

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 LANDÉNIEN

Rapport final (phase II)

R-2016-043

DECEMBRE 2016



TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	14
2	LE LOGICIEL FEFLOW	18
2.1	MOTIVATION RELATIVE AU CHOIX DU LOGICIEL	18
2.2	DESCRIPTION SUCCINCTE DU LOGICIEL	19
3	ELABORATION DU MODÈLE CONCEPTUEL.....	20
3.1	EXTENSION GÉOGRAPHIQUE DU MODÈLE.....	20
3.2	EXTENSION VERTICALE DU MODÈLE	23
3.3	CONCEPTUALISATION DE LA STRUCTURE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE.....	23
3.3.1	<i>Description de la géologie et de l'hydrogéologie de la zone modélisée</i>	24
3.3.1.1	Contexte géologique régional.....	24
3.3.1.2	Contexte hydrogéologique régional	30
3.3.1.2.1	Année de référence pour le régime permanent - 2013	30
3.3.1.2.2	Période de référence pour le régime transitoire – 2009-2013	33
3.3.1.2.3	Analyse à long terme – 1997-2013	48
3.3.1.3	Contexte bruxellois.....	49
3.3.2	<i>Conceptualisation de la géologie et de l'hydrogéologie</i>	49
3.3.2.1	Conceptualisation de la géologie – géométrie des couches	49
3.3.2.2	Conceptualisation de l'hydrogéologie – hypothèses simplificatrices sur le comportement de l'aquifère	50
3.4	CONDITIONS AUX FRONTIÈRES EXTERNES ET INTERNES.....	53
3.4.1	<i>Définition des limites externes</i>	53
3.4.1.1	Frontières latérales Nord, Ouest et Est – Condition de Dirichlet, niveau d'eau imposé.....	53
3.4.1.2	Frontière latérale Sud – Condition de Neumann, flux imposé.....	53
3.4.1.3	Limite supérieure - Infiltration.....	53
3.4.1.4	Limite inférieure – Condition de neumann, flux imposé	54
3.4.2	<i>Définition des limites internes</i>	54
3.4.2.1	Cours d'eau – Condition de Dirichlet, niveau d'eau imposé	54
3.4.2.2	Captages – Conditions « Well BC »	55
4	ELABORATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE SOUS FEFLOW®	56
4.1	ETAPE #1 – CRÉATION DE LA GÉOMÉTRIE DE BASE	56
4.2	ETAPE #2 - GÉNÉRATION DU MAILLAGE EN ÉLÉMENTS FINIS	58
4.3	ETAPE #3 - DÉFINITION DU TYPE DE PROBLÈME	61
4.4	ETAPE #4 - DÉFINITION DES CONDITIONS AUX LIMITES.....	62
4.4.1	<i>Définition des limites externes</i>	62
4.4.1.1	Frontières latérales Nord, Ouest et Est– Condition de Dirichlet, niveau d'eau imposé.....	62
4.4.1.2	Frontière latérale Sud – Condition de Neumann, flux imposé.....	63
4.4.1.3	Limite supérieure – Infiltration.....	64
4.4.1.3.1	Evaluation de l'infiltration en régime permanent.....	64
4.4.1.3.2	Evaluation de l'infiltration en régime transitoire	66
4.4.1.3.2.1	Etude du contexte climatique pour la période 2009 - 2013	66
4.4.1.3.2.2	Etude du contexte climatique à long terme	69
4.4.1.3.2.3	Etude du contexte climatique à très long terme	77
4.4.1.3.2.4	Conséquence pour le modèle.....	79
4.4.1.3.3	Remarque importante	79
4.4.1.4	Limite inférieure – Condition de neumann, flux imposé	80
4.4.2	<i>Définition des limites internes</i>	80
4.4.2.1	Cours d'eau – Condition de Dirichlet, niveau d'eau imposé	80

4.4.2.2	Captages – Conditions « Well BC »	81
4.4.2.2.1	En régime permanent	81
4.4.2.2.2	En régime transitoire	85
5	CALIBRATION DU MODÈLE.....	90
5.1	ETAPE #5 - DÉFINITION DES POINTS D'OBSERVATION.....	90
5.1.1	<i>Observation de la piézométrie</i>	91
5.1.1.1	En régime permanent	91
5.1.1.2	En régime transitoire	93
5.1.2	<i>Observation des débits</i>	94
5.1.2.1	Contexte géologique des vallées en Région de Bruxelles-Capitale et alentours	96
5.1.2.2	En régime permanent	97
5.1.2.2.1	Bilan dans la vallée de la Senne	97
5.1.2.2.2	Bilan dans la vallée de la Dyle	98
5.1.2.2.3	Bilan dans la vallée de la Dendre	99
5.1.2.3	En régime transitoire	99
5.1.2.3.1	La vallée de la Senne	100
5.1.2.3.2	La vallée de la Dyle.....	100
5.1.2.3.3	La vallée de la Dendre	102
5.1.2.4	Synthèse des observations des débits	103
5.2	ETAPE #6 - DÉFINITION DES PARAMÈTRES D'ÉCOULEMENT	104
5.2.1	<i>Conductivité hydraulique</i>	104
5.2.2	<i>Porosité efficace</i>	105
5.2.3	<i>Coefficient d'emménagement</i>	105
5.3	ETAPE #7 – VISUALISATION DES RÉSULTATS.....	106
5.3.1	<i>Calibration en régime permanent – Période de mai-juin 2013</i>	106
5.3.2	<i>Calibration en régime permanent – Période de novembre 2013</i>	109
5.3.3	<i>Calibration et validation en régime transitoire – Période de 1970 à 2013</i>	113
5.4	ETAPE #8 – BILAN HYDROGÉOLOGIQUE	125
5.4.1	<i>Calibration en régime permanent – Période de mai – juin 2013</i>	125
5.4.1.1	Bilan global	125
5.4.1.2	Etat de Calibration	126
5.4.2	<i>Calibration en régime permanent – Période de novembre 2013</i>	128
5.4.2.1	Bilan global	128
5.4.2.2	Etat de calibration	128
5.4.3	<i>Calibration et validation en régime transitoire – Période de 2009 à 2013</i>	128
5.4.3.1	La Senne	129
5.4.3.2	La Dyle	129
5.4.3.3	La Lasne	130
5.4.3.4	La Dendre	131
5.5	CONCLUSION GÉNÉRALE SUR L'ÉTAT DE CALIBRATION DU MODÈLE HYDROGÉOLOGIQUE	132
6	ETUDE DE SENSIBILITÉ	134
6.1	INFILTRATION ET CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE.....	134
6.2	DÉBITS PRÉLEVÉS PAR POMPAGE (HISTORIQUE)	136
6.3	NIVEAUX D'EAU IMPOSÉS AU DROIT DES RIVIÈRES.....	141
6.4	POROSITÉ	146
6.5	COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT	149
6.6	DÉBITS PRÉLEVÉS PAR POMPAGE (FICTIF).....	152
6.7	CONCLUSION GÉNÉRALE DE L'ÉTUDE DE SENSIBILITÉ.....	154
7	SIMULATIONS ET RÉSULTATS DE L'ÉTUDE.....	157
7.1	INTRODUCTION.....	157
7.1.1	<i>Définition des scénarii</i>	157
7.1.2	<i>Estimation de l'infiltration de référence pour les différents scénarii</i>	158
7.1.2.1	Scénarii n°1 à 3 – Infiltration représentative d'une situation moyenne	158

7.1.2.2	Scénarii n°4 à 6 – Infiltration représentative d’une période de recharge faible	159
7.1.2.3	Scénarii n°7 à 9 – Infiltration représentative d’une période de recharge élevée	159
7.2	ESTIMATION DES RESSOURCES DISPONIBLES	159
7.2.1	<i>Généralités</i>	159
7.2.1.1	Législation Européenne	159
7.2.1.2	Législation bruxelloise	161
7.2.1.3	Démarche	161
7.2.2	<i>Etude à long terme des niveaux d’eau mesurés dans les piézomètres de la Région de Bruxelles-Capitale</i>	161
7.2.3	<i>Simulations</i>	165
7.2.3.1	Scénarii n°1 à 3 – Régime permanent, infiltration représentative d’une situation moyenne	165
7.2.3.1.1	Scénario 1 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale identique à celui de 2013.....	165
7.2.3.1.2	Scénario 2 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 50 % par rapport à celui de 2013	166
7.2.3.1.3	Scénario 3 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 100 % par rapport à celui de 2013	169
7.2.3.2	Scénarii n°4 à 6 – Régime transitoire, infiltration représentative d’une période de 5 années de recharge faible	171
7.2.3.2.1	Scénario 4 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale identique à celui de 2013.....	171
7.2.3.2.2	Scénario 5 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 50 % par rapport à celui de 2013	173
7.2.3.2.3	Scénario 6 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 100 % par rapport à celui de 2013	177
7.2.3.3	Scénarii n°7 à 9 – Régime transitoire, infiltration représentative d’une période de 5 années de recharge élevée	181
7.2.3.3.1	Scénario 7 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale identique à celui de 2013.....	181
7.2.3.3.2	Scénario 8 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 50 % par rapport à celui de 2013	184
7.2.3.3.3	Scénario 9 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 100 % par rapport à celui de 2013	187
7.2.4	<i>Synthèse</i>	191
7.3	QUANTIFICATION DES ÉCHANGES AVEC LA RÉGION FLAMANDE	192
7.3.1	<i>Simulations</i>	192
7.3.1.1	Scénarii n°1 à 3 – Régime permanent, infiltration représentative d’une situation moyenne	192
7.3.1.1.1	Scénario 1 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale identique à celui de 2013.....	192
7.3.1.1.2	Scénario 2 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 50 % par rapport à celui de 2013	194
7.3.1.1.3	Scénario 3 – Volume prélevé en Région de Bruxelles-Capitale augmenté de 100 % par rapport à celui de 2013	196
7.3.1.1.4	Remarque sur les scénarii et la sensibilité	198
7.3.1.2	Scénarii n°4 à 6 – Régime transitoire, infiltration représentative d’une période de 5 années de recharge faible	199
7.3.1.3	Scénarii n°7 à 9 – Régime transitoire, infiltration représentative d’une période de 5 années de recharge élevée	200
7.3.2	<i>Synthèse</i>	202
8	CONCLUSIONS, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS	204

FIGURES – TABLEAUX - ANNEXES

FIGURES

Figure 1-1 : Les différentes étapes dans le développement d'un modèle numérique des écoulements et du transport	16
Figure 3-1 : Etendue géographique de la zone d'étude	21
Figure 3-2 : Carte géologique de la zone modélisée (Source : les planches évoquées dans le texte ci-dessus) ...	26
Figure 3-3 : Coupes géologiques de la planche 31-39 (Bruxelles-Nivelles)	27
Figure 3-4 : Tracé de la coupe géologique schématique A-A'	28
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 piézométriques de la <i>nappe du Landénien</i> pour la campagne de mai et juin 2013, les abréviations utilisées pour les formations sont reprises de la carte géologique – Planche 31-39 – Bruxelles – Nivelles, Ph. BUFFEL, J. MATTHIJS, 2002 , voir légende de la figure 3-2)	29
Figure 3-6 : Carte piézométrique de l'aquifère des sables du Landénien, campagne de mai et juin 2013 (contexte d'intermédiaires eaux)	31
Figure 3-7 : Carte piézométrique de l'aquifère des sables du Landénien, campagne de novembre 2013 (contexte d'intermédiaires eaux)	32
Figure 3-8 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Landénien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre - 33 et - 23 m)	35
Figure 3-9 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Landénien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre - 10 et 0 m)	36
Figure 3-10 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Landénien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 0 et 10 m)	37
Figure 3-11 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Landénien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 10 et 20 m)	38
Figure 3-12 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Landénien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 20 et 30 m)	39
Figure 3-13 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Landénien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 30 et 40 m)	40
Figure 3-14 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Landénien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 40 et 50 m)	41
Figure 3-15 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Landénien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 50 et 60 m)	42

Figure 3-16 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Landénien</i> entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 70 et 80 m)	43
Figure 3-17 : Localisation des piézomètres pour lesquels un suivi piézométrique est réalisé entre 2009 et 2013 (ceux-ci sont repris aux figures 3-8 à 3-16)	44
Figure 3-18 : Identification des différents types de variation piézométrique entre 2009 et 2013 au sein de la zone modélisée	47
Figure 3-19 : Evolution de la piézométrie de la <i>nappe du Landénien</i> entre 1997 et 2013 pour les piézomètres Coca-Cola et Lavallée	48
Figure 3-20 : Zonage par comportement piézométrique (période 2009 – 2013)	52
Figure 4-1 : Etape #1 – création de la géométrie de base du modèle numérique (Supermesh)	57
Figure 4-2 : Etape #2 – génération du maillage en éléments finis	59
Figure 4-3 : Etape #2 – zoom sur le maillage en éléments finis	60
Figure 4-4 : Modèle 3D généré après maillage	61
Figure 4-5 : Potentiels imposés le long des frontières extérieures Nord, Ouest et Est (Vue vers le Sud).....	63
Figure 4-6 : Flux nuls imposés le long de la frontière Sud (Vue vers le Nord).....	64
Figure 4-7 : Infiltration imposée au modèle hydrogéologique en régime permanent	65
Figure 4-8 : Evolution de la pluviométrie et de l'eau utile mensuelle à la station IRM d'Uccle entre 2009 et 2013	66
Figure 4-9 : 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)	71
Figure 4-10 : Impact de l'eau utile à long terme sur les piézomètres situés en Région de Bruxelles-Capitale.....	74
Figure 4-11 : Impact de l'eau utile à long terme sur le piézomètre 4-0067	75
Figure 4-12 : Impact de l'eau utile à long terme sur les piézomètres 2-0046 et 2-0072	76
Figure 4-13 : 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)	77
Figure 4-14 : 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)	77
Figure 4-15 : 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)	78
Figure 4-16 : 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)	78
Figure 4-17 : Potentiels imposés sur les ruisseaux / rivières à l’intérieur de la zone modélisée	81
Figure 4-18 : Débits de pompage imposés dans la <i>nappe du Landénien</i> en régime permanent	84
Figure 4-19 : Localisation des puits fictifs utilisés pour reproduire la remontée piézométrique observée à très long terme.....	89
Figure 5-1 : Points d’observation dans la <i>nappe du Landénien</i> pour les deux périodes calibrées en régime permanent	93
Figure 5-2 : Stations de jaugeage prises en considération pour la réalisation des bilans hydrographiques.....	95
Figure 5-3 : Coupe géologique des dépôts du Quaternaire en vallée de la Senne (ULB, 2013).....	97
Figure 5-4 : Evolution de l’augmentation moyenne mensuelle du débit de la Senne entre Lot d’une part, et Rebecq et Tubize d’autre part (en m ³ /j)	100
Figure 5-5 : Evolution de l’augmentation moyenne mensuelle du débit de la Dyle entre Limelette et Florival (en m ³ /j)	101
Figure 5-6 : Evolution de l’augmentation moyenne mensuelle du débit de la Lasne entre Rosières et Overijse (en m ³ /j)	102
Figure 5-7 : Evolution du débit mensuel de la Dendre à Idegem (en m ³ /j).....	103
Figure 5-8 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe du Landénien</i> pour la période de mai – juin 2013	107
Figure 5-9 : Diagramme de dispersion (scatterplot) de l’ensemble des points d’observation pour la période de mai – juin 2013.....	108
Figure 5-10 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe du Landénien</i> pour la période de novembre 2013.....	111
Figure 5-11 : Diagramme de dispersion (scatterplot) de l’ensemble des points d’observation pour la période de novembre 2013	112
Figure 5-12 : Piézométries mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de - 20 à 0 m	115
Figure 5-13 : Piézométries mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 0 à 20 m	116
Figure 5-14 : Piézométries mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 20 à 40 m	117

Figure 5-15 : Piézométries mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 40 à 60 m	118
Figure 5-16 : Piézométries mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 60 à 80 m	119
Figure 5-17 : Piézométries mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 5 à 25 m en Région de Bruxelles-Capitale	120
Figure 5-18 : Piézométries mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 5 à 25 m en Région de Bruxelles-Capitale entre 1970 et 2013	121
Figure 5-19 : Qualité de la calibration en régime transitoire	124
Figure 5-20 : Bilan global en m ³ /j en régime permanent pour la période de mai – juin 2013	125
Figure 5-21 : Diagramme de dispersion (scatterplot) de l'ensemble des débits sortants pour la période de mai – juin 2013	127
Figure 5-22 : Evolution du débit de drainage par la Senne en amont de la station de Lot simulé en régime transitoire	129
Figure 5-23 : Evolution du débit de drainage par la Dyle en amont de la station de Florival simulé en régime transitoire	130
Figure 5-24 : Evolution du débit de drainage par la Lasne entre Rosières et Overijse simulé en régime transitoire	131
Figure 6-1 : Graphique de l'étude de sensibilité sur l'infiltration et la conductivité hydraulique	135
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	137
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	138
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	139
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	140
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 (Dendre, Senne, Dyle et Lasne – tronçons amonts) dans le cadre de la calibration en régime permanent	142
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 (Dendre, Senne, Dyle et Lasne – tronçons amonts) dans le cadre de la calibration en régime permanent	143
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 (Dendre, Senne, Dyle et Lasne – tronçons amonts) dans le cadre de la calibration en régime permanent	144

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 (Dendre, Senne, Dyle et Lasne – tronçons amonts) dans le cadre de la calibration en régime permanent	145
Figure 6-10 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage Lavallée pour différentes valeurs de porosité.....	147
Figure 6-11 : Variation du débit drainé par la Senne en amont de Lot pour différentes valeurs de porosité	148
Figure 6-12 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage Lavallée pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement.....	150
Figure 6-13 : Variation du débit drainé par la Senne en amont de Lot pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement	151
Figure 6-14 : Evolution de la piézométrie mesurée et simulée au droit de l'ouvrage Lavallée pour différentes valeurs de débit aux puits fictifs	153
Figure 6-15 : Détermination des simulations à réaliser pour l'évaluation de l'incertitude sur les résultats	156
Figure 7-1 : Scénarii réalisés dans le cadre de la présente étude	158
Figure 7-2 : Evolution de la piézométrie mesurée automatiquement à très long terme (1997 – 2013)	163
Figure 7-3 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°1	165
Figure 7-4 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°2	167
Figure 7-5 : Diminution du niveau d'eau de la <i>nappe du Landénien</i> par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°2	168
Figure 7-6 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°3	169
Figure 7-7 : Diminution du niveau d'eau de la <i>nappe du Landénien</i> par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°3	170
Figure 7-8 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°4	171
Figure 7-9 : Diminution du niveau d'eau de la <i>nappe du Landénien</i> par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°4	172
Figure 7-10 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°5	174
Figure 7-11 : Diminution du niveau d'eau de la <i>nappe du Landénien</i> par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°5	175
Figure 7-12 : Diminution du niveau d'eau de la <i>nappe du Landénien</i> par rapport au niveau de référence du scénario n°4 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°5	176
Figure 7-13 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°6	178
Figure 7-14 : Diminution du niveau d'eau de la <i>nappe du Landénien</i> par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°6	179

Figure 7-15 : Diminution du niveau d'eau de la <i>nappe du Landénien</i> par rapport au niveau de référence du scénario n°4 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°6	180
Figure 7-16 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°7	182
Figure 7-17 : Augmentation du niveau d'eau de la <i>nappe du Landénien</i> par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°7	183
Figure 7-18 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°8	184
Figure 7-19 : Modification du niveau d'eau de la <i>nappe du Landénien</i> par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°8	185
Figure 7-20 : Diminution du niveau d'eau de la <i>nappe du Landénien</i> par rapport au niveau de référence du scénario n°7 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°8	186
Figure 7-21 : Piézométrie absolue simulée selon le scénario n°9	188
Figure 7-22 : Modification du niveau d'eau de la <i>nappe du Landénien</i> par rapport au niveau de référence du scénario n°1 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°9	189
Figure 7-23 : Diminution du niveau d'eau de la <i>nappe du Landénien</i> par rapport au niveau de référence du scénario n°7 compte tenu des paramètres spécifiques au scénario n°9	190
Figure 7-24 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la <i>nappe du Landénien</i> selon le scénario n°1.....	194
Figure 7-25 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la <i>nappe du Landénien</i> selon le scénario n°2.....	196
Figure 7-26 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la <i>nappe du Landénien</i> selon le scénario n°3.....	198
Figure 7-27 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la <i>nappe du Landénien</i> selon le scénario n°4.....	200
Figure 7-28 : Lignes de flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale dans la <i>nappe du Landénien</i> selon le scénario n°7.....	202

TABLEAUX

Tableau 3-1 : Entités hydrogéologiques en Région de Bruxelles-Capitale	23
Tableau 3-2 : Comportement de la <i>nappe du Landénien</i> au droit des différents piézomètres entre 2009 et 2013	45
Tableau 4-1 : Evolution de l'eau utile annuelle entre 1990 et 2013 (mm) (Source des données pluviométriques : IRM).....	70
Tableau 4-2 : Débits de pompage imposés dans la <i>nappe du Landénien</i> en régime permanent	84
Tableau 4-3 : Débits de pompage imposés dans la <i>nappe du Landénien</i> en régime transitoire.....	88
Tableau 5-1 : Points d'observation dans la <i>nappe du Landénien</i>	92
Tableau 5-2 : Synthèse de l'observation des débits.....	104
Tableau 5-3 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe du Landénien</i> pour la période de mai – juin 2013.....	107
Tableau 5-4 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la <i>nappe du Landénien</i> pour la période de novembre 2013	110
Tableau 5-5 : Comparaison des débits mesurés (ou estimés) et simulés en régime permanent pour la période mai – juin 2013.....	126
Tableau 6-1 : Sensibilité du modèle vis-à-vis des débits prélevés par pompage	136
Tableau 6-2 : Sensibilité du modèle vis-à-vis des niveaux d'eau imposés au droit des rivières	141
Tableau 7-1 : Synthèse des évaluations des ressources pour les 9 scénarii	191
Tableau 7-2 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°1	193
Tableau 7-3 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°2	195
Tableau 7-4 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°3	197
Tableau 7-5 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°4	199
Tableau 7-6 : Evaluation de l'incertitude sur les estimations des flux entrant, sortant et de la balance globale dans le cadre du scénario n°7	201
Tableau 7-7 : Synthèse des évaluations des flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale pour les scénarii étudiés	203
Tableau 8-1 : Synthèse des évaluations des ressources pour les 9 scénarii	206

Tableau 8-2 : Synthèse des évaluations des flux à la frontière de la Région de Bruxelles-Capitale pour les scénarii étudiés 207

ANNEXES

Annexe 1 : Présentation détaillée du logiciel FEFLOW® 19

Annexe 2 : Bilans de Thornthwaite sur les années 1999 à 2013 pour la station pluviométrique d’Uccle (IRM) .. 66

DECHARGE DE RESPONSABILITE – DISCLAIMER

Le présent délivrable / 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 délivrable / 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 délivrable / 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 délivrable / 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 délivrable / 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 Landénien. 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 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'eau¹ du Landénien² 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 l'ensemble du territoire de la Région de Bruxelles-Capitale.

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. Le rapport final de cette première phase de l'étude a été finalisé par le SGB durant l'été 2015.

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 de l'aquifère du Landénien (masse Br03)* »³.

Le présent rapport a pour objectif de présenter à l'IBGE le modèle hydrogéologique finalisé (en date du 19 novembre 2016).

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... ;
 - o 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 ;

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

² La masse d'eau souterraine du Landénien (Br03) caractérisée au titre de la définition de la directive et de l'ordonnance cadre eau regroupe les sables et les argiles de la Formation de Hannut (les sables étant repris dans le Membre de Grandglise alors que les argiles sont reprises dans le Membre de Lincent).

³ Projet Hydroland, Etude hydrogéologique de la masse d'eau souterraine du Landénien, Projet eau n°2012.410 – CSC 2012-02-ALI, Modélisation géologique en 3D de l'aquifère du Landénien (masse Br03), 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, Août 2015.

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

- 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.

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

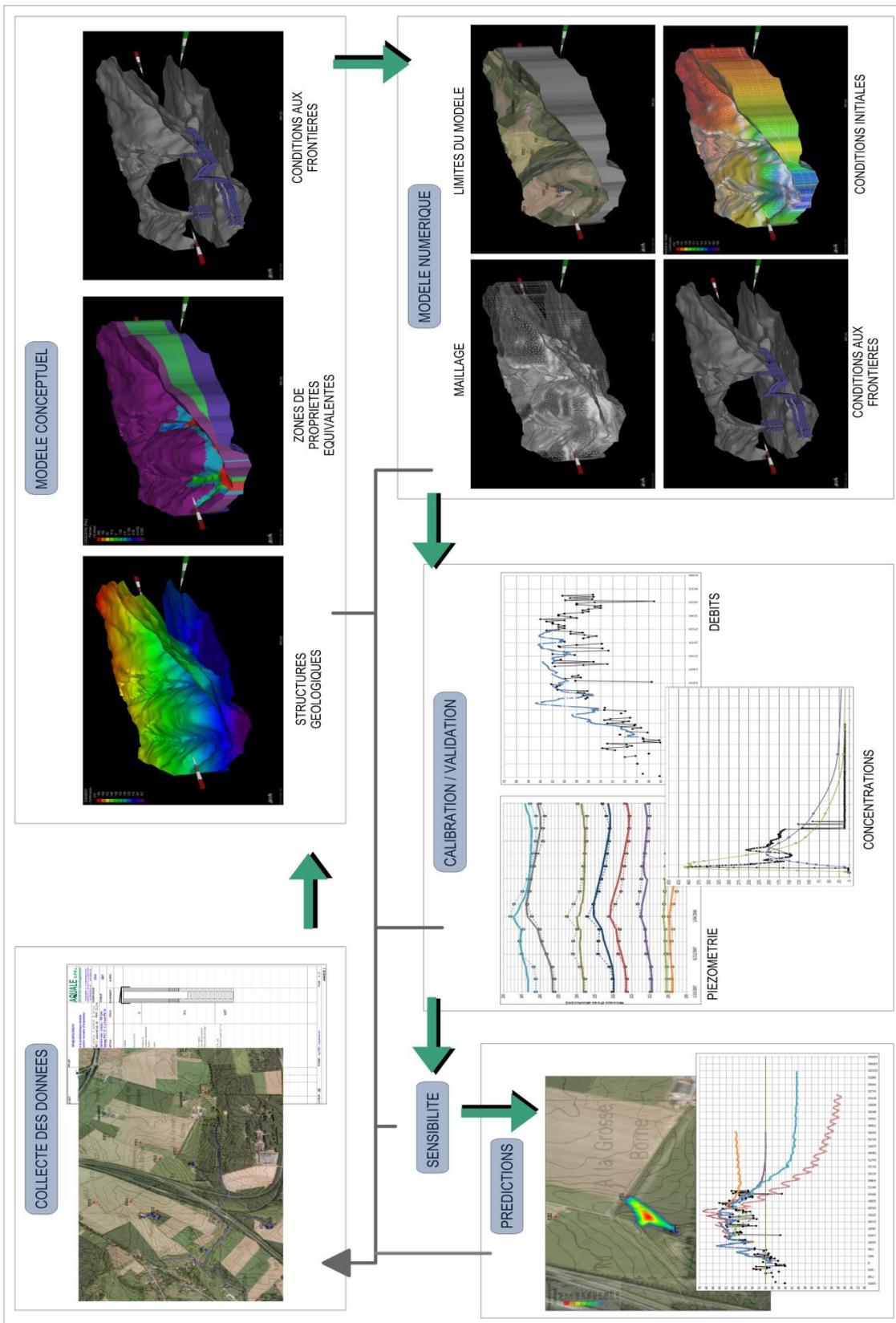


Figure 1-1 : Les différentes étapes dans le développement d'un modèle numérique des écoulements et du transport

Le présent rapport 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 ;
- 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'entièreté 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 Landénien (Br03). La zone couverte par le modèle fait partie du bassin versant (hydrographique) de l'Escaut et s'étend principalement dans les provinces du Brabant wallon et du Brabant flamand et dans la Région de Bruxelles-Capitale.

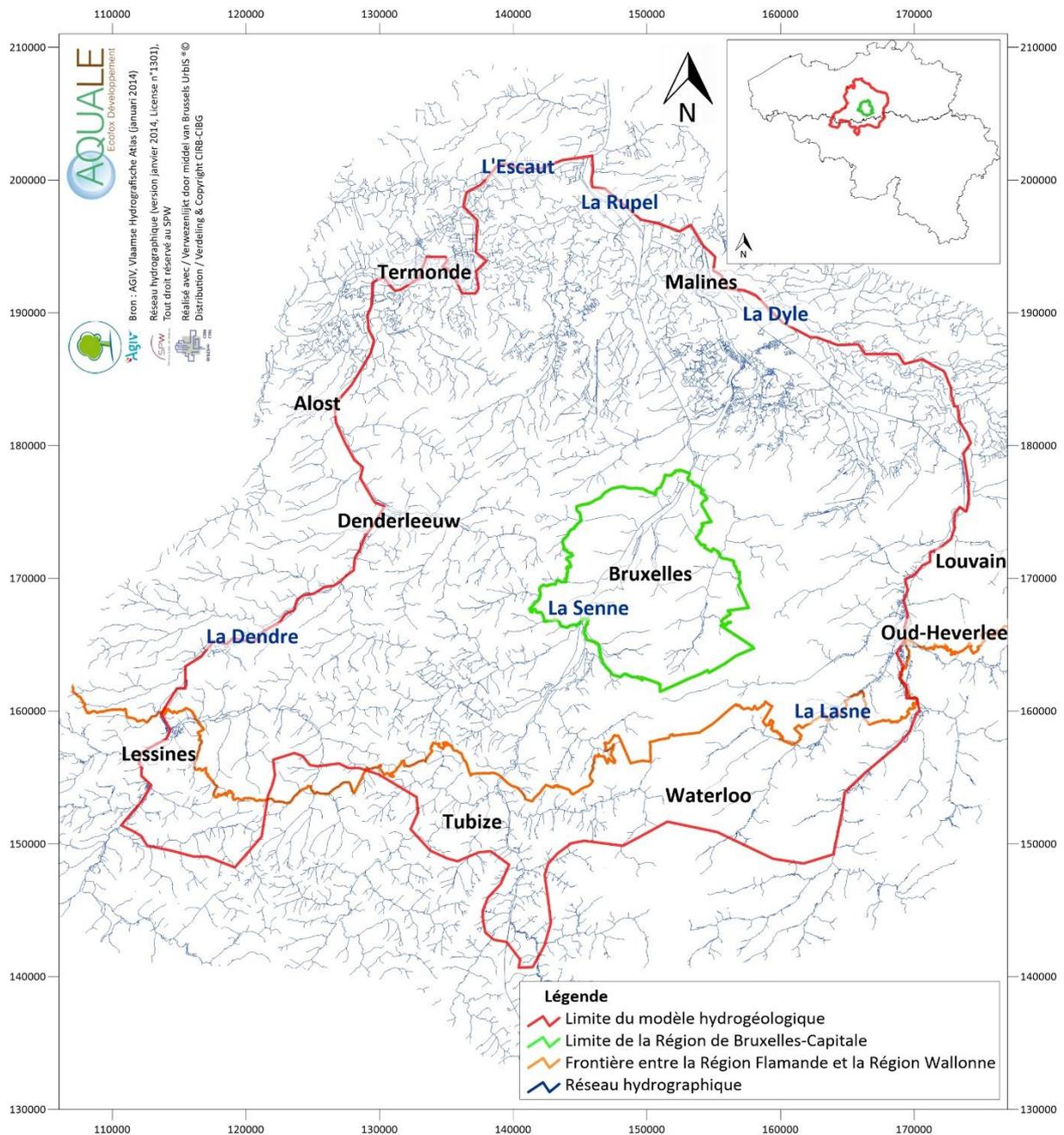


Figure 3-1 : Etendue géographique de la zone d'étude

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 Dendre puis de l'Escaut ;
- au Nord, la zone est limitée par la vallée de la Dyle puis de la Rupel, la zone s'étend jusqu'au point de confluence de l'Escaut et de la Rupel ;
- à l'Est, la zone est limitée par la Dyle ;
- au Sud, la zone est limitée par l'extension géologique du Membre de Grandglise.

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 et Nord car il s'agit de la première rivière majeure vers l'Est et qu'elle recoupe, sur un certain tronçon au Sud du modèle, la Formation des sables du Landénien. 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.

Si cette rivière est choisie comme limite, c'est parce qu'elle draine l'aquifère modélisé sur la partie la plus amont de son cours. Ce n'est évidemment pas le cas sur l'ensemble du tronçon de rivière considéré comme limite. Ainsi, les niveaux d'eau imposés le long de cette frontière sont ceux qui sont obtenus par interpolation de la piézométrie mesurée pour les périodes de référence. Là où la rivière est en équilibre avec la nappe, ce sont bien les niveaux d'eau de la rivière qui ont été imposés au modèle.

C'est précisément dans le même esprit que la Dendre est choisie comme limite Ouest. Comme pour la Dyle, les niveaux d'eau imposés le long de cette frontière sont ceux qui sont déduits de l'interpolation de la piézométrie mesurée pour les périodes de référence, exception faite du tronçon de rivière en équilibre avec la nappe et le long duquel ce sont les niveaux d'eau de la rivière qui ont été imposés au modèle.

La limite Sud est localisée le long de la limite géologique du Membre de Grandglise qui représente la partie aquifère de la Formation de Hannut. Cette limite géologique a été définie par le modèle géologique tridimensionnel construit par le SGB. Le Membre de Grandglise est encore présent ponctuellement plus au Sud mais de façon discontinue par rapport à la zone modélisée. 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.

La digitalisation (détermination des points XY) des cours d'eau délimitant le modèle a été réalisée avec une précision modérée dès lors que 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 alors que celles-ci sont expressément éloignées de la zone d'intérêt.

Le modèle a une extension légèrement supérieure à 60 km selon l'axe Ouest – Est et selon l'axe Nord – Sud. Sa superficie est de 2 067 km². Il englobe les villes de Tubize et Waterloo au Sud ainsi qu'une partie des villes de Lessines, Denderleeuw, Alost et Termonde à l'Ouest, 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 :

- dans sa partie centrale, une partie du bassin versant de la Senne,
- à l'Ouest et au Sud, une partie du bassin versant de la Dendre,
- au Nord, une partie du bassin versant de la Senne, de la Dyle et de l'Escaut,
- à l'Est, une partie du bassin versant de la Dyle.

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 base du Membre de Saint-Maur définie par le SGB pour la limite supérieure ;
- la base du Membre de Grandglise définie par le SGB pour la limite inférieure.

L'épaisseur maximale du modèle est de 36 m environ (cette grande épaisseur est liée à un artefact dans la création des couches du modèle géologique, elle apparaît très localement à l'extrémité Nord-Est de la zone modélisée). L'épaisseur minimale imposée est de 5 m, en bordure de la Senne à proximité de la limite Sud de la zone modélisée. Localement, le modèle géologique développé par le SGB présente des épaisseurs inférieures à 5 m (atteignant même quelques cm) pour le Membre de Grandglise. C'est pour favoriser la stabilité numérique du modèle que l'épaisseur minimale a été limitée à 5 m.

3.3 CONCEPTUALISATION DE LA STRUCTURE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE

Les paragraphes suivants décrivent les contextes 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.

Ere	Système	Etage	Série	Formation	Unités Hydrogéologiques de la RBC (UH/RBC)	Type	Etat de la nappe	
IV (Cénozoïque)	Quaternaire	-	-	-	UH/RBC_1 Système aquifère du quaternaire	AQUIFÈRE / AQUITARD	libre à captif	
		-	Holocène / Pléistocène	-		AQUIFÈRE / AQUITARD		
		-	Holocène	-		AQUICLUDE		
		-	Pléistocène	-		AQUIFÈRE		
III (Cénozoïque)	Néogène	Diestien	Miocène supérieur	Diest	UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché	AQUIFÈRE	libre (localement captif)	
		Bolderien	Miocène inférieur	Bolderberg		AQUIFÈRE		
		Tongerrien	Eocène supérieur	Sint-Huilbrechts-Hern		AQUIFÈRE / AQUITARD		
	Paléogène	Complexe de Kallo	Eocène moyen	Maldegem (Zomergem)	UH/RBC_3 Aquiclude des argiles de Ursel et Asse	AQUICLUDE	-	
				Maldegem (Onderdale)		AQUICLUDE		
				Maldegem (Ursel et Asse)		AQUICLUDE		
		Paléogène	Eocène inférieur	Lediensien	Lede	UH/RBC_4 Système aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Gent	AQUIFÈRE	libre (localement captif)
					Bruxellien		AQUIFÈRE	
					Bruxellien		AQUIFÈRE	
	Paléogène	Paléogène	Eocène inférieur	Gent (Vlierzele)	UH/RBC_5 Aquiclude des argiles de Gent	AQUICLUDE	-	
				Gent (Merebeke)		AQUICLUDE		
		Ypresien	Eocène inférieur	Tielt	UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt	AQUIFÈRE / AQUITARD	libre (localement captif)	
				Kortrijk (Aalbeke)		AQUICLUDE		
				Kortrijk (Moen)		AQUIFÈRE / AQUITARD		
	Landénien	Paléocène supérieur	Landénien	Kortrijk (Saint-Maur)	UH/RBC_7 Système aquitard des sables et argiles de Kortrijk	AQUICLUDE	-	
Hannut (Grandglise)				AQUIFÈRE				
Landénien	Paléocène supérieur	Landénien	Hannut (Lincet)	UH/RBC_8 Aquifère des sables du Landénien	AQUIFÈRE	captif		
			Hannut (Lincet)		AQUICLUDE			
UH/RBC_9 Aquiclude des argiles du Landénien	AQUICLUDE	-						
II (Mésozoïque)	Crétacé	Maastrichtien	Crétacé supérieur	Gulpen	UH/RBC_10 Système aquifère des craies du Crétacé et du socle paléozoïque	AQUIFÈRE	captif	
I (Paléozoïque)	Cambrien	Dévilien (?)	Cambrien inférieur (?)	-	-	AQUIFÈRE / AQUITARD	captif	

Tableau 3-1 : Entités hydrogéologiques en Région de Bruxelles-Capitale⁷

⁷ Source : Bruxelles Environnement

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 du Membre de Grandglise (qui constitue la couche géologique modélisée) ainsi que des membres de Saint-Maur et de Lincet (qui constituent respectivement les limites supérieure et inférieure du modèle) est présentée chronologiquement, c'est-à-dire des couches les plus anciennes vers les couches les plus jeunes⁸.

La base du modèle coïncide avec le sommet du Membre de Lincet (Formation de Hannut), constituant un aquiclude. Il s'agit d'argile gris vert, légèrement sableuse, localement cimentée par de l'opale. À la base, quelques galets de silex vert foncé sont visibles. Vers le Nord de la Région de Bruxelles-Capitale, son épaisseur atteint 20 m.

Le modèle hydrogéologique est constitué du Membre de Grandglise qui est un aquifère. Il est composé de sable fin, glauconieux, avec des intercalations argileuses minces. Son épaisseur moyenne est de 8 m.

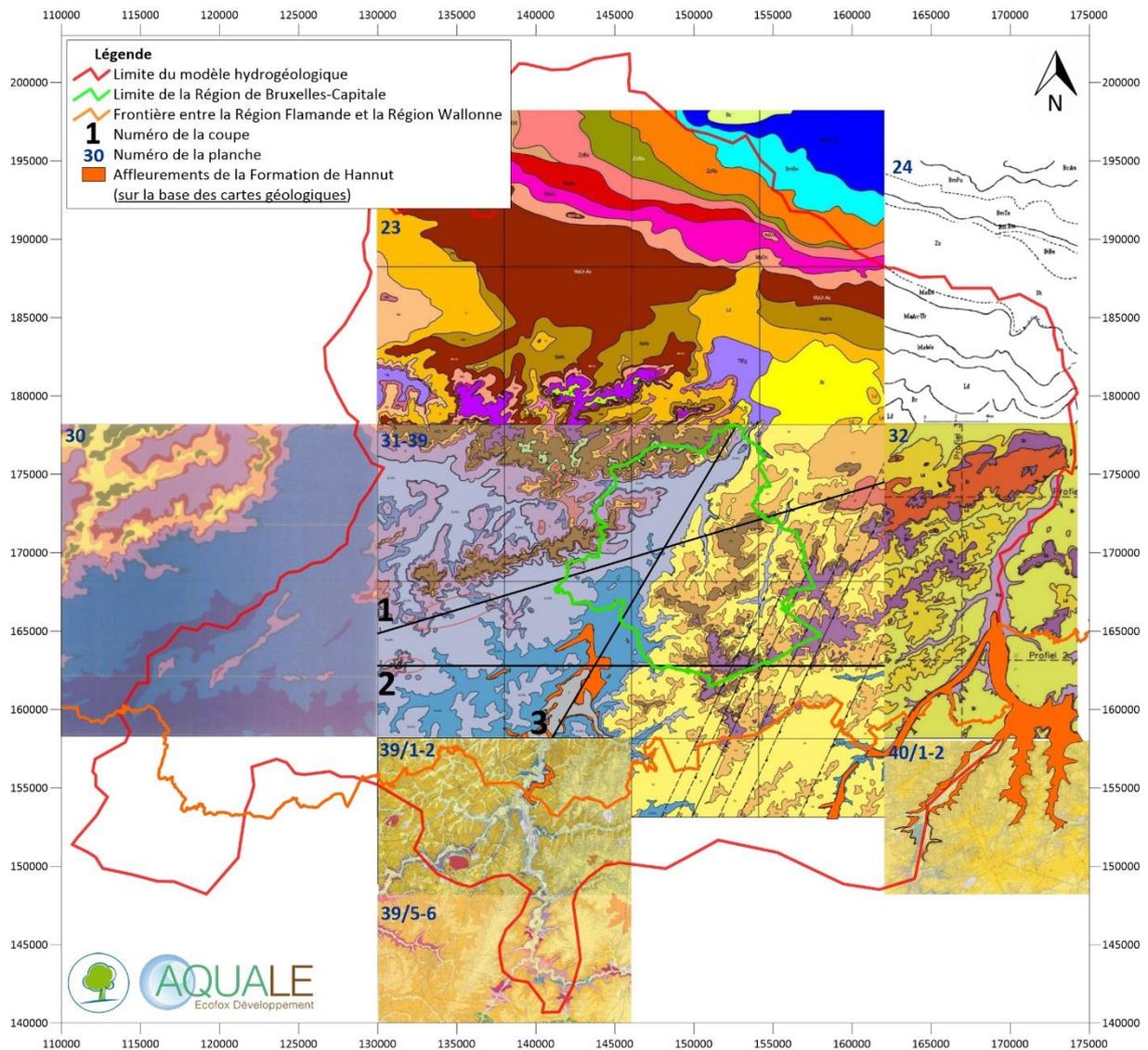
Enfin, le sommet du modèle correspond à la base du Membre de Saint-Maur (Formation de Kortrijk), constituant un aquiclude. Il s'agit de dépôts d'argile très finement silteuse avec quelques minces intercalations d'argile grossièrement silteuse ou de silt très fin argileux. L'épaisseur moyenne du membre est de 30 m (y inclus le Membre du Mont-Héribu).

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 23 : Mechelen, Ph. BUFFEL, N. VANDENBERGHE, M. VACKIER, 2009 ;
- Planche 24 : Aarschot, M. SCHILTZ, N. VANDENBERGHE, F. GULLENTOPS, 1993 ;
- Planche 30 : Gerrardsbergen, P. JACOBS, V. VAN LANCKER, M. DE CEUKELAIRE, W. DE BREUCK, G. DE MOOR, G. DE GEYTER, 1999 ;
- Planche 31-39 : Bruxelles – Nivelles, Ph. BUFFEL, J. MATTHIJS, 2002 ;
- Planche 32 : Leuven, N. VANDENBERGHE, F. GULLENTOPS, 2001 ;
- Planche 38/1-2 pour l'extrémité Sud-Ouest du modèle (pas encore publiée) ;
- Planche 38/3-4 pour l'extrémité Sud-Ouest du modèle (pas encore publiée) ;
- Planche 39/1-2 : Rebecq – Ittre, A. HERBOSCH, S. BLOCKMANS, V. DUMOULIN, 2009 ;
- Planche 39/3-4 pour l'extrémité Sud-Est du modèle (pas encore publiée) ;
- Planche 39/5-6 : Braine-le-Comte – Feluy, M. HENNEBERT, B. EGGERMONT, 2002 ;
- Planche 40/1-2 : Wavre – Chaumont-Gistoux, S. BLOCKMANS, A. HERBOSCH, 2012.

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

⁸ Source : Carte géologique de Belgique, Planche 31-39 : Bruxelles – Nivelles, Ph. BUFFEL, J. MATTHIJS, 2002



Di	Formatie van Diest (Boven Mioceen) - Formation de Diest (Mioceen supérieur)
Di	Groenbruin tot roestkleurig matig fijn tot grof zand met ijzerhoudende concretes 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 limoniteuses. 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 (Mioceen inférieur)
Bb	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)
Sh	Geel fijn zand met mica dat van boven naar onder geleidelijk overgaat in een wigele tot grijs-roze klei/silt ("Targile saumon") die licht zand- en glauconiethoudend 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 keien van groene Cambrium zandstenen. 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 ("Targile 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 gris 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)
Ma	Lid van Zomergem - <i>Membre de Zomergem</i> 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 - <i>Membre de Onderdale</i> Donkergrijze 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 - <i>Membres d'Ursel et d'Asse</i> Homogene grijsblauwe klei die geleidelijk overgaat in glauconiethoudende 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 - <i>Membre de Wemmel</i> Grijs glauconiethoudend fijn zand met een toename van het kleigehalte naar de top. Gekenmerkt door het voorkomen van Nummulites wemmelensis en een goed ontwikkelde basislaag rijk aan herwerkte en gerolde nummulieten evenals fossielhoudende kalkzandsteenblokken. 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)
Le	Grijs fijn zand, kalkhoudend en licht glauconiethoudend. Het zand wordt gekenmerkt door enkele banken zandige kalksteen, indien niet verweerd, door de aanwezigheid van Nummulites variolarius. Naar de basis toe komen af en toe grovere zones voor met aan de basis een duidelijk grindslag 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)
Br	Heterogene afzetting van zeer licht glauconiethoudende fijne tot grove kwartshoudende zanden. Gekenmerkt door het voorkomen van harde banken (zandige kalksteenbanken "Gobertange facies" - kalkige, soms verkeuzelde zandsteenbanken) en/of losse zandstenenrollen met zeer grillige vormen. Indien kalkhoudend is het voorkomen van Nummulites laevigatus typerend. De dikte wisselt sterk door het geïsoleerde 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. Étant 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)
Ge	Lid van Vlierzele - <i>Membre de Vlierzele</i> Grijsgroen glauconiethoudend 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 - <i>Membre de Merelbeke</i> Groenrijke klei met groene zandige vlekken. Soms is de klei pyriethoudend. 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)
Tt	Heterogene afzetting van kleihoudend fijn zand met glauconiet en glimmers afgezwemd 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)
KoAa	Lid van Aalbeke - <i>Membre d'Aalbeke</i> Grijze tot grijsbrune zeer fijnsiltige klei. Gemiddeld 4 m dik. <i>Argile grise à gris brun, très finement silteuse. L'épaisseur moyenne est de 4 m.</i>
KoMo	Lid van Moen - <i>Membre de Moen</i> Heterogene afzetting van siltig tot kleihoudend en licht glauconiethoudend zand met enkele kleilige zones. Vaak nummuliethoudend. 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>
KoS	Lid van Saint-Maur - <i>Membre de Saint-Maur</i> 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-Hérribu (= 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-Hérribu inclus.</i>
Hn	Formatie van Hannut (Boven Paleoceen) - Formation de Hannut (Paléocène supérieur)
Hn	Lid van Grandglise - <i>Membre de Grandglise</i> Fijn glauconiethoudend 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 - <i>Membre de Lincent</i> 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
P	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>
	
	
	

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**).

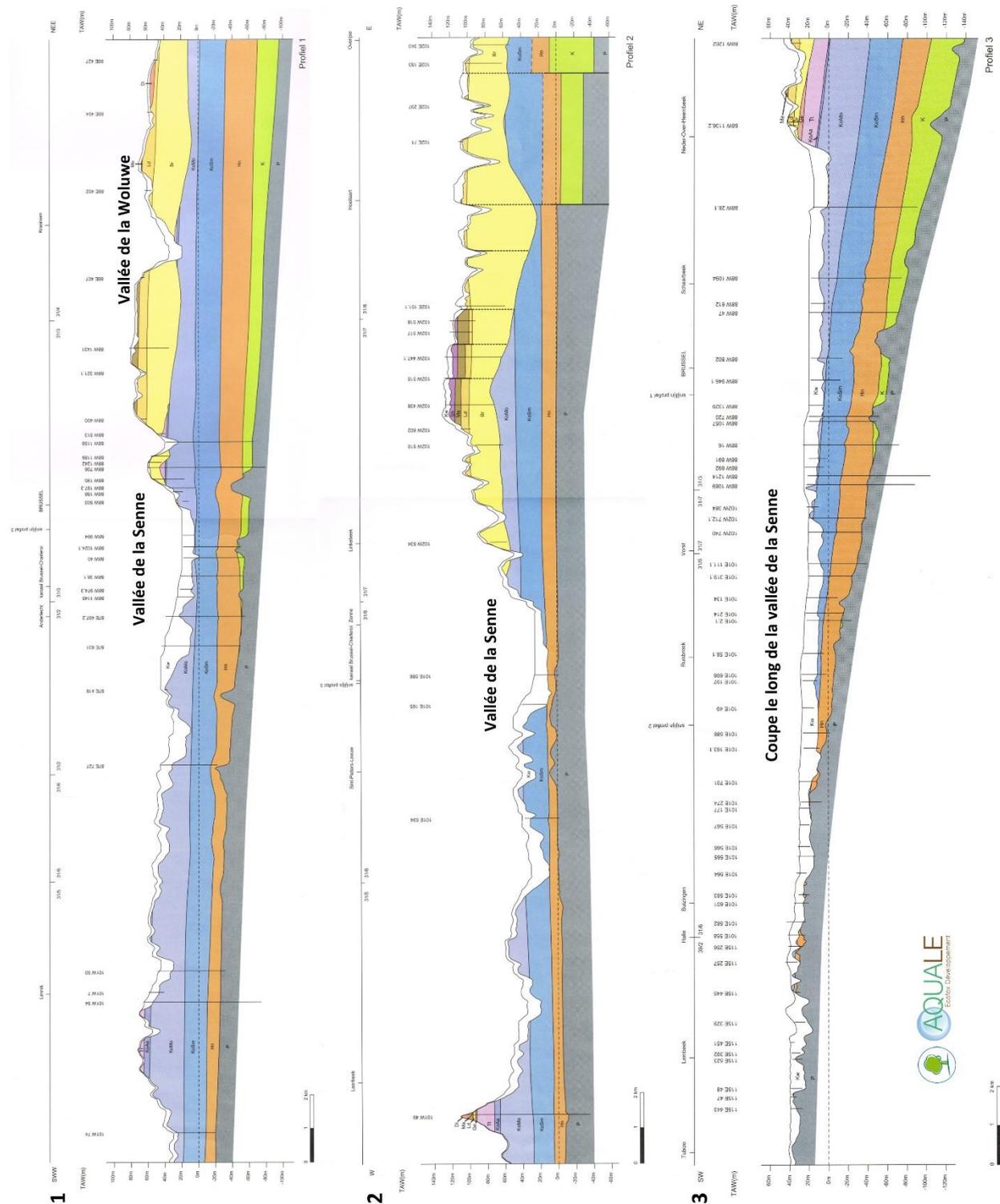


Figure 3-3 : Coupes géologiques de la planche 31-39 (Bruxelles-Nivelles)

En plus de ces coupes et afin de mieux appréhender la géologie et l'hydrogéologie au droit de la zone modélisée, une coupe supplémentaire reprenant à titre indicatif le niveau piézométrique de la nappe des sables du Landénien pour la campagne de mai – juin 2013 est présentée ci-dessous (FIGURES 3-4 et 3-5). Cette coupe, qui traverse l'ensemble de la zone modélisée selon l'axe Ouest – Est, illustre, en particulier, l'encaissement des rivières utilisées comme limites extérieures du modèle (pour rappel, la Dyle et la Dendre sont utilisées comme limites externes du modèle parce que ces rivières drainent très localement – sur certains tronçons proches de l'extrémité Sud du modèle – l'aquifère modélisé ; sur la majeure partie de leur cours, les rivières ne drainent pas l'aquifère étudié et les niveaux d'eau imposés le long de ces limites ne sont donc pas les niveaux d'eau des rivières).

Cette coupe est réalisée à l'aide du logiciel Surfer®.

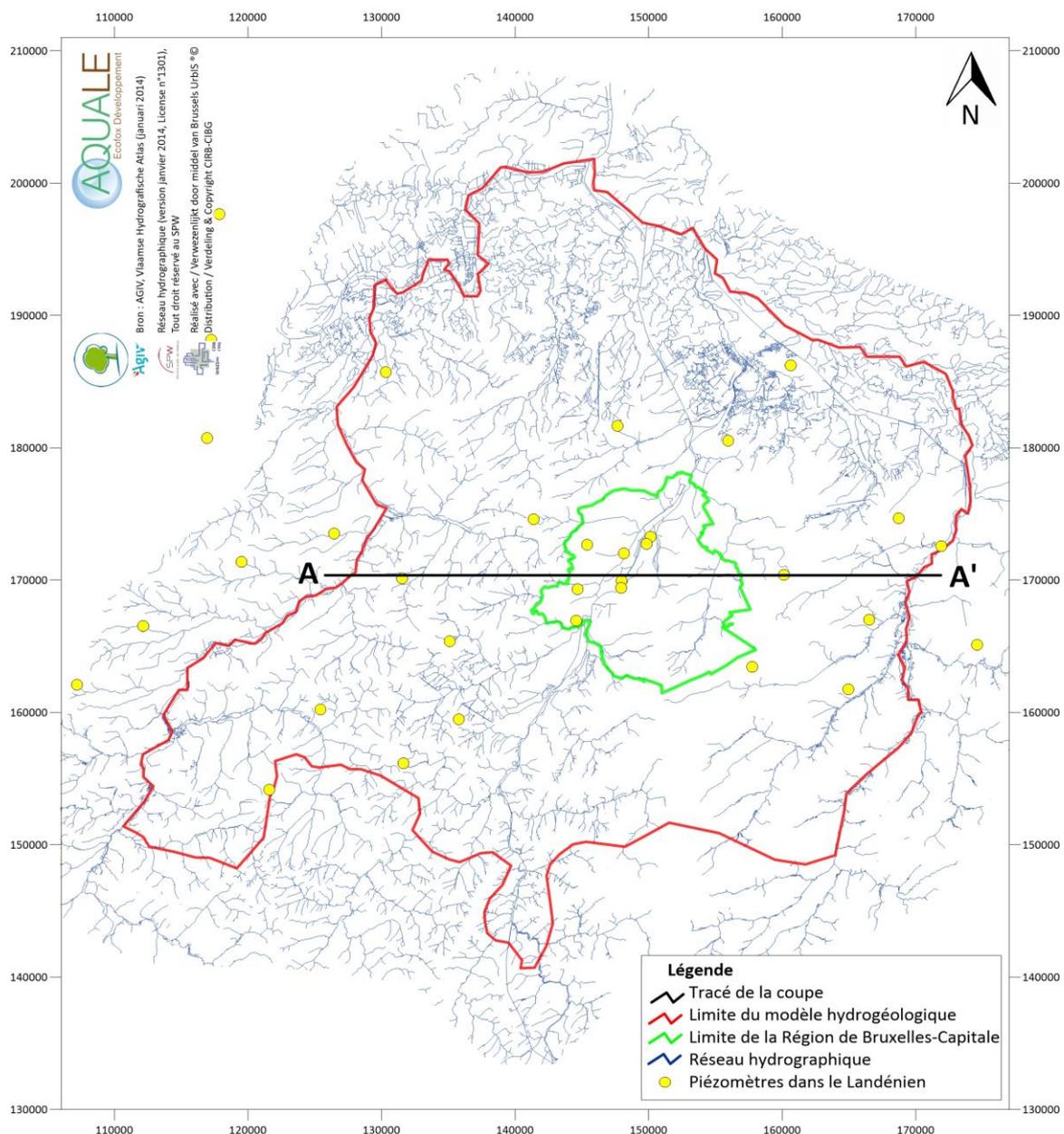


Figure 3-4 : Tracé de la coupe géologique schématique A-A'

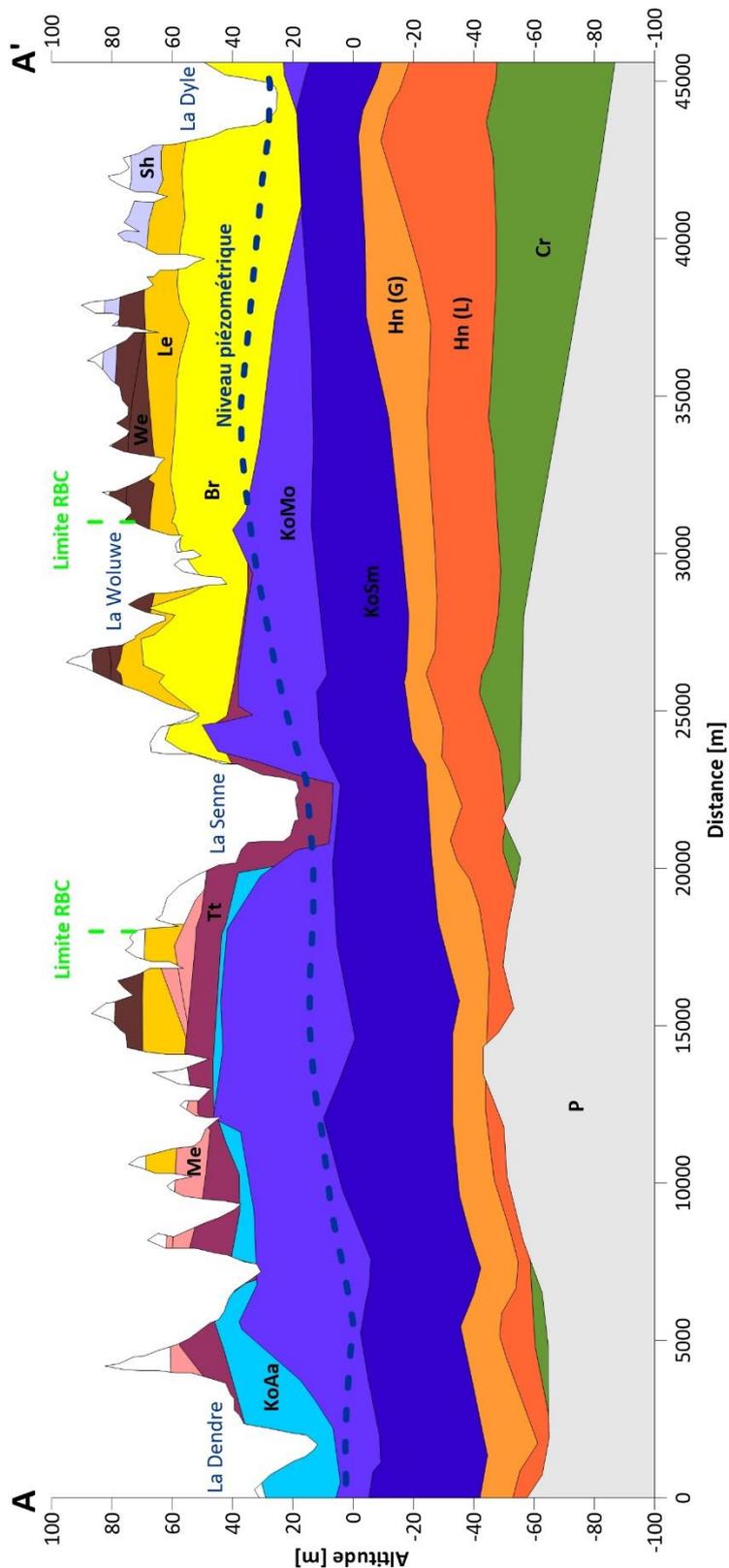


Figure 3-5 : Coupe géologique schématique A-A' (le niveau piézométrique représenté par la ligne pointillée bleue est le résultat de l'interpolation des niveaux piézométriques de la *nappe du Landénien* pour la campagne de mai et juin 2013, les abréviations utilisées pour les formations sont reprises de la carte géologique – Planche 31-39 – Bruxelles – Nivelles, Ph. BUFFEL, J. MATTHIJS, 2002 , voir légende de la figure 3-2)

La coupe géologique schématique présentée sur la **FIGURE 3-5** a été tracée selon la ligne AA' (**FIGURE 3-4**). Le tracé a été choisi afin de visualiser les formations géologiques au sein de la zone modélisée, en tenant compte des limites du modèle conceptuel matérialisées par la Dendre (à l'Ouest) et la Dyle (à l'Est). Le niveau piézométrique de l'aquifère des sables du Landénien est représenté par un trait bleu pointillé. Il est important de garder à l'esprit qu'il s'agit d'une coupe schématique 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). Il apparaît clairement que l'aquifère des sables du Landénien est captif. Le niveau d'eau qui y est mesuré est supérieur au toit de la Formation de Hannut.

La limite gauche est représentée par la vallée de la Dendre 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. Le long de cette coupe, il apparaît toutefois que les vallées ne sont pas suffisamment profondes pour atteindre le Membre de Grandglise. Le niveau piézométrique de l'aquifère du Landénien se situe quelques mètres à quelques dizaines de mètres sous le niveau topographique. En particulier, dans la vallée de la Dyle, le Membre de Grandglise affleurant quelques centaines de mètres en amont du point illustré sur la coupe, le niveau d'eau est très peu profond.

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). Enfin, des données à plus long terme (à partir de 1997) sont également prises en considération car elles sont également utiles pour la reproduction du fonctionnement de l'aquifère en régime transitoire.

3.3.1.2.1 ANNÉE DE RÉFÉRENCE POUR LE RÉGIME PERMANENT - 2013

Les **FIGURES 3-6** et **3-7** présentent les cartes piézométriques des sables du Landénien respectivement pour les campagnes de mai – juin 2013 (campagne réalisée entre les hautes eaux de mars – avril et les moyennes eaux de juillet) et de novembre 2013 (campagne réalisée entre les basses eaux d'octobre et les moyennes eaux de janvier).

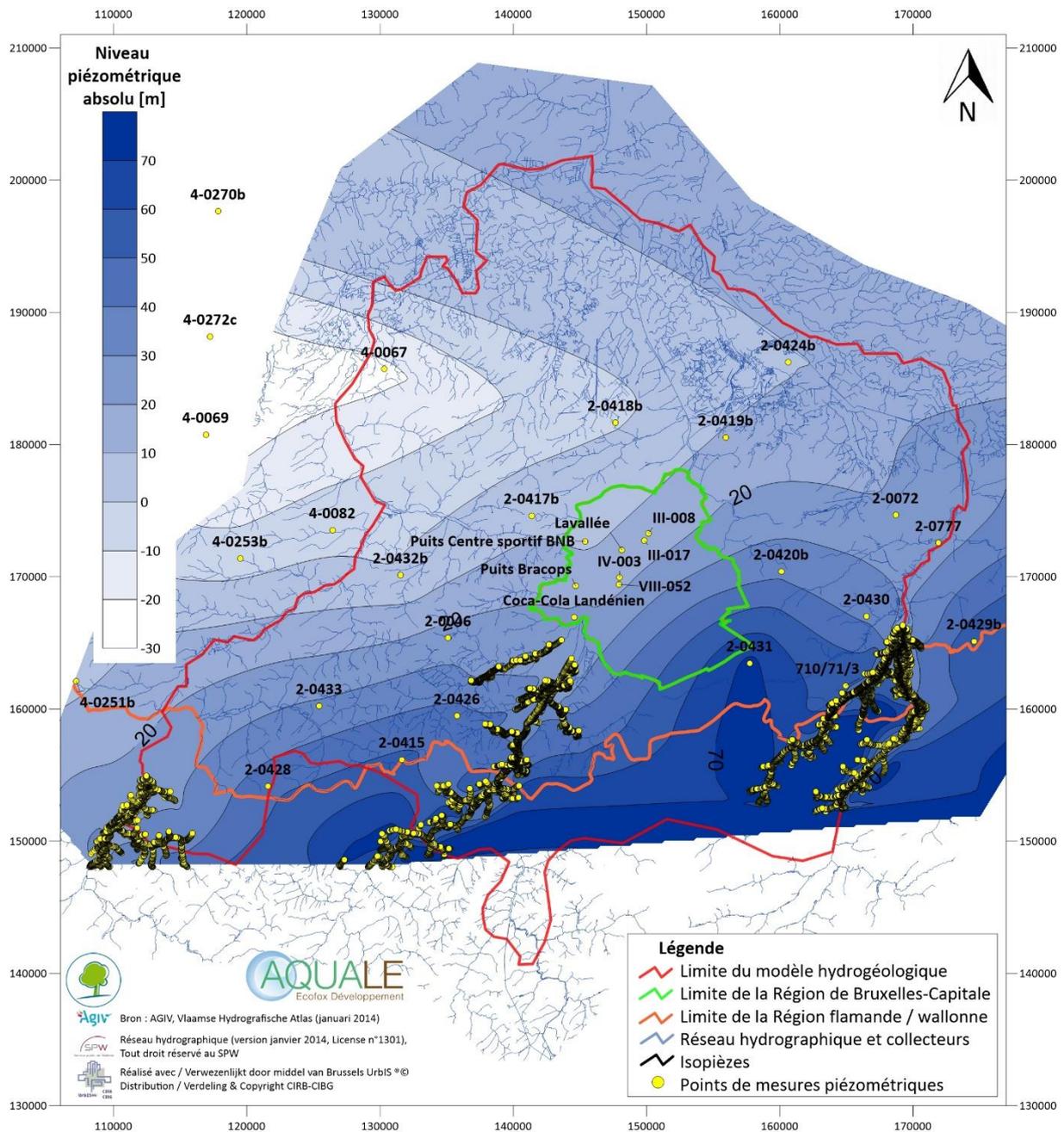


Figure 3-7 : Carte piézométrique de l'aquifère des sables du Landénien, campagne de novembre 2013 (contexte d'intermédiaires eaux)

Ces deux cartes piézométriques ont été réalisées par la méthode d'interpolation appelée « *natural neighbor* » en utilisant comme données de base :

- les niveaux piézométriques mesurés de l'aquifère durant la période concernée (voir **CHAPITRE 5.1.1**) ;
- les niveaux d'eau des rivières extraits du SRTM, de l'IGN ou du LIDAR (seuls les tronçons de rivières situés dans les zones d'affleurement du Landénien sont prises en considération – une analyse de l'évolution du débit de ces rivières a par ailleurs été réalisée afin de valider leur potentiel de drainage).

Ces cartes sont donc des interprétations qu'il convient d'analyser dans leur globalité et non pas localement.

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

Les cartes piézométriques (**FIGURES 3-6 et 3-7**) confirment que les écoulements des eaux souterraines dans les sables du Landénien sont orientés globalement du Sud/Sud-Est vers le Nord/Nord-Ouest (des niveaux hauts vers les niveaux bas), soit depuis la Région Wallonne vers la Région Flamande avec, au Nord, un écoulement clairement dirigé vers l'Ouest. Cet écoulement vers l'Ouest semble lié à la présence d'un point bas qui pourrait être créé par une exploitation importante de l'aquifère aux alentours des coordonnées X = 116 000 m et Y = 185 000 m. L'origine de ce creux piézométrique régional n'a pu être déterminée dans le cadre de la présente étude. Dès lors qu'il influence assez fortement les écoulements souterrains en aval de la Région de Bruxelles-Capitale, il conviendra de poursuivre les recherches parallèlement à l'amélioration future du modèle prévue par Bruxelles Environnement. Des précisions à ce sujet pourraient probablement être obtenues par le biais des archives de la VMM.

Par ailleurs, il existe localement un transfert d'eau depuis la nappe vers le réseau hydrographique (situé en contrebas des niveaux de la nappe à proximité) dans la partie Sud du modèle tel que cartographié ci-dessus (points de référence le long des ruisseaux – vallées de la Dendre, de la Senne et de la Dyle – utilisés pour l'établissement des cartes piézométriques). Ce contact entre les eaux de surface et les eaux souterraines est très limité et non-continu car il ne concerne que certains tronçons du réseau hydrographique. En effet, certaines portions de cours d'eau sont isolées, par exemple par la présence d'un matériau encaissant très peu perméable, comme c'est le cas au droit des argiles alluviales. De manière plus générale, les échanges avec le réseau hydrographique sont très limités dès lors que l'aquifère étudié est captif (sous l'aquiclude qu'est le Membre de Saint-Maur) et profond.

L'aquifère est majoritairement captif sur l'ensemble de la zone étudiée excepté au droit des trois zones d'alimentation dans les vallées de la Dendre, de la Senne et de la Dyle à l'extrémité Sud du modèle. Les niveaux d'eau qui y sont observés sont en déséquilibre avec les niveaux d'eau mesurés dans les aquifères plus superficiels (Quaternaire, Bruxellien, Yprésien) vu que la couverture de l'aquifère par l'aquiclude du Membre de Saint-Maur est quasiment continue sur l'ensemble de la zone d'étude.

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 et d'identifier la source des variations piézométriques observées. Le modèle étant validé en régime transitoire sur les années 2009 à 2013, les données piézométriques sont étudiées sur cette période. Les piézomètres ayant fait l'objet d'un suivi automatisé ou manuel sont assez peu nombreux et répartis de façon non homogène, principalement à l'Ouest de la Région de Bruxelles-Capitale.

Les **FIGURES 3-8 à 3-16** présentent l'évolution des niveaux d'eau de la nappe des sables du Landénien 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 - 33 et - 23 m à la **FIGURE 3-8**, - 10 et 0 m à la **FIGURE 3-9**, ..., 70 et 80 m à la **FIGURE 3-16**). 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 ;

- supérieure à 100 cm : amplitude élevée ;
- nombre de mesures entre 2009 et 2013 :
 - entre 0 et 10 mesures (soit entre 0 à 2 mesures par an en moyenne) : faible ;
 - entre 11 et 100 mesures (soit entre 2 à 20 mesures par an en moyenne) : moyen ;
 - supérieur à 100 mesures (soit supérieur à 20 mesures par an en moyenne) : élevé.

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

La **FIGURE 3-17** présente une carte de localisation des différents piézomètres dont le niveau d'eau est repris dans les **FIGURES 3-8 à 3-16**. 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.

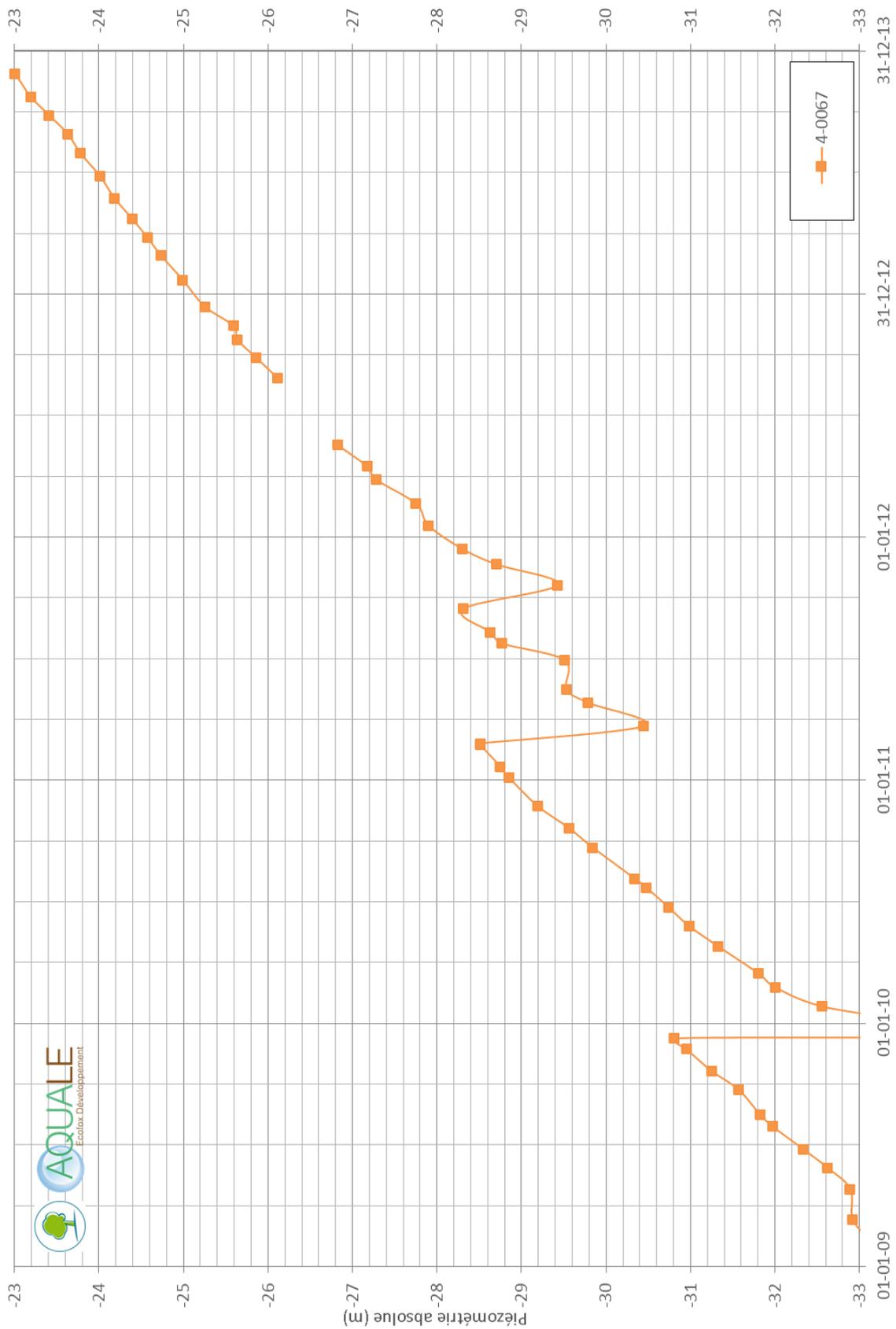


Figure 3-8 : Evolution de la piézométrie de la *nappe du Landénien* entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre - 33 et - 23 m)

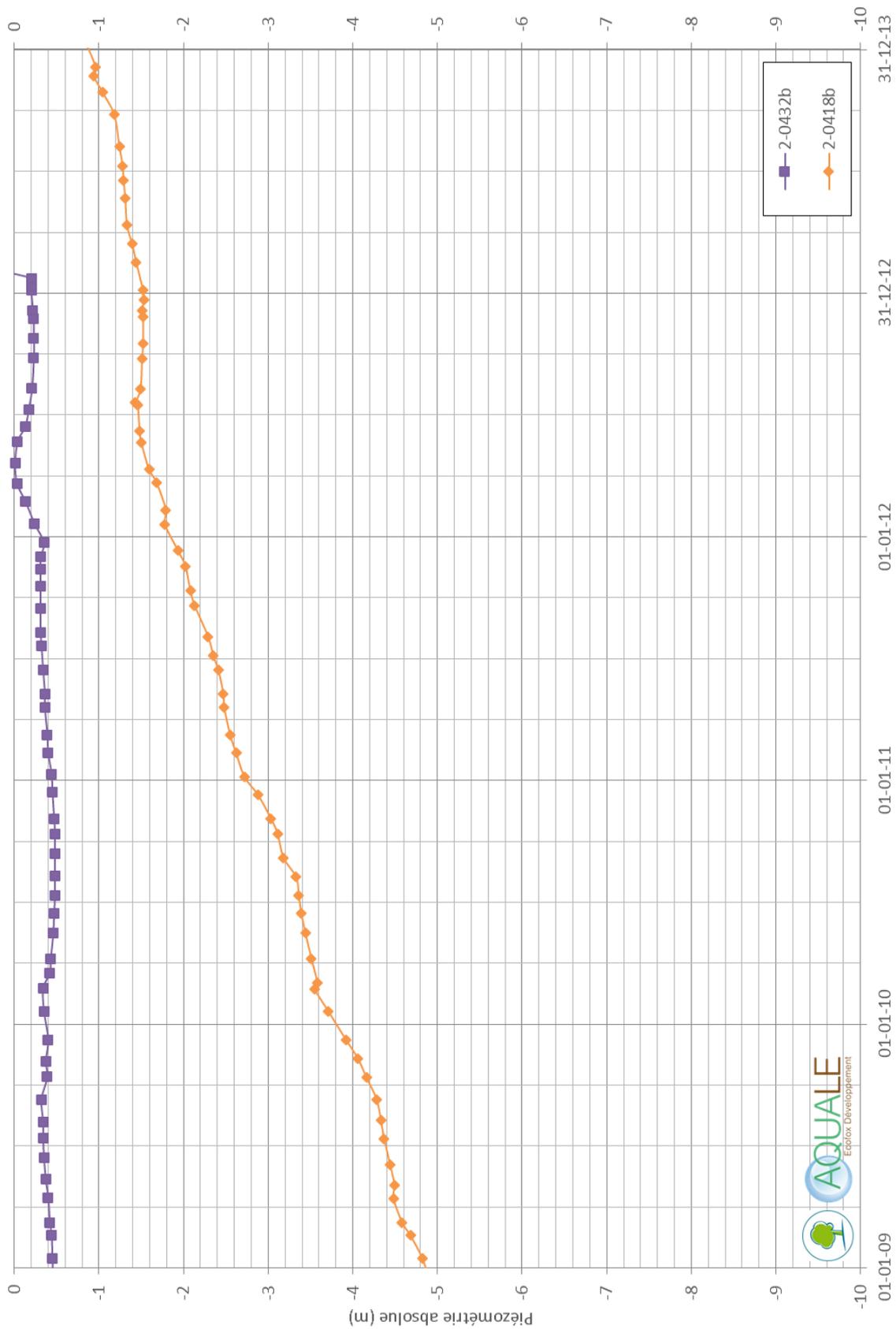


Figure 3-9 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Landénien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre - 10 et 0 m)

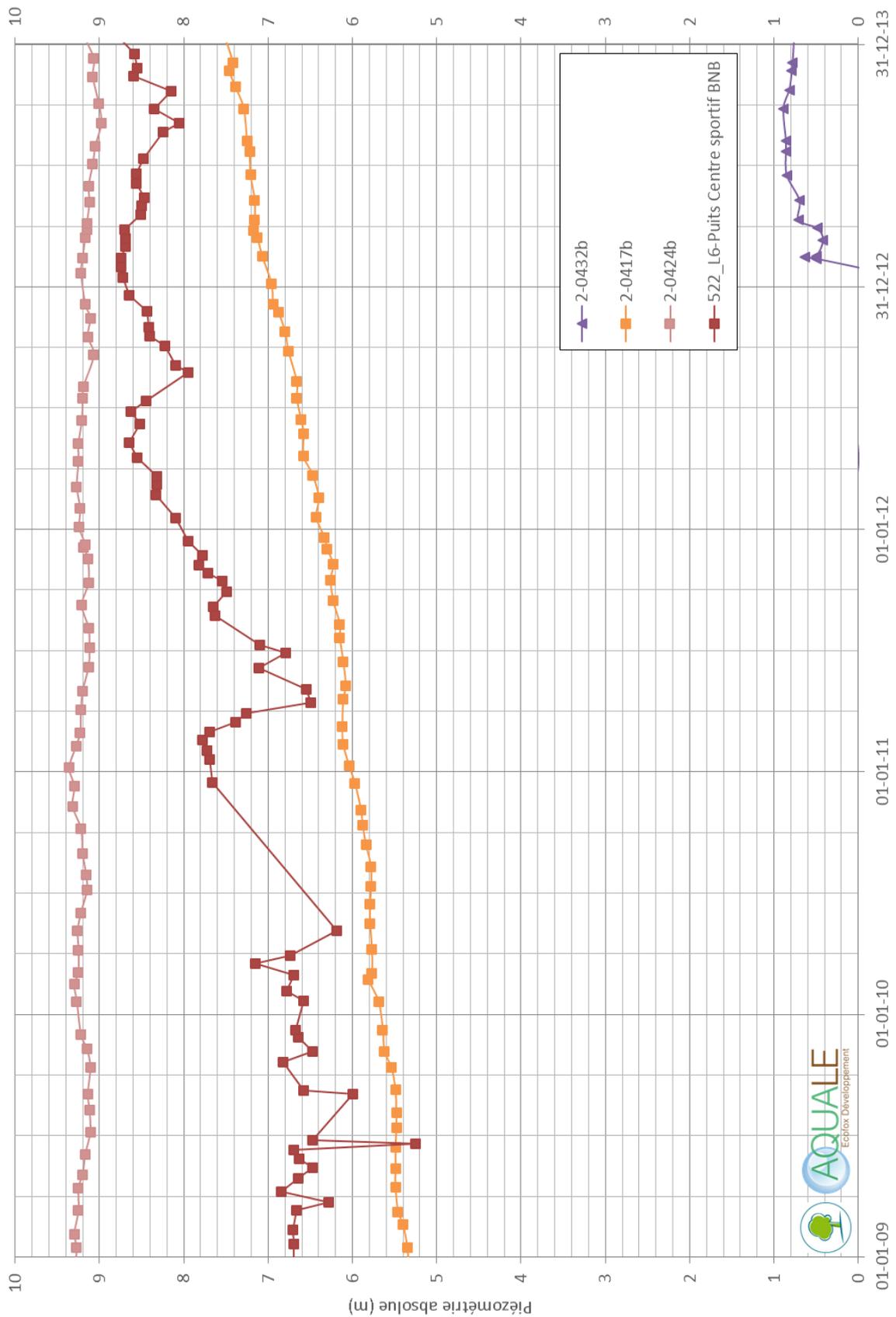


Figure 3-10 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Landénien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 0 et 10 m)

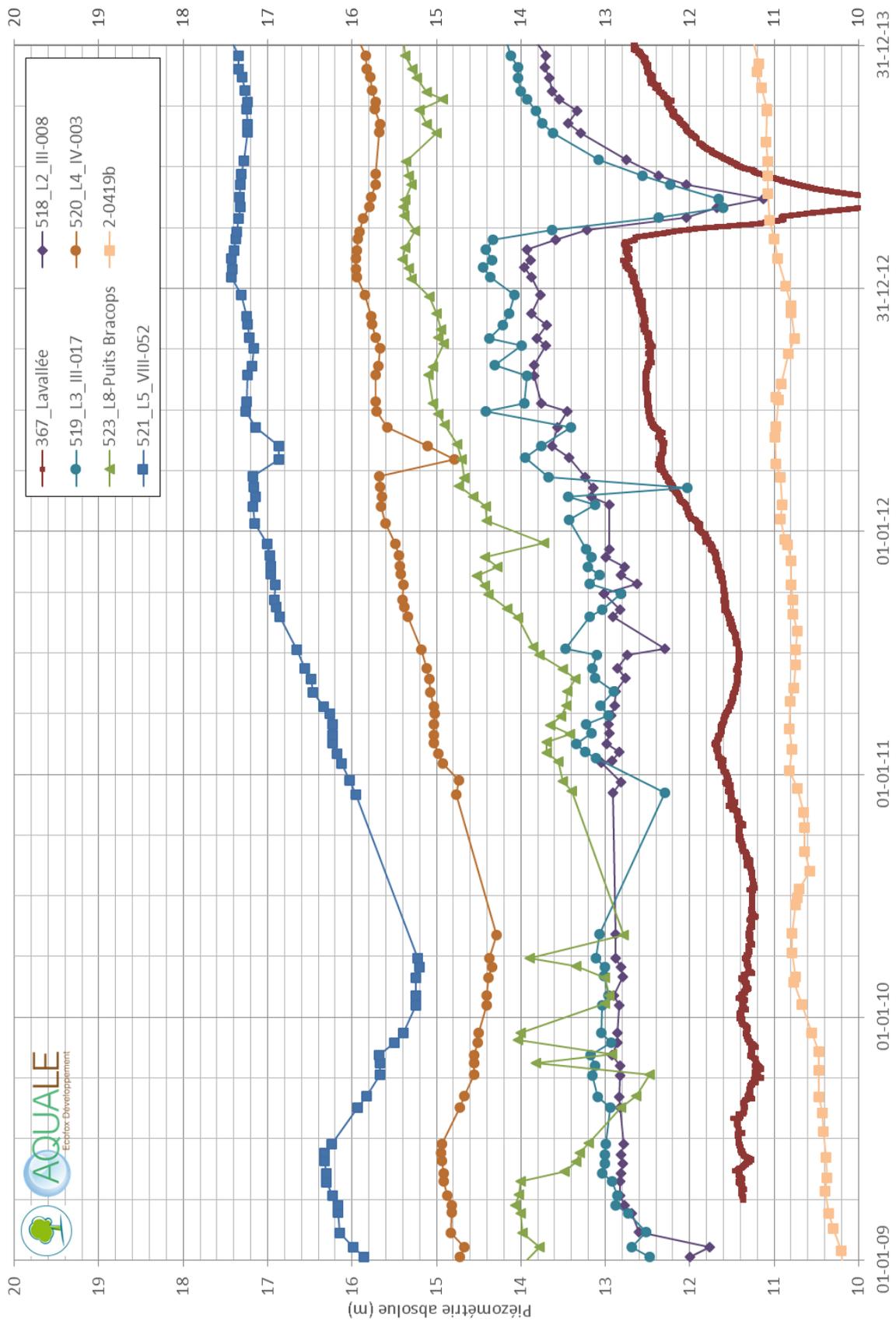


Figure 3-11 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Landénien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 10 et 20 m)

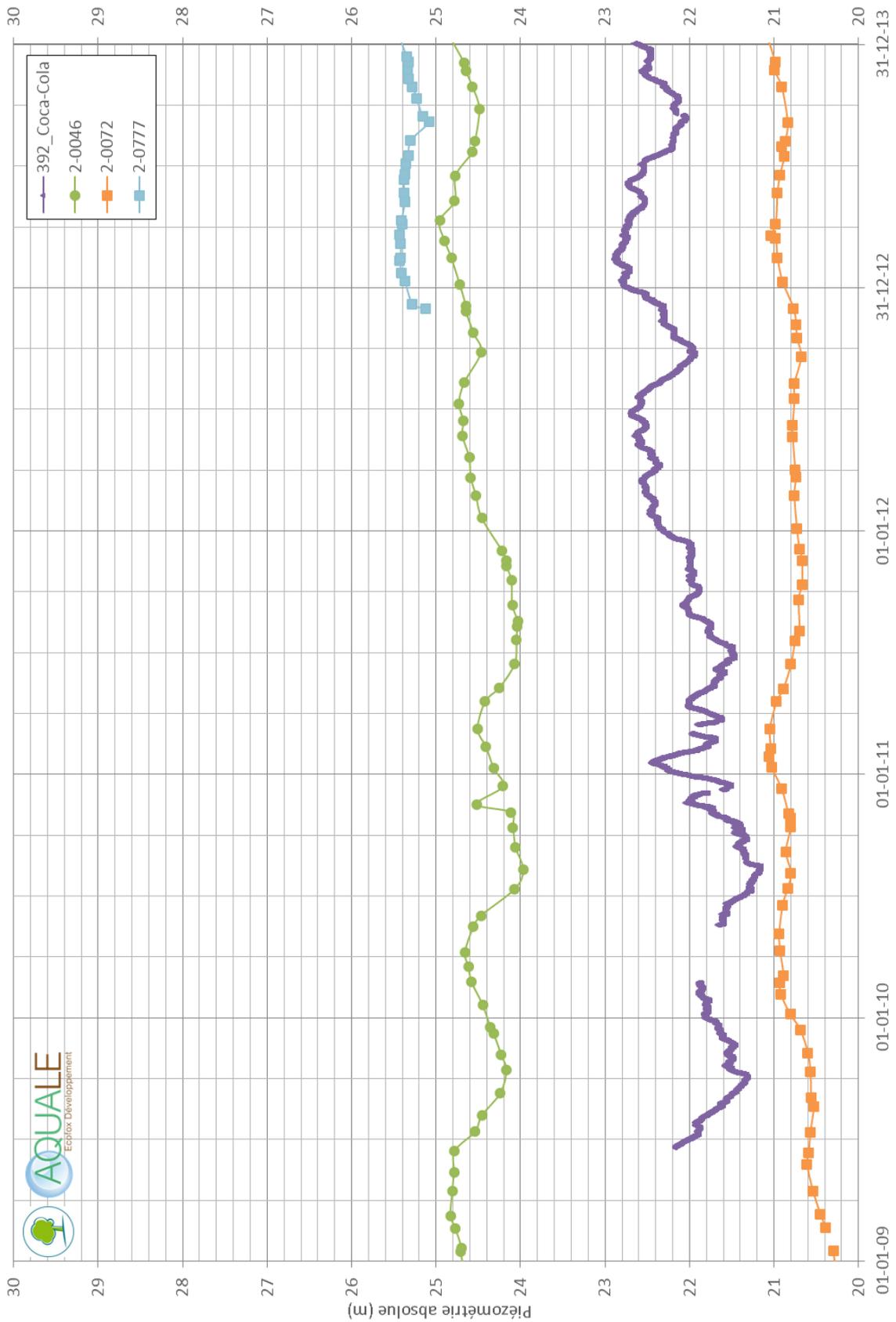


Figure 3-12 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Landénien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 20 et 30 m)

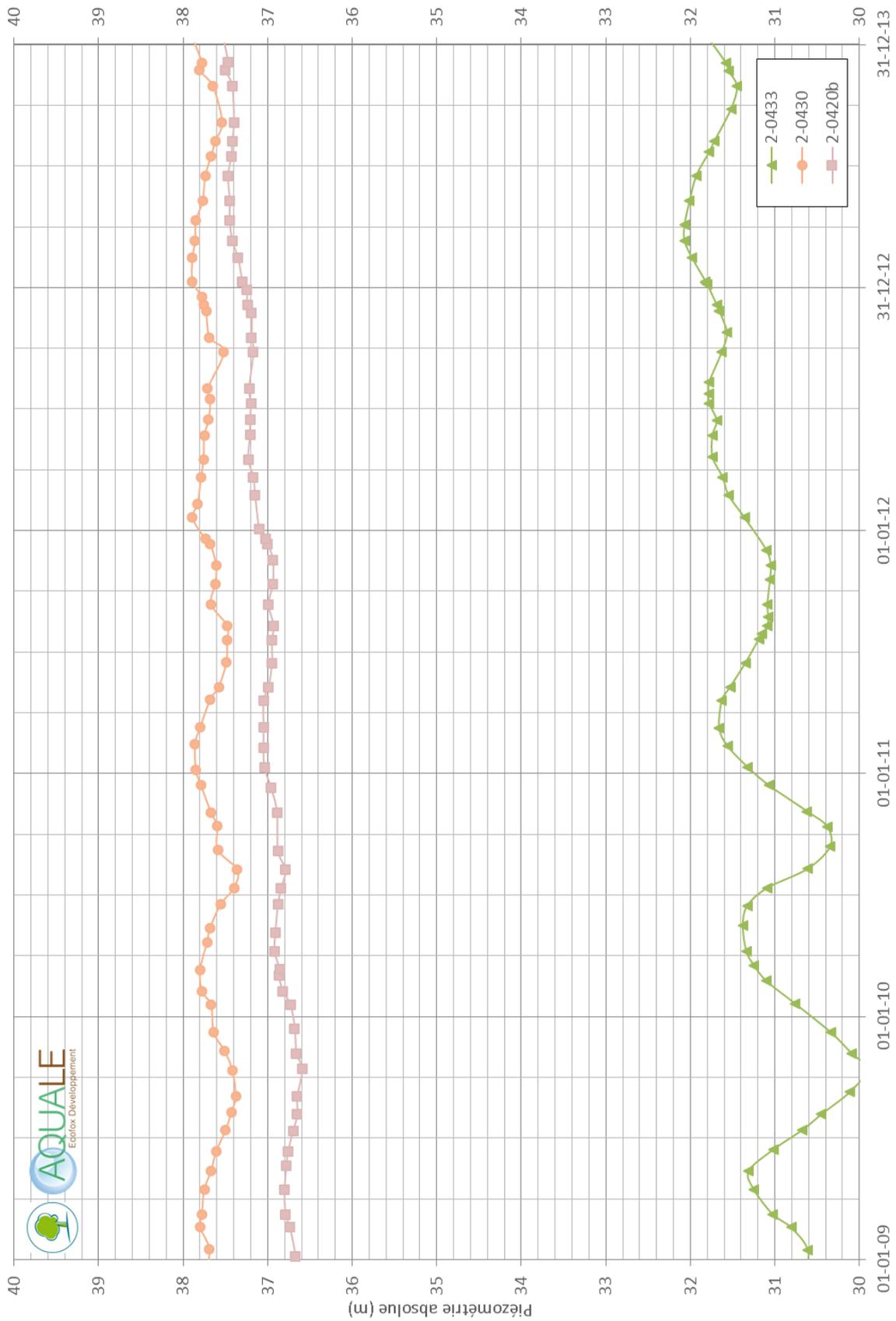


Figure 3-13 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Landénien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 30 et 40 m)

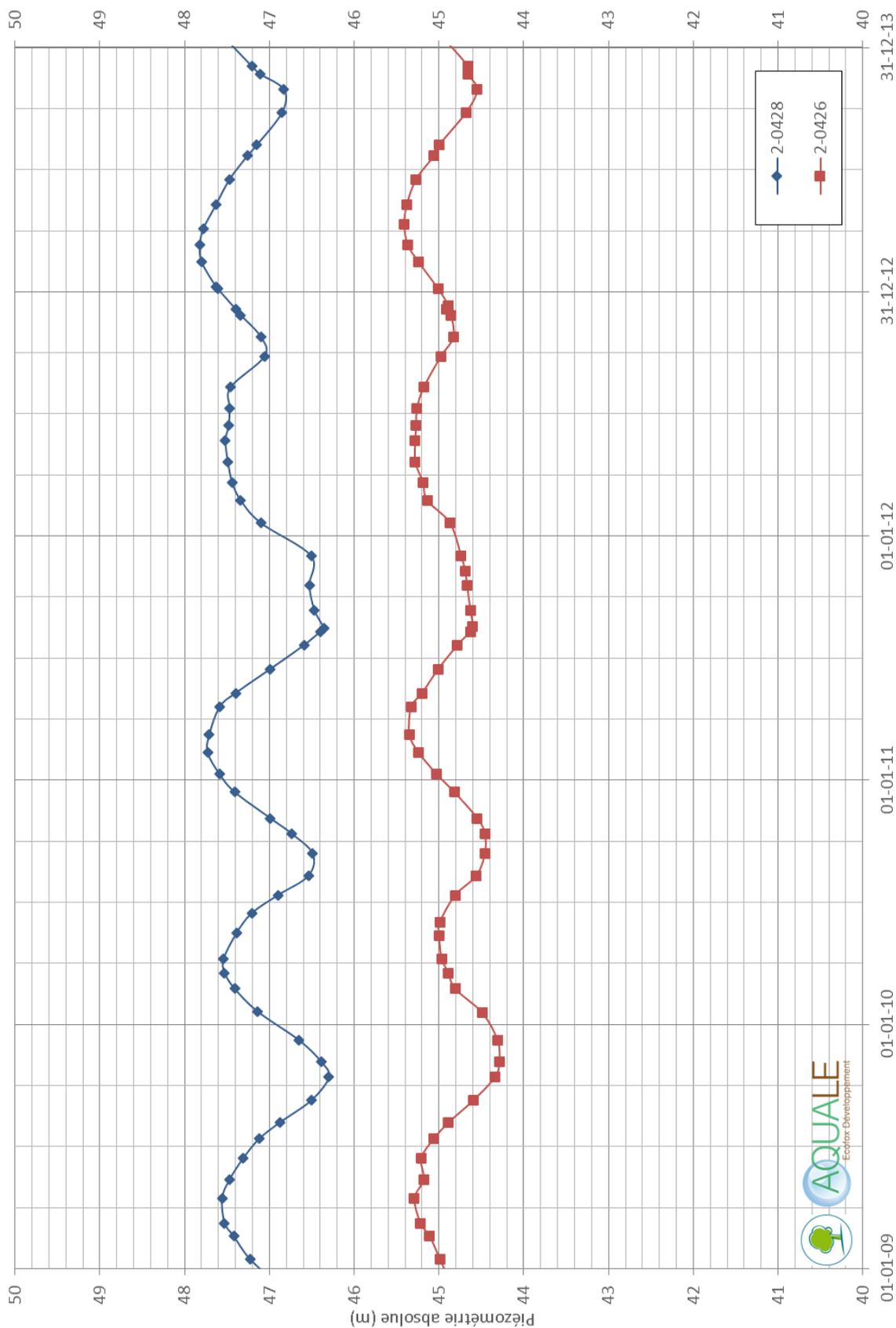


Figure 3-14 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Landénien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 40 et 50 m)

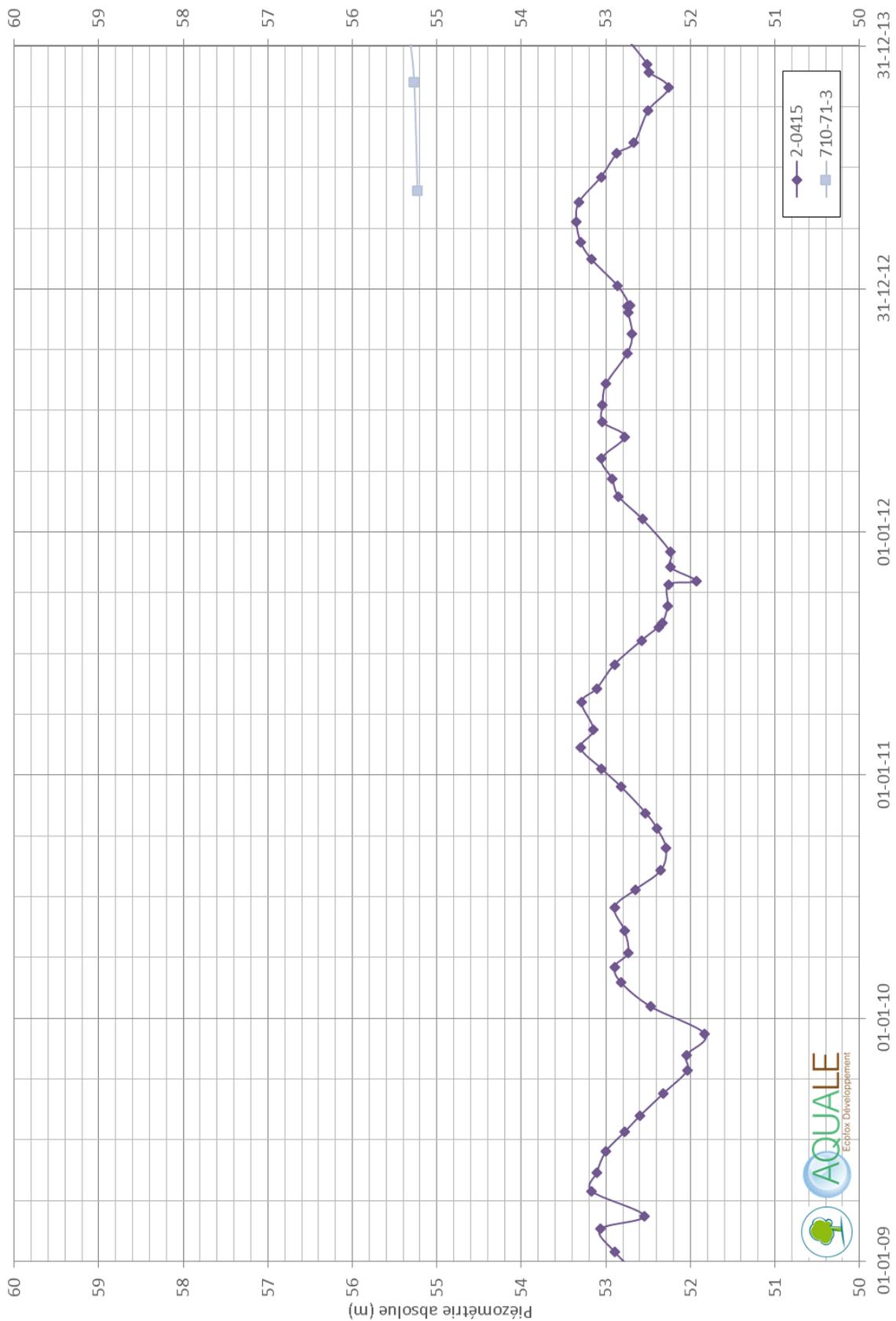


Figure 3-15 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Landénien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 50 et 60 m)

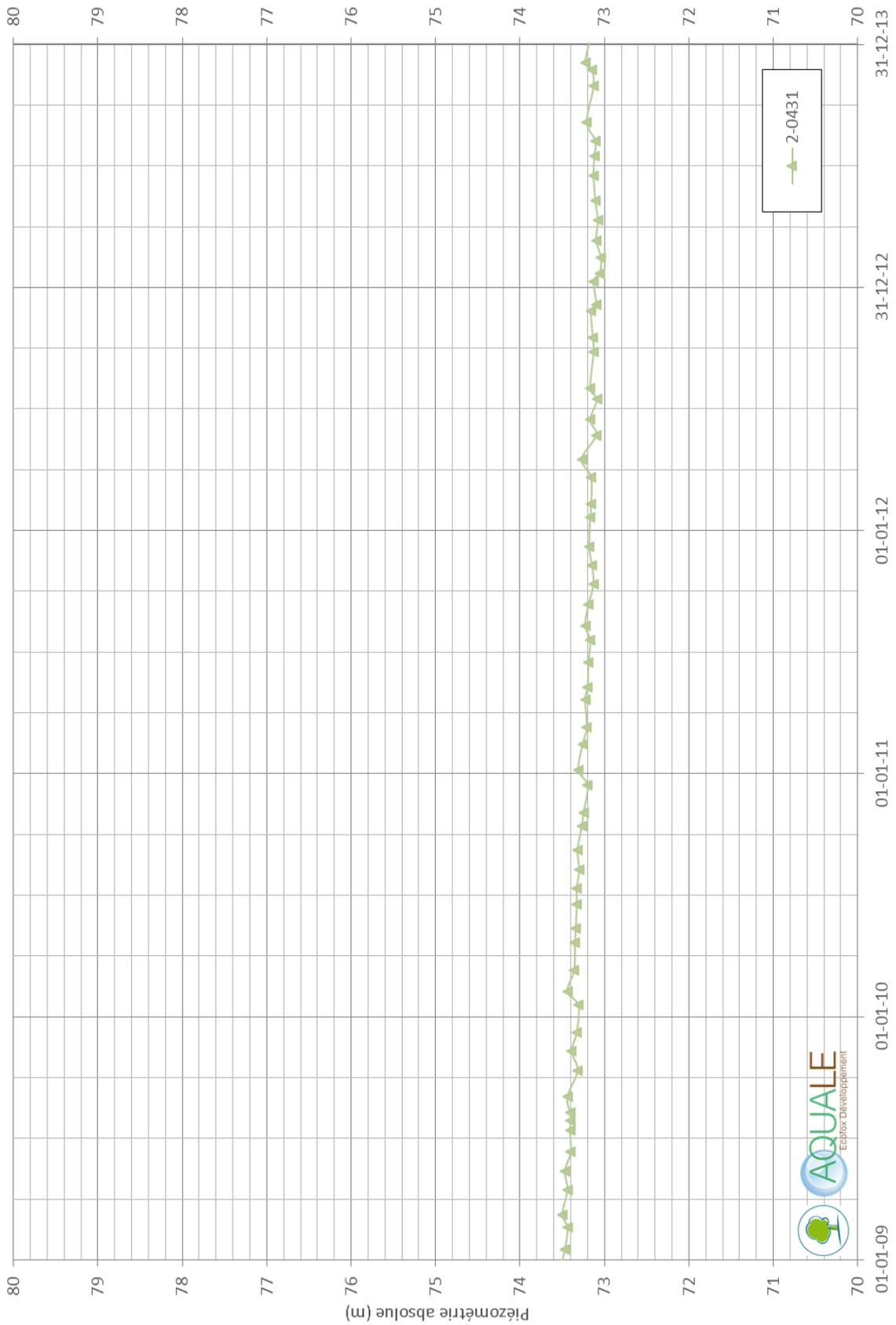


Figure 3-16 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Landénien entre 2009 et 2013 (gamme de hauteur d'eau entre 70 et 80 m)

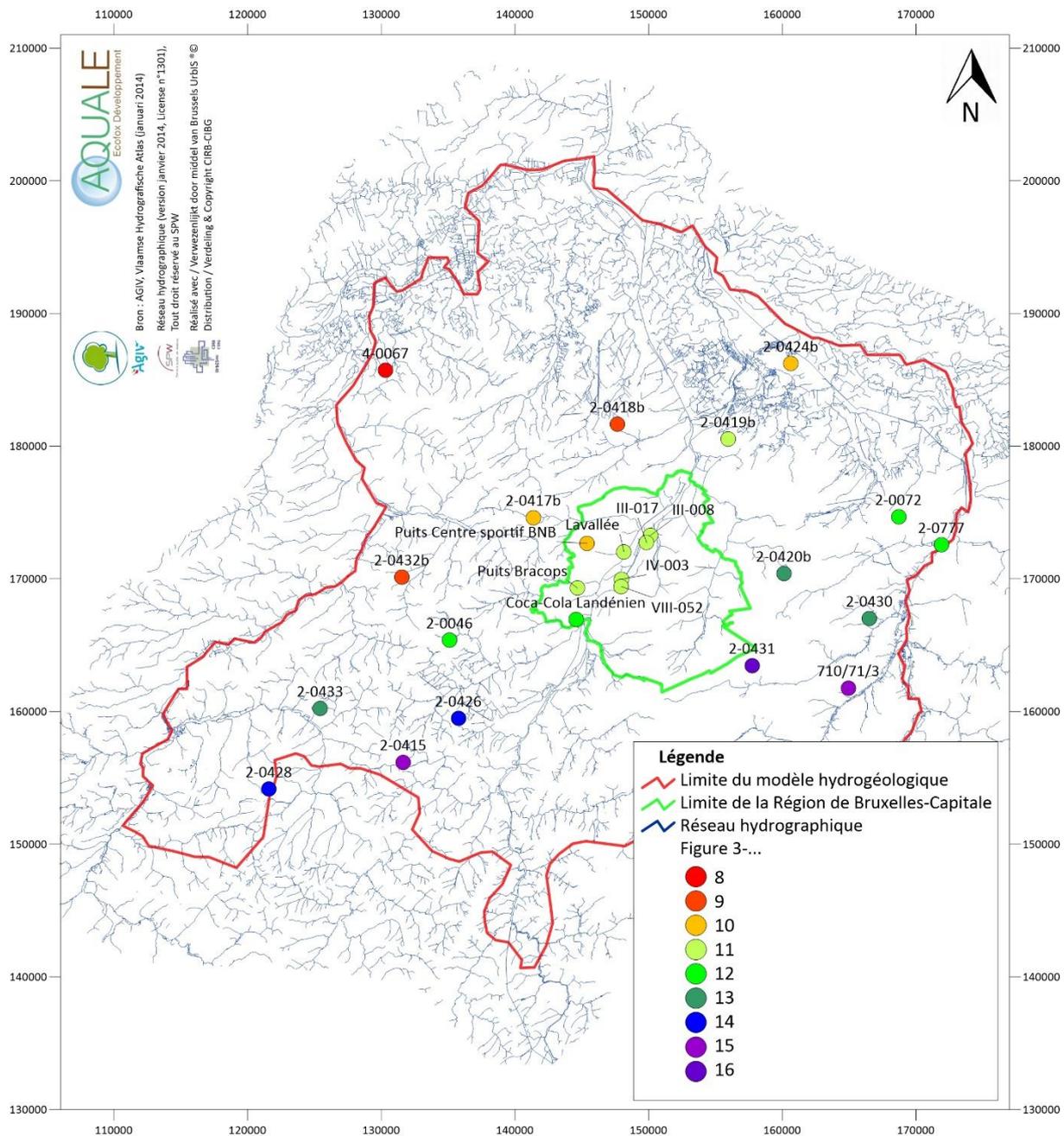


Figure 3-17 : Localisation des piézomètres pour lesquels un suivi piézométrique est réalisé entre 2009 et 2013 (ceux-ci sont repris aux figures 3-8 à 3-16)

La **FIGURE 3-17** ci-dessus illustre le fait qu'il y a un nombre assez restreint de piézomètres au sein de la zone modélisée. Deux 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 d'une à deux mesures par mois) ; 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
3-8	4-0067	Montée, non fiable	élevée	moyen
3-9	2-0418b	montée	élevée	moyen
	2-0432b	montée	faible	moyen
3-10	2-0417b	montée	élevée	moyen
	2-0424b	saisonnier	faible	moyen
	Puits Centre sportif BNB	montée et saisonnier	élevée	moyen
3-11	2-0419b	montée et saisonnier	moyen	moyen
	III-008	saisonnier, stable en 2009 – 2010, montée en 2011 – 2012, grand creux en 2013 puis remontée	élevée	moyen
	III-017	saisonnier, stable en 2009 – 2010, montée en 2011 – 2012, grand creux en 2013 puis remontée	élevée	moyen
	IV-003	saisonnier, descente en 2009 puis montée de 2010 à 2013	élevée	moyen
	Lavallée	saisonnier, stable en 2009 – 2010, montée en 2011 – 2012, grand creux en 2013 puis remontée	élevée	élevé
	Puits Bracops	saisonnier, descente en 2009 puis montée de 2010 à 2013	élevée	moyen
	VIII-052	saisonnier, descente en 2009 puis montée de 2010 à 2013	élevée	moyen
3-12	2-0046	saisonnier	moyen	moyen
	2-0072	saisonnier	moyen	moyen
	2-0777	saisonnier	faible	moyen
	Coca-Cola Landénien	saisonnier, descente en 2009 puis montée de 2010 à 2013	élevée	élevé
3-13	2-0420b	montée et saisonnier	moyen	moyen
	2-0430	saisonnier	moyen	moyen
	2-0433	montée et saisonnier	élevée	moyen
3-14	2-0426	saisonnier	élevée	moyen
	2-0428	saisonnier	élevée	moyen
3-15	2-0415	saisonnier	élevée	moyen
	710/71/3	stable	faible	faible
3-16	2-0431	descente	faible	moyen

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

Ce tableau permet d'identifier différents types de variation. Sur les 25 piézomètres repris dans le tableau :

- 2 sont jugés inadaptés à l'interprétation (710/71/3 du fait du nombre de mesures réalisées et 4-0067 compte tenu de l'allure des données qui semblent entachées d'erreurs, bien que, pour ce dernier, la chronique semble illustrer une remontée progressive et assez importante du niveau de l'eau) ;
- 7 sont caractérisés par un niveau montant durant les 5 années étudiées :
 - o pour 4 d'entre eux (2-0418b, 2-0417b, Puits Centre sportif BNB, 2-0433), le niveau d'eau varie fortement (dont 2 avec une composante de variation saisonnière également visible) ;
 - o pour 2 d'entre eux (2-0419b, 2-0420b), le niveau d'eau varie moyennement et avec une composante de variation saisonnière également visible ;
 - o pour 1 d'entre eux (2-0432b), le niveau d'eau varie faiblement ;
- 8 sont caractérisés par un niveau d'eau variant saisonnièrement :
 - o pour 3 d'entre eux (2-0426, 2-0428, 2-0415), la variation saisonnière est élevée ;
 - o pour 3 d'entre eux (2-0046, 2-0072, 2-0430), la variation saisonnière est moyenne ;
 - o pour 2 d'entre eux (2-0424b, 2-0777), la variation saisonnière est faible ;
- 3 sont caractérisés par un niveau d'eau stable en 2009 et 2010, montant durant 2011 et 2012 puis chutant fortement début 2013 avant de remonter et ce, avec une composante de variation saisonnière (III-008, III-017, Lavallée) ;
- 4 sont caractérisés par un niveau d'eau descendant en 2009 puis montant de 2010 à 2013 et ce, avec une composante de variation saisonnière (IV-003, Puits Bracops, VIII-052, Coca-Cola Landénien) ;
- 1 est caractérisé par un niveau d'eau descendant faiblement durant les 5 années étudiées (2-0431).

Sur les 25 piézomètres, seulement 2 sont caractérisés par un grand nombre de mesures (> 100). 22 sont caractérisés par un nombre de mesures intermédiaire (compris entre 11 et 100 mesures). Enfin, un piézomètre (le 710/71/3) est caractérisé par moins de 10 mesures durant la période étudiée.

Les différentes catégories de variations sont représentées sur un plan à la **FIGURE 3-18**.

Les commentaires suivants peuvent être faits :

- les différents types de variation sont globalement regroupés par zone ;
- les piézomètres au sein desquels une évolution saisonnière importante des niveaux d'eau est observée sont principalement localisés dans la partie Sud-Ouest et Nord-Est du modèle, soit à proximité des zones d'alimentation ;
- l'amplitude de la variation saisonnière est d'autant plus forte que l'on va vers le Sud (soit vers les zones d'alimentation) ;
- les piézomètres caractérisés par un niveau d'eau montant durant toute la période étudiée sont localisés principalement dans la partie Nord-Ouest du modèle ; l'étendue de cette zone de remontée piézométrique semblerait coïncider partiellement avec la zone influencée par le creux piézométrique important dont l'origine est située à l'Ouest de la zone modélisée – il pourrait dès lors s'agir d'un captage (ou d'un groupe de captages) important dont le débit diminue progressivement, il est probable que d'autres anciens puits d'exploitation localisés au sein de la zone modélisée soient également responsables de la remontée actuellement observée ;
- les piézomètres caractérisés par ces deux comportements (variation saisonnière et montée continue durant la période étudiée) sont localisés entre les zones précédemment identifiées et caractérisées par un seul des deux comportements ; en particulier, le piézomètre L6 – Centre Sportif BNB est influencé par un pompage qui fonctionne durant la belle saison (arrosage de terrains de sports), ce qui accentue l'effet saisonnier alors que l'on se situe dans une zone relativement éloignée de l'alimentation ;
- les piézomètres caractérisés par un niveau d'eau descendant en 2009 puis montant de 2010 à 2013 sont tous localisés au Sud-Ouest de la Région de Bruxelles-Capitale ;
- les piézomètres caractérisés par un niveau d'eau stable en 2009 – 2010 puis montant de 2011 à 2013 (avec un grand creux au début de 2013) sont tous localisés dans la partie Nord de la Région de Bruxelles-Capitale ;

- le piézomètre caractérisé par un niveau d'eau descendant durant toute la période étudiée est localisé au Sud-Est de la Région de Bruxelles-Capitale (en dehors de celle-ci).

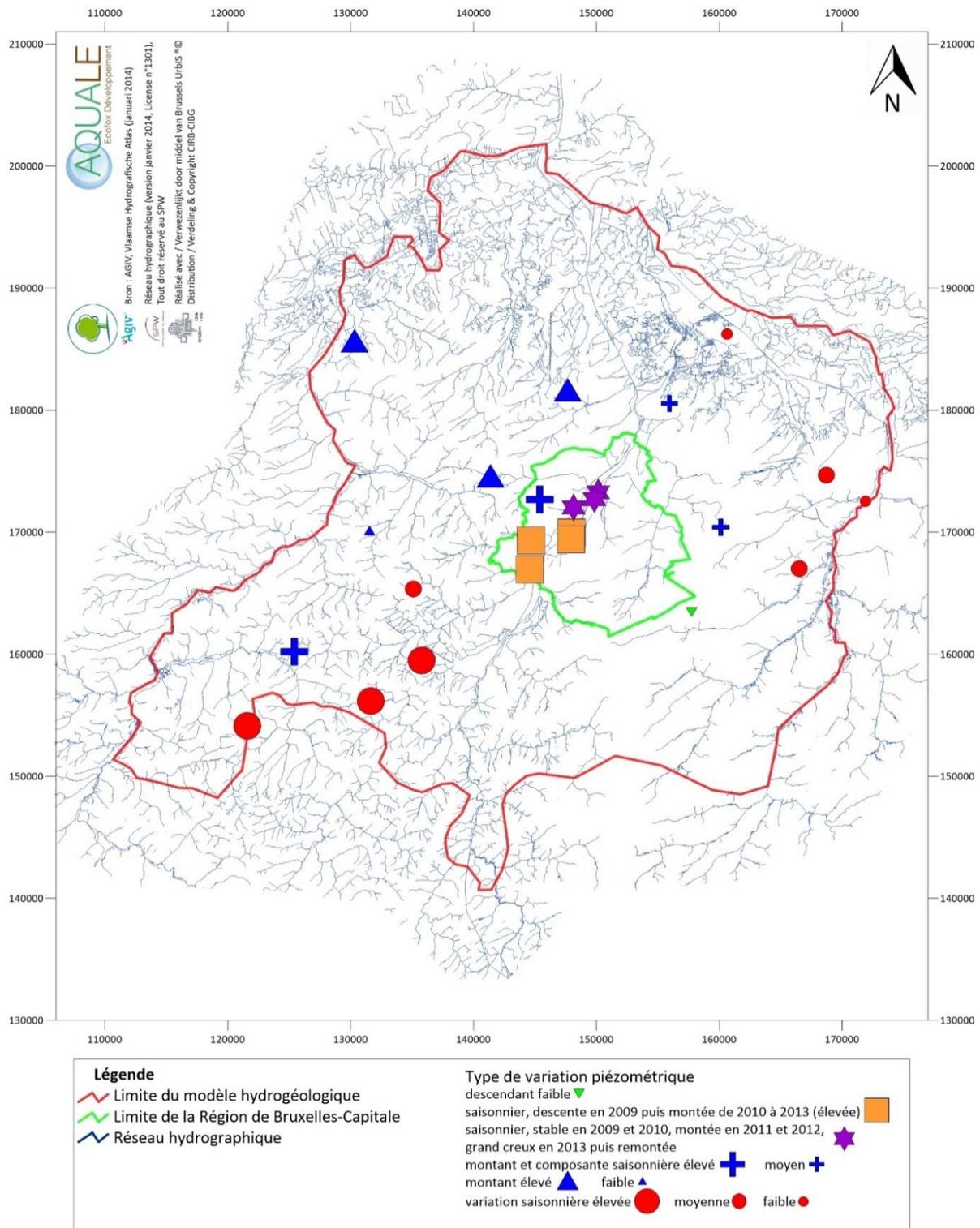


Figure 3-18 : Identification des différents types de variation piézométrique entre 2009 et 2013 au sein de la zone modélisée

3.3.1.2.3 ANALYSE À LONG TERME – 1997-2013

Deux piézomètres situés en Région de Bruxelles-Capitale ont fait l'objet d'un suivi piézométrique depuis l'année 1997. Il s'agit des piézomètres Lavallée et Coca-Cola. Puisque l'on observe une remontée piézométrique dans les données récentes, il est jugé important de prendre en considération l'évolution à plus long terme pour comprendre les phénomènes à l'origine de la remontée observée régionalement.

La **FIGURE 3-19** présente l'évolution de la piézométrie dans ces deux piézomètres entre 1997 et 2013.

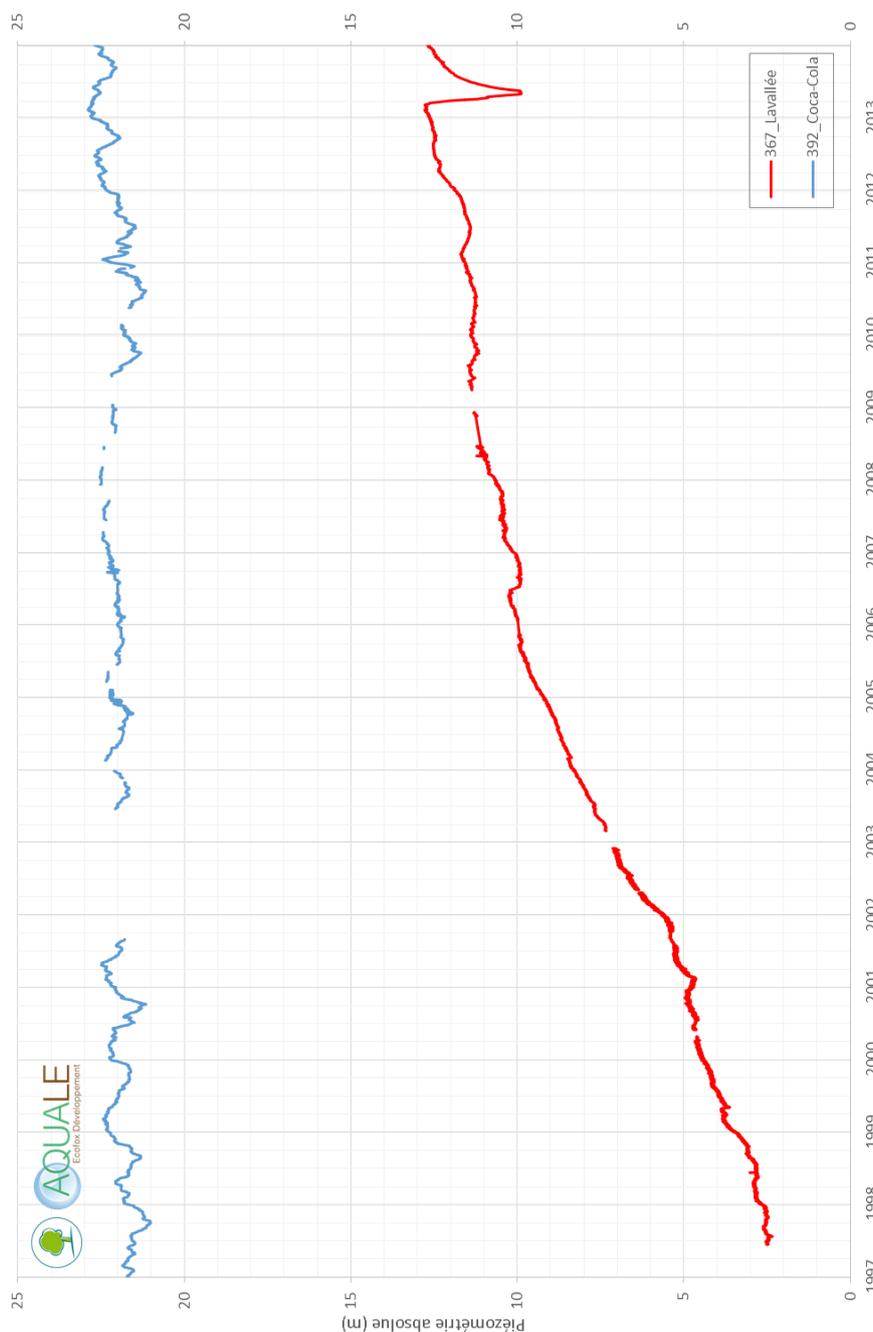


Figure 3-19 : Evolution de la piézométrie de la nappe du Landénien entre 1997 et 2013 pour les piézomètres Coca-Cola et Lavallée

Sur la base de l'observation de cette dernière figure, il apparaît que la piézométrie au droit du piézomètre Lavallée est en augmentation depuis de très nombreuses années. La **FIGURE 3-11** présentée plus tôt illustre par ailleurs le fait que la majorité des autres piézomètres en Région de Bruxelles-Capitale sont caractérisés par une évolution similaire de la piézométrie. Il peut donc être supposé que l'évolution de la piézométrie dans le piézomètre Lavallée est une tendance régionale. Le piézomètre Coca-Cola, à l'inverse, montre un niveau plutôt constant (en très légère croissance) d'un point de vue pluriannuel.

Etant donné que la remontée régionale est observée depuis de très nombreuses années, la cause de la remontée est probablement liée à la diminution de la quantité d'industries exploitant l'aquifère dans la zone modélisée. Cette diminution a entraîné une diminution des sollicitations par pompage qui, à son tour, a entraîné une remontée progressive du niveau d'eau de l'aquifère.

3.3.1.3 CONTEXTE BRUXELLOIS

Au vu de la profondeur de l'aquifère modélisé, le contexte urbanisé propre à la Région de Bruxelles-Capitale n'impacte pas la conceptualisation du modèle hydrogéologique. L'imperméabilisation des surfaces, les pertes et drains superficiels créés par les canalisations souterraines, ... n'ont ainsi pas d'influence sur l'aquifère étudié dès lors que celui-ci est isolé de la surface par le Membre de Saint-Maur (Formation de Kortrijk).

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, une seule nappe est étudiée : la nappe présente dans le Membre de Grandglise, aquifère de la Formation de Hannut (appelée *nappe du Landénien* dans ce rapport).

Ainsi, dans le modèle hydrogéologique, une seule couche géologique modélisée par le SGB est prise en considération. Le modèle est donc constitué d'une couche appelée *Layer* : Layer 1 – *aquifère du Landénien*.

La Layer 1 est délimitée dans sa partie supérieure par la base du Membre de Saint-Maur et dans sa partie inférieure par la base du Membre de Grandglise.

Au sein de cette Layer, aucune variation verticale des paramètres hydrodynamiques n'est possible. La 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 la Layer a une épaisseur bien définie.

Le modèle hydrogéologique 3D constitue donc une représentation du Membre de Grandglise. Aucune autre Formation n'est modélisée.

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 Landénien sont orientés du Sud vers le Nord, soit depuis la Région Wallonne vers la Région Flamande. Au Nord de la Région de Bruxelles-Capitale, les écoulements sont de plus en plus dirigés vers l'Ouest.

L'influence du réseau hydrographique est quasiment nulle pour l'aquifère étudié dès lors que celui-ci est captif (recouvert par l'aquiclude qu'est le Membre de Saint-Maur) et assez profond. Toutefois, dans la partie Sud du modèle, là où le Membre de Grandglise affleure, certains tronçons de rivières ont localement un rôle drainant.

Puisqu'il est couvert par le Membre de Saint-Maur (aquiclude) et qu'il recouvre le Membre de Lincint (aquiclude également), il est supposé que les échanges verticaux à travers les limites supérieure et inférieure du modèle sont négligeables par rapport aux flux horizontaux. Ceci est vrai sur l'ensemble du modèle à l'exception de l'extrémité Sud, où le Membre de Grandglise affleure en de nombreux endroits (zones d'alimentation – nappe libre). A ces endroits, l'aquifère est directement alimenté par l'infiltration des eaux météoriques. Dans la partie Sud également, le Membre de Lincint ne constitue plus la base de l'aquifère modélisé. Il est remplacé par le Socle Primaire qui n'est pas aquiclude. Une alimentation depuis le socle primaire existe donc dans cette zone.

Le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère étudié peut donc être résumé simplement comme ceci :

Là où il affleure (au Sud du modèle), l'aquifère est alimenté par les eaux de pluie. Dans le même temps (et dans la même zone), il est également alimenté latéralement (limite géologique, frontière Sud du modèle) et depuis sa base par l'eau contenue dans le Socle Primaire.

Une fois dans l'aquifère, l'eau progresse au sein de celui-ci depuis les points hauts (soit là où l'aquifère est alimenté) vers les points bas, soit vers le Nord (vers les zones confinées qui ne sont pas directement alimentées par les eaux de pluie) au sein de l'aquifère ou encore vers le réseau hydrographique proche. L'eau progresse vers le Nord puis vers l'Ouest à travers le modèle et peut ensuite passer à travers les limites du modèle (limites Nord et Ouest principalement) et poursuivre son parcours souterrain.

L'alimentation depuis le Socle est intégrée dans la composante « recharge » du modèle dès lors que la limite Sud représente un « pincement » du modèle (son épaisseur y est très faible étant donné qu'il s'agit de la limite de la couche géologique définie par le SGB). Le modèle étant constitué d'une seule couche, il n'y a par ailleurs pas d'intérêt pour la modélisation de distinguer les apports venant de la base du modèle de ceux venant du sommet du modèle. Ces différents apports étant tous localisés à l'extérieur de la zone d'intérêt et même à une distance importante, il n'est pas jugé nécessaire pour la modélisation d'affiner la distinction entre les différentes composantes de l'alimentation.

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. Compte-tenu de la profondeur de l'aquifère et de son caractère captif dans la zone concernée par l'étude, il est jugé que les différents comportements observés sur les chroniques piézométriques sont probablement liés à des variations météorologiques à long terme ou, plus vraisemblablement, à des modifications anthropiques (modification de régime de pompage par exemple).

Les différents comportements piézométriques observés sont regroupés par zone (**FIGURE 3-20**).

La **zone 1** est caractérisée par un niveau d'eau variant fortement (à moyennement) avec les saisons. Ce comportement est lié à la proximité relative des zones d'affleurement / alimentation, c'est donc logiquement la zone la plus impactée par les variations saisonnières.

La **zone 2** est caractérisée par un niveau d'eau montant durant toute la période étudiée et variant avec les saisons. Ce comportement est lié à l'influence toujours présente des variations saisonnières et à des modifications à plus long terme provoquant la montée continue (soit des apports météoriques qui augmentent, soit plus vraisemblablement des prélèvements par pompage qui diminuent).

La **zone 3** est caractérisée par un niveau d'eau montant durant toute la période étudiée. Il n'y a plus ou quasiment pas de variation saisonnière. L'absence de variation saisonnière est liée à l'éloignement de la zone par rapport aux points d'alimentation de la nappe. L'augmentation continue est, comme en zone 2, liée à des modifications à plus long terme (apports météoriques qui augmentent ou plus vraisemblablement des prélèvements par pompage qui diminuent).

La **zone 4a** est caractérisée par un niveau d'eau assez stable en 2009 – 2010 avant d'être croissant à partir de 2011 (comme en zone 2). Il semble impacté par des activités anthropiques au début de l'année 2013, probablement le démarrage de l'installation géothermique (système ouvert) exploitant les sables du Landénien au droit du bâtiment de Bruxelles Environnement (la réinjection, active actuellement, ne devait pas l'être à l'époque, d'où le fort rabattement). Le comportement global est assez proche de celui observé en zone 2, sauf durant les années 2009 – 2010.

La **zone 4b** est caractérisée par un niveau d'eau variant comme en zone 2 sauf durant l'année 2009. Durant cette année 2009, le niveau d'eau des piézomètres de la zone 4b diminue légèrement. Les observations sont les mêmes que pour la zone 2.

Etant donné que les données permettant de reproduire le creux piézométrique observé en début d'année 2013 pour les piézomètres situés en zone 4a ne sont pas disponibles, les zones 4a et 4b peuvent être considérées comme très similaires puisque c'est ce creux piézométrique qui les différencie.

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.

L'observation des données piézométriques en régime transitoire illustre le fait que la situation piézométrique de 2013 n'est pas une situation d'équilibre. En effet, l'allure piézométrique est globalement montante durant les dernières années. Ainsi, la modélisation hydrogéologique en régime permanent induit la reproduction d'une situation en déséquilibre. Par ce fait, la balance entre les arrivées et les sorties d'eau évaluée en régime permanent est forcément sous-estimée par rapport à la balance d'eau réelle (qui sera obtenue en régime transitoire) puisque, dans les conditions réelles, une lente remontée des niveaux piézométriques est observée.

L'intérêt du développement du modèle en régime permanent est dès lors d'obtenir une première construction du modèle qui servira de base au développement du modèle en régime transitoire.

Remarque importante : Etant donné que la diminution des sollicitations par pompage de la seconde moitié du vingtième siècle n'a pu être documentée, des hypothèses fortes sont posées pour reproduire la remontée des niveaux d'eau observées. La modélisation en régime transitoire ne pourra donc pas être cantonnée aux années 2009 à 2013 mais devra débuter bien plus en amont dans le temps afin de simuler l'arrêt de puits de pompage anciens représentés de façon fictive dans le présent cas.

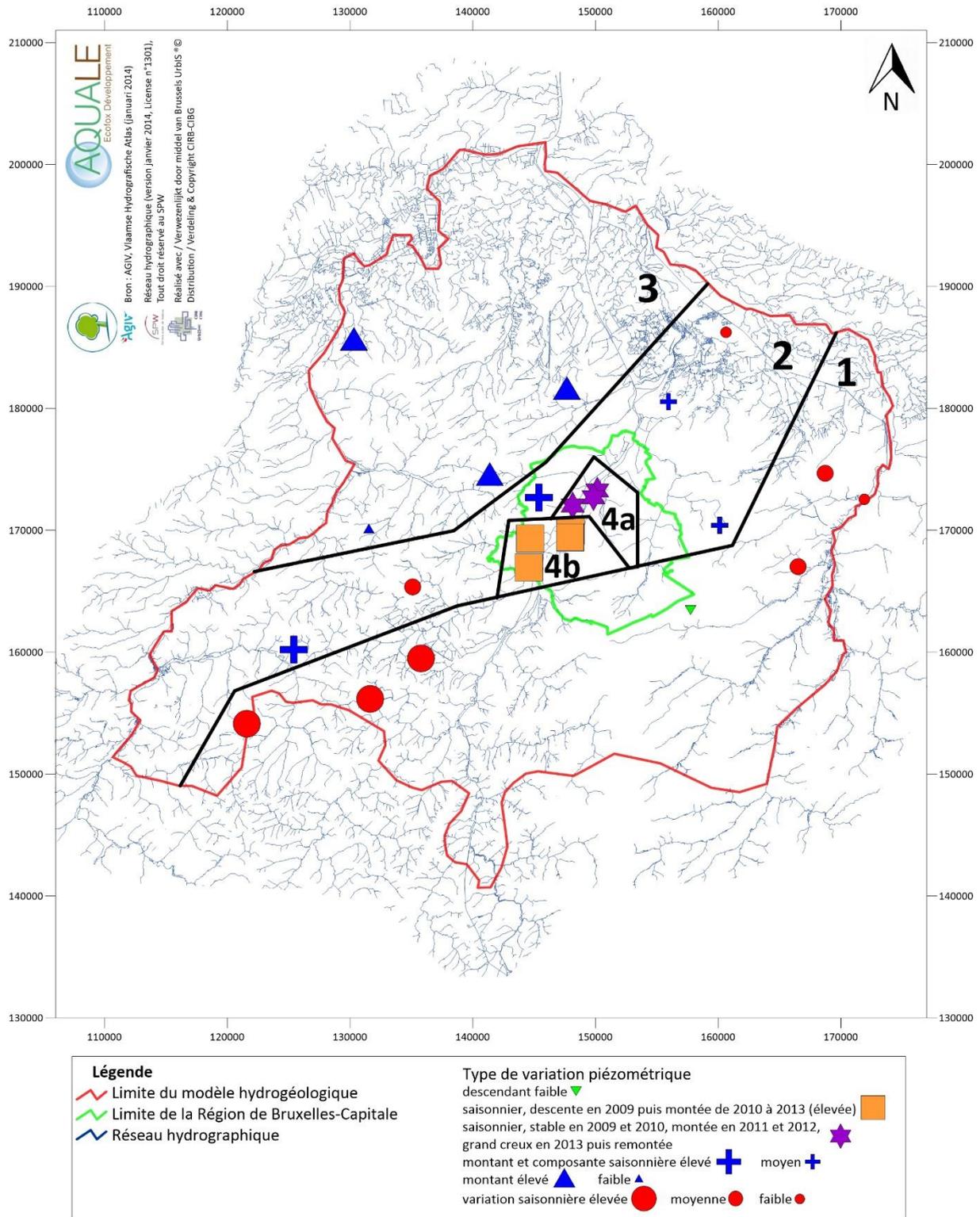


Figure 3-20 : Zonage par comportement piézométrique (période 2009 – 2013)

3.4 CONDITIONS AUX FRONTIÈRES EXTERNES ET INTERNES

3.4.1 DÉFINITION DES LIMITES EXTERNES

3.4.1.1 FRONTIÈRES LATÉRALES NORD, OUEST ET EST – CONDITION DE DIRICHLET, NIVEAU D’EAU IMPOSÉ

Sur toutes les limites latérales du modèle à l’exception de la frontière Sud, des conditions de 1^{er} type (Dirichlet, niveau d’eau) sont imposées.

Au droit des zones de captivité de la nappe, soit là où la limite ne correspond pas à un tronçon de rivière drainant (c’est la plupart du temps le cas), les potentiels imposés sont déduits de la carte de la piézométrie mesurée interpolée.

Au droit des zones d’alimentation, là où la limite correspond à un tronçon de rivière drainant, les potentiels imposés 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).

3.4.1.2 FRONTIÈRE LATÉRALE SUD – CONDITION DE NEUMANN, FLUX IMPOSÉ

Sur la limite Sud du modèle, qui correspond à la limite géologique du Membre de Grandglise, des conditions de 2^{ème} type (Neumann, flux) sont imposées. Un flux nul est imposé, supposant que l’apport latéral, à la limite du Membre de Grandglise, est négligeable par rapport aux apports météoriques directs dans cette même partie Sud du modèle, là où l’aquifère affleure.

3.4.1.3 LIMITE SUPÉRIEURE - INFILTRATION

La limite supérieure correspond à la base du Membre de Saint-Maur (aquiclude).

Une condition de 2^e type (Neumann) avec un flux imposé correspondant à l’infiltration est imposée sur cette frontière. Le flux imposé est nul sur la quasi-totalité de la surface couverte par le modèle hydrogéologique puisque le Membre de Saint-Maur (dépôts d’argile très finement silteuse avec quelques minces intercalations d’argile grossièrement silteuse ou de silt très fin argileux – l’épaisseur moyenne du membre est de 30 m) est jugé imperméable. Elle est supérieure à 0 dans la partie Sud, là où l’aquifère affleure et est alimenté par l’infiltration des eaux de pluie comme en attestent les chroniques piézométriques. La recharge imposée sur la limite supérieure reprend les contributions en provenance des eaux météoriques ainsi que les transferts depuis le Socle.

3.4.1.4 LIMITE INFÉRIEURE – CONDITION DE NEUMANN, FLUX IMPOSÉ

La limite inférieure coïncide avec la base du Membre de Grandglise qui repose quasiment partout (sauf sur une bande d'environ 10 km le long de la frontière Sud du modèle) sur le Membre de Lincent (argile gris vert, légèrement sableuse, localement cimentée par de l'opale – son épaisseur atteint 20 m) qui constitue une couche imperméable également.

Là où elle n'est pas présente, la base du modèle coïncide avec le toit des couches sous-jacentes (Crétacé, Paléozoïque) qui peuvent être la source d'un apport d'eau additionnel. Le modèle étant constitué d'une seule couche, cet apport supplémentaire est intégré dans la recharge majeure imposée sur le toit du modèle (il n'y a aucun intérêt à distinguer les apports venant de la base de ceux venant du sommet du modèle). La limite inférieure est dès lors 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** : 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 au centre ;
- de la Dyle à l'Est ;
- de la Dendre à l'Ouest.

Les tronçons jugés en équilibre avec la *nappe du Landénien* sont rares. Ils se trouvent tous dans la partie Sud du modèle hydrogéologique, là où l'aquifère est peu profond ou affleurant.

Il s'agit donc de quelques tronçons de la Senne, de la Dyle et de la Dendre et de l'un ou l'autre de leurs affluents, cantonnés à la partie extrême Sud du modèle. Ces tronçons sont clairement identifiés aux **FIGURES 3-6** et **3-7** puisque les points de mesure de niveau d'eau de ces tronçons ont été utilisés pour réaliser les cartes piézométriques.

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 CAPTAGES – CONDITIONS « WELL BC »

Dans la zone modélisée, de nombreux puits de captages sont répertoriés (particulièrement en Région de Bruxelles-Capitale).

Pour la plupart des ouvrages, les débits moyens annuels prélevés sont connus pour les périodes de calibration (mai – juin 2013 et novembre 2013 pour le régime permanent, 2009 – 2013 pour le régime transitoire). Pour certains ouvrages, seuls les débits autorisés sont connus.

De manière générale, tous les ouvrages déclarés sont repris dans le modèle. Une condition de 4^e type (Well BC) est imposée au droit de l'ouvrage avec un flux sortant du modèle correspondant aux débits fournis par les exploitants ou, à défaut, 75 % du débit autorisé. Compte tenu de la variabilité des données disponibles, une imprécision existe sur les débits de pompage appliqués au modèle.

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 à laquelle 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 à laquelle se situe la pompe (le puits s'assèche).

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 raffinement 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).

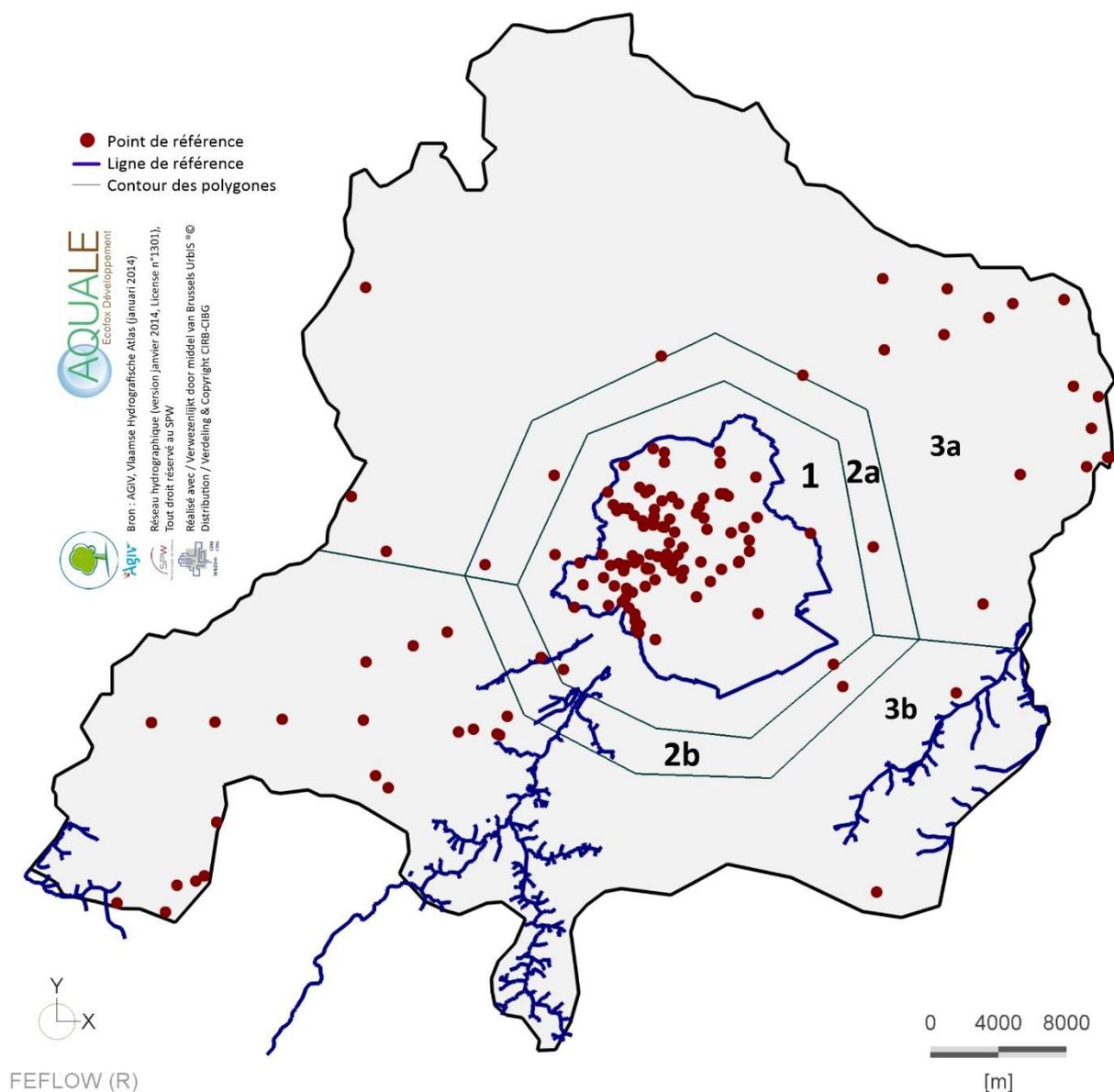


Figure 4-1 : Etape #1 – création de la géométrie de base du modèle numérique (Supermesh)

La **FIGURE 4-1** montre que le modèle est subdivisé en 5 polygones (séparés par les fines lignes noires) dessinés à main levée. Cette subdivision en 5 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 (1) englobe la Région de Bruxelles-Capitale et ses alentours directs (au moins 1 km), une densité maximale d'éléments est assignée à ce polygone et tous les points d'intérêt y sont pris en compte ;

- les polygones 2a et 2b reprennent la zone géographique située à une distance intermédiaire de la Région de Bruxelles-Capitale, une densité intermédiaire d'éléments est assignée à ces polygones et tous les points d'intérêt y sont pris en compte ;
- les polygones 3a et 3b reprennent la zone géographique située à grande distance de la Région de Bruxelles-Capitale, une densité minimale d'éléments est assignée à ces polygones et tous les points d'intérêt y sont pris en compte.

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 Landénien* a été pris en considération, à savoir :

- les piézomètres crépinés dans les sables du Landénien ;
- les pompes crépinés dans les sables du Landénien.

Les cours d'eau majeurs ayant un potentiel drainant sont pris en considération (lignes bleues) pour la création du maillage. Le maillage suivra donc la géométrie de ces lignes.

Le *Supermesh* comporte 5 polygones, 215 lignes et 155 points. Les intersections créées par ces éléments permettent de définir au final 375 éléments et 4 823 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 qu'*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*⁹ 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 un angle obtus (ce qui peut être corrigé par des contraintes imposées sur les angles, moyennant un certain coût CPU¹⁰).

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 1 500 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 150 à 180 m de côté.

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

⁹ Disponible gratuitement à l'adresse <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>

¹⁰ Central Processing Unit

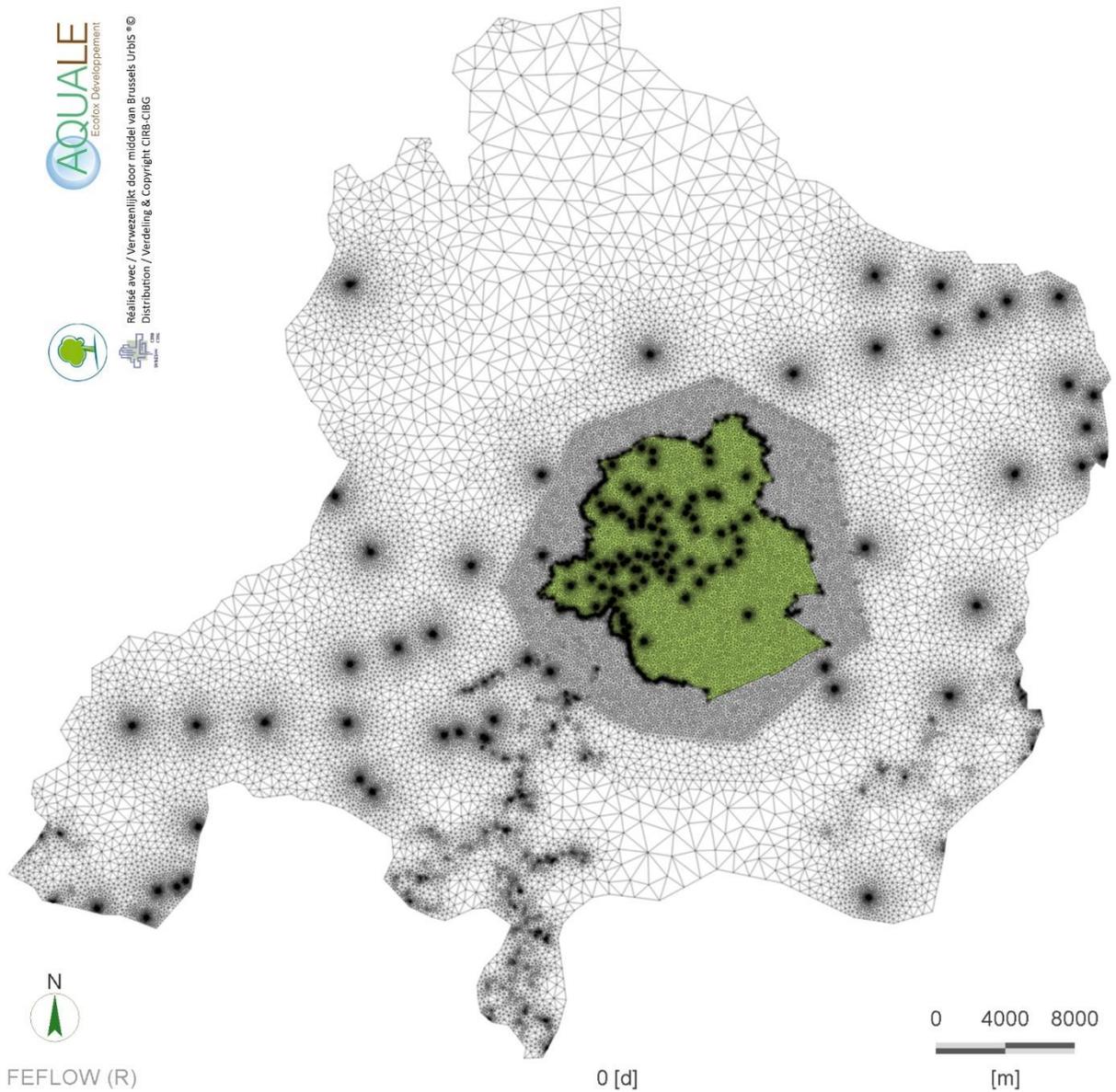


Figure 4-2 : Etape #2 – génération du maillage en éléments finis

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

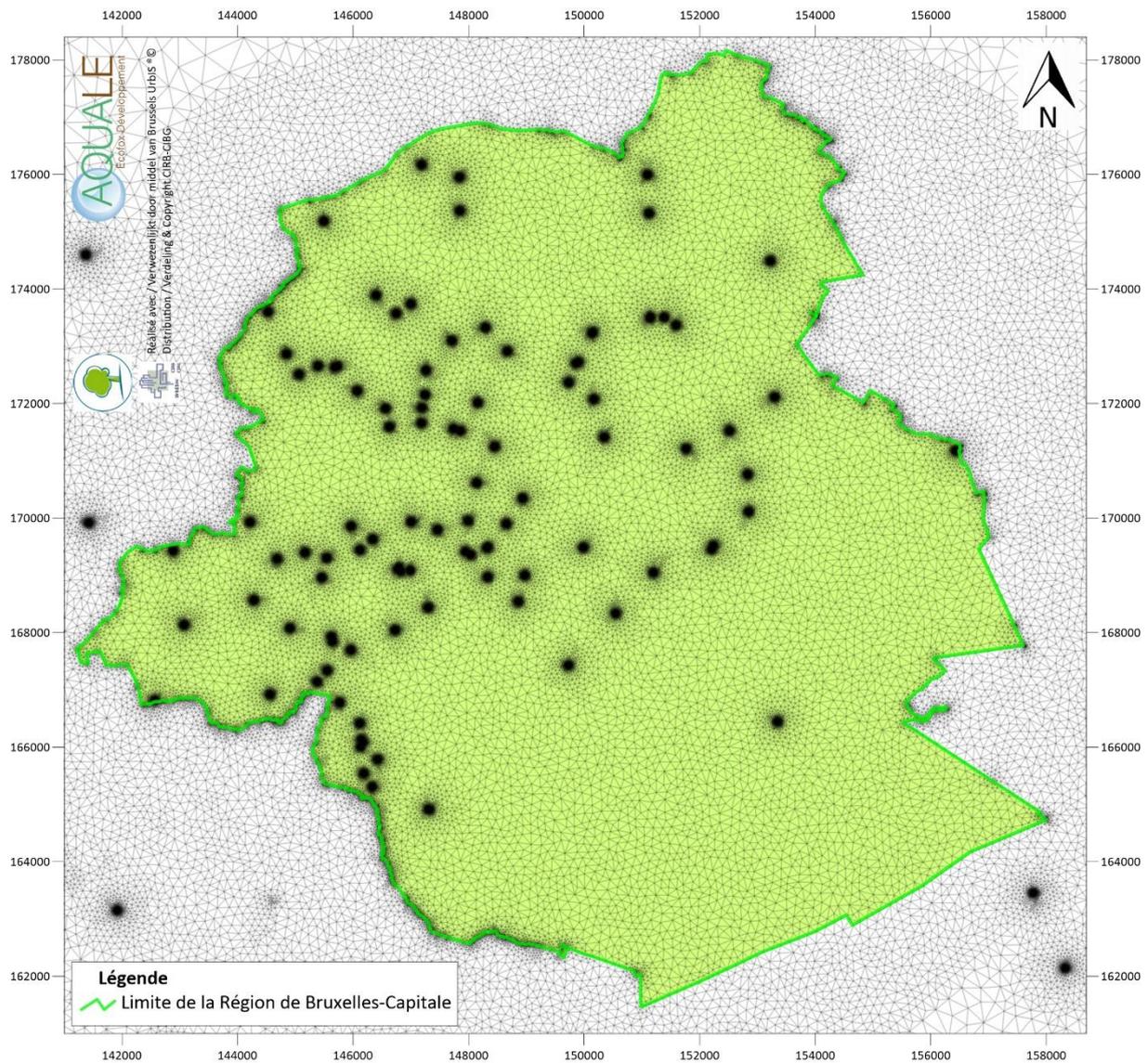


Figure 4-3 : Etape #2 – zoom sur le maillage en éléments finis

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 une *Layer* délimitée au-dessus et en-dessous par une *Slice* (le modèle compte dès lors 2 *Slices*, la première correspond à la base du Membre de Saint-Maur et la seconde à la base du Membre de Grandglise). Le modèle 3D comporte 494 859 éléments de type prismes triangulaires et composés chacun de 6 nœuds (pour un total de 495 764 nœuds).

Le modèle 3D généré après maillage est présenté à la **FIGURE 4-4**. L'échelle verticale est exagérée 20 fois pour une meilleure visualisation.

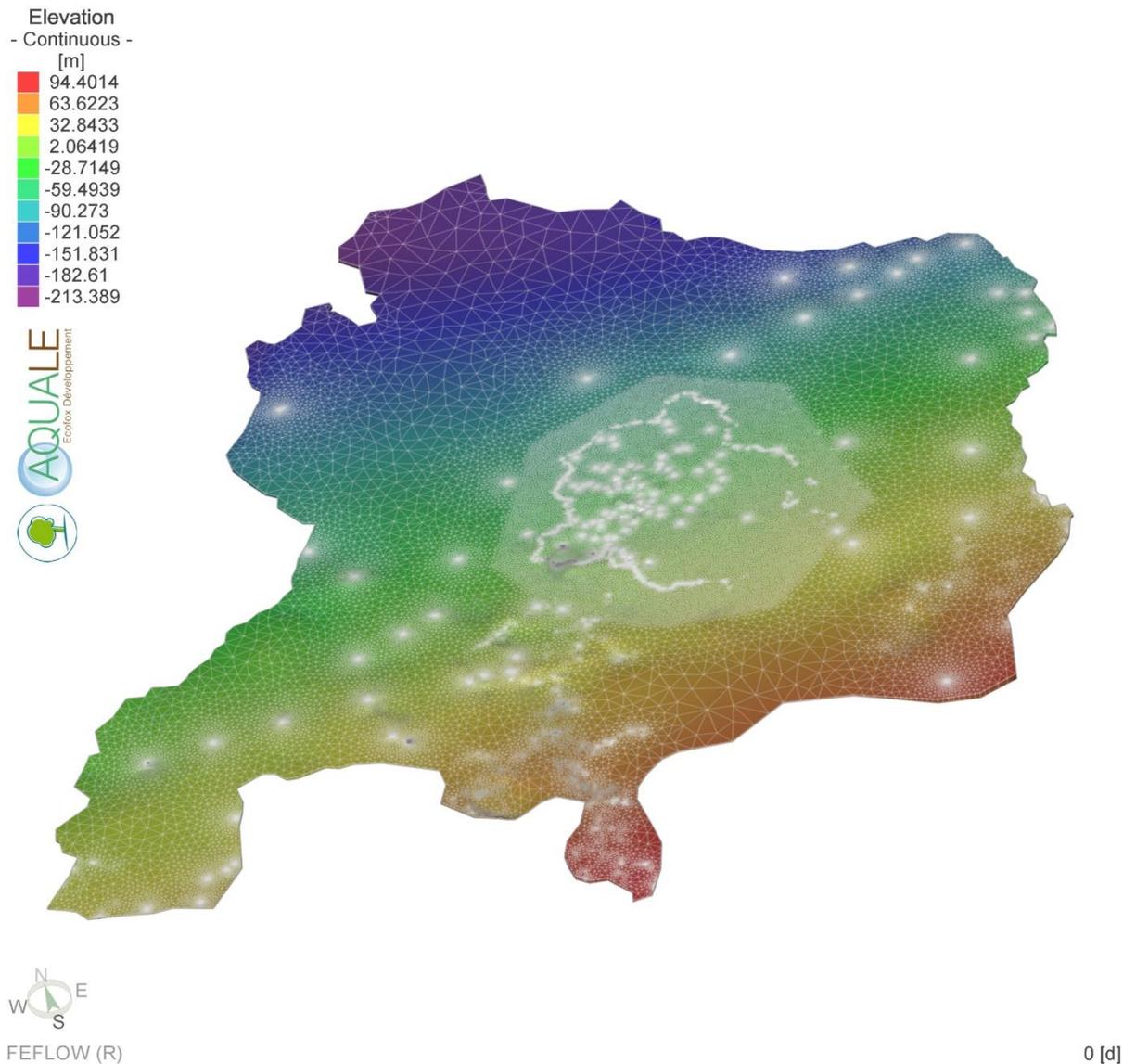


Figure 4-4 : Modèle 3D généré après maillage

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).

Dans le présent cas, afin d'affiner la reproduction de la remontée piézométrique observée à long terme, les simulations de calibration en régime transitoire seront réalisées sur la période 1970 – 2013 avec pour objectif de reproduire l'ensemble de la courbe piézométrique du piézomètre Lavallée.

4.4 ETAPE #4 - DÉFINITION DES CONDITIONS AUX LIMITES

4.4.1 DÉFINITION DES LIMITES EXTERNES

4.4.1.1 FRONTIÈRES LATÉRALES NORD, OUEST ET EST – CONDITION DE DIRICHLET, NIVEAU D'EAU IMPOSÉ

Les potentiels imposés sont déduits de la carte piézométrique mesurée présentée aux **FIGURES 3-6** et **3-7**. Localement, là où des tronçons de rivières avec potentiel drainant sont présents, le potentiel imposé est déduit du niveau de la rivière.

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

La **FIGURE 4-5** ci-dessous illustre l'ajout des conditions aux frontières latérales Nord, Ouest et Est du modèle. Les cercles bleus symbolisent les potentiels imposés.

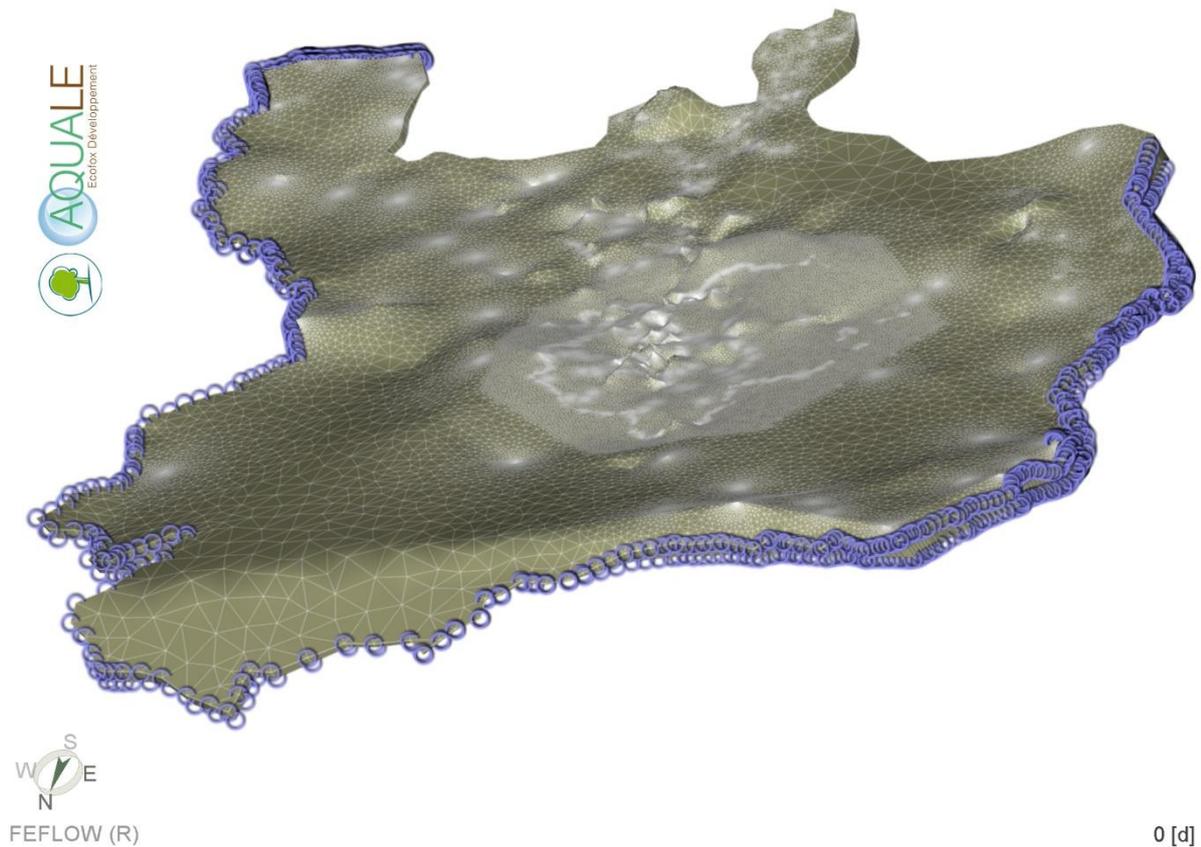


Figure 4-5 : Potentiels imposés le long des frontières extérieures Nord, Ouest et Est (Vue vers le Sud)

4.4.1.2 FRONTIÈRE LATÉRALE SUD – CONDITION DE NEUMANN, FLUX IMPOSÉ

Le flux à travers la frontière Sud (limite géologique du Membre de Grandglise) est supposé négligeable. La limite Sud, qui coïncide avec la limite du Membre de Grandglise, est dès lors d'épaisseur très faible puisqu'elle constitue un « pincement » du modèle. Les apports d'eau depuis le Socle sont intégrés dans la recharge imposée en limite supérieure.

Les conditions de Neumann sont imposées sur toutes les slices en bordure Sud du modèle pour les deux périodes de calibration en régime permanent. Elles restent identiques en régime transitoire.

La **FIGURE 4-6** ci-dessous illustre l'ajout des conditions aux frontières latérales Sud du modèle. Les croix rose symbolisent les flux imposés.

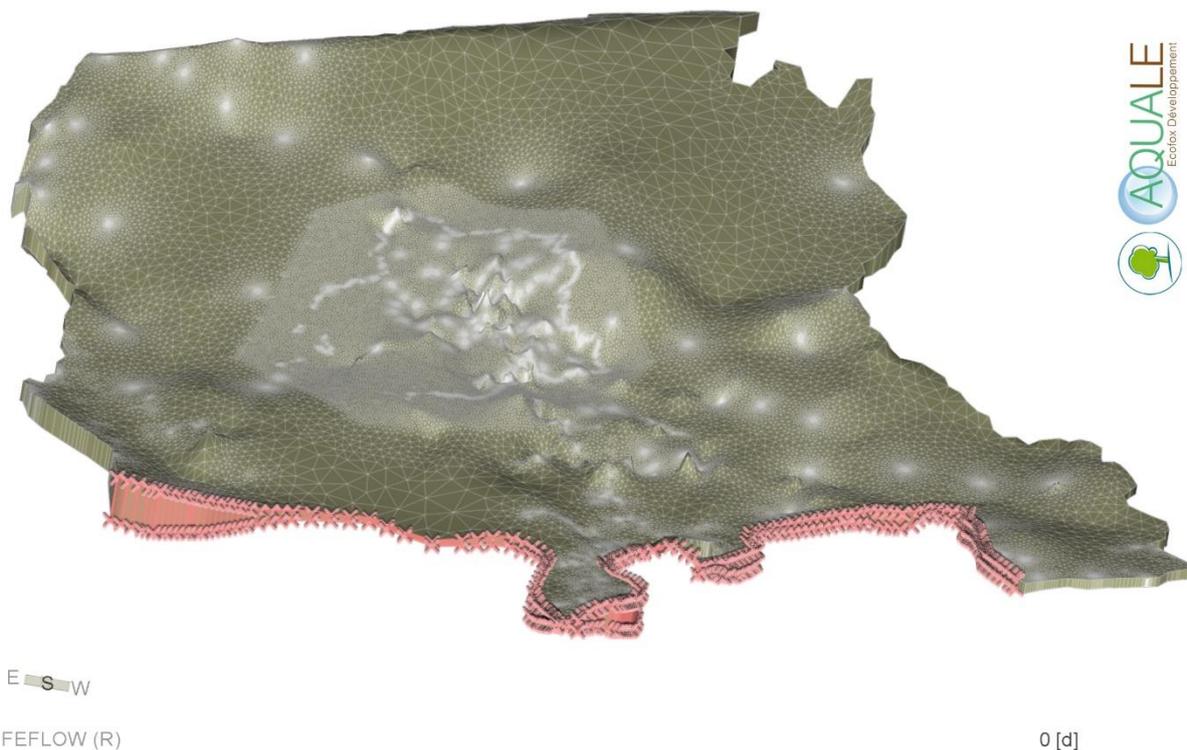


Figure 4-6 : Flux nuls imposés le long de la frontière Sud (Vue vers le Nord)

4.4.1.3 LIMITE SUPÉRIEURE – INFILTRATION

4.4.1.3.1 EVALUATION DE L'INFILTRATION EN RÉGIME PERMANENT

Dans le contexte particulier d'un aquifère presque totalement confiné, la zone d'infiltration est assez réduite. L'infiltration imposée résulte, dans la présente étude, de :

- l'expérience du projet HYDROBRUX qui a permis d'évaluer les ordres de grandeur acceptables de l'infiltration dans la région ;
- l'étape de calibration durant laquelle l'infiltration est ajustée pour reproduire à la fois les niveaux d'eau mesurés dans l'aquifère mais également les débits drainés par les ruisseaux dans la partie Sud ;
- la prise en considération d'un apport éventuel des aquifères plus profonds (Crétacé et Socle) difficilement mesurable.

La zone d'infiltration résulte de la combinaison entre les zones d'affleurement du Membre de Grandglise repérées sur les cartes géologiques et les zones d'absence du Membre de Lincet, autorisant un transfert d'eau depuis les couches sous-jacentes (**FIGURE 4-7**). La délimitation finalement obtenue résulte également du processus de calibration. En particulier, la zone verte longeant la limite Sud (moitié Est) du modèle n'est pas précisément liée à une zone d'affleurement de l'aquifère mais plutôt à un apport depuis les aquifères sous-jacents. En effet, un haut piézométrique existe près de la limite Sud du modèle. Sur la base des données à disposition, ce haut piézométrique ne peut être lié qu'à l'alimentation importante de l'aquifère dans sa partie Sud.

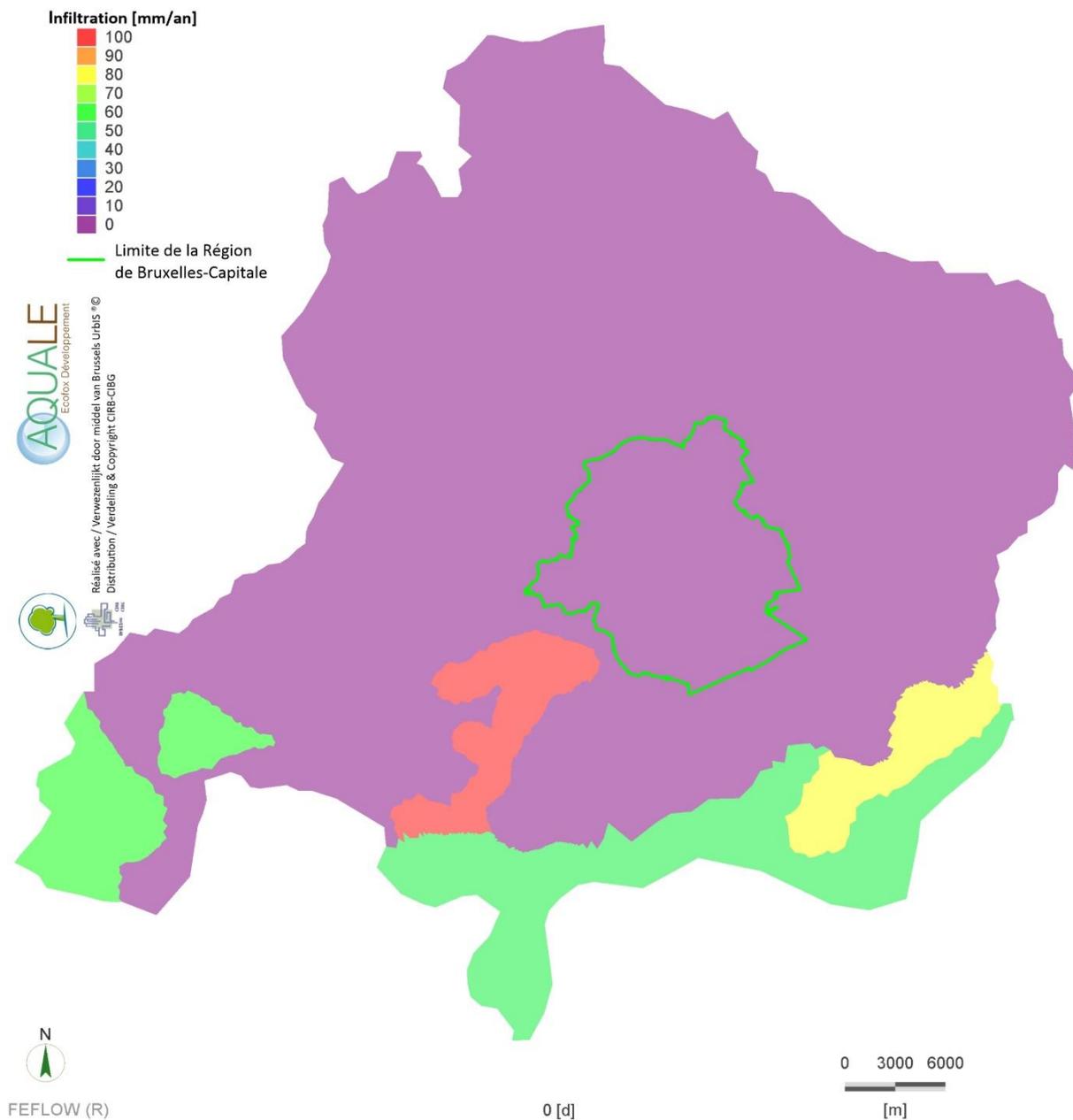


Figure 4-7 : Infiltration imposée au modèle hydrogéologique en régime permanent

L'observation des données piézométriques en régime transitoire illustre le fait que la situation piézométrique de 2013 n'est pas une situation d'équilibre. En effet, l'allure piézométrique est globalement montante durant les dernières années. Ainsi, la modélisation hydrogéologique en régime permanent induit la reproduction d'une situation en déséquilibre. Par ce fait, la balance d'eau évaluée en régime permanent est forcément sous-estimée par rapport à la balance d'eau réelle (qui sera obtenue en régime transitoire) puisque, dans les conditions réelles, une lente remontée des niveaux piézométriques est observée.

4.4.1.3.2.1 Etude du contexte climatique pour la période 2009 - 2013

La **FIGURE 4-8** montre l'évolution de la pluviométrie et de l'eau utile mensuelles durant les années 2009 à 2013 à la station IRM d'Uccle. L'**ANNEXE 2** reprend les bilans de Thornthwaite réalisés pour évaluer l'eau utile.

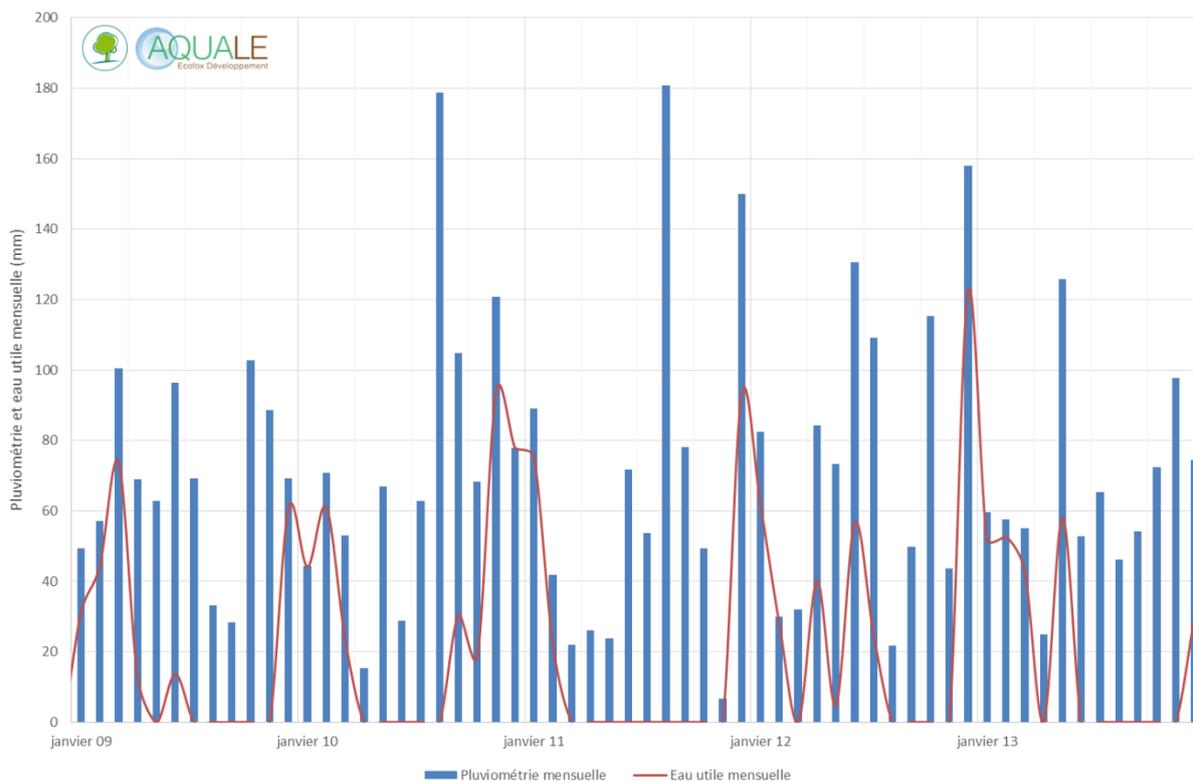


Figure 4-8 : Evolution de la pluviométrie et de l'eau utile mensuelle à la station IRM d'Uccle entre 2009 et 2013

Annexe 2 : Bilans de Thornthwaite sur les années 1999 à 2013 pour la station pluviométrique d'Uccle (IRM)

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 3-8 à 3-16**, 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 clair :

- Puits Centre sportif BNB ;
- 2-0419b ;
- 2-0420b ;
- 2-0433 ;
- 2-0424b ;
- 2-0046 ;
- 2-0072 ;
- 2-0777 ;
- 2-0430 ;
- 2-0426 ;
- 2-0428 ;
- 2-0415 ;
- IV-003 ;
- Puits Bracops ;
- VIII-052 ;
- Coca-Cola Landénien.

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

- de février à avril 2009 ;
- de mars à mai 2010 ;
- de janvier à mars 2011 ;
- de avril à juin 2012 ;
- en février à avril 2013.

Il apparaît que la période des hautes eaux correspond à la fin de l'hiver / au début du 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 3 mois ;

- décalage temporel : 0 à 1 mois ;
- en 2010 :
 - période d'infiltration élevée étalée sur 3 mois ;
 - hautes eaux étalées sur 3 mois ;
 - décalage temporel : 3 mois ;
- en 2011 :
 - période d'infiltration élevée étalée sur 3 mois ;
 - hautes eaux étalées sur 3 mois ;
 - décalage temporel : 2 mois ;
- en 2012 :
 - période d'infiltration élevée étalée sur 2 mois (suivie de 2 mois isolés d'infiltration modérée / élevée) ;
 - hautes eaux étalées sur 3 mois ;
 - décalage temporel : 4 à 5 mois ;
- en 2013 :
 - période d'infiltration élevée étalée sur 4 mois (suivie de 1 mois isolé d'infiltration élevée) ;
 - hautes eaux étalées sur 3 mois ;
 - décalage temporel : 1 à 2 mois.

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

- de septembre à octobre 2009 ;
- d'août à septembre 2010 ;
- d'août à octobre 2011 ;
- de septembre à octobre 2012 ;
- en septembre à octobre 2013.

Il apparaît que la période des basses eaux correspond à la fin de l'été / au début de 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 2 mois ;
 - décalage temporel : 2 à 3 mois ;
- en 2010 :
 - période d'infiltration faible étalée sur 5 mois ;
 - basses eaux étalées sur 2 mois ;
 - décalage temporel : 4 à 5 mois ;
- en 2011 :
 - période d'infiltration faible étalée sur 9 mois ;
 - basses eaux étalées sur 3 mois ;
 - décalage temporel : 5 à 6 mois ;
- en 2012 :
 - période d'infiltration faible étalée sur 4 mois (avec infiltration modérée les 3 mois qui précédent) ;
 - basses eaux étalées sur 2 mois ;
 - décalage temporel : 3 à 4 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 : 2 à 3 mois.

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 la fin de l'hiver / le début du printemps ;
- les périodes d'infiltration faible sont centrées sur l'été ;
- les périodes de basses eaux sont centrées sur la fin de l'été / le début de l'automne ;
- globalement, il y a donc un décalage compris entre 1.5 et 3 mois entre l'événement pluviométrique et sa conséquence sur l'aquifère.

4.4.1.3.2.2 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 4-1** 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
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	

Année	Eau utile annuelle (mm)	< P25 (183 mm)	P25 < < MED (303 mm)	MED < < P75 (341 mm)	P75 <
2013	236		X		

Tableau 4-1 : 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 faible entre 2003 et 2008 et élevé entre 1998 et 2002.

Afin de confirmer ces observations, la **FIGURE 4-9** 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 cumulée de décembre à mars sur la période de 1991 à 2013. Il est ainsi très aisé de visualiser les années d'eau utile élevée / faible.

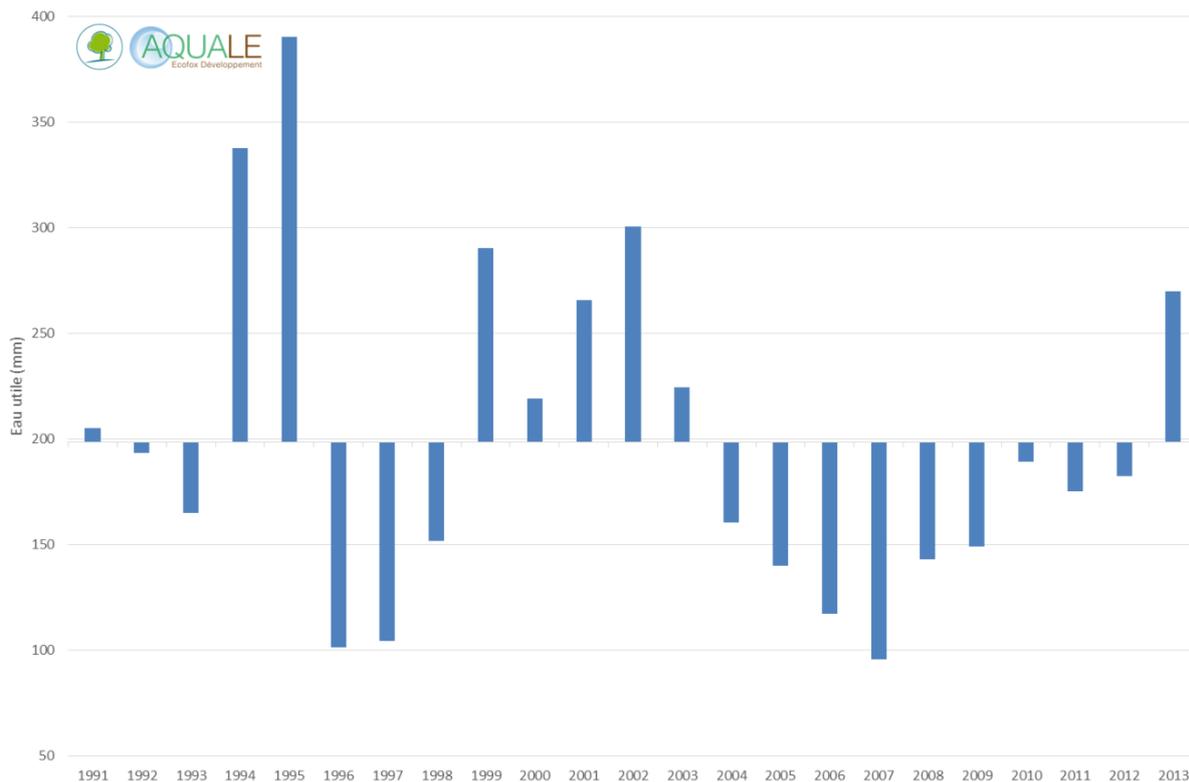


Figure 4-9 : Evolution de l'eau utile cumulée de décembre à mars pour les années 1991 à 2013 (la valeur indiquée est calculée en prenant la somme des valeurs mensuelles calculées entre le mois de décembre de l'année précédente et le mois de mars de l'année en cours)

La **FIGURE 4-10** illustre l'impact de l'eau utile à long terme (1997 – 2013) pour les piézomètres de la Région de Bruxelles Capitale (seuls les piézomètres Lavallée et Coca-Cola ont fait l'objet d'un suivi sur toute cette période ; pour les autres, la période étudiée couvre les années 2005 à 2013). Les flèches colorées, dans la partie supérieure de la figure, indiquent la tendance de l'eau utile. Il apparaît que le parallèle entre l'eau utile et la piézométrie à long terme n'est pas clair pour les piézomètres suivis depuis 2005. Les chroniques de piézométrie sont un peu courtes pour pouvoir avoir une vision de l'impact de différents régimes d'alimentation de la nappe. En effet, bien que la période 2005 – 2008 représente globalement une période de recharge faible, il faut quand même noter que l'eau utile augmente d'année en année durant cette période, ce qui peut également provoquer la remontée de niveau d'eau observée sur les chroniques piézométriques.

Le suivi du piézomètre Lavallée permet de mieux évaluer l'impact éventuel de la variation d'eau utile. En effet, il apparaît sur cette courbe que :

- la période allant de juillet 1997 à janvier 2002 est caractérisée par une remontée modérée du niveau d'eau (+ 3.2 m en 4.5 années, soit 0.70 m/an) ;
- la période allant de janvier 2002 à janvier 2006 est caractérisée par une remontée majeure du niveau d'eau (+ 5.5 m en 4 années, soit 1.4 m/an) ;
- la période allant de janvier 2006 à mars 2012 est caractérisée par une remontée faible du niveau d'eau (+ 2.4 m en 6 années, soit 0.4 m/an) ;
- la période allant de mars 2012 à décembre 2013 est caractérisée par une remontée quasi nulle du niveau d'eau (+ 0.3 m en 2 années, soit 0.15 m/an) ;
- sur l'ensemble du suivi, le niveau d'eau évolue fortement à la hausse avec une différence de plus de 10 m entre 1997 et 2013.

Ces différentes périodes sont représentées par les traits pointillés. Il n'est pas évident d'associer les différentes variations aux changements d'eau utile.

L'observation à long terme de la piézométrie mesurée dans l'ouvrage Coca-Cola ne permet pas non plus d'identifier un lien clair avec l'évolution à long terme de l'eau utile. Les variations saisonnières sont par contre bien visibles.

Les piézomètres situés en Flandre font aussi l'objet d'un suivi depuis plusieurs années. Bien que ces données ne concernent pas la zone d'intérêt du modèle, elles permettent de vérifier également la corrélation entre l'évolution de l'eau utile et la piézométrie de la *nappe du Landénien*. Ainsi, les piézomètres suivants sont utiles pour préciser l'interprétation à long terme :

- le piézomètre 4-0067 est suivi régulièrement depuis l'année 1992 ;
- le piézomètre 2-0046 est suivi régulièrement depuis l'année 1993 ;
- le piézomètre 2-0072 est suivi régulièrement depuis l'année 1993.

La chronique du piézomètre 4-0067 (**FIGURE 4-11**) est inexploitable dès lors qu'elle semble peu fiable. Il apparaît toutefois que le niveau d'eau y augmente de façon continue et forte.

Les observations suivantes sont faites sur l'évolution de la piézométrie dans l'ouvrage 2-0046 (**FIGURE 4-12**) :

- le niveau d'eau est relativement stable durant les années 1993 et 1994 ;
- il chute ensuite durant les années 1995 et 1996 ;
- il remonte ensuite de 1997 à 1999 ;
- il chute à nouveau entre 2000 et 2004 ;
- il remonte ensuite de 2005 à 2008 ;
- il est finalement relativement stable de 2008 à 2013 ;
- sur les 20 années de suivi, le niveau d'eau varie assez peu, la tendance générale est stable.

De la même manière, les observations suivantes sont faites sur l'évolution de la piézométrie dans l'ouvrage 2-0072 (**FIGURE 4-12**) :

- le niveau d'eau baisse de 1993 à 2000 ;
- il remonte ensuite de 2000 à 2006 ;
- il chute à nouveau entre 2006 et 2009 ;
- il remonte ensuite de 2009 à 2011 ;
- il est finalement relativement stable de 2011 à 2013 ;
- sur les 20 années de suivi, le niveau d'eau varie assez peu, la tendance générale est stable.

De ces différentes chroniques piézométriques, il est assez difficile de dégager une tendance générale et une corrélation entre l'évolution de l'eau utile à long terme et la piézométrie de l'aquifère étudié.

Les piézomètres situés en Région de Bruxelles-Capitale indiquent que le niveau d'eau remonte progressivement ces dernières années. Puisque cela n'apparaît pas lié à l'évolution de l'eau utile, il est probable que cela soit une conséquence d'une diminution des sollicitations par pompage au sein de la zone modélisée (voire à l'extérieur).

Concernant les piézomètres situés en Flandre, l'observation majeure est la grande stabilité à long terme. Cette stabilité doit être liée :

- soit à un système de tampon, comme par exemple une influence du réseau hydrographique, qui viendrait empêcher l'eau de monter trop fortement dans la nappe... Cette hypothèse est a priori valable pour le piézomètre 2-0046 dès lors qu'il se situe à proximité d'un tronçon de rivière en

équilibre avec la nappe. Elle est moins fiable dans le cas du piézomètre 2-0072 car celui-ci ne se situe pas à proximité d'un tel tronçon.

- soit à une gestion intelligente de l'aquifère en Flandre avec des sollicitations par pompage qui évoluent en fonction des apports, de façon à conserver une stabilité des niveaux d'eau à long terme (cette zone de l'aquifère est très peu sollicitée en comparaison aux masses d'eaux souterraines Est et Ouest flamands).

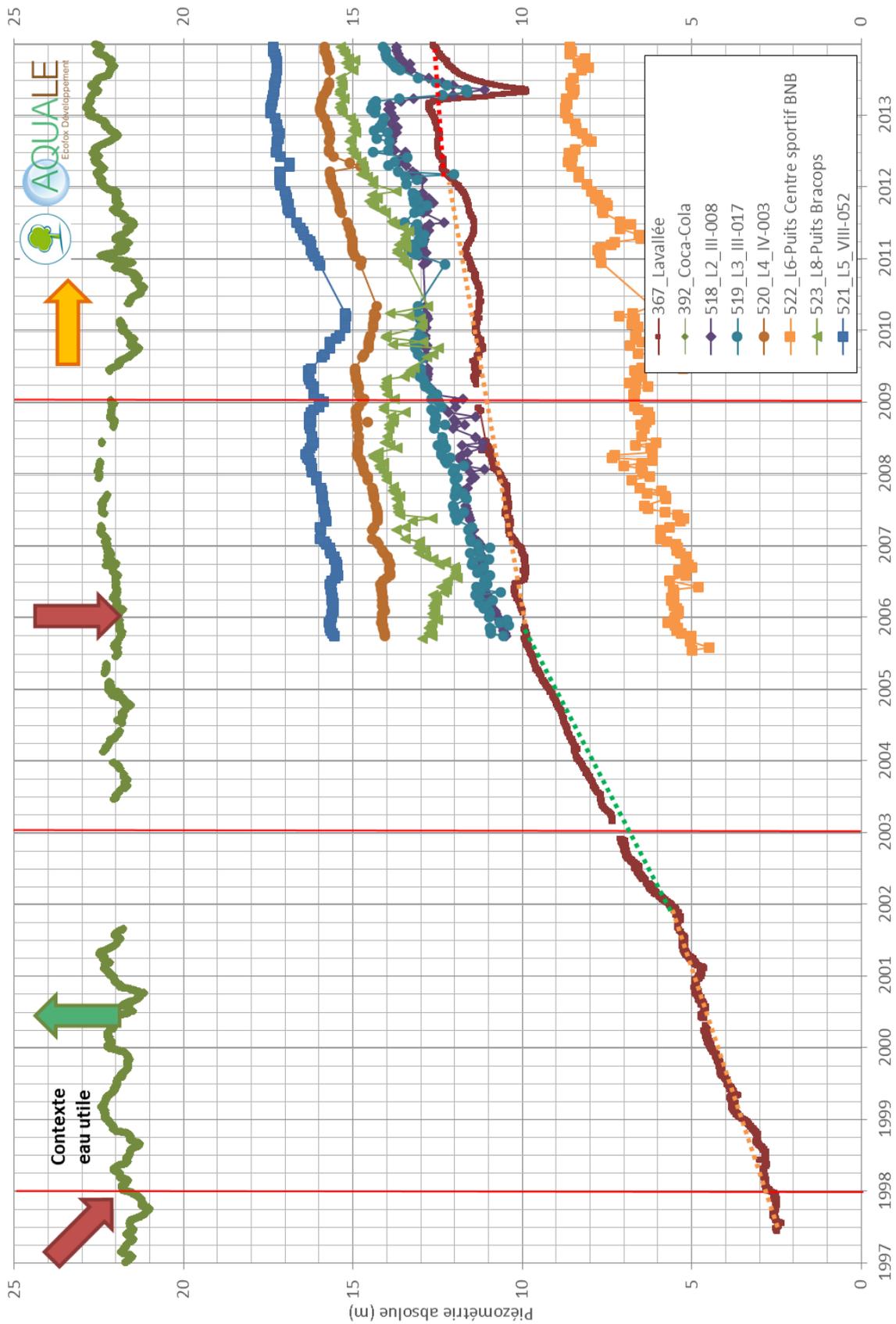


Figure 4-10 : Impact de l'eau utile à long terme sur les piézomètres situés en Région de Bruxelles-Capitale

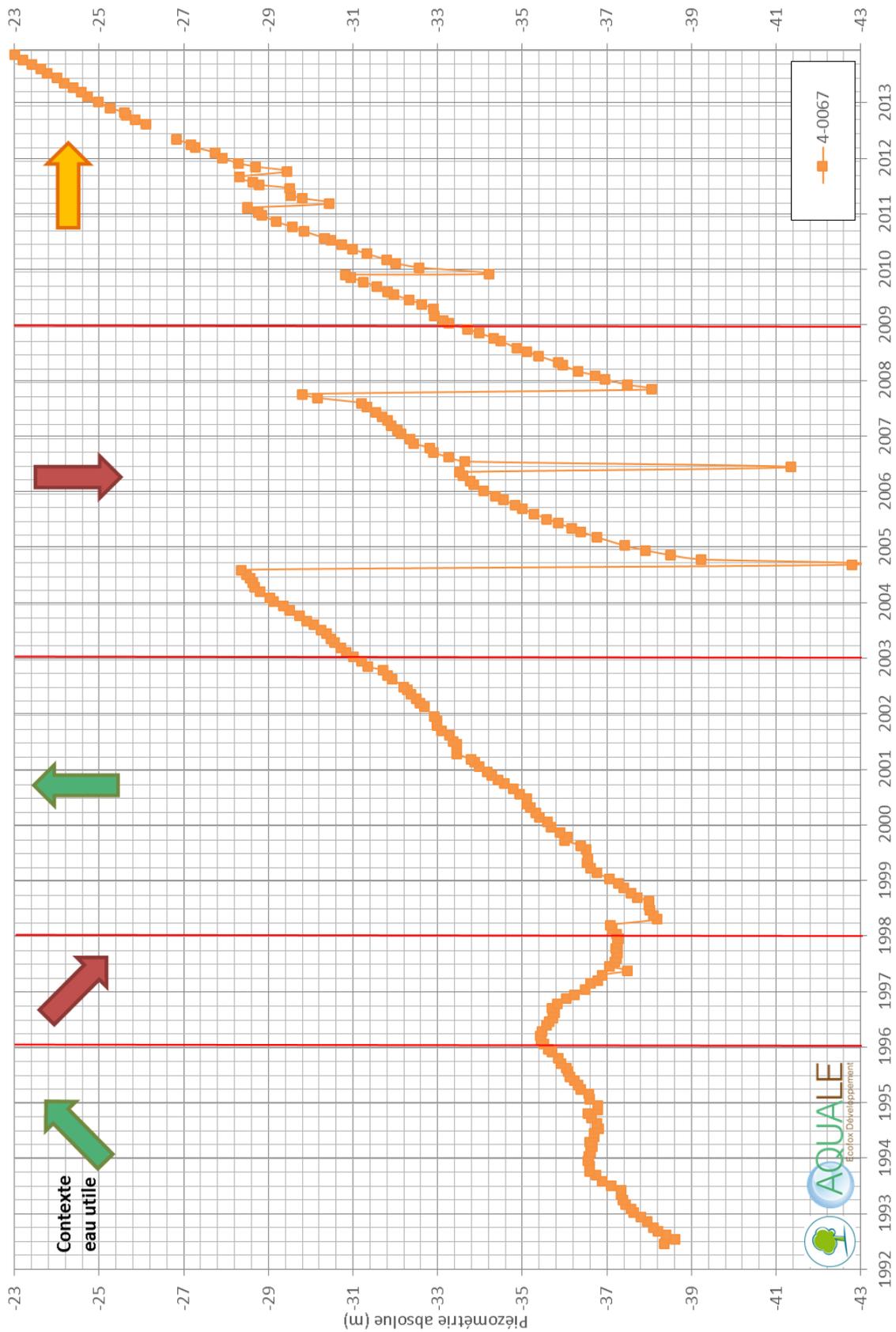


Figure 4-11 : Impact de l'eau utile à long terme sur le piézomètre 4-0067

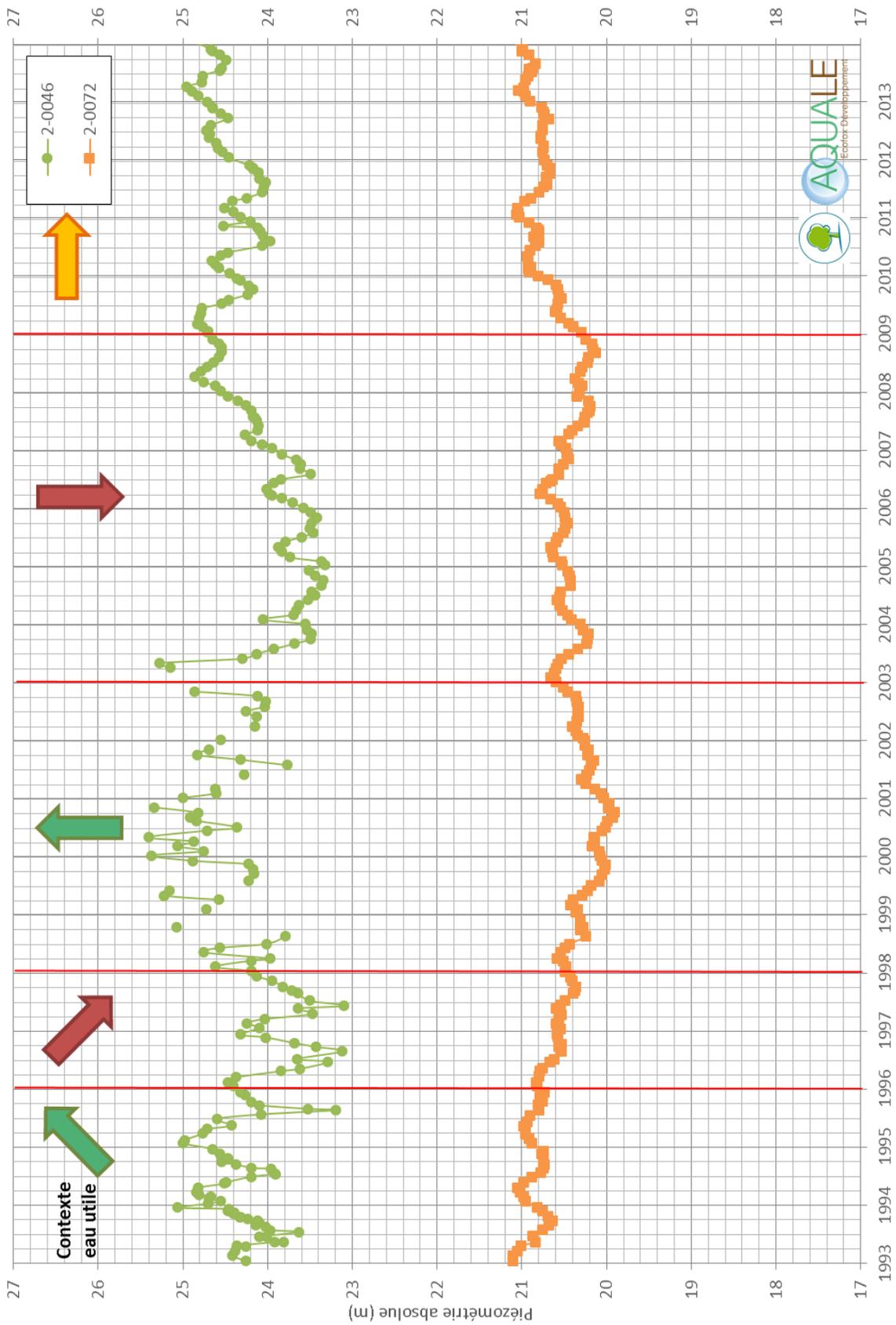


Figure 4-12 : Impact de l'eau utile à long terme sur les piézomètres 2-0046 et 2-0072

4.4.1.3.2.3 Etude du contexte climatique à très long terme

Les FIGURES 4-13 à 4-16 ainsi que les commentaires (*en italique*) qui suivent sont repris du rapport de l'IRM (IRM, septembre 2014¹¹). Elles illustrent l'évolution des précipitations cumulées par saison de 1901 à 2014 à Uccle.

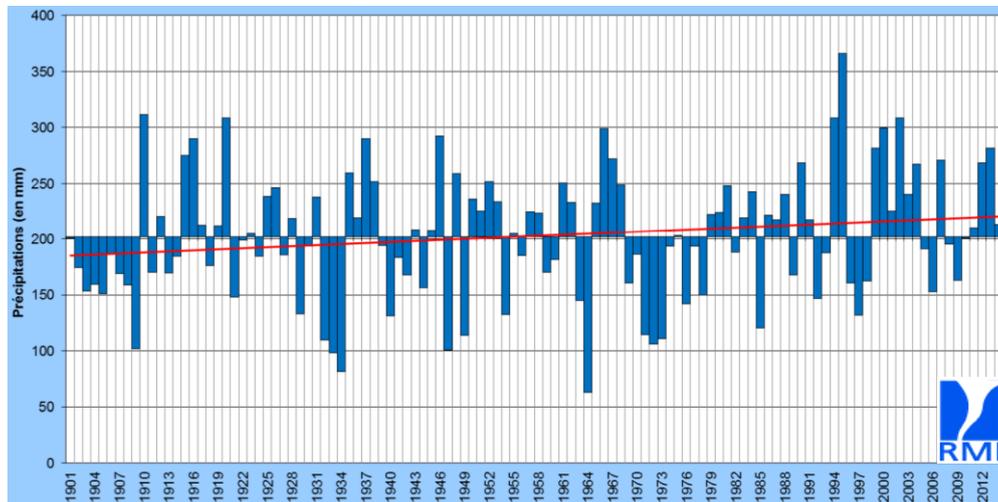


Figure 4-13 : Précipitations hivernales (les trois mois consécutifs de décembre à février) à Uccle sur la période 1901 – 2014 (en mm). L'année reprise sur le graphique est celle de la fin de la période des trois mois consécutifs. Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur 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)

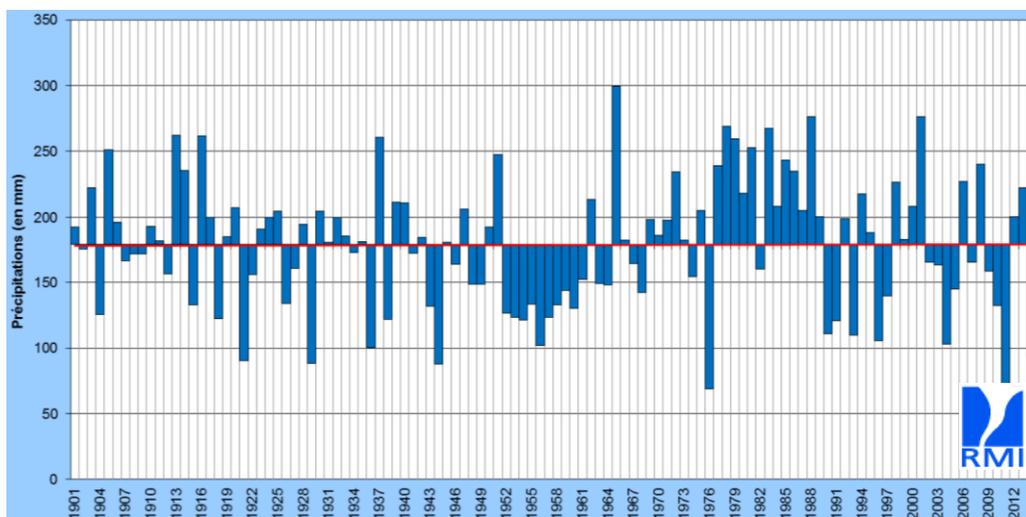


Figure 4-14 : Précipitations printanières (mars – mai) à Uccle sur la période 1901 – 2014 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (178.5 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période (droite quasi horizontale, dans ce cas) (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement)

¹¹ 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)

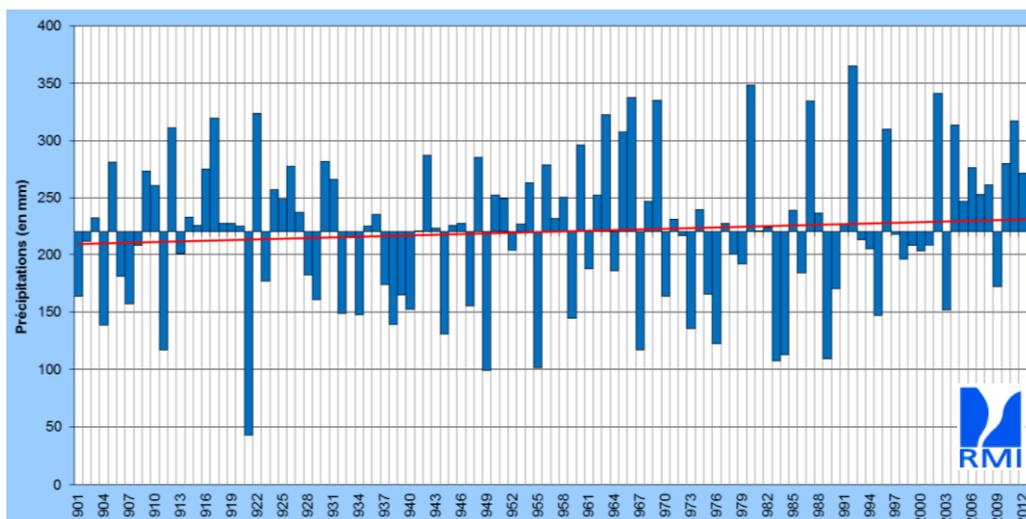


Figure 4-15 : Précipitations estivales (juin – août) à Uccle sur la période 1901 – 2013 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (220.5 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période (Source : IRM, septembre 2014, étude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement)

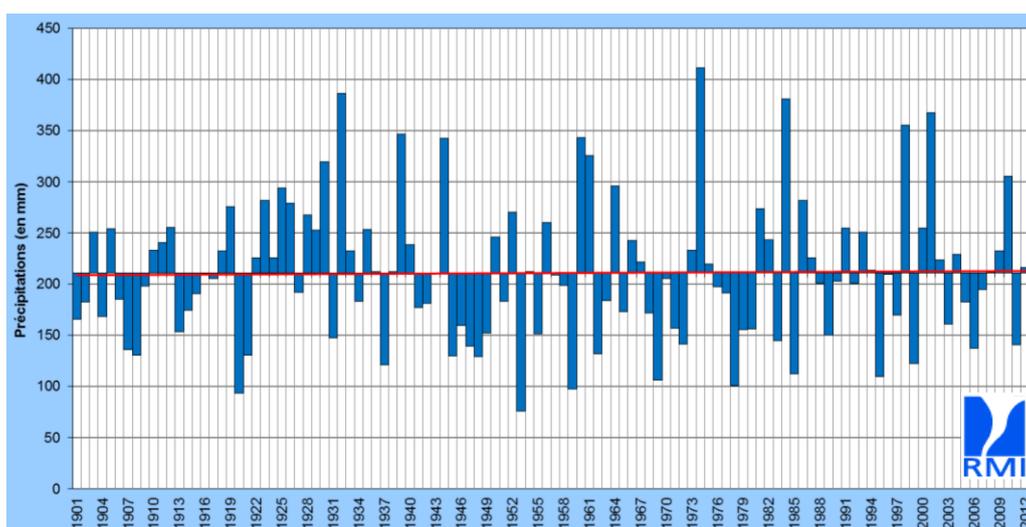


Figure 4-16 : Précipitations automnales (septembre – novembre) à Uccle sur la période 1901 – 2013 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (210.7 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période (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.

4.4.1.3.2.4 Conséquence pour le modèle

La difficulté majeure pour reproduire le comportement de l'aquifère en régime transitoire est de déterminer le (les) élément(s) déclencheur(s) de la remontée progressive importante des niveaux d'eau. La variation de l'infiltration à long terme ne semble pas être la cause de cette évolution compte-tenu des observations faites au chapitre précédent.

L'hypothèse majeure concernant cette remontée considère qu'elle est liée à une diminution progressive des sollicitations par captage depuis le milieu du vingtième siècle. Cette diminution progressive des débits captés associée à des conductivités hydrauliques relativement faibles pour un aquifère pourrait effectivement provoquer une remontée lente des niveaux d'eau. Puisque cette hypothèse n'a pu être documentée, des puits fictifs seront utilisés en régime transitoire pour reproduire la probable sollicitation importante du vingtième siècle par rapport aux sollicitations actuelles. Il convient toutefois de poursuivre les recherches pour pouvoir documenter cette diminution des sollicitations et assez augmenter la robustesse du modèle. Ce travail sera réalisé dans le futur par Bruxelles Environnement dans le cadre de l'amélioration continue du modèle.

Du point de vue de l'infiltration, une variation périodique permettant de reproduire les effets saisonniers est donc imposée au modèle en régime transitoire pour la période 2008 – 2013 (elle débute donc un an avant le début de la période de calibration définie pour le régime transitoire afin de s'assurer que les variations d'infiltration de l'année 2008 entraînent bien les effets saisonniers observés sur la piézométrie dès le début de l'année 2009). L'infiltration imposée en régime transitoire varie entre 110 % (en janvier) et 95 % (en mai) de l'infiltration imposée en régime permanent. Elle varie saisonnièrement de façon identique pour les années 2008 à 2013. Cette variation est assez faible en comparaison avec la variation d'eau utile obtenue à partir des bilans de Thornthwaite. Cela est lié à une série d'effets tampons qui provoquent un lissage important de l'infiltration. En particulier, il est important de rappeler que l'infiltration imposée reprend également les apports d'eau depuis les aquifères sous-jacents (Crétacé et Socle Paléozoïque) et que ces apports sont probablement fortement lissés vu qu'ils résultent d'un parcours sous-terrain déjà importants au sein des autres aquifères susmentionnés.

4.4.1.3.3 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 aux contributions des écoulements venant du Socle.

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.

4.4.1.4 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 au centre ;
- de la Dyle à l'Est ;
- de la Dendre à l'Ouest.

Les tronçons jugés en équilibre avec la *nappe du Landénien* sont rares. Ils se trouvent tous dans la partie Sud du modèle hydrogéologique, là où l'aquifère est peu profond ou affleurant.

Il s'agit donc de quelques tronçons de la Senne, de la Dyle et de la Dendre et de l'un ou l'autre de leurs affluents, cantonnés à la partie extrême Sud du modèle. Ils 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 (données issues de la couche topographique SRTM). 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.

La **FIGURE 4-17** ci-dessous illustre la prise en considération des cours d'eau internes au modèle. Comme expliqué ci-avant, il s'agit uniquement de quelques tronçons dans la partie Sud du modèle hydrogéologique.

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 m³/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.

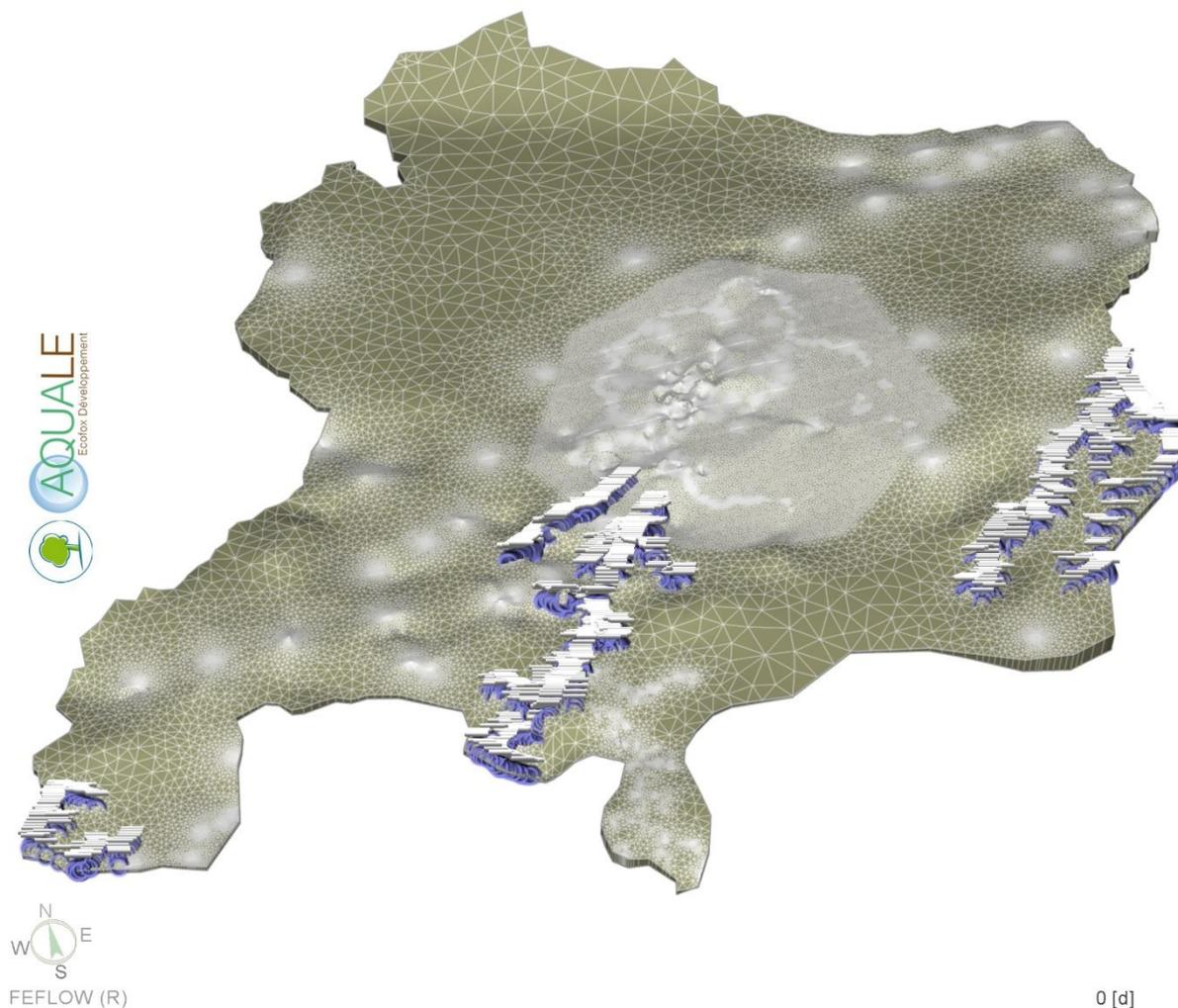


Figure 4-17 : Potentiels imposés sur les ruisseaux / rivières à l'intérieur de la zone modélisée

4.4.2.2 CAPTAGES – CONDITIONS « WELL BC »

Dans la zone modélisée, de nombreux puits de captages sont répertoriés (en particulier dans la partie Nord-Ouest de la Région de Bruxelles-Capitale).

4.4.2.2.1 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) ;
- En Région Flamande :
 - o les débits déclarés en 2013 (données fournies par la VMM) ;
 - o à défaut, les débits autorisés en 2013 (données fournies par la VMM) ;

- En Région Wallonne : les débits déclarés en 2013 (données issues de la base de données Dix-Sous).

Pour les puits situés en Flandre, lorsque le débit déclaré n'est pas connu, le débit imposé au sein du modèle est 75 % du débit autorisé.

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

Les débits pris en compte sont repris dans le **TABLEAU 4-2** et illustrés sur la **FIGURE 4-18** ci-dessous. La nature des données disponibles y est également spécifiée.

Ouvrage	X [m]	Y [m]	Débit imposé [m ³ /j]	Source et nature de la donnée
UCL Services Tec. 3	156407	171192	125.05	IBGE / débit annuel déclaré 2013
capt_4413	142888	169447	8.90	
Puits Godiva capt_5227	147256	172600	13.60	
capt_5248	147703	173116	5.89	
capt_5254	146993	173761	2.41	
capt_5261	147239	172171	2.16	
capt_5262	147835	175975	6.89	
capt_5264	148322	168985	2.96	
capt_5268	149887	172744	1.24	
capt_5280	151750	171229	6.59	
capt_5281	150337	171428	6.59	
capt_5298	153280	172128	2.64	
522_L6	145390	172676	0.08	
capt_5326	148310	169494	5.26	
capt_5330	144215	169945	10.73	
capt_5332	148926	170362	3.24	
capt_5339	146180	165552	6.14	
capt_5341	149978	169501	5.68	
capt_5342	151185	169064	6.37	
capt_5344	146557	171932	7.32	
capt_5354	145540	169320	3.29	
capt_5355	145961	169873	3.47	
capt_5356	144280	168580	2.10	
capt_5393	149717	167442	3.05	
capt_5409	146112	166430	3.54	
capt_5419_P1	146137	166142	8.97	
capt_5419_P2	146165	166101	8.97	
capt_5422	146979	169102	1.59	
capt_5423_1	145683	172653	12.24	
capt_5423_2	145725	172670	12.24	
Royal Uccle Sports	146327	165318	2.53	

Ouvrage	X [m]	Y [m]	Débit imposé [m ³ /j]	Source et nature de la donnée
capt_5428	144525	173623	1.82	IBGE / débit annuel déclaré 2013
Lavoir Helmet	151127	173514	16.50	
capt_5466	148282	173347	0.36	
capt_5249	144905	168090	3.89	
capt_5412	151082	176018	1.35	
capt_5426	146115	169459	88.38	
Lavoir Anderlecht_2	146336	169644	20.88	
OVL-5850	117770	160021	4.1	VMM / débit annuel autorisé 2013 (x 75 %)
OVL-83891	119145	159229	2.3	
VLB-2/3174	129142	164719	2.2	
Z2000884	129492	173367	28.8	
VLB-2/3031	130908	156886	4.3	
VLB-2/2867	131053	169139	1.5	
K2/08/115	133114	164555	4.1	
VLB 2/2920	133336	156976	3.3	
VLB-gw1-2321	134979	162009	4.1	
VLB-1/3102	136003	173891	1.0	
1077a	136645	159630	6.6	
1093	136834	159519	5.1	
1567	137326	169345	2.8	
895	138030	159357	4.1	
2174	138631	160389	2.4	
VLB-2/2845	138705	168089	2.7	
1699	140609	163869	18.5	
VLB-gw1-2373	140669	161588	9.8	
1254	141241	167365	49.3	
VLB-1/2864	141651	177254	4.4	
VLB-kl2/2210	141922	163158	10.3	
VLB-1/2739	142671	161176	2.5	
1597	145068	161428	2.3	
VLB-2/3151	153048	180604	13.9	
VLB-1/3194	153096	177566	41.6	
1376	160730	182021	4.1	
1446	164425	185625	205.5	
VLB-2/2915	165926	167923	1.9	
VLB-2/3152	166645	181985	2.8	
Z2001013	168261	184749	2.1	
1308	170569	182051	7.2	
VLB-1/3119	170996	184554	8.5	
VLB-2/3112	171268	184987	3.4	

Ouvrage	X [m]	Y [m]	Débit imposé [m ³ /j]	Source et nature de la donnée
VLB-2/5157	141427	169934	0.1	VMM / débit annuel déclaré 2013
VLB-1/3109a	158300	162150	710.1	
VLB-1/2692	166856	183923	37.0	
VLB-kl1/3496	171762	179895	450.9	
38/3/8/001	118590	148840	22.99	RW / débit annuel déclaré 2013

Tableau 4-2 : Débits de pompage imposés dans la *nappe du Landénien* en régime permanent

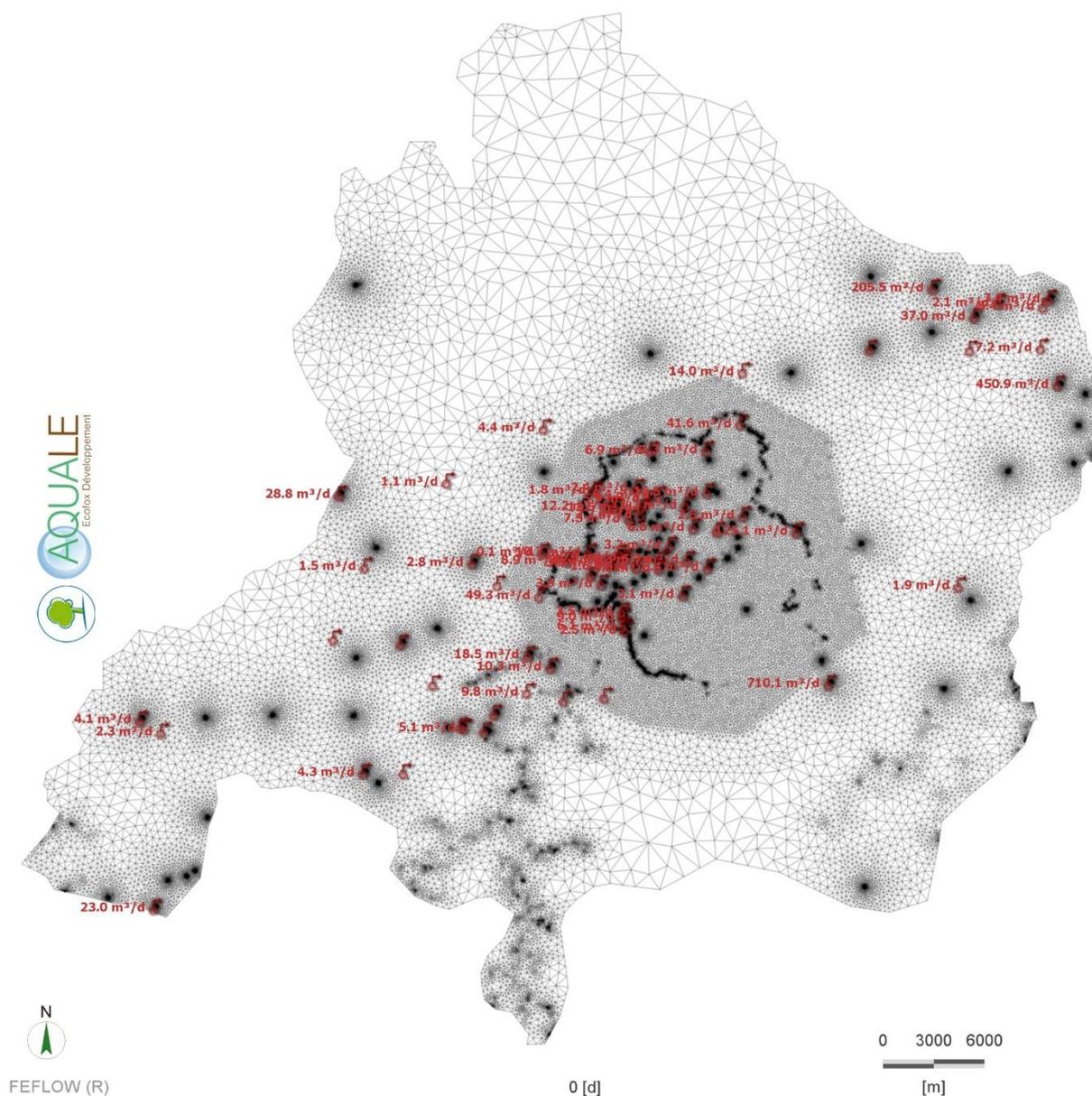


Figure 4-18 : Débits de pompage imposés dans la *nappe du Landénien* en régime permanent

Il apparaît dans le **TABLEAU 4-2** que sur les 76 ouvrages de captage dans la zone étudiée au sein de la *nappe du Landénien*, 38 sont situés en Région de Bruxelles-Capitale, 37 sont situés en Région Flamande et 1 en Région Wallonne.

Le débit total de prélèvement calculé dans la zone étudiée au sein de la *nappe du Landénien* est de 2 113 m³/j dont :

- 425 m³/j en Région de Bruxelles-Capitale ;
- 1 665 m³/j en Région Flamande ;
- 23 m³/j en Région Wallonne.

La majorité des ouvrages au sein de la zone étudiée se trouve en Région de Bruxelles-Capitale mais les débits de ceux-ci sont assez faibles comparés aux prélèvements en activité en Flandre dans cette zone. 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.

4.4.2.2.2 EN RÉGIME TRANSITOIRE

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

En Région Flamande, la problématique est la même que pour le régime permanent. Certains débits imposés au modèle représentent donc un pourcentage (75 %) du débit autorisé, à défaut de connaître le débit déclaré.

En Région Wallonne, les débits déclarés annuellement pour la période 2009 – 2013 sont disponibles via la base de données Dix-Sous.

Le **TABLEAU 4-3** reprend 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**, 75 % des débits annuels autorisés.

Ouvrage	Débit imposé [m ³ /j]				
	2009	2010	2011	2012	2013
38/3/9/011	7.9	7.7	7.9	8.0	0.0
38/3/8/002	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38/3/8/001	22.2	21.8	12.0	28.2	23.0
522_L6	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1
capt_4413	1.9	6.7	11.4	8.9	8.9
capt_5209	0.0	1.9	4.5	5.9	0.0
capt_5215	3.2	3.1	3.1	2.9	0.0
capt_5223	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
capt_5224	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0
capt_5238	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
capt_5245	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0

Ouvrage	Débit imposé [m ³ /j]				
	2009	2010	2011	2012	2013
capt_5246	6.7	5.3	4.0	4.4	0.0
capt_5248	5.5	5.8	6.3	6.6	5.9
capt_5249	3.3	2.7	3.7	4.2	3.9
capt_5250	4.1	0.3	0.0	0.0	0.0
capt_5254	2.9	2.8	2.8	2.5	2.4
capt_5257	6.8	6.8	6.8	6.3	0.0
capt_5261	3.7	2.3	2.6	2.7	2.2
capt_5262	21.1	20.8	0.0	6.4	6.9
capt_5264	3.4	3.3	3.2	3.2	3.0
capt_5268	2.7	1.6	1.5	1.3	1.2
capt_5270	8.1	7.4	7.6	6.9	0.0
capt_5273	4.0	2.5	2.7	2.4	0.0
capt_5280	4.9	4.6	4.2	4.0	6.6
capt_5281	6.8	6.0	5.1	4.0	6.6
capt_5283	1.7	1.8	1.8	1.6	0.0
capt_5284	2.4	2.3	2.2	2.1	0.0
capt_5286	1.5	1.6	1.7	1.6	0.0
capt_5287	3.2	2.8	1.6	2.1	0.0
capt_5290	6.1	6.1	5.8	5.6	0.0
capt_5293	2.4	1.1	0.0	0.0	0.0
capt_5298	2.5	2.9	3.1	2.8	2.6
capt_5300	6.5	5.9	5.2	4.1	0.0
capt_5301	3.6	3.4	2.3	2.5	0.0
capt_5325	4.9	4.5	3.9	3.8	0.0
capt_5326	5.4	6.1	5.7	5.8	5.3
capt_5330	8.3	15.0	14.6	15.8	10.7
capt_5332	4.1	4.0	3.4	3.0	3.2
capt_5339	6.6	8.2	6.9	5.3	6.1
capt_5341	5.7	7.2	6.0	6.4	5.7
capt_5342	7.8	6.9	6.6	7.3	6.4
capt_5344	12.5	9.9	6.7	6.4	7.3
capt_5345	4.7	4.7	4.7	1.6	0.0
capt_5346	3.4	1.7	3.2	5.8	0.0
capt_5354	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
capt_5355	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
capt_5356	4.4	6.5	7.8	7.2	2.1
capt_5374	113.1	84.0	89.4	90.6	0.0
capt_5385	5.0	5.5	6.6	6.2	0.0

Ouvrage	Débit imposé [m³/j]				
	2009	2010	2011	2012	2013
capt_5393	4.5	8.0	4.8	4.4	3.1
capt_5409	3.2	4.3	3.1	3.0	3.5
capt_5412	2.6	2.0	2.2	0.0	1.3
capt_5419_P1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.0
capt_5419_P2	9.2	9.3	9.4	9.5	9.0
capt_5422	4.6	4.0	3.7	2.5	1.6
capt_5423_1	12.4	12.6	13.7	13.4	12.2
capt_5423_2	12.4	12.6	13.7	13.4	12.2
capt_5426	26.2	24.6	20.9	32.5	88.4
capt_5428	4.6	5.7	2.8	2.5	1.8
capt_5466	0.0	0.0	0.3	3.0	0.4
capt_5467	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
capt_5485	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lavoir Anderlecht_2	0.0	25.2	22.1	21.0	20.9
Lavoir Carsen	3.3	2.3	1.4	0.0	0.0
Lavoir Helmet	4.0	14.6	16.3	16.0	16.5
Puits Godiva (capt_5227)	5.6	27.9	19.3	18.6	13.6
Royal Uccle Sports	1.4	1.4	2.8	2.4	2.5
Smet Boring	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
UCL Services Tec. 3	206.5	173.1	210.7	166.8	125.1
Z2001013	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Z2000884	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8
OVL-5850	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
1254	49.3	49.3	49.3	49.3	49.3
1093	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
1308	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
895	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
1376	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
1446	205.5	205.5	205.5	205.5	205.5
1567	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
1597	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
1699	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5
1077a	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
2174	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
K2/08/115	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
VLB-kl2/2210	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3
VLB-gw1-2321	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
VLB-gw1-2373	6.5	9.8	9.8	9.8	9.8
VLB-2/5157	0	0.1	0.1	0.1	0.1

Ouvrage	Débit imposé [m ³ /j]				
	2009	2010	2011	2012	2013
VLB-1/2692	38.9	44.5	50.8	38.5	37.0
VLB-1/2739	0	0	1.8	2.5	2.5
VLB-2/2845	0	0	0.9	2.7	2.7
VLB-2/2867	0	0	0.4	1.5	1.5
VLB-1/2864	0	0	0.7	4.4	4.4
VLB-2/2915	0	0	0.3	1.9	1.9
VLB 2/2920	0	0	0	3.3	3.3
VLB-2/3031	0	0	0	2.2	4.3
VLB-1/3109a	915.0	0	0	0	710.1
VLB-1/3102	0	0	0	0.0	1.0
VLB-2/3112	0	0	0	0.0	3.4
VLB-2/3152	0	0	0	0	2.8
VLB-2/3174	0	0	0	0	2.2
VLB-2/3151	0	0	0	0	13.9
VLB-1/3119	0	0	0	0	8.5
OVL-83891	0	0	0	0	2.3
VLB-1/3194	0	0	0	0	41.6
VLB-kl1/3496	278.9	407.8	514.0	605.8	450.9
TOTAL	4 591	3 150	3 826	2 994	2 696

Tableau 4-3 : Débits de pompage imposés dans la *nappe du Landénien* en régime transitoire

Pour la reproduction de la remontée piézométrique à long terme, cinq puits fictifs ont été placés dans la partie Ouest du modèle. La localisation et le débit des puits est le résultat du processus de calibration. L'historique de pompage imposé dans chaque puits est le suivant :

- du 1^{er} janvier 1970 au 1^{er} janvier 1987 : débit constant de 1 800 m³/j ;
- du 1^{er} janvier 1987 au 1^{er} janvier 2002 : débit diminuant linéairement de 1 800 m³/j à 0 m³/j ;
- après le 1^{er} janvier 2002 : puits arrêtés.

La **FIGURE 4-19** ci-dessous donne la localisation des 5 puits fictifs.

Entre 1970 et 2008, les débits des autres puits sont considérés comme étant constants et identiques aux débits renseignés en 2009.

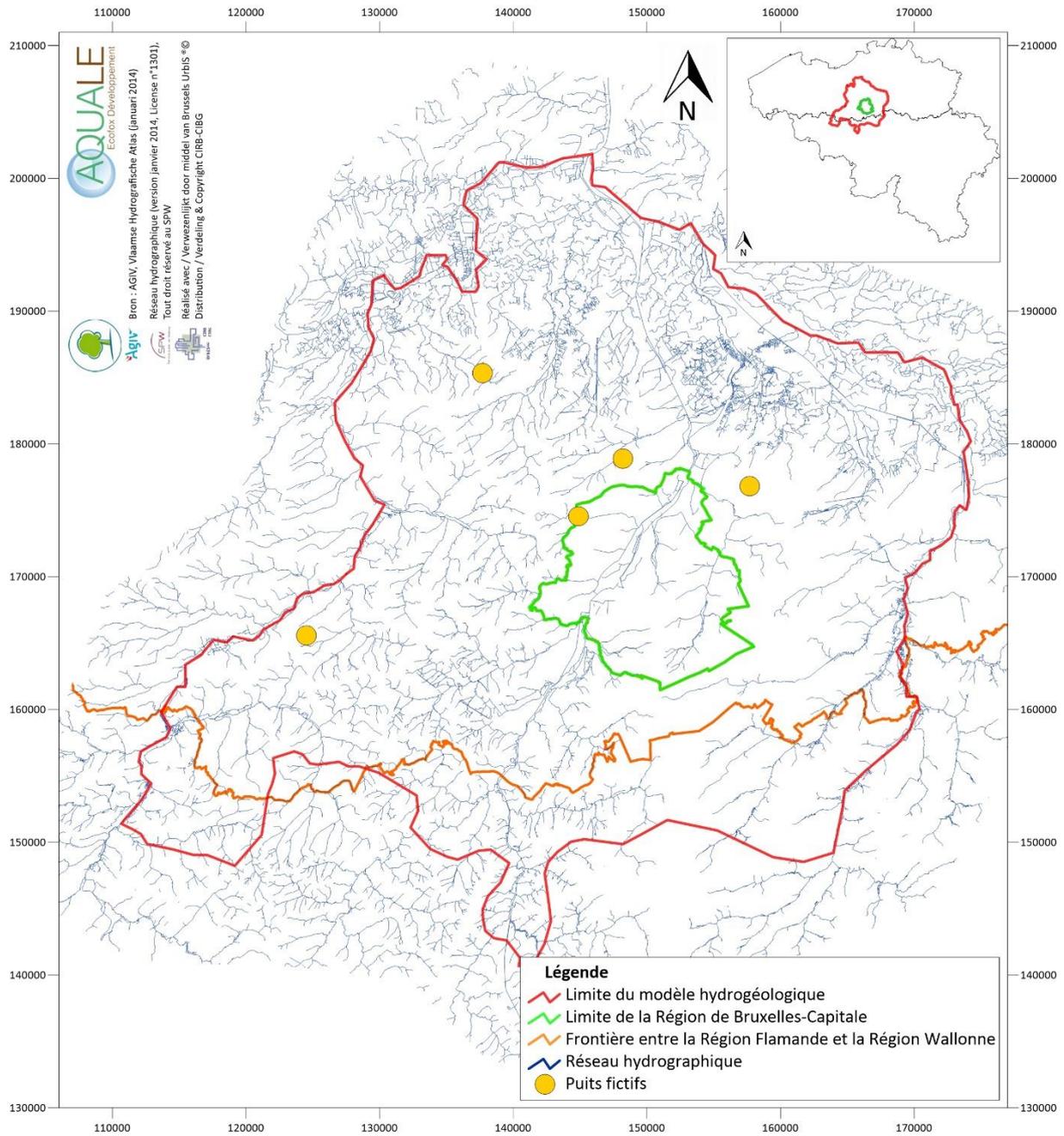


Figure 4-19 : Localisation des puits fictifs utilisés pour reproduire la remontée piézométrique observée à très long terme

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 de la formation géologique concernée 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 (2008 – 2013) ;
- un champ de débit prélevé variable dans le temps (1970 – 2002 pour les puits fictifs, constant pour les puits historiques de 1970 à 2008 puis variant annuellement de 2009 à 2013) ;
- un champ de porosité efficace unique puisque les propriétés intrinsèques de la formation géologique concernée n'évoluent pas ;
- un champ de coefficient d'emménagement unique puisque les propriétés intrinsèques de la formation géologique concernée n'évoluent pas.

Le modèle en régime transitoire couvre la période allant de janvier 1970 à décembre 2013 inclus. Le pas de temps utilisé pour la calibration en régime transitoire sur la période 2009 à 2013 est d'un mois.

5.1 ETAPE #5 - DÉFINITION DES POINTS D'OBSERVATION

Les points d'observation 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 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

Le **TABLEAU 5-1** ci-après présente les points d'observation pris en compte pour la calibration de la piézométrie de mai – juin 2013 et de novembre 2013. Il reprend leurs coordonnées de même que la piézométrie de référence pour cette période. Les points d'observation sont par ailleurs également présentés à l'aide de petits drapeaux à la **FIGURE 5-1**.

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 les piézomètres Lavallée, III-008 et III-017, les niveaux d'eau de référence sont pris à un autre moment car ces ouvrages sont impactés par un pompage (il s'agit en réalité des essais de pompage réalisés sur l'installation géothermique du bâtiment de Bruxelles Environnement) entre début mars 2013 et février 2014. Au vu de l'évolution piézométrique mesurée dans les autres ouvrages, jugée très stable, la piézométrie de référence retenue pour ces trois piézomètres est celle mesurée juste avant le pompage (fin février 2013), et ce, pour les deux périodes de calibration en régime permanent.

L'erreur acceptable sur la piézométrie dépend de la proximité du piézomètre observé par rapport à la zone d'intérêt (Région de Bruxelles-Capitale). Ainsi, les erreurs acceptables seront de 2.5 m et légèrement plus pour les points éloignés de la zone d'intérêt.

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 précision (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]
2-0046	135108	165364	24.77	24.65
2-0072	168699	174665	20.94	21
2-0415	131650	156174	53.19	52.49
2-0417b	141379	174618	7.18	7.46
2-0418b	147660	181650	-1.3	-0.94
2-0419b	155955	180524	11.08	11.2
2-0420b	160113	170398	37.46	37.5
2-0424b	160639	186224	9.13	9.08
2-0426	135773	159470	45.32	44.66
2-0428	121594	154145	47.55	47.11
2-0430	166516	167019	37.75	37.81
2-0431	157749	163462	73.12	73.15
2-0432b	131538	170127	0.77	0.79
2-0433	125436	160215	31.97	31.55
2-0777	171911	172554	25.37	25.33
4-0067	130325	185708	-24.09	-23
710/71/3	164952	161769	55.23	55.27
Coca-Cola Landénien	144562	166932	22.61	22.48
III-008	150137	173266	13.93	13.93
III-017	149848	172723	14.42	14.42
IV-003	147983	169968	15.75	15.81
Lavallée	148151	172034	12.72	12.72
Puits Bracops	144684	169301	15.35	15.26
Puits Centre sportif BNB	145390	172676	8.52	8.57
VIII-052	147939	169430	17.32	17.32

Tableau 5-1 : Points d'observation dans la nappe du Landénien

La variation piézométrique entre les deux périodes de référence est assez variable.

Pour les piézomètres 2-0426, 2-0415, 2-0433 et 2-0428, tous situés dans la partie Sud-Ouest du modèle, il y a une diminution de piézométrie comprise entre 0.20 et 0.70 m. Il s'agit des piézomètres pour lesquels la variation saisonnière est élevée.

A l'inverse, pour le piézomètre 4-0067, il y a une augmentation de piézométrie comprise entre 1.00 et 2.00 m. L'évolution observée dans le piézomètre 4-0067 est cependant jugée peu fiable (FIGURE 4-11).

Il y a également deux piézomètres (2-0417b et 2-0418b) au sein desquels l'augmentation de piézométrie mesurée est comprise entre 0.2 et 0.4 m (ces piézomètres sont caractérisés par une remontée continue du niveau sur la période 2009 – 2013).

Pour les autres, soit 18 des 25 piézomètres suivis, la variation est très faible (comprise entre -0.15 et +0.15 m).

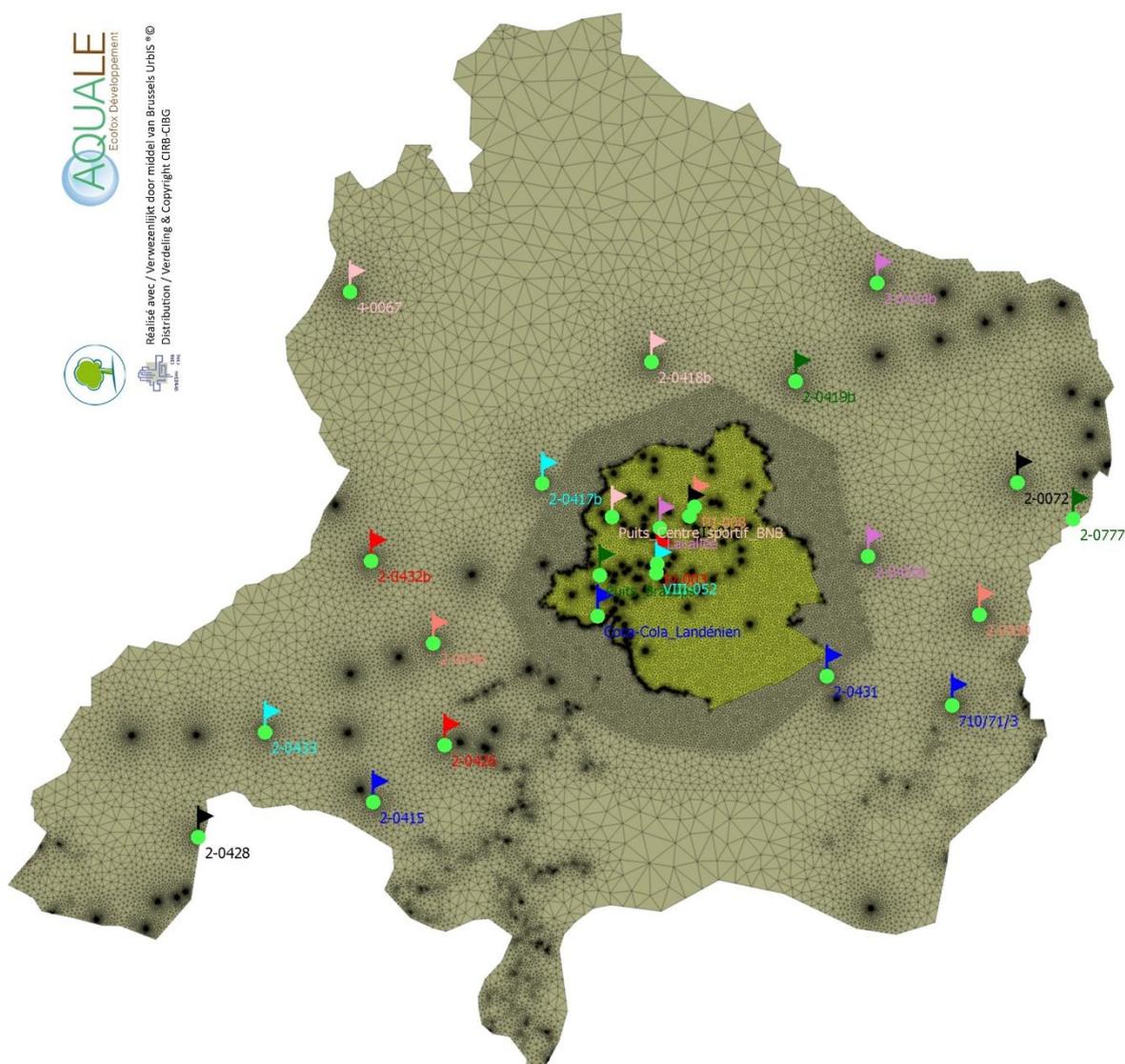


Figure 5-1 : Points d'observation dans la nappe du Landénien pour les deux périodes calibrées en régime permanent

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.

5.1.1.2 EN RÉGIME TRANSITOIRE

Pour le régime transitoire, tous les points d'observations définis en régime permanent sont conservés. Après simulations sur la période allant de 1970 à 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 3-8 à 3-16**). La comparaison est réalisée en particulier sur les années 2009 à 2013 puisque c'est durant cette période que l'ensemble des piézomètres ont été suivis (alors qu'entre 1970 et 2008, l'évaluation de l'état de calibration est réalisée uniquement sur la base du piézomètre Lavallée, jugé comme référence). 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 :

- 2-0046 ;
- 2-0072 ;
- 2-0415 ;
- 2-0417b ;
- 2-0418b ;
- 2-0419b ;
- 2-0420b ;
- 2-0424b ;
- 2-0426 ;
- 2-0428 ;
- 2-0430 ;
- 2-0431 ;
- 2-0432b ;
- 2-0433 ;
- 2-0777 ;
- Coca-Cola Landénien ;
- III-008 ;
- III-017 ;
- IV-003 ;
- Lavallée ;
- Puits Bracops ;
- Puits Centre sportif BNB ;
- VIII-052.

5.1.2 OBSERVATION DES DÉBITS

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

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

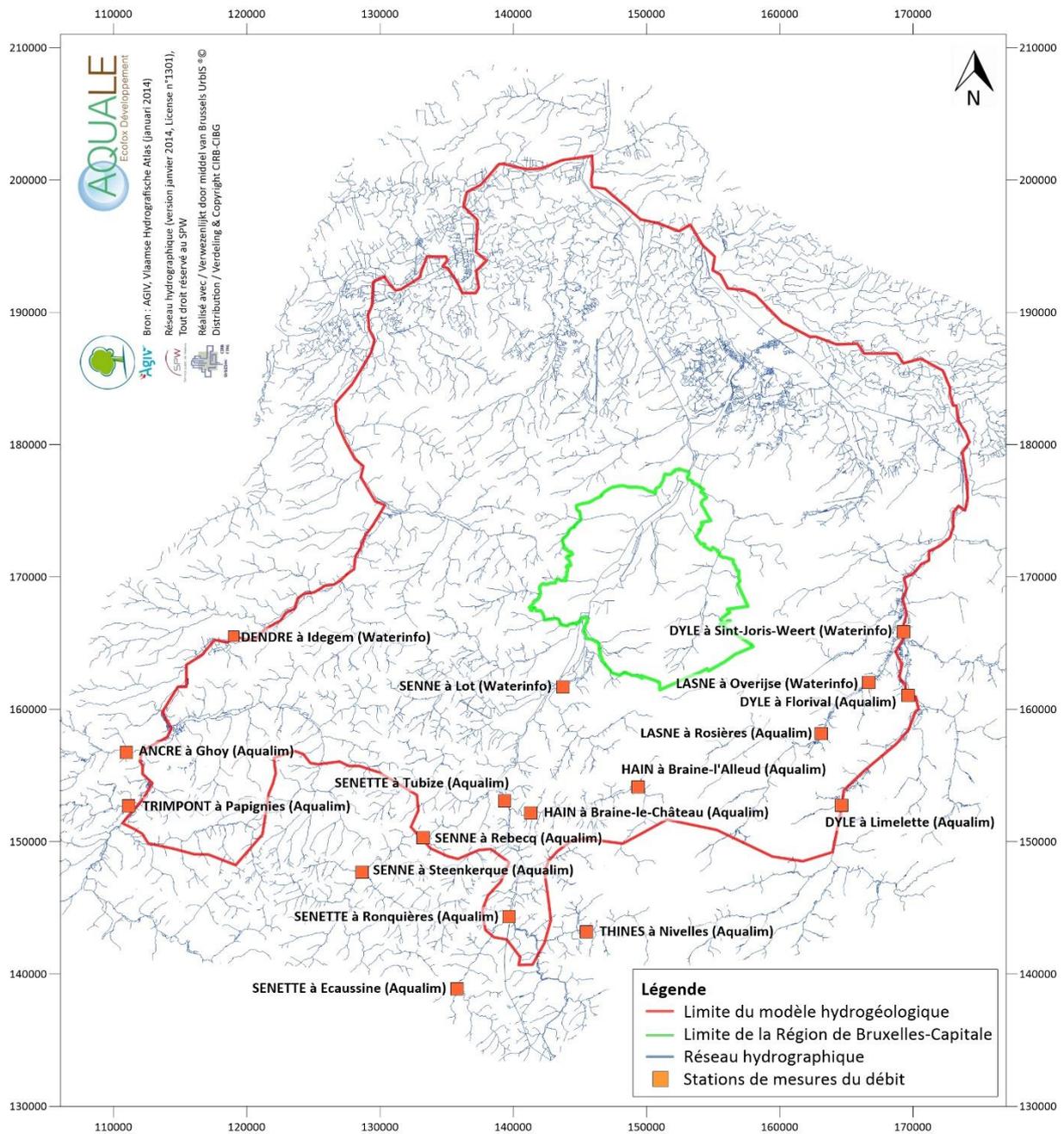
Pour déterminer le débit de drainage des rivières, il est nécessaire de réaliser des bilans sur ces différentes rivières. Pour cela, les données de l'ensemble des stations de jaugeage des rivières concernées ont été étudiées.

Dans la présente étude, les seuls tronçons de rivières susceptibles de drainer l'aquifère étudié sont situés dans la partie Sud du modèle hydrogéologique. Seules les données des stations permettant de réaliser les bilans sur les tronçons concernés sont retenues dans la suite du chapitre. Le Canal Charleroi-Bruxelles est jugé non drainant compte-tenu de ses parois étanches.

La **FIGURE 5-2** 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 ou Waterinfo).



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.

5.1.2.1 CONTEXTE GÉOLOGIQUE DES VALLÉES EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE ET ALENTOURS

Les dépôts Quaternaires présents en Région de Bruxelles-Capitale et alentours 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.

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

Les sables et graviers alluviaux sont présents en bandes continues sous les argiles et limons alluviaux et peuvent atteindre des épaisseurs de 10 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 5-3** ci-dessous illustre le contexte décrit ci-dessus en vallée de la Senne.

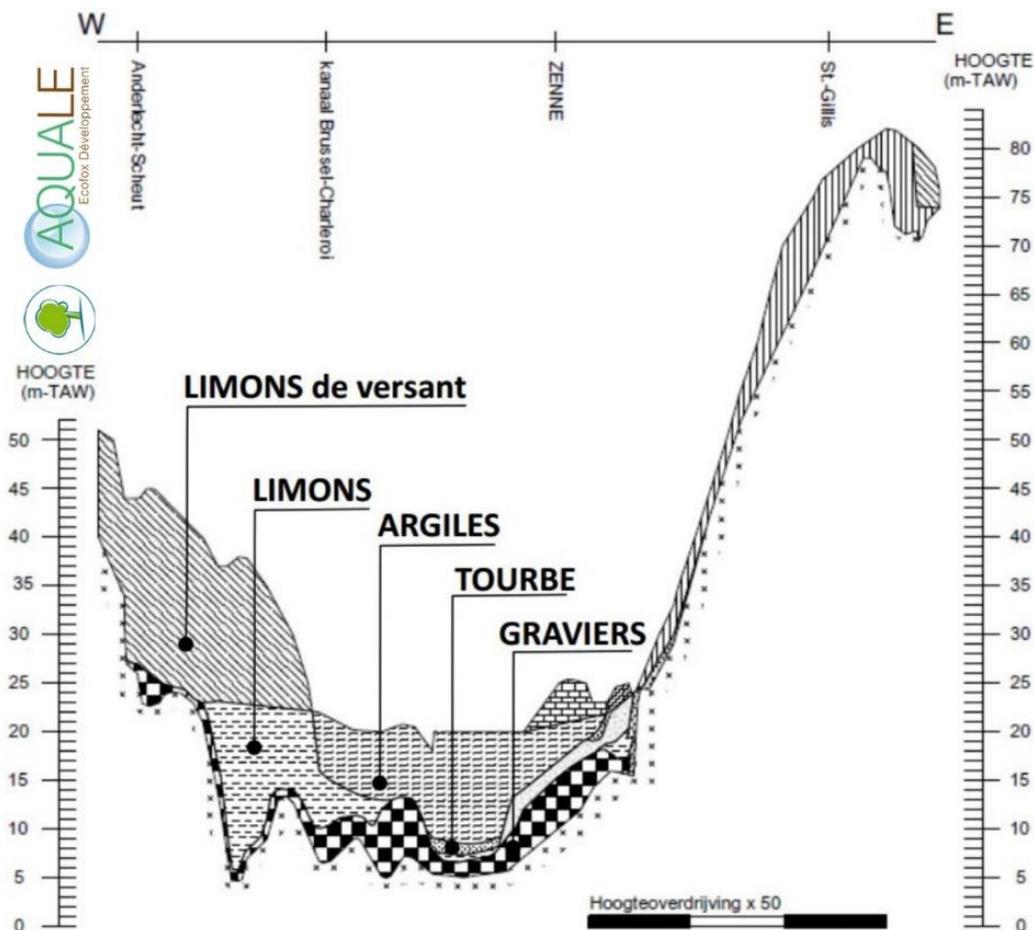


Figure 5-3 : Coupe géologique des dépôts du Quaternaire en vallée de la Senne (ULB, 2013)

Compte tenu de la nature de ces alluvions, il est à ce stade considéré que le drainage des eaux souterraines par le réseau hydrographique doit être assez limité (là où il existe). 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.

5.1.2.2 EN RÉGIME PERMANENT

5.1.2.2.1 BILAN DANS LA VALLÉE DE LA SENNE

Les tronçons de rivières susceptibles de drainer l'aquifère étudié sont compris entre les stations suivantes :

- Senette : depuis la station de Ronquières jusqu'à la station de Tubize ;
- Senne : depuis la station de Rebecq jusqu'à la station de Lot.

La période étudiée pour réaliser les bilans va de mars 2015 à mars 2016, soit une année complète. Cette période est retenue car c'est celle qui est caractérisée par le plus de mesures.

Les débits moyens mesurés aux stations concernées sont les suivants :

- Senette à Ronquières : 0.54 m³/s ;
- Senette à Tubize : 0.52 m³/s ;
- Senne à Rebecq : 1.31 m³/s ;
- Senne à Lot : 3.64 m³/s.

Il apparaît dès lors qu'il n'y a pas de drainage sur le tronçon de Senette vu que le débit moyen annuel est constant voire en diminution.

La mesure de débit de la Senne à Lot reprend les contributions de la Senne et de la Senette. En comparant la mesure de Lot au cumul des mesures de Tubize et Rebecq, il apparaît que le tronçon de Senne situé entre Rebecq et Lot est caractérisé par une augmentation de débit d'environ 1.80 m³/s ou environ 156 000 m³/j. En supposant que le débit drainé de l'aquifère ne peut dépasser 20 %¹² de cette augmentation mesurée, il est considéré que le débit drainé de l'aquifère étudié devrait être inférieur à 31 000 m³/j sur le tronçon de Senne entre Rebecq et Lot.

Il est important de garder à l'esprit que 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.

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).

5.1.2.2 BILAN DANS LA VALLÉE DE LA DYLE

Les tronçons de rivières susceptibles de drainer l'aquifère étudié sont compris entre les stations suivantes :

- Lasne : en amont de la station de Rosières et jusqu'à l'embouchure avec la Dyle près de Sint-Joris-Weert (entre les deux se situe la station d'Overijse) ;
- Dyle : depuis la station de Limelette jusqu'à la station de Sint-Joris-Weert (entre les deux se situe la station de Florival).

La période étudiée pour réaliser les bilans va de mars 2015 à mars 2016, soit une année complète. Cette période est retenue car c'est celle qui est caractérisée par le plus de mesures.

Les débits moyens mesurés aux stations concernées sont les suivants :

- Lasne à Rosières : 0.78 m³/s ;
- Lasne à Overijse : 1.49 m³/s ;
- Dyle à Limelette : 2.41 m³/s ;
- Dyle à Florival : 4.54 m³/s ;
- Dyle à Sint-Joris-Weert : 4.55 m³/s.

La mesure de débit de la Dyle à Sint-Joris Weert reprend les contributions de la Dyle et de la Lasne. En comparant la mesure de Sint-Joris-Weert au cumul des mesures de Florival et Overijse, il apparaît qu'il n'y a pas d'augmentation de débit. Toutefois, ces tronçons de rivières sont caractérisés par de nombreuses bifurcations

¹² Cette valeur est définie de manière arbitraire pour considérer le potentiel de drainage d'un ruisseau en zone relativement peu urbanisée.

qui peuvent induire une erreur d'interprétation. Il est jugé qu'un faible débit de drainage n'est pas exclu le long de ce tronçon mais que celui-ci doit être très faible par rapport aux mesures de débit réalisées aux stations.

La mesure de débit de la Lasne à Rosières est de $0.78 \text{ m}^3/\text{s}$ ou environ $67\,000 \text{ m}^3/\text{j}$. En amont de cette station, il est jugé que le débit de la rivière provenant du drainage de l'aquifère ne peut pas dépasser 20 % de ce débit. Ainsi, le débit drainé de l'aquifère étudié devrait être inférieur à $13\,000 \text{ m}^3/\text{j}$ sur le tronçon de Lasne en amont de Rosières.

Toujours sur la Lasne, l'augmentation de débit entre les stations de Rosières et Overijse est d'environ $0.71 \text{ m}^3/\text{s}$ ou environ $61\,000 \text{ m}^3/\text{j}$. En supposant que le débit drainé de l'aquifère ne peut dépasser 20 % de cette augmentation mesurée, il est considéré que le débit drainé de l'aquifère étudié devrait être inférieur à $12\,000 \text{ m}^3/\text{j}$ sur le tronçon de Lasne entre Rosières et Overijse.

Enfin, sur la Dyle, l'augmentation de débit entre les stations de Limelette et Florival est d'environ $2.13 \text{ m}^3/\text{s}$ ou environ $184\,000 \text{ m}^3/\text{j}$. En supposant que le débit drainé de l'aquifère ne peut dépasser 20 % de cette augmentation mesurée, il est considéré que le débit drainé de l'aquifère étudié devrait être inférieur à $37\,000 \text{ m}^3/\text{j}$ sur le tronçon de Dyle entre Limelette et Florival.

5.1.2.2.3 BILAN DANS LA VALLÉE DE LA DENDRE

Aucune station de mesure de débit n'est localisée sur le tronçon de la Dendre susceptible de drainer l'aquifère étudié. Seules les stations Aqualim de Papignies (débit du ruisseau de Trimont) et de Ghoy (débit du ruisseau d'Ancre) sont situées à proximité.

Plus en aval, la station Waterinfo d'Idegem mesure le débit de la Dendre. La période étudiée pour réaliser la moyenne va de mars 2015 à mars 2016, soit une année complète. Cette période est retenue car c'est celle qui est caractérisée par le plus de mesures.

Le débit moyen mesuré à la station d'Idegem est de $6.21 \text{ m}^3/\text{s}$ ou $537\,000 \text{ m}^3/\text{j}$.

Au vu du débit important mesuré, il est considéré qu'un drainage potentiel existe mais celui-ci ne peut être estimé dès lors qu'il n'y a pas d'autres stations de mesure. Il sera vérifié que le débit de drainage simulé par le modèle le long du tronçon de Dendre concerné sera d'un ordre de grandeur identique aux autres débits de drainage simulés dans les vallées de la Senne et de la Dyle.

5.1.2.3 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.

5.1.2.3.1 LA VALLÉE DE LA SENNE

L'évolution du débit de la Senne est étudiée entre la station de Lot d'une part, et les stations de Rebecq et Tubize (Senette) d'autre part. L'augmentation moyenne mensuelle du débit de la Senne entre ces stations est illustrée à la **FIGURE 5-4**. Les débits n'ayant pas tous été mesurés durant la période d'intérêt qu'est 2009 – 2013, l'évolution du débit est présentée pour la période 2015 – 2016.

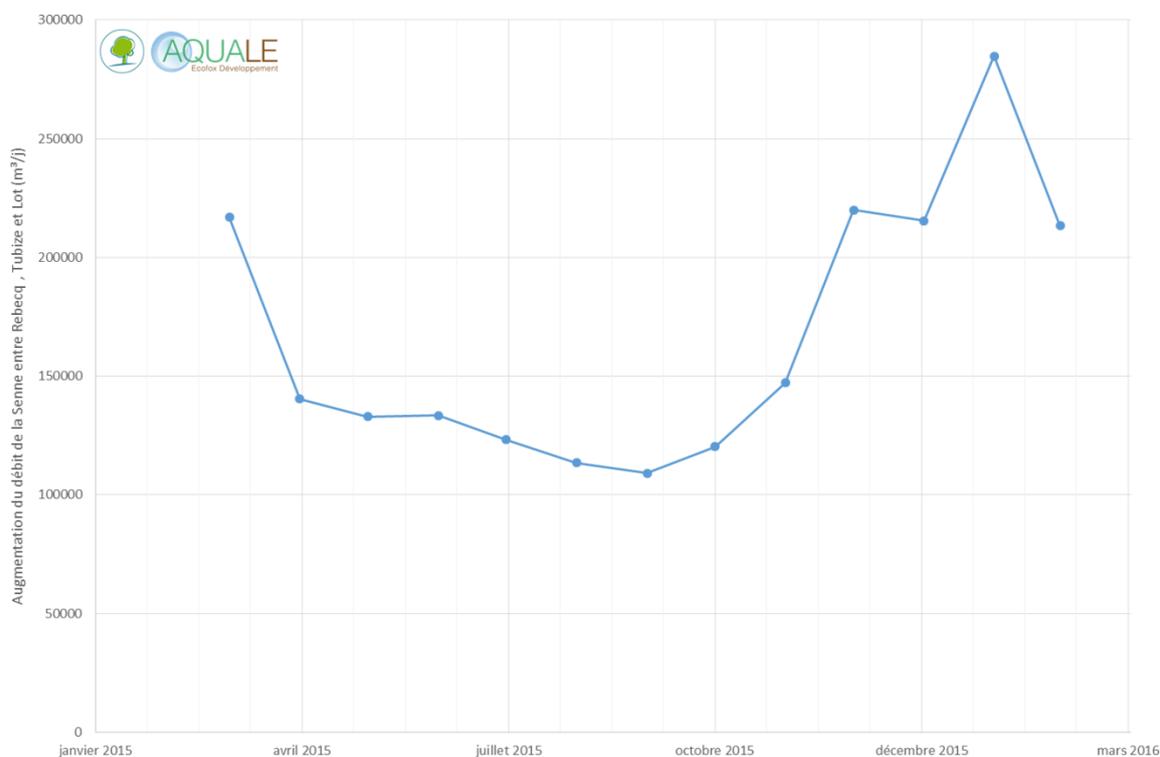


Figure 5-4 : Evolution de l'augmentation moyenne mensuelle du débit de la Senne entre Lot d'une part, et Rebecq et Tubize d'autre part (en m³/j)

Il apparaît que l'augmentation du débit entre ces stations est assez variable dans le temps. Elle varie globalement entre 100 000 et 300 000 m³/j, la très grande majorité des valeurs étant située entre 120 000 et 220 000 m³/j.

5.1.2.3.2 LA VALLÉE DE LA DYLE

L'évolution du débit de la Dyle est étudiée entre les stations de Limelette et de Florival. L'augmentation moyenne mensuelle du débit de la Dyle entre ces deux stations est présentée à la **FIGURE 5-5**.

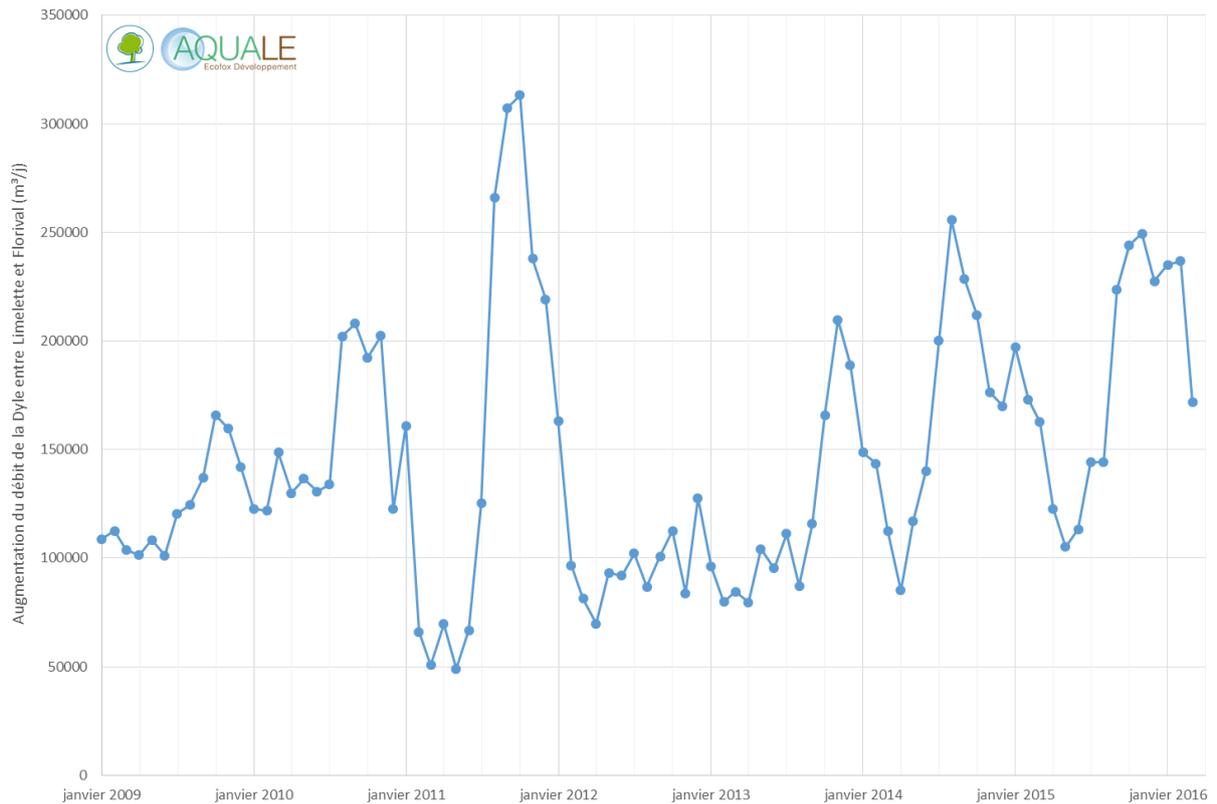


Figure 5-5 : Evolution de l'augmentation moyenne mensuelle du débit de la Dyle entre Limelette et Florival (en m³/j)

Il apparaît que l'augmentation du débit entre ces deux stations est assez variable dans le temps. Elle varie globalement entre 50 000 et 300 000 m³/j, la très grande majorité des valeurs étant située entre 80 000 et 200 000 m³/j.

De la même manière, l'évolution du débit de la Lasne est étudiée entre les stations de Rosières et d'Overijse. L'augmentation moyenne mensuelle du débit de la Lasne entre ces deux stations est présentée à la **FIGURE 5-6**.

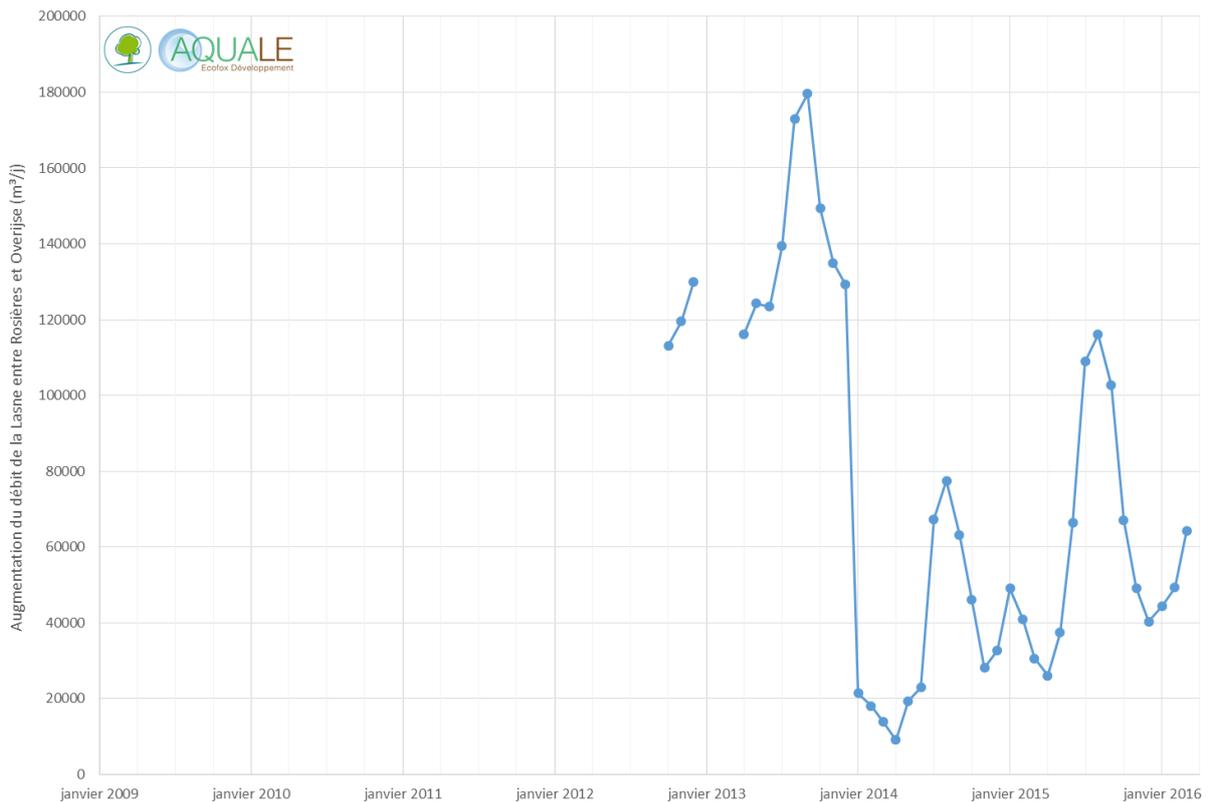


Figure 5-6 : Evolution de l'augmentation moyenne mensuelle du débit de la Lasne entre Rosières et Overijse (en m³/j)

Il apparaît que l'augmentation du débit entre ces deux stations est assez variable dans le temps. Elle varie globalement entre 10 000 et 180 000 m³/j, la très grande majorité des valeurs étant située entre 20 000 et 120 000 m³/j.

5.1.2.3.3 LA VALLÉE DE LA DENDRE

L'évolution du débit de la Dendre entre deux stations n'est pas réalisable dès lors que seule la station d'Idegem est présente.

A titre informatif, l'évolution temporelle du débit de la Dendre mesuré à la station d'Idegem est présentée à la **FIGURE 5-7**.

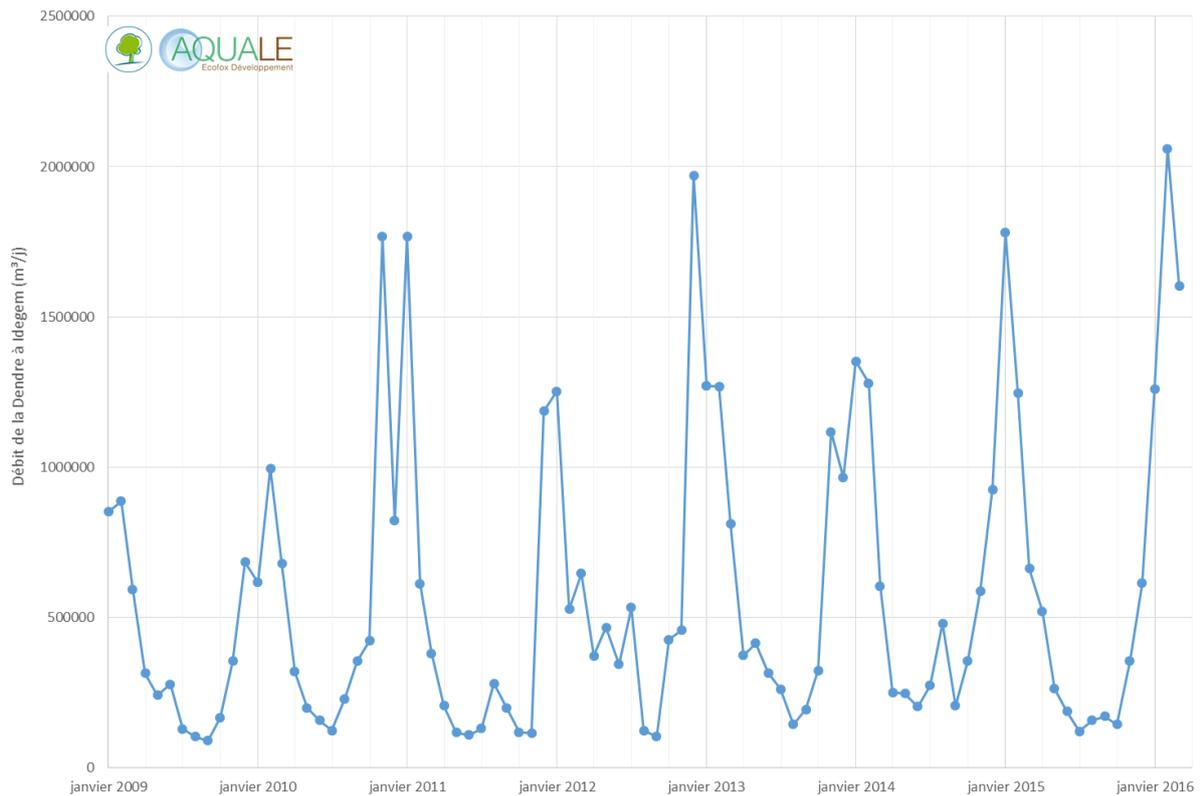


Figure 5-7 : Evolution du débit mensuel de la Dendre à Idegem (en m³/j)

Il apparaît que le débit de la Dendre à la station d'Idegem est assez variable dans le temps. Il varie saisonnièrement entre 100 000 et 2 000 000 m³/j.

5.1.2.4 SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS DES DÉBITS

L'observation des débits des rivières a été réalisée.

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 5-2**. 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 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.

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.

Type	Nom	Valeur à reproduire (m ³ /j)
Rivière	Senne (en amont de Lot mais en aval de Tubize et Rebecq)	Entre 3 100 et 31 000
Rivière	Lasne (en amont de Rosières)	Entre 1 300 et 13 000
Rivière	Lasne (entre Rosières et Overijse)	Entre 1 200 et 12 000
Rivière	Dyle (entre Limelette et Florival)	Entre 3 700 et 37 000
Rivière	Dendre	Du même ordre de grandeur que pour la Dyle et la Senne

Tableau 5-2 : Synthèse de l'observation des débits

5.2 ETAPE #6 - DÉFINITION DES PARAMÈTRES D'ÉCOULEMENT

Seule l'unité géologique constituée par le Membre de Grandglise est modélisée.

Au sein de cette unité géologique, des propriétés hydrogéologiques et paramètres hydrodynamiques variables peuvent être définis de façon à reproduire son hétérogénéité.

5.2.1 CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

Les conductivités hydrauliques imposées au Membre de Grandglise sont comprises entre 5×10^{-6} et 9×10^{-4} m/s. Les valeurs imposées résultent de la prise en considération de résultats de pompages d'essai (voir ci-dessous) et du processus de calibration. La contrainte majeure à respecter était évidemment de se cantonner à des valeurs acceptables pour des sables.

Les conductivités hydrauliques inférieures à 1×10^{-5} m/s sont imposées sur une zone réduite à proximité de la Dyle et de la Senne (parties amont) pour reproduire une remontée rapide du niveau d'eau en bordure des ruisseaux jugés drainants. Il s'agit d'une zone d'environ 270 km², soit environ 13 % de la surface du modèle.

Les conductivités hydrauliques comprises entre 1×10^{-5} et 1×10^{-4} m/s couvrent majoritairement la partie centrale du modèle et notamment toute la Région de Bruxelles-Capitale. Ces conductivités hydrauliques concernent une surface de 950 km² environ, soit un peu plus de 46 % de la surface du modèle.

Les conductivités hydrauliques comprises entre 1×10^{-4} et 5×10^{-4} m/s couvrent majoritairement la partie centre-Est et extrême Sud-Ouest du modèle. Ces conductivités hydrauliques concernent une surface de 270 km² environ, soit un peu plus de 13 % de la surface du modèle.

Enfin, les conductivités hydrauliques comprises entre 5×10^{-4} et 9×10^{-4} m/s couvrent deux zones situées dans la zone de rabattement piézométrique important au Nord-Ouest de la Région de Bruxelles-Capitale d'une part, et au Sud-Est de la Région de Bruxelles-Capitale d'autre part. Ces conductivités hydrauliques concernent une surface de 580 km² environ, soit un peu plus de 28 % de la surface du modèle.

Ce zonage de conductivité hydraulique est en accord avec les mesures de conductivité hydraulique réalisées via pompage d'essai.

Ainsi, la conductivité hydraulique de l'ouvrage geoth_T&T (9.2×10^{-6} m/s) a permis de valider la possibilité de mettre des conductivités hydrauliques relativement faibles en Région de Bruxelles-Capitale. Au sein du modèle

hydrogéologique, la conductivité hydraulique imposée est de 1×10^{-5} m/s pour la moitié Sud de la Région de Bruxelles-Capitale et de 5×10^{-5} m/s pour sa moitié Nord. Ces valeurs sont donc légèrement supérieures à celle qui avait été mesurée dans l'ouvrage geoth_t&T mais il s'agit bien de valeurs imposées régionalement au sein du modèle.

Sur la base de la transmissivité mesurée dans l'ouvrage capt_5708 (3.75×10^{-4} m²/s), la conductivité hydraulique est estimée à environ 5 à 6×10^{-5} m/s, en accord avec la conductivité hydraulique imposée dans cette zone du modèle (5×10^{-5} m/s).

Enfin, d'après une étude réalisée par l'Université Libre de Bruxelles et le Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale¹³, les conductivités hydrauliques de l'aquifère étudié sont comprises entre 1×10^{-4} et 1×10^{-5} m/s, ce qui est encore une fois cohérent avec les valeurs imposées au modèle.

5.2.2 POROSITÉ EFFICACE

La porosité efficace imposée au modèle résulte des simulations en régime transitoire. Toutefois, l'aquifère modélisé étant presque exclusivement captif, la porosité a une influence très faible à nulle sur les écoulements (cet aspect sera développé dans le **CHAPITRE 6** concernant l'étude de sensibilité). La valeur de porosité imposée à l'ensemble de l'aquifère est de 10 %.

5.2.3 COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT

Le coefficient d'emménagement est très important dans le cadre de la modélisation en régime transitoire pour un aquifère presque totalement captif. La valeur imposée à l'aquifère pour le coefficient d'emménagement *spécifique* est uniforme sur l'ensemble de la zone modélisée et égale à 2×10^{-4} m⁻¹.

En Région de Bruxelles-Capitale, le coefficient d'emménagement a été évalué à 3.3×10^{-3} [-] au sein de l'ouvrage capt_5708. Cela revient à un coefficient d'emménagement *spécifique* d'environ 4 à 6×10^{-4} m⁻¹, ce qui est en accord avec la valeur imposée à l'ensemble du modèle hydrogéologique.

Le **CHAPITRE 6** consacré à l'étude de sensibilité illustre l'impact de modifications de ce paramètre sur la remontée des niveaux d'eau observée durant les 30 dernières années.

Etant donné que le contexte de la remontée piézométrique est mal documenté et que celle-ci est donc reproduite à l'aide de puits fictifs, il est évident que la précision sur le coefficient d'emménagement (principalement fixé sur la base de cette remontée piézométrique) est faible. L'amélioration future du modèle, en particulier grâce à l'acquisition d'informations sur ce phénomène, permettra de préciser la valeur du coefficient d'emménagement.

¹³ Source : Etude du sous-sol bruxellois par sondages hydrogéologiques, Convention entre l'Université Libre de Bruxelles et le Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale, Premier rapport trimestriel, 1991 - 1992

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 le **TABLEAU 5-1** ci-avant (**CHAPITRE 5.1.1**).

Le **TABLEAU 5-3** ci-dessous présente 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 (il n'y en a pas).

La **FIGURE 5-8** présente 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]
2-0046	135108	165364	24.77	22.83	- 1.94
2-0072	168699	174665	20.94	19.83	- 1.11
2-0415	131650	156174	53.19	55.03	1.84
2-0417b	141379	174618	7.18	6.26	- 0.92
2-0418b	147660	181650	-1.3	0.30	1.60
2-0419b	155955	180524	11.08	10.57	- 0.51
2-0420b	160113	170398	37.46	37.77	0.31
2-0424b	160639	186224	9.13	11.20	2.07
2-0426	135773	159470	45.32	44.17	- 1.15
2-0428	121594	154145	47.55	47.18	- 0.37
2-0430	166516	167019	37.75	36.04	- 1.71
2-0431	157749	163462	73.12	73.22	0.10
2-0432b	131538	170127	0.77	0.22	- 0.55
2-0433	125436	160215	31.97	31.63	- 0.34
2-0777	171911	172554	25.37	25.85	0.48
4-0067	130325	185708	-24.09	-22.24	1.85
710/71/3	164952	161769	55.23	55.05	- 0.18
Coca-Cola Landénien	144562	166932	22.61	22.36	- 0.25
III-008	150137	173266	13.93	15.65	1.72
III-017	149848	172723	14.42	16.10	1.68
IV-003	147983	169968	15.75	16.95	1.20
Lavallée	148151	172034	12.72	14.16	1.44
Puits Bracops	144684	169301	15.35	15.05	- 0.30

Il apparaît que la très grande majorité des niveaux d'eau mesurés dans les piézomètres sont bien reproduits. En effet, les critères sont respectés pour tous les ouvrages.

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 5-9**. 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.

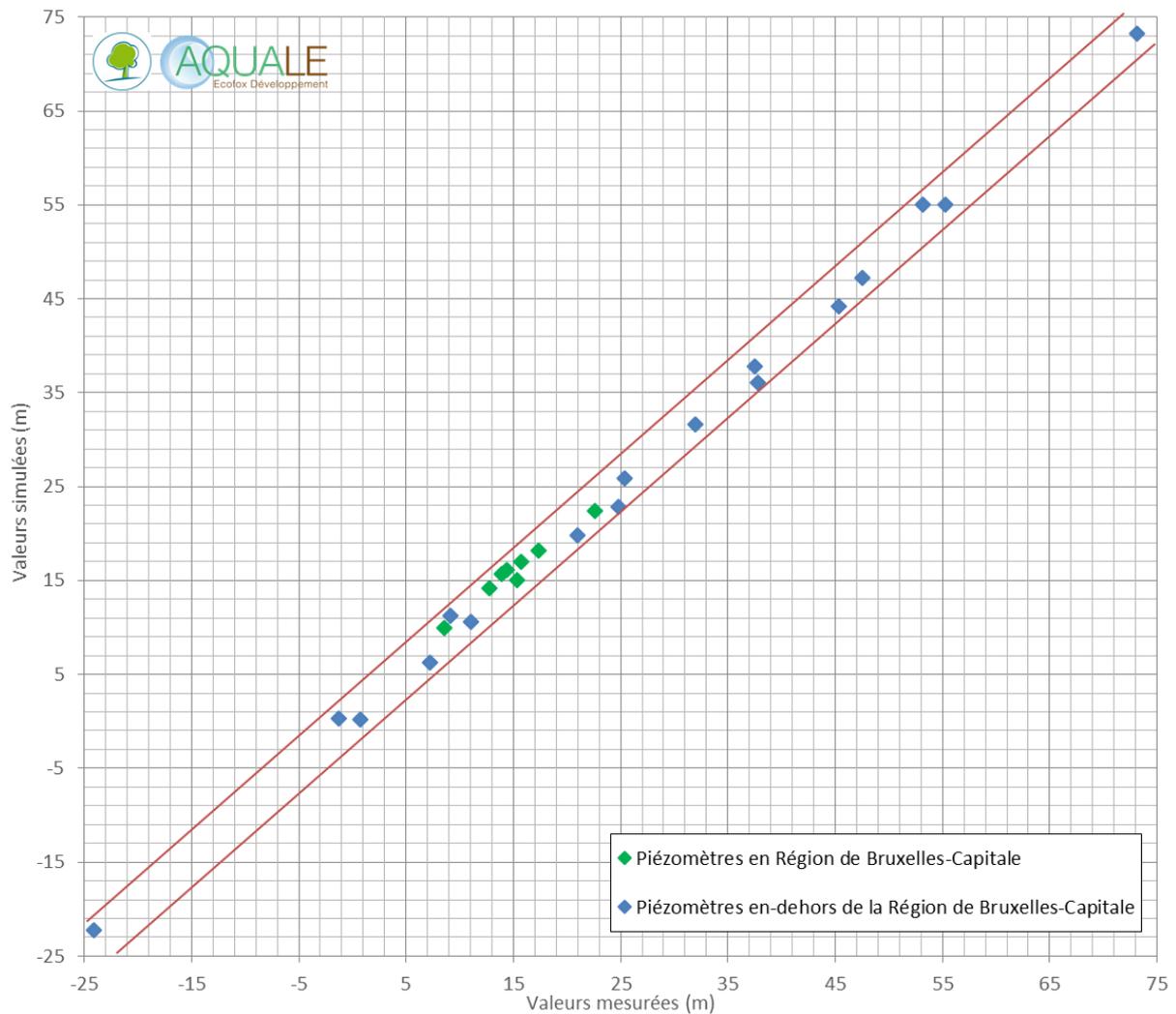


Figure 5-9 : Diagramme de dispersion (*scatterplot*) de l'ensemble des points d'observation pour la période de mai – juin 2013

Les indicateurs de calibration¹⁴ classiquement pris en compte pour juger de la qualité du modèle sont les suivants :

- SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 7.00 % ;
- SRMS (Scaled Root Mean Square) : 1.26 % ;
- CD (Coefficient of Determination) : 0.97,

ce qui peut être jugé vraiment bon.

Si l'on prend en considération uniquement les points situés en Région de Bruxelles-Capitale, les indicateurs de calibration sont les suivants :

- SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 2.37 % ;
- SRMS (Scaled Root Mean Square) : 1.27 % ;
- CD (Coefficient of Determination) : 0.77,

ce qui peut être jugé très bon.

Il peut être observé que la calibration est légèrement moins bonne que dans la première version du modèle présentée dans le rapport intermédiaire de l'étude. Cela est dû au fait que des modifications de conductivité hydraulique ont été apportées pour reproduire les écoulements en régime transitoire. Cela concerne tout particulièrement les niveaux d'eau simulés en Région de Bruxelles-Capitale qui sont légèrement surestimés en régime permanent.

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 le **TABLEAU 5-1** ci-avant (**CHAPITRE 5.1.1**).

Le **TABLEAU 5-4** ci-dessous présente 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.

La **FIGURE 5-10** présente 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 novembre 2013 [m]	Piézométrie simulée pour novembre 2013 [m]	Erreur [m]
2-0046	135108	165364	24.65	22.83	- 1.82
2-0072	168699	174665	21.00	19.83	- 1.17
2-0415	131650	156174	52.49	55.03	2.54
2-0417b	141379	174618	7.46	6.26	- 1.20

¹⁴ 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]
2-0418b	147660	181650	-0.94	0.30	1.24
2-0419b	155955	180524	11.2	10.57	- 0.63
2-0420b	160113	170398	37.5	37.77	0.27
2-0424b	160639	186224	9.08	11.20	2.12
2-0426	135773	159470	44.66	44.17	- 0.49
2-0428	121594	154145	47.11	47.18	0.07
2-0430	166516	167019	37.81	36.04	- 1.77
2-0431	157749	163462	73.15	73.22	0.07
2-0432b	131538	170127	0.79	0.22	- 0.57
2-0433	125436	160215	31.55	31.63	0.08
2-0777	171911	172554	25.33	25.85	0.52
4-0067	130325	185708	-23	-22.24	0.76
710/71/3	164952	161769	55.27	55.05	- 0.22
Coca-Cola Landénien	144562	166932	22.48	22.36	- 0.12
III-008	150137	173266	13.93	15.65	1.72
III-017	149848	172723	14.42	16.10	1.68
IV-003	147983	169968	15.81	16.95	1.14
Lavallée	148151	172034	12.72	14.16	1.44
Puits Bracops	144684	169301	15.26	15.05	- 0.21
Puits Centre sportif BNB	145390	172676	8.57	9.99	1.42
VIII-052	147939	169430	17.32	18.13	0.81

Tableau 5-4 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la *nappe du Landénien* pour la période de novembre 2013

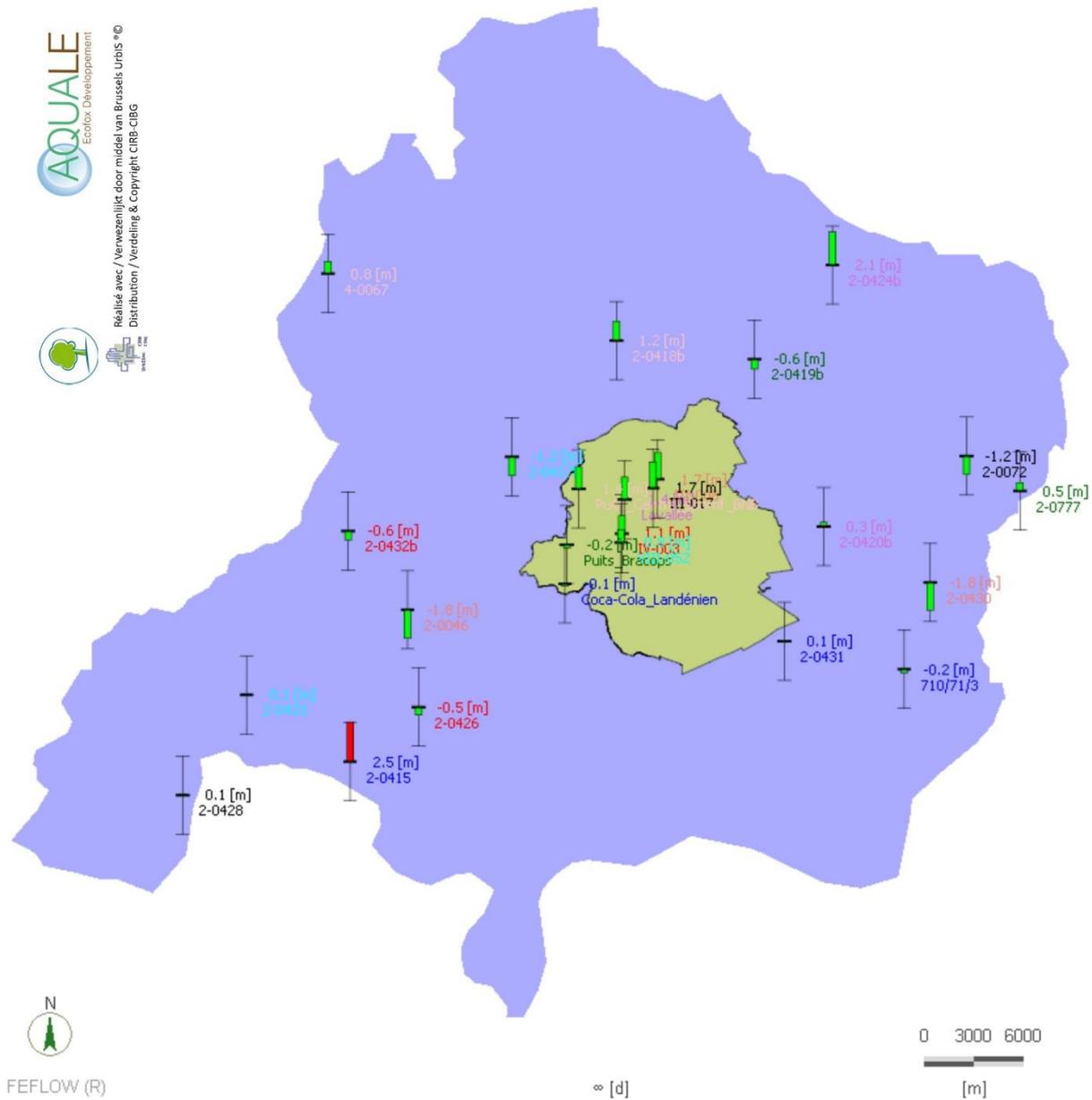


Figure 5-10 : Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées dans la nappe du Landénien pour la période de novembre 2013

Il apparaît que la très grande majorité des niveaux d’eau mesurés dans les piézomètres sont bien reproduits. En effet, les critères sont respectés pour tous les ouvrages sauf 1.

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 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 5-11**. 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.

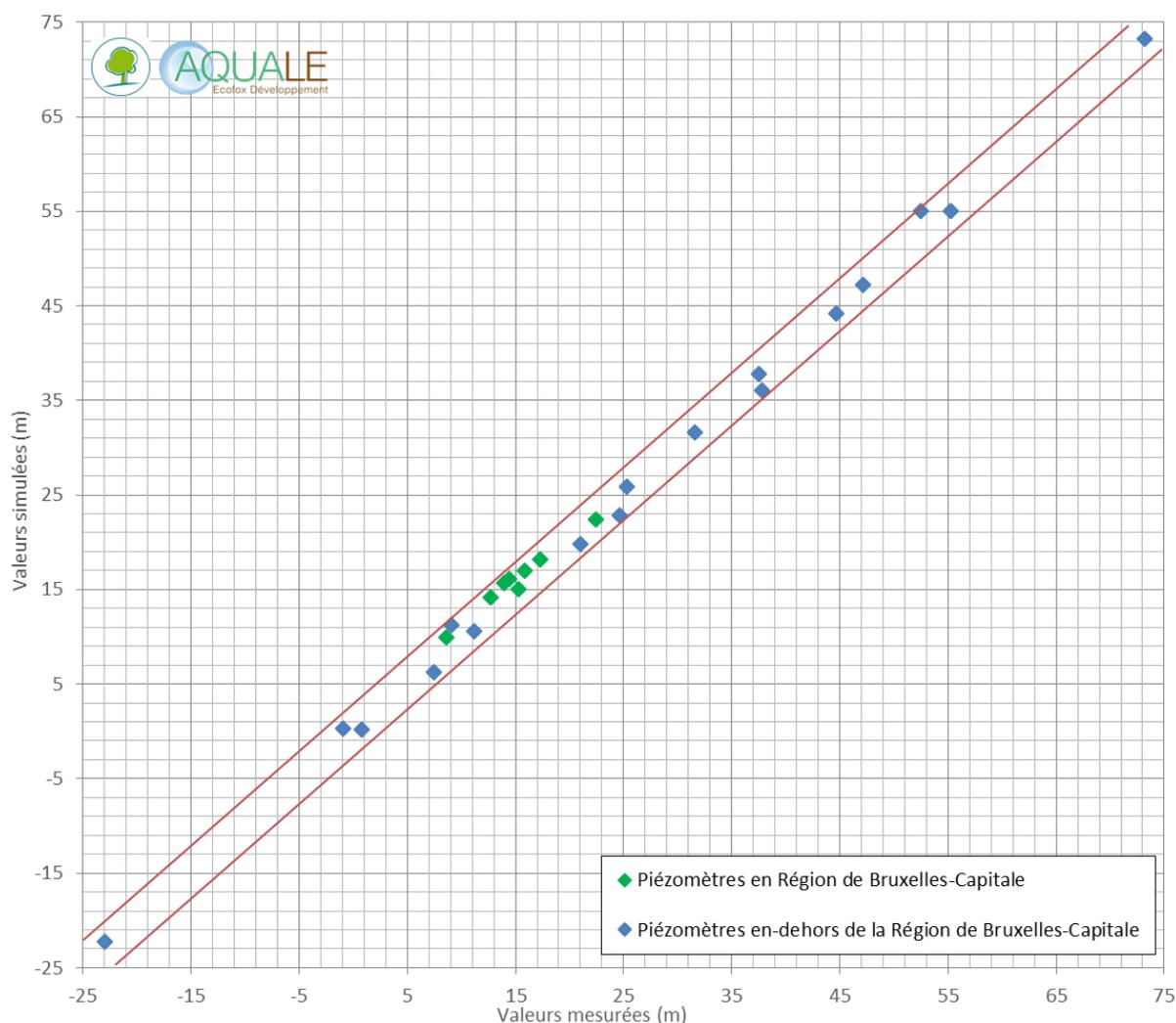


Figure 5-11 : Diagramme de dispersion (scatterplot) de l'ensemble des points d'observation pour la période de novembre 2013

Les indicateurs de calibration¹⁵ classiquement pris en compte pour juger de la qualité du modèle sont les suivants :

- SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 7.45 % ;
- SRMS (Scaled Root Mean Square) : 1.24 % ;
- CD (Coefficient of Determination) : 0.99,

ce qui peut être jugé bon.

Si l'on prend en considération uniquement les points situés en Région de Bruxelles-Capitale, les indicateurs de calibration sont les suivants :

- SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 2.35 % ;
- SRMS (Scaled Root Mean Square) : 1.27 % ;
- CD (Coefficient of Determination) : 0.77,

¹⁵ Pour une très bonne calibration, les valeurs classiquement à atteindre sont < 5 % (SRMFS et SRMS) et ± 1 (CD)

ce qui peut être jugé très bon.

Il peut être observé que la calibration est légèrement moins bonne que dans la première version du modèle présentée dans le rapport intermédiaire de l'étude. Cela est dû au fait que des modifications de conductivité hydraulique ont été apportées pour reproduire les écoulements en régime transitoire. Cela concerne tout particulièrement les niveaux d'eau simulés en Région de Bruxelles-Capitale qui sont légèrement surestimés en régime permanent.

5.3.3 CALIBRATION ET VALIDATION EN RÉGIME TRANSITOIRE – PÉRIODE DE 1970 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 l'ensemble de 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. Compte-tenu de l'augmentation de piézométrie observée à long terme, il a même été décidé de réaliser des simulations directement sur une période plus longue, à savoir 1970 – 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 -20 et 0 m :
 - o 2-0418b ;
 - o 2-0432b ;
- Entre 0 et 20 m (en Flandre) :
 - o 2-0417b ;
 - o 2-0419b ;
 - o 2-0424b ;
- Entre 5 et 25 m (en Région de Bruxelles-Capitale) :
 - o Coca-Cola Landénien ;
 - o III-008 ;
 - o III-017 ;
 - o IV-003 ;
 - o Lavallée ;
 - o Puits Bracops ;
 - o Puits Centre sportif BNB ;
 - o VIII-052 ;
- Entre 20 et 40 m (en Flandre) :
 - o 2-0046 ;
 - o 2-0072 ;
 - o 2-0420b ;
 - o 2-0430 ;
 - o 2-0433 ;
 - o 2-0777 ;
- Entre 40 et 60 m :
 - o 2-0415 ;
 - o 2-0426 ;
 - o 2-0428 ;

- Entre 60 et 80 m :
 - o 2-0431.

Si la calibration en régime permanent a permis de vérifier que le modèle était capable de reproduire la piézométrie du Landénien 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 Landénien. Ainsi, les écarts de piézométrie identifiés dans les **TABLEAUX 5-3** et **5-4** 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 5-12** à **5-17** présentent l'évolution de la piézométrie mesurée (lignes continues) et de la piézométrie simulée en régime transitoire (lignes discontinues) entre 2009 et 2013 pour les gammes de hauteur piézométrique absolue allant de -20 à 0 m, 0 à 20 m, 20 à 40 m, 40 à 60 m et 60 à 80 m pour la Flandre (**FIGURES 5-12** à **5-16**) et de 5 à 25 m pour la Région de Bruxelles-Capitale (**FIGURE 5-17**).

La **FIGURE 5-18** présente l'évolution à long terme (1970 – 2013) des niveaux d'eau mesurés et simulés dans les piézomètres de la Région de Bruxelles-Capitale

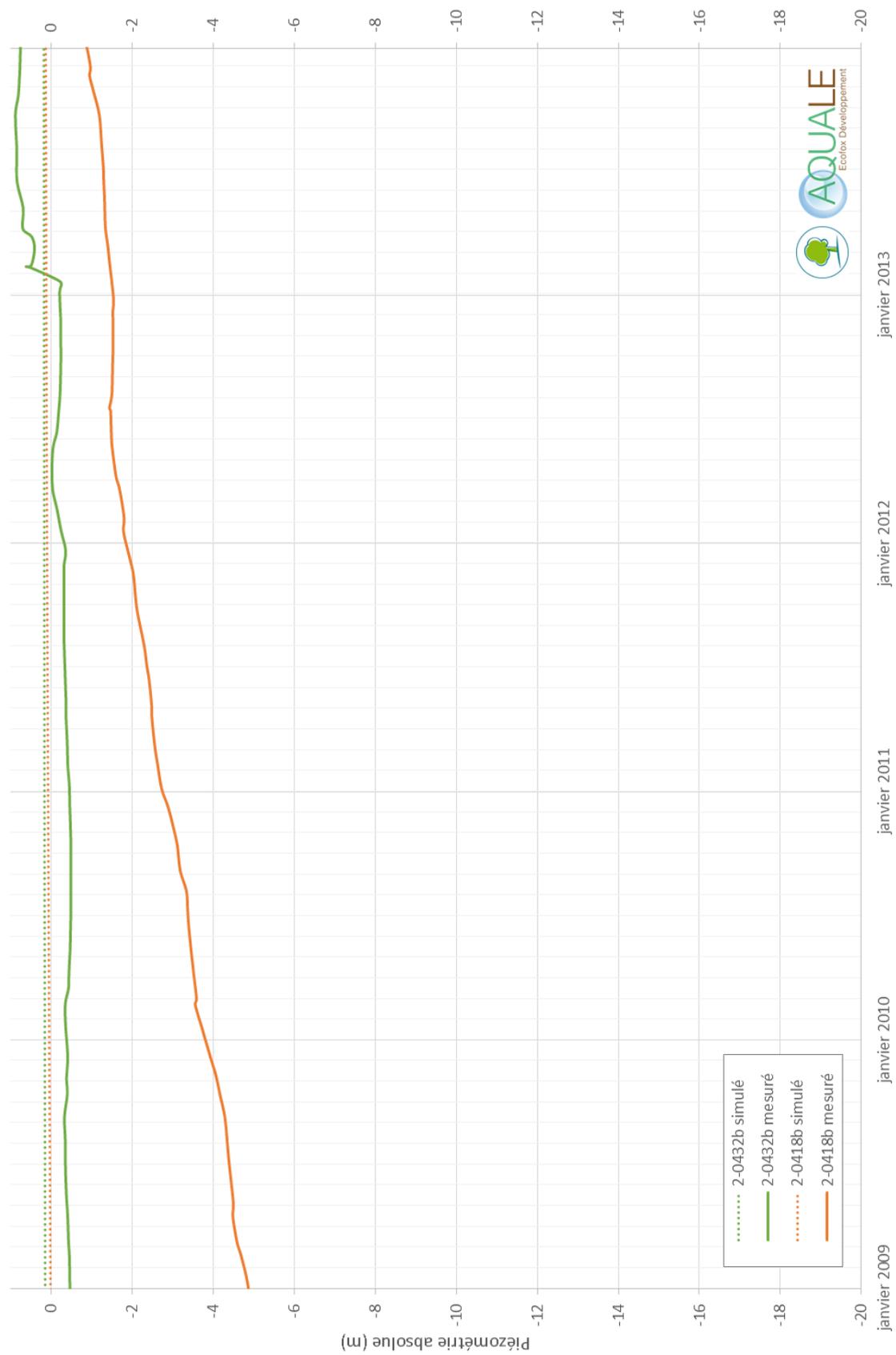


Figure 5-12 : Piézométries mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de - 20 à 0 m

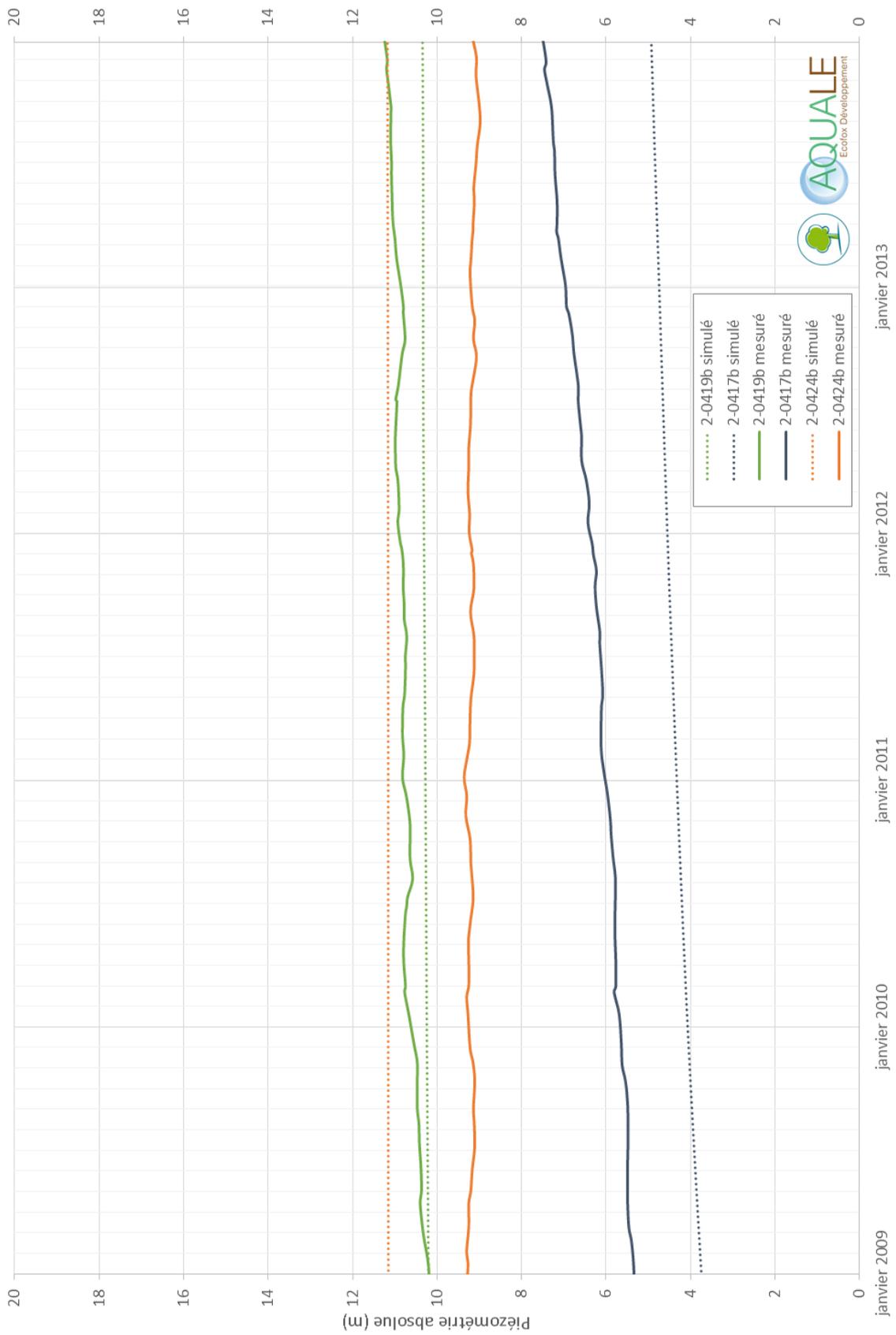


Figure 5-13 : Piézométries mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 0 à 20 m

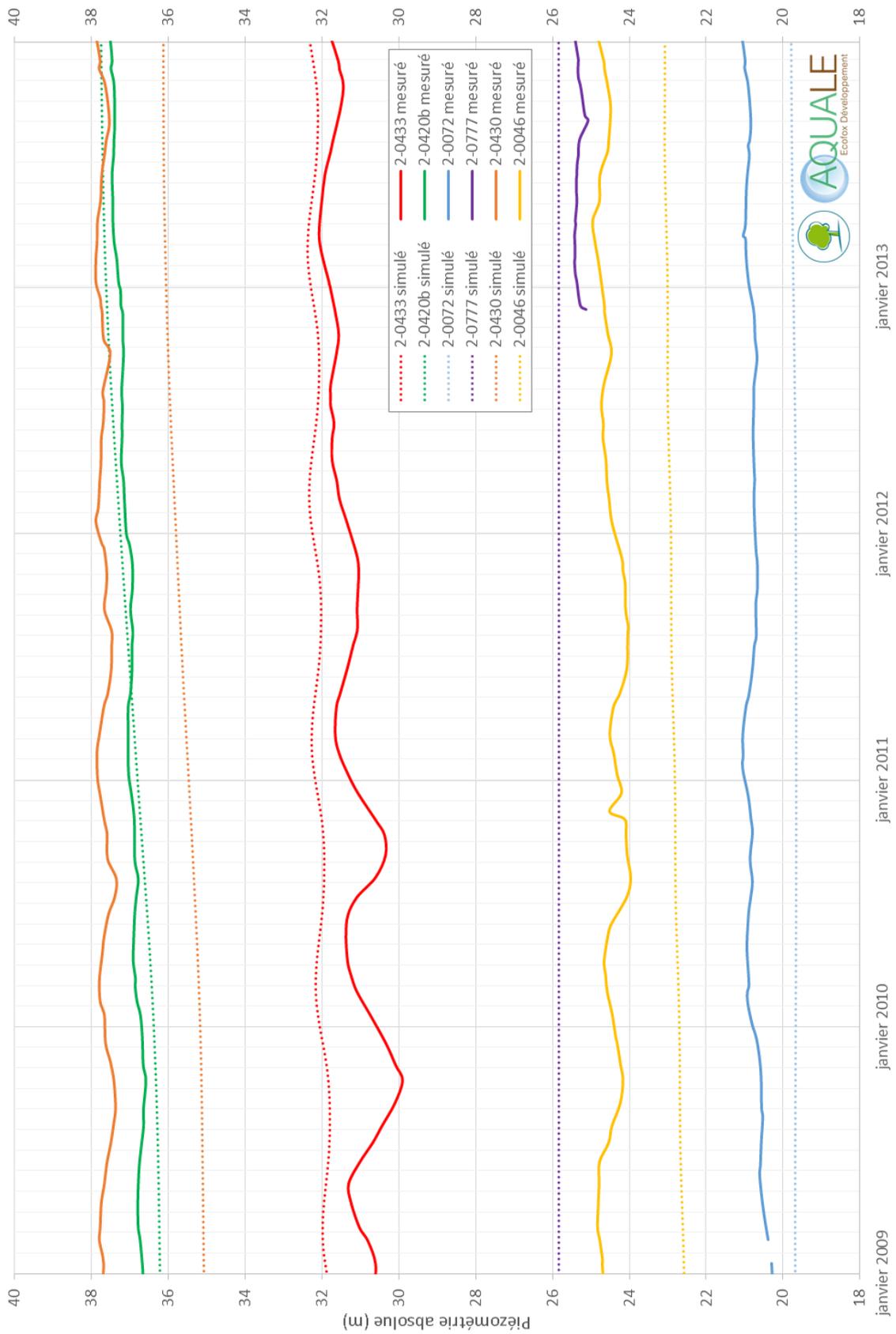


Figure 5-14 : Piézométries mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 20 à 40 m

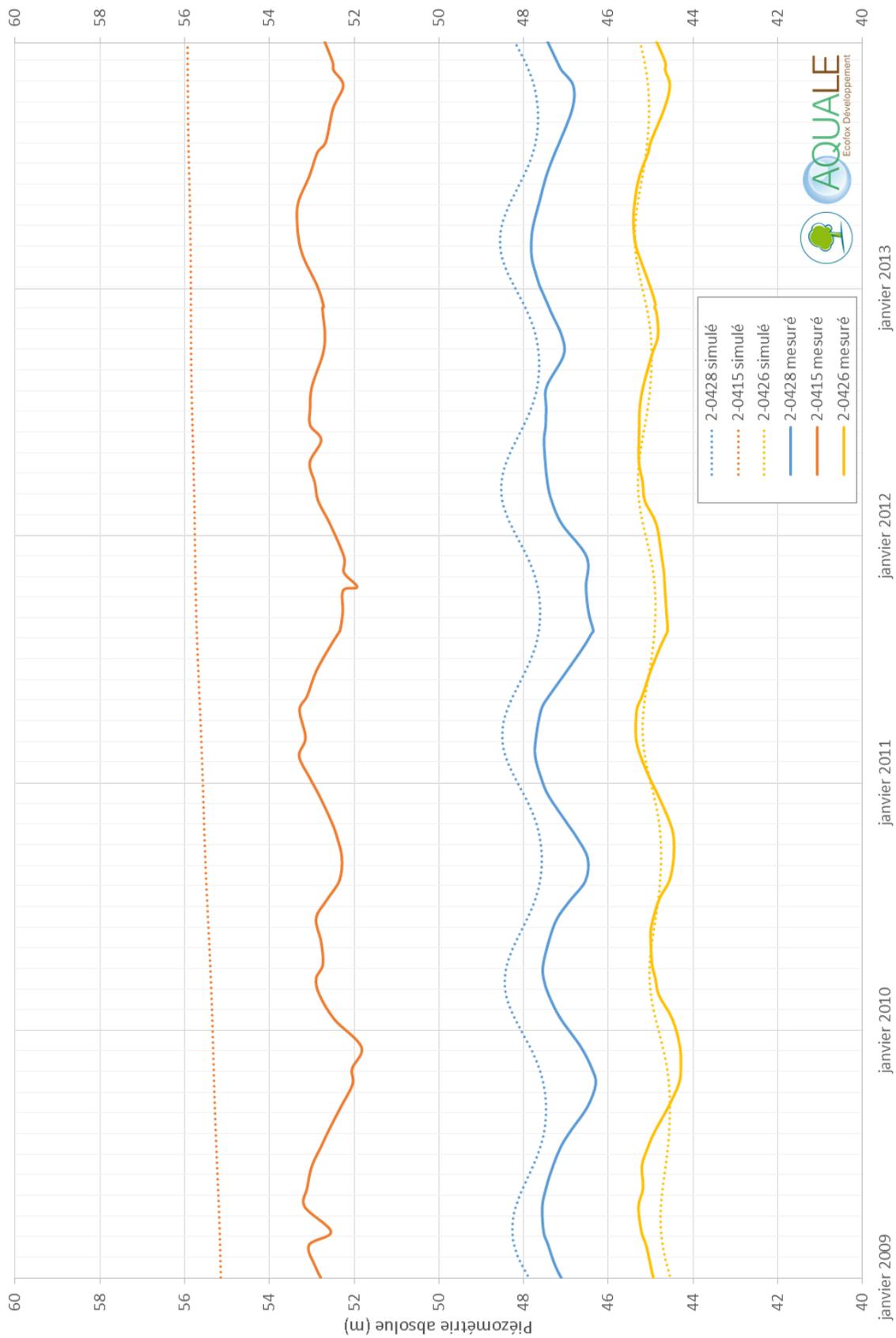


Figure 5-15 : Piézométries mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 40 à 60 m

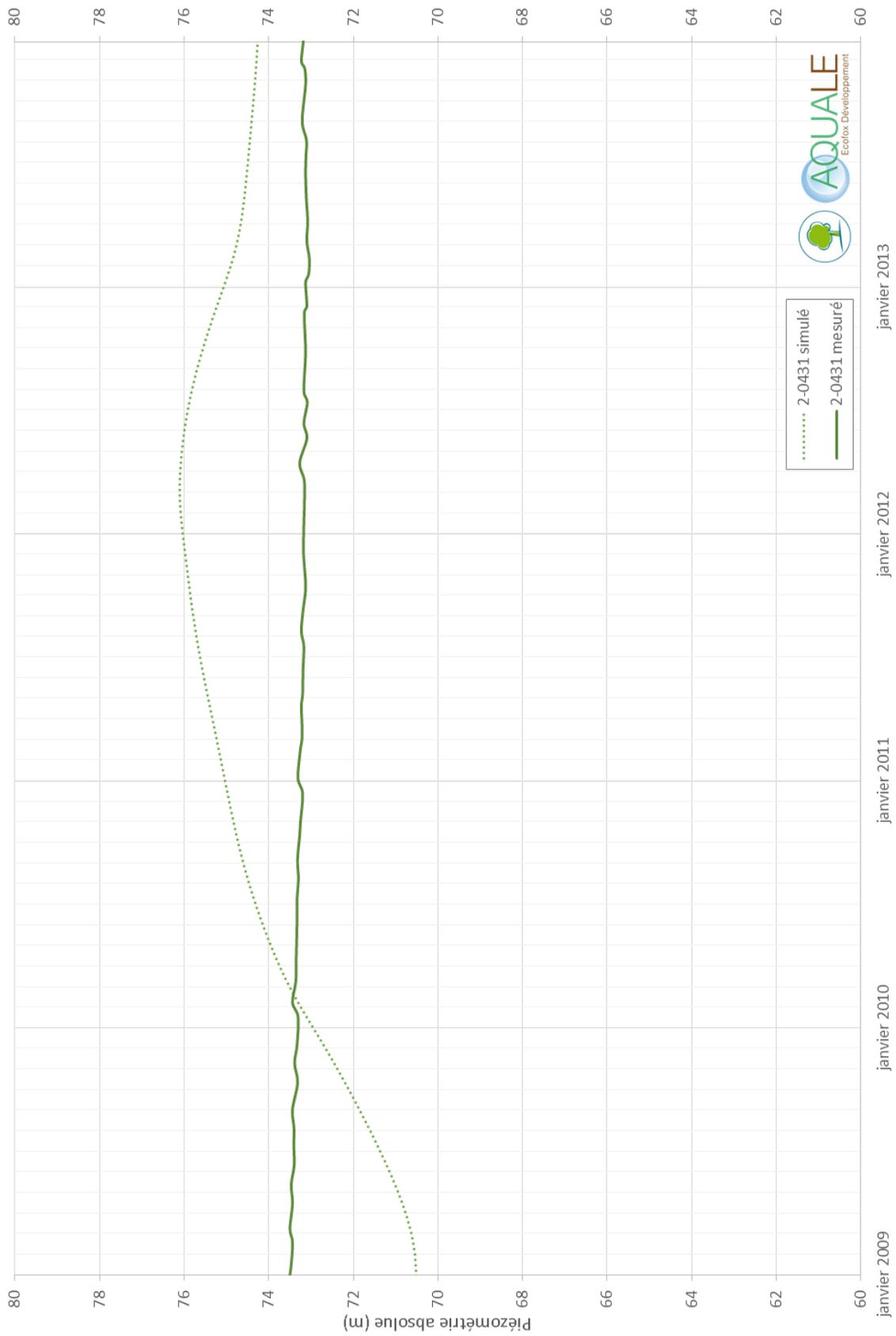


Figure 5-16 : Piézométries mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 60 à 80 m

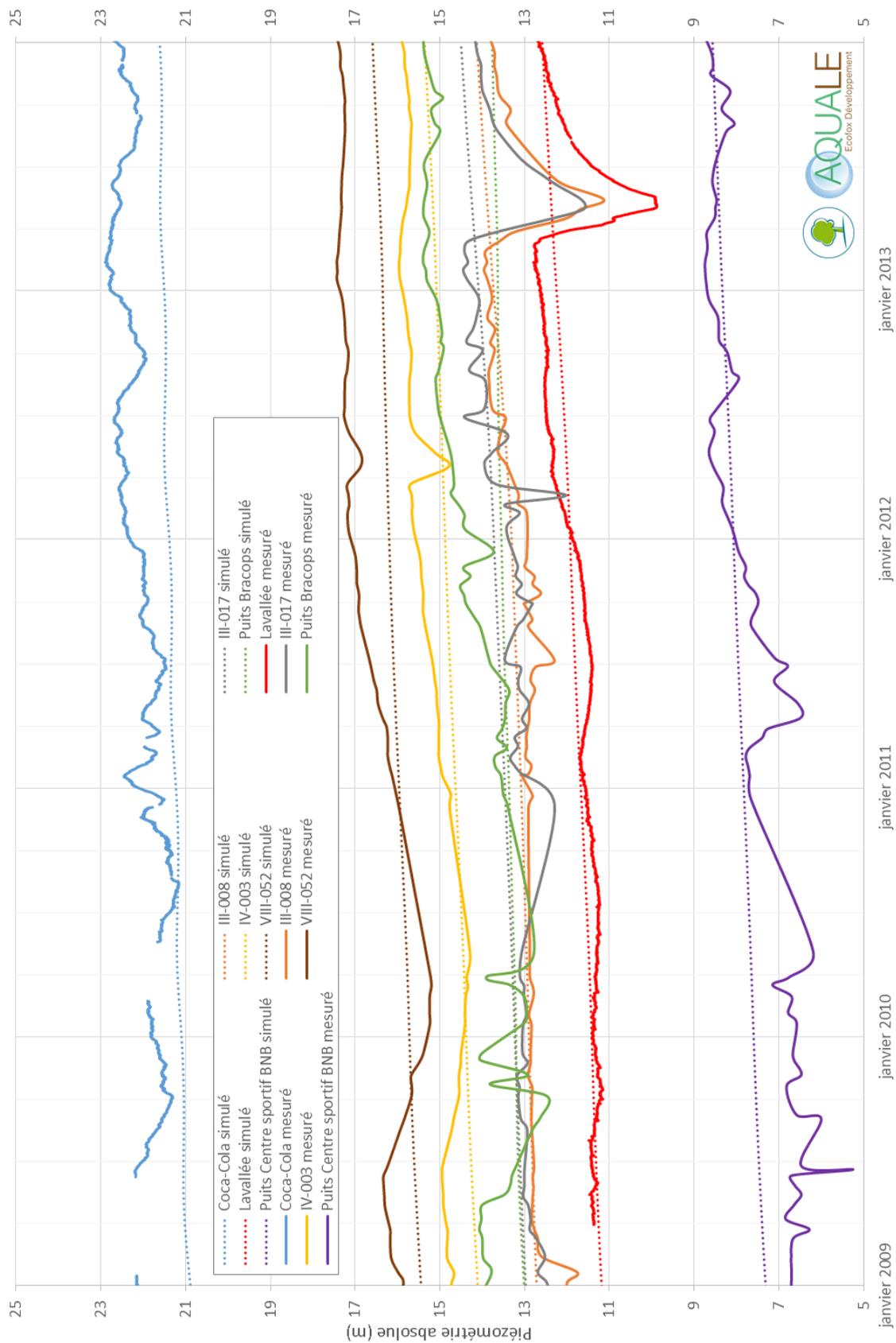


Figure 5-17 : Piézométries mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 5 à 25 m en Région de Bruxelles-Capitale

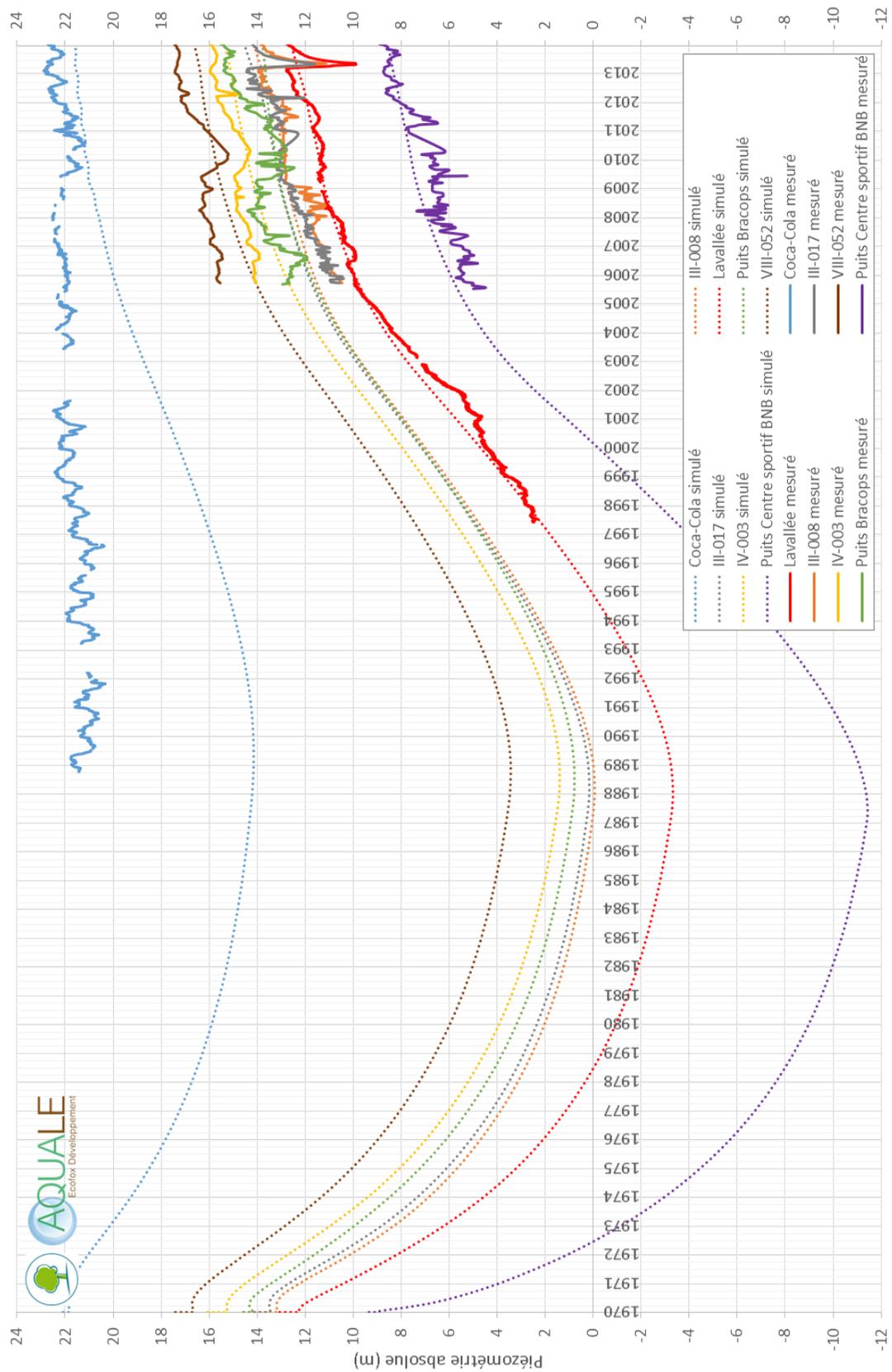


Figure 5-18 : Piézométries mesurée et simulée pour la gamme de hauteur piézométrique absolue de 5 à 25 m en Région de Bruxelles-Capitale entre 1970 et 2013

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 - 20 et 0 m (**FIGURE 5-12**) :
 - o **2-0418b** : les courbes des piézométries mesurée et simulée sont assez différentes dès lors que la piézométrie mesurée est montante durant les 5 années de suivi alors que la piézométrie simulée est constante ; cela s'explique par le fait que le niveau d'eau mesuré dans ce piézomètre est directement influencé par un pompage très important à l'Ouest du modèle (hors de la zone modélisée) et que celui-ci n'est pas reproduit dans le modèle ;
 - o **2-0432b** : l'allure très stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée ;
- Entre 0 et 20 m (**FIGURE 5-13**) :
 - o **2-0417b** : l'allure légèrement montante mesurée est bien reproduite ;
 - o **2-0419b** : l'allure légèrement montante et les faibles effets saisonniers ne sont pas reproduits dans la courbe de la piézométrie simulée ; la simulation reste toutefois une très bonne approximation de la réalité ;
 - o **2-0424b** : l'allure très stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée ;
- Entre 20 et 40 m (**FIGURE 5-14**) :
 - o **2-0046** : l'allure légèrement montante est bien reproduite mais les faibles effets saisonniers ne le sont pas ; la simulation reste toutefois une très bonne approximation de la réalité ;
 - o **2-0072** : l'allure globalement stable de ce piézomètre est très bien reproduite durant toute la période simulée ;
 - o **2-0420b** : l'allure légèrement montante est bien reproduite mais avec une pente légèrement trop grande ; la simulation reste toutefois une très bonne approximation de la réalité ;
 - o **2-0430** : l'allure globalement stable avec des légères variations saisonnières n'est pas correctement reproduite par la simulation ;
 - o **2-0433** : la piézométrie variant saisonnièrement est très bien reproduite ;
 - o **2-0777** : la période couverte par les mesures pour ce piézomètre est assez courte (fin 2012 – 2013) ; l'allure très stable est très bien reproduite ;
- Entre 40 et 60 m (**FIGURE 5-15**) :
 - o **2-0415** : les variations saisonnières et la stabilité à long terme ne sont pas correctement reproduites par la simulation ;
 - o **2-0426** : la stabilité à long terme et les variations saisonnières sont très bien reproduites par la simulation ;
 - o **2-0428** : la stabilité à long terme et les variations saisonnières sont très bien reproduites par la simulation ;
- Entre 60 et 80 m (**FIGURE 5-16**) :
 - o **2-0431** : l'allure très légèrement descendante observée n'est pas correctement reproduite par la simulation ;
- En Région de Bruxelles-Capitale, entre 5 et 25 m (**FIGURE 5-17**) :
 - o **Coca-Cola** : l'allure légèrement montante est bien reproduite mais les variations saisonnières observées ne le sont pas ; la simulation reste toutefois une très bonne approximation de la réalité ;
 - o **Lavallée** : l'allure légèrement montante est très bien reproduite ;
 - o **Puits Centre sportif BNB** : l'allure légèrement montante est très bien reproduite ;
 - o **Puits Bracops** : l'allure légèrement montante est très bien reproduite ;
 - o **IV-003** : l'allure légèrement montante est très bien reproduite ;
 - o **III-008** : l'allure légèrement montante est très bien reproduite ;
 - o **III-017** : l'allure légèrement montante est très bien reproduite ;
 - o **VIII-052** : l'allure légèrement montante est très bien reproduite ;

- En Région de Bruxelles-Capitale, à très long terme (**FIGURE 5-18**) :
 - o **Coca-Cola** : l'allure assez stable à long terme et influencée par les saisons n'est pas correctement reproduite ;
 - o **Lavallée** : l'allure montante est très bien reproduite sur une très longue période (1997 – 2013) ;
 - o **Puits Centre sportif BNB** : l'allure montante est très bien reproduite sur une longue période (2005 – 2013) ;
 - o **Puits Bracops** : l'allure montante est très bien reproduite sur une longue période (2005 – 2013) ;
 - o **IV-003** : l'allure montante est très bien reproduite sur une longue période (2005 – 2013) ;
 - o **III-008** : l'allure montante est très bien reproduite sur une longue période (2005 – 2013) ;
 - o **III-017** : l'allure montante est très bien reproduite sur une longue période (2005 – 2013) ;
 - o **VIII-052** : l'allure montante est très bien reproduite sur une longue période (2005 – 2013).

Le code couleur utilisé dans la liste ci-dessus est reproduit sur la **FIGURE 5-19** ci-dessous qui illustre la qualité de la calibration en régime transitoire.

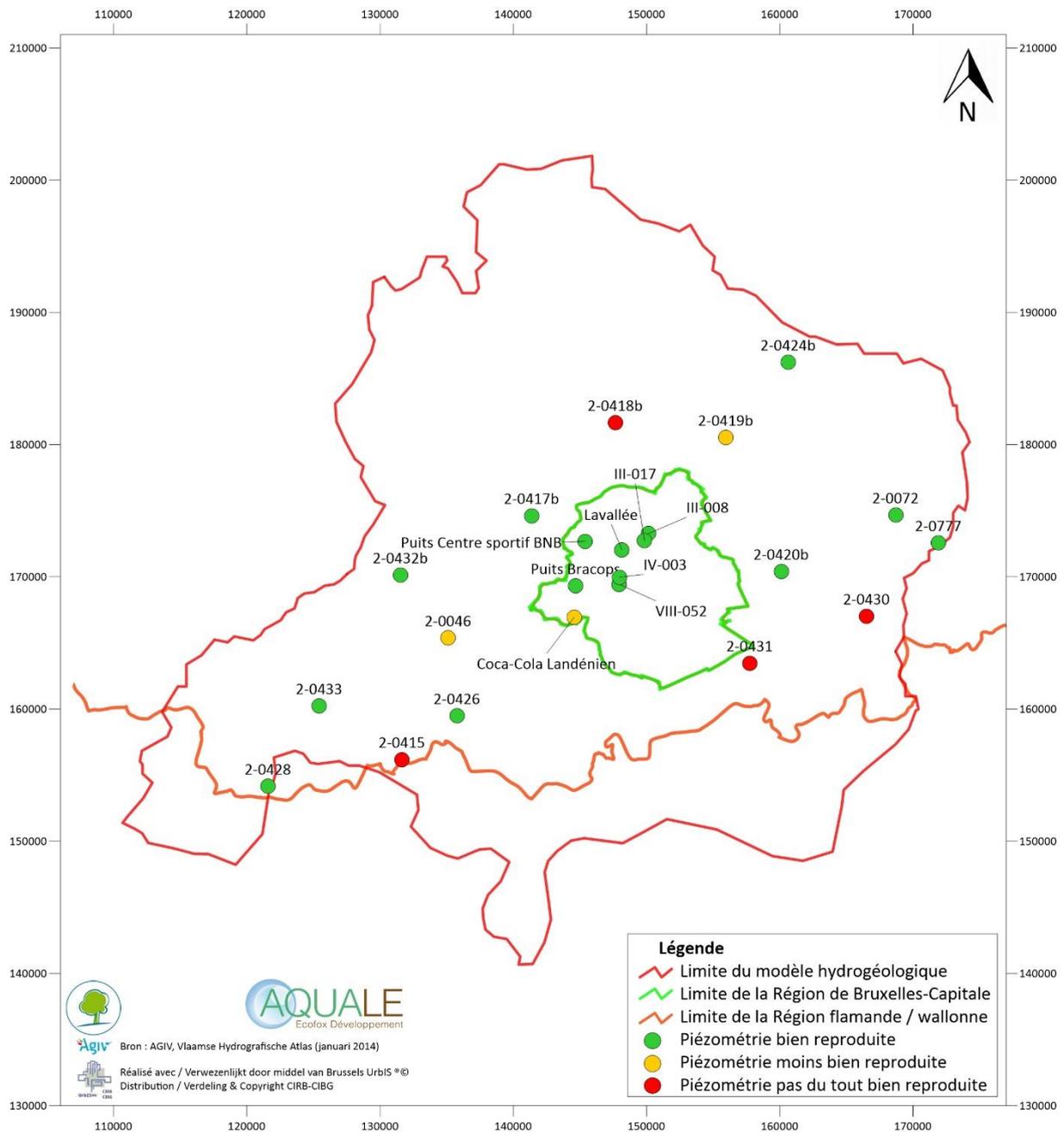


Figure 5-19 : Qualité de la calibration en régime transitoire

Il apparaît, grâce à cette dernière figure, que les évolutions des niveaux d'eau mesurés dans les piézomètres sont bien reproduites.

Globalement, la qualité de la calibration en régime transitoire est jugée bonne. Il est considéré que la calibration pourrait être améliorée à la condition d'améliorer la connaissance des données de base et ainsi accroître les degrés de confiance.

Sur la base des données actuellement à disposition, la calibration ne peut être améliorée sans qu'il ne s'agisse de fausse précision.

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 5-20** ci-dessous illustre ce bilan global.

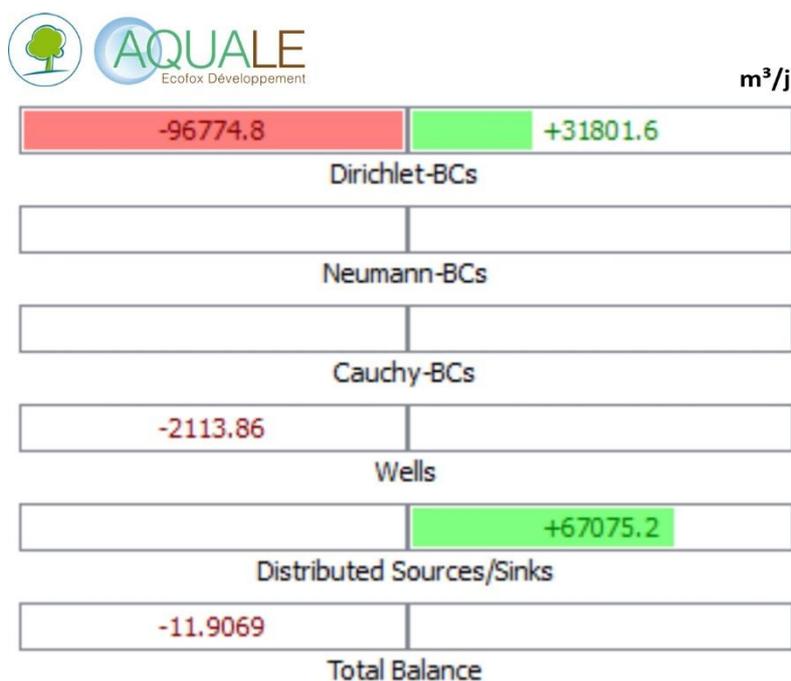


Figure 5-20 : Bilan global en m³/j en régime permanent pour la période de mai – juin 2013

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 et des autres limites du modèle (écoulement à travers l'aquifère). Les puits (Wells) constituent également une sortie mais de très faible ampleur.

L'entrée majeure est l'eau météorique qui s'infiltré. Les niveaux d'eau imposés constituent une entrée secondaire importante (écoulement à travers l'aquifère).

5.4.1.2 ETAT DE CALIBRATION

Le **TABLEAU 5-5** 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)
Rivière	Senne (en amont de Lot mais en aval de Tubize et Rebecq)	Entre 3 100 et 31000	28 000
Rivière	Lasne (en amont de Rosières)	Entre 1 300 et 13 000	7 400
Rivière	Lasne (entre Rosières et Overijse)	Entre 1 200 et 12 000	3 600
Rivière	Dyle (entre Limelette et Florival)	Entre 3 700 et 37 000	5 200
Rivière	Dendre	Du même ordre de grandeur que pour la Dyle et la Senne	3 700

Tableau 5-5 : Comparaison des débits mesurés (ou estimés) et simulés en régime permanent pour la période mai – juin 2013

Il apparaît que tous les débits sortants du modèle sont bien reproduits. L'ordre de grandeur du débit des points de sortie est bien conservé. La **FIGURE 5-21** ci-dessous illustre graphiquement la reproduction des débits.

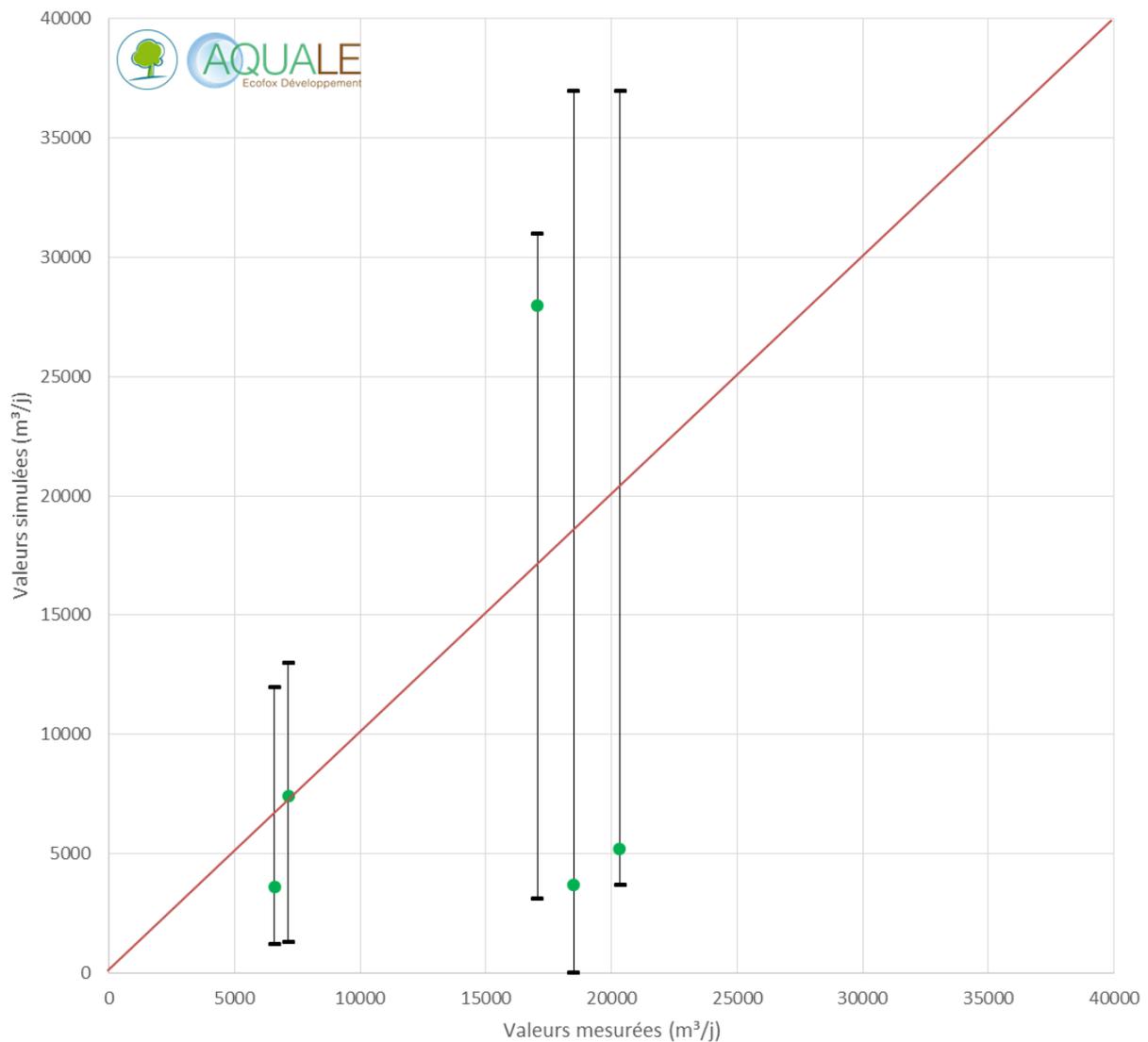


Figure 5-21 : Diagramme de dispersion (scatterplot) de l'ensemble des débits sortants pour la période de mai – juin 2013

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 5-21** 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 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 puisqu'ils sont tous inclus dans la fourchette de valeurs jugées acceptables.

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 l'ensemble de 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. Compte-tenu de l'augmentation de piézométrie observée à long terme, il a même été décidé de réaliser des simulations directement sur une période plus longue, à savoir 1970 – 2013.

Les différentes sorties suivantes sont suivies pour vérifier la qualité de la calibration en régime transitoire :

- la Senne ;
- la Dyle ;
- la Lasne ;
- la Dendre.

5.4.3.1 LA SENNE

L'évolution du débit de la Senne est étudiée entre la station de Lot d'une part, et les stations de Rebecq et Tubize (Senette) d'autre part. L'augmentation moyenne mensuelle mesurée du débit de la Senne entre ces stations et le débit drainé simulé pour cette même portion sont illustrés à la **FIGURE 5-22**. Les débits n'ayant pas tous été mesurés durant la période d'intérêt qu'est 2009 – 2013, l'évolution du débit mesuré est présentée pour la période 2015 – 2016.

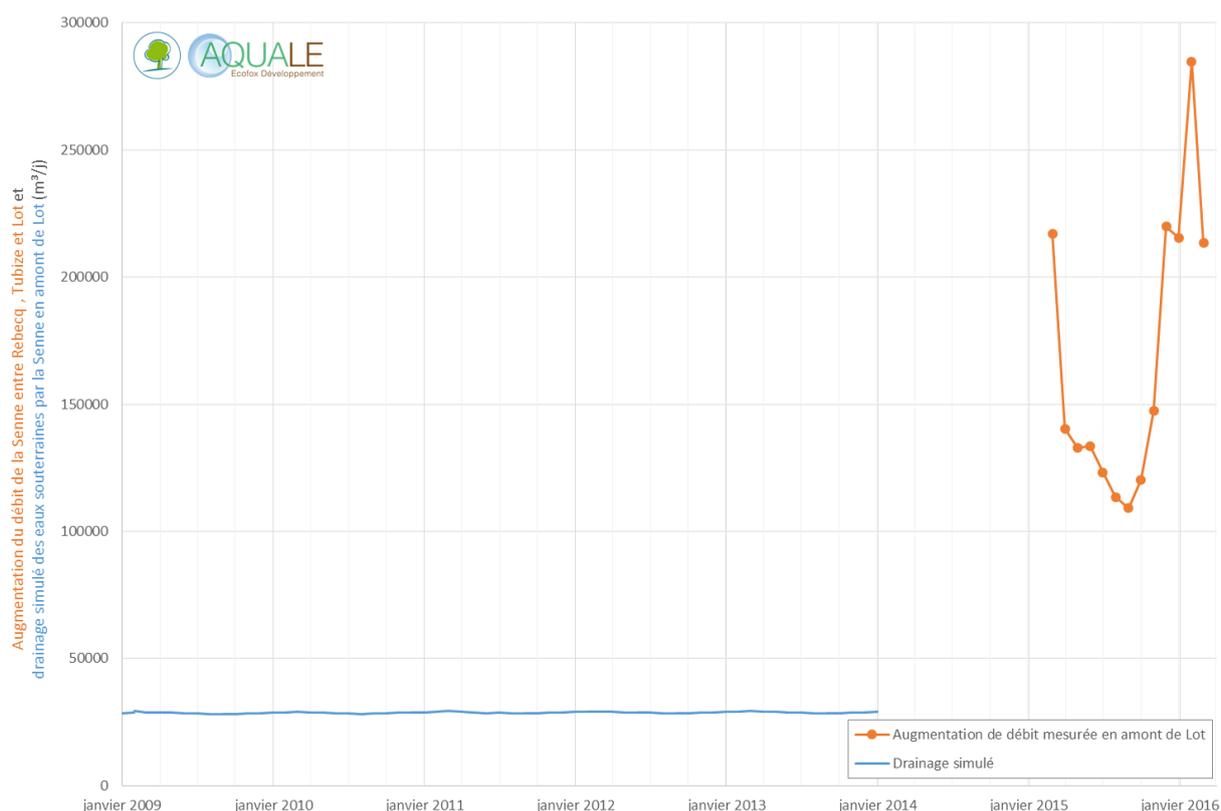


Figure 5-22 : Evolution du débit de drainage par la Senne en amont de la station de Lot simulé en régime transitoire

Il apparaît que l'augmentation du débit entre ces stations est assez variable dans le temps. Elle varie globalement entre 100 000 et 300 000 m³/j, la très grande majorité des valeurs étant située entre 120 000 et 220 000 m³/j. L'augmentation de débit liée au drainage des eaux souterraines représente une part faible dans l'augmentation du débit de la Senne. Le débit de drainage simulé peut être jugé comme bon.

5.4.3.2 LA DYLE

L'évolution du débit de la Dyle est étudiée entre les stations de Limelette et de Florival. L'augmentation moyenne mensuelle du débit de la Dyle entre ces deux stations et le débit drainé simulé pour cette même portion sont illustrés à la **FIGURE 5-23**.

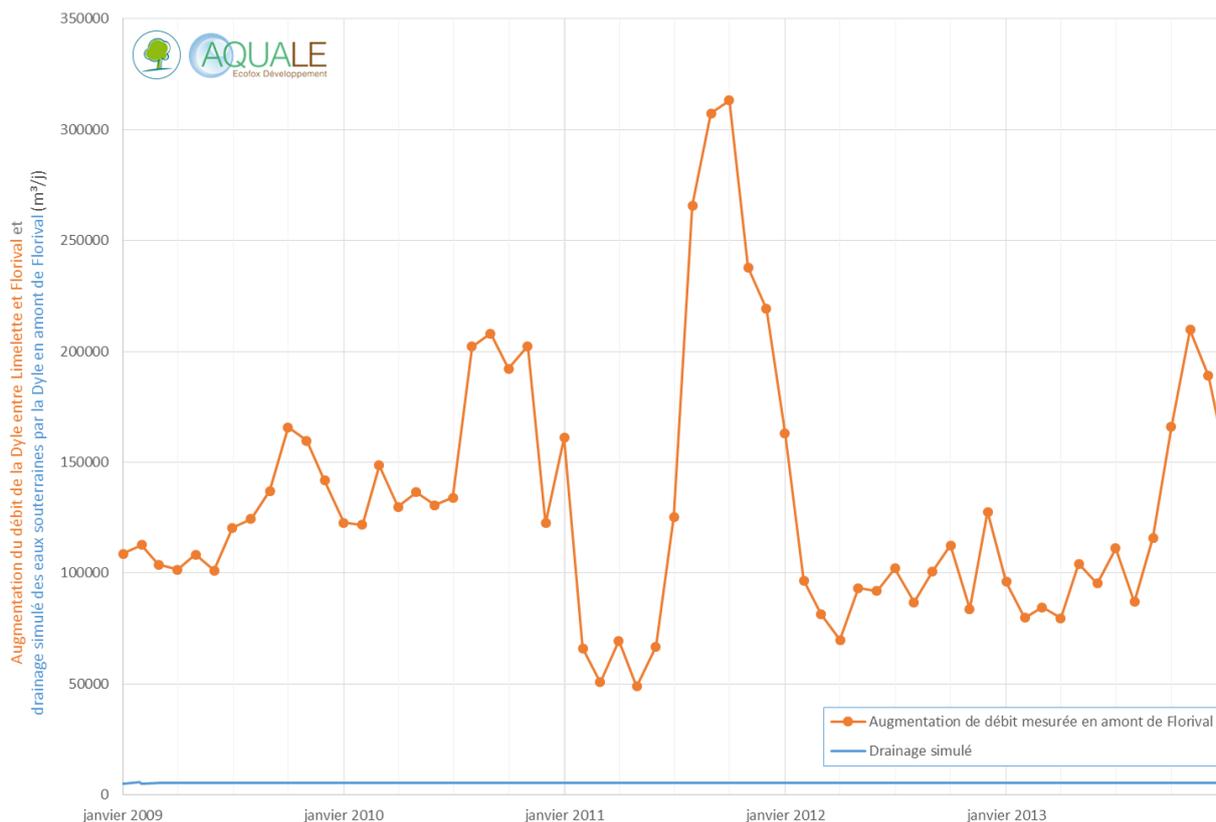


Figure 5-23 : Evolution du débit de drainage par la Dyle en amont de la station de Florival simulé en régime transitoire

Il apparaît que l'augmentation du débit entre ces deux stations est assez variable dans le temps. Elle varie globalement entre 50 000 et 300 000 m³/j, la très grande majorité des valeurs étant située entre 80 000 et 200 000 m³/j. L'augmentation de débit liée au drainage des eaux souterraines représente une part très faible dans l'augmentation du débit de la Dyle. Le débit de drainage simulé peut être jugé comme bon.

5.4.3.3 LA LASNE

L'évolution du débit de la Lasne est étudiée entre les stations de Rosières et d'Overijse. L'augmentation moyenne mensuelle du débit de la Lasne entre ces deux stations et le débit drainé simulé pour cette même portion sont illustrés à la **FIGURE 5-24**.

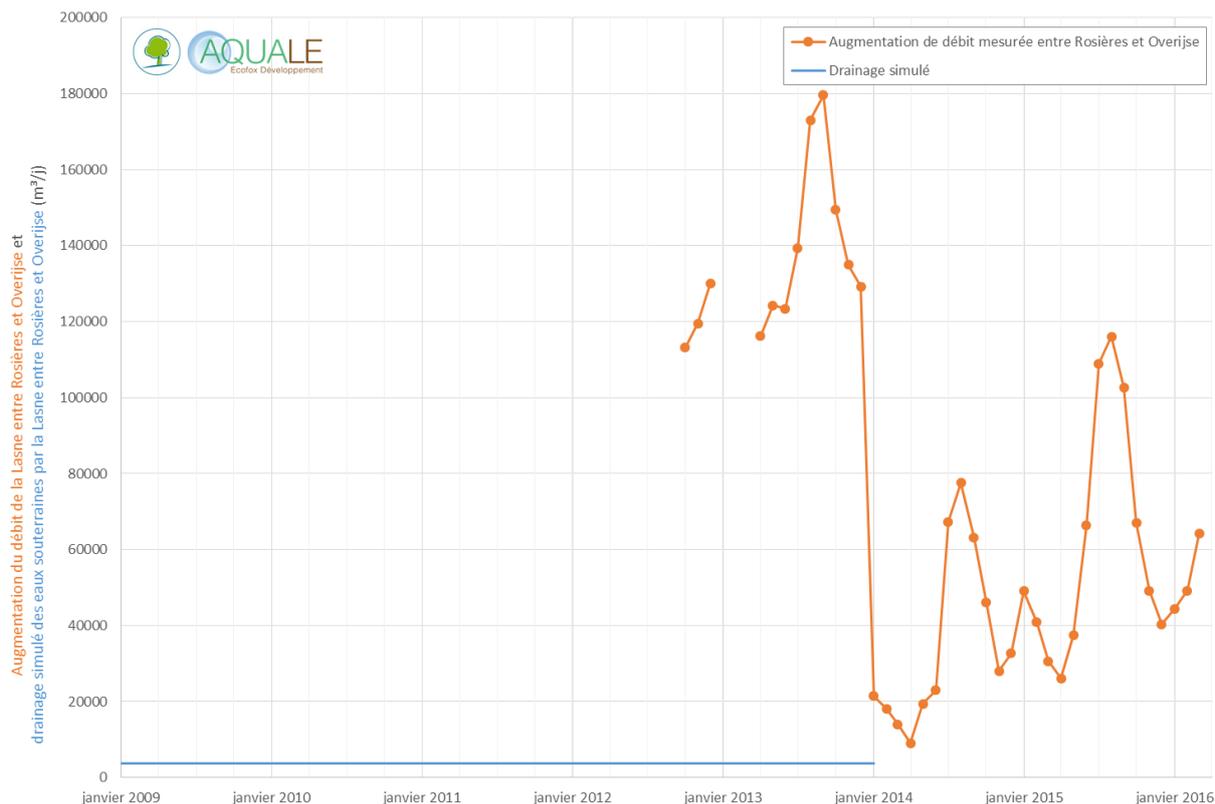


Figure 5-24 : Evolution du débit de drainage par la Lasne entre Rosières et Overijse simulé en régime transitoire

Il apparaît que l'augmentation du débit entre ces deux stations est assez variable dans le temps. Elle varie globalement entre 10 000 et 180 000 m³/j, la très grande majorité des valeurs étant située entre 20 000 et 120 000 m³/j. L'augmentation de débit liée au drainage des eaux souterraines représente une part faible dans l'augmentation du débit de la Lasne. Le débit de drainage simulé peut être jugé comme bon.

5.4.3.4 LA DENDRE

L'évolution du débit de la Dendre entre deux stations n'est pas réalisable dès lors que seule la station d'Idegem est présente.

Comme pour les autres tronçons de rivières pris en considération, le débit drainé simulé varie peu dans le temps.

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 1970 à 2013.

Pour vérifier l'état de calibration, la bonne reproduction des niveaux d'eau et des débits prélevés dans le Landénien a été vérifiée.

EN RÉGIME PERMANENT

En ce qui concerne la reproduction des niveaux d'eau, les indicateurs de calibration¹⁶ classiquement pris en compte pour juger de la qualité du modèle sont les suivants pour la période de mai-juin 2013 :

- SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 7.00 % ;
- SRMS (Scaled Root Mean Square) : 1.26 % ;
- CD (Coefficient of Determination) : 0.97,

ce qui peut être jugé vraiment bon.

Si l'on prend en considération uniquement les points situés en Région de Bruxelles-Capitale, les indicateurs de calibration sont les suivants :

- SRMFS (Scaled Root Mean Fraction Square) : 2.37 % ;
- SRMS (Scaled Root Mean Square) : 1.27 % ;
- CD (Coefficient of Determination) : 0.77,

ce qui peut être jugé très bon.

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.

Les conclusions sont les mêmes pour la calibration en régime permanent sur la période de novembre 2013.

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 seul un piézomètre (Coca-Cola) sur les 8 situés dans la zone d'intérêt est caractérisé 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 compte-tenu de la précision des données sources.

La difficulté principale de la reproduction des écoulements en régime transitoire réside dans la reproduction de la remontée à long terme observée régionalement. Les phénomènes à la source de cette remontée ne sont pas

¹⁶ Pour une très bonne calibration, les valeurs classiquement à atteindre sont < 5 % (SRMFS et SRMS) et ± 1 (CD)

suffisamment connus et il a dès lors été nécessaire de prendre des hypothèses fortes (via l'imposition de puits fictifs entre 1970 et 2002).

L'utilisation du modèle à des fins prédictives ne peut être réalisée sans prendre en considération cet aspect fondamental.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au vu des observations reprises ci-dessus, le modèle est considéré comme suffisamment calibré et apte à répondre de façon approximative aux objectifs suivants :

- estimer les ressources disponibles ;
- quantifier les échanges d'eau souterraine avec la Région Flamande.

Il est considéré que le niveau de calibration devra être amélioré par l'acquisition de données supplémentaires permettant de bien reproduire les phénomènes transitoires observés à court et long termes.

Sans prendre en considération des données supplémentaires, il est estimé qu'une amélioration de la calibration serait vaine et principalement porteuse d'une fausse précision.