'eau général de la nappe serait assez peu impacté en cas d'augmentation de 100 % des débits pompés dans la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale ;
- cette première remarque n'est pas valable localement puisqu'en cas d'augmentation du débit de pompage (ou, *a fortiori*, en cas d'ajout d'un nouveau puits), le niveau d'eau diminuera plus ou moins fortement en fonction du débit mis en jeu ;
- dans des conditions d'infiltration normale (moyenne), le débit drainé par les collecteurs, la galerie Vivaqua et le réseau hydrographique devrait diminuer très légèrement (de façon négligeable) en cas d'augmentation de 100 % des débits pompés dans la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale. Cette observation est la conséquence du fait que le volume total prélevé annuellement par les puits est d'un voire de deux ordres de grandeurs inférieur aux débits drainés par, d'une part, la galerie Vivaqua et la Woluwe, et d'autre part, les collecteurs.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.6**, à savoir :

- **cas A** : infiltration x 1.05 et conductivité hydraulique x 0.85 ;
- **cas B** : infiltration x 1.03 et conductivité hydraulique x 1.32 ;
- **cas C** : infiltration x 0.86 et conductivité hydraulique x 1.08 ;
- **cas D** : infiltration x 0.88 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le **TABLEAU 7-3** ci-dessous reprend les variations des débits sortant par la Galerie Vivaqua, les tronçons amont de la Woluwe et les collecteurs pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Galerie Vivaqua	+ 16 %	- 17 %	- 23 %	+ 5 %	[- 23 à + 16 %]
Tronçons amont de la Woluwe	+ 10 %	- 7 %	- 23 %	- 9 %	[- 23 à + 10 %]
Collecteurs	+ 0 %	+ 7 %	- 12 %	- 18 %	[- 18 à + 7 %]

Tableau 7-3 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°3

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°3**, les débits sortants par ces trois exutoires sont :

- compris entre 1.5 et 2.3 Mm³/an pour la Galerie Vivaqua ;
- compris entre 2.5 et 3.6 Mm³/an pour les tronçons amont de la Woluwe ;
- compris entre 21 et 28 Mm³/an pour les collecteurs.

7.2.3.1.4 REMARQUE SUR LA SENSIBILITÉ

Dès lors que les **TABLEAUX 7-1, 7-2 et 7-3** démontrent que l'incertitude reste à très peu de chose près la même pour les **SCÉNARII N°1, 2 et 3**, les variantes **A à D** ne seront réalisées, dans la suite de l'étude, que sur les **SCÉNARII N°4 et 7**.

Ainsi, l'incertitude évaluée sur le **SCÉNARIO N°4** sera considérée comme représentative de l'incertitude également pour les **SCÉNARII N°5 et 6**.

De la même manière, l'incertitude évaluée sur le **SCÉNARIO N°7** sera considérée comme représentative de l'incertitude également pour les **SCÉNARII N°8 et 9**.

7.2.3.2 SCÉNARII N°4 À 6 – RÉGIME TRANSITOIRE, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE PÉRIODE DE 5 ANNÉES DE RECHARGE FAIBLE

7.2.3.2.1 SCÉNARIO 4 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE IDENTIQUE À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-11** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°4**.

La **FIGURE 7-12** présente l'augmentation du niveau piézométrique dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°4** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°1**.

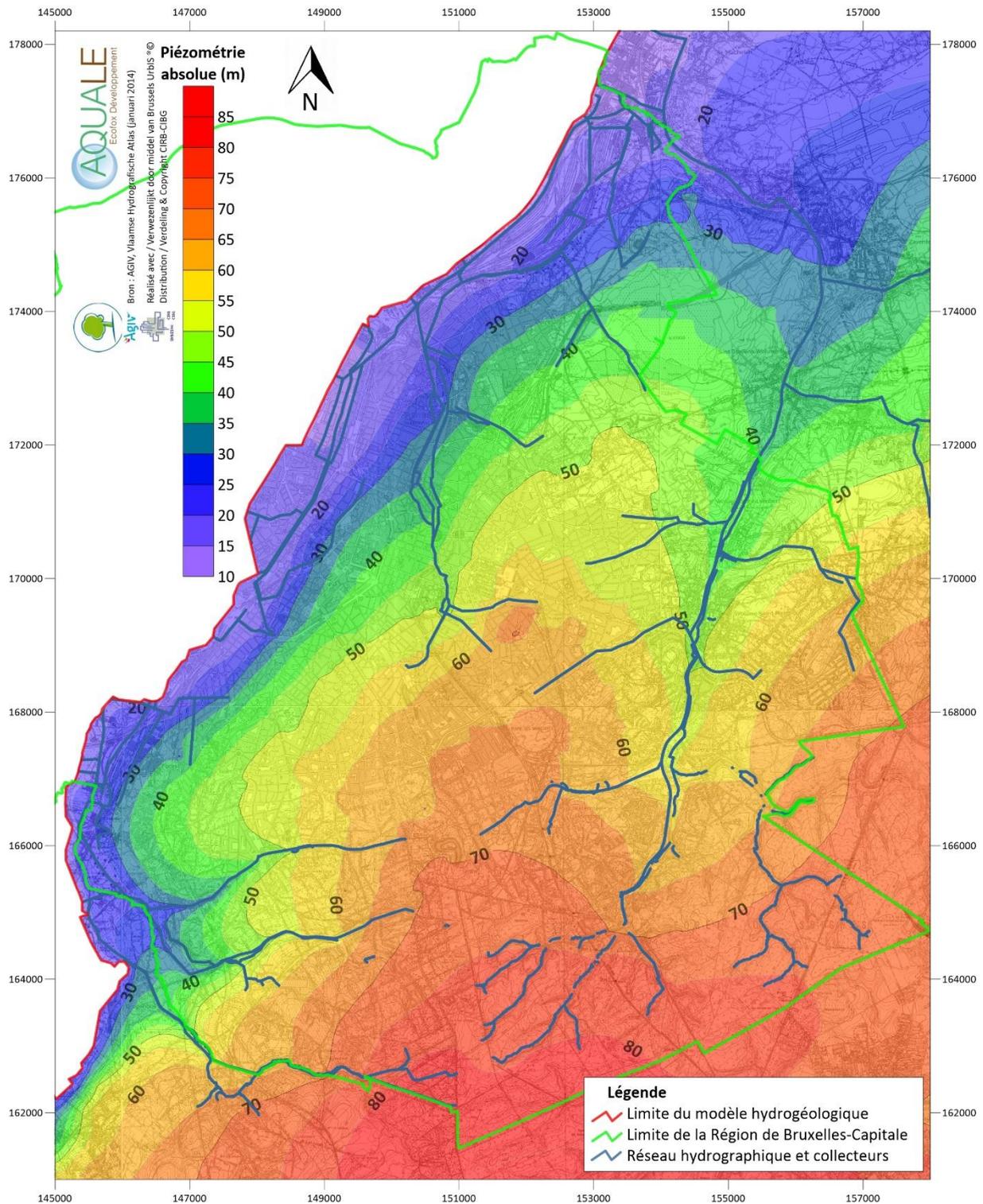


Figure 7-11 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°4

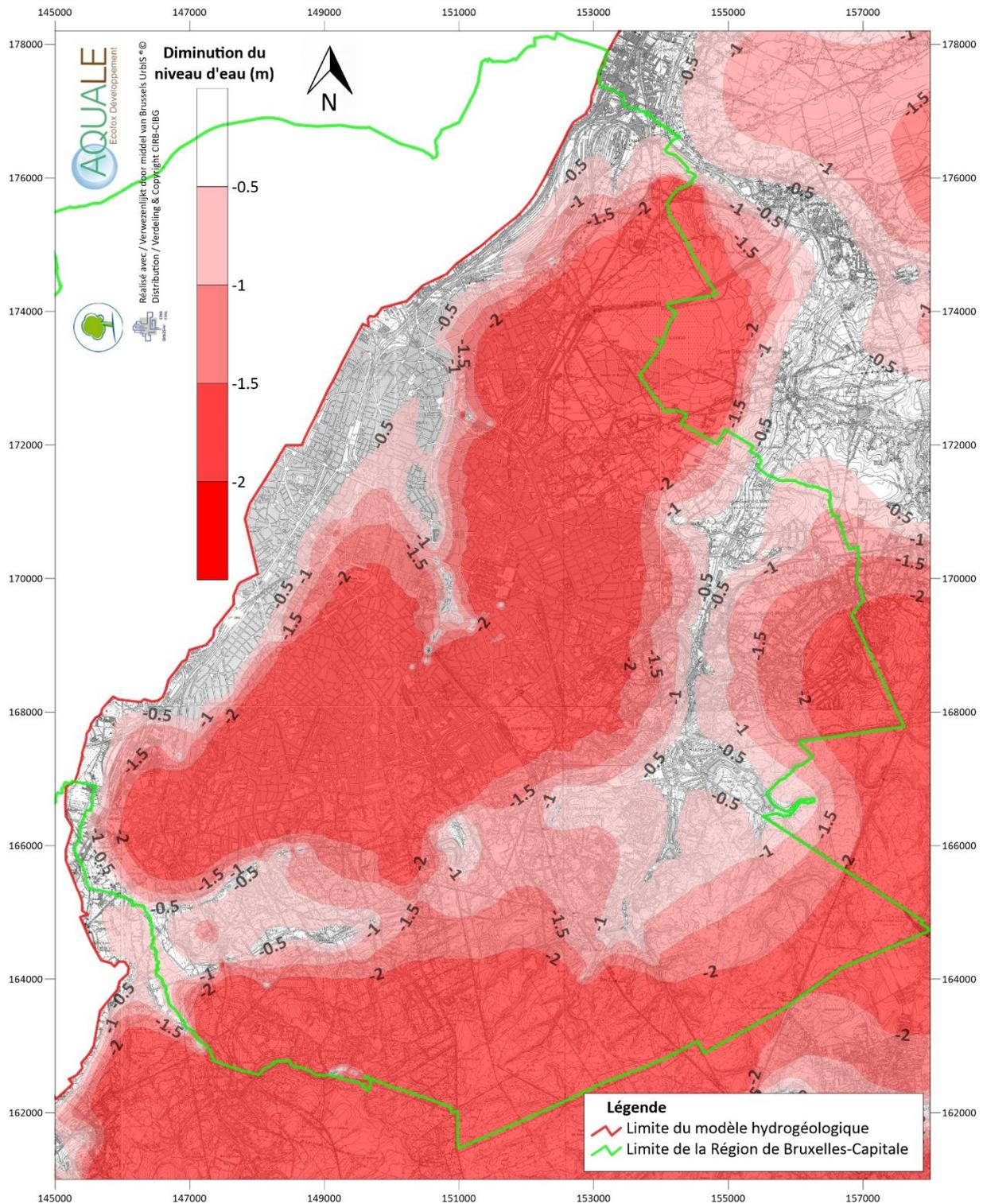


Figure 7-12 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°4

Il apparaît sur la **FIGURE 7-11** que le niveau de la nappe diminue depuis le Sud vers le Nord et en direction des rivières et collecteurs. L'eau rentre dans la Région par la frontière Sud et accessoirement par la frontière Est et en sort par la Senne, la Woluwe, les collecteurs et accessoirement à travers la frontière Nord. Il n'y a a priori pas de modifications visibles par rapport au **SCÉNARIO N°1**.

La **FIGURE 7-12** est intéressante pour estimer l'impact de l'infiltration sur le niveau de la nappe. Cette figure indique que, par rapport au **SCÉNARIO N°1**, une infiltration faible (diminuée de 25 %) entraîne une diminution des niveaux d'eau de la nappe. La descente est assez faible dans les vallées de la Senne et de la Woluwe puisque ces vallées agissent comme des drains. Elle atteint 2 m en dehors des vallées. Localement, elle atteint même 4 m en certaines zones plus éloignées des exutoires. Les observations réalisées sur les **FIGURES 7-2 et 7-3** ont démontré que le niveau d'eau dans les différents piézomètres a varié globalement avec une amplitude de 2 m durant les 25 dernières années. Ainsi, l'infiltration annuelle faible imposée dans ce **SCÉNARIO N°4** permet de récupérer les niveaux d'eau faibles des périodes d'infiltration faible (l'impact de cette recharge faible est même probablement surestimé à cause de la sensibilité trop grande à l'infiltration).

En ce qui concerne les débits de sortie en Région de Bruxelles-Capitale, ce **SCÉNARIO N°4** donne les estimations suivantes :

- la Galerie Vivaqua : 1.5 Mm³/an (soit une diminution d'environ 32 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les tronçons amont de la Woluwe : environ 2.2 Mm³ (soit une diminution d'environ 35 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les collecteurs : environ 20 Mm³ (soit une diminution d'environ 21 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

Les débits de sortie diminuent forcément avec la diminution du débit d'entrée.

Ce **SCÉNARIO N°4** tend à démontrer que :

- dans des conditions d'infiltration très faible, le niveau d'eau de la nappe devrait diminuer en Région de Bruxelles-Capitale et ainsi atteindre les niveaux les plus bas mesurés ;
- dans des conditions d'infiltration très faible, le débit drainé par les collecteurs, la galerie Vivaqua et le réseau hydrographique devrait diminuer (proportionnellement à la diminution d'infiltration, voire plus comme dans le cas des tronçons amont de la Woluwe et de la galerie Vivaqua).

Les **SCÉNARII N°5 et N°6** seront étudiés en comparant leurs résultats aux résultats du **SCÉNARIO N°1**. L'impact cumulé d'une période de recharge très faible et de l'augmentation des volumes prélevés par les puits de captage apparaîtra dès lors de manière évidente.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.6**, à savoir :

- **cas A** : infiltration x 1.05 et conductivité hydraulique x 0.85 ;
- **cas B** : infiltration x 1.03 et conductivité hydraulique x 1.32 ;
- **cas C** : infiltration x 0.86 et conductivité hydraulique x 1.08 ;
- **cas D** : infiltration x 0.88 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le **TABLEAU 7-4** ci-dessous reprend les variations des débits sortant par la Galerie Vivaqua, les tronçons amont de la Woluwe et les collecteurs pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Galerie Vivaqua	+ 22 %	- 22 %	- 25 %	+ 11 %	[- 22 à + 11 %]
Tronçons amont de la Woluwe	+ 12 %	- 14 %	- 28 %	- 8 %	[- 28 à + 12 %]
Collecteurs	+ 4 %	+ 12 %	- 8 %	- 14 %	[- 14 à + 12 %]

Tableau 7-4 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°4

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°4**, les débits sortants par ces trois exutoires sont :

- compris entre 1.2 et 1.7 Mm³/an pour la Galerie Vivaqua ;
- compris entre 1.6 et 2.5 Mm³/an pour les tronçons amont de la Woluwe ;
- compris entre 17 et 22 Mm³/an pour les collecteurs.

7.2.3.2.2 SCÉNARIO 5 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 50 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-13** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°5**.

La **FIGURE 7-14** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°5** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°1**. Elle illustre donc le rabattement total lié à la diminution importante de la recharge et à l'augmentation de 50 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale.

La **FIGURE 7-15** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°5** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°4**. Elle illustre donc le rabattement lié à l'augmentation de 50 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale dans ce contexte de recharge faible.

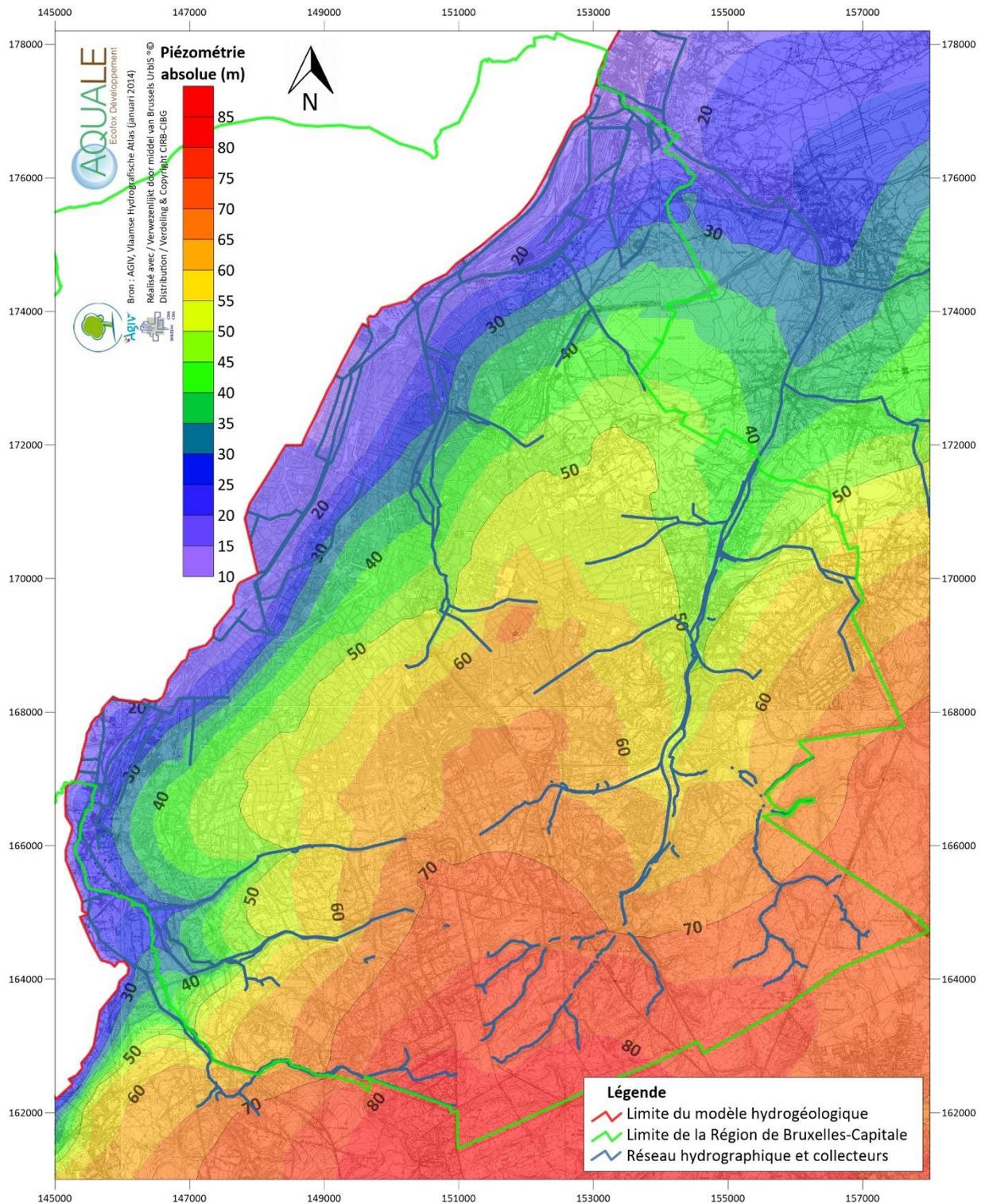


Figure 7-13 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°5

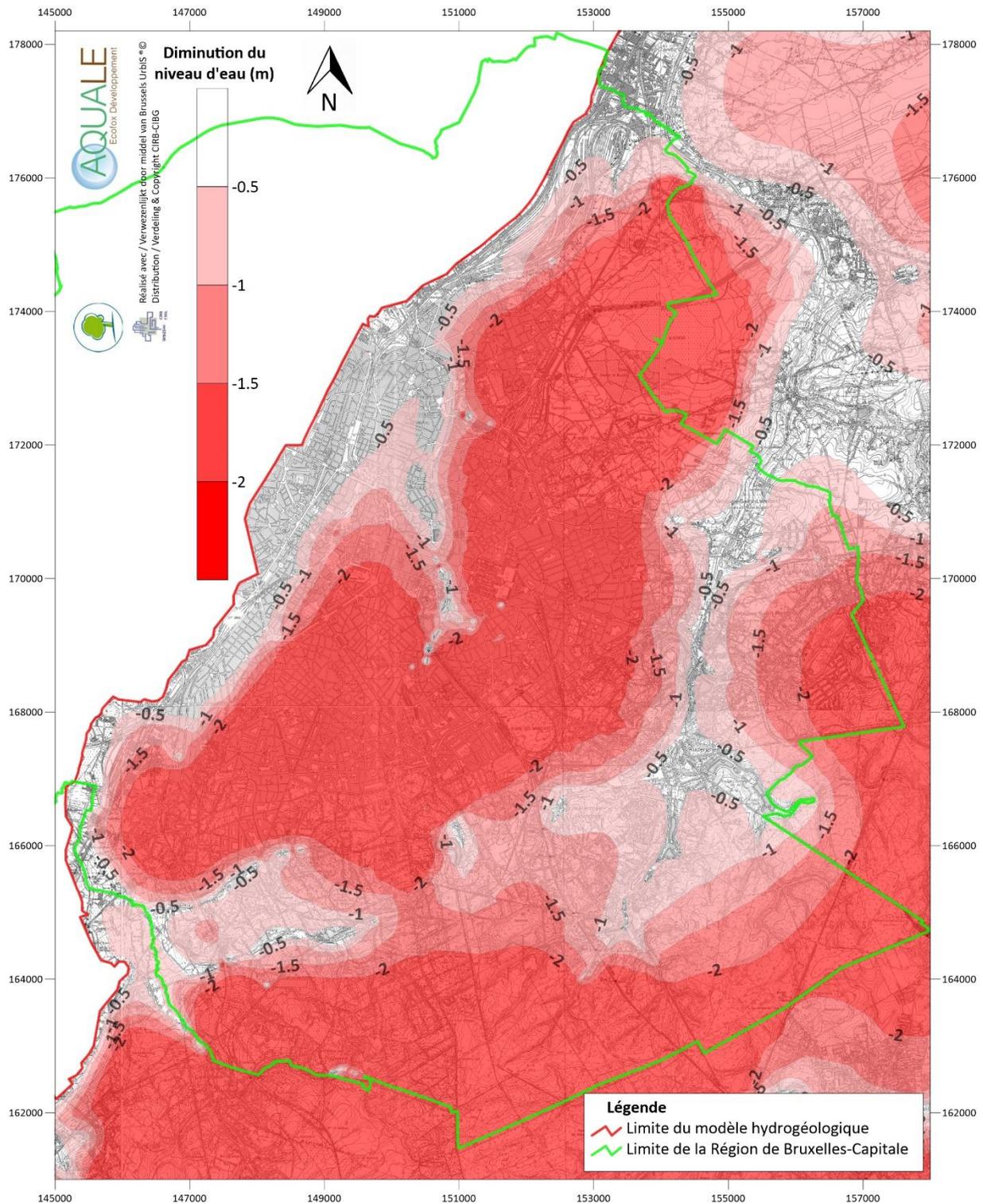


Figure 7-14 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°5

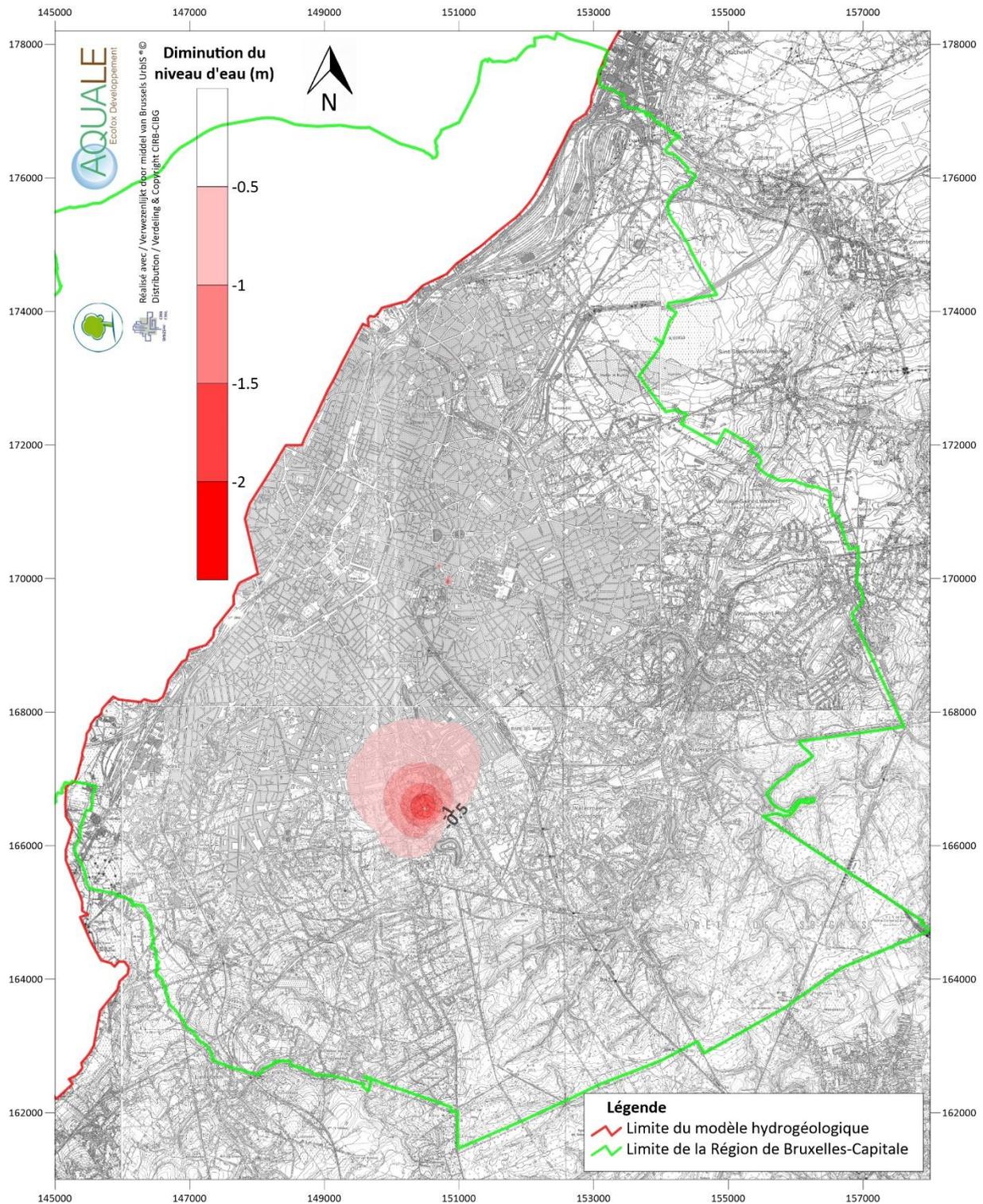


Figure 7-15 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°4 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°5

Il apparaît sur la **FIGURE 7-13** qu'il n'y a *a priori* pas de modifications visibles par rapport au **SCÉNARIO N°4**.

Les **FIGURES 7-14 et 7-15** sont intéressantes pour estimer les impacts cumulés de l'infiltration faible et de l'augmentation de 50 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale sur le niveau de la nappe. Ces figures indiquent que, par rapport au **SCÉNARIO N°1**, cette augmentation du débit prélevé aurait une incidence mineure et surtout très localisée sur le niveau de la *nappe du Bruxellien*. L'impact est globalement le même que dans le cas d'une infiltration moyenne, soit un rabattement autour du point de prélèvement principal qu'est le champ captant Vivaqua. Pour le reste, le rabattement lié à la diminution d'infiltration est clairement nettement plus impactant.

En ce qui concerne les débits de sortie en Région de Bruxelles-Capitale, ce **SCÉNARIO N°5** donne les estimations suivantes :

- la Galerie Vivaqua : 1.5 Mm³/an (soit une diminution d'environ 32 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les tronçons amont de la Woluwe : environ 2.2 Mm³ (soit une diminution d'environ 35 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les collecteurs : environ 20 Mm³ (soit une diminution d'environ 21 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

Il n'y a pas de variation importante par rapport au **SCÉNARIO N°4**, nouvelle preuve de l'impact faible des puits de pompage.

Ce **SCÉNARIO N°5** tend à démontrer que :

- dans des conditions d'infiltration très faible, le niveau d'eau général de la nappe serait assez peu impacté en cas d'augmentation de 50 % des débits pompés dans la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale ;
- cette première remarque n'est pas valable localement puisqu'en cas d'augmentation du débit de pompage (ou, *a fortiori*, en cas d'ajout d'un nouveau puits), le niveau d'eau diminuera plus ou moins fortement en fonction du débit mis en jeu ;
- dans des conditions d'infiltration très faible, le débit drainé par les collecteurs, la galerie Vivaqua et le réseau hydrographique devrait diminuer très légèrement (de façon négligeable) en cas d'augmentation de 50 % des débits pompés dans la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale. Cette observation est la conséquence du fait que le volume total prélevé annuellement par les puits est d'un ordre de deux ordres de grandeurs inférieur aux débits drainés par, d'une part, la galerie Vivaqua et la Woluwe, et d'autre part, les collecteurs.

Vu les incertitudes évaluées sur le **SCÉNARIO N°4 (TABLEAU 7-4)** et dès lors que l'on peut considérer que ces incertitudes restent identiques dans le présent cas ; selon ce **SCÉNARIO N°5**, les débits sortants par ces trois exutoires sont :

- compris entre 1.2 et 1.7 Mm³/an pour la Galerie Vivaqua ;
- compris entre 1.6 et 2.5 Mm³/an pour les tronçons amont de la Woluwe ;
- compris entre 17 et 22 Mm³/an pour les collecteurs.

7.2.3.2.3 SCÉNARIO 6 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 100 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-16** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°6**.

La **FIGURE 7-17** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°6** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°1**.

Elle illustre donc le rabattement total lié à la diminution importante de la recharge et à l'augmentation de 100 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale.

La **FIGURE 7-18** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°6** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°4**. Elle illustre donc le rabattement lié à l'augmentation de 100 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale dans ce contexte de recharge faible.

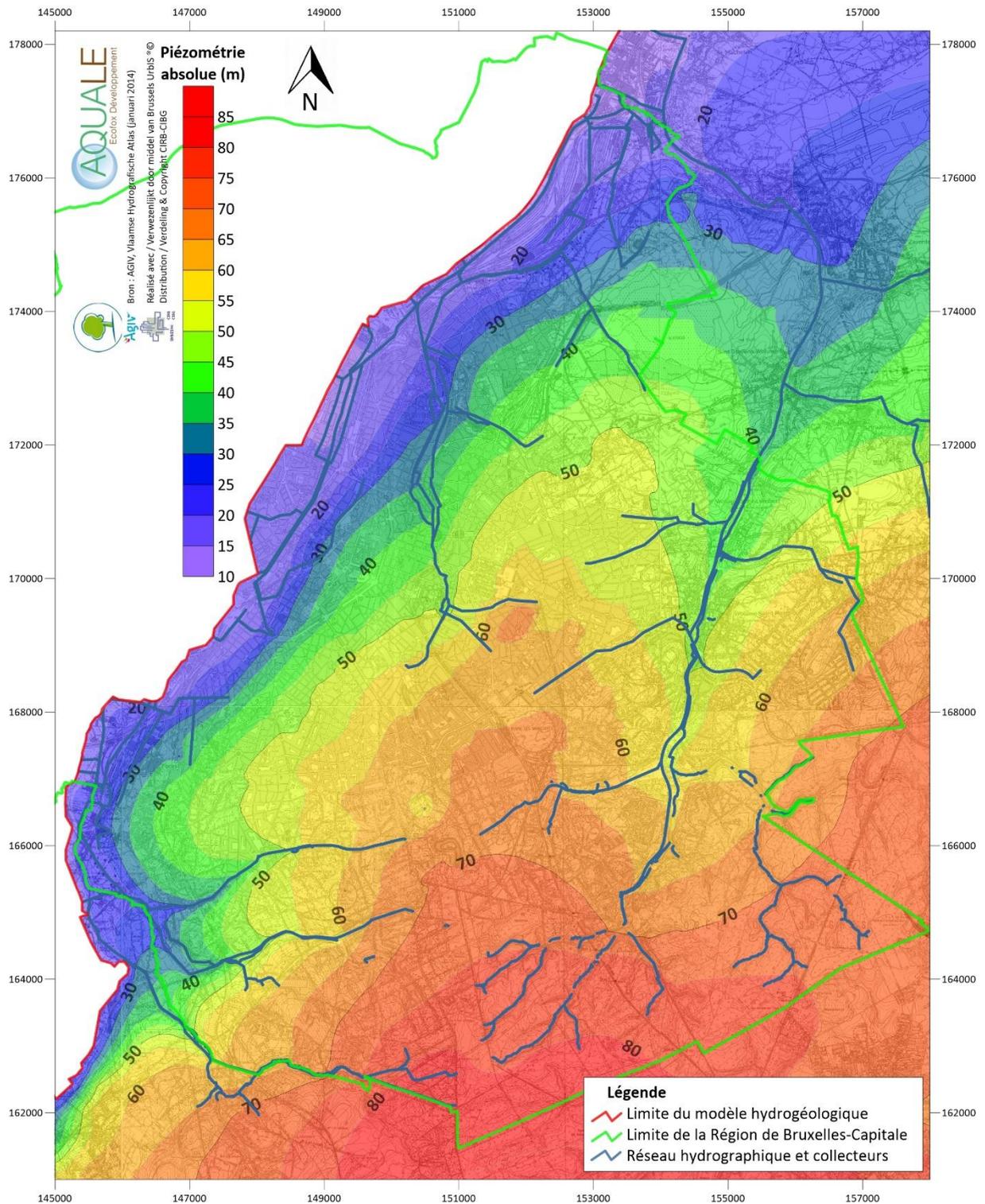


Figure 7-16 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°6

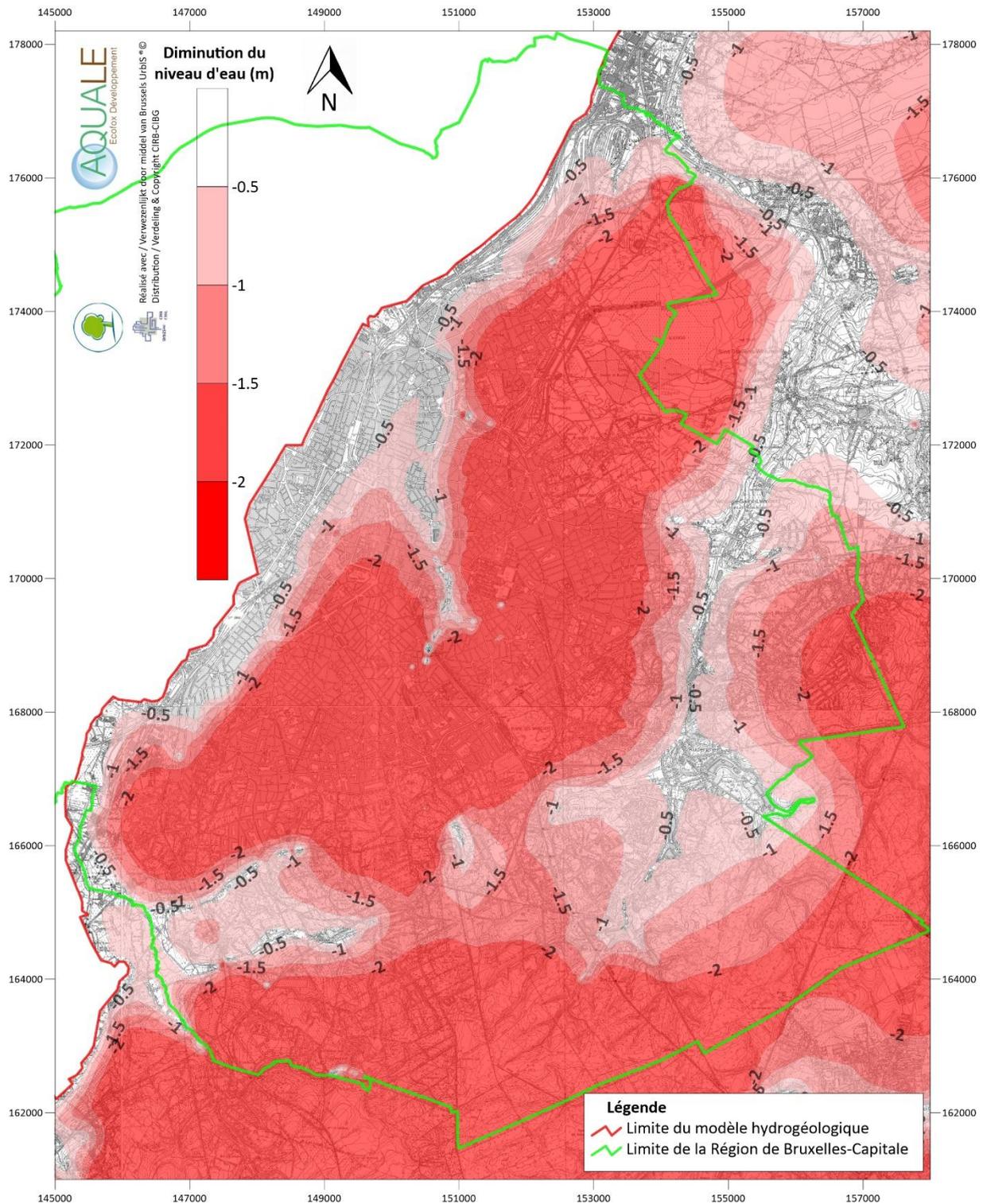


Figure 7-17 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°6

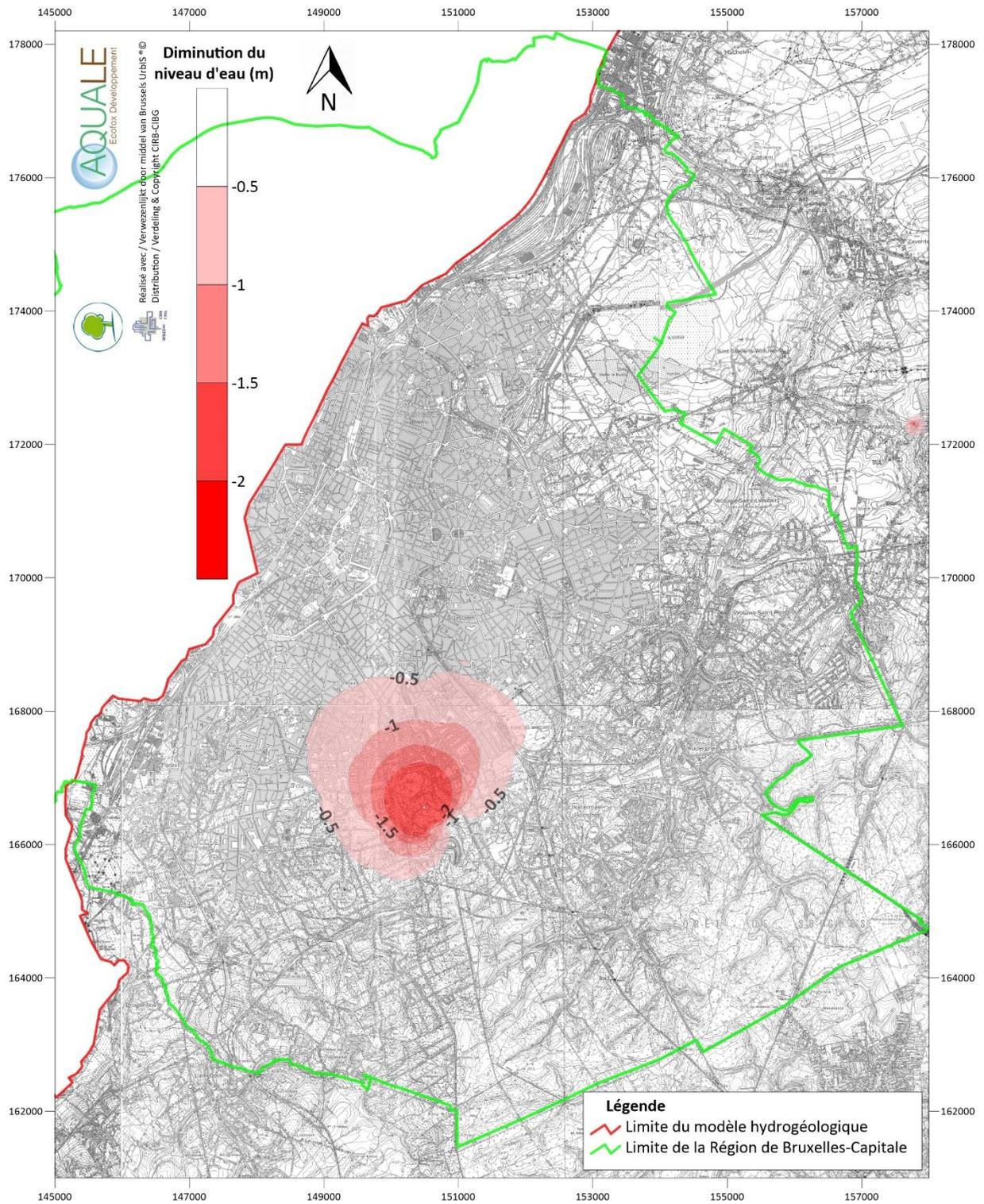


Figure 7-18 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°4 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°6

Il apparaît sur la **FIGURE 7-16** qu'il n'y a *a priori* pas de modifications visibles par rapport aux **SCÉNARIO N°4 et 5**.

Les **FIGURES 7-17 et 7-18** sont intéressantes pour estimer les impacts cumulés de l'infiltration faible et de l'augmentation de 100 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale sur le niveau de la nappe. Ces figures indiquent que, par rapport au **SCÉNARIO N°1**, cette augmentation du débit prélevé aurait une incidence mineure et surtout très localisée sur le niveau de la *nappe du Bruxellien*. L'impact est globalement le même que dans le cas d'une infiltration moyenne, soit un rabattement autour du point de prélèvement principal qu'est le champ captant Vivaqua. Pour le reste, le rabattement lié à la diminution d'infiltration est clairement nettement plus impactant.

En ce qui concerne les débits de sortie en Région de Bruxelles-Capitale, ce **SCÉNARIO N°6** donne les estimations suivantes :

- la Galerie Vivaqua : 1.4 Mm³/an (soit une diminution d'environ 36 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les tronçons amont de la Woluwe : environ 2.2 Mm³ (soit une diminution d'environ 35 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les collecteurs : environ 20 Mm³ (soit une diminution d'environ 21 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

Il n'y a pas de variation importante par rapport au **SCÉNARIO N°4**, nouvelle preuve de l'impact faible des puits de pompage.

Ce **SCÉNARIO N°6** tend à démontrer que :

- dans des conditions d'infiltration très faible, le niveau d'eau général de la nappe serait assez peu impacté en cas d'augmentation de 100 % des débits pompés dans la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale ;
- cette première remarque n'est pas valable localement puisqu'en cas d'augmentation du débit de pompage (ou, *a fortiori*, en cas d'ajout d'un nouveau puits), le niveau d'eau diminuera plus ou moins fortement en fonction du débit mis en jeu ;
- dans des conditions d'infiltration très faible, le débit drainé par les collecteurs, la galerie Vivaqua et le réseau hydrographique devrait diminuer très légèrement (de façon négligeable) en cas d'augmentation de 100 % des débits pompés dans la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale. Cette observation est la conséquence du fait que le volume total prélevé annuellement par les puits est d'un voire de deux ordres de grandeurs inférieur aux débits drainés par, d'une part, la galerie Vivaqua et la Woluwe, et d'autre part, les collecteurs.

Vu les incertitudes évaluées sur le **SCÉNARIO N°4 (TABLEAU 7-4)** et dès lors que l'on peut considérer que ces incertitudes restent identiques dans le présent cas ; selon ce **SCÉNARIO N°6**, les débits sortants par ces trois exutoires sont :

- compris entre 1.1 et 1.6 Mm³/an pour la Galerie Vivaqua ;
- compris entre 1.6 et 2.5 Mm³/an pour les tronçons amont de la Woluwe ;
- compris entre 17 et 22 Mm³/an pour les collecteurs.

7.2.3.3 SCÉNARII N°7 À 9 – RÉGIME TRANSITOIRE, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE PÉRIODE DE 5 ANNÉES DE RECHARGE ÉLEVÉE

7.2.3.3.1 SCÉNARIO 7 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE IDENTIQUE À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-19** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°7**.

La **FIGURE 7-20** présente l'augmentation du niveau piézométrique dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°7** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°1**.

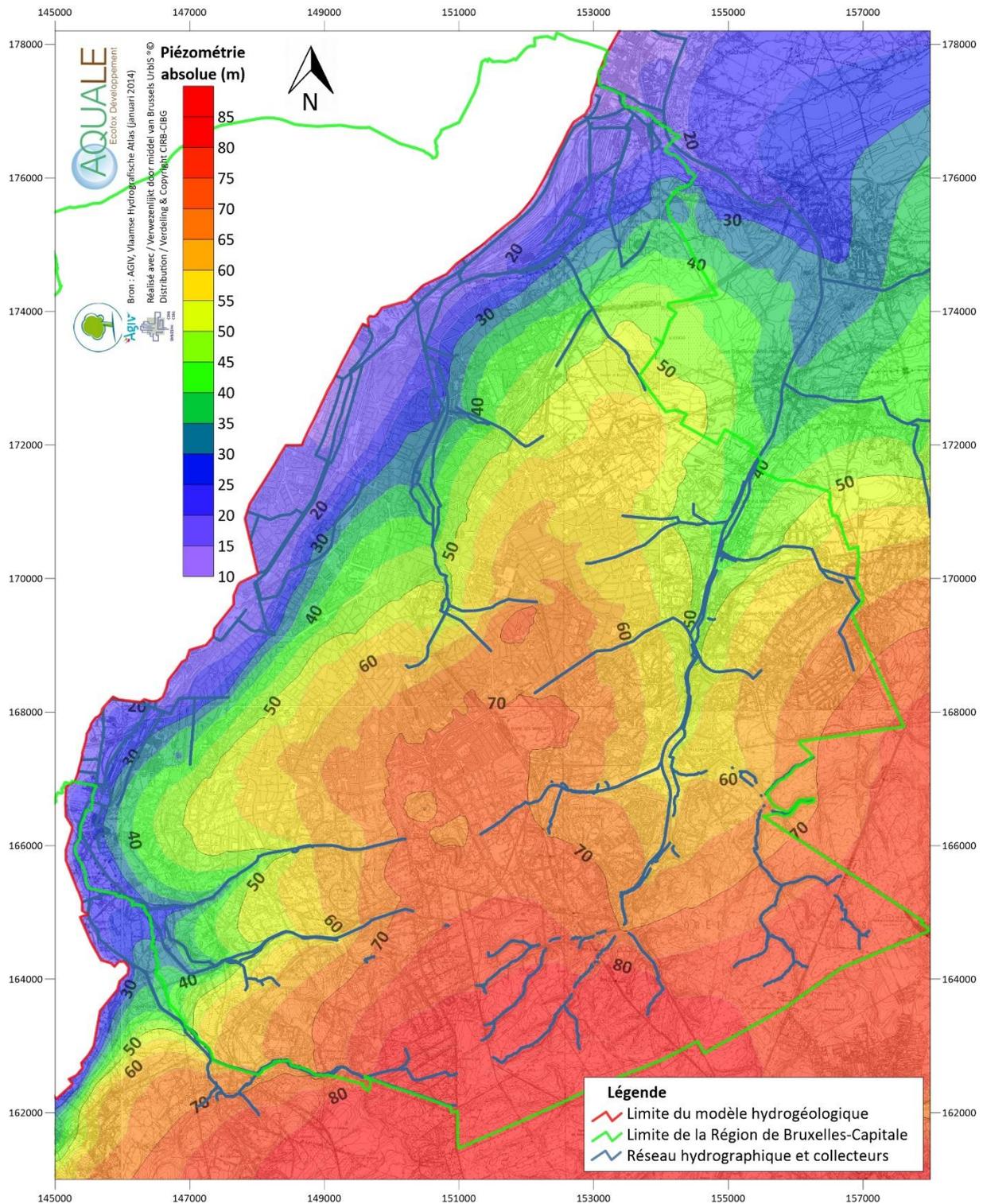


Figure 7-19 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°7

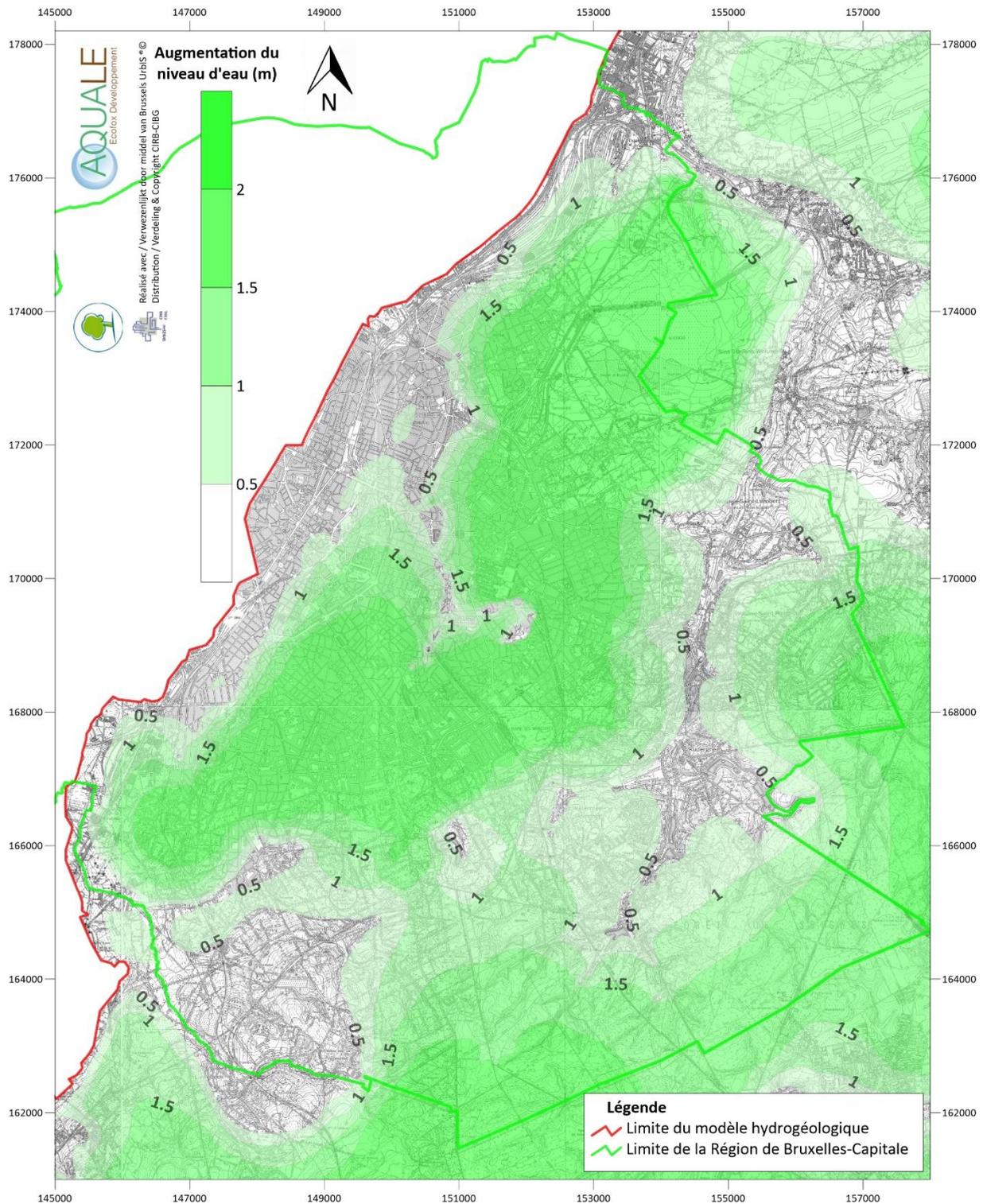


Figure 7-20 : Augmentation du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°7

Il apparaît sur la **FIGURE 7-19** que le niveau de la nappe diminue depuis le Sud vers le Nord et en direction des rivières et collecteurs. L'eau rentre dans la Région par la frontière Sud et accessoirement par la frontière Est et en sort par la Senne, la Woluwe, les collecteurs et accessoirement à travers la frontière Nord. Il n'y a a priori pas de modifications visibles par rapport au **SCÉNARIO N°1**.

La **FIGURE 7-20** est intéressante pour estimer l'impact de l'infiltration sur le niveau de la nappe. Cette figure indique que, par rapport au **SCÉNARIO N°1**, une infiltration élevée (augmentée de 25 %) entraîne une augmentation des niveaux d'eau de la nappe. La montée est assez faible dans les vallées de la Senne et de la Woluwe puisque ces vallées agissent comme des drains. Elle atteint 2 m en dehors des vallées. Localement, elle atteint même 4 m en certaines zones plus éloignées des exutoires. Les observations réalisées sur les **FIGURES 7-2 et 7-3** ont démontré que le niveau d'eau dans les différents piézomètres a varié globalement avec une amplitude de 2 m durant les 25 dernières années. Ainsi, l'infiltration annuelle élevée imposée dans ce **SCÉNARIO N°7** permet de récupérer les niveaux d'eau élevés des périodes d'infiltration élevée (l'impact de cette recharge élevée est même probablement surestimé à cause de la sensibilité trop grande à l'infiltration).

En ce qui concerne les débits de sortie en Région de Bruxelles-Capitale, ce **SCÉNARIO N°7** donne les estimations suivantes :

- la Galerie Vivaqua : 2.7 Mm³/an (soit une augmentation d'environ 23 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les tronçons amont de la Woluwe : environ 4.4 Mm³ (soit une augmentation d'environ 33 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les collecteurs : environ 31 Mm³ (soit une augmentation d'environ 19 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

Les débits de sortie augmentent forcément avec l'augmentation du débit d'entrée.

Ce **SCÉNARIO N°7** tend à démontrer que :

- dans des conditions d'infiltration très élevée, le niveau d'eau de la nappe devrait augmenter en Région de Bruxelles-Capitale et ainsi atteindre les niveaux les plus hauts mesurés ;
- dans des conditions d'infiltration très élevée, le débit drainé par les collecteurs, la galerie Vivaqua et le réseau hydrographique devrait augmenter (proportionnellement à l'augmentation d'infiltration, voire plus comme dans le cas des tronçons amont de la Woluwe).

Les **SCÉNARIOS N°8 et N°9** seront étudiés en comparant leurs résultats aux résultats du **SCÉNARIO N°1**. L'impact cumulé d'une période de recharge très élevée et de l'augmentation des volumes prélevés par les puits de captage apparaîtra dès lors de manière évidente.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.6**, à savoir :

- **cas A** : infiltration x 1.05 et conductivité hydraulique x 0.85 ;
- **cas B** : infiltration x 1.03 et conductivité hydraulique x 1.32 ;
- **cas C** : infiltration x 0.86 et conductivité hydraulique x 1.08 ;
- **cas D** : infiltration x 0.88 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le **TABLEAU 7-5** ci-dessous reprend les variations des débits sortant par la Galerie Vivaqua, les tronçons amont de la Woluwe et les collecteurs pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Galerie Vivaqua	+ 12 %	- 11 %	- 17 %	+ 1 %	[- 17 à + 12 %]
Tronçons amont de la Woluwe	+ 10 %	- 4 %	- 20 %	- 10 %	[- 20 à + 10 %]
Collecteurs	+ 1 %	+ 10 %	- 10 %	- 16 %	[- 16 à + 10 %]

Tableau 7-5 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°7

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°7**, les débits sortants par ces trois exutoires sont :

- compris entre 2.2 et 3.0 Mm³/an pour la Galerie Vivaqua ;
- compris entre 3.5 et 4.8 Mm³/an pour les tronçons amont de la Woluwe ;
- compris entre 26 et 34 Mm³/an pour les collecteurs.

7.2.3.3.2 SCÉNARIO 8 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 50 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-21** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°8**.

La **FIGURE 7-22** présente l'augmentation du niveau piézométrique dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°8** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°1**. Elle illustre donc l'augmentation du niveau de la nappe liée à l'augmentation importante de la recharge et à l'augmentation de 50 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale.

La **FIGURE 7-23** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°8** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°7**. Elle illustre donc le rabattement lié à l'augmentation de 50 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale dans ce contexte de recharge élevée.

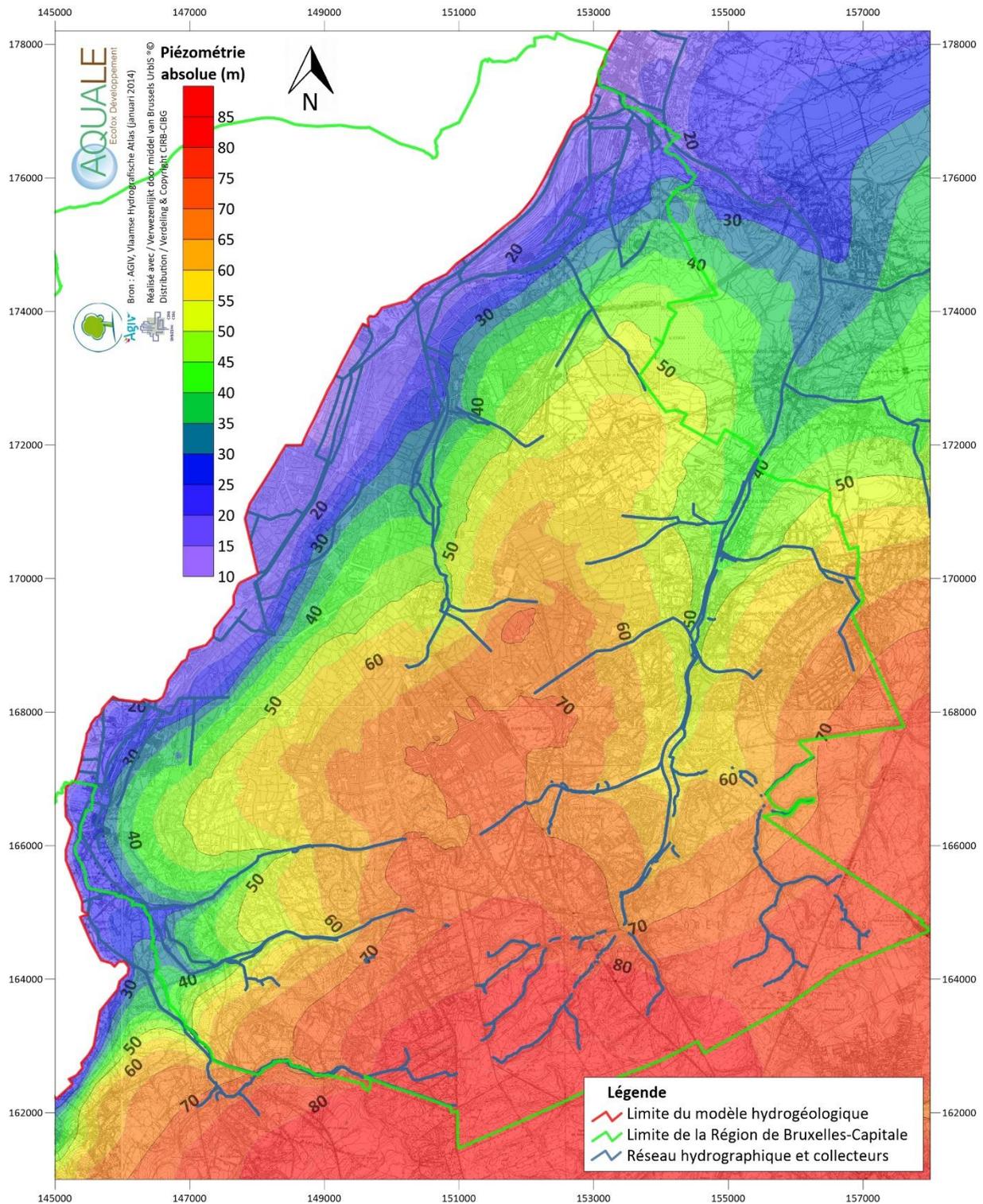


Figure 7-21 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°8

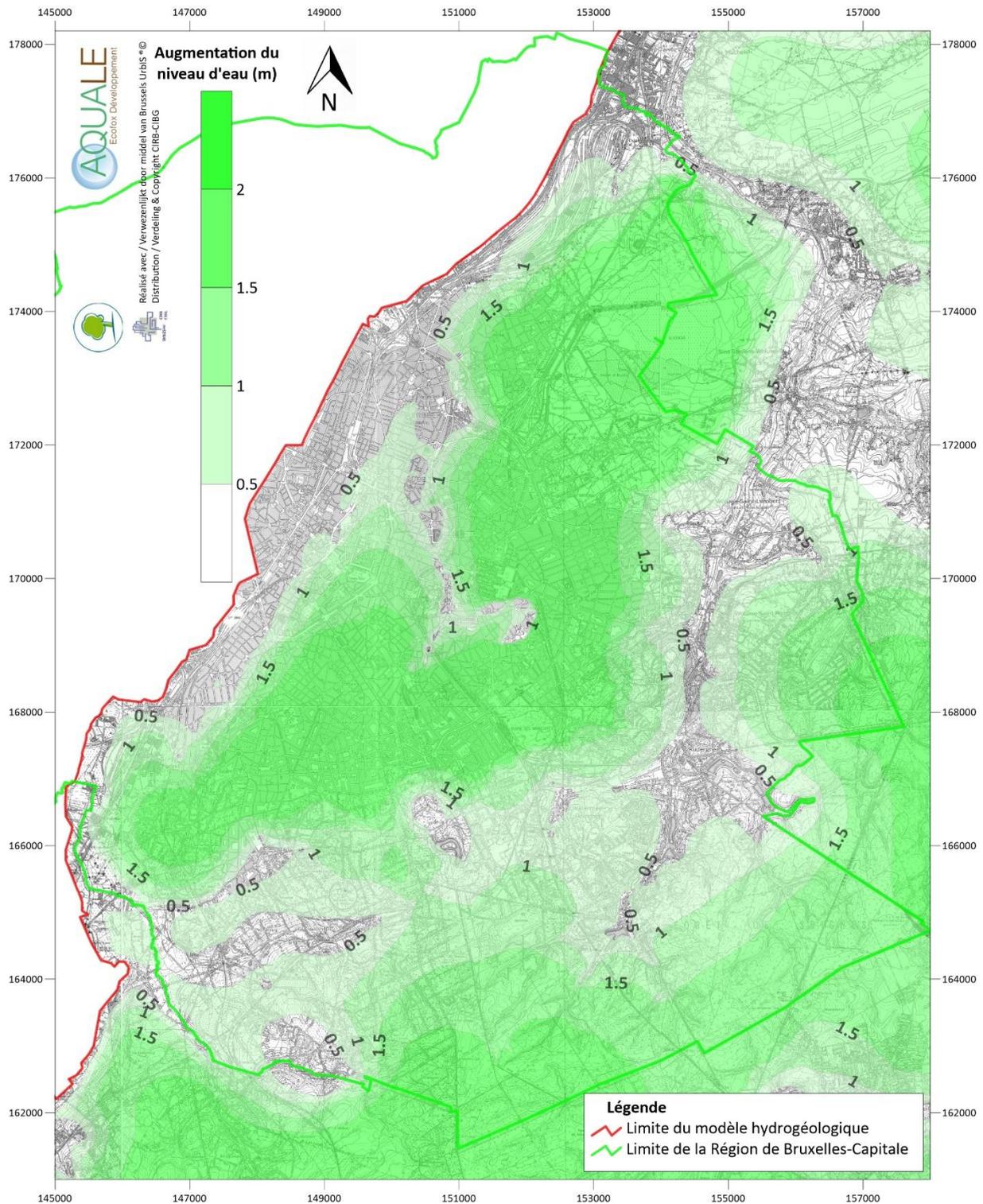


Figure 7-22 : Augmentation du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°8

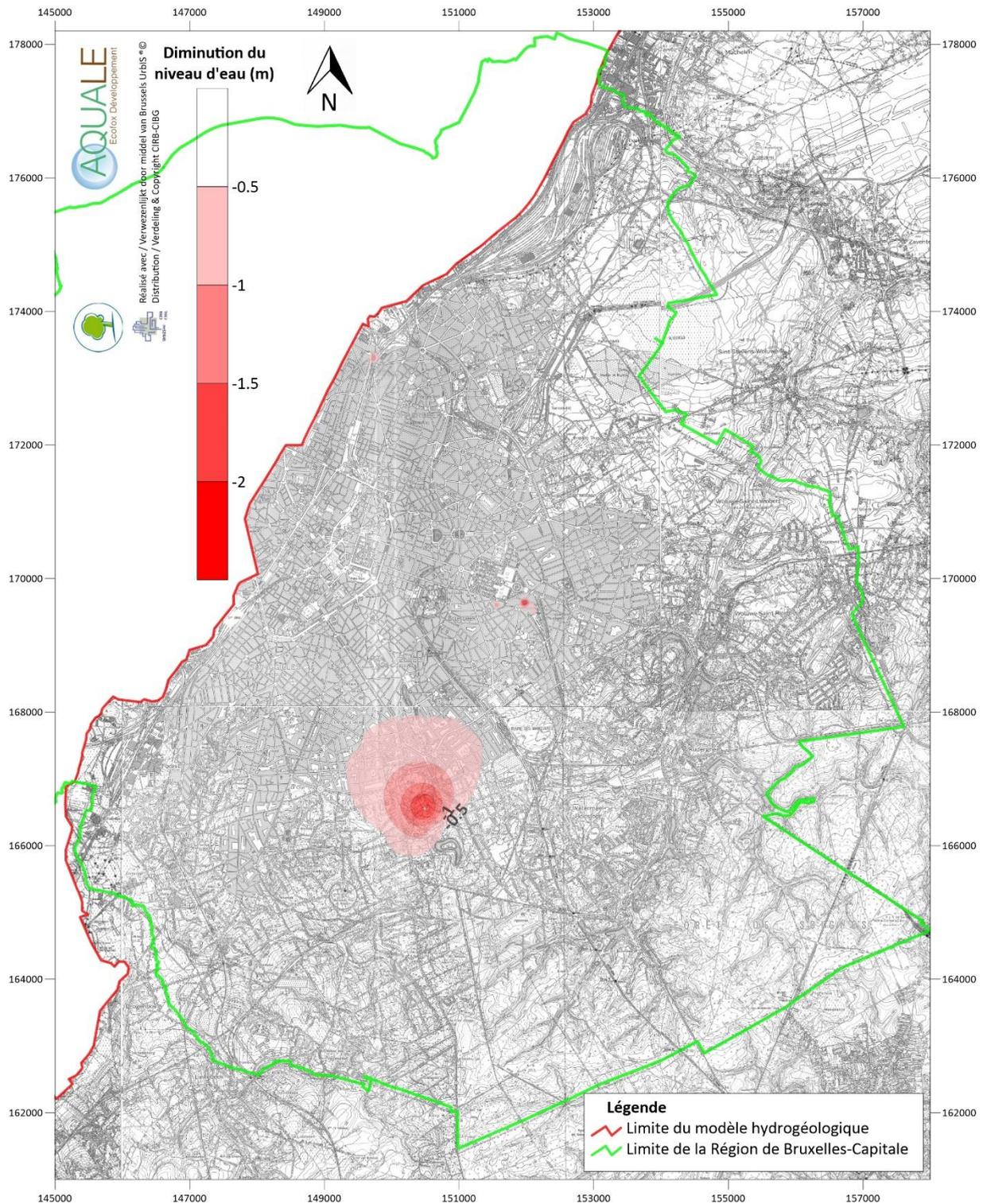


Figure 7-23 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°7 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°8

Il apparaît sur la **FIGURE 7-21** qu'il n'y a *a priori* pas de modifications visibles par rapport au **SCÉNARIO N°7**.

Les **FIGURES 7-22 et 7-23** sont intéressantes pour estimer les impacts cumulés de l'infiltration élevée et de l'augmentation de 50 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale sur le niveau de la nappe. Ces figures indiquent que, par rapport au **SCÉNARIO N°1**, cette augmentation du débit prélevé aurait une incidence mineure et surtout très localisée sur le niveau de la *nappe du Bruxellien*. L'impact est globalement le même que dans le cas des infiltrations moyenne et faible, soit un rabattement autour du point de prélèvement principal qu'est le champ captant Vivaqua. Pour le reste, l'augmentation du niveau d'eau liée à l'augmentation d'infiltration est clairement nettement plus importante.

En ce qui concerne les débits de sortie en Région de Bruxelles-Capitale, ce **SCÉNARIO N°8** donne les estimations suivantes :

- la Galerie Vivaqua : 2.6 Mm³/an (soit une augmentation d'environ 18 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les tronçons amont de la Woluwe : environ 4.4 Mm³ (soit une augmentation d'environ 33 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les collecteurs : environ 31 Mm³ (soit une augmentation d'environ 19 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

Il n'y a pas de variation importante par rapport au **SCÉNARIO N°7**, nouvelle preuve de l'impact faible des puits de pompage.

Ce **SCÉNARIO N°8** tend à démontrer que :

- dans des conditions d'infiltration très élevée, le niveau d'eau général de la nappe serait assez peu impacté en cas d'augmentation de 50 % des débits pompés dans la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale ;
- cette première remarque n'est pas valable localement puisqu'en cas d'augmentation du débit de pompage (ou, *a fortiori*, en cas d'ajout d'un nouveau puits), le niveau d'eau diminuera plus ou moins fortement en fonction du débit mis en jeu ;
- dans des conditions d'infiltration très élevée, le débit drainé par les collecteurs, la galerie Vivaqua et le réseau hydrographique devrait diminuer très légèrement (de façon négligeable) en cas d'augmentation de 50 % des débits pompés dans la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale. Cette observation est la conséquence du fait que le volume total prélevé annuellement par les puits est d'un ordre de deux ordres de grandeurs inférieur aux débits drainés par, d'une part, la galerie Vivaqua et la Woluwe, et d'autre part, les collecteurs.

Vu les incertitudes évaluées sur le **SCÉNARIO N°7 (TABLEAU 7-5)** et dès lors que l'on peut considérer que ces incertitudes restent identiques dans le présent cas ; selon ce **SCÉNARIO N°8**, les débits sortants par ces trois exutoires sont :

- compris entre 2.2 et 2.9 Mm³/an pour la Galerie Vivaqua ;
- compris entre 3.5 et 4.8 Mm³/an pour les tronçons amont de la Woluwe ;
- compris entre 26 et 34 Mm³/an pour les collecteurs.

7.2.3.3.3 SCÉNARIO 9 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 100 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

La **FIGURE 7-24** présente la piézométrie absolue dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°9**.

La **FIGURE 7-25** présente l'augmentation du niveau piézométrique dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°9** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°1**. Elle illustre donc l'augmentation du niveau de la nappe liée à l'augmentation importante de la recharge et à l'augmentation de 100 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale.

La **FIGURE 7-26** présente la diminution du niveau piézométrique dans la *nappe du Buxellien* en Région de Bruxelles-Capitale dans le cas du **SCÉNARIO N°9** par rapport au niveau de la nappe dans le cas du **SCÉNARIO N°7**. Elle illustre donc le rabattement lié à l'augmentation de 100 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale dans ce contexte de recharge élevée.

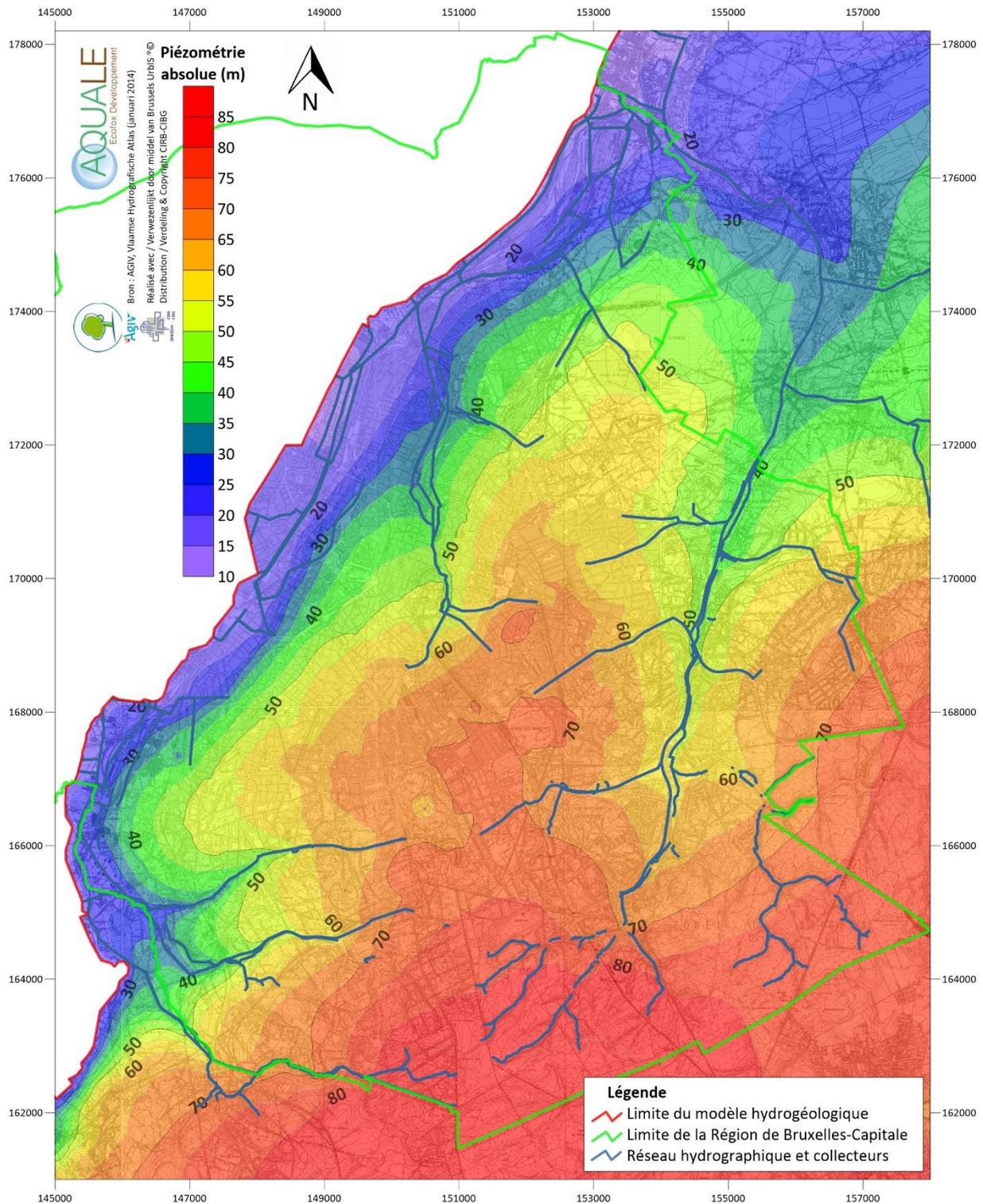


Figure 7-24 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°9

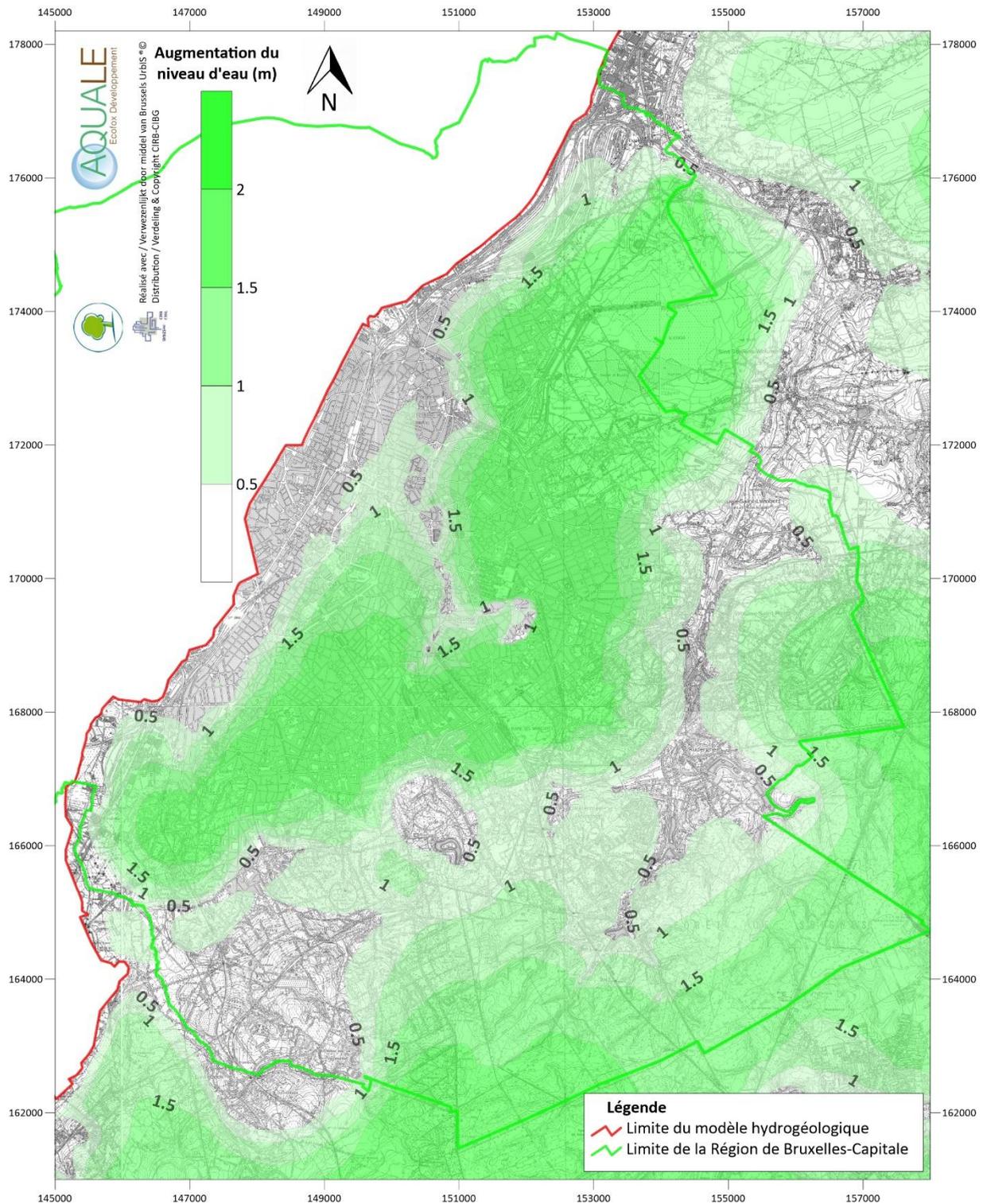


Figure 7-25 : Augmentation du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°9

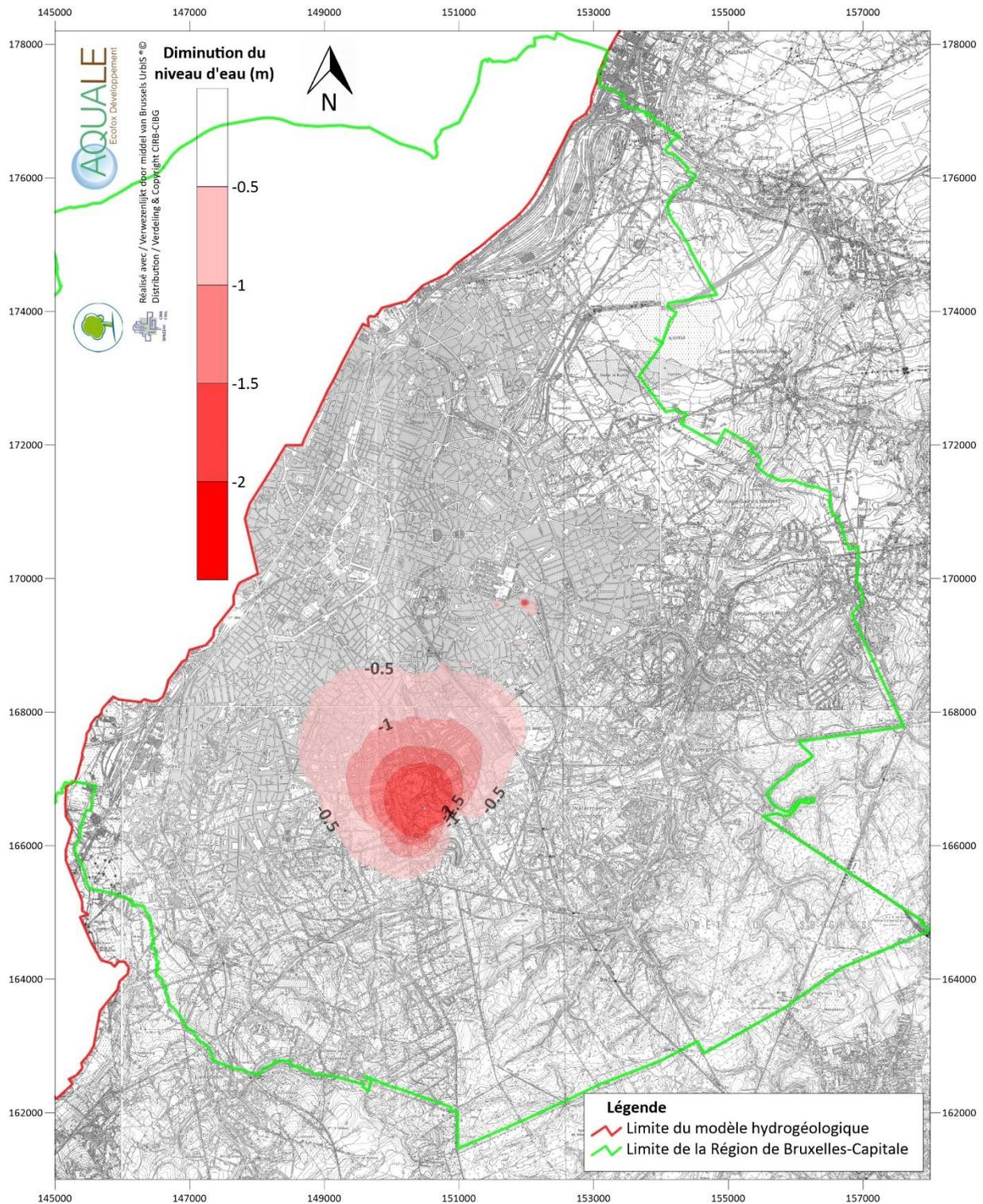


Figure 7-26 : Diminution du niveau d'eau de la nappe du Bruxellien par rapport au niveau de référence du scénario n°7 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°9

Il apparaît sur la **FIGURE 7-24** qu'il n'y a *a priori* pas de modifications visibles par rapport aux **SCÉNARII N°7 et 8**.

Les **FIGURES 7-25 et 7-26** sont intéressantes pour estimer les impacts cumulés de l'infiltration élevée et de l'augmentation de 100 % du débit des puits en Région de Bruxelles-Capitale sur le niveau de la nappe. Ces figures indiquent que, par rapport au **SCÉNARIO N°1**, cette augmentation du débit prélevé aurait une incidence mineure et surtout très localisée sur le niveau de la *nappe du Bruxellien*. L'impact est globalement le même que dans le cas des infiltrations moyenne et faible, soit un rabattement autour du point de prélèvement principal qu'est le champ captant Vivaqua. Pour le reste, l'augmentation de niveau d'eau liée à l'augmentation d'infiltration est clairement nettement plus importante.

En ce qui concerne les débits de sortie en Région de Bruxelles-Capitale, ce **SCÉNARIO N°9** donne les estimations suivantes :

- la Galerie Vivaqua : 2.5 Mm³/an (soit une augmentation d'environ 18 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les tronçons amont de la Woluwe : environ 4.4 Mm³ (soit une augmentation d'environ 33 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- les collecteurs : environ 31 Mm³ (soit une augmentation d'environ 19 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

Il n'y a pas de variation importante par rapport au **SCÉNARIO N°7**, nouvelle preuve de l'impact faible des puits de pompage.

Ce **SCÉNARIO N°9** tend à démontrer que :

- dans des conditions d'infiltration très élevée, le niveau d'eau général de la nappe serait assez peu impacté en cas d'augmentation de 100 % des débits pompés dans la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale ;
- cette première remarque n'est pas valable localement puisqu'en cas d'augmentation du débit de pompage (ou, *a fortiori*, en cas d'ajout d'un nouveau puits), le niveau d'eau diminuera plus ou moins fortement en fonction du débit mis en jeu ;
- dans des conditions d'infiltration très élevée, le débit drainé par les collecteurs, la galerie Vivaqua et le réseau hydrographique devrait diminuer très légèrement (de façon négligeable) en cas d'augmentation de 100 % des débits pompés dans la *nappe du Bruxellien* en Région de Bruxelles-Capitale. Cette observation est la conséquence du fait que le volume total prélevé annuellement par les puits est d'un ordre de deux ordres de grandeurs inférieur aux débits drainés par, d'une part, la galerie Vivaqua et la Woluwe, et d'autre part, les collecteurs.

Vu les incertitudes évaluées sur le **SCÉNARIO N°7 (TABLEAU 7-5)** et dès lors que l'on peut considérer que ces incertitudes restent identiques dans le présent cas ; selon ce **SCÉNARIO N°9**, les débits sortants par ces trois exutoires sont :

- compris entre 2.1 et 2.8 Mm³/an pour la Galerie Vivaqua ;
- compris entre 3.5 et 4.8 Mm³/an pour les tronçons amont de la Woluwe ;
- compris entre 26 et 34 Mm³/an pour les collecteurs.

7.2.4 SYNTHÈSE

Pour estimer les ressources disponibles, l'évolution des débits drainés naturellement en Région de Bruxelles-Capitale ainsi que l'évolution des niveaux d'eau de la *nappe du Bruxellien* ont été étudiées pour différents scénarii. Ces scénarii considèrent une infiltration variable (faible, moyenne et élevée) ainsi qu'un prélèvement

par puits de pompage variable (identique à 2013, augmenté de 50 % par rapport à 2013 et augmenté de 100 % par rapport à 2013).

Le **TABLEAU 7-6** ci-après reprend une synthèse des estimations données au sein du **CHAPITRE 7.2**.

Le contexte piézométrique bas est identique aux périodes basses observées depuis que le monitoring automatique est mis en œuvre, à savoir au maximum 2 – 3 mètres sous le niveau piézométrique moyen. Le contexte piézométrique haut est, à l'inverse, 2 – 3 mètres au-dessus du niveau piézométrique moyen.

	Contexte piézométrique	Débit drainé par la galerie Vivaqua (Mm ³ /an)	Débit drainé par les collecteurs (Mm ³ /an)	Débit drainé par les tronçons amont de la Woluwe (Mm ³ /an)	Débit prélevé par les puits en Région de Bruxelles-Capitale (Mm ³ /an)
SCÉNARIO N°1	moyen	1.7 à 2.5	22 à 28	2.5 à 3.6	0.4
SCÉNARIO N°2		1.6 à 2.4			0.6
SCÉNARIO N°3		1.5 à 2.3			0.8
SCÉNARIO N°4	bas	1.2 à 1.7	17 à 22	1.6 à 2.5	0.4
SCÉNARIO N°5		1.1 à 1.6			0.6
SCÉNARIO N°6					0.8
SCÉNARIO N°7	élevé	2.2 à 3.0	26 à 34	3.5 à 4.8	0.4
SCÉNARIO N°8		2.2 à 2.9			0.6
SCÉNARIO N°9		2.1 à 2.8			0.8

Tableau 7-6 : Synthèse des évaluations des ressources pour les 9 scénarii

Ces différents scénarii ont démontré que le niveau d'eau de la nappe est principalement gouverné par la recharge. Dès lors que les dernières années sont caractéristiques d'une recharge assez faible et que le suivi à long terme illustre une cyclicité récurrente entre des périodes de recharge faible et des périodes de recharge élevée, il peut être supposé que l'on se dirige vers une remontée progressive du niveau de la nappe.

La période actuelle est jugée particulièrement basse dès lors qu'une période de recharge modérée (2009 – 2013) a succédé à une période de recharge très faible (2005 – 2008).

Bien que la sensibilité du modèle à l'infiltration soit jugée un peu trop élevée, le modèle est capable de reproduire différents contextes de recharge. Il apparaît, à travers ces différents scénarii, que l'impact d'une augmentation des débits de pompage par les puits aura un effet similaire dans les différents contextes de recharge. Ainsi, il peut être jugé que les ressources disponibles actuellement (et *a fortiori* durant les prochaines années) ne risquent pas d'être mises à mal par une augmentation du débit des puits.

Au final, la présentation des résultats des 9 scénarii semble un peu redondante et répétitive. Cela est dû au fait que les **SCÉNARII N°2 et 3, 5 et 6, 8 et 9** diffèrent des **SCÉNARII N°1, 4 et 7** uniquement du point de vue des débits des puits en Région de Bruxelles-Capitale et ceux-ci sont peu impactants.

Enfin, bien que des incertitudes existent sur les niveaux d'eau comme sur les débits sortant, il peut être conclu que l'exploitation actuelle de la nappe en Région de Bruxelles-Capitale est durable et que les ressources disponibles sont suffisantes par rapport au niveau d'exploitation.

7.3 QUANTIFICATION DES ÉCHANGES AVEC LA RÉGION FLAMANDE

Les 9 mêmes scénarii sont étudiés dans le cadre de la quantification des échanges avec la Région Flamande.

L'estimation concerne le flux d'eau souterraine passant entre la Région de Bruxelles-Capitale et la Région Flamande et au sein de la *nappe du Bruxellien*.

Pour chaque scénario, le débit total entrant, le débit total sortant ainsi que la balance globale sont évalués. Les zones de flux entrant et sortant sont également identifiées.

7.3.1 SIMULATIONS

7.3.1.1 SCÉNARIO N°1 À 3 – RÉGIME PERMANENT, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE SITUATION MOYENNE

7.3.1.1.1 SCÉNARIO 1 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE IDENTIQUE À CELUI DE 2013

Selon le **SCÉNARIO N°1**, les flux estimés sont les suivants :

- flux entrant : 6.7 Mm³/an ;
- flux sortant : 2.8 Mm³/an ;
- balance globale : 3.9 Mm³/an entrant dans la Région de Bruxelles-Capitale.

La **FIGURE 7-27** illustre les lignes de flux à travers la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la *nappe du Bruxellien*. Sur cette figure, plus les lignes de flux sont longues, plus le chemin parcouru en 5 années est grand et plus la vitesse d'écoulement est grande.

Il apparaît très clairement que les flux entrants principaux sont situés :

- le long de la frontière Sud et, en particulier, en amont de la galerie Vivaqua ;
- le long de la frontière Est.

Les flux sortants principaux sont situés le long de la frontière Nord.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.6**, à savoir :

- **cas A** : infiltration x 1.05 et conductivité hydraulique x 0.85 ;
- **cas B** : infiltration x 1.03 et conductivité hydraulique x 1.32 ;
- **cas C** : infiltration x 0.86 et conductivité hydraulique x 1.08 ;
- **cas D** : infiltration x 0.88 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le **TABLEAU 7-7** ci-dessous reprend les variations des débits sortant et entrant et de la balance globale pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Flux entrant	- 7 %	+ 16 %	- 3 %	- 22 %	[- 22 à + 16 %]
Flux sortant	- 7 %	+ 18 %	+ 0 %	- 25 %	[- 25 à + 18 %]
Balance globale	- 8 %	+ 15 %	- 3 %	- 21 %	[- 21 à + 15 %]

Tableau 7-7 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°1

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°1**, les flux sont :

- compris entre 5.2 et 7.8 Mm³/an pour les flux entrants ;
- compris entre 2.1 et 3.3 Mm³/an pour les flux sortants ;
- compris entre 3.1 et 4.5 Mm³/an pour la balance globale.

Comme au **CHAPITRE 7.2**, l'incertitude évaluée sur le **SCÉNARIO N°1** sera considérée comme représentative de l'incertitude également pour les **SCÉNARII N°2 et 3**.

De la même manière, l'incertitude évaluée sur le **SCÉNARIO N°4** sera considérée comme représentative de l'incertitude également pour les **SCÉNARII N°5 et 6**.

Enfin, l'incertitude évaluée sur le **SCÉNARIO N°7** sera considérée comme représentative de l'incertitude également pour les **SCÉNARII N°8 et 9**.

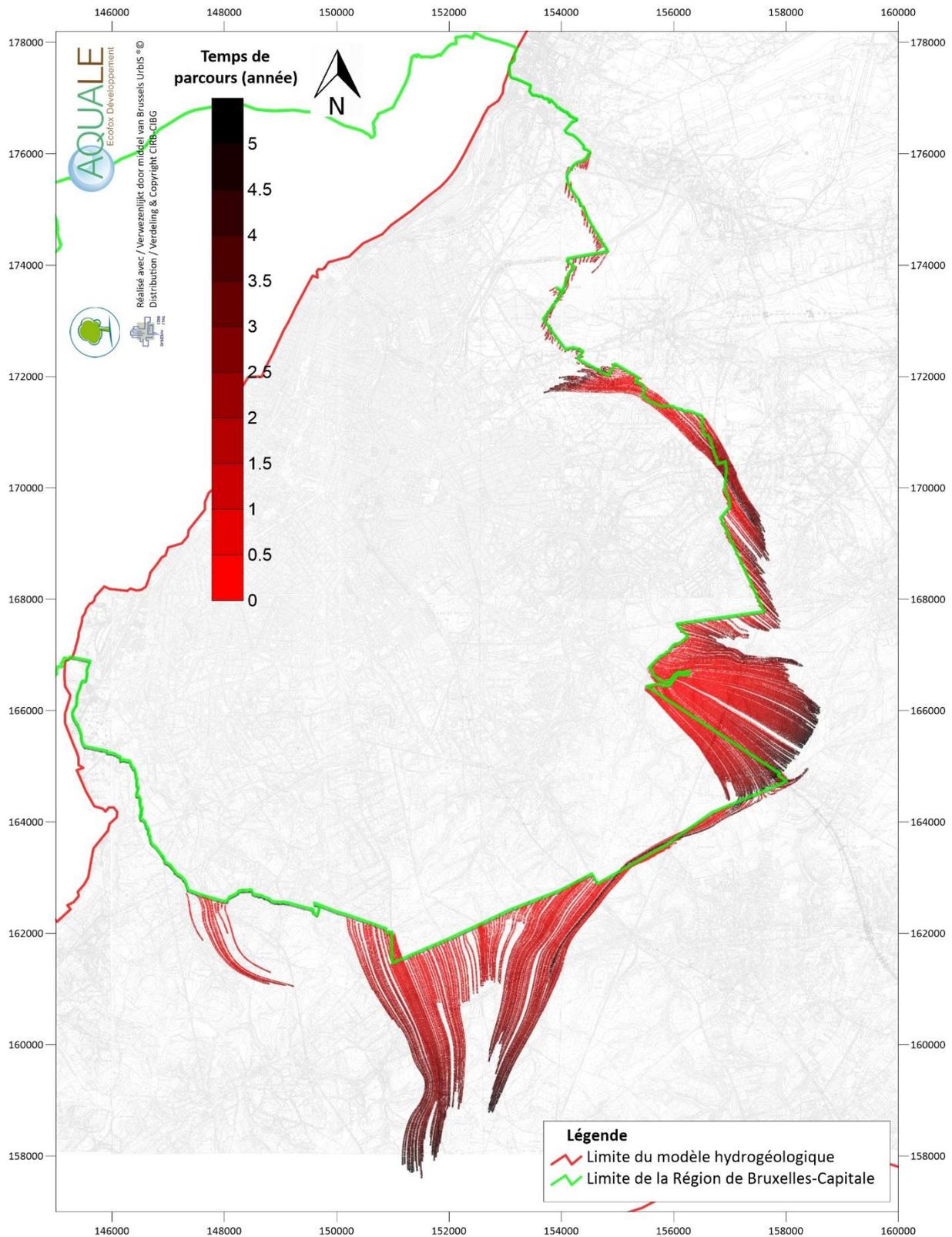


Figure 7-27 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Bruxellien selon le scénario n°1

7.3.1.1.2 SCÉNARIO 2 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 50 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

Selon le **SCÉNARIO N°2**, les flux estimés sont les suivants :

- flux entrant : 6.7 Mm³/an ;
- flux sortant : 2.8 Mm³/an ;
- balance globale : 3.9 Mm³/an entrant dans la Région de Bruxelles-Capitale.

Il n'y a aucun changement par rapport au **SCÉNARIO N°1**.

La **FIGURE 7-28** illustre les lignes de flux à travers la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la *nappe du Bruxellien*.

Il apparaît très clairement que les flux entrants principaux sont situés :

- le long de la frontière Sud et, en particulier, en amont de la galerie Vivaqua ;
- le long de la frontière Est.

Les flux sortants principaux sont situés le long de la frontière Nord.

Comme pour les débits, il n'y a aucun changement par rapport au **SCÉNARIO N°1**.

Compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°2** (comme pour le **SCÉNARIO N°1**), les flux sont :

- compris entre 5.2 et 7.8 Mm³/an pour les flux entrants ;
- compris entre 2.1 et 3.3 Mm³/an pour les flux sortants ;
- compris entre 3.1 et 4.5 Mm³/an pour la balance globale.

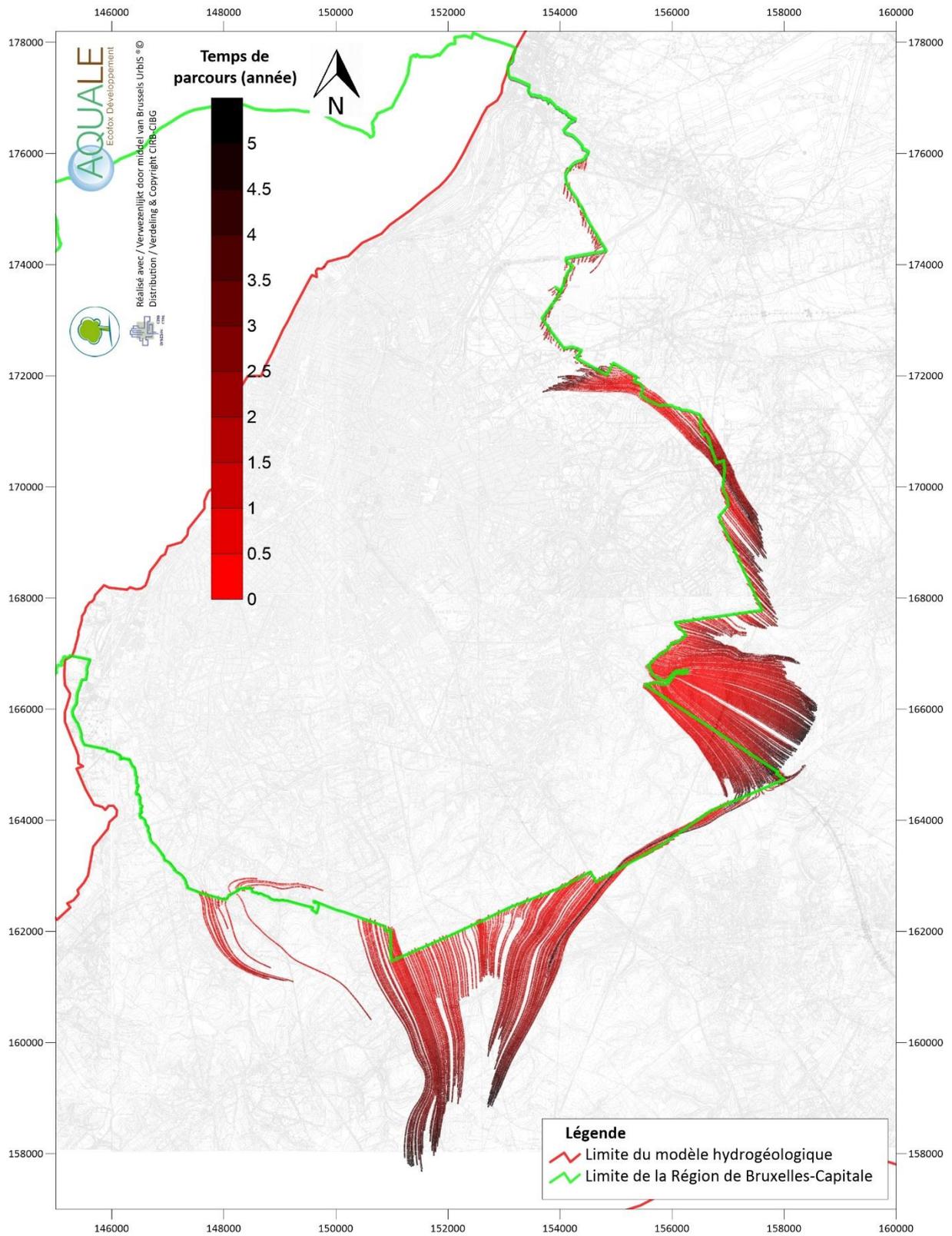


Figure 7-28 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Bruxellien selon le scénario n°2

7.3.1.1.3 SCÉNARIO 3 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 100 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

Selon le **SCÉNARIO N°3**, les flux estimés sont les suivants :

- flux entrant : 6.7 Mm³/an ;
- flux sortant : 2.8 Mm³/an ;
- balance globale : 3.9 Mm³/an.

Il n'y a aucun changement par rapport au **SCÉNARIO N°1**.

La **FIGURE 7-29** illustre les lignes de flux à travers la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la *nappe du Bruxellien*.

Il apparaît très clairement que les flux entrants principaux sont situés :

- le long de la frontière Sud et, en particulier, en amont de la galerie Vivaqua ;
- le long de la frontière Est.

Les flux sortants principaux sont situés le long de la frontière Nord.

Comme pour les débits, il n'y a aucun changement par rapport au **SCÉNARIO N°1**.

Compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°3** (comme pour le **SCÉNARIO N°1**), les flux sont :

- compris entre 5.2 et 7.8 Mm³/an pour les flux entrants ;
- compris entre 2.1 et 3.3 Mm³/an pour les flux sortants ;
- compris entre 3.1 et 4.5 Mm³/an pour la balance globale.

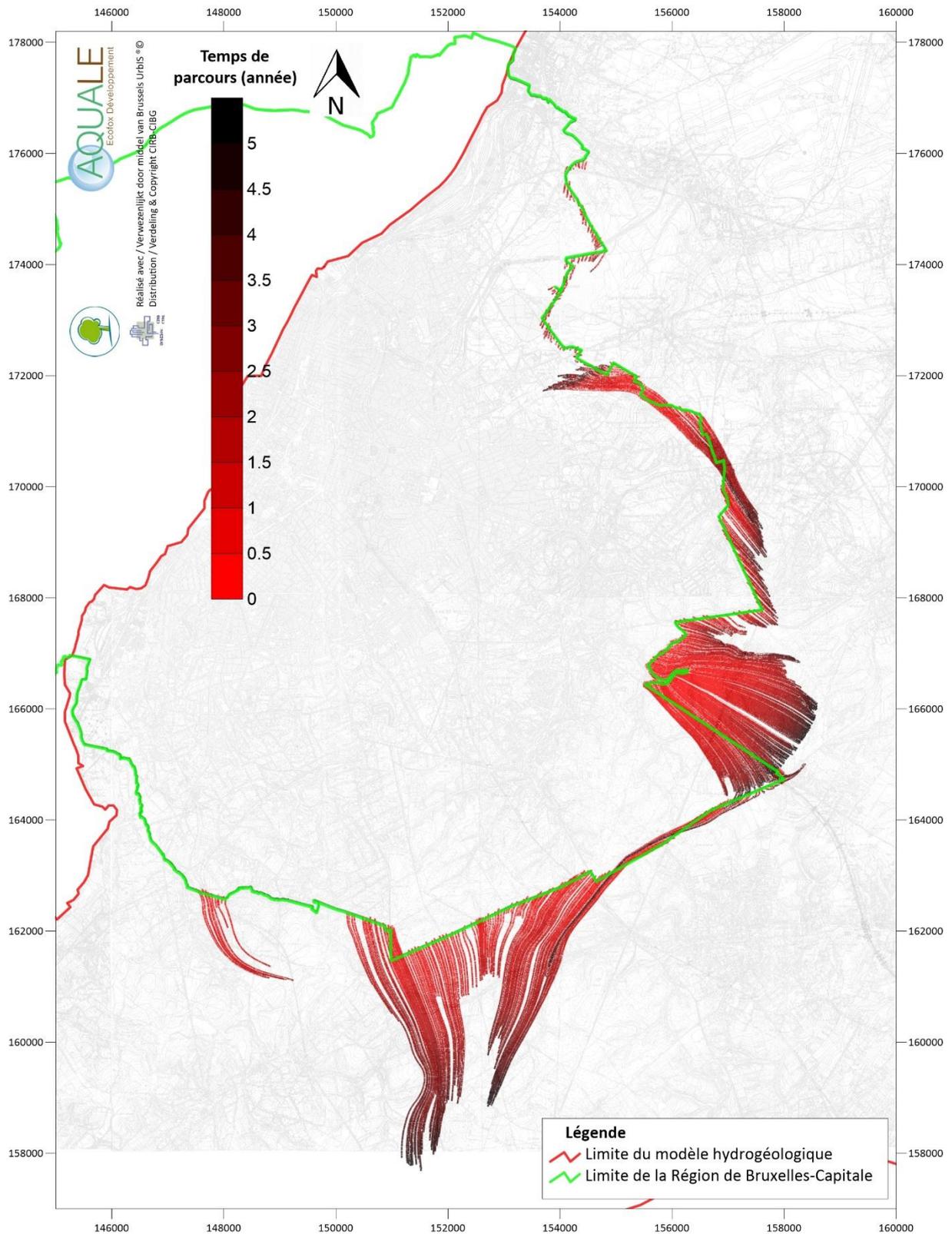


Figure 7-29 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Bruxellien selon le scénario n°3

7.3.1.1.4 REMARQUE SUR LES SCÉNARI

Etant donné que les résultats sont parfaitement identiques pour les **SCÉNARII N°1, 2 et 3**, il apparaît que l'influence de l'augmentation des débits des puits en Région de Bruxelles-Capitale n'impacte pas le flux traversant la frontière de la Région.

Ainsi, afin d'éviter de trop nombreuses répétitions, seuls les **SCÉNARII N°4 et 7** seront présentés dans la suite pour évaluer l'impact de recharges très faible et très élevée sur les flux à la frontière. Les résultats du **SCÉNARIO N°4** sont considérés comme valables pour les **SCÉNARII N°5 et 6**. Les résultats du **SCÉNARIO N°7** sont considérés comme valables pour les **SCÉNARII N°8 et 9**.

7.3.1.2 SCÉNARII N°4 À 6 – RÉGIME TRANSITOIRE, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE PÉRIODE DE 5 ANNÉES DE RECHARGE FAIBLE

Comme expliqué précédemment, seul le **SCÉNARIO N°4** est réalisé. Ses résultats sont considérés comme valables pour les **SCÉNARII N°5 et 6**.

Selon le **SCÉNARIO N°4**, les flux estimés sont les suivants :

- flux entrant : 6.0 Mm³/an (soit une diminution d'environ 10 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- flux sortant : 2.5 Mm³/an (soit une diminution d'environ 11 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- balance globale : 3.5 Mm³/an (soit une diminution d'environ 10 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

Une diminution de l'infiltration au droit de la Région de Bruxelles-Capitale mais également au droit des zones amont et aval provoque logiquement une diminution des flux souterrains entrant et sortant. Cette diminution est d'environ 10 %.

La **FIGURE 7-30** illustre les lignes de flux à travers la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la *nappe du Bruxellien*. Sur cette figure, plus les lignes de flux sont longues, plus le chemin parcouru en 5 années est grand et plus la vitesse d'écoulement est grande.

Il apparaît très clairement que les flux entrants principaux sont situés :

- le long de la frontière Sud et, en particulier, en amont de la galerie Vivaqua ;
- le long de la frontière Est.

Les flux sortants principaux sont situés le long de la frontière Nord.

Il y a très peu de changements par rapport au **SCÉNARIO N°1**. Les lignes de flux sont situées aux mêmes endroits mais leur orientation est très légèrement plus dirigée selon l'axe Sud-Nord.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.6**, à savoir :

- **cas A** : infiltration x 1.05 et conductivité hydraulique x 0.85 ;
- **cas B** : infiltration x 1.03 et conductivité hydraulique x 1.32 ;
- **cas C** : infiltration x 0.86 et conductivité hydraulique x 1.08 ;
- **cas D** : infiltration x 0.88 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le **TABLEAU 7-8** ci-dessous reprend les variations des débits sortant et entrant et de la balance globale pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Flux entrant	- 8 %	+ 20 %	+ 0 %	- 23 %	[- 23 à + 20 %]
Flux sortant	- 8 %	+ 20 %	+ 0 %	- 24 %	[- 24 à + 20 %]
Balance globale	- 9 %	+ 17 %	+ 0 %	- 23 %	[- 23 à + 17 %]

Tableau 7-8 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°4

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°4**, les flux sont :

- compris entre 4.6 et 7.2 Mm³/an pour les flux entrants ;
- compris entre 1.9 et 3.0 Mm³/an pour les flux sortants ;
- compris entre 2.7 et 4.1 Mm³/an pour la balance globale.

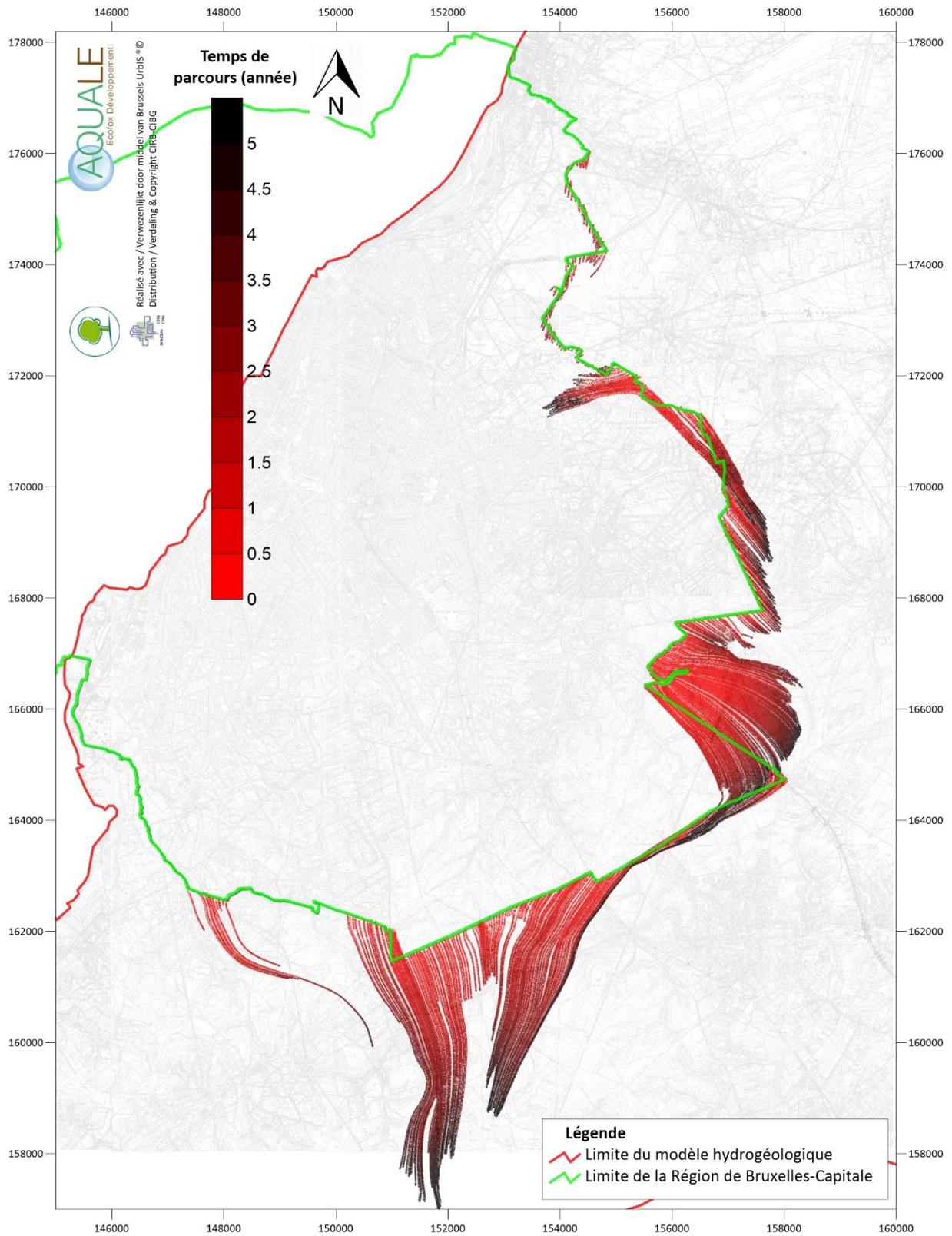


Figure 7-30 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Bruxellien selon le scénario n°4

7.3.1.3 SCÉNARIO N°7 À 9 – RÉGIME TRANSITOIRE, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE PÉRIODE DE 5 ANNÉES DE RECHARGE ÉLEVÉE

Comme expliqué précédemment, seul le **SCÉNARIO N°7** est réalisé. Ses résultats sont considérés comme valables pour les **SCÉNARIO N°8 et 9**.

Selon le **SCÉNARIO N°7**, les flux estimés sont les suivants :

- flux entrant : 7.2 Mm³/an (soit une augmentation d'environ 7 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- flux sortant : 3.1 Mm³/an (soit une augmentation d'environ 11 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- balance globale : 4.1 Mm³/an (soit une augmentation d'environ 5 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

Une augmentation de l'infiltration au droit de la Région de Bruxelles-Capitale mais également au droit des zones amont et aval provoque logiquement une augmentation des flux souterrains entrant et sortant. Cette augmentation est d'environ 5 % sur la balance globale.

La **FIGURE 7-31** illustre les lignes de flux à travers la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la *nappe du Bruxellien*. Sur cette figure, plus les lignes de flux sont longues, plus le chemin parcouru en 5 années est grand et plus la vitesse d'écoulement est grande.

Il apparaît très clairement que les flux entrants principaux sont situés :

- le long de la frontière Sud et, en particulier, en amont de la galerie Vivaqua ;
- le long de la frontière Est.

Les flux sortants principaux sont situés le long de la frontière Nord.

Il y a très peu de changements par rapport au **SCÉNARIO N°1**. Les lignes de flux sont situées aux mêmes endroits mais leur orientation est très légèrement différente.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.6**, à savoir :

- **cas A** : infiltration x 1.05 et conductivité hydraulique x 0.85 ;
- **cas B** : infiltration x 1.03 et conductivité hydraulique x 1.32 ;
- **cas C** : infiltration x 0.86 et conductivité hydraulique x 1.08 ;
- **cas D** : infiltration x 0.88 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le **TABLEAU 7-9** ci-dessous reprend les variations des débits sortant et entrant et de la balance globale pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Flux entrant	- 8 %	+ 19 %	- 1 %	- 23 %	[- 23 à + 19 %]
Flux sortant	- 8 %	+ 21 %	+ 0 %	- 24 %	[- 24 à + 21 %]
Balance globale	- 8 %	+ 17 %	+ 0 %	- 21 %	[- 21 à + 17 %]

Tableau 7-9 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°7

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°7**, les flux sont :

- compris entre 5.5 et 8.6 Mm³/an pour les flux entrants ;
- compris entre 2.4 et 3.8 Mm³/an pour les flux sortants ;
- compris entre 3.2 et 4.8 Mm³/an pour la balance globale.

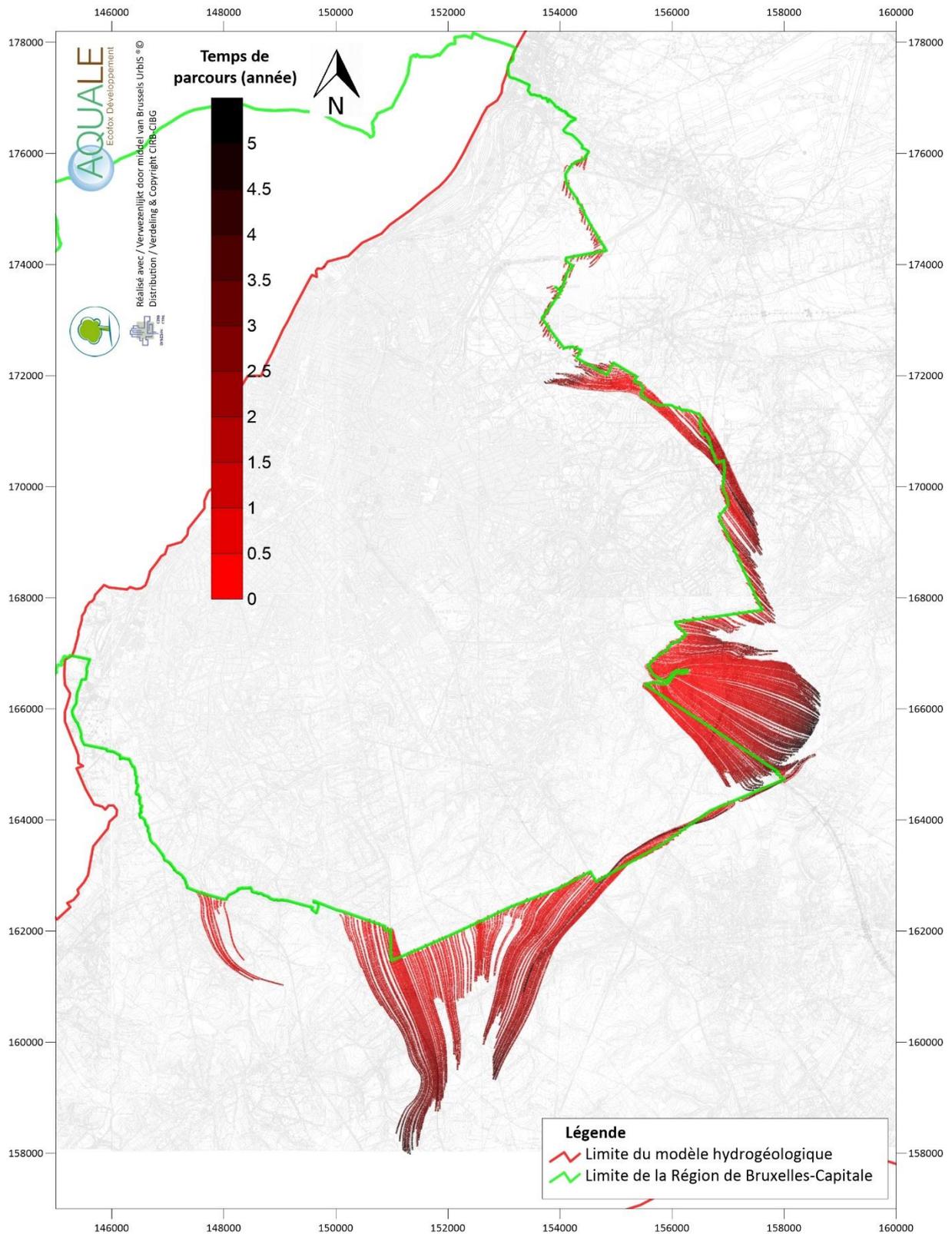


Figure 7-31 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la nappe du Bruxellien selon le scénario n°7

7.3.2 SYNTHÈSE

Pour estimer les échanges à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale, différents scénarii ont été réalisés. Ces scénarii considèrent une infiltration variable (faible, moyenne et élevée) ainsi qu'un prélèvement par puits de pompage variable (identique à 2013, augmenté de 50 % par rapport à 2013 et augmenté de 100 % par rapport à 2013).

Le **TABLEAU 7-10** ci-après reprend une synthèse des estimations données au sein du **CHAPITRE 7.3**.

	Flux entrant (Mm ³ /an)	Flux sortant (Mm ³ /an)	Balance globale (Mm ³ /an)
SCÉNARII N°1 à 3	5.2 à 7.8	2.1 à 3.3	3.1 à 4.5
SCÉNARII N°4 à 6	4.6 à 7.2	1.9 à 3.0	2.7 à 4.1
SCÉNARII N°7 à 9	5.5 à 8.6	2.4 à 3.8	3.2 à 4.8

Tableau 7-10 : Synthèse des évaluations des flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale pour les 9 scénarii

Les flux varient quelque peu avec la variation de la recharge. Cette variation est d'environ 10 % à la baisse en cas de recharge très faible et de 5 % à la hausse en cas de recharge très élevée. Compte tenu des variations climatiques et de l'incertitude propre au modèle hydrogéologique, le transfert entre la Région Flamande et la Région de Bruxelles-Capitale est compris globalement entre 2.7 Mm³/an et 4.8 Mm³/an (en direction de la Région de Bruxelles-Capitale). Le flux entrant dans la Région de Bruxelles-Capitale est compris entre 4.6 et 8.6 Mm³/an. Le flux sortant de la Région de Bruxelles-Capitale est compris entre 1.9 et 3.8 Mm³/an.

Dans tous les cas, les flux entrants principaux sont situés :

- le long de la frontière Sud et, en particulier, en amont de la galerie Vivaqua ;
- le long de la frontière Est.

Les flux sortants principaux sont situés le long de la frontière Nord.

Cette balance positive vers la Région de Bruxelles-Capitale ne signifie pas qu'il y a une accumulation d'eau au sein de la nappe dans la Région mais plutôt un grand nombre d'exutoires. En l'occurrence, il s'agit principalement des collecteurs, de la Senne, de la Woluwe et de la galerie Vivaqua.

7.4 INTERACTIONS AVEC LES EAUX DE SURFACE DE LA WOLUWE

7.4.1 ETUDE DE L'ÉVOLUTION DES DÉBITS MESURÉS DE LA WOLUWE

Comme cela a été annoncé au **CHAPITRE 5.5** concluant la calibration du modèle hydrogéologique, compte-tenu du contexte particulier de la vallée de la Woluwe caractérisé par :

- la présence d'une rivière et d'un collecteur superposés ;
- un débit drainé par le collecteur méconnu dans la réalité et très largement supérieur au débit drainé par les eaux de surface de la Woluwe ;

- des échanges très complexes et méconnus entre ce collecteur et la rivière ;

il est considéré que le modèle ne peut que partiellement mettre en évidence les interactions pouvant exister entre la masse d'eau souterraine du Bruxellien et les eaux de surface de la Woluwe. En effet, l'incertitude caractérisant le drainage de la nappe par le collecteur couvre totalement la gamme de débit drainé par les eaux de surface, ce qui induit, forcément, une imprécision sur les résultats.

Plus que le modèle, les mesures Flowbru disponibles donnent des renseignements intéressants sur l'évolution des débits de la rivière et du collecteur. Ces données ont déjà été présentées et analysées dans les **CHAPITRES 4 et 5** relatifs à la construction et la calibration du modèle. Elles sont à nouveau présentées dans le présent chapitre afin de fournir une réponse intégrée et complète.

La **FIGURE 7-32** ci-dessous présente la localisation du collecteur et de la rivière.

Cette figure illustre le recouvrement entre la rivière et le collecteur sur une très grande partie de la vallée. La rivière est présente seule en amont de la station de Middlebourg ainsi qu'en amont de la station de Kloosterberg. Pour le reste, le collecteur est présent sur tout le tronçon, soit directement au même endroit que la rivière, soit à quelques mètres.

La zone est également caractérisée par la présence d'un grand nombre d'étangs.

Quelques stations de mesures sont disposées sur la rivière et le collecteur :

- pour la rivière :
 - o station Middlebourg ;
 - o station Kloosterberg ;
 - o station Gobert ;
 - o station Sortie Région ;
- pour le collecteur :
 - o station Watermaelbeek ;
 - o station Roodebeek ;
 - o station Sortie Région.

Puisque le collecteur, là où il est présent, se trouve sous le niveau de la rivière, il joue un rôle potentiellement drainant assez important. L'estimation du débit drainé par les collecteurs a été très largement abordée au **CHAPITRE 5.1.2.4**. De manière très approximative, le débit drainé par les collecteurs pour l'ensemble de la Région de Bruxelles-Capitale a été estimé entre 50 000 et 70 000 m³/j. Une part de ce débit, comprise probablement entre 10 000 et 40 000 m³/j est associée au collecteur de la Woluwe.

Pour la rivière, les différentes stations montrent que le débit atteint déjà une valeur élevée au niveau des stations les plus amont, soit Middlebourg et Kloosterberg. Cela est assez logique si l'on considère qu'en aval de ces stations, le drainage est majoritairement réalisé par le collecteur.

Pour caractériser le débit de la rivière, l'évolution des mesures de débit aux différentes stations est la donnée la plus intéressante.

Les graphiques suivants (**FIGURES 7-33 à 7-36** pour les stations de Middlebourg, de Kloosterberg, de Gobert et de la Sortie Région) illustrent l'évolution du débit de la rivière aux différentes stations, depuis l'amont vers l'aval et sur l'ensemble de la période couverte par les mesures. Une mesure est prise toutes les cinq minutes. Les graphiques illustrent les données moyennées sur une semaine. Une courbe de tendance présente l'évolution de la moyenne trimestrielle en bleu marine.

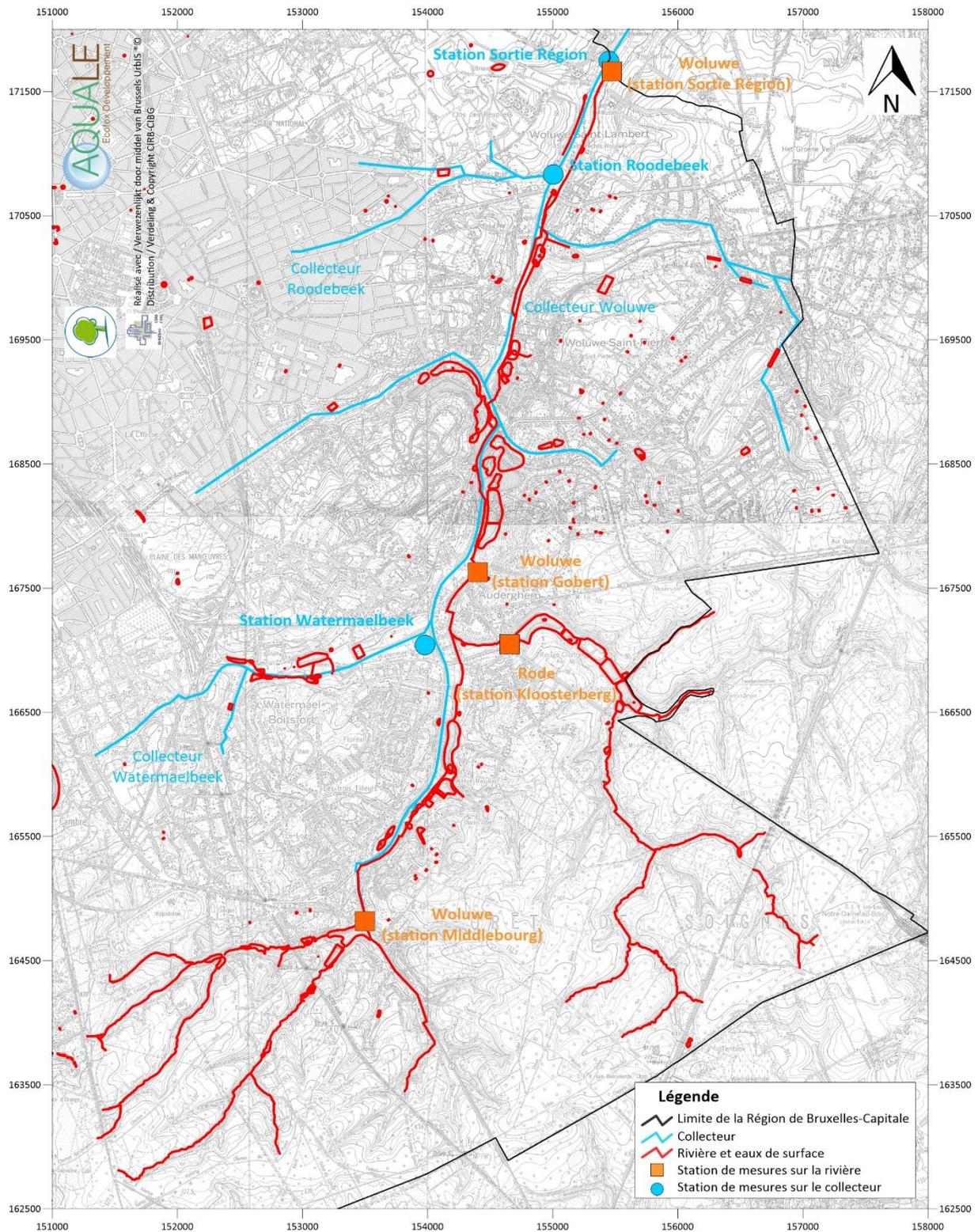


Figure 7-32 : Vallée de la Woluwe

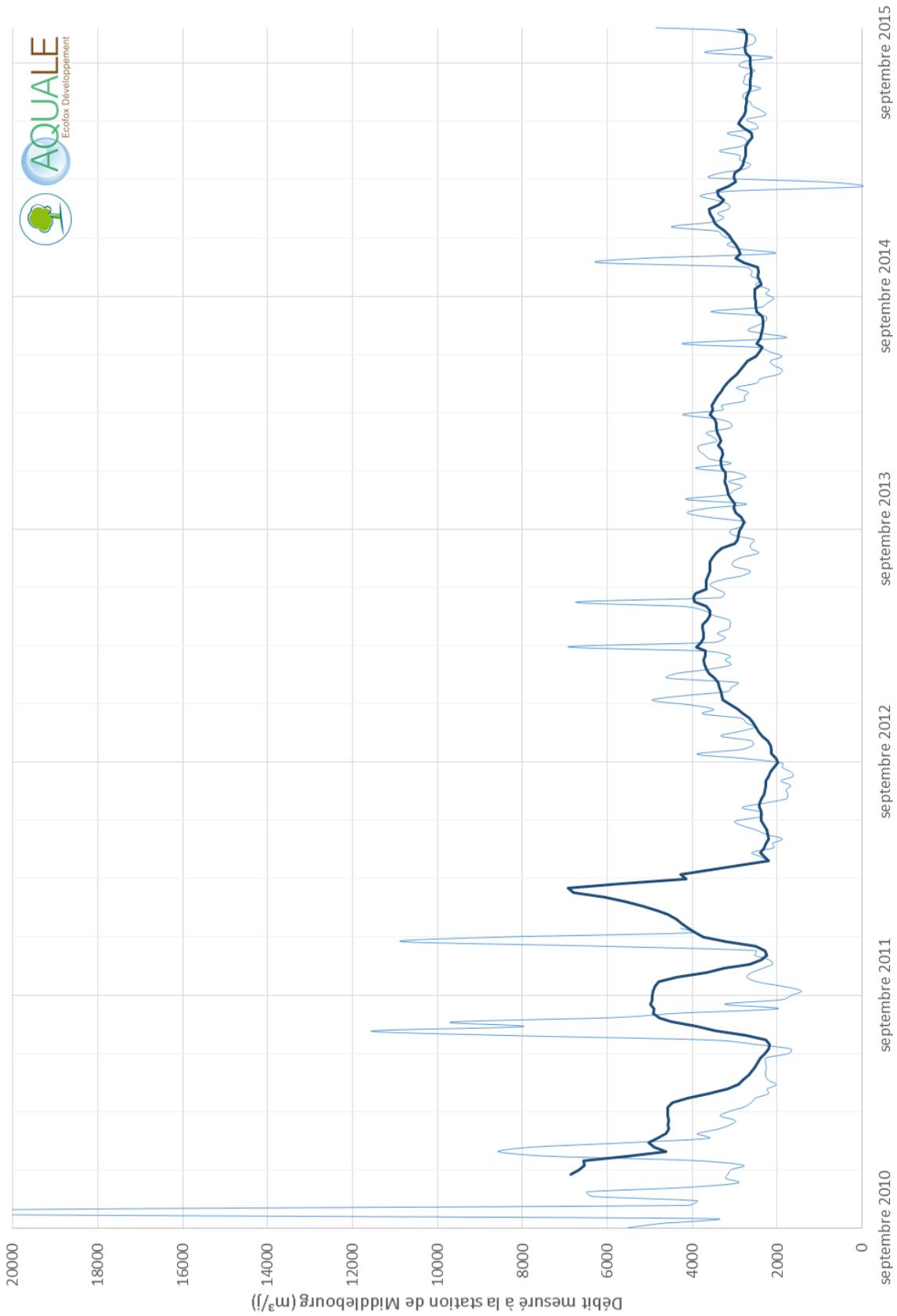


Figure 7-33 : Evolution du débit mesuré de la Woluwe à la station de Middlebourg

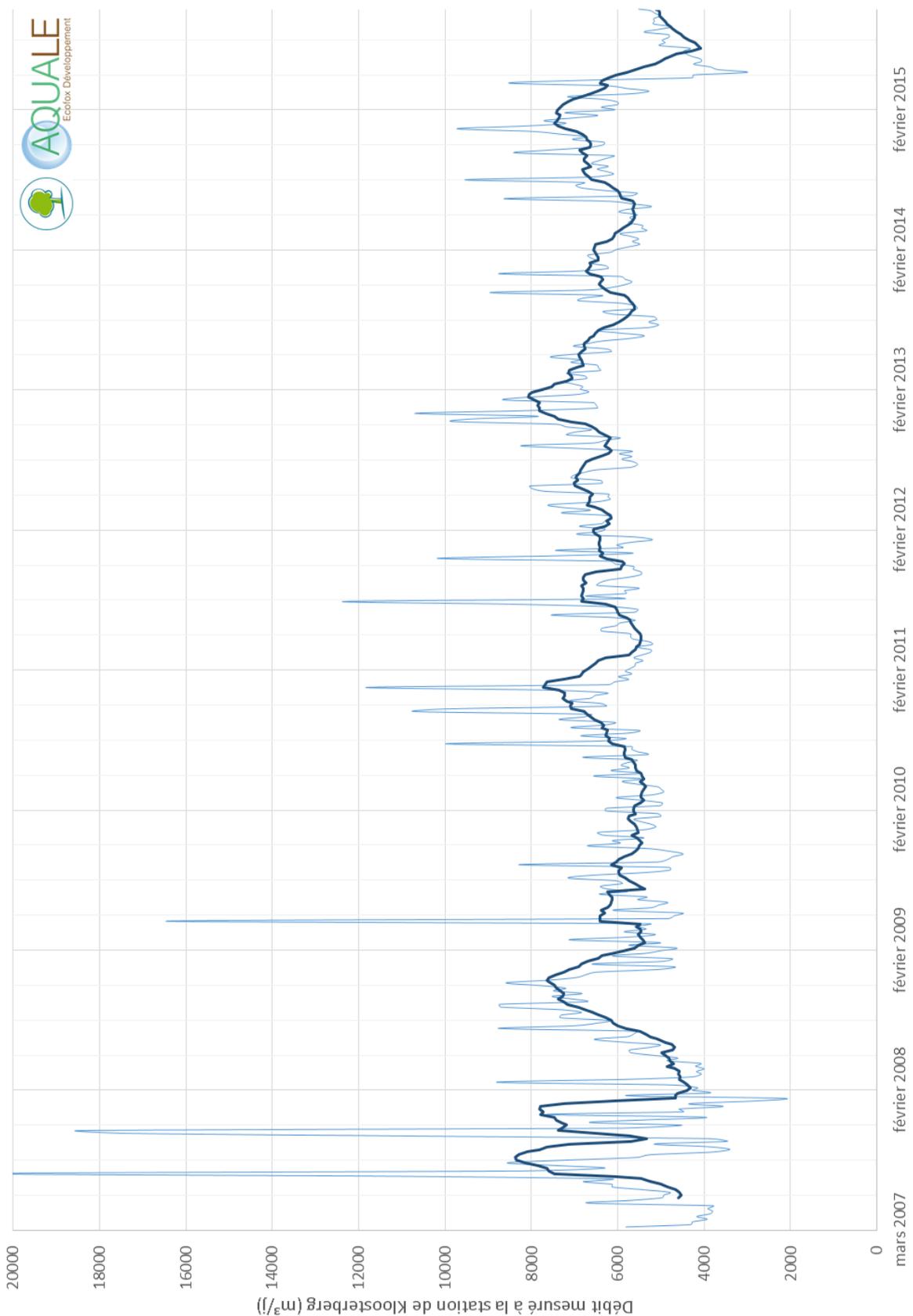


Figure 7-34 : Evolution du débit mesuré du Rode à la station de Kloosterberg

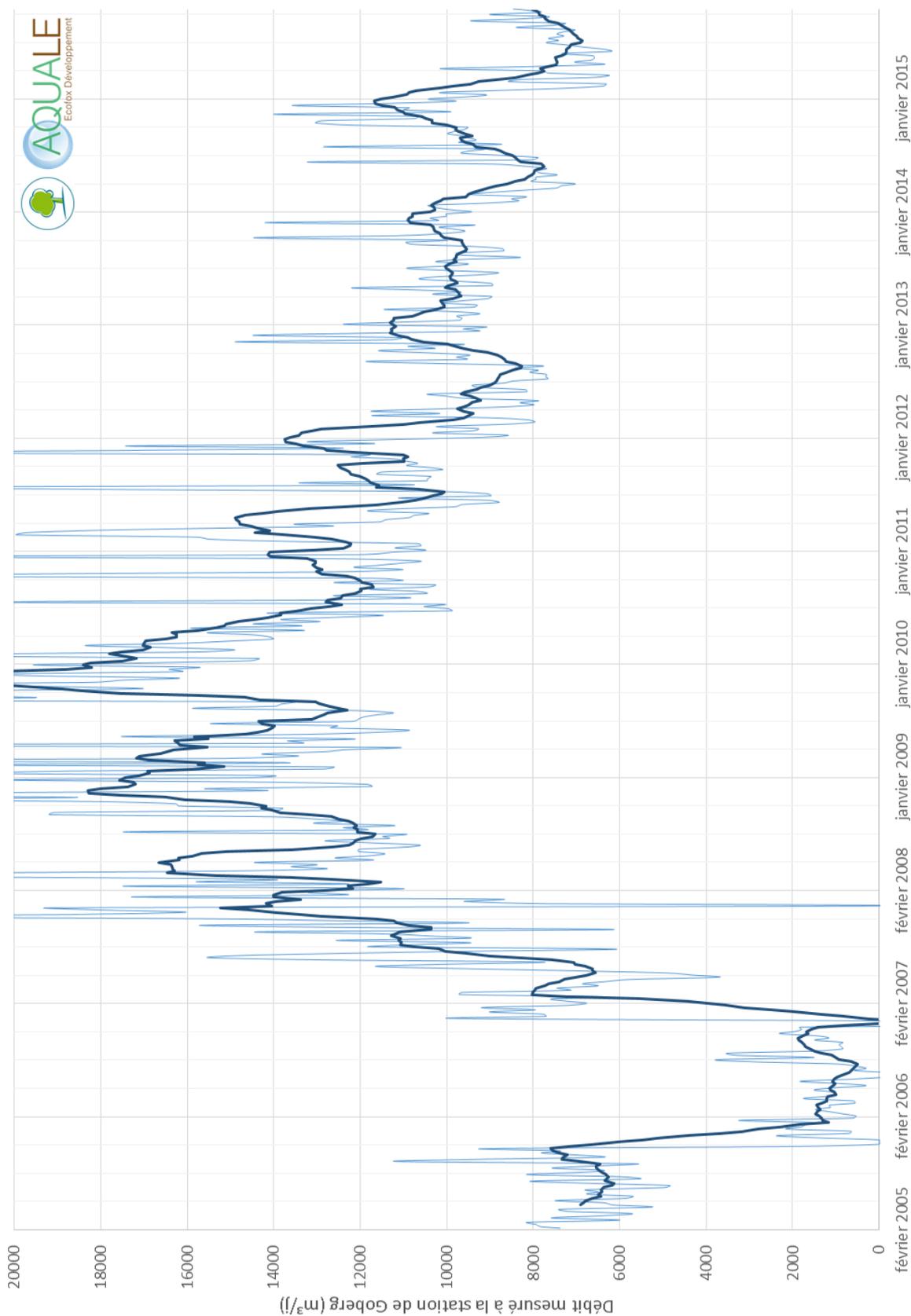


Figure 7-35 : Evolution du débit mesuré de la Woluwe à la station de Gobert

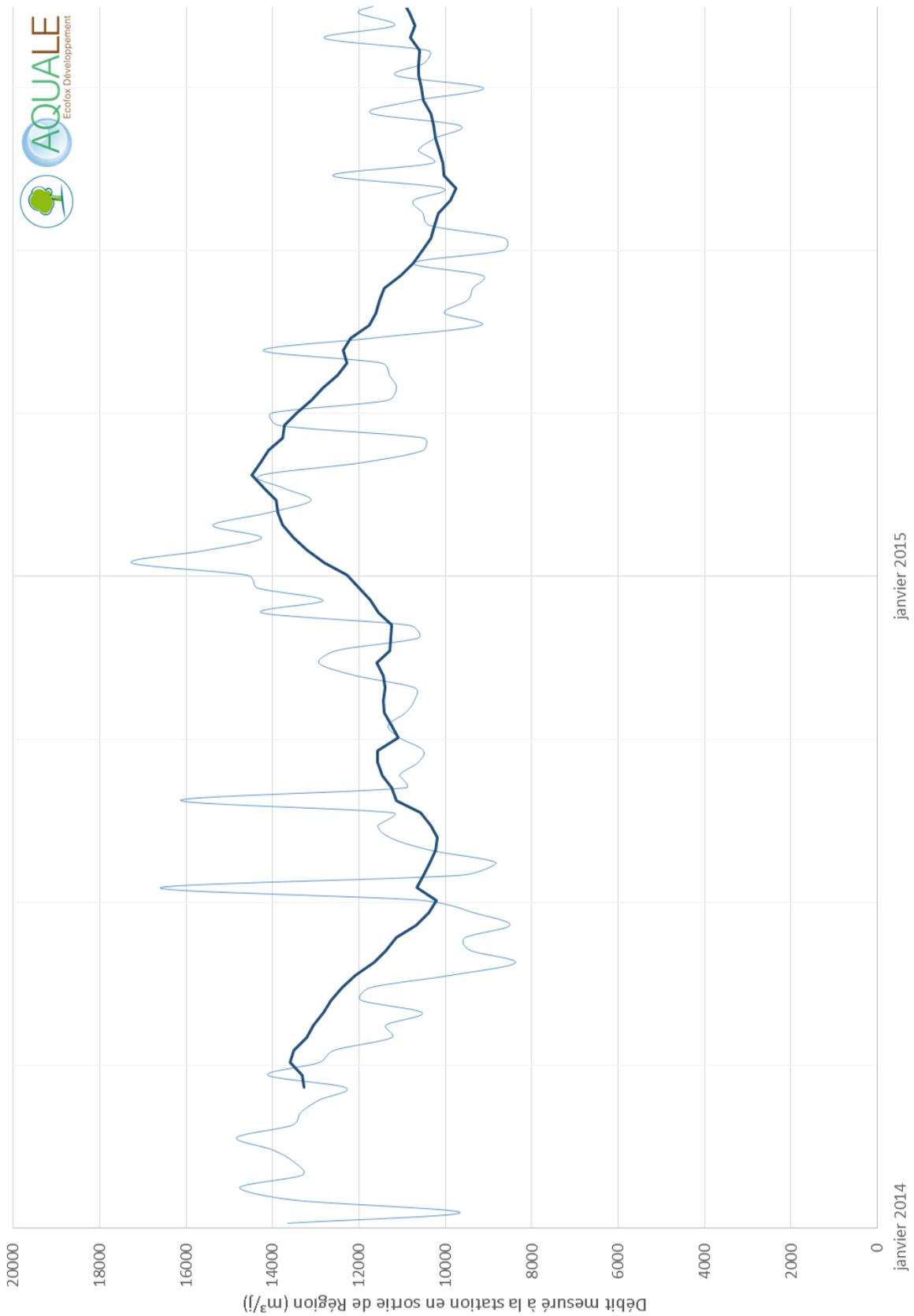


Figure 7-36 : Evolution du débit mesuré de la Woluwe à la sortie de la Région

Les graphiques illustrent que :

- le débit de la Woluwe à Middlebourg depuis septembre 2010 jusqu'à aujourd'hui varie globalement entre 2 000 et 4 000 m³/j, il varie assez peu dans le temps ;
- le débit du Rode à Kloosterberg depuis mars 2007 jusqu'à aujourd'hui varie globalement entre 4 000 et 8 000 m³/j, il varie assez peu dans le temps ;
- le débit de la Woluwe à Goberg varie globalement entre 0 et 20 000 m³/j, il varie très fortement dans le temps ;
- le débit de la Woluwe à la sortie de la Région varie globalement entre 10 000 et 14 000 m³/j, il varie assez peu dans le temps.

La **FIGURE 7-37** reprend l'ensemble des évolutions de débits (trimestriels) pour la rivière pour la période 2011 – 2015. Cette figure illustre que :

- le débit atteint à la station de Middlebourg est déjà assez élevé et que le potentiel de drainage en amont doit dès lors être important ;
- le débit atteint à la station de Kloosterberg est encore plus élevé et que le potentiel de drainage en amont doit dès lors être encore plus important ;
- la somme des débits mesurés aux stations de Middlebourg et de Kloosterberg est très proche du débit mesuré à la station de Gobert ; cela sous-entend que le drainage de la nappe par la rivière est très faible voire inexistant sur le tronçon de rivière compris entre les deux stations amont et la station aval ;
- le débit mesuré en sortie de Région est environ 2 000 m³/j plus élevé que le débit mesuré à la station de Gobert ; cela sous-entend que le drainage de la nappe par la rivière est assez faible mais probablement pas inexistant.

Sur la base de ces observations et compte tenu du débit très élevé drainé par le collecteur, il est considéré qu'en sa présence, la rivière ne draine pas ou quasiment pas la nappe. Son débit évolue très légèrement à la hausse grâce aux apports directs ou par ruissellement.

Ainsi, le lien entre les eaux souterraines et les eaux de surface de la Woluwe est cantonné aux tronçons situés en amont des stations de Kloosterberg et de Middlebourg. Sur ces tronçons, la modélisation en régime transitoire a montré que le débit de drainage de la nappe par la rivière était très constant dans le temps, eu égard au niveau stable de la nappe dans les environs.

En aval de la station Gobert, un drainage de la nappe par la rivière existe et est pris en considération par le modèle. Cependant, la distinction entre le drainage par le collecteur et le drainage par la rivière est impossible compte tenu de la précision des données disponibles.

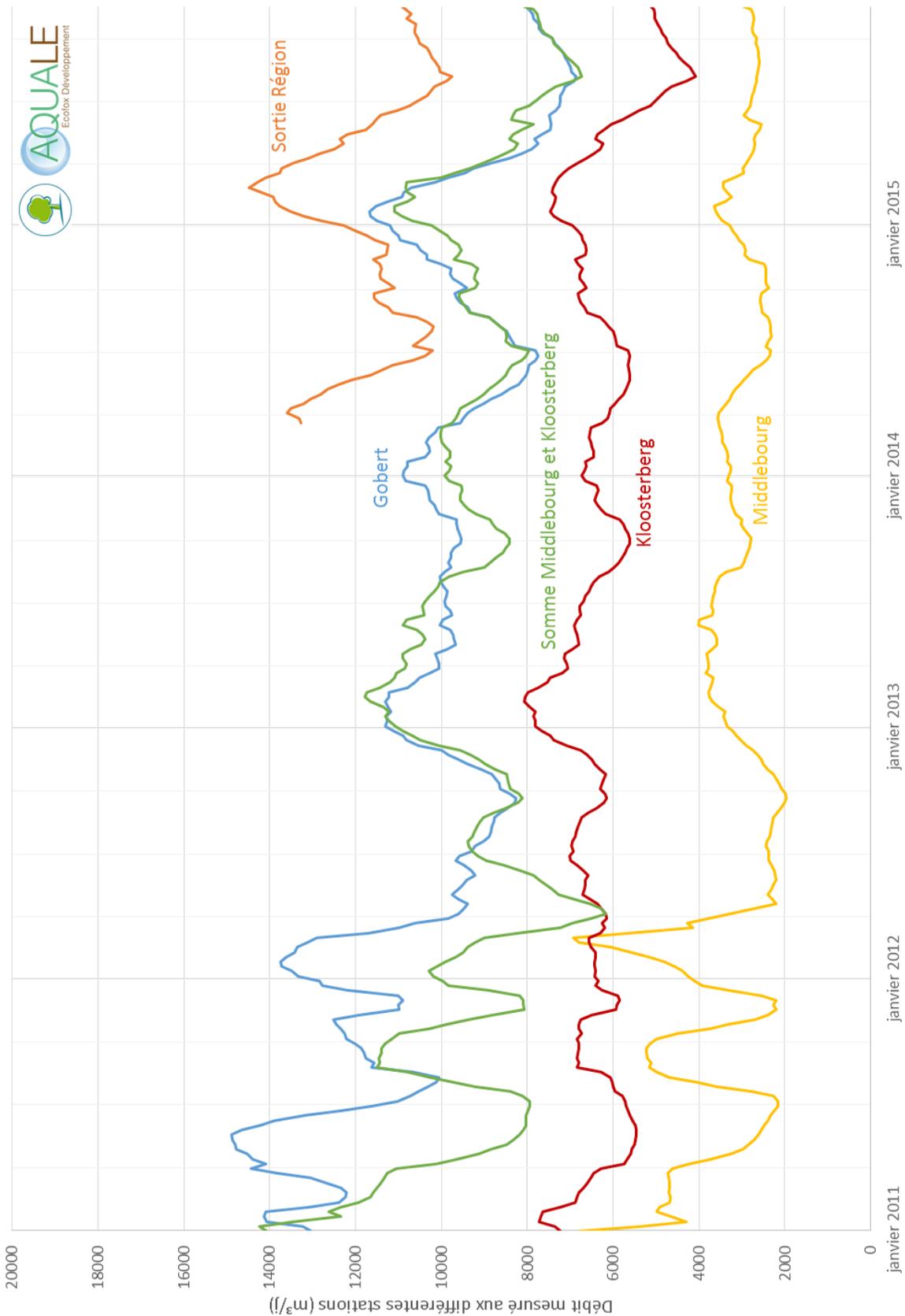


Figure 7-37 : Evolution du débit mesuré de la Woluwe aux différentes stations

7.4.2 SIMULATIONS

Compte tenu des observations présentées ci-dessus au **CHAPITRE 7.4.1**, les résultats des simulations repris ci-dessous concernent les tronçons de rivière situés en amont des stations de Middlebourg et de Kloosterberg.

7.4.2.1 SCÉNARII N°1 À 3 – RÉGIME PERMANENT, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE SITUATION MOYENNE

7.4.2.1.1 SCÉNARIO 1 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE IDENTIQUE À CELUI DE 2013

Selon le **SCÉNARIO N°1**, les débits drainés par les deux tronçons de rivières sont les suivants :

- 0.9 Mm³/an par la Woluwe en amont de Middlebourg ;
- 2.3 Mm³/an par le Rode en amont de Kloosterberg.

La **FIGURE 7-38** illustre les lignes de flux en direction des deux tronçons de rivières. La longueur des lignes de flux représente le trajet parcouru par l'eau en une année. Plus la ligne est longue et plus l'eau circule rapidement.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.6**, à savoir :

- **cas A** : infiltration x 1.05 et conductivité hydraulique x 0.85 ;
- **cas B** : infiltration x 1.03 et conductivité hydraulique x 1.32 ;
- **cas C** : infiltration x 0.86 et conductivité hydraulique x 1.08 ;
- **cas D** : infiltration x 0.88 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le **TABLEAU 7-11** ci-dessous reprend les variations des débits drainés par les tronçons amont de la Woluwe pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Amont Middlebourg	+ 20 %	- 11 %	- 22 %	+ 0 %	[- 22 à + 20 %]
Amont Kloosterberg	+ 9 %	- 4 %	- 17 %	- 9 %	[- 17 à + 9 %]

Tableau 7-11 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°1

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°1**, les débits drainés par ces deux tronçons sont :

- compris entre 0.7 et 1.1 Mm³/an pour le tronçon en amont de la station Middlebourg ;
- compris entre 1.9 et 2.5 Mm³/an pour les tronçons en amont de la station de Kloosterberg.

Comme aux **CHAPITRES 7.2 et 7.3**, l'incertitude évaluée sur le **SCÉNARIO N°1** sera considérée comme représentative de l'incertitude également pour les **SCÉNARII N°2 et 3**.

De la même manière, l'incertitude évaluée sur le **SCÉNARIO N°4** sera considérée comme représentative de l'incertitude également pour les **SCÉNARII N°5 et 6**.

Enfin, l'incertitude évaluée sur le **SCÉNARIO N°7** sera considérée comme représentative de l'incertitude également pour les **SCÉNARII N°8 et 9**.

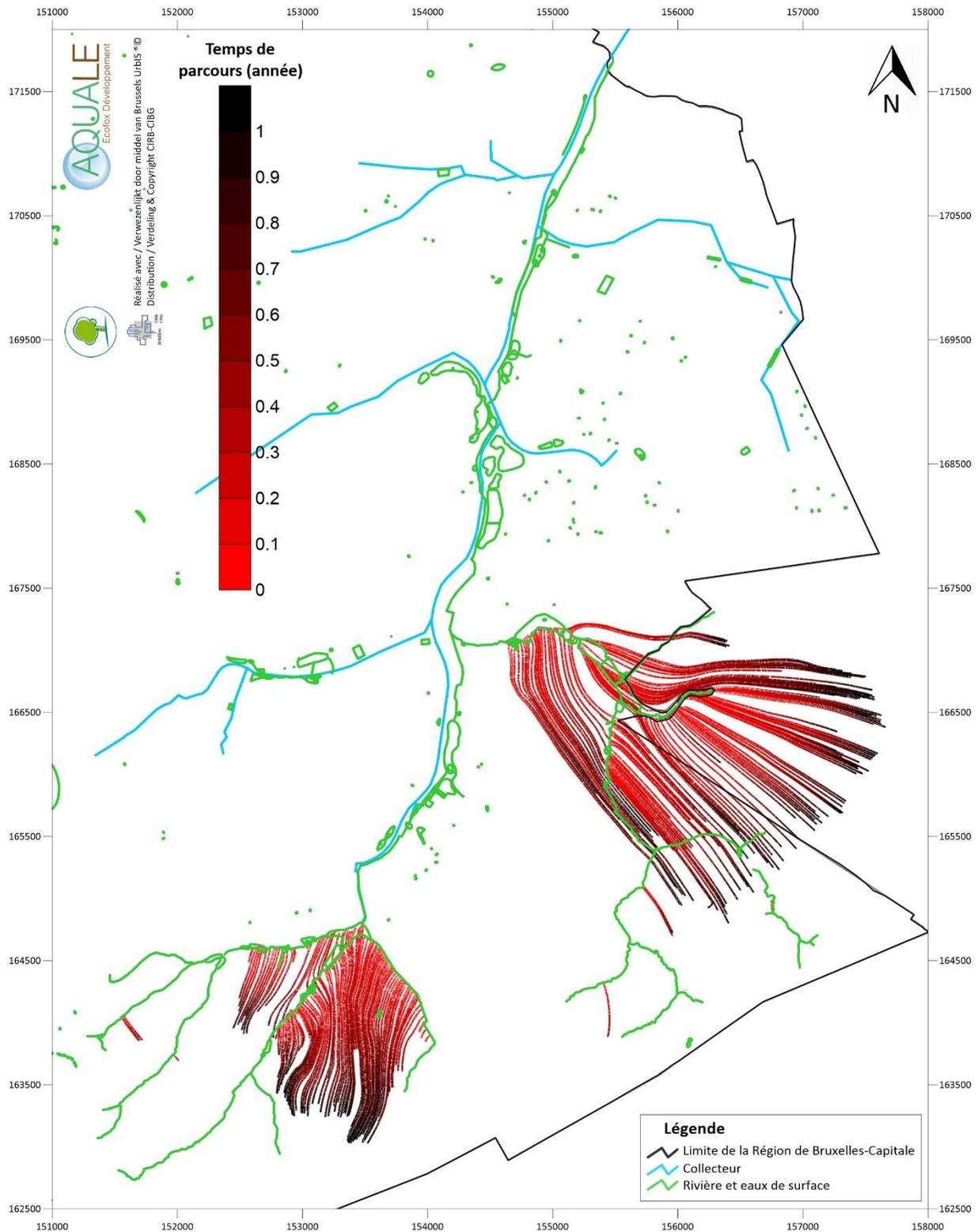


Figure 7-38 : Lignes de flux en direction des tronçons amont de la Woluwe selon le scénario n°1

7.4.2.1.2 SCÉNARIO 2 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 50 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

Selon le **SCÉNARIO N°2**, les débits drainés par les deux tronçons de rivières sont les suivants :

- 0.9 Mm³/an par la Woluwe en amont de Middlebourg (soit une variation très faible par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- 2.3 Mm³/an par le Rode en amont de Kloosterberg (soit une variation très faible par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

La **FIGURE 7-39** illustre les lignes de flux en direction des deux tronçons de rivières. Celles-ci sont identiques à celles du **SCÉNARIO N°1**.

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°2**, les débits drainés par ces deux tronçons sont :

- compris entre 0.7 et 1.1 Mm³/an pour le tronçon en amont de la station Middlebourg ;
- compris entre 1.9 et 2.5 Mm³/an pour les tronçons en amont de la station de Kloosterberg.

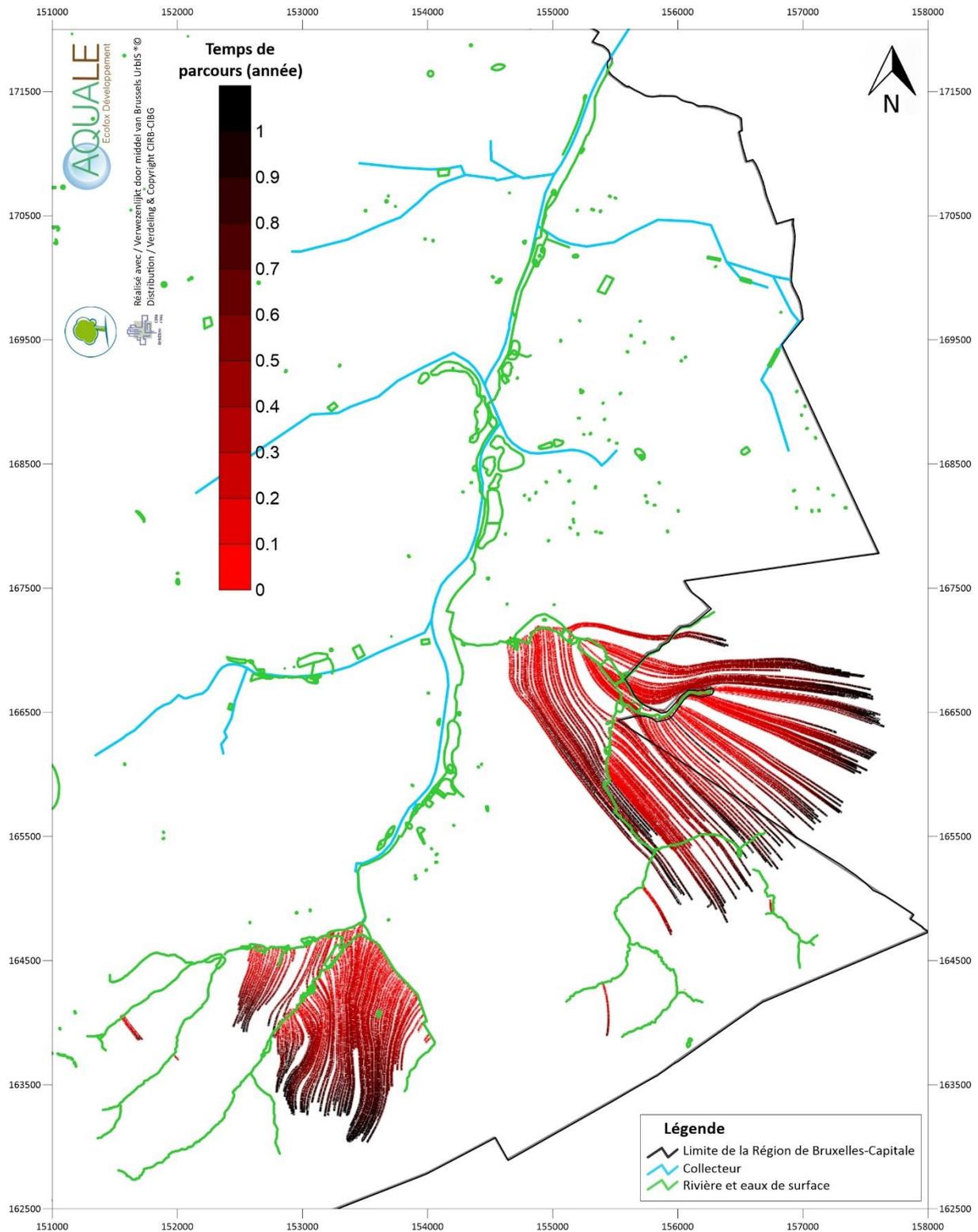


Figure 7-39 : Lignes de flux en direction des tronçons amont de la Woluwe selon le scénario n°2

7.4.2.1.3 SCÉNARIO 3 – VOLUME PRÉLEVÉ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE AUGMENTÉ DE 100 % PAR RAPPORT À CELUI DE 2013

Selon le **SCÉNARIO N°3**, les débits drainés par les deux tronçons de rivières sont les suivants :

- 0.9 Mm³/an par la Woluwe en amont de Middlebourg (soit une variation très faible par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- 2.3 Mm³/an par le Rode en amont de Kloosterberg (soit une variation très faible par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

La **FIGURE 7-40** illustre les lignes de flux en direction des deux tronçons de rivières. Celles-ci sont identiques à celles des **SCÉNARIO N°1 et 2**.

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°3**, les débits drainés par ces deux tronçons sont :

- compris entre 0.7 et 1.1 Mm³/an pour le tronçon en amont de la station Middlebourg ;
- compris entre 1.9 et 2.5 Mm³/an pour les tronçons en amont de la station de Kloosterberg.

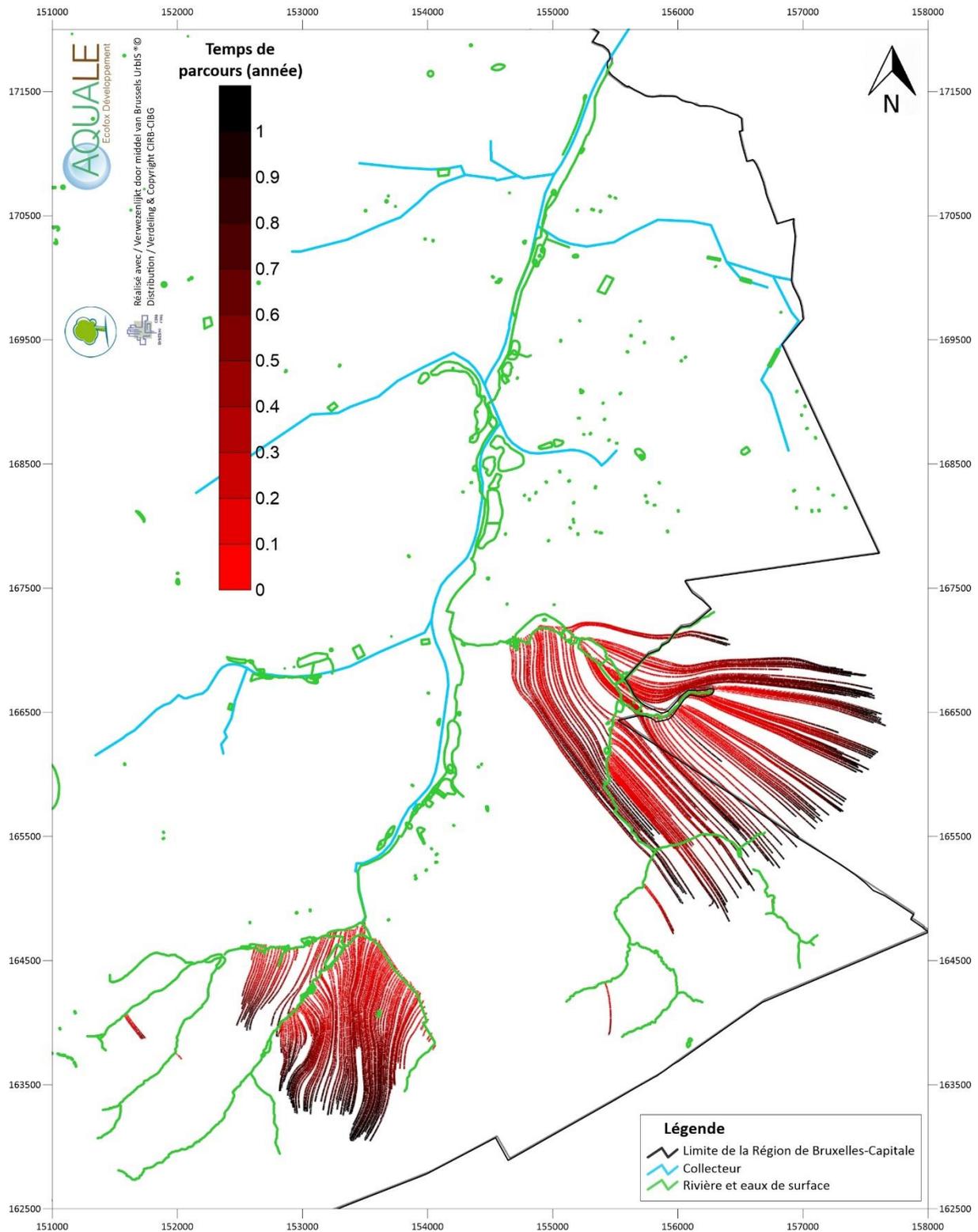


Figure 7-40 : Lignes de flux en direction des tronçons amont de la Woluwe selon le scénario n°3

7.4.2.1.4 REMARQUE SUR LES SCÉNARIIS

Etant donné que les résultats sont parfaitement identiques pour les **SCÉNARIIS N°1, 2 et 3**, il apparaît que l'influence de l'augmentation des débits des puits en Région de Bruxelles-Capitale n'impacte pas ou très peu le débit drainé par les tronçons amont de la Woluwe.

Ainsi, afin d'éviter de trop nombreuses répétitions, seuls les **SCÉNARIIS N°4 et 7** seront présentés dans la suite pour évaluer l'impact de recharges très faible et très élevée sur les débits drainés par ces rivières. Les résultats du **SCÉNARIO N°4** sont considérés comme valables pour les **SCÉNARIIS N°5 et 6**. Les résultats du **SCÉNARIO N°7** sont considérés comme valables pour les **SCÉNARIIS N°8 et 9**.

7.4.2.2 SCÉNARIIS N°4 À 6 – RÉGIME TRANSITOIRE, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE PÉRIODE DE 5 ANNÉES DE RECHARGE FAIBLE

Comme expliqué précédemment, seul le **SCÉNARIO N°4** est réalisé. Ses résultats sont considérés comme valables pour les **SCÉNARIIS N°5 et 6**.

Selon le **SCÉNARIO N°4**, les débits drainés par les deux tronçons de rivières sont les suivants :

- 0.5 Mm³/an par la Woluwe en amont de Middlebourg (soit une diminution d'environ 44 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- 1.6 Mm³/an par le Rode en amont de Kloosterberg (soit une diminution d'environ 30 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

La **FIGURE 7-41** illustre les lignes de flux en direction des deux tronçons de rivières. Celles-ci sont orientées comme celles du **SCÉNARIO N°1** mais sont un peu plus courtes, ce qui signifie que l'écoulement est un peu plus lent.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.6**, à savoir :

- **cas A** : infiltration x 1.05 et conductivité hydraulique x 0.85 ;
- **cas B** : infiltration x 1.03 et conductivité hydraulique x 1.32 ;
- **cas C** : infiltration x 0.86 et conductivité hydraulique x 1.08 ;
- **cas D** : infiltration x 0.88 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le **TABLEAU 7-12** ci-dessous reprend les variations des débits drainés par les tronçons amont de la Woluwe pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Amont Middlebourg	+ 40 %	- 20 %	- 20 %	+ 0 %	[- 20 à + 40 %]
Amont Kloosterberg	+ 12 %	- 6 %	- 25 %	- 6 %	[- 25 à + 12 %]

Tableau 7-12 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°4

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°4**, les débits drainés par ces deux tronçons sont :

- compris entre 0.4 et 0.7 Mm³/an pour le tronçon en amont de la station Middlebourg ;
- compris entre 1.2 et 1.8 Mm³/an pour les tronçons en amont de la station de Kloosterberg.

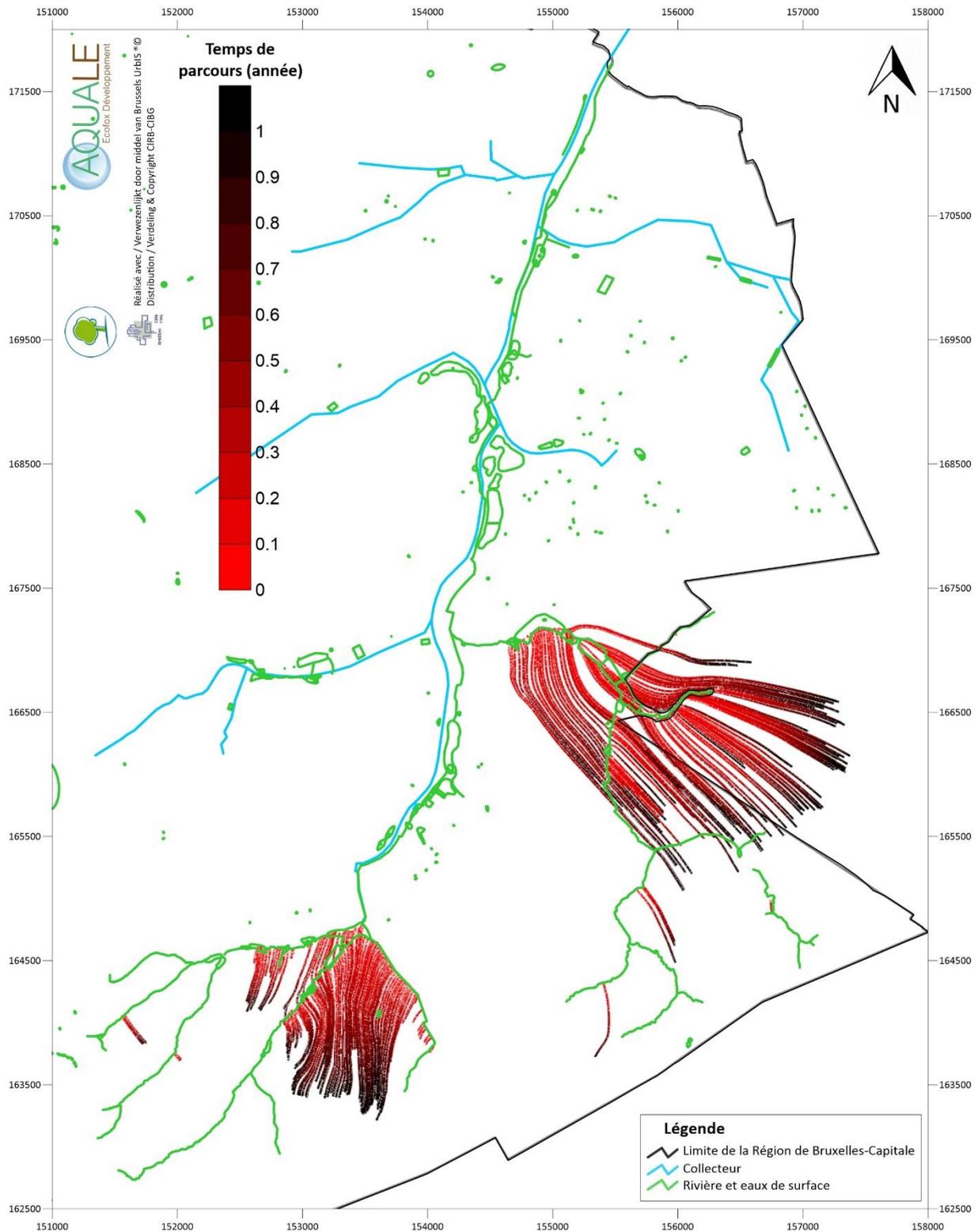


Figure 7-41 : Lignes de flux en direction des tronçons amont de la Woluwe selon le scénario n°4

7.4.2.3 SCÉNARII N°7 À 9 – RÉGIME TRANSITOIRE, INFILTRATION REPRÉSENTATIVE D'UNE PÉRIODE DE 5 ANNÉES DE RECHARGE ÉLEVÉE

Comme expliqué précédemment, seul le **SCÉNARIO N°7** est réalisé. Ses résultats sont considérés comme valables pour les **SCÉNARII N°8 et 9**.

Selon le **SCÉNARIO N°7**, les débits drainés par les deux tronçons de rivières sont les suivants :

- 1.4 Mm³/an par la Woluwe en amont de Middlebourg (soit une augmentation d'environ 56 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**) ;
- 3.0 Mm³/an par le Rode en amont de Kloosterberg (soit une augmentation d'environ 30 % par rapport au **SCÉNARIO N°1**).

La **FIGURE 7-42** illustre les lignes de flux en direction des deux tronçons de rivières. Celles-ci sont orientées comme celles du **SCÉNARIO N°1** mais sont un peu plus longues, ce qui signifie que l'écoulement est un peu plus rapide.

En termes de sensibilité, il convient à présent de comparer ces résultats en adaptant les paramètres infiltration et conductivité hydraulique comme précisé au **CHAPITRE 6.6**, à savoir :

- **cas A** : infiltration x 1.05 et conductivité hydraulique x 0.85 ;
- **cas B** : infiltration x 1.03 et conductivité hydraulique x 1.32 ;
- **cas C** : infiltration x 0.86 et conductivité hydraulique x 1.08 ;
- **cas D** : infiltration x 0.88 et conductivité hydraulique x 0.70.

Le **TABLEAU 7-13** ci-dessous reprend les variations des débits drainés par les tronçons amont de la Woluwe pour ces différents cas.

	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Synthèse
Amont Middlebourg	+ 14 %	- 14 %	- 29 %	- 7 %	[- 29 à + 14 %]
Amont Kloosterberg	+ 7 %	+ 0 %	- 17 %	- 10 %	[- 17 à + 7 %]

Tableau 7-13 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations de débits drainés dans le cadre du scénario n°7

Ainsi, compte tenu de l'incertitude existant sur l'infiltration et la conductivité hydraulique, il peut être considéré que, selon ce **SCÉNARIO N°7**, les débits drainés par ces deux tronçons sont :

- compris entre 1.0 et 1.6 Mm³/an pour le tronçon en amont de la station Middlebourg ;
- compris entre 2.5 et 3.2 Mm³/an pour les tronçons en amont de la station de Kloosterberg.

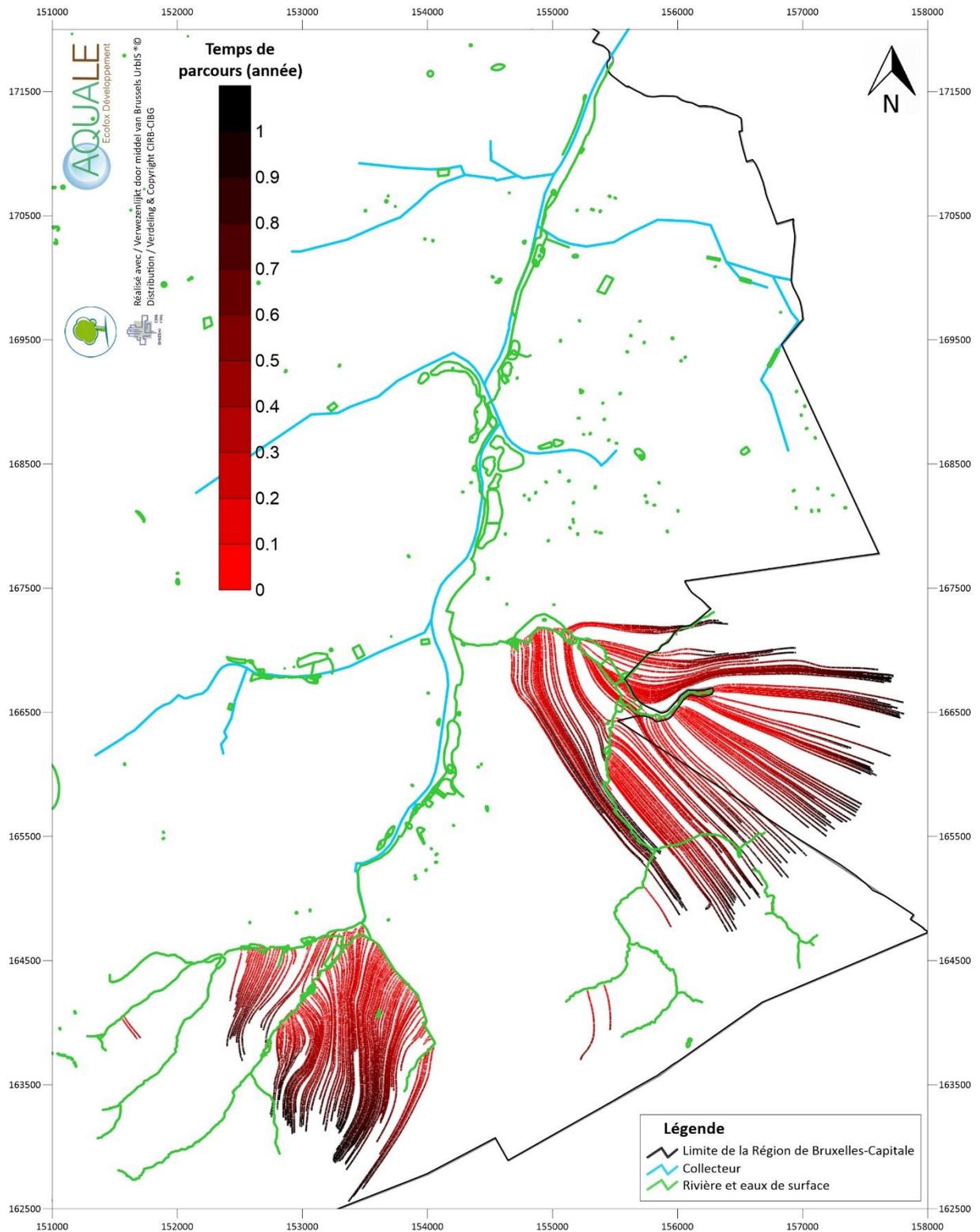


Figure 7-42 : Lignes de flux en direction des tronçons amont de la Woluwe selon le scénario n°7

7.4.3 SYNTHÈSE

Pour évaluer les interactions entre les eaux de surface de la Woluwe et les eaux souterraines, les mesures de débit aux différentes stations ont été interprétées et les débits drainés par la rivière ont été simulés selon les différents scénarii.

Les stations de mesures illustrent que le drainage de la nappe par la rivière est important dans les tronçons en amont des stations de Middlebourg et de Kloosterberg. En aval de ces stations, le collecteur de la Woluwe, situé plus bas que la rivière, joue le rôle de drain principal.

Les interactions entre le collecteur, la rivière et les eaux souterraines sont extrêmement complexes et ne peuvent être caractérisées plus complètement dans le cadre de cette étude compte tenu des nombreuses incertitudes existant notamment sur le débit drainé par le collecteur, la localisation des zones les plus drainantes, l'impact des étangs, etc...

Pour les tronçons amont, le modèle reproduit bien le niveau de drainage mesuré. Les simulations permettent d'apprécier le temps de parcours et l'orientation des lignes de flux en direction de la Woluwe. Le **TABLEAU 7-14** ci-dessous reprend l'estimation des débits drainés par les tronçons amont pour les différents scénarii réalisés.

	En amont de Middlebourg (Mm ³ /an)	En amont de Kloosterberg (Mm ³ /an)
SCÉNARII N°1 à 3	0.7 à 1.1	1.9 à 2.5
SCÉNARII N°4 à 6	0.4 à 0.7	1.2 à 1.8
SCÉNARII N°7 à 9	1.0 à 1.6	2.5 à 3.2

Tableau 7-14 : Synthèse des évaluations des flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale pour les 9 scénarii

8 CONCLUSIONS, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Le présent rapport a pour objectif de présenter à l'IBGE le modèle hydrogéologique final pour la masse d'eau souterraine du Bruxellien (état du modèle au 16 novembre 2015) développé par AQUALE sprl.

Après une brève introduction (**CHAPITRE 1**) accompagnée d'une description succincte du logiciel de modélisation hydrogéologique utilisé (**CHAPITRE 2**), le rapport présente le modèle conceptuel (**CHAPITRE 3**) ainsi que la construction du modèle numérique (**CHAPITRE 4**). Ces **CHAPITRES 3 et 4** définissent les limites du modèle et la manière de représenter le fonctionnement hydrogéologique global.

Le **CHAPITRE 5** est ensuite consacré à la calibration du modèle hydrogéologique en régime permanent pour les périodes de mai – juin et de novembre 2013, puis en régime transitoire (calibration et validation) pour la période 2009 – 2013.

Il a été démontré que le modèle hydrogéologique est très bien calibré en régime permanent pour les deux périodes de référence et en régime transitoire pour la période 2009 – 2013. En effet, les niveaux d'eau et les directions d'écoulement sont globalement très bien reproduits au sein de la Région de Bruxelles-Capitale et à proximité, comme en attestent les indicateurs de calibration repris ci-dessous (calculés sur la base des points de mesure situés en Région de Bruxelles-Capitale et dans un rayon de 2 km autour) :

- Pour la période de mai – juin 2013 :
 - o SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 1.15 % ;
 - o SRMS (Scaled Root Mean Square) : 1.31 % ;
 - o CD (Coefficient of Determination) : 1.02.
- Pour la période de novembre 2013 :
 - o SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 1.35 % ;
 - o SRMS (Scaled Root Mean Square) : 1.38 % ;
 - o CD (Coefficient of Determination) : 0.99.

En ce qui concerne la reproduction des débits, celle-ci est considérée comme acceptable dès lors que :

- les débits les plus importants sont bien reproduits puisque la valeur simulée se situe dans la fourchette de valeurs acceptables ;
- pour les débits intermédiaires, la valeur simulée est souvent très proche de l'extrémité supérieure de la fourchette de valeurs acceptables ;
- les débits faibles sont reproduits avec un bon ordre de grandeur.

En régime transitoire, la qualité de la calibration est jugée très bonne dès lors que seuls deux piézomètres (Bonniers et Strasbourg) sur les 18 situés dans la zone d'intérêt sont caractérisés par des niveaux d'eau moins bien reproduits. En ce qui concerne la reproduction des débits, la qualité de la calibration en régime transitoire est jugée comme bonne dès lors que seul le débit drainé par l'Ijse semble fortement surestimé alors que les autres débits simulés sont jugés bons compte tenu des mesures disponibles.

Sur cette base, les hypothèses ayant permis de construire le modèle conceptuel et *a fortiori* le modèle numérique sont validées.

Le **CHAPITRE 6** concerne l'étude de sensibilité. Celle-ci a été réalisée sur bon nombre de paramètres d'entrée du modèle hydrogéologique, à savoir :

- l'infiltration ;
- la conductivité hydraulique ;
- les débits prélevés par pompage ;

- les niveaux d'eau imposés aux rivières et collecteurs ;
- la porosité ;
- le coefficient d'emmagasinement.

Les impacts de modifications de ces paramètres ont été évalués sur :

- la piézométrie ;
- les débits ;
- l'indicateur de qualité SRMS.

Il a ainsi été démontré que l'influence des débits prélevés par pompage, des niveaux d'eau imposés aux rivières et collecteurs, de la porosité et du coefficient d'emmagasinement est largement inférieure à celle de l'infiltration et de la conductivité hydraulique. Pour cette raison, c'est l'incertitude existant sur ces deux derniers paramètres qui a été prise en considération pour évaluer l'incertitude sur les résultats présentés au **CHAPITRE 7**.

Les objectifs du modèle sont repris ci-dessous (avec indication du chapitre reprenant les résultats associés) :

- estimer les ressources disponibles (**CHAPITRE 7.2**) ;
- quantifier les échanges d'eau souterraine avec la Région Flamande (**CHAPITRE 7.3**) ;
- mettre en évidence les interactions pouvant exister entre la masse d'eau souterraine du Bruxellien et les eaux de surface de la Woluwe (**CHAPITRE 7.4**).

Pour répondre à ces objectifs, plusieurs scénarii ont été réalisés dans les conditions suivantes :

- en régime permanent, avec une infiltration calculée sur la base de l'eau utile moyenne à très long terme et avec un volume prélevé par les puits en Région de Bruxelles-Capitale :
 - o identique à celui de 2013 (**SCÉNARIO N°1**) ;
 - o augmenté de 50 % par rapport à 2013 (**SCÉNARIO N°2**) ;
 - o augmenté de 100 % par rapport à 2013 (**SCÉNARIO N°3**) ;
- en régime transitoire sur une période de cinq années, avec une infiltration représentative d'une alimentation faible et avec un volume prélevé par les puits en Région de Bruxelles-Capitale :
 - o identique à celui de 2013 (**SCÉNARIO N°4**) ;
 - o augmenté de 50 % par rapport à 2013 (**SCÉNARIO N°5**) ;
 - o augmenté de 100 % par rapport à 2013 (**SCÉNARIO N°6**) ;
- en régime transitoire sur une période de cinq années, avec une infiltration représentative d'une alimentation élevée et avec un volume prélevé par les puits en Région de Bruxelles-Capitale :
 - o identique à celui de 2013 (**SCÉNARIO N°7**) ;
 - o augmenté de 50 % par rapport à 2013 (**SCÉNARIO N°8**) ;
 - o augmenté de 100 % par rapport à 2013 (**SCÉNARIO N°9**).

Chacun de ces scénarii est accompagné de simulations visant à évaluer l'incertitude sur les résultats.

OBJECTIF 1 – ESTIMATION DES RESSOURCES DISPONIBLES

Pour estimer les ressources disponibles, l'évolution des débits drainés naturellement en Région de Bruxelles-Capitale ainsi que l'évolution des niveaux d'eau de la *nappe du Bruxellien* ont été étudiées.

Le **TABLEAU 8-1** ci-après reprend une synthèse des résultats.

Le contexte piézométrique bas est identique aux périodes basses observées depuis que le monitoring automatique est mis en œuvre, à savoir au maximum 2 – 3 mètres sous le niveau piézométrique moyen. Le contexte piézométrique haut est, à l'inverse, 2 – 3 mètres au-dessus du niveau piézométrique moyen.

	Contexte piézométrique	Débit drainé par la galerie Vivaqua (Mm ³ /an)	Débit drainé par les collecteurs (Mm ³ /an)	Débit drainé par les tronçons amont de la Woluwe (Mm ³ /an)	Débit prélevé par les puits en Région de Bruxelles-Capitale (Mm ³ /an)
SCÉNARIO N°1	moyen	1.7 à 2.5	22 à 28	2.5 à 3.6	0.4
SCÉNARIO N°2		1.6 à 2.4			0.6
SCÉNARIO N°3		1.5 à 2.3			0.8
SCÉNARIO N°4	bas	1.2 à 1.7	17 à 22	1.6 à 2.5	0.4
SCÉNARIO N°5		1.1 à 1.6			0.6
SCÉNARIO N°6		1.1 à 1.6			0.8
SCÉNARIO N°7	élevé	2.2 à 3.0	26 à 34	3.5 à 4.8	0.4
SCÉNARIO N°8		2.2 à 2.9			0.6
SCÉNARIO N°9		2.1 à 2.8			0.8

Tableau 8-1 : Synthèse des évaluations des ressources pour les 9 scénarii

Ces différents scénarii ont démontré que le niveau d'eau de la nappe est principalement gouverné par la recharge. Dès lors que les dernières années sont caractéristiques d'une recharge assez faible et que le suivi à long terme illustre une cyclicité récurrente entre des périodes de recharge faible et des périodes de recharge élevée, il peut être supposé que l'on se dirige vers une remontée progressive du niveau de la nappe.

La période actuelle est jugée particulièrement basse dès lors qu'une période de recharge modérée (2009 – 2013) a succédé à une période de recharge très faible (2005 – 2008).

Bien que la sensibilité du modèle à l'infiltration soit jugée un peu trop élevée, le modèle est capable de reproduire différents contextes de recharge. Il apparaît, à travers ces différents scénarii, que l'impact d'une augmentation des débits de pompage par les puits aura un effet similaire dans les différents contextes de recharge. Ainsi, il peut être jugé que les ressources disponibles actuellement (et *a fortiori* durant les prochaines années) ne risquent pas d'être mises à mal par une augmentation du débit des puits.

Enfin, bien que des incertitudes existent sur les niveaux d'eau comme sur les débits sortant, il peut être conclu que l'exploitation actuelle de la nappe en Région de Bruxelles-Capitale est durable et que les ressources disponibles sont suffisantes par rapport au niveau d'exploitation.

OBJECTIF 2 – QUANTIFICATION DES ÉCHANGES ENTRE RÉGIONS

Pour estimer les échanges à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale, les mêmes scénarii ont été réalisés.

Le **TABLEAU 8-2** ci-après reprend une synthèse des résultats.

	Flux entrant (Mm ³ /an)	Flux sortant (Mm ³ /an)	Balance globale (Mm ³ /an)
SCÉNARII N°1 à 3	5.2 à 7.8	2.1 à 3.3	3.1 à 4.5
SCÉNARII N°4 à 6	4.6 à 7.2	1.9 à 3.0	2.7 à 4.1
SCÉNARII N°7 à 9	5.5 à 8.6	2.4 à 3.8	3.2 à 4.8

Tableau 8-2 : Synthèse des évaluations des flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale pour les 9 scénarii

Les flux varient quelque peu avec la variation de la recharge. Cette variation est d'environ 10 % à la baisse en cas de recharge très faible et de 5 % à la hausse en cas de recharge très élevée. Compte tenu des variations climatiques et de l'incertitude propre au modèle hydrogéologique, le transfert entre la Région Flamande et la Région de Bruxelles-Capitale est compris globalement entre 2.7 Mm³/an et 4.8 Mm³/an (en direction de la Région de Bruxelles-Capitale). Le flux entrant dans la Région de Bruxelles-Capitale est compris entre 4.6 et 8.6 Mm³/an. Le flux sortant de la Région de Bruxelles-Capitale est compris entre 1.9 et 3.8 Mm³/an.

Dans tous les cas, les flux entrants principaux sont situés :

- le long de la frontière Sud et, en particulier, en amont de la galerie Vivaqua ;
- le long de la frontière Est.

Les flux sortants principaux sont situés le long de la frontière Nord.

Cette balance positive vers la Région de Bruxelles-Capitale ne signifie pas qu'il y a une accumulation d'eau au sein de la nappe dans la Région mais plutôt un grand nombre d'exutoires. En l'occurrence, il s'agit principalement des collecteurs, de la Senne, de la Woluwe et de la galerie Vivaqua.

OBJECTIF 3 – INTERACTIONS AVEC LES EAUX DE SURFACE DE LA WOLUWE

Pour évaluer les interactions entre les eaux de surface de la Woluwe et les eaux souterraines, les mesures de débit aux différentes stations ont été interprétées et les débits drainés par la rivière ont été simulés selon les différents scénarii.

Les stations de mesures illustrent que le drainage de la nappe par la rivière est important dans les tronçons en amont des stations de Middlebourg et de Kloosterberg. En aval de ces stations, le collecteur de la Woluwe, situé plus bas que la rivière, joue le rôle de drain principal.

Les interactions entre le collecteur, la rivière et les eaux souterraines sont extrêmement complexes et ne peuvent être caractérisées plus complètement dans le cadre de cette étude compte tenu des nombreuses incertitudes existant notamment sur le débit drainé par le collecteur, la localisation des zones les plus drainantes, l'impact des étangs, etc...

Pour les tronçons amont, le modèle reproduit bien le niveau de drainage mesuré. Les simulations permettent d'apprécier le temps de parcours et l'orientation des lignes de flux en direction de la Woluwe. Le **TABLEAU 8-3** ci-dessous reprend l'estimation des débits drainés par les tronçons amont pour les différents scénarii réalisés.

	En amont de Middlebourg (Mm ³ /an)	En amont de Kloosterberg (Mm ³ /an)
SCÉNARII N°1 à 3	0.7 à 1.1	1.9 à 2.5
SCÉNARII N°4 à 6	0.4 à 0.7	1.2 à 1.8
SCÉNARII N°7 à 9	1.0 à 1.6	2.5 à 3.2

Tableau 8-3 : Synthèse des évaluations des flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale pour les 9 scénarii

CONCLUSION GÉNÉRALE

La masse d'eau des Sables du Bruxellien s'écoule depuis le Sud vers le Nord en Région de Bruxelles-Capitale. Les flux entrants principaux sont localisés le long de la frontière Sud et Sud-Est de la Région. Les flux sortants principaux sont localisés le long de la frontière Nord.

La piézométrie est principalement influencée par la variation de la recharge, et donc de la pluviométrie, de la température extérieure et de l'urbanisation. Ce dernier point est essentiel dans le cadre de la gestion d'une ville comme Bruxelles.

L'état actuel des ressources est satisfaisant et selon toute vraisemblance, le restera même en cas d'augmentation du débit de prélèvement par les puits pour autant que les conditions de recharge n'évoluent pas de façon exceptionnelle et inattendue.

Les principaux exutoires en Région de Bruxelles-Capitale sont les collecteurs, la galerie Vivaqua et le réseau hydrographique (la Woluwe draine la nappe majoritairement le long de ses tronçons les plus amont).

PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Le modèle hydrogéologique est très bien calibré et apte à reproduire une série de phénomènes hydrogéologiques complexes. L'outil, fourni à l'IBGE, pourra dès lors être utilisé à des fins prédictives pour la bonne gestion de la masse d'eau des Sables du Bruxellien en Région de Bruxelles-Capitale.

Dans le but d'améliorer davantage sa capacité prédictive et par le principe de précaution d'usage pour la protection de l'environnement, le performant outil développé serait idéalement enrichi par l'acquisition de nouvelles données afin de réduire les sources d'incertitudes sur les résultats identifiées et inhérentes à tout modèle. Il conviendrait par conséquent en priorité d'affiner l'estimation de l'infiltration, paramètre auquel le modèle est assez sensible. En second lieu, il serait intéressant d'améliorer l'évaluation du débit drainé par les rivières, ruisseaux et collecteurs afin d'obtenir des débits plus contraignants pour calibrer le modèle hydrogéologique.

L'obtention de données plus précises en ce qui concerne les prélèvements par pompage semble moins prioritaire, eu égard à la sensibilité plus faible du modèle vis-à-vis de cette donnée, excepté pour des cas particuliers.

Ces nouvelles données sources et leur intégration dans le modèle hydrogéologique auraient pour conséquence directe une diminution des incertitudes sur les résultats.

Dans le cas d'une exploitation du modèle hydrogéologique pour répondre à des objectifs plus locaux ou différents de ceux définis pour la présente étude, l'utilisateur doit impérativement vérifier la validité du modèle conceptuel compte tenu du fait que le modèle a été construit pour répondre à des objectifs régionaux.

Rapport final rédigé à Noville-les-Bois le 9 décembre 2015.



O. BOUHON

*Ir. Hydrogéologue
Responsable Permitting
AQUALE s.p.r.l.*

**Institut bruxellois pour la gestion de
l'environnement**

**RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE
LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU BRUXELLIEN**

Rapport final (phase II)

Annexe 1 : Présentation détaillée du logiciel FEFLOW®

R-2015-031

DECEMBRE 2015



Key Features in Groundwater Simulation Codes

FEFLOW® is offered in *six* feature levels:

Symbol	Hierarchical level of feature extent	FEFLOW license ident
0	Flow 2D	F2
1	0 + Mass 2D	FM2
2	1 + Heat 2D + Flow 3D	F3
3	2 + Mass 3D	FM3
4	2 + Heat 3D	FH3
5	3 + Heat 3D	FMH3

Any level includes all the features of all lower levels. Accordingly, license pricing increases with feature level. Symbols indicate the lowest level at which the respective feature is available. For example, the symbol 2 denotes features that are available at levels 2, 3, 4 and 5. Features available at *all* levels are indicated by the symbol 0.

1 Basics

	FEFLOW
Integrated pre- and postprocessing	0
Interactive graphics	0
Data interfacing to GIS	0
Data interfacing to CAD	0
Programming interface (C, C++)	0
No internal software limits	0
Microsoft windows platforms	0
LINUX/UNIX platforms	0
64-bit technology	0

2 Physics

	FEFLOW
Darcy fluid flow in porous media	0
Variably saturated porous media	0
Free surface (phreatic) flow	0
Single-species mass transport	1
Multi-species reactive mass transport	1
Multi-phase flow and transport	
Heat (nonisothermal) transport	2
Variable-density transport	1
Thermohaline flow	2
Multi-diffusive convection	1

Key Features in Groundwater Simulation Codes

2 Continued from *Physics*

	FEFLOW
Fracture flow	0
Fracture mass transport	1
Fracture heat transport	2
Transient problems	0
Steady problems	0

3 Mathematics

	FEFLOW
Finite element method (FEM)	0
Finite difference method (FDM)	
Finite volume method (FVM)	
Discrete feature elements (fracs)	0
Adaptive time stepping (ATS)	0
Adaptive mesh refinement (AMR)	0

4 Dimensions

	FEFLOW
Three dimensions (3D)	2
Quasi three dimensions (Q3)	
Two-dimensional vertical plane (2V)	0
Two-dimensional horizontal plane (2H)	0

4 Continued from *Dimensions*

	FEFLOW
Axisymmetric (meridional) plane (2X)	0
One dimension (1D)	

5 Meshing

	FEFLOW
Prismatic elements in 3D	2
Tetrahedral elements in 3D	
Unstructured triangular meshes	0
Structured quadrilateral meshes	0
Delaunay meshes	0
Using add-ins in mesh generation	0
Refinement techniques	0
Derefinement (encoarsening) techniques	0
Node movement	0
Element edge flipping	0
Element deletion	0
Mesh reflection	0
Mesh coordinates transformation	0
Moving mesh for 3D free-surface problems	2

Key Features in Groundwater Simulation Codes

6 Maps

	FEFLOW
Loading background maps	0
Use maps for mesh design	0
Joining maps for direct data assignment	0
Use maps in 3D drawings	0

7 Data Support

	FEFLOW
Direct Read of Vector Data	
ESRI Shapefiles	0
ESRI coverages	0
ASCII	0
Internal binary interchange format (PLX)	0
Direct Read of CAD Data	
AutoCAD DXF	0
Direct Read of Raster Data	
Tagged image file format (TIFF)	0
JPEG file interchange format (JFIF)	
Exporting Vector Data	
ESRI Shapefiles	0
ASCII	0

7 Continued from Data Support

	FEFLOW
Internal binary interchange format (PLX)	0
Exporting CAD Data	
AutoCAD DXF	0
Exporting Raster Data	
ESRI ASCII grids	0
Surfer grids	0

8 Data Management

	FEFLOW
Direct linkage to dBase IV tables	0
Direct linkage to ASCII tables	0
Direct linkage to ESRI INFO databases	0

9 Data Regionalization

	FEFLOW
Akima interpolation	0
Inverse distance weighting (IDW)	0
Kriging	0
Customized data mapping techniques	0
Polygon-related regionalization (joining)	0

Key Features in Groundwater Simulation Codes

9 Continued from *Data*

	FEFLOW
Interpolation of time-varying 1D functions	0
Interpolation of time-varying 2D functions	0

10 Editing

	FEFLOW
Geometry Construction Tools Including	
Point-and-click location with mouse	0
X, Y coordinate input with mouse	0
Snap to vertex, endpoint, or along the edge	0
Undo/redo operations	0
Assign edges as parabolic segments	0
Assign edges as circular segments	0
Move, rotate, split, delete, copy, and paste operations	0
Intersection of two segments	0
Auto-close for polygons	0
Attribute Data Assigning Tools for Initial, Boundary and Material Conditions Including	
Mouse selection	0
Data mapping (regionalization)	0
Tools for data exploring and retrieval	0

10 Continued from *Editing*

	FEFLOW
Time-varying databases for 1D curves and 2D distributions	0
Copy, joining and debug operations	0
Data inheritance in mesh enrichment and layer (re-)configuration	0
Trimming layer thicknesses and distances	0

11 Boundary Conditions

	FEFLOW
Dirichlet-type	0
Neumann-type	0
Cauchy-type (leakage)	0
Well-type	0
All boundary conditions can be transient	0
All boundary conditions can be constrained	0
Specific Boundary Conditions	
Hydraulic head	0
Pressure	0
Seepage face	0
Saltwater head	1
Saturation	0
Moisture content	0

Key Features in Groundwater Simulation Codes

11 *Continued from Boundary*

	FEFLOW
Integral flux	2
Free drainage	0
Multi-layer well (well bore condition)	2
Borehole heat exchanger (BHE)	4
Total mass flux	1
Total heat flux	2
Dispersive mass flux	1
Conductive heat flux	2

12 *Boundary Constraints*

	FEFLOW
Neumann constraint for Dirichlet-type	0
Dirichlet constraint for Neumann-type	0
Neumann constraint for Cauchy-type	0
Dirichlet constraint for Cauchy-type	0
Dirichlet constraint well-type	0
All constraints can be transient	0

13 *Material Data (General)*

	FEFLOW
Time-constant distributions	0
Time-variable distributions	0
User-defined formula for sink/source relationships	0
Anisotropy of hydraulic conductivity in 2D	0
Axis-parallel anisotropy of hydraulic conductivity in 3D	2
Layer-oriented anisotropy of hydraulic conductivity in 3D	2
General (full) anisotropy of hydraulic conductivity in 3D	2
Anisotropy factor of solid heat conductivity in 3D	4

14 *Unsaturated Material Data*

	FEFLOW
Empirical Laws for Capillary Pressure and Relative Conductivity Relations	
van Genuchten - Mualem (α - n params)	0
van Genuchten - modified (α - n - m params) with regularization	0
Splines (cubic; monotonic, non-monotonic)	0
Brooks - Corey	0
Haverkamp	0
Exponential	0

Key Features in Groundwater Simulation Codes

14 Continued from *Unsaturated*

	FEFLOW
Linear	0
Hysteresis	0

15 Model Options for Variably Saturated Flow Problems

	FEFLOW
Standard Richards equation	0
Mixed (saturation-pressure) formulation	0
Primary variable substitution (switching)	0
Picard method	0
Newton method	0
Residual error control	0
Kirchhoff integral transformation in steady-state	0
Gravity direction setting	0

16 Free Surface (Phreatic) Conditions

	FEFLOW
Unconfined aquifers	0
Confined aquifers	0

16 Continued from *Free Surface (Phreatic) Conditions*

	FEFLOW
Moving (adaptive) mesh strategy	2
Fixed mesh strategy	2
Multiple free surfaces (perched water)	2
Control of partially-saturated cells/elements by a linear relation of the cell filling height	2
Control of dry cells/elements by a residual pseudo-saturation	2
Control of dry cells/elements by deletion	

17 Fracture Elements

	FEFLOW
Flow Laws	
Darcy	0
Hagen-Poiseuille	0
Manning-Strickler	0
Pipes (1D)	0
Faces (2D)	2
Horizontally placed	0
Vertically placed	2
Arbitrarily placed in 3D	
Variable-density flow and transport	1

Key Features in Groundwater Simulation Codes

17 *Continued from Fracture Elements*

	FEFLOW
Extended Oberbeck-Boussinesq approximation	1

18 Chemical Reactions

	FEFLOW
Equilibrium reaction (sorption)	
Henry	1
Freundlich	1
Langmuir	1
Nonequilibrium reaction	
1st order linear decay	1
Michaelis-Menten	1
Decay chains	1
Multi-species reaction kinetics	
Degradation	1
Arrhenius	1
Monod	1
User-specified type with an interactive reaction kinetics editor FEMATHED: Freely editable reactions using a fast formula interpreter, including conditional expressions	1

19 Variable Fluid Density

	FEFLOW
Default Oberbeck-Boussinesq approximation	1
Extended Oberbeck-Boussinesq approximation	1
Constant expansion	1
Variable (higher-order) expansion	2
Gravity direction setting	1
Viscosity dependency	1
User-defined formula for viscosity relationships	1
Non-Fickian (high-concentration) mass flux	1
Consistent velocity approximation	1
Variable fluid density in fractures	1

20 Time Stepping Methods

	FEFLOW
Constant time steps (user-predefined)	0
Variable time steps (user-predefined)	0
Adaptive error-controlled time steps	0
Implicit in time	0
Explicit in time	
Mixed, 2nd-order scheme (Crank-Nicolson)	0
Time step modifiers (maximum, increase limits)	0

Key Features in Groundwater Simulation Codes

21 Numerical Stabilization

	FEFLOW
Upstream weighting (unsaturated problems)	0
Streamline upwinding (SU)	1
Full upwinding (FU)	1
Shock capturing (SC)	1
Petrov-Galerkin least-square upwinding (PGLS)	1

22 Sparse Matrix Equation Solvers

	FEFLOW
Preconditioned conjugate gradient method (PCG)	0
Algebraic multigrid (AMG) with OMP extension	0
Restarted orthogonalization-minimization method (ORTHOMIN)	0
Restarted generalized minimal residual method (GMRES)	0
Conjugate gradient square method (CGS)	0
Bi-conjugate gradient stable method (BiCGSTAB)	0
Postconditioned bi-conjugate gradient stable method (BiCGSTABP)	0
Direct Gaussian equation solvers	0

22 Continued from Sparse Matrix Equation Solvers

	FEFLOW
Solver parameter settings (stop criteria, maximum iteration numbers, etc.)	0

23 Parallel Computing

	FEFLOW
Supports hyper-threading in processor units	0
Supports multiprocessor multicore hardware systems	0

24 Particle Tracking

	FEFLOW
Stationary	0
Transient	0
Isochrones	0
2D	0
3D	2
Forward	0
Backward	0
Methods	

Key Features in Groundwater Simulation Codes

24 Continued from Particle Tracking

	FEFLOW
Pollock	0
4th-order Runge-Kutta	0
Relevant area of influence (RAI)	2

25 Resulting Data Evaluation Tools

	FEFLOW
Diagrams for observation points and wells	0
Diagrams for balanced flux quantities	0
2D graphics	0
3D graphics	2
Budget analysis	0
Fluid flux analysis	0
Content analysis (volume, mass, energy)	0
Spatial operations (differences)	0
Temporal operations (difference, deviation, cumulative changes)	0
Creating 2D cross-sectional models from 3D	2
Reverse flow field analysis	0
Legend editing	0
Diagram editing	0

25 Continued from Resulting Data Evaluation Tools

	FEFLOW
Scatter plots for spatial and temporal data	0

26 Resulting Data Graphics

	FEFLOW
Isoline contouring (2D)	0
Isoline contouring (3D)	2
Fringes (2D)	0
Fringes (3D)	2
Vector plotting (2D)	0
Vector plotting (3D)	2
Visualization of vector fields by texture transport (2D)	
Visualization of vector fields by texture transport (3D)	
Pathlines (2D)	0
Pathlines (3D)	2
Isochrones (2D)	0
Isochrones (3D)	2
Streamlines (2D)	0
Isosurfaces (3D)	2
Cutting (3D)	2

Key Features in Groundwater Simulation Codes

26 *Continued from* **Resulting Data**

	FEFLOW
Map overlay (3D)	2
Fences and cross-sections (3D)	2
Animation, video creation (2D)	0
Animation, video creation (3D)	2

27 **Interface Modules**

	FEFLOW
Parameter estimator (PEST), steady and unsteady	0
Coupling with the surface water model MIKE11 [†] (unsteady groundwater - river network simulation)	0

†) requires extra license

OVERVIEW

3D Groundwater Flow, Mass, and Heat Transport Finite Element Groundwater Modeling Software

FEFLOW FMH3[®] (Finite Element subsurface FLOW system) is one of the most sophisticated software packages available for the modeling of flow and transport processes in porous media under saturated and unsaturated conditions.

Integral components are interactive graphics, a GIS interface, data regionalization and visualization tools and powerful numeric techniques. These components ensure an efficient working process building the finite element mesh, assigning model properties and boundary conditions, running the simulation, and visualizing the results.

FEFLOW FMH3 major features are:

- Two or three dimensional modeling
- Stationary or instationary simulation
- Computation of saturated / variable saturated or unsaturated conditions
- Computation of mass and/or heat transport
- Integration of chemical reactions and degradation mechanisms
- Adsorption using sorption isotherms by Henry, Freundlich or Langmuir
- Consideration of variable fluid density because of temperature or salt concentration
- One and two dimensional finite elements for flow and transport in fractures, channels or tubes
- FEFLOW FMH3 is handled exclusively by interactive graphical user interfaces.
- The complexity of problem design, problem generation and solution is completely kept in the background.
- The system is completely self-explaining
- The system is based on a hierarchical structure
- FEFLOW FMH3 is available for different operating systems of the UNIX as well as the Windows world.
- FEFLOW FMH3 contains more than 1.100.000 lines of code in ANSI C/C++.

FEFLOW is a registered trademark of WASY GmbH

APPLICATIONS

FEFLOW FMH3 offers a virtually unlimited application area in the groundwater flow and transport processes simulation including:

- Study of pollutant dispersion in case of contaminated sites, waste sites or averages
- Evaluate remediation and decontamination strategies in case of contaminated groundwater
- Study of groundwater drawdown and rise in mining areas and reservoir construction
- Isotope computation for detection of groundwater age
- Assessment of availability of groundwater resources
- Estimation and control of strategies for groundwater management
- Design of well-head protection zones
- Studies for environmental impact assessments
- Design of groundwater monitoring programs
- Applications in research

Groundwater Modeling

Determine the spatial and temporal distribution of groundwater heads and contaminants.

Contaminant Transport

Estimate of duration and travel times of a pollutant in aquifers.

Seawater Intrusion

Evaluate the impact of sea water intrusion due to groundwater pumping and/or mining activities along coastal regions.

Nuclear Waste Disposal

Simulate the combined effects of geothermal gradients and saline groundwater flow for deep well injection of nuclear wastes.

Mine Dewatering

Design and optimize pumping well locations and pumping rates and determine the influence of dewatering activities on local and regional groundwater supplies.

Groundwater Remediation

Evaluate remediation alternatives, plan remediation strategies, and optimize groundwater remediation system designs.

Dam Seepage

Analyze moisture dynamics and seepage through the dam.

Aquifer Recharge

Predict rates of infiltration/aquifer recharge due to precipitation, storm water retention ponds or artificial aquifer recharge schemes.

DETAILS

PROBLEM CLASSES

Analysis of both saturated (groundwater) and unsaturated aquifers is possible. For unsaturated conditions the nonlinear Richards equation is available as well as the van Genuchten-Mualem, Brooks-Corey and Haverkamp equations. Alternatively, for three dimensional regional unconfined aquifers a multiple free surface approach using moving meshes has been developed.

Transient or steady-flow conditions:

The flow and transport can be either transient or steady-state.

Modeling of the Unsaturated Zone

- Consideration of variable saturation
- Different parameter models:
 - van Genuchten
 - Brooks-Corey
 - van Genuchten modified
 - Haverkamp
 - Exponential
 - Linear
- Different forms of the Richards equation
- Consideration of capillary hysteresis
- Parameter fitting for different parameter models in FE-LM²

Mass Transport Modeling

- Consideration of sorption according to the:
 - Henry
 - Freundlich
 - Langmuir isotherms
- Decay processes:
 - Reactions of 1. order
 - Michaelis-Menten reactions
 - radioactive decay using an external module
- Parameter fitting for the sorption isotherms in FE-LM²
- Linear or nonlinear dispersion
- Galerkin-FEM, Streamline-, Shock-Capturing-, Least-Square- or Full-Upwinding
- Density coupled modeling for concentration-dependent fluid density and fluid viscosity
- Simultaneous modeling of heat and mass transport

Multi or single component Transport (species)

The conservation equation is solved for a single component governed by advection, diffusion, mechanical dispersion, retardation, zero and first-order reaction terms.

FEFLOW allows simulating multi-species transport with an arbitrary number of components. Besides an intuitive definition of arbitrary reaction terms in the new equation editor, Degradation, Arrhenius and Monod reactions are available as pre-defined equations.

Altogether, a reactive term can use an arbitrary number of components. The mass transport parameters, like diffusion, dispersion, sorption and reaction rate can be individually edited and spatially distributed.

Heat Transport Modeling

- Heat conductance and storage in the fluid phase
- Heat conductance and storage in the matrix
- User-defined heat transport parameters of fluid and matrix
- Density-coupled modeling for temperature-dependent fluid density and fluid viscosity
- Simultaneous modeling of heat and mass transport

IFM

Under some circumstances it can be necessary to have more influence on the simulation, data regionalization, visualization, and more. In this case FEFLOW provides a tool called Interface Manager (IFM).

The IFM manages an arbitrary number of external modules. An installed, registered, and activated module can access FEFLOW's internal data store and method pool via a published programming interface (API).

Depending on the principle of integration with FEFLOW's internal methods two basic types of interfaces can be subdivided: (1) the external module replaces the FEFLOW-internal methods or (2) the external module extends the internal functionality.

Functions for the open programming interface IFM:

- 'Set' and 'Get' functions for fracture properties
- 'Set' and 'Get' functions for drying curve properties (hysteresis)
- Setting of predictor values for predictor/corrector time-stepping schemes
- Extended functions for boundary constraint conditions
- 'Get' and 'Set' functions for adaptive mesh refinement (AMR) estimators
- Various functions for time-step control parameters, solver types and specific options settings

PEST

The interface to the automatic parameter estimation program allows optimizing transient processes.

MESH GENERATION

Superelement mesh

The mesh editor allows to automatically close the actual superelement if you construct more than one, eliminating the laborious task of clicking on existing superelement nodes is no longer necessary.

Gridbuilder

For the generation of the finite element mesh, the mesh generator Gridbuilder is available. Gridbuilder has its main advantages in very flexible refinement along add-ins and polygon borders and in the handling of complex superelement meshes.

Additional options for Triangle mesh generator

Using the Triangle mesh generator, the mesh can be refined along specific sections of polygon borders or add-ins. A target element size can be specified to define the maximum edge length for elements at borders or add-ins.

Edge flipping for mesh improvement

The mesh geometry editor can flip edges for two neighboring elements in triangle meshes. This is useful for improving the mesh quality, and avoiding obtuse angles at specific locations.

BOUNDARY CONDITIONS

Dirichlet, Neumann and Cauchy-type boundary conditions can be specified for flow, mass and heat. A so-called 4th kind boundary condition exists for singular wells. These boundary conditions can be arbitrarily placed at nodal points of a two or three dimensional mesh. All boundary conditions can be specified either as steady-state or as transient conditions.

For each boundary condition constraint formulations can be combined. They represent limitations of boundary conditions and result from the requirement that boundary conditions should only be valid as long as minimum and maximum bounds are satisfied. The constraints can also be time-dependent

Specified internal conditions

There are no spatial and temporal limitations in prescribing boundary conditions and their corresponding constraints of a mesh. The boundary conditions are node-related while material parameters are element-related. Both nodal and elemental quantities can be transient if desired.

Stresses

Rainfall or evaporation are normally modeled by sink/source formulations. They may also be time-dependent. Pumping or injection conditions of singular wells are described by a boundary condition of 4th kind. Multi-layer pumping or injection wells are also accommodated in three dimensions.

Optional BC input: Pressure, Seepage Face, Saltwater Head, Saturation and Moisture Content

Instead of using values of hydraulic head, the Dirichlet boundary conditions can be done by using pressure values, setting a seepage face condition, automatically converting a saltwater head into a freshwater head or setting saturation or moisture content under unsaturated conditions.

Multi-Layer Well Input Dialog

Wells with screens in multiple layers can be input by specifying the top and bottom of the well screen(s), avoiding a manual selection of each slice in the range of the screening.

Layer-Related Evaluation of Fluid Flux for Multi-Layer Wells

For multi-layer wells, the flows into the well in the respective layers can be calculated by using the fluid flux analyzer.

Natural Constraints

FEFLOW allows setting natural constraints on the top and bottom slice to obviate a falling dry of the model or an increasing of the water table above the surface. Users can now set an additional constraint condition to the boundary condition either “water table” or “seepage face” types for the natural constraint.

DISCRETE ELEMENTS

User-defined reactions and source/sink terms in discrete elements

Arbitrary relationships for multi-species reactions and source/sink terms can also be specified in discrete elements using the formula editor.

Automatic switch-off of fracture elements in unsaturated soil

Discrete feature elements are automatically switched off if at one node of the element the pressure is below zero. This is done in both the unsaturated mode using Richards' equation and in phreatic

mode.

Mesh inspector for copying discrete feature data

Properties of an existing discrete element can be copied into the input boxes for new elements by hitting the left mouse button while using the Mesh inspector.

Extended Oberbeck-Boussinesq approximation for fracture elements

The extended Oberbeck-Boussinesq approximation is now also applied to discrete feature elements.

PARAMETERS

All parameters are handled on an elemental level, they can differ from element to element and it is possible to consider those as steady-state or transient quantities. Accordingly, parameter heterogeneity, zoning or constant settings are arbitrarily possible.

The input and assignment of the parameter is done via a graphical problem attribute editor. This attribution encompasses different graphical assignment methods, and also interpolation techniques.

A more general programming interface is also available, which allows manipulation of parameters during simulation runs.

Material and Physical Properties

User-defined equations for source/sink and recharge

For the source/sink and in/outflow on top/bottom parameters in flow materials and for the source/sink parameters in mass and heat transport modeling an equation editor is available, so that user-defined relationships are possible.

Reactions in single-species transport can be limited to the fluid or solid phase only

For single-species transport, reactions can be limited to either the fluid or the liquid phase.

Additional parameters for user-defined reaction

The reaction kinetics editor provides additional parameters such as time, time-varying functions, and elemental reference distributions, for application in the user-defined chemical reactions.

Automatic generation of Euler angles for full 3D anisotropy

Using full 3D anisotropy with user-defined Euler angles, the initial Euler angles can be calculated automatically from the layer inclination.

Species-dependent density relationships

For each species a separate ratio can be specified, considering different concentration-density relationships for the simulated species.

User-defined viscosity relationship

The built-in viscosity relationship can be replaced by user-defined relationships. The formula editor is used to specify an arbitrary equation.

Storage change is considered for time-varying storativity

In case of time-varying storativity, the change in storage due to changed storativity is now considered altered.

Anisotropy

Additional to the axis-parallel and layer-oriented systems of anisotropy, the Eulerian angles can freely be edited for representing complete 3D anisotropy.

REFERENCE DATA

Scatter plots for comparison of results and observation data

Scatter point plots are available for comparing both steady-state results with observation values and measured and calculated time curves. The locations of the compared points are indicated on the model domain, values are shown by tool tips.

Elemental reference distributions

Elemental reference distributions can be defined in the same way as the nodal parameter fields. These user-defined elemental parameter distributions can be used to incorporate arbitrary spatial parameter distributions in user-defined equations.

Import of observation points on multiple slices from shape files

In addition to the observation point names the slice number to put the observation point can also be imported from ESRI shape files.

SOLVERS

The solution of sparse equation systems can be solved either by iterative or direct techniques. As default and especially for large systems, the following, methods are available:

Preconditioned Conjugate Gradient (PCG)

Standard preconditioners such as the incomplete factorization (IF) technique and, alternatively, a modified incomplete factorization (MIF) technique based on the Gustafsson algorithm are used.

Alternatives for the CG-like solution of the unsymmetric transport equations include:

- Restarted ORTHOMIN (orthogonalization-minimization) method
- Restarted GMRES (generalized minimal residual) technique
- Lanczos-type methods such as CGS (conjugate gradient square), BiCGSTAB (bi-conjugate gradient stable) and BiCGSTABP (postconditioned bi-conjugate gradient stable)

Crout Decomposition Scheme

For small or ill-posed problems, direct Gaussian elimination techniques for symmetric and unsymmetric matrices are available. Here, the Reverse Cuthill-McKee (RCM) nodal reordering technique are used to minimize fill-in entries of the matrices.

New version of SAMG, supporting parallel computing

The OpenMP version of SAMG 2.2 supports parallel computing on machines with multiple processors and/or multiple-core processors. So now even the solution process itself can be done in parallel.

SAMG

The solver SAMG, especially approved for steady state problems, can be efficiently used for transient and mass transport models. The reduction of simulation time can be formidable with SAMG's parallel processing capabilities.

NUMERICAL METHODS

FEFLOW uses a Galerkin finite element numerical approach with a selection of numerical solvers and state-of-the-art tools for controlling and optimizing the solution process including:

- Fast and direct solvers such as the PCG and Restarted ORTHOMIN Methods with preconditioning
- Variable types of solution up-winding techniques are provided to minimize numerical dispersion
- Picard and Newton iterative techniques for non-linear flow problems and adaptive time stepping
- Contaminant transport processes include advection, hydrodynamic dispersion, linear and non-linear sorption isotherms, and first order chemical non-equilibrium
- Automated adaptive mesh refinement scheme to optimize the numerical solution in regions where steep gradients exist
- Real-time graphs of transient heads and concentrations at a number of points throughout

- the model domain are plotted during the solution process
- Simulation progress can be paused at any time to view intermediate results in three dimensions

VISUALIZATION & POST PROCESSING

Feflow supports a wide class of subsurface flow, mass and heat transport problems, provides an open data interface for importing, exporting (GIS interface) and programming (interface manager IFM) and also encompasses many graphical tools in the post processing analysis of the results.

Transient particle tracking

For an exact chase of particle tracks the new transient particle tracking can be used. The tracks can be computed for the simulated time range or a specific time period. Furthermore the particle start points or lines can be loaded and exported. In contrast to previous FEFLOW versions, the particle starting points around wells can be either distributed equally, spaced or corresponding to the flux distribution.

Display and Analysis

- Interactive 3D rotation and zoom
- 3D view of the model area (finite element mesh, material properties, computed distributions) with isolines, 3D isosurfaces, cross sections etc
- 2D view with isolines, velocity vectors, background maps, etc. as a vertical cross section or horizontal projection
- 3D and 2D particle tracking with isochrone markers
- Extensive export functions: vector graphics (ESRI Shape File, DXF, FEFLOW Plot File, ASCII), screendumps, data triplets/quads, diagram points, etc
- Creation of plot layouts with extensive additional features (background maps, legends, frames, text, etc) in FEPLLOT for Windows (inclusive)
- Analysis of results in every time step as well as differential operations
- Comparison with reference data and distributions
- Creation of mass and energy balances for the model area or parts of it using the 'budget analyzer'
- Computation of flux through cross sections or single layers using the 'fluid flux analyzer'

FEFLOW comes with state-of-the-art visualization capabilities for creating high impact, three-dimensional graphics for displaying model results:

- Isolines and fringes
- Velocity vector fields
- Particle tracking (forward/reverse)
- Cross sections and fence diagrams
- 3D projections
- 3D Cut-Aways

All graphical editing is completed through FEPLLOT, the Microsoft Windows based graphical design tool included with FEFLOW. Captured plots can be georeferenced to ensure exact overlay of the map

objects. File formats include FEFLOW *.plx files, ESRI shape files, or ARC/INFO compatible ASCII files.

Fence Diagrams

FEFLOW creates cross sections and true fence diagrams to display mass concentrations, temperature distributions, computed hydraulic heads, streamline velocities, moisture & saturation distributions, and pressure distributions.

Three Dimensional Projections

Three-dimensional projections are helpful when describing computed hydraulic heads, streamline velocities, moisture & saturation distributions, and pressure distributions. The 3D projections options display these data overlaying the geo-referenced map objects for a better understanding of the simulation.

Three-Dimensional Cut-Aways

The Cut-Away-Viewer gives the user the ability to define a block portion of the model's body to be cut-away. It is a helpful tool to view parameter distributions in the inner part of the model. The cut-away can be defined by inserting screen related position coordinates in the menu or by moving the three-dimensional handlers on the model's body via the mouse.

Budget Analyzer

The 'Budget' analyzer computes quantities of fluid masses and contaminant masses entering or exiting the simulated region, sub-regions or boundary sections. The balance computation takes into account only mesh nodes occupied by values for areal recharge or boundary conditions as listed below.

The computed quantities for the fluid and contaminant mass are:

- Fluxes along outer or inner boundaries, ie. borders occupied with Dirichlet, Neumann or Cauchy boundary conditions (1st, 2nd and 3rd kind) Injections and withdrawals through single wells (4th kind)
- Areal fluxes due to infiltration, recharge, leakage etc.
- Imbalance: Gain (+)/Loss(-)

INCLUDED SOFTWARE

WGEO map tool replaces FEMAP on Windows

On Windows systems, the georeferencing tool FEMAP, is replaced by the software WGEO for georeferencing, geoinaging and coordinate conversion. A license for WGEO Basis is delivered with FEFLOW.

FEFLOW Explorer

FEFLOW Explorer allows three dimensional visualizing of FEFLOW model properties and simulation results. Some of the features are automatic rotation, fly-over and video export. Alternatively hardware-accelerated or software-optimized OpenGL graphics can be used.

New bullets vector plot style

This style uses equal-sized line segments that are individually oriented and colored according to the local flow-vector orientation and magnitude, respectively. The vector direction of each line segment is illustrated by opacity, increasing from fully translucent to fully opaque along the segment. Compared to the arrow plot style, more detail of the flow field can be discerned especially in the slower-moving regions.

Wells and observation points can be shown

Wells and observation points can be displayed as emphasized “points”. In addition, wells can also be displayed via surface flags and as pipes.

More supported image/map formats including 2D ESRI-shape files

In addition to the standard pixel image formats, vector images including 2D ESRI-shape files can be displayed as surface-mapped overlays. Multiple maps can be shown simultaneously.

Individual layers and slices accessible as plotting domains

Individual layers, slices, and the vertical hull can be used as plotting domains.

Editable color sequences

The color sequence associated with a data source can be individually edited via a convenient dialog. Color sequences are also easily inverted, exported, and imported. Several predefined sequences are available.

Animated clipping and dynamic plot-feature visibility with automatic cross-fading

Besides simulation time and object positioning, the autopilot now also controls clipping planes and plot-feature visibility over the duration of the presentation. The new dynamic clipping allows presentation (movie) effects such as a gradually extending cut-out section progressively exposing internal isosurfaces. Dynamic plot-feature visibility can be used to display multiple data sources in sequence, or to display features such as the finite-element mesh or a surface map during only a portion of the entire presentation, with smooth cross-fading at the beginning and end of the visibility period.

Off-screen (background) export rendering

During image (.bmp) or movie (.avi) export, graphics are rendered directly to the file without any screen capturing. This makes it possible to minimize the FEFLOW-Explorer window and to keep working while exporting a movie.

Redesigned memory layout permits loading of larger problems

All visible geometry vertices and their attributes are now managed in a way that permits direct, fast

drawing without having to use memory-expensive 'display lists' as in version 1.

DOCUMENTATION

FEFLOW includes a user's manual, (two) reference manuals, one dongle, and an installation CD-ROM. Technical support and upgrades are available for a duration of 30 days free of charge. An annual maintenance fee will be charged beyond the free 30 day period. Contact SWS for more information regarding the annual maintenance fee.

HARDWARE REQUIREMENTS

Hardware Requirements (PC)

- Pentium PC 133 or higher
- Exactly 256 color video mode with a resolution of 1280X1024 or higher
- 32 Mb RAM (64 or higher recommended for 3D models)
- 130 Mb free disk space
- Windows 98/NT/2000/XP/ME installed
- TCP/IP protocol installed
- X-Vision X Windows server (supplied w/ FEFLOW)

Hardware Requirements (UNIX)

- High resolution color graphics UNIX workstation, providing 8 Bit planes (25 simultaneous colors) and full 32-bit or 64-bit virtual memory architecture
- 32 Mb main memory
- 130 Mb free disk space
- recommended: RISC workstations with 1280 X1024 pixel
- UNIX System V or equivalent and optional NFS for networking

64-bit technology for Windows and Linux

FEFLOW is now available for the 64-bit versions of Windows (XP X64 Edition, Server 2003 X64 Edition, and Vista X64 Edition) and Linux (SUSE 9.2, 9.3, 10.0, 10.1, Fedora Core 4 and 5, Ubuntu 6.06). 64-bit technology is essential for running large models requiring more than about 2 GB of RAM.

Parallel computing on Windows and Linux

Parallel computing on multi-processor machines or computers with multi-core processors is now supported on both Windows and Linux systems.

Hummingbird Exceed as default X server

The X server XVision is replaced by Hummingbird Exceed as the default X server on Windows systems.

DHI-WASY Software Training

Modeling Subsurface Flow and
Transport using

FEFLOW 6.0

DHI-WASY Software Training

Modeling Subsurface Flow
and Transport using
FEFLOW 6.0

Who we are ...

DHI Group



- DHI is an independent, self-governing research and consultancy organisation (non-profit)
- DHI builds competence and promotes technological development relevant to water, environment and health
- DHI has ongoing activities world-wide
- DHI has a total staff of about 800



Introduction - 3

DHI-WASY



- Formerly
 - WASY
Gesellschaft für Wasserwirtschaftliche Planung- und Systemforschung mbH, founded 1990
 - DHI Wasser und Umwelt GmbH
German subsidiary of DHI Group, founded 2004
- Merged to DHI-WASY GmbH in 2007
- About 70 permanent staff members in:
Berlin (headquarter), Syke, Dresden, Bestensee
Offices in Cologne, Stuttgart
- Areas
 - Consulting
 - Software Solutions
 - Software Products



Headquarters Berlin-Bohnsdorf



Syke Branch



Dresden Branch

FEFLOW 6.0 Training

Introduction - 4

DHI-WASY Groundwater Modelling Centre



- Focused groundwater competence within the DHI Group
- Staff: 10 people
- Three closely integrated main fields:
 - FEFLOW Development
 - FEFLOW Services
 - Groundwater Consulting

FEFLOW Services Group



Our experienced staff assists you whenever needed by

- ... solving software problems
- ... giving advice on groundwater modeling
- ... analyzing sources of errors in your models
- ... additional explanation of functionality and providing background knowledge

In addition, we offer

- Training courses
- Solutions and software customization
- Consulting in groundwater projects

FEFLOW Services Staff

- Support
- Training
- IFM Solutions



Dipl.-Ing.
Peter Schätzl



Dr.
Wolfram Rühaak



Dipl.-Ing.
Alexander Renz



Dipl.-Ing.
Julia Mayer

DHI -WASY Software Training

Modeling Subsurface Flow
and Transport using
FEFLOW 6.0

Introduction

Introduction - 7

FEFLOW – Subsurface Flow & Transport Model

Our Modeling Subject:

More than „just“ Groundwater...

Subsurface Flow and Transport

The aim of the FEFLOW development is to cover not only the **groundwater flow**, but also to offer the complete package of **related processes** in one integrated model:

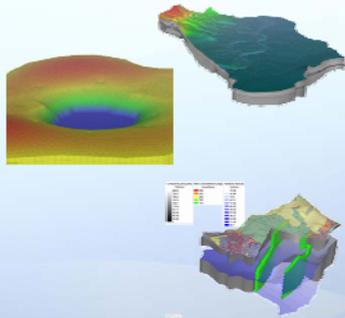
- Vadose (unsaturated) zone modeling
- Contaminant transport
- Heat transport
- Changing fluid properties (esp. density)
- Chemical reactions
- and more ...

Introduction - 8

FEFLOW – Subsurface Flow & Transport Model



Our Top Development Goals: *The software must be ...*



Easy and Productive
to quickly master everyday groundwater projects

Powerful and Comprehensive
to model the complex subsurface processes

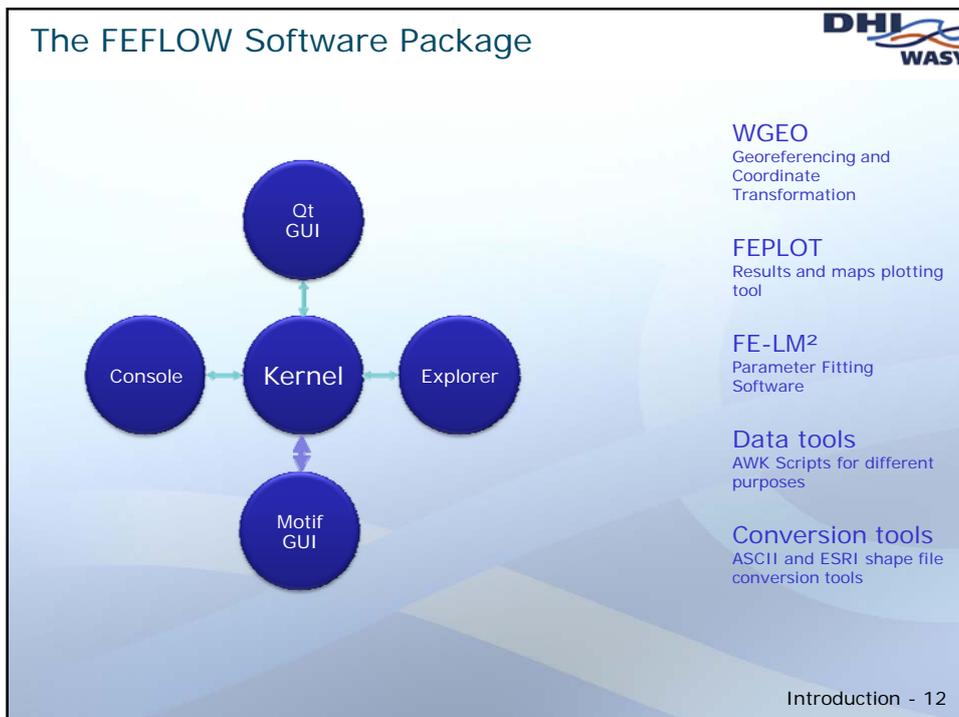
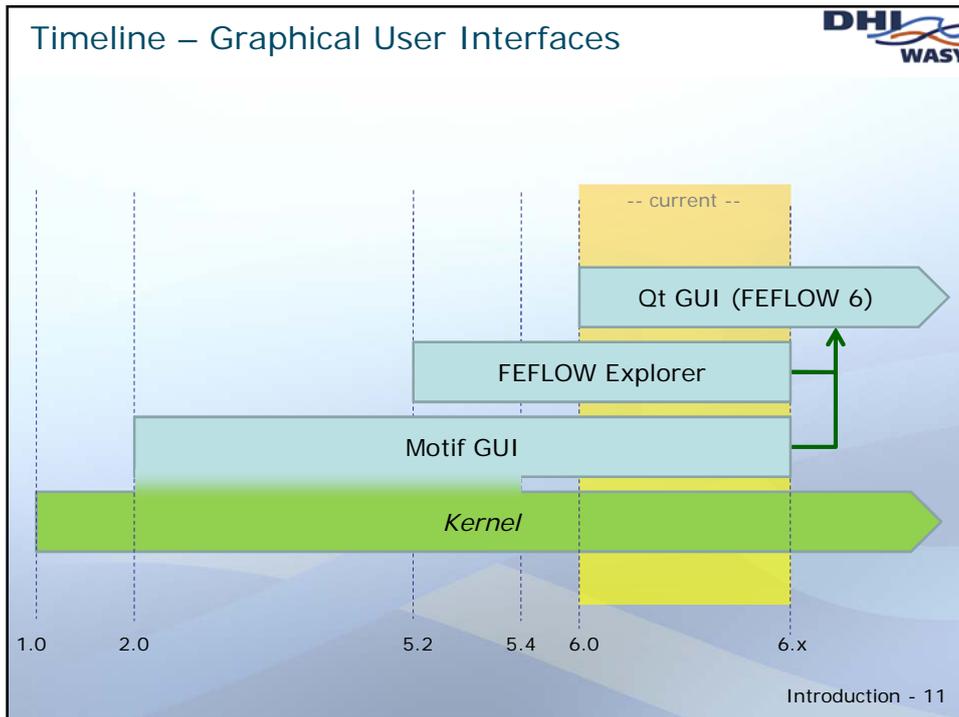
Introduction - 9

Development History

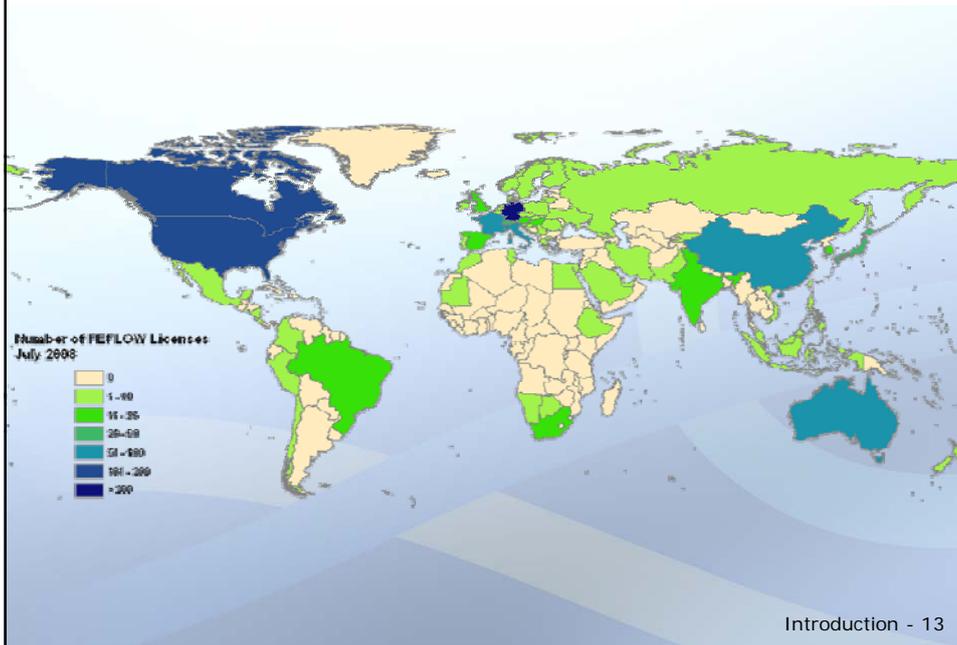


1.x 1979-1986	FORTRAN user-oriented batch program; implementations for IBM 370, EC 1055, BESM-6; limited pre- and postprocessing;	8,000 (FORTRAN)
2.x 1987-1990	First interactive prototype for Sun workstations; rewritten in C for SUN workstations	25,000 (C)
3.x 1990-1992	X-Windows and OSF/Motif implementation, multiple hardware (platform) installations, additional software tools	140,000 (C)
4.0-4.2 1992-1995	3D extensions and developments for flow, mass and heat (thermohaline) transport, 3D visual analysis tools, GIS interface extensions	250,000 (C)
4.5 1996-1997	Extensions regarding numerical capabilities and data interfacing, introducing DSM (data store manager) and FEMAP (map assistant), automatic mesh adaptation in 2D	730,000 (C, C++)
4.6 1997-1998	Installation on Windows 95/NT, new mesh generator TMESH including add-ins, revision of budget analyzing tools	750,000 (C, C++)
4.7 1998	Interface Manager (IFM) for coupling external code, unsaturated flow and transport modeling in 2D and 3D, extended interpolation techniques for time varying data, FEPLLOT	850,000 (C, C++)
4.8 2000	PEST for parameter estimation, legend editor, improved map manager, reference distributions, DAVIS for 3D visualization	900,000 (C, C++)
4.9 2001	Extended zooming tools, improved coordinate handling, new mesh editor, non-linear dispersion, improved phreatic mode, new features in FEPLLOT	1,000,000 (C, C++)
5.0 2002	Discrete feature elements (1D/2D), extended possibilities for unsaturated flow, parameter fitting tool FE-LMP, true color implementation	1,100,000 (C, C++)
5.1 2003-2004	Extensions for density-variable transport (gravity-projected option), fast TRIANGLE mesh generator, algebraic multigrid (SAMG) equation solver	1,300,000 (C, C++)
5.2 2005	Multispecies transport, parallel computing, reaction kinetics editor FEMATHED, transient pathline computations, FEFLOW Explorer for 3D visualization and animation	1,500,000 (C, C++)
5.3 2006	64-bit technology, variable-density multispecies multidiffusive transport, new mesh generator GRIDBUILDER, scatter plots, formula editor for sink/sources, and others	1,700,000 (C, C++)
5.4 2008	Borehole heat exchangers, SAMG as standard solver, splines parametric model for unsaturated properties, improved parallelization, parameter zones in Explorer, and others	1,700,000 (C, C++)

Introduction - 10



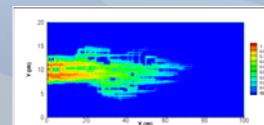
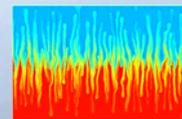
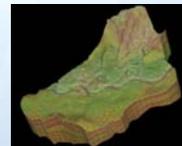
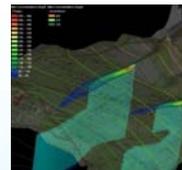
International FEFLOW Users



Main Fields of Application



- Groundwater management
- Environment and pollution control
- Mining and Construction industry
- Geothermal energy
- Special applications
 - Subsurface storages and reservoirs
 - Material development
 - ...
- ...



Introduction - 14

Capabilities – Groundwater Flow



- Flexible meshing using finite elements
 - Triangular or quad elements (2D)
 - Prisms or cuboids (3D)
- 3D or 2D horizontal/vertical/axisymmetric
- Mixed dimensions (1D, 2D and 3D finite elements) for fracture/pipe/borehole flow
- Groundwater flow model
 - “Classical” saturated flow (Darcy-law)
 - Different approaches for handling phreatic surfaces
 - Unsaturated or variably saturated flow (Richards’ equation)
- Transport model
 - Solutes (advection, dispersion, diffusion)
 - Heat (advection, dispersion, conduction)
 - Multi-component (several Solutes and/or heat)

Introduction - 15

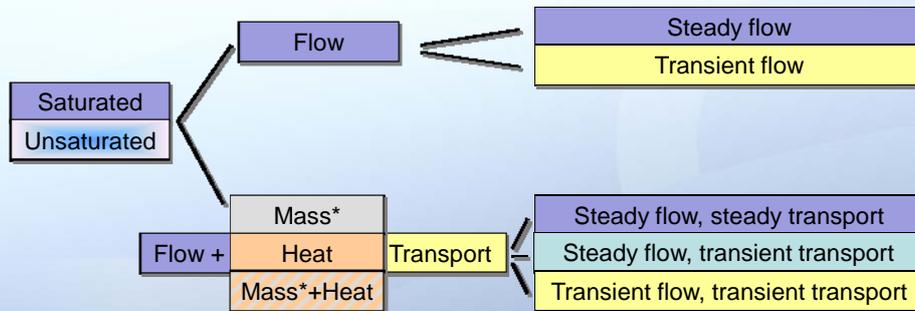
Capabilities – Transport, Processes and More



- Chemical and physical processes
 - Sorption
 - Chemical reaction systems
- Property dependencies
 - Density-dependent flow (temperature and/or concentration-driven)
 - Viscosity
- Advanced computational methods
 - Powerful mesh generators
 - Automatic time stepping scheme
 - Algebraic multi-grid solver
 - Parallelization
- Text (ASCII)/GIS/CAD-file interfaces for data import and export
- Extensibility (IFM open programming interface)
- ...

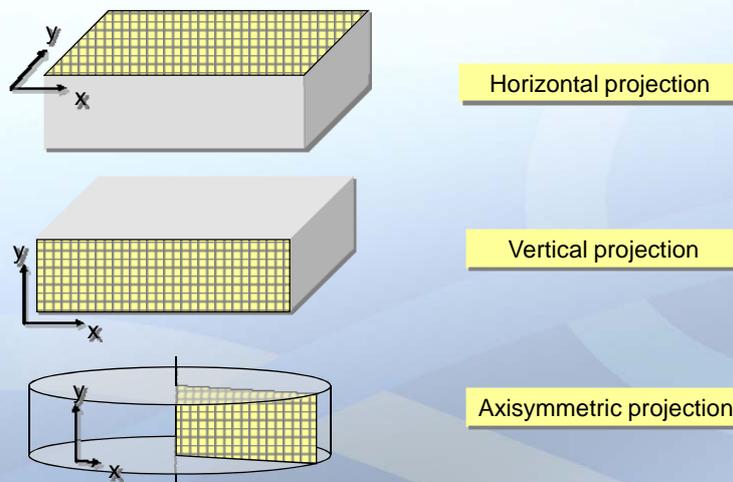
Introduction - 16

Model Types (Model Classes)



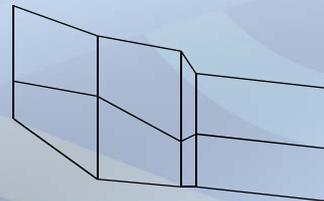
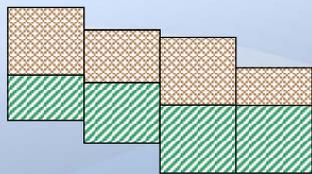
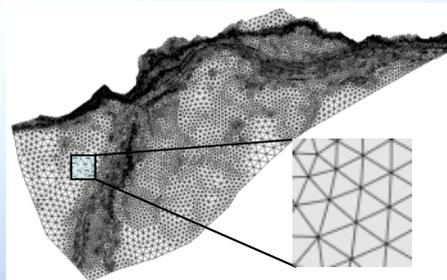
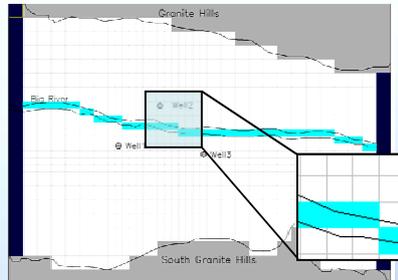
* Single-species or (reactive) multi-species mass transport

2D Model Projections



Flexible Meshes

Finite Differences vs. Finite Elements

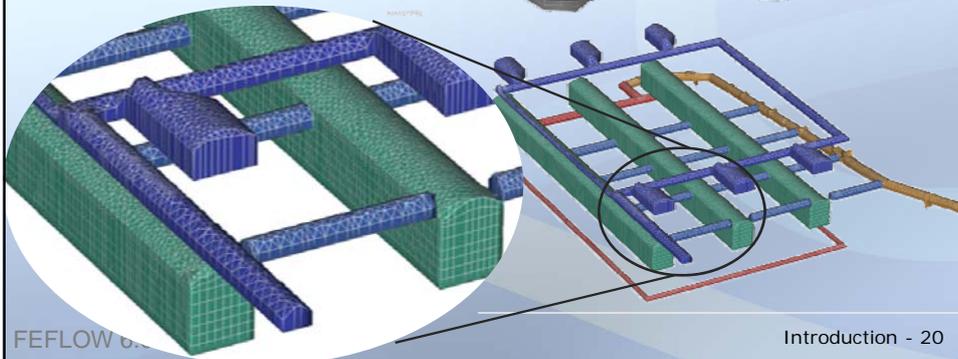
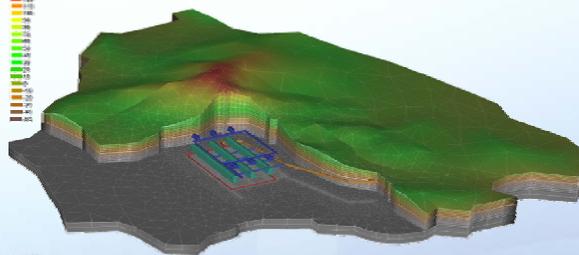


Flexible Meshes

3D geometries



... Allows detailed models of complex geometrical structures:



Documentation

- Demonstration Exercise
- User's Manual
- Reference Manual
- White Papers Vol. I
- White Papers Vol. II
- White Papers Vol. III
- White Papers Vol. IV
- **Help System**



All manuals are available printed and on the FEFLOW DVD (*.pdf)
and for download on www.feflow.info

Licensing and Maintenance

- Licensed via HASP hardware dongle and license manager software

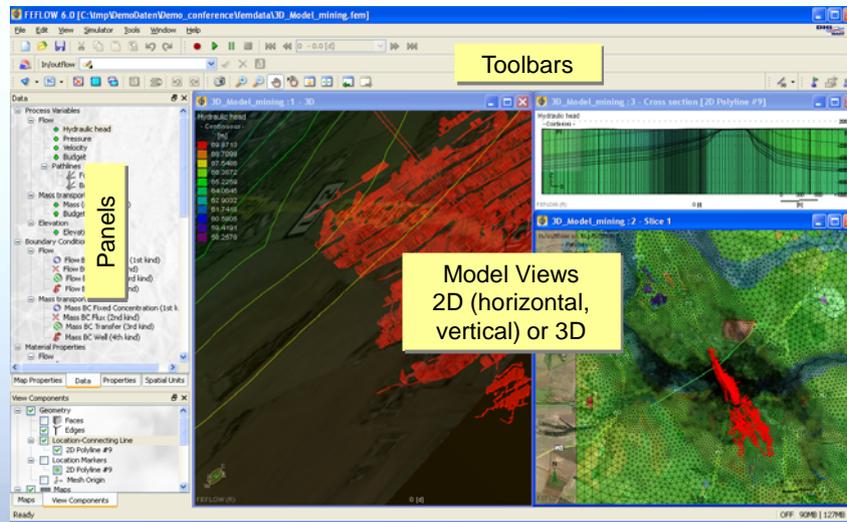


- License types:

- | | |
|-------------|--|
| • F2 | 2D flow |
| • FM2 | 2D flow and mass transport |
| • F3 | 2D/3D flow |
| • FM3 | 2D/3D flow and mass transport |
| • FH3 (new) | 2D/3D flow and heat transport |
| • FMH3 | 2D/3D flow, mass and heat transport |
| • FMHES | Education starter kit (5 limited licenses) - for universities only |

- Single seat or network licenses
- License includes 1 year maintenance contract

Graphical User Interface



The new Qt based GUI



- Modern GUI elements such as tree views, list views, dock windows, combo boxes.
- Customizable workspace
- Multi-view architecture (MDI)
- Parallel visualization of multiple model properties
- No X-server required under MS Windows

DHI-WASY Software Training

Modeling Subsurface Flow
and Transport using
FEFLOW 6.0

Mesh

Mesh - 1

Supermesh

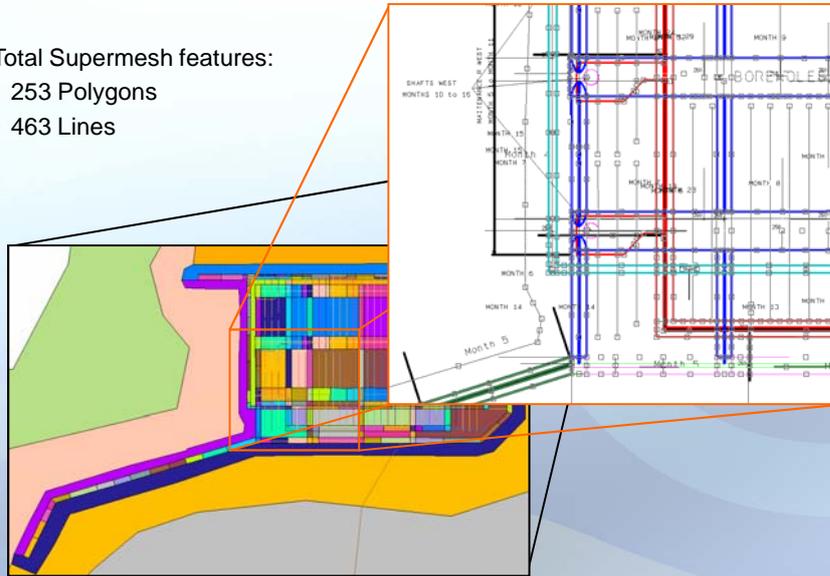
- Conceptual definition of the model geometry
 - Areas
 - Model area
 - Subareas (e.g. lenses)
 - Locations
 - Lines (rivers, barriers, drainages)
 - Points (wells, observation points)

Supermesh



Total Supermesh features:

- 253 Polygons
- 463 Lines



FEFLOW 6.0 Training

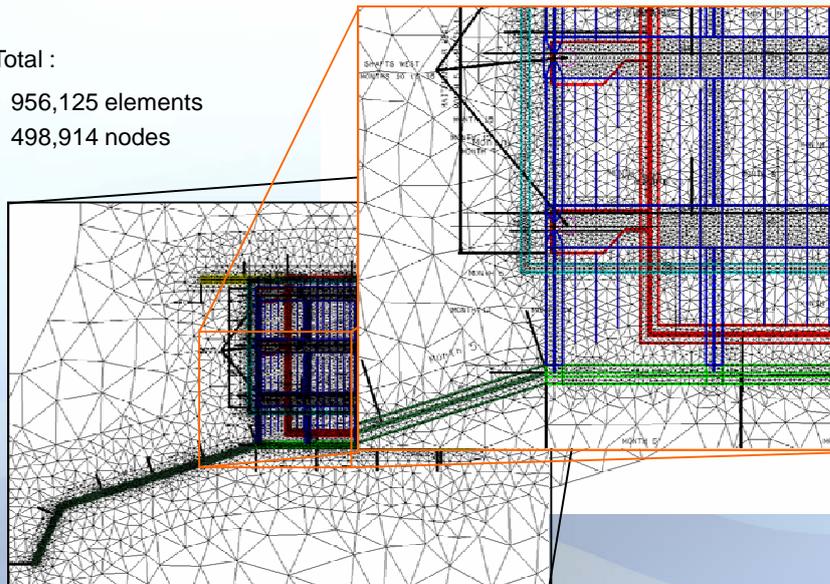
Mesh - 3

Supermesh



Total :

- 956,125 elements
- 498,914 nodes



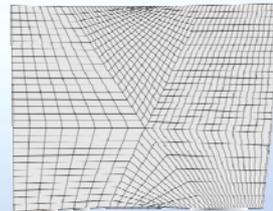
FEFLOW 6.0 Training

Mesh - 4

Mesh Generation



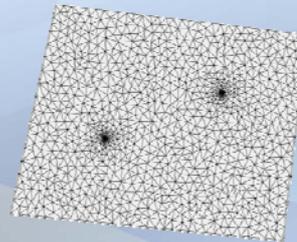
Transport mapping



Triangle (via interface)

Advancing front

Gridbuilder



Mesh Generation Algorithms

- Advancing Front
 - + Fast
 - + Very regular triangles
 - No Add-Ins
- T-Mesh (Motif GUI only)
 - Slow
 - Produces obtuse-angled triangles
 - + Add-Ins possible

Mesh Generation Algorithms



- Triangle
 - + Extremely fast
 - + Complex setups of polygons and add-ins
 - Angles slightly over 90°
 - Consider usage agreement

- Gridbuilder
 - + Fast
 - Can fail under certain circumstances (see online help and/or Users Manual)
 - + Regular Triangles
 - + Good gradation

Mesh Generators in FEFLOW



Triangular Elements

	Quality	Adaption	Speed	Overall
Advancing front	good regular triangles	no points / lines!	fast	Recommended for geometries without lines / points
Triangle	moderate angles slightly over 90°	handles complex geometries	extremely fast	Recommended for complex geometries license restrictions apply, see copyright, online-help!
Gridbuilder	good regular triangles good gradation	lines may lead to failures (see online- help)	fast	Very good alternative for Triangle
Tmesh* (* Motif GUI only)	produces obtuse-angled triangles		slow	Rudimentary generator, avoid usage

Quadrilateral Elements

	Quality	Adaption	Speed	Overall
Transport Mapping	very good regular quadrilaterals	no points / lines! limited to quadrilateral polygons!	extremely fast	Recommended for geometries with quadrilateral sub-regions

WHY USING FEFLOW ?

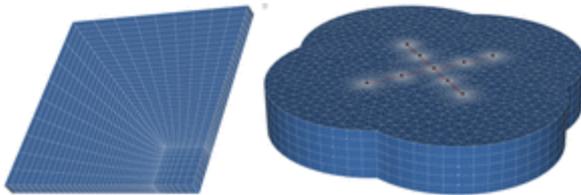
High-level support



Dealing with an extensive modeling package like FEFLOW, even the most extensive documentation can never answer all the questions a user might have in a specific situation. Furthermore, a long trial-and error process in a commercial project means a considerable loss of time and money.

DHI-WASY offers high-level support given by experienced groundwater modelers to clients with a current maintenance contract for FEFLOW.

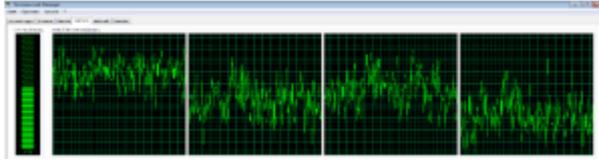
Flexible mesh generators



Finite-element discretization allows to use complex unstructured meshes that closely match natural structures while obeying requirements such as element size, element angles, etc. For large modeling areas, generation is supported by sophisticated automation algorithms to ensure efficient work. Automatically generated meshes also have to be adapted to internal geographical structures, like rivers or well locations.

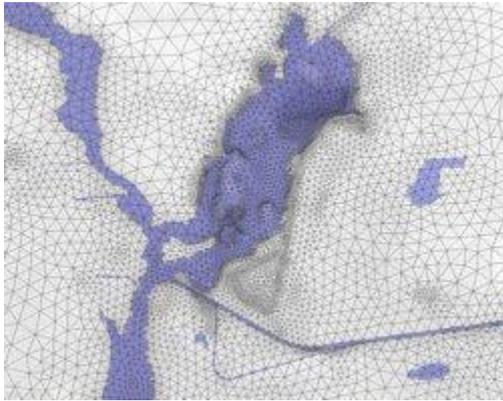
As any single mesh generation approach cannot be expected to perform optimally under all conditions, FEFLOW offers a number of different mesh-generation algorithms and different options of user influence on the generation process.

Parallel computing



Transient calculations of complex regional models for long time periods require significant computational effort. Long simulation times can occur, even using the latest hardware available. Parallel processing allows a significant reduction in CPU times on multiple-processor platforms. In FEFLOW tasks of parallel structure as matrix assembly are processed in parallel on the different CPUs.

Finite-element method

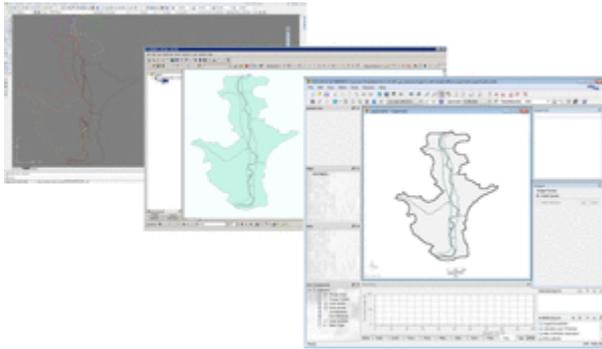


Spatial discretization of the study area is a prerequisite for any numerical modeling. Classic groundwater simulation codes use finite difference discretization. In contrast, FEFLOW is based on the finite-element technique.

Major advantages of finite-element modeling include:

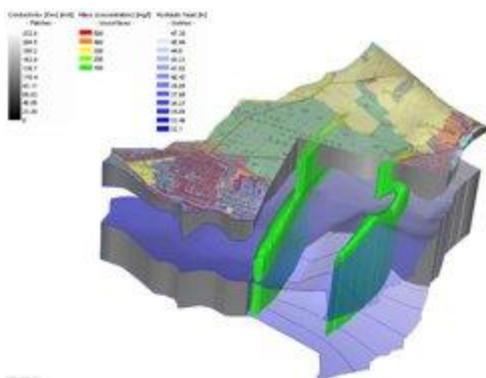
- Unstructured meshing, thus much better representation of features like rivers, fractures, well locations by adaptation of the mesh
- Better representation of sloping layers and anisotropy
- Local mesh refinement without having to refine the whole column/row
- Moving meshes for free-surface calculations
- Automatic mesh refinement and coarsening
- Less computational effort due to reduced element numbers for large regional models
- Broad range of small-scale and large-scale applications

GIS/CAD interface



In most practical applications, the basic spatial data are available either in GIS (e.g., ESRI formats) file format or in a CAD-like format (e.g., AutoCAD exchange format). Direct import of these data formats helps to avoid intermediate conversion routines for transferring the basic data to the groundwater model. In the post processing step, data are easily transferred back to the GIS or CAD system to provide the results in data formats compliant to the project framework. FEFLOW can handle GIS as well as CAD data for import and export at all stages of modeling, e.g., to provide geographical input for mesh generation, parameter distribution, etc. Where appropriate, different regionalization methods are provided to transfer the basic data to the finite elements or mesh nodes. Using GIS files, attribute data can be directly transferred to the groundwater model. Alternatively, all data input can be performed manually or by importing ASCII files.

Up-to-date visualization tools



The days of presenting modeling results in large tables of figures are long gone. Today's customers expect elaborate isoline maps, pathline diagrams, cross-sectional and 3D views and animations, which can also be used to present complex hydrogeologic conditions to the public.

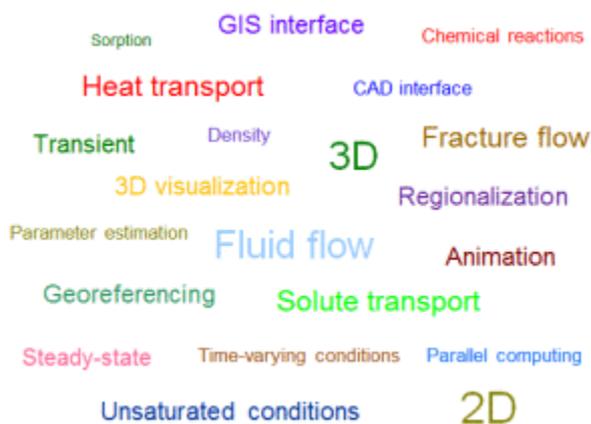
FEFLOW addresses that need by its planar, cross-sectional and 3D visualization features. Using FEFLOW three-dimensional visualizations of all model parameters and modeling results (like movements of contaminant plumes, etc.) can be produced.

Sophisticated solvers



The equation systems for solving advanced groundwater models result in large matrix systems. To guarantee both stability and effectiveness of the solution, highly sophisticated solvers are required. In FEFLOW, sparse-matrix PCG-type solvers as well as an algebraic multigrid solver are available. There are no internal limitations in the numbers of nodes and elements.

Advanced modeling package



At first glance, it might seem that you won't need some of the features FEFLOW provides for your every-day work. Nevertheless it is a good decision to choose a scalable sophisticated system with many modeling options.

On the one hand you will be able to work with the same system also for your future applications, which might be quite different from your current modeling tasks. In such a case, it will save time and money if you won't need additional software and training.

On the other hand, FEFLOW provides many of its easy-to-use high-level modeling features from the inexpensive 2D flow modeling package on. So even if you only deal with relatively simple tasks, you will benefit from the functionality designed to meet the most challenging needs in groundwater simulation.

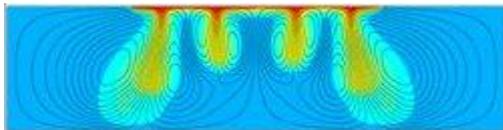
Commercial software



Companies developing commercial software depend on the satisfaction of their clients: To remain successful, they have to be eager to develop software and documentation according to the client's needs, to provide a stable and easy-to-use graphical interface, to fix bugs within the shortest time frame possible and to support their clients in software application.

The FEFLOW development team at DHI-WASY has been working on FEFLOW for many years, ensuring the permanent good quality of the product. Close contact between user and developer and latest experiences out of DHI-WASY's own consulting and research activities are the main basis for successful further development of FEFLOW.

Benchmark simulations



The user of a complex simulation software like FEFLOW requires reliability, accuracy and effectiveness. Physical and mathematical correctness within the limits posed by discretization is essential. All parts of the FEFLOW simulation engine have passed an extensive benchmarking process where results are compared to those of other well-known simulation systems, to analytical solutions or to observations from lab experiments whenever possible. The results of numerous important benchmark tests are published in the documentation, along with a detailed description of the corresponding model setups and an extensive discussion of the results. The related files are available, too. All benchmark examples can be loaded and executed without a license.

Open Programming Interface



FEFLOW covers a broad variety of processes in the subsurface, but still there are very specific applications where its capabilities are not sufficient and the user wishes to modify parts of the system.

For such cases FEFLOW provides an open programming interface to interact with user-specific additional plug-ins. Parameters can be changed at any time, boundary conditions can be varied using external dependencies, time stepping can be influenced, even other programs (like hydrodynamic simulation or parameter estimation software) can be directly linked to FEFLOW. A developer framework provides the basis for designing specific plug-ins. The plug-in can be coded in C/C++ or, using mixed-language programming, in other languages such as Fortran.

So why FEFLOW?

If you still doubt that FEFLOW should be the groundwater modeling package of your choice, try out the free demo version or ask for it at one of the DHI offices, your local distributor or directly at DHI-WASY .

You will understand why.

**Institut bruxellois pour la gestion de
l'environnement**

**RÉALISATION D'UNE ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE
LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE DU BRUXELLIEN**

Rapport final (phase II)

**Annexe 2 : Bilans de Thornthwaite sur l'année 2013 aux
différentes stations pluviométriques**

R-2015-031

DECEMBRE 2015



L'évaluation de l'eau utile est réalisée sur la base du bilan de Thornthwaite.

Les abréviations utilisées dans les tableaux suivants sont détaillées ci-dessous :

- P : Précipitation mensuelle en mm ;
- ETP : Evapotranspiration mensuelle potentielle en mm calculée selon l'équation suivante :

$$ETP = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T}{I} \right)^a$$

où

- o T : Température moyenne mensuelle en °C ;
- o I : somme des indices thermiques mensuels calculés selon l'équation suivante :

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

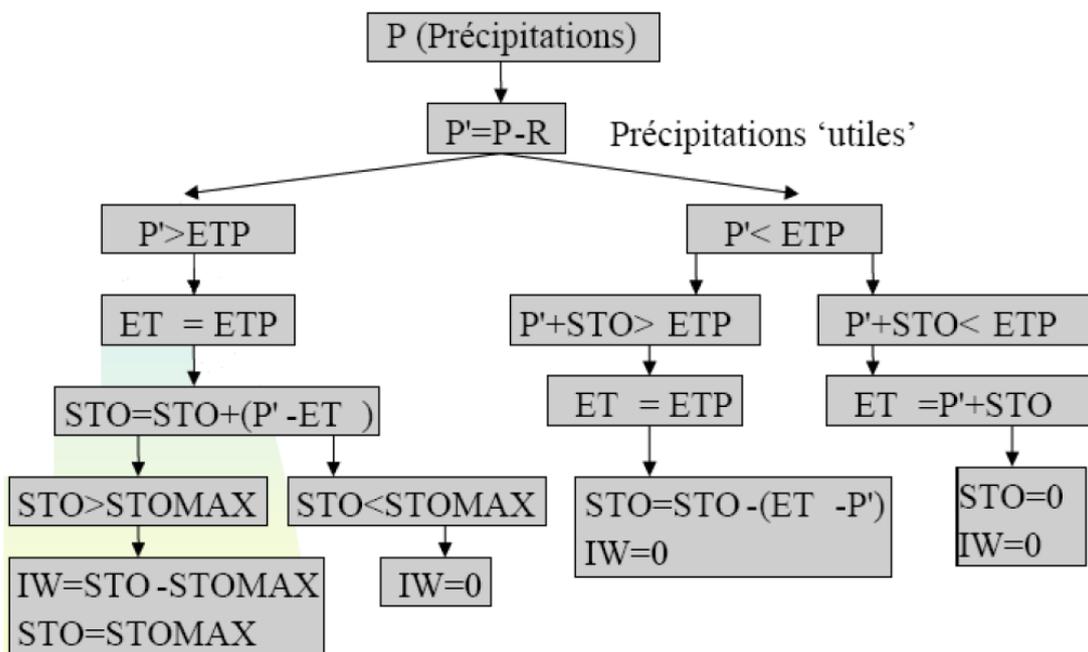
- o a est un indice calculé selon l'équation suivante :

$$a = 0.016 \cdot I + 0.5$$

- P-ETP est la différence entre les précipitations mensuelles et l'évapotranspiration mensuelle potentielle ;
- DEF est le déficit en mm considéré comme étant nul si les précipitations mensuelles sont supérieures à l'évapotranspiration mensuelle potentielle et comme égal à la différence entre ces deux paramètres dans le cas inverse ;
- DEF cum est le déficit cumulé en mm, il est calculé en prenant la somme des déficits mensuels depuis le début de l'année ;
- STOCK fin de mois en mm est la quantité d'eau restant dans le stock du sol à la fin du mois. Elle est considérée comme étant égale à 100 en début d'année. Lorsqu'il y a un déficit durant un mois, ce stock se réduit d'une quantité égale au déficit. Lorsqu'il n'y a pas de déficit (précipitations supérieures à l'évapotranspiration potentielle), le stock se remplit de l'excès de précipitations par rapport à l'évapotranspiration potentielle. Le stock est considéré comme compris entre 0 et 100. Il ne sera donc jamais négatif ni supérieur à 100 ;
- Var STOCK en mm est la variation du STOCK entre deux mois consécutifs. Il est négatif si le stock diminue et positif si le stock augmente ;
- EVT réelle en mm est l'évapotranspiration mensuelle réelle. Elle est égale :
 - o Soit à l'évapotranspiration mensuelle potentielle si celle-ci est :
 - inférieure ou égale aux précipitations mensuelles ou
 - inférieure ou égale à la somme des précipitations mensuelles et du stock de la fin du mois précédent ;
 - o soit à la somme du stock de la fin du mois précédent et des précipitations mensuelles dans les autres cas ;
- EU en mm est l'eau utile mensuelle. Elle est égale :

- Soit aux précipitations mensuelles dont on retranche l'évapotranspiration mensuelle réelle dans le cas où cette différence est positive et que le stock à la fin du mois précédent est rempli ;
- Soit aux précipitations mensuelles dont on retranche l'évapotranspiration mensuelle réelle et la variation du stock dans le cas où le résultat est positif et que le stock à la fin du mois précédent n'est pas rempli ;
- Soit à zéro dans les autres cas (évapotranspiration mensuelle réelle supérieure aux précipitations mensuelles ou encore dans le cas où la somme de l'évapotranspiration mensuelle réelle et de la variation du stock est supérieure aux précipitations mensuelles).

A toutes fins utiles, le schéma suivant reprend la logique de calcul exposée ci-dessus.

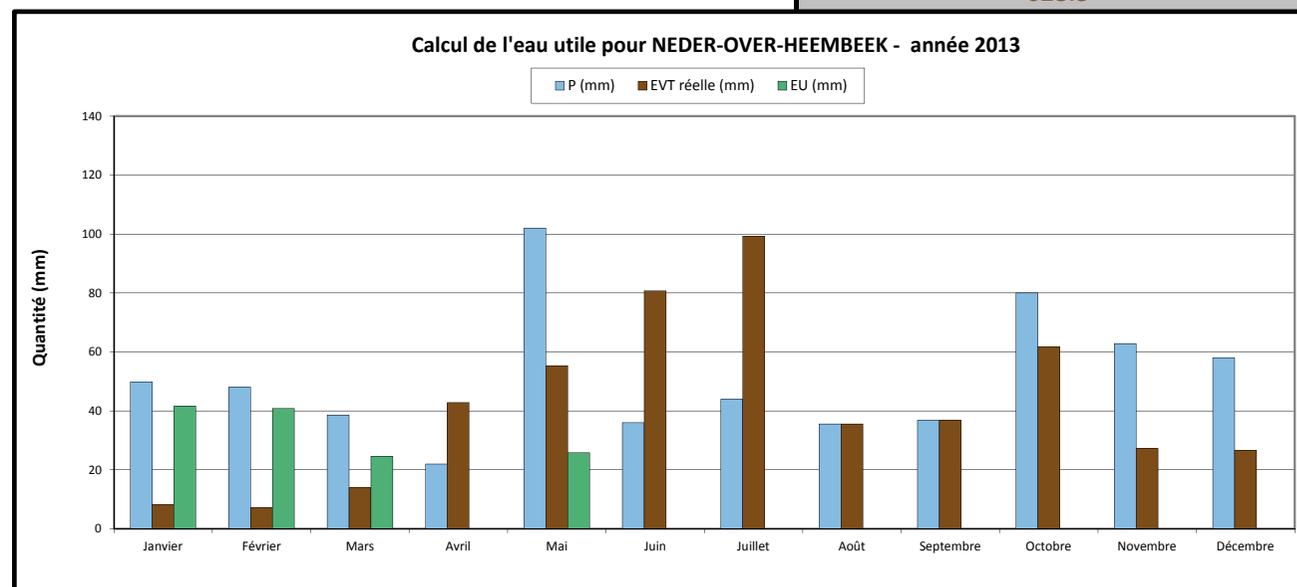




	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						100		stock en fin d'année précédente	
Janvier	49.8	8	42	0	0	100	0	8.2	41.6
Février	48.0	7	41	0	0	100	0	7.2	40.8
Mars	38.6	14	25	0	0	100	0	14.0	24.6
Avril	22.0	43	-21	-21	-21	79	-21	42.8	0.0
Mai	102.0	55	47	0	-21	100	21	55.3	25.8
Juin	36.0	81	-45	-45	-66	55	-45	80.7	0.0
Juillet	44.0	107	-63	-63	-129	0	-55	99.3	0.0
Août	35.6	97	-62	-62	-190	0	0	35.6	0.0
Septembre	36.8	74	-37	-37	-228	0	0	36.8	0.0
Octobre	80.0	62	18	0	-228	18	18	61.7	0.0
Novembre	62.8	27	36	0	-228	54	36	27.2	0.0
Décembre	58.0	27	31	0	-228	85	31	26.6	0.0
Total	613.6	602						495	132.9

628.3

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.5	0.3618
Février	2.3	0.3051
mars	3.9	0.6996
Avril	10.0	2.8199
Mai	12.3	3.8766
Juin	16.9	6.2030
Juillet	21.4	8.8295
Août	19.7	7.8101
Septembre	15.7	5.5705
Octobre	13.5	4.4398
Novembre	6.8	1.6023
Décembre	6.7	1.5596
I =		44.0779
a = 1.205247		

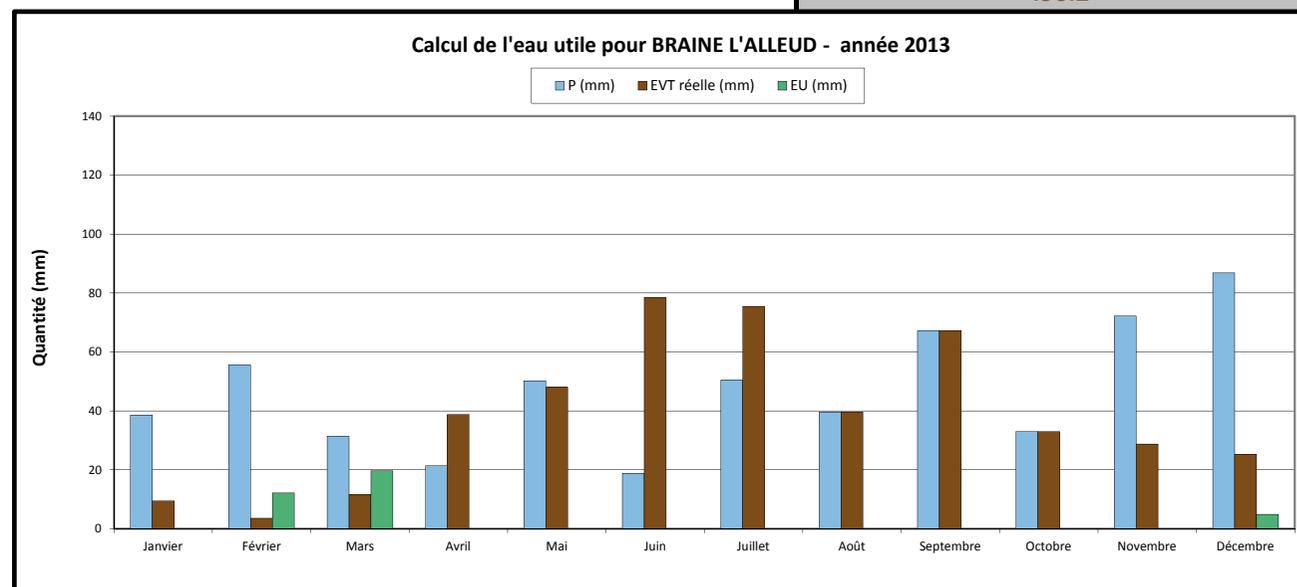




	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						31		stock en fin d'année précédente	
Janvier	38.6	9	29	0	0	60	29	9.5	0.0
Février	55.6	4	52	0	0	100	40	3.6	12.2
Mars	31.4	12	20	0	0	100	0	11.7	19.7
Avril	21.4	39	-17	-17	-17	83	-17	38.8	0.0
Mai	50.2	48	2	0	-17	85	2	48.0	0.0
Juin	18.8	78	-60	-60	-77	25	-60	78.5	0.0
Juillet	50.4	102	-52	-52	-129	0	-25	75.5	0.0
Août	39.6	88	-48	-48	-177	0	0	39.6	0.0
Septembre	67.2	69	-2	-2	-179	0	0	67.2	0.0
Octobre	33.0	63	-30	-30	-209	0	0	33.0	0.0
Novembre	72.2	29	43	0	-209	43	43	28.8	0.0
Décembre	86.8	25	61	0	-209	100	57	25.3	4.9
Total	565.2	566						459	36.8

496.2

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.4	0.3326
Février	1.0	0.0894
mars	2.9	0.4417
Avril	8.5	2.2165
Mai	10.3	2.9567
Juin	16.0	5.7243
Juillet	20.3	8.1807
Août	17.7	6.6605
Septembre	14.3	4.8367
Octobre	13.1	4.2408
Novembre	6.5	1.4822
Décembre	5.8	1.2494
I =		38.4115
a =		1.114584





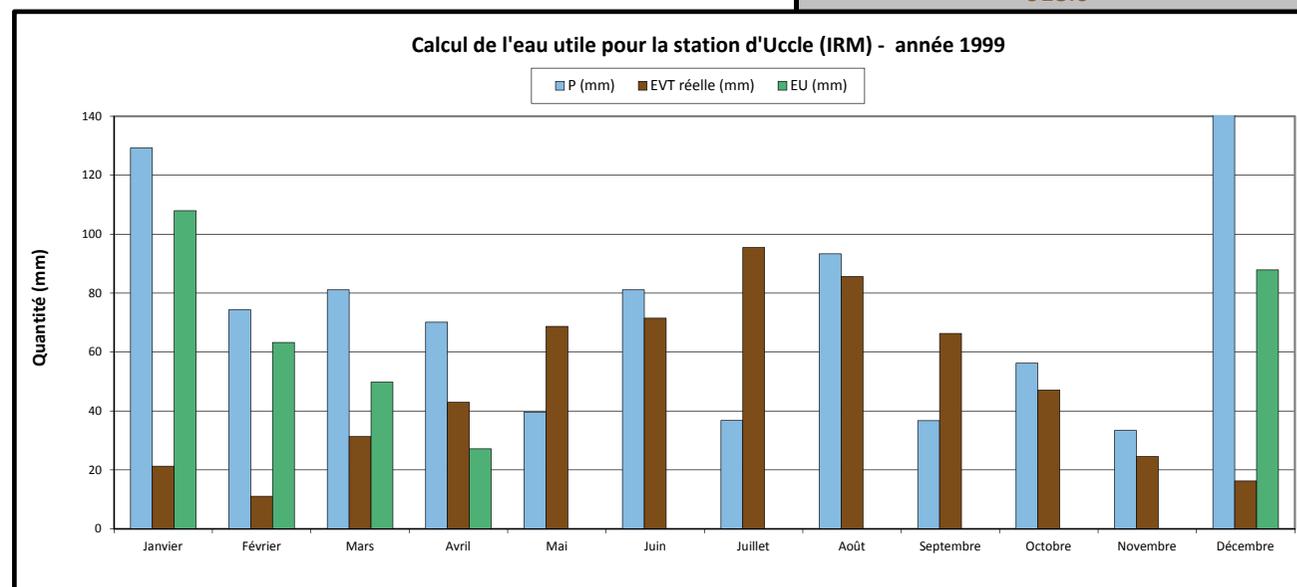
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100			
						100			
						100			
						100			
						100			
						71	-29		
						81	10		
						22	-59		
						30	8		
						0	-30		
						9	9		
						18	9		
						100	82		
Total	918.0	601						582	335.9

stock maximal estimé (fonction du sol)

stock en fin d'année précédente

918.0

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	5.4	1.1224
Février	3.1	0.4882
mars	7.5	1.8371
Avril	9.8	2.7440
Mai	14.6	4.9897
Juin	15.1	5.2482
Juillet	19.3	7.5837
Août	17.6	6.6041
Septembre	17.5	6.5479
Octobre	10.6	3.0868
Novembre	6.1	1.3475
Décembre	4.3	0.7975
I =		42.3971
a =		1.178354





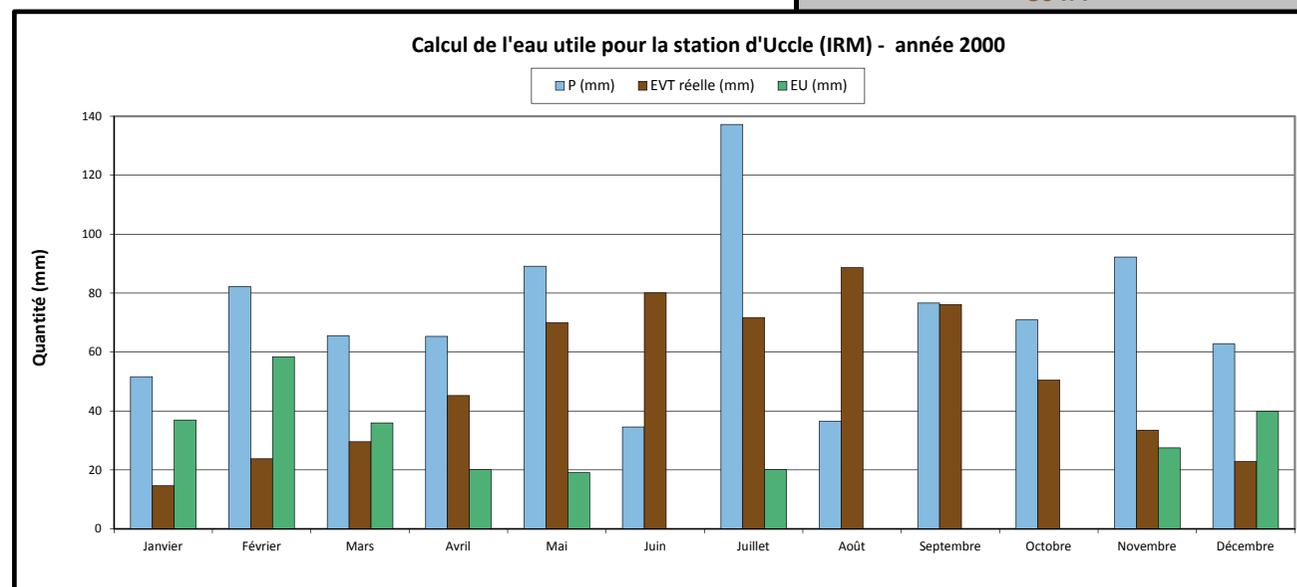
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100			
						100			
						100			
						100			
						100			
						100			
						55	-45		
						100	45		
						48	-52		
						48	0		
						69	20		
						100	31		
						100	0		
Total	864.4	606						606	258.0

stock maximal estimé (fonction du sol)

stock en fin d'année précédente

864.4

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	3.9	0.6889
Février	5.9	1.2818
mars	7.1	1.6921
Avril	10.2	2.9137
Mai	14.8	5.0926
Juin	16.6	6.0493
Juillet	15.1	5.2482
Août	18.1	6.8875
Septembre	15.9	5.6708
Octobre	11.2	3.3525
Novembre	7.9	1.9860
Décembre	5.7	1.2172
I =		42.0806
a = 1.173290		





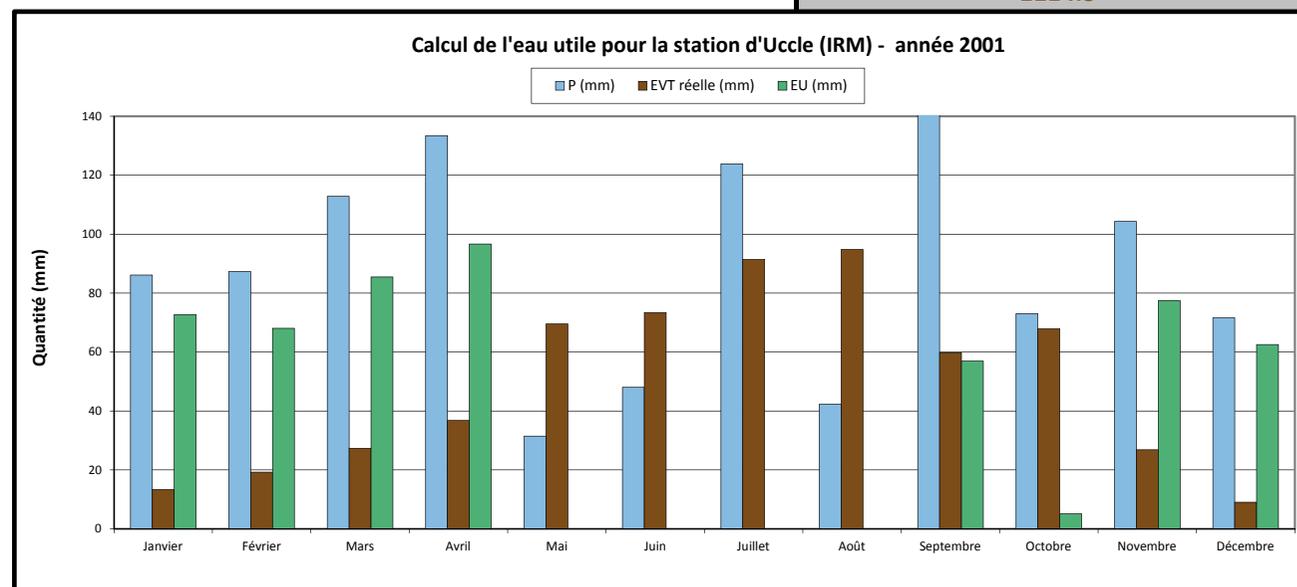
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100			
						100			
						100			
						100			
						100			
						62	-38		
						37	-25		
						69	32		
						16	-53		
						100	84		
						100	0		
						100	0		
						100	0		
						100	0		
						100	0		
Total	1114.3	589						589	524.8

stock maximal estimé (fonction du sol)

stock en fin d'année précédente

1114.3

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	3.5	0.5857
Février	4.8	0.9406
mars	6.5	1.4822
Avril	8.4	2.1775
Mai	14.6	4.9897
Juin	15.3	5.3528
Juillet	18.5	7.1171
Août	19.1	7.4661
Septembre	12.8	4.0960
Octobre	14.3	4.8367
Novembre	6.4	1.4482
Décembre	2.5	0.3536
I =		40.8462
a = 1.153538		

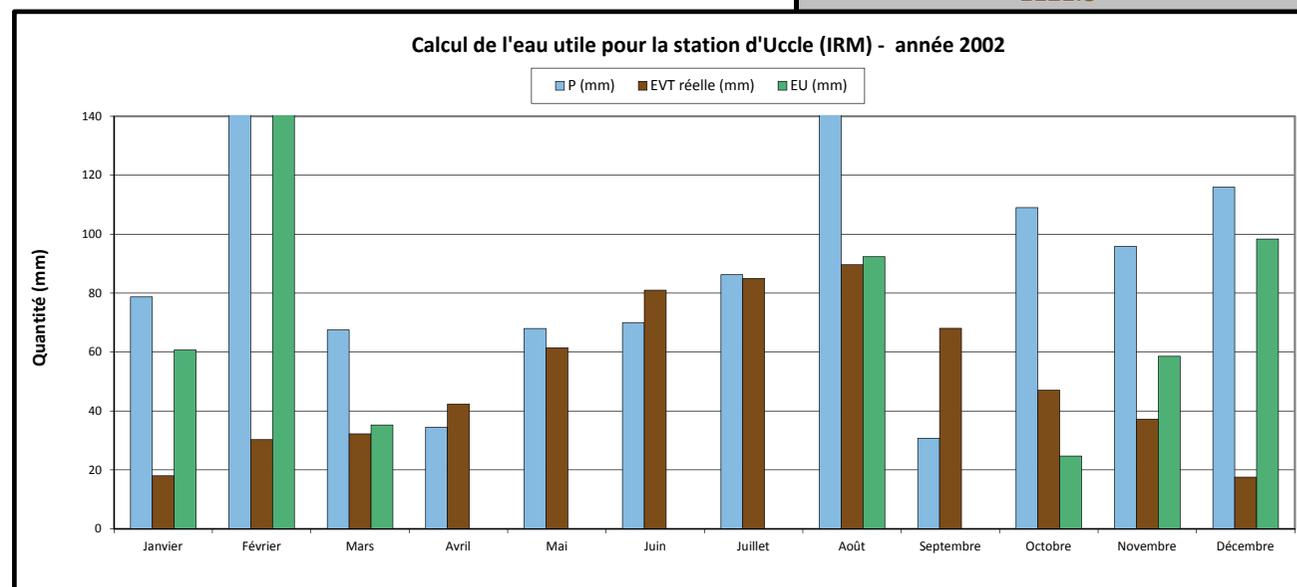




	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						100		stock en fin d'année précédente	
Janvier	78.7	18	61	0	0	100	0	18.0	60.7
Février	172.4	30	142	0	0	100	0	30.3	142.1
Mars	67.5	32	35	0	0	100	0	32.2	35.3
Avril	34.5	42	-8	-8	-8	92	-8	42.3	0.0
Mai	68.0	61	7	0	-8	99	7	61.5	0.0
Juin	69.9	81	-11	-11	-19	88	-11	81.0	0.0
Juillet	86.2	85	1	0	-19	89	1	85.0	0.0
Août	193.1	90	104	0	-19	100	11	89.6	92.3
Septembre	30.8	68	-37	-37	-56	63	-37	68.1	0.0
Octobre	109.0	47	62	0	-56	100	37	47.0	24.7
Novembre	95.8	37	59	0	-56	100	0	37.2	58.6
Décembre	115.9	18	98	0	-56	100	0	17.5	98.4
Total	1121.8	610						610	512.1

1121.8

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	4.7	0.9114
Février	7.3	1.7641
mars	7.7	1.9111
Avril	9.7	2.7021
Mai	13.3	4.3383
Juin	16.8	6.1590
Juillet	17.5	6.5479
Août	18.3	7.0020
Septembre	14.5	4.9385
Octobre	10.6	3.0868
Novembre	8.7	2.2952
Décembre	4.6	0.8824
I =		42.5388
a =		1.180621





	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100			
						100			
						100			
						100			
						100			
						100			
						42	-58		
						23	-19		
						0	-23		
						0	0		
						33	33		
						59	26		
						100	41		
Total	693.5	602						533	160.5

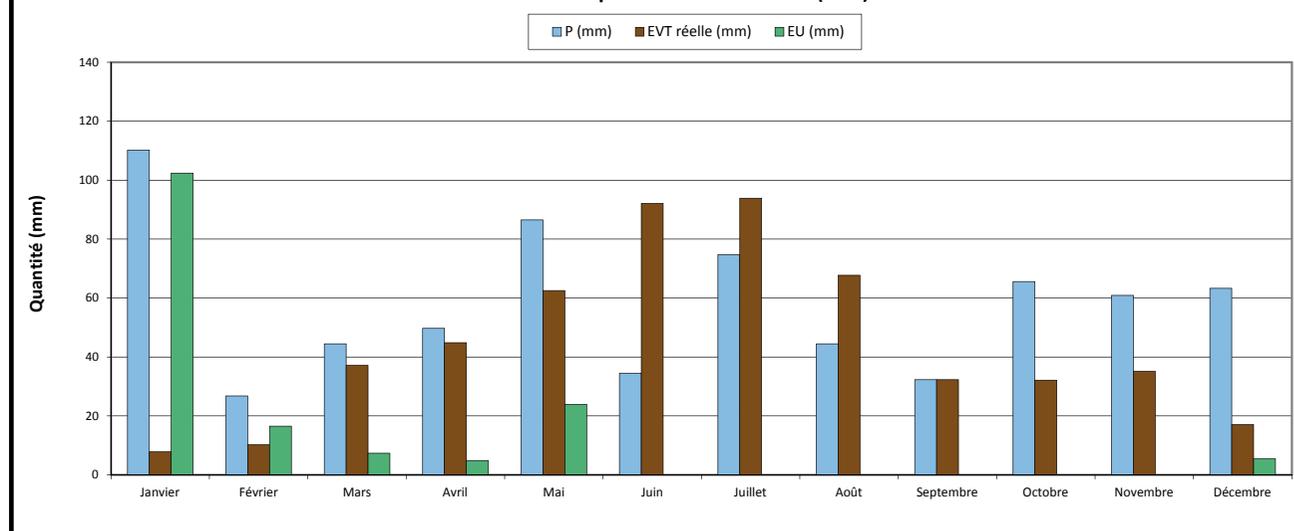
stock maximal estimé (fonction du sol)

stock en fin d'année précédente

693.5

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.4	0.3326
Février	3.0	0.4648
mars	8.8	2.3349
Avril	10.3	2.9567
Mai	13.6	4.4859
Juin	18.8	7.2909
Juillet	19.1	7.4661
Août	20.0	8.0000
Septembre	15.0	5.1962
Octobre	7.8	1.9484
Novembre	8.4	2.1775
Décembre	4.6	0.8824
I =		43.5364
a =		1.196582

Calcul de l'eau utile pour la station d'Uccle (IRM) - année 2003

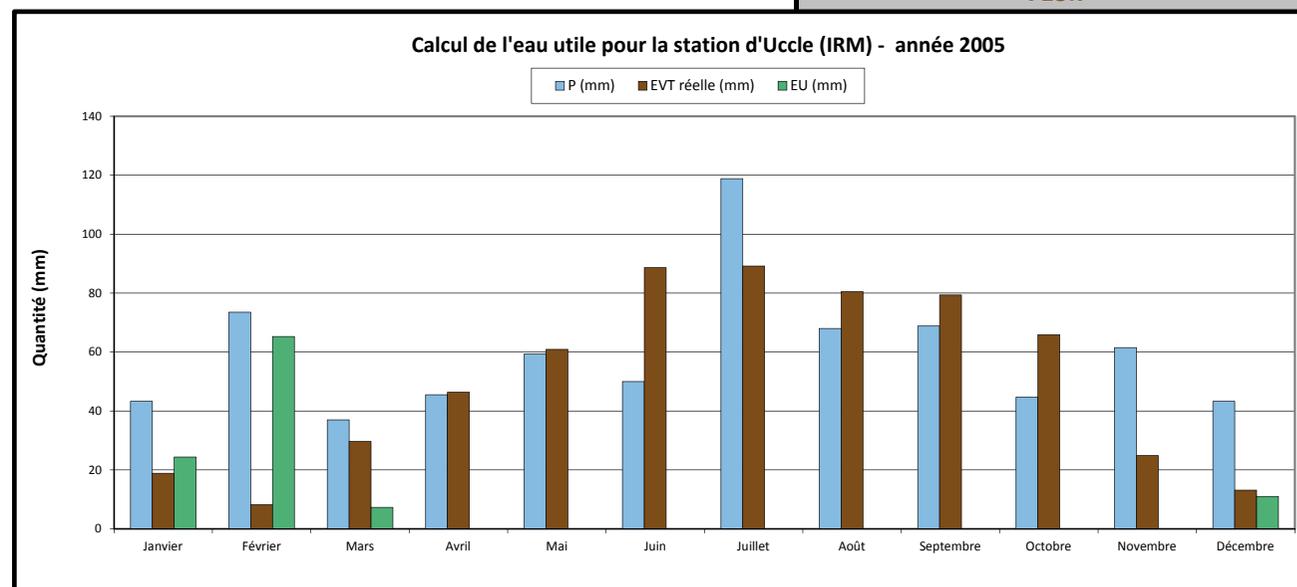




	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						100		stock en fin d'année précédente	
Janvier	43.3	19	24	0	0	100	0	18.9	24.4
Février	73.5	8	65	0	0	100	0	8.2	65.3
Mars	37.0	30	7	0	0	100	0	29.7	7.3
Avril	45.5	46	-1	-1	-1	99	-1	46.4	0.0
Mai	59.3	61	-2	-2	-2	98	-2	60.9	0.0
Juin	50.0	89	-39	-39	-41	59	-39	88.6	0.0
Juillet	118.8	89	30	0	-41	89	30	89.2	0.0
Août	68.0	81	-13	-13	-54	76	-13	80.5	0.0
Septembre	68.8	79	-11	-11	-64	65	-11	79.4	0.0
Octobre	44.7	66	-21	-21	-85	44	-21	65.8	0.0
Novembre	61.5	25	37	0	-85	81	37	24.9	0.0
Décembre	43.3	13	30	0	-85	100	19	13.2	11.0
Total	713.7	606						606	108.0

713.7

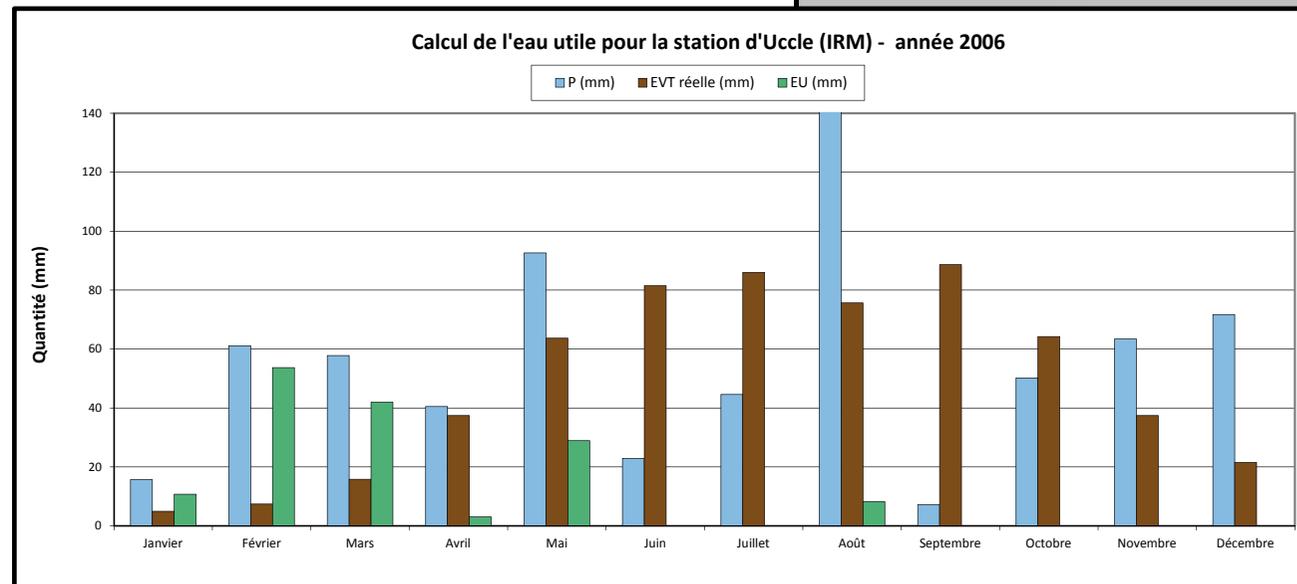
	T (°C)	Indice thermique
Janvier	5.0	1.0000
Février	2.5	0.3536
mars	7.3	1.7641
Avril	10.6	3.0868
Mai	13.3	4.3383
Juin	18.2	6.9447
Juillet	18.3	7.0020
Août	16.8	6.1590
Septembre	16.6	6.0493
Octobre	14.2	4.7861
Novembre	6.3	1.4143
Décembre	3.7	0.6366
I =		43.5347
a =		1.196556





	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						100		stock en fin d'année précédente	
Janvier	15.7	5	11	0	0	100	0	4.9	10.8
Février	61.1	7	54	0	0	100	0	7.4	53.7
Mars	57.8	16	42	0	0	100	0	15.8	42.0
Avril	40.5	37	3	0	0	100	0	37.5	3.0
Mai	92.6	64	29	0	0	100	0	63.7	28.9
Juin	22.9	81	-59	-59	-59	41	-59	81.5	0.0
Juillet	44.6	117	-72	-72	-131	0	-41	86.0	0.0
Août	183.9	76	108	0	-131	100	100	75.6	8.3
Septembre	7.2	89	-81	-81	-212	19	-81	88.6	0.0
Octobre	50.2	64	-14	-14	-226	5	-14	64.2	0.0
Novembre	63.4	37	26	0	-226	31	26	37.5	0.0
Décembre	71.7	22	50	0	-226	81	50	21.6	0.0
Total	711.6	615						584	146.6
								731.0	

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	1.8	0.2160
Février	2.5	0.3536
mars	4.6	0.8824
Avril	9.2	2.4959
Mai	14.1	4.7356
Juin	17.2	6.3802
Juillet	23.0	9.8659
Août	16.2	5.8320
Septembre	18.4	7.0595
Octobre	14.2	4.7861
Novembre	9.2	2.4959
Décembre	5.9	1.2818
I =		46.3848
a =		1.242157





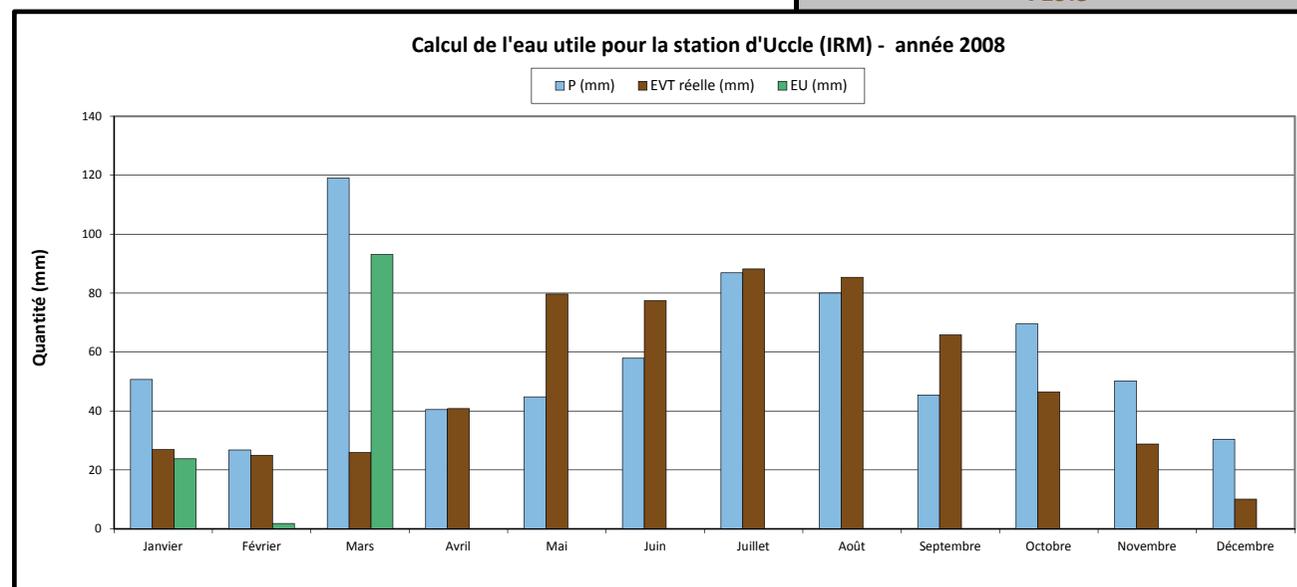
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100			
						100			
						100			
						100			
						65			
						45			
						44			
						39			
						18			
						41			
						63			
						83			
Total	702.1	601						601	118.7

stock maximal estimé (fonction du sol)

stock en fin d'année précédente

719.3

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	6.5	1.4822
Février	6.1	1.3475
mars	6.3	1.4143
Avril	9.3	2.5367
Mai	16.5	5.9947
Juin	16.1	5.7781
Juillet	18.0	6.8305
Août	17.5	6.5479
Septembre	14.0	4.6853
Octobre	10.4	2.9998
Novembre	6.9	1.6211
Décembre	2.8	0.4191
I =		41.6574
a = 1.166518		





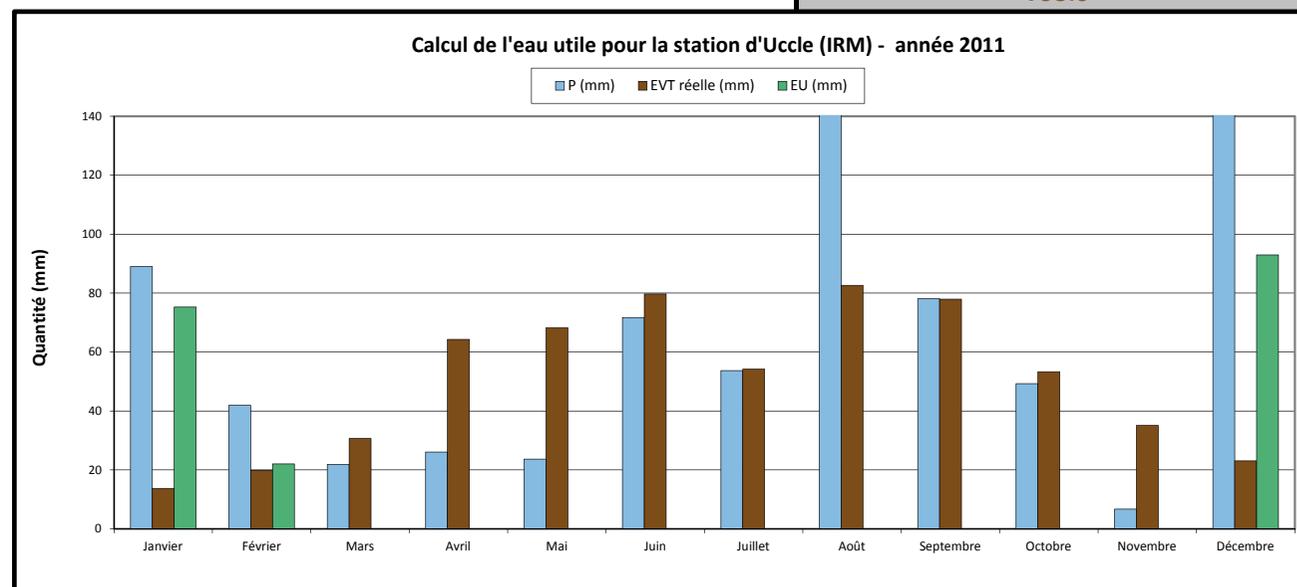
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100			
						100			
						100			
Janvier	89.0	14	75	0	0	100	0	13.8	75.2
Février	41.9	20	22	0	0	100	0	19.9	22.0
Mars	21.9	31	-9	-9	-9	91	-9	30.7	0.0
Avril	26.1	64	-38	-38	-47	53	-38	64.3	0.0
Mai	23.7	68	-45	-45	-92	8	-45	68.2	0.0
Juin	71.7	80	-8	-8	-99	1	-8	79.7	0.0
Juillet	53.7	75	-21	-21	-121	0	-1	54.2	0.0
Août	180.9	83	98	0	-121	98	98	82.6	0.0
Septembre	78.1	78	0	0	-121	98	0	78.0	0.0
Octobre	49.3	53	-4	-4	-125	94	-4	53.3	0.0
Novembre	6.7	35	-28	-28	-153	66	-28	35.1	0.0
Décembre	150.0	23	127	0	-153	100	34	23.1	93.0
Total	793.0	624						603	190.2

stock maximal estimé (fonction du sol)

stock en fin d'année précédente

793.0

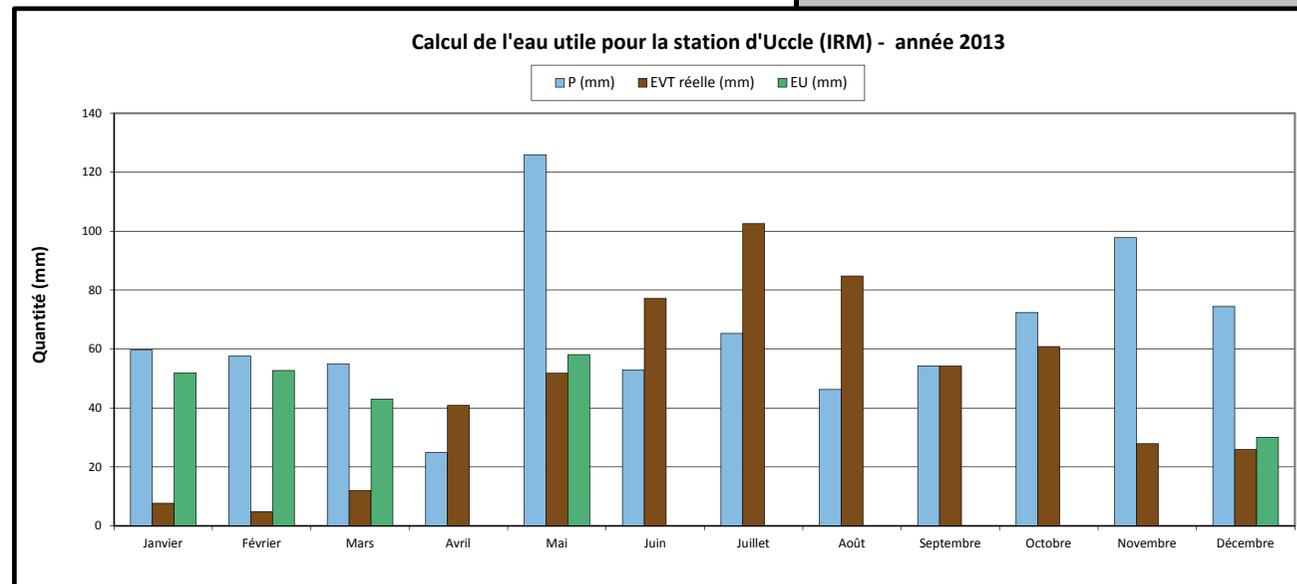
	T (°C)	Indice thermique
Janvier	4.0	0.7155
Février	5.4	1.1224
mars	7.7	1.9111
Avril	14.1	4.7356
Mai	14.8	5.0926
Juin	16.8	6.1590
Juillet	16.0	5.7243
Août	17.3	6.4360
Septembre	16.5	5.9947
Octobre	12.1	3.7646
Novembre	8.6	2.2558
Décembre	6.1	1.3475
I =		45.2591
a =		1.224146





	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						100		stock en fin d'année précédente	
Janvier	59.6	8	52	0	0	100	0	7.7	51.9
Février	57.6	5	53	0	0	100	0	4.9	52.7
Mars	55.0	12	43	0	0	100	0	12.0	43.0
Avril	25.0	41	-16	-16	-16	84	-16	40.9	0.0
Mai	125.9	52	74	0	-16	100	16	51.8	58.1
Juin	52.9	77	-24	-24	-40	76	-24	77.2	0.0
Juillet	65.3	103	-37	-37	-77	38	-37	102.5	0.0
Août	46.3	93	-47	-47	-124	0	-38	84.7	0.0
Septembre	54.2	71	-17	-17	-141	0	0	54.2	0.0
Octobre	72.4	61	12	0	-141	12	12	60.8	0.0
Novembre	97.8	28	70	0	-141	81	70	27.9	0.0
Décembre	74.5	26	49	0	-141	100	19	25.9	30.1
Total	786.4	576						551	235.8
									786.4

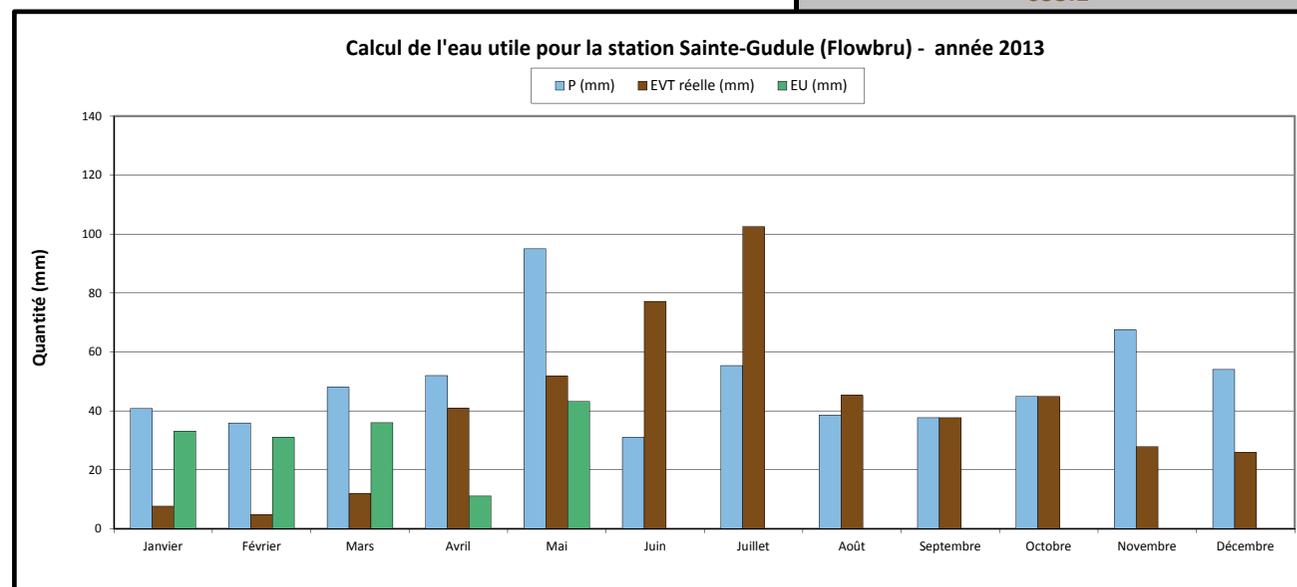
	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.1	0.2722
Février	1.4	0.1482
mars	3.1	0.4882
Avril	9.1	2.4553
Mai	11.2	3.3525
Juin	15.9	5.6708
Juillet	20.4	8.2412
Août	18.7	7.2328
Septembre	14.8	5.0926
Octobre	12.9	4.1441
Novembre	6.5	1.4822
Décembre	6.1	1.3475
I =		39.9276
a = 1.138841		





	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						100		stock en fin d'année précédente	
Janvier	40.8	8	33	0	0	100	0	7.7	33.1
Février	35.9	5	31	0	0	100	0	4.9	31.0
Mars	48.0	12	36	0	0	100	0	12.0	36.0
Avril	52.0	41	11	0	0	100	0	40.9	11.1
Mai	95.0	52	43	0	0	100	0	51.8	43.2
Juin	31.0	77	-46	-46	-46	54	-46	77.2	0.0
Juillet	55.4	103	-47	-47	-93	7	-47	102.5	0.0
Août	38.6	93	-54	-54	-148	0	-7	45.3	0.0
Septembre	37.7	71	-33	-33	-181	0	0	37.7	0.0
Octobre	44.9	61	-16	-16	-197	0	0	44.9	0.0
Novembre	67.5	28	40	0	-197	40	40	27.9	0.0
Décembre	54.1	26	28	0	-197	68	28	25.9	0.0
Total	600.9	576						479	154.5
								633.1	

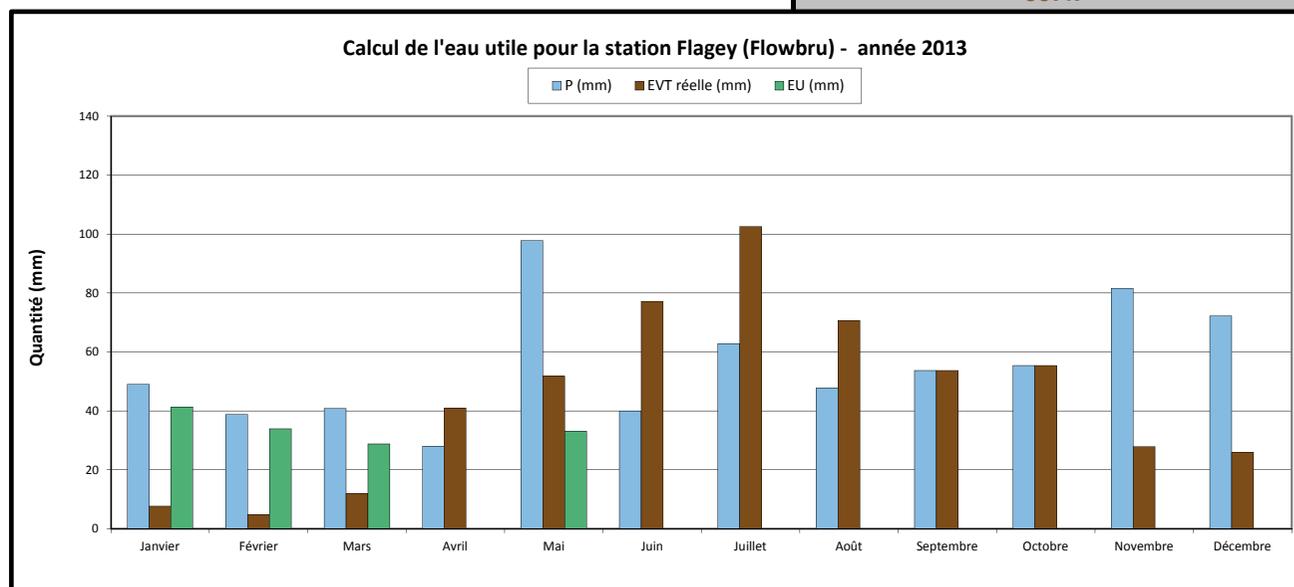
	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.1	0.2722
Février	1.4	0.1482
mars	3.1	0.4882
Avril	9.1	2.4553
Mai	11.2	3.3525
Juin	15.9	5.6708
Juillet	20.4	8.2412
Août	18.7	7.2328
Septembre	14.8	5.0926
Octobre	12.9	4.1441
Novembre	6.5	1.4822
Décembre	6.1	1.3475
I =		39.9276
a =		1.138841





	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						100		stock en fin d'année précédente	
Janvier	49.0	8	41	0	0	100	0	7.7	41.3
Février	38.8	5	34	0	0	100	0	4.9	33.9
Mars	40.8	12	29	0	0	100	0	12.0	28.8
Avril	28.0	41	-13	-13	-13	87	-13	40.9	0.0
Mai	97.8	52	46	0	-13	100	13	51.8	33.1
Juin	39.9	77	-37	-37	-50	63	-37	77.2	0.0
Juillet	62.8	103	-40	-40	-90	23	-40	102.5	0.0
Août	47.7	93	-45	-45	-135	0	-23	70.7	0.0
Septembre	53.7	71	-17	-17	-152	0	0	53.7	0.0
Octobre	55.4	61	-5	-5	-158	0	0	55.4	0.0
Novembre	81.6	28	54	0	-158	54	54	27.9	0.0
Décembre	72.2	26	46	0	-158	100	46	25.9	0.0
Total	667.7	576						531	137.2
								667.7	

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.1	0.2722
Février	1.4	0.1482
mars	3.1	0.4882
Avril	9.1	2.4553
Mai	11.2	3.3525
Juin	15.9	5.6708
Juillet	20.4	8.2412
Août	18.7	7.2328
Septembre	14.8	5.0926
Octobre	12.9	4.1441
Novembre	6.5	1.4822
Décembre	6.1	1.3475
I =		39.9276
a =		1.138841

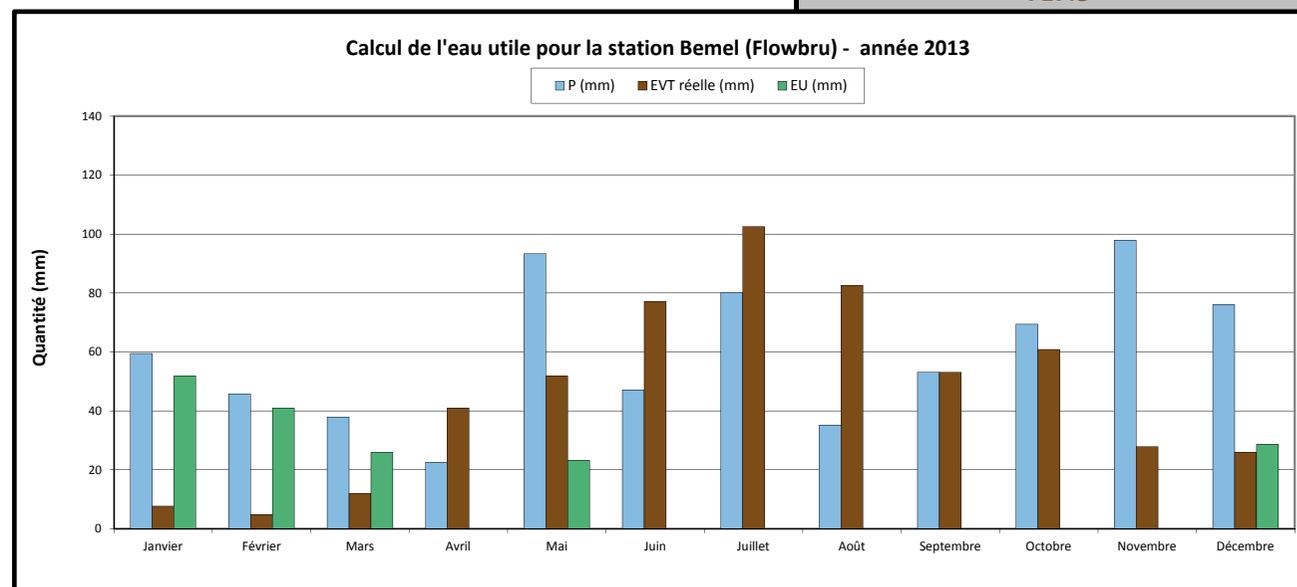




	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						100		stock en fin d'année précédente	
Janvier	59.5	8	52	0	0	100	0	7.7	51.8
Février	45.8	5	41	0	0	100	0	4.9	40.9
Mars	37.9	12	26	0	0	100	0	12.0	25.9
Avril	22.6	41	-18	-18	-18	82	-18	40.9	0.0
Mai	93.3	52	42	0	-18	100	18	51.8	23.2
Juin	47.1	77	-30	-30	-48	70	-30	77.2	0.0
Juillet	80.1	103	-22	-22	-71	47	-22	102.5	0.0
Août	35.1	93	-58	-58	-129	0	-47	82.6	0.0
Septembre	53.1	71	-18	-18	-147	0	0	53.1	0.0
Octobre	69.4	61	9	0	-147	9	9	60.8	0.0
Novembre	97.9	28	70	0	-147	79	70	27.9	0.0
Décembre	76.0	26	50	0	-147	100	21	25.9	28.7
Total	717.8	576						547	170.6

717.8

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.1	0.2722
Février	1.4	0.1482
mars	3.1	0.4882
Avril	9.1	2.4553
Mai	11.2	3.3525
Juin	15.9	5.6708
Juillet	20.4	8.2412
Août	18.7	7.2328
Septembre	14.8	5.0926
Octobre	12.9	4.1441
Novembre	6.5	1.4822
Décembre	6.1	1.3475
I =		39.9276
a =		1.138841





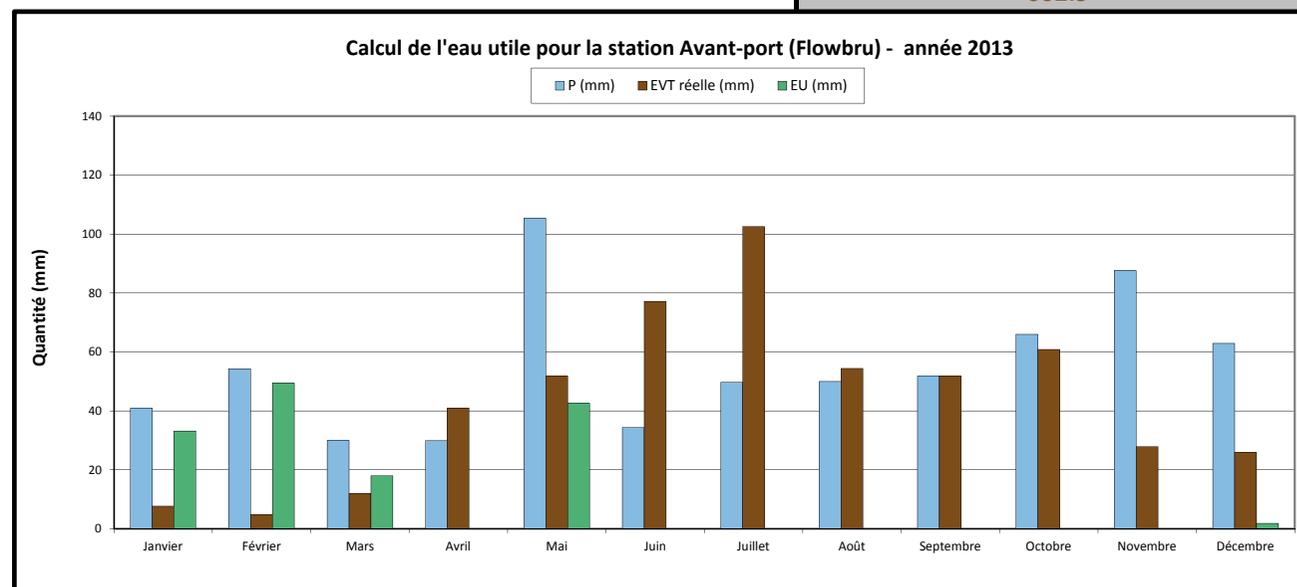
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100			
						100			
						100			
						100			
						89	-11		
						100	11		
						57	-43		
						4	-53		
						0	-4		
						0	0		
						5	5		
						65	60		
						100	35		
Total	662.9	576						518	145.2

stock maximal estimé (fonction du sol)

stock en fin d'année précédente

662.9

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.1	0.2722
Février	1.4	0.1482
mars	3.1	0.4882
Avril	9.1	2.4553
Mai	11.2	3.3525
Juin	15.9	5.6708
Juillet	20.4	8.2412
Août	18.7	7.2328
Septembre	14.8	5.0926
Octobre	12.9	4.1441
Novembre	6.5	1.4822
Décembre	6.1	1.3475
I =		39.9276
a = 1.138841		

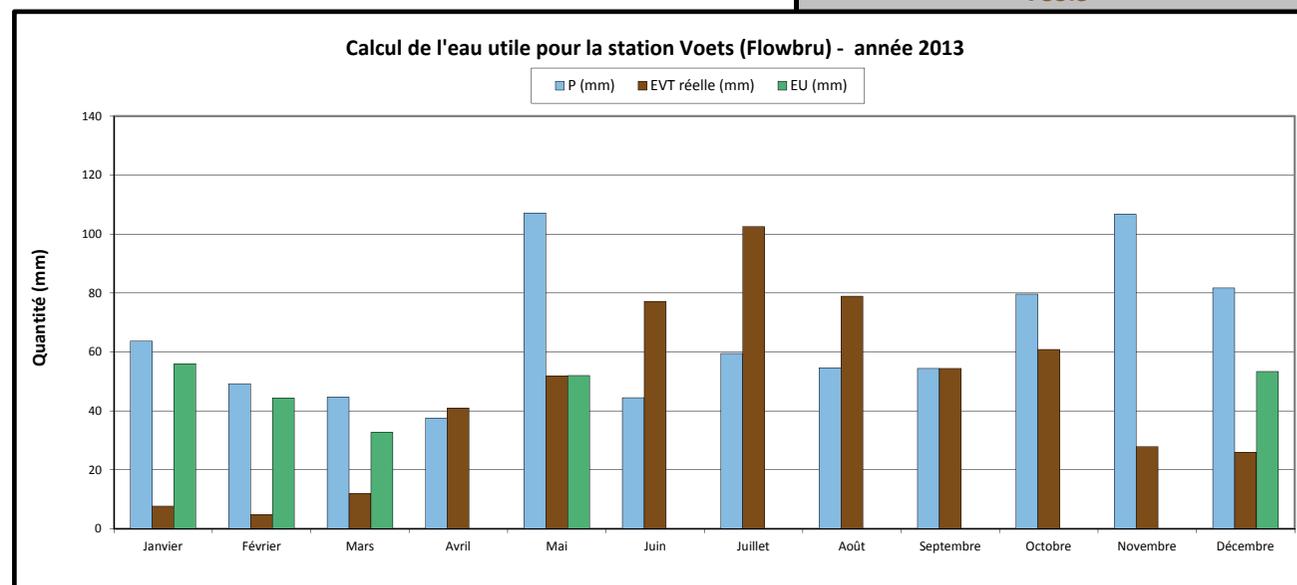




	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						100		stock en fin d'année précédente	
Janvier	63.7	8	56	0	0	100	0	7.7	56.0
Février	49.2	5	44	0	0	100	0	4.9	44.3
Mars	44.7	12	33	0	0	100	0	12.0	32.7
Avril	37.6	41	-3	-3	-3	97	-3	40.9	0.0
Mai	107.1	52	55	0	-3	100	3	51.8	52.0
Juin	44.5	77	-33	-33	-36	67	-33	77.2	0.0
Juillet	59.5	103	-43	-43	-79	24	-43	102.5	0.0
Août	54.6	93	-38	-38	-117	0	-24	78.9	0.0
Septembre	54.4	71	-17	-17	-134	0	0	54.4	0.0
Octobre	79.6	61	19	0	-134	19	19	60.8	0.0
Novembre	106.7	28	79	0	-134	98	79	27.9	0.0
Décembre	81.7	26	56	0	-134	100	2	25.9	53.4
Total	783.3	576						545	238.5

783.3

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.1	0.2722
Février	1.4	0.1482
mars	3.1	0.4882
Avril	9.1	2.4553
Mai	11.2	3.3525
Juin	15.9	5.6708
Juillet	20.4	8.2412
Août	18.7	7.2328
Septembre	14.8	5.0926
Octobre	12.9	4.1441
Novembre	6.5	1.4822
Décembre	6.1	1.3475
I =		39.9276
a =		1.138841

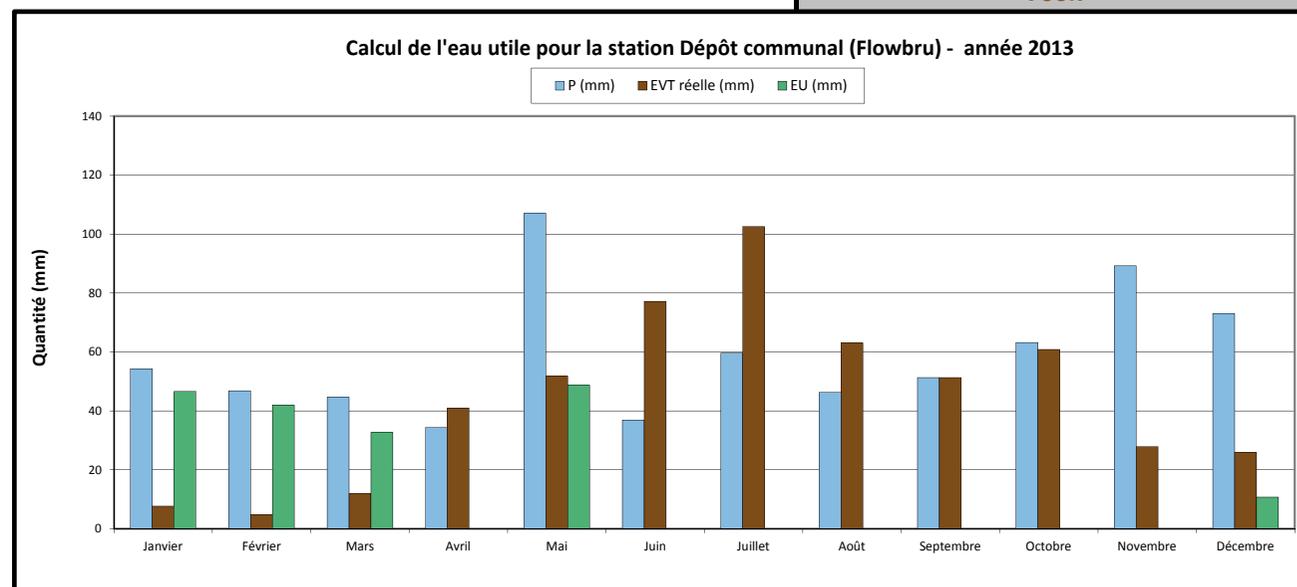




	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						100		stock en fin d'année précédente	
Janvier	54.3	8	47	0	0	100	0	7.7	46.6
Février	46.8	5	42	0	0	100	0	4.9	41.9
Mars	44.7	12	33	0	0	100	0	12.0	32.7
Avril	34.4	41	-6	-6	-6	94	-6	40.9	0.0
Mai	107.0	52	55	0	-6	100	6	51.8	48.7
Juin	36.9	77	-40	-40	-47	60	-40	77.2	0.0
Juillet	59.6	103	-43	-43	-90	17	-43	102.5	0.0
Août	46.3	93	-47	-47	-136	0	-17	63.1	0.0
Septembre	51.3	71	-20	-20	-156	0	0	51.3	0.0
Octobre	63.2	61	2	0	-156	2	2	60.8	0.0
Novembre	89.2	28	61	0	-156	64	61	27.9	0.0
Décembre	73.0	26	47	0	-156	100	36	25.9	10.8
Total	706.7	576						526	180.8

706.7

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.1	0.2722
Février	1.4	0.1482
mars	3.1	0.4882
Avril	9.1	2.4553
Mai	11.2	3.3525
Juin	15.9	5.6708
Juillet	20.4	8.2412
Août	18.7	7.2328
Septembre	14.8	5.0926
Octobre	12.9	4.1441
Novembre	6.5	1.4822
Décembre	6.1	1.3475
I =		39.9276
a =		1.138841

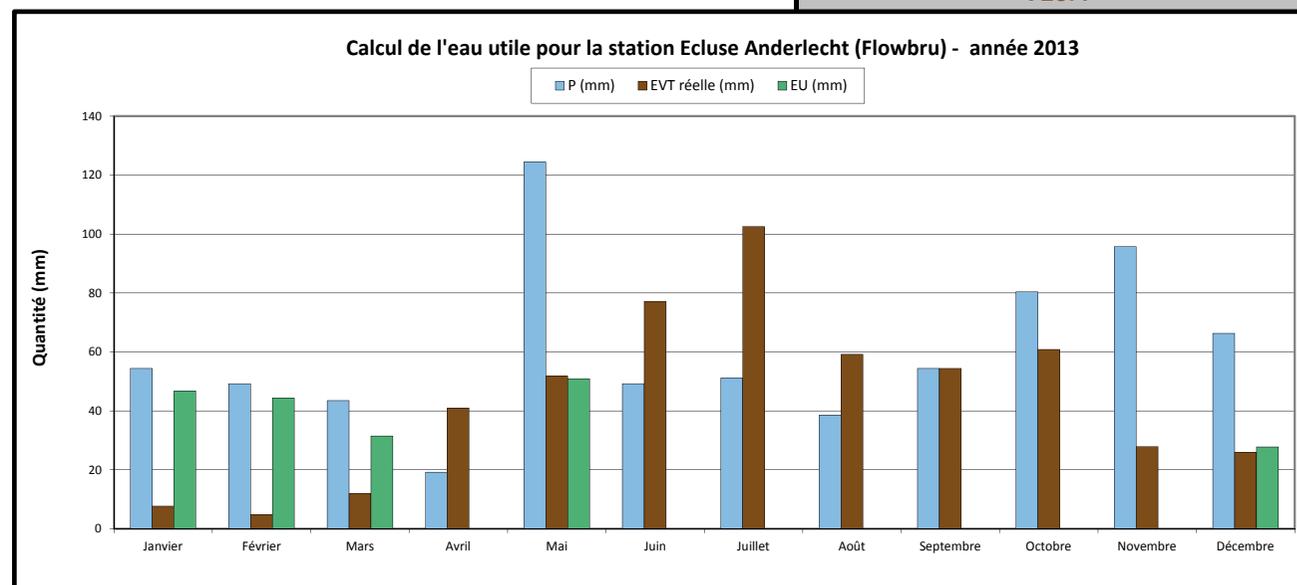




	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						100		stock en fin d'année précédente	
Janvier	54.4	8	47	0	0	100	0	7.7	46.7
Février	49.2	5	44	0	0	100	0	4.9	44.3
Mars	43.5	12	32	0	0	100	0	12.0	31.5
Avril	19.2	41	-22	-22	-22	78	-22	40.9	0.0
Mai	124.4	52	73	0	-22	100	22	51.8	50.9
Juin	49.2	77	-28	-28	-50	72	-28	77.2	0.0
Juillet	51.2	103	-51	-51	-101	21	-51	102.5	0.0
Août	38.5	93	-54	-54	-155	0	-21	59.2	0.0
Septembre	54.4	71	-17	-17	-172	0	0	54.4	0.0
Octobre	80.4	61	20	0	-172	20	20	60.8	0.0
Novembre	95.7	28	68	0	-172	87	68	27.9	0.0
Décembre	66.3	26	40	0	-172	100	13	25.9	27.8
Total	726.4	576						525	201.3

726.4

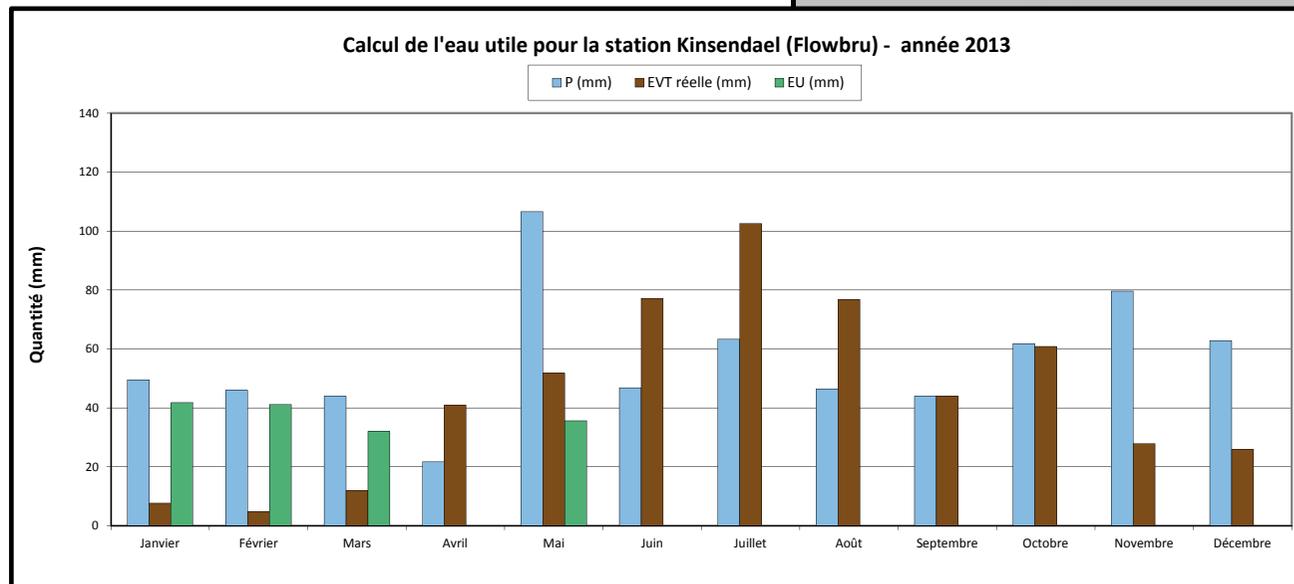
	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.1	0.2722
Février	1.4	0.1482
mars	3.1	0.4882
Avril	9.1	2.4553
Mai	11.2	3.3525
Juin	15.9	5.6708
Juillet	20.4	8.2412
Août	18.7	7.2328
Septembre	14.8	5.0926
Octobre	12.9	4.1441
Novembre	6.5	1.4822
Décembre	6.1	1.3475
I =		39.9276
a =		1.138841





	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						100		stock en fin d'année précédente	
Janvier	49.5	8	42	0	0	100	0	7.7	41.8
Février	46.0	5	41	0	0	100	0	4.9	41.1
Mars	44.0	12	32	0	0	100	0	12.0	32.0
Avril	21.7	41	-19	-19	-19	81	-19	40.9	0.0
Mai	106.6	52	55	0	-19	100	19	51.8	35.6
Juin	46.8	77	-30	-30	-50	70	-30	77.2	0.0
Juillet	63.3	103	-39	-39	-89	30	-39	102.5	0.0
Août	46.4	93	-46	-46	-135	0	-30	76.8	0.0
Septembre	44.0	71	-27	-27	-162	0	0	44.0	0.0
Octobre	61.8	61	1	0	-162	1	1	60.8	0.0
Novembre	79.6	28	52	0	-162	53	52	27.9	0.0
Décembre	62.8	26	37	0	-162	90	37	25.9	0.0
Total	672.5	576						532	150.6
								682.9	

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.1	0.2722
Février	1.4	0.1482
mars	3.1	0.4882
Avril	9.1	2.4553
Mai	11.2	3.3525
Juin	15.9	5.6708
Juillet	20.4	8.2412
Août	18.7	7.2328
Septembre	14.8	5.0926
Octobre	12.9	4.1441
Novembre	6.5	1.4822
Décembre	6.1	1.3475
I =		39.9276
a =		1.138841

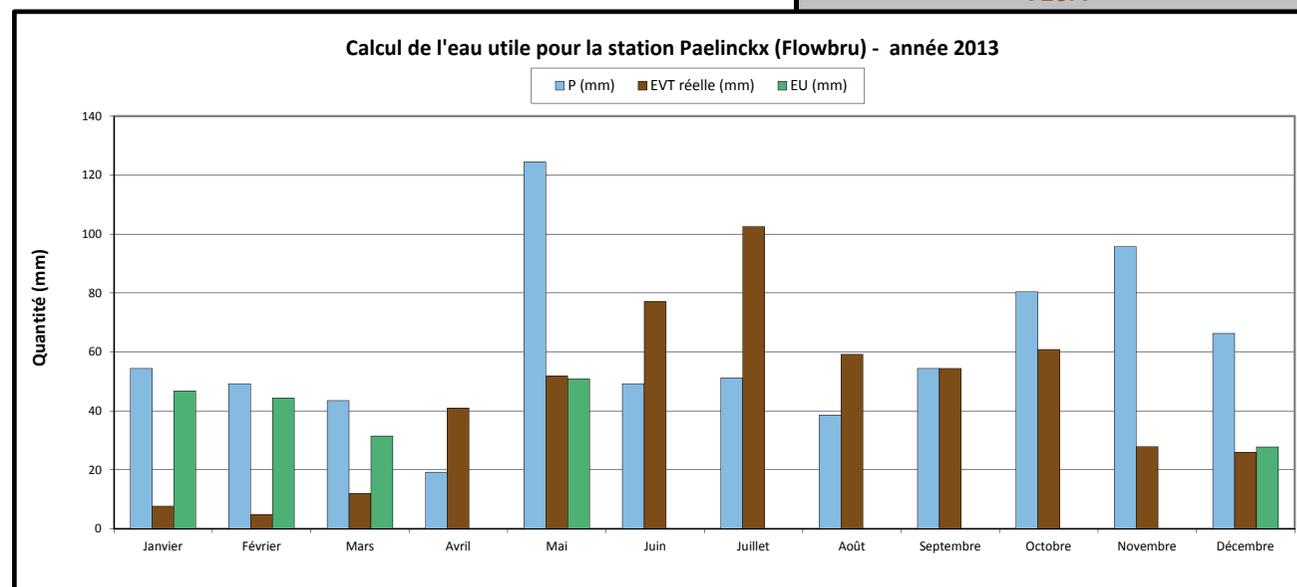




	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						100		stock en fin d'année précédente	
Janvier	54.4	8	47	0	0	100	0	7.7	46.7
Février	49.2	5	44	0	0	100	0	4.9	44.3
Mars	43.5	12	32	0	0	100	0	12.0	31.5
Avril	19.2	41	-22	-22	-22	78	-22	40.9	0.0
Mai	124.4	52	73	0	-22	100	22	51.8	50.9
Juin	49.2	77	-28	-28	-50	72	-28	77.2	0.0
Juillet	51.2	103	-51	-51	-101	21	-51	102.5	0.0
Août	38.5	93	-54	-54	-155	0	-21	59.2	0.0
Septembre	54.4	71	-17	-17	-172	0	0	54.4	0.0
Octobre	80.4	61	20	0	-172	20	20	60.8	0.0
Novembre	95.7	28	68	0	-172	87	68	27.9	0.0
Décembre	66.3	26	40	0	-172	100	13	25.9	27.8
Total	726.4	576						525	201.3

726.4

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.1	0.2722
Février	1.4	0.1482
mars	3.1	0.4882
Avril	9.1	2.4553
Mai	11.2	3.3525
Juin	15.9	5.6708
Juillet	20.4	8.2412
Août	18.7	7.2328
Septembre	14.8	5.0926
Octobre	12.9	4.1441
Novembre	6.5	1.4822
Décembre	6.1	1.3475
I =		39.9276
a =		1.138841

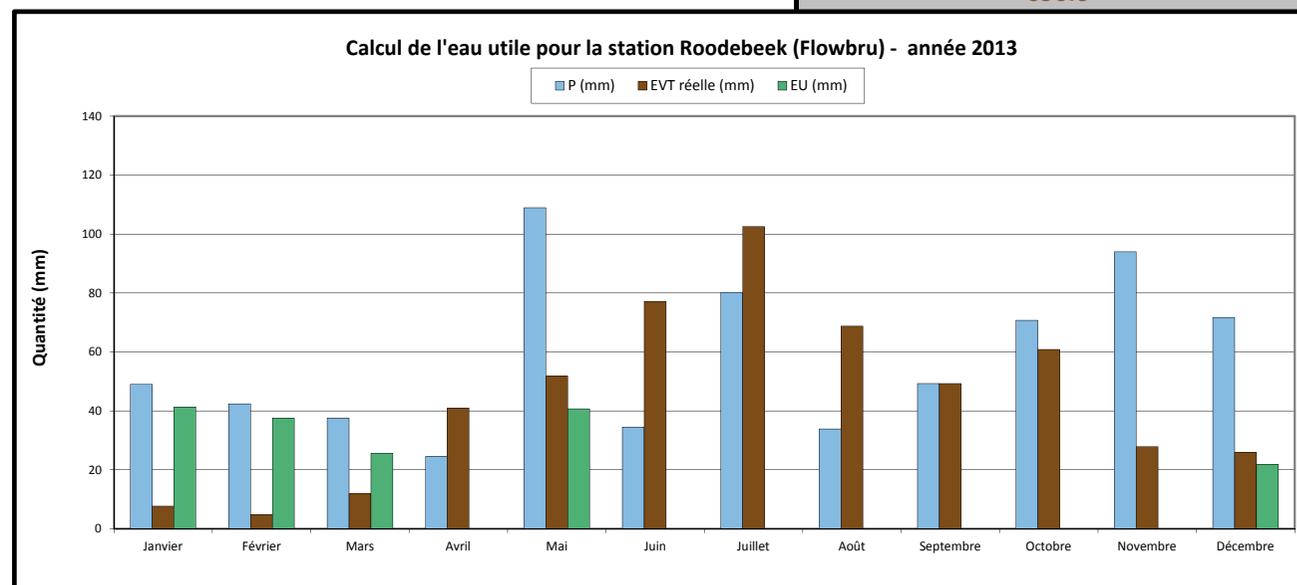




	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100		stock maximal estimé (fonction du sol)	
						100		stock en fin d'année précédente	
Janvier	49.0	8	41	0	0	100	0	7.7	41.3
Février	42.4	5	38	0	0	100	0	4.9	37.5
Mars	37.6	12	26	0	0	100	0	12.0	25.6
Avril	24.5	41	-16	-16	-16	84	-16	40.9	0.0
Mai	108.9	52	57	0	-16	100	16	51.8	40.7
Juin	34.5	77	-43	-43	-59	57	-43	77.2	0.0
Juillet	80.1	103	-22	-22	-81	35	-22	102.5	0.0
Août	33.9	93	-59	-59	-140	0	-35	68.8	0.0
Septembre	49.3	71	-22	-22	-162	0	0	49.3	0.0
Octobre	70.7	61	10	0	-162	10	10	60.8	0.0
Novembre	94.0	28	66	0	-162	76	66	27.9	0.0
Décembre	71.7	26	46	0	-162	100	24	25.9	21.8
Total	696.6	576						530	167.0

696.6

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.1	0.2722
Février	1.4	0.1482
mars	3.1	0.4882
Avril	9.1	2.4553
Mai	11.2	3.3525
Juin	15.9	5.6708
Juillet	20.4	8.2412
Août	18.7	7.2328
Septembre	14.8	5.0926
Octobre	12.9	4.1441
Novembre	6.5	1.4822
Décembre	6.1	1.3475
I =		39.9276
a =		1.138841





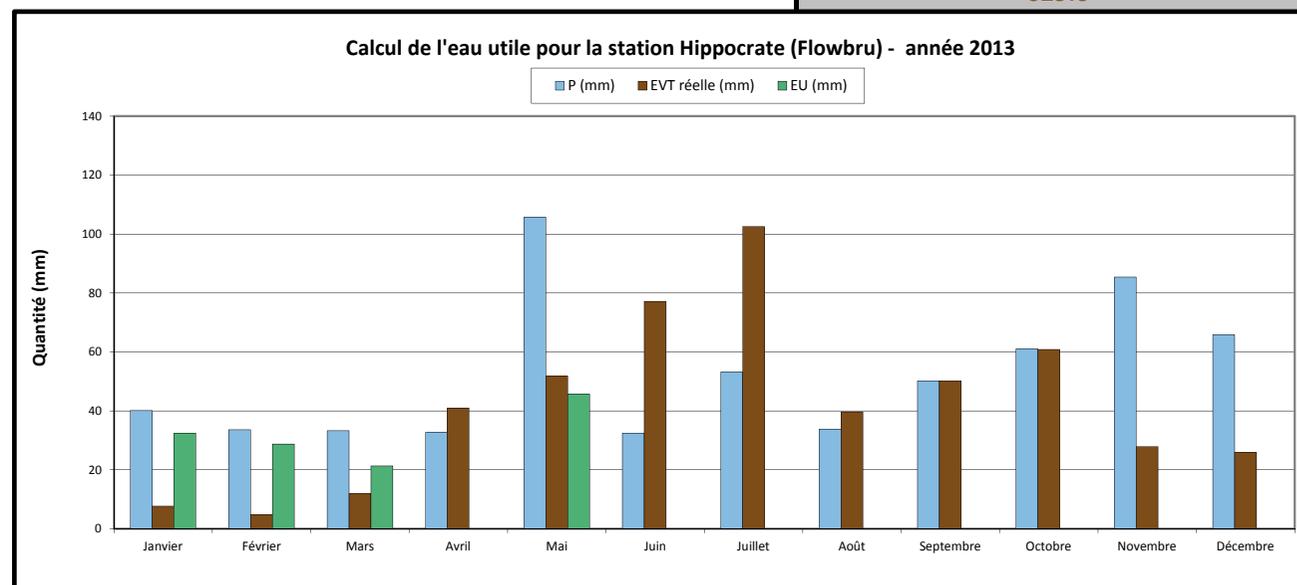
	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100			
						100			
						100			
						92	-8		
						100	8		
						55	-45		
						6	-49		
						0	-6		
						0	0		
						0	0		
						58	58		
						98	40		
Total	627.2	576						501	128.2

stock maximal estimé (fonction du sol)

stock en fin d'année précédente

629.6

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.1	0.2722
Février	1.4	0.1482
mars	3.1	0.4882
Avril	9.1	2.4553
Mai	11.2	3.3525
Juin	15.9	5.6708
Juillet	20.4	8.2412
Août	18.7	7.2328
Septembre	14.8	5.0926
Octobre	12.9	4.1441
Novembre	6.5	1.4822
Décembre	6.1	1.3475
I =		39.9276
a =		1.138841





	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	DEF (mm)	DEF cum (mm)	STOCK fin de mois (mm)	var STOCK (mm)	EVT réelle (mm)	EU (mm)
						100			
						100			
						100			
						92	-8		
						100	8		
						61	-39		
						9	-52		
						0	-9		
						0	0		
						24	24		
						89	65		
						100	11		
Total	695.7	576						523	172.9
								695.7	

	T (°C)	Indice thermique
Janvier	2.1	0.2722
Février	1.4	0.1482
mars	3.1	0.4882
Avril	9.1	2.4553
Mai	11.2	3.3525
Juin	15.9	5.6708
Juillet	20.4	8.2412
Août	18.7	7.2328
Septembre	14.8	5.0926
Octobre	12.9	4.1441
Novembre	6.5	1.4822
Décembre	6.1	1.3475
I =		39.9276
a = 1.138841		

