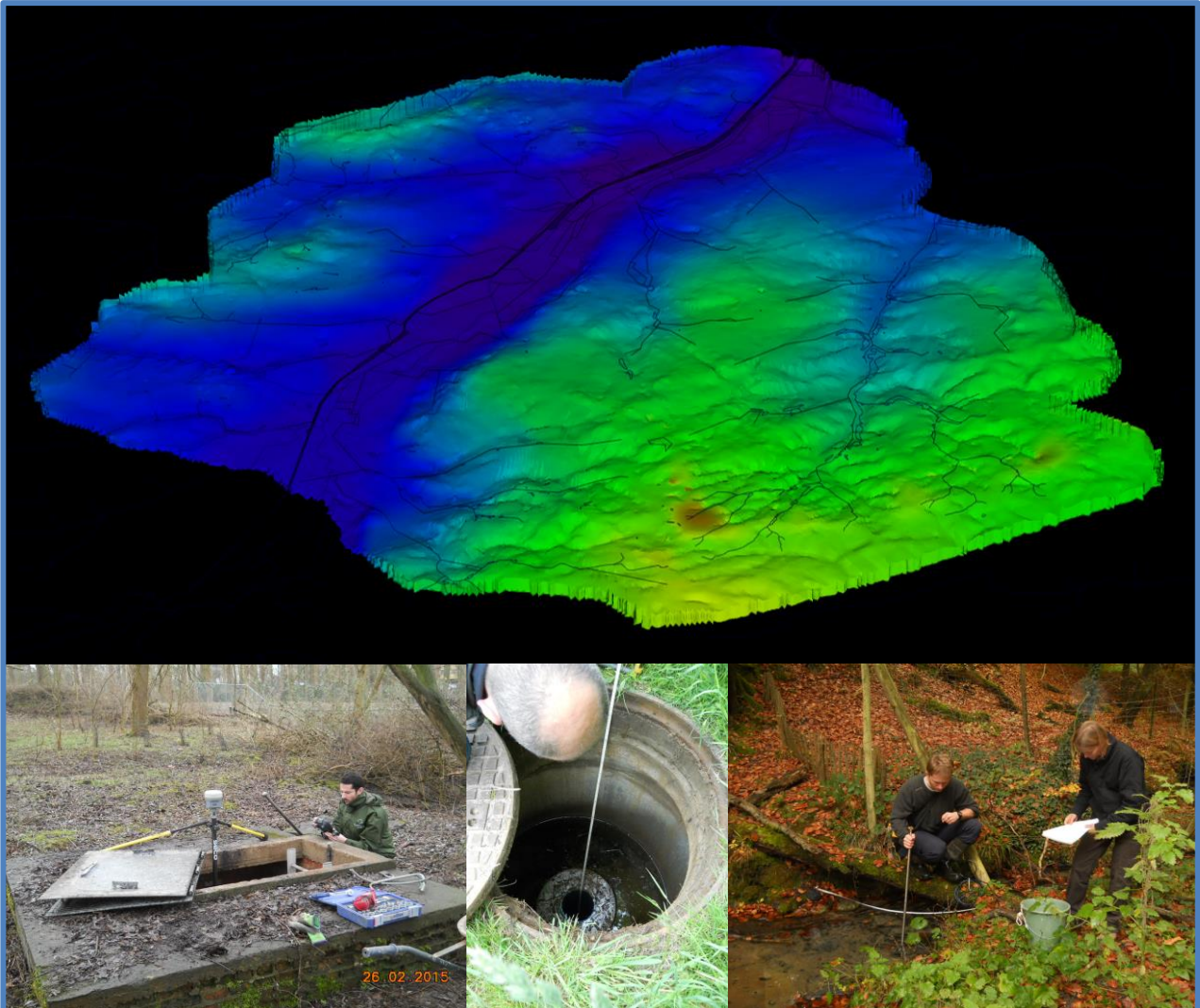


BRUSSELS PHREATIC SYSTEM MODEL

VERSION 1.0

Modélisation hydrogéologique en éléments finis
du système phréatique bruxellois



SEPTEMBRE 2020

Table des matières

1	Introduction	8
2	Méthodologie	10
3	Modèle conceptuel	11
3.1	Limites de la zone d'étude	11
3.2	Topographie	12
3.3	Hydrographie	13
3.3.1	Description	13
3.3.2	Bilan des débits entrants et sortants	17
3.3.3	Conditions aux limites	20
3.4	Grands collecteurs (région bruxelloise)	25
3.4.1	Description	25
3.4.2	Bilan des débits des grand collecteurs	27
3.4.3	Conditions aux limites	29
3.5	Hydrogéologie	30
3.5.1	Unités Stratigraphiques	30
3.5.2	Unités Hydrogéologiques	39
3.5.3	Carte piézométrique du système phréatique	42
3.5.4	Discrétisation verticale	46
3.6	Captages	47
3.6.1	Puits	47
3.6.2	Galerie drainante (région bruxelloise)	51
3.6.3	Analyse des prélèvements par unité hydrogéologique	55
3.7	Sources (région bruxelloise)	57
3.7.1	Description	57
3.7.2	Conditions aux limites	60
3.8	Recharge	61
3.8.1	Bilan hydrologique	61
3.8.2	Modèle hydrologique <i>WetSpass</i> (2007)	63
3.8.3	Synthèse	64
3.9	Fuites du réseau d'adduction	64
3.10	Paramètres hydrodynamiques	66
3.10.1	Conductivité hydraulique (K)	66
3.10.2	Coefficient d'emmagasinement (S)	69
4	Modèle numérique	74
4.1	Maillage (supermesh)	74
4.1.1	Horizontal (2D)	74
4.1.2	Vertical (3D)	77
4.2	Configuration du modèle	84
4.3	Conditions aux limites	84
4.3.1	Condition de « flux imposé » (2 ^{eme} type, Neumann)	84
4.3.2	Condition de « transfert » (3 ^{eme} type ou Cauchy)	85
4.3.3	Condition « puits »	87



4.4	Recharge	89
4.5	Paramètres hydrodynamiques	90
5	Calibration	91
5.1	Méthodologie	91
5.2	Observations	92
5.2.1	Piézométrie.....	92
5.2.2	Débit de la galerie drainante VIVAQUA	96
5.2.3	Débites de drainage du système <i>réseau hydrographique / grands collecteurs</i>	96
5.3	Critères de validité.....	98
5.3.1	Convergence	98
5.3.2	Erreur maximale acceptable.....	98
6	Résultats	100
6.1	Piézométrie	100
6.1.1	Scatter plot	100
6.1.2	Etat de calibration.....	102
6.1.3	Piézométrie simulée	106
6.2	Débit de la galerie drainante VIVAQUA	113
6.3	Débites de drainage du système <i>réseau hydrographique / grands collecteurs</i>	113
6.4	Conductivités hydrauliques	113
6.5	Conductances	128
6.6	Bilan hydrogéologique.....	129
7	Analyse de sensibilité et d'incertitude	132
7.1	Analyse d'incertitude	132
7.2	Analyse de sensibilité.....	141
7.2.1	Méthodologie	141
7.2.2	Résultats.....	142
8	Conclusions et perspectives	145
9	Bibliographie	147



Figures

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.....	11
Figure 2 : Localisation de la zone d'étude (zoom)	12
Figure 3 : Topographie de la zone d'étude	13
Figure 4 : Réseau hydrographique.....	14
Figure 5 : Réseau hydrographique (région bruxelloise).....	15
Figure 6 : Chantier de voutement entre la rue des Teinturiers et la rue des Pierres, juillet 1870 – source : coordination Senne asbl.....	16
Figure 7 : Evolution du réseau hydrographique bruxellois.....	16
Figure 8 : Débits bruts (<i>flowrate</i>) et de base (<i>baseflow</i>) des cours d'eau principaux en entrée et sortie de la région bruxelloise	18
Figure 9 : Out vs In Transfer rate (source : http://www.feflow.info)	21
Figure 10 : Localisation des limnimètres de Bruxelles Environnement (ciel ouvert) et Flowbru (pertuis) – exemple en photo : limnimètre <i>Woluwe Out</i>	22
Figure 11 : Au-dessus, limite sud du modèle - condition de flux imposé (2eme type, Neumann) – En dessous, flux de Darcy au sein de l' <i>UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele</i> (Hydrobrux, 2015)	24
Figure 12 : Carte des bassins 'épuration' en Région de Bruxelles-Capitale et dans sa périphérie © AQUIRIS25	
Figure 13 : STEP et réseau de grands collecteurs	26
Figure 14 : Débits bruts (<i>flowrate</i>) et de base (<i>baseflow</i>) des grands collecteurs en sortie des bassins 'épuration' <i>Woluwe (en excluant la partie flamande), Senne Sud et Senne Nord</i>	27
Figure 15 : Débits totaux et débits d'eau claire parasites entrants à la STEP Nord (2011) - N. de Ville, H.M. Le et M.A. Verbanck, 2013.....	29
Figure 16 : Extension et coupe du massif du Brabant (source : http://www.geolsed.ulg.ac.be/).....	30
Figure 17 : Mer du Crétacé dessinant le paléo littoral bruxellois, source : <i>Le sol de Bruxelles à travers les âges géologiques</i>	31
Figure 18 : Isopaque du quaternaire, carte géologique de Bruxelles-Nivelles (31-39).....	32
Figure 19 : Coupe transversale de la vallée de la Senne en région de Bruxelles-Capitale selon dov (https://www.dov.vlaanderen.be/).....	32
Figure 20 : Carte et coupe géologiques de la Région Bruxelles-Capitale	34
Figure 21 : Méthodologie suivie dans le cadre du projet Brustrati3D	36
Figure 22 : Représentation 2D du modèle géologique au droit de la zone d'étude.....	37
Figure 23 : Extensions des unités stratigraphiques quaternaires (dovvlaanderen) (https://www.dov.vlaanderen.be/).....	38
Figure 24 : Extension et épaisseur de l' <i>US/RBC_73 Argiles de Kortrijk (membre de Saint Maur)</i> à l'échelle de la zone modélisée	40
Figure 25 : Localisation des points de mesures piézométriques pour l'interpolation de la piézométrie par <i>Natural Neighbor</i>	43
Figure 26 : Piézométrie absolue (m-DNG) interpolée par <i>Natural Neighbor</i>	44
Figure 27 : Piézométrie relative (m/ surface) interpolée par <i>Natural Neighbor</i>	45
Figure 28 : Localisation de l' <i>UH/RBC_3 Aquiclude des argiles de Ursel et Asse</i> sur fond de piézométrie phréatique interpolée.....	46
Figure 29 : Localisation des puits actifs sur la période mai 2013 par chaque couche modélisée (<i>layer</i>).....	49
Figure 30 : Débits annuels 2013 au droit de la zone d'étude (galerie drainante VIVAQUA non comptabilisée) ..	50
Figure 31 : Tracé de la galerie drainante, serremments - source : VIVAQUA.....	52
Figure 32 : Coupe Nord-Sud de la galerie drainante	53
Figure 33 : Reproduction d'une section de la galerie Vivaqua (photo de gauche et milieu) - Serrement de la galerie (photo de droite - source : VIVAQUA).....	53
Figure 34 : Evolution entre 2008 et 2014 du débit sortant de la galerie (m³/an) et des cotes (m_DNG) des lames d'eau mesurées au droit des 5 serremments.....	54
Figure 35 : Prelevements d'eau souterraine en 2013 par unité hydrogéologique au droit de la zone d'étude	56
Figure 36 : Prelevements d'eau souterraine en 2013 par unité hydrogéologique au droit de la zone d'intérêt (région bruxelloise).....	57



Figure 37 : Localisation des sources (région bruxelloise) sur fond topographique	58
Figure 38 : Localisation des sources (région bruxelloise) sur fond de carte géologique	59
Figure 39 : Débits min, max et moyens des sources entre 2013 et 2015.....	60
Figure 40 : Bilan hydrologique	61
Figure 41 : Résultats du bilan de Thornwaite sur la station d'Uccle, IRM (2013)	62
Figure 42 : Recharge moyenne annuelle en mm/an (1833-1975) selon <i>Wetspass</i> au droit de la zone d'étude..	64
Figure 43 : Emmagasinement en nappe libre et en nappe captive (Source : BRGM).....	70
Figure 44 : Porosité totale et efficace en fonction de la lithologie type de sédiments déconsolidés (d'après N. KRESIC, 2007 et JOHNSON, 1967)	71
Figure 45 : Exemple de maillage en éléments finis (2D)	74
Figure 46 : <i>Supermesh</i> - Points et lignes	75
Figure 47 : <i>Supermesh</i> sur la zone d'étude (<i>croix</i> : piézomètre – <i>triangle</i> : captage – <i>astérisque</i> : source).....	76
Figure 48 : <i>Supermesh</i> sur la zone d'intérêt (région Bruxelles-Capitale) augmentée d'un buffer de 1 km (<i>croix</i> : piézomètre – <i>triangle</i> : captage – <i>astérisque</i> : source).....	76
Figure 49 : <i>Supermesh</i> sur une zone tampon de 150 m autour de la galerie drainante (<i>croix</i> : piézomètre – <i>triangle</i> : captage – <i>astérisque</i> : source).....	77
Figure 50 : Localisation des Coupes A (longitudinale N-S, vallée de la Senne), B (longitudinale N-S, entre vallées de la Senne et Woluwe) et C (transversale O-E).....	78
Figure 51 : (De gauche à droite) Coupes A (longitudinale N-S, vallée de la Senne), B (longitudinale N-S, entre vallées de la Senne et Woluwe) et C (transversale O-E) - axe z x 25 (m)	79
Figure 52 : Vue 3D de <i>BPSM</i> , orientation nord – axe z x 15 (m).....	80
Figure 53 : Vue 3D de <i>BPSM</i> , orientation est – axe z x 15 (m)	81
Figure 54 : Vue 3D de <i>BPSM</i> , orientation sud – axe z x 15 (m)	82
Figure 55 : Vue 3D de <i>BPSM</i> , orientation ouest – axe z x 15 (m)	83
Figure 56 : Contions de flux imposés (2 ^{ème} type ou Neumann)	85
Figure 57 : Conditions de transfert (3 ^{ème} type ou Cauchy) - réseau hydrographique & grands collecteurs, layer 1 (en haut) - galerie drainante VIVAQUA, layer 5 (en bas).....	86
Figure 58 : Conditions « puits » - captages, layer 5 (en haut) - sources, layer 5 (en bas)	88
Figure 59 : Recharge, layer 1.....	89
Figure 60 : Porosité efficace, layer 1.....	90
Figure 61 : Répartition des points d'observation (piézométrie) par <i>layer</i> et par zone – localisation des points d'observation (piézométrie) en <i>layer 5</i>	93
Figure 62 : Points d'observation, sources (piézométrie), layer 5	94
Figure 63 : Points d'observation, artefacts (piézométrie).....	95
Figure 64 : <i>Scatter plot</i> - zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un buffer de 1 km (à gauche) - reste de la zone d'étude (à droite)	100
Figure 65 : <i>Scatter plot</i> - unités hydrogéologiques UH/RBC_1a, 1b, 4, 6, 7b (de gauche à droite et de haut en bas) – centré sur la zone d'intérêt (région bruxelloise) + 1km	101
Figure 66 : <i>Scatter plot</i> - UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché – zone d'étude	102
Figure 67 : Mean difference (MD) et Scaled Root Mean Square (SRMS).....	106
Figure 68 : Piézométrie de l'UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel simulée par <i>BPSM</i> (Layer 1) (m-DNG).....	107
Figure 69 : Piézométrie de l'UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux simulée par <i>BPSM</i> (Layer 2) (m-DNG)	108
Figure 70 : Piézométrie de l'UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché simulée par <i>BPSM</i> (Layer 3) (m-DNG)	109
Figure 71 : Piézométrie de l'UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele simulée par <i>BPSM</i> (Layer 5) (m-DNG).....	110
Figure 72 : Piézométrie de l'UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt simulée par <i>BPSM</i> (Layer 7) (m-DNG)	111
Figure 73 : Piézométrie de l'UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen simulée par <i>BPSM</i> (Layer 9) (m-DNG).....	112
Figure 74 : K_h – analyse statistique – boxspot (1 ^{ère} partie)	116
Figure 75 : K_h – analyse statistique – boxspot (2 ^{ème} partie)	117



Figure 76 : K_h - analyse statistique – zone A_UHRBC_1a (IV-alluvial aquitard)	118
Figure 77 : K_h - analyse statistique – zone B_UHRBC_1a (IV-silt cover)	119
Figure 78 : K_h - analyse statistique – zone C_UHRBC_1b (IV-alluvial aquifer)	120
Figure 79 : K_h - analyse statistique – zone D_UHRBC_2 (III-Shh.and On. perched aquifer) & zone E_UHRBC_2 (III-Diest perched aquifer)	121
Figure 80 : K_h - analyse statistique – zone F_UHRBC_3 (III-U.and A. aquiclude).....	122
Figure 81 : K_h - analyse statistique – zone G_UHRBC_4 (III-Bruxellian aquifer-West) & zone H_UHRBC_4 (III-Bruxellian aquifer-East).....	123
Figure 82 : K_h - analyse statistique – zone I_UHRBC_5 (III-Merelbeke aquiclude).....	124
Figure 83 : K_h - analyse statistique – zone J_UHRBC_6 (III-Tielt aquitard)	125
Figure 84 : K_h - analyse statistique – zone K_UHRBC_7a (III-Aalbeke aquiclude)	126
Figure 85 : K_h - analyse statistique – zone L_UHRBC_7b (III-Moen aquitard)	127
Figure 86 : Conductance (<i>Transfer rate out</i>) - analyse statistique – à gauche : réseau hydrographique et grands collecteurs – à droite : galerie drainante	129
Figure 87 : Bilan hydrogéologique du <i>système phréatique</i> au droit de la région bruxelloise (2013) – inflow (bleu) / outflow (rouge)	130
Figure 87 : Bilan hydrogéologique général au droit de la région bruxelloise (2013) – inflow (bleu) / outflow (rouge).....	131
Figure 88 : Analyse d'incertitude, principe	132
Figure 89 : $\Delta head_{min}$ (bleu) et $\Delta head_{max}$ (rouge) - analyse d'incertitude - UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel	134
Figure 90 : $\Delta head_{min}$ (bleu) et $\Delta head_{max}$ (rouge) - analyse d'incertitude - UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux	135
Figure 91 : $\Delta head_{min}$ (bleu) et $\Delta head_{max}$ (rouge) - analyse d'incertitude - UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché	136
Figure 92 : $\Delta head_{min}$ (bleu) et $\Delta head_{max}$ (rouge) - analyse d'incertitude - UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele (Bruxellien)	137
Figure 93 : $\Delta head_{min}$ (bleu) et $\Delta head_{max}$ (rouge) - analyse d'incertitude - UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt	138
Figure 94 : $\Delta head_{min}$ (bleu) et $\Delta head_{max}$ (rouge) - analyse d'incertitude - UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen.....	139
Figure 95 : $\Delta head_{min}$ (bleu) et $\Delta head_{max}$ (rouge) - analyse d'incertitude – boxspot	140
Figure 96 : Etude de sensibilité globale des paramètres principaux vis-à-vis de la piézométrie des <i>unités hydrogéologiques</i> aquifères & aquitards.....	143
Figure 97 : Etude de sensibilité globale des paramètres principaux vis-à-vis du débit de la galerie drainante .	143
Figure 98 : Etude de sensibilité globale des paramètres principaux vis-à-vis des débits de drainage du système <i>réseau hydrographique/grand collecteurs</i>	144



Tableaux

Tableau 1 : Modèles Numériques de Terrain (MNT) au droit de la zone d'étude.....	13
Tableau 2 : Bilan <i>entrée/sortie</i> des <i>débits bruts</i> et <i>volumes totaux cumulés</i> sur l'année de référence 2013, Senne et Woluwe en région bruxelloise.....	19
Tableau 3 : Bilan <i>débits bruts</i> et <i>volumes totaux cumulés</i> sortants sur l'année de référence (2013), grands collecteurs.....	28
Tableau 4 : Unités Stratigraphiques de la Région de Bruxelles-Capitale (US/RBC).....	35
Tableau 5 : Unités Hydrogéologiques de la Région de Bruxelles-Capitale (UH/RBC).....	39
Tableau 6 : Discrétisation verticale : couches (layers).....	47
Tableau 7 : Synthèse des valeurs moy, min et max des lames d'eau mesurées au droit des serremments entre 2008 et 2011.....	54
Tableau 8 : Pluie efficace, Recharge et Ruissellement selon WetSpa.....	63
Tableau 9 : Approvisionnement, consommation et volumes non enregistrés par les compteurs.....	65
Tableau 10 : Débit de fuite du réseau de distribution Vs débit d'infiltration.....	65
Tableau 11 : <i>Conductivité hydraulique</i> en fonction de la lithologie type de sédiments (d'après <i>Dassargues, 2019</i>).....	67
Tableau 12 : <i>Conductivités hydrauliques</i> assignées à <i>BPSM</i> (valeurs initiales).....	68
Tableau 13 : Compressibilité de l'aquifère (m^2/N ou Pa^{-1}) par type de lithologie (source : <i>Dassargue, 2019</i>).....	72
Tableau 14 : <i>Porosités efficaces</i> et <i>coefficients d'emménagement spécifiques</i> assignés à <i>BPSM</i>	73
Tableau 15 : Bilan des débits drainés par le système <i>réseau hydrographique / grands collecteurs</i> au droit des trois bassins 'épuratoires' <i>Nord, Sud</i> et <i>Woluwe</i> (partie flamande non prise en compte pour ce dernier).....	97
Tableau 16 : Erreur maximale acceptable pour chaque type d'observation.....	99
Tableau 17 : Erreur moyenne arithmétique (MD), Ecart type (σ), Erreur quadratique moyenne (RMS), Erreur quadratique moyenne normalisée (SRMS).....	104
Tableau 18 : Comparaison des valeurs <i>observées</i> et <i>simulées</i> de débit drainé par le système <i>réseau hydrographique / grands collecteurs</i> à l'échelle des trois bassins 'épuratoires' <i>Nord, Sud</i> et <i>Woluwe</i>	113
Tableau 19 : Analyse statistique, $\log(K_h)$ à gauche et transformation des $\log(K_h)$ en K_h à droite.....	114
Tableau 20 : Analyse statistique, $\log(\text{Transfer rate out})$ à gauche et transformation des $\log(\text{Transfer rate out})$ en Transfer rate out à droite.....	128
Tableau 21 : Analyse d'incertitude par <i>Monte-Carlo</i> , paramétrisation.....	133



1 Introduction

D'une superficie de 161,38 km², la Région Bruxelles-Capitale intègre la plus grande aire urbaine de Belgique et présente une densité de population élevée dépassant les 7 582 habitants par km² en 2020.

Comme toute zone urbanisée, elle se caractérise par une grande quantité et densité d'activités humaines ayant des impacts directs ou indirects sur le sous-sol (d'un point de vue hydrogéologique, géotechnique et environnemental) et ses ressources (en eau souterraine et géothermie). On peut les classer en quatre catégories :

- *ouvrages exploitant les ressources du sous-sol* (captages d'eau potable - industriels et tertiaires, installations géothermiques sur sondes ou sur nappe,...) ayant un impact direct et pouvant rentrer en conflit d'usage si trop proches ;
- *ouvrages de génie civil et infrastructures souterraines* rentrant en interaction avec le sous-sol et notamment les eaux souterraines (pieux de fondation, caves et sous-sol, tunnels, métro, bassins d'orage,...) ;
- *réseaux hydrauliques urbains*, à savoir :
 - o *réseau hydrographique* souvent aménagé/dévié de son tracé original ;
 - o *réseau de collecteurs* caractérisé par du drainage de nappe (eau claire) ou des fuites d'effluent vers le sous-sol (eau chargée) ;
 - o *réseau d'adduction d'eau potable* caractérisé par la présence de fuites vers le sous-sol ;
- *sites pollués* souvent historiques, séquelles du passé industriel de Bruxelles, pouvant encore aujourd'hui constituer des sources potentielles de pollution des eaux souterraines, les rendant polluées pour des décennies. Sans compter le risque de contamination lié aux activités humaines actuelles qui, malgré une réglementation bruxelloise adaptée, continue d'être significatif.

La population grandissante (supérieure à 1,2 millions d'habitants en 2020) et l'urbanisation croissante de la région poussent à une gestion pro-active et rationnelle du sous-sol de la ville région pour :

- assurer la pérennité des ressources en eau souterraine et en géothermie pour les générations à venir de bruxellois ;
- gérer les risques et impacts liés à l'aménagement du territoire actuel et futur ;
- anticiper les risques et impacts à venir liés aux changements climatiques.

En outre, la *Directive Cadre Eau 2000/60/CE* reprend un ensemble de principes à respecter afin d'assurer une bonne gestion des eaux souterraines et de surface, tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif.

Dans ce contexte, une meilleure maîtrise du système hydrogéologique bruxellois apparaît nécessaire pour faire face à ces enjeux. Le développement de modèles numériques du sous-sol bruxellois et plus particulièrement le recours à la *modélisation hydrogéologique*, permettant de reproduire numériquement et simuler l'écoulement des eaux souterraines ainsi que les processus de transport de soluté (ex : pollutions) ou thermique (géothermie) existant au sein des nappes aquifères, apparaît opportun pour la mise à disposition d'outils d'aide à la décision exploitables par un hydrogéologue. Ce dernier étant en capacité de réaliser des simulations prédictives quantifiant l'ampleur des impacts à venir à court et long terme pour *in fine* conseiller au mieux les gestionnaires et décideurs institutionnels/politiques vis-à-vis de mesures de gestion du sous-sol.

Un premier modèle hydrogéologique en *éléments finis*, dénommé *Hydrobrux* et développé sur le logiciel FEFLOW®, a été exploité à partir de 2015 par Bruxelles Environnement. Il est obsolète depuis 2019. Il s'est focalisé sur la *masse d'eau souterraine*¹ des *sables du Bruxellien*, localisée en Région de Bruxelles-Capitale sur le versant est de la vallée de la Senne. Cette ressource est de première importance puisqu'environ 80% de l'eau captée en région de Bruxelles-Capitale, tous usages confondus, provient de cette masse d'eau souterraine, avec une forte majorité destinée à l'alimentation en eau potable (donnée de 2018). Les secteurs industriels et tertiaires exploitant en moindre mesure cette masse d'eau souterraine.

Un second modèle hydrogéologique en *éléments finis*, dénommé **Hydroland** et développé sur le logiciel FEFLOW®, est exploité depuis 2016 par Bruxelles Environnement. Il se focalise sur l'aquifère captif des *sables*

¹ Une masse d'eau souterraine y est définie comme étant un volume distinct d'eau souterraine à l'intérieur d'un ou plusieurs aquifères.



du *Landénien*, s'étendant sur la totalité du territoire de la Région de Bruxelles-Capitale et constituant le second aquifère stratégique (après celui des *sables du Bruxellien*), notamment exploité par le secteur industriel - tertiaire et pour des usages géothermiques.

Un dernier modèle hydrogéologique en *éléments finis* relatif au *système phréatique*, développé sur le logiciel FEFLOW® et dénommé **Brussels Phreatic System Model (BPSM)**, est exploité depuis 2019. Ce modèle hydrogéologique permet de simuler les processus d'écoulement des eaux souterraines au sein des unités hydrogéologiques du système phréatique bruxellois (*sables du Bruxellien* compris). *BPSM* englobe donc *Hydrobrux* et constitue une version améliorée de ce dernier.

BPSM répond à deux principaux objectifs :

- **développer un outil de gestion stratégique de la ressource en eau souterraine (et en géothermie) du système phréatique**, permettant de simuler les pressions quantitatives et qualitatives s'exerçant sur les eaux souterraines ;
- **constituer des cartes piézométriques de référence (mai 2013)** à savoir :
 - o cartes piézométriques (m-DNG) des unités hydrogéologiques aquifères et aquitards composant le système phréatique bruxellois :
 - *UH/RBC_1b* Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux ;
 - *UH/RBC_2* Système aquifère sableux perché ;
 - *UH/RBC_4* Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele (ou plus connu sous le nom de *sables du Bruxellien*) ;
 - *UH/RBC_6* Aquitard des sables et argiles de Tielt ;
 - *UH/RBC_7b* Aquitard des sables et argiles de Moen.
 - o hauteurs du niveau phréatique (m-DNG) ;
 - o profondeurs du niveau phréatique (m).

Il y a lieu de préciser qu'*Hydroland* répond à des objectifs similaires à ceux de *BPSM*, à savoir :

- développer un outil de gestion stratégique de la ressource en eau souterraine (et en géothermie) de l'aquifère des *sables du Landénien* ;
- constituer une carte piézométrique de référence de l'aquifère des *sables du Landénien* (mai 2013).

Le présent rapport se focalise sur la documentation de la construction de *BPSM* dans sa version v1.0 (la documentation de la construction d'*Hydroland* dans sa version v1.0. est disponible sur le site internet de Bruxelles Environnement). **Il ne documente pas la réalisation de simulations prédictives**. Néanmoins, une série d'exemples d'analyse prédictive potentiellement réalisable avec ce type de modèle est synthétisée en §8.



2 Méthodologie

Les 6 étapes de construction du modèle *BPMS* sont reprises ci-dessous :

- collecte des données de base : données géographiques, géologiques, hydrogéologiques, hydrologiques et environnementales ;
- modèle conceptuel : analyse des données recueillies et simplification réaliste du système hydrogéologique. Définition de l'extension 3D du modèle, discrétisation verticale, conditions aux limites (potentiels imposés, flux imposés, drainage, ...), définition des sollicitations (recharge, captages,...) ;
- modèle numérique : intégration du modèle conceptuel dans le logiciel de modélisation FEFLOW ;
- calibration : adaptation des paramètres d'entrée du modèle jusqu'à reproduction des *observations* (piézométrie, débits). Dans le cadre de la version v1.0 de *BPSM*, la calibration est réalisée en régime permanent uniquement, sur la période *mai 2013*. Le processus s'appuie sur trois objectifs :
 - o reproduction de la piézométrie ;
 - o reproduction des débits de la galerie drainante VIVAQUA ;
 - o reproduction des débits de drainage entrants dans le système *réseau hydrographique / grands collecteurs* ;
- analyse des résultats : analyse des résultats de simulation du modèle calibré, analyse statistique des paramètres ayant été sujets à la calibration, génération des premières cartes piézométriques des unités hydrogéologiques aquifères et aquitards ;
- analyse de sensibilité et d'incertitude : estimation de la sensibilité des paramètres d'entrée principaux sur les résultats du modèle calibré (piézométrie et débits) et quantification de l'incertitude du modèle vis-à-vis de la piézométrie simulée ;

BPMS étant mené à évoluer dans le futur, **des upgrades sont à prévoir à moyen/long terme et notamment** :

- validation : vérification de la capacité du modèle à reproduire d'autres événements passés en régime permanent (et si nécessaire adaptation de la calibration) ;
- calibration en régime transitoire. Une **version 2** de *BPSM* doit assurer la calibration de ce dernier en régime transitoire.



3 Modèle conceptuel

3.1 Limites de la zone d'étude

La zone d'intérêt est la région de Bruxelles-Capitale. Afin d'assurer un niveau de précision optimal du modèle hydrogéologique au droit de cette zone, la zone modélisée ou « zone d'étude » doit nécessairement être plus large que la zone d'intérêt.

La définition de la zone modélisée s'est basée sur l'analyse macroscopique des contextes hydrographique (§3.3) et hydrogéologique (§3.5) entourant la région bruxelloise.

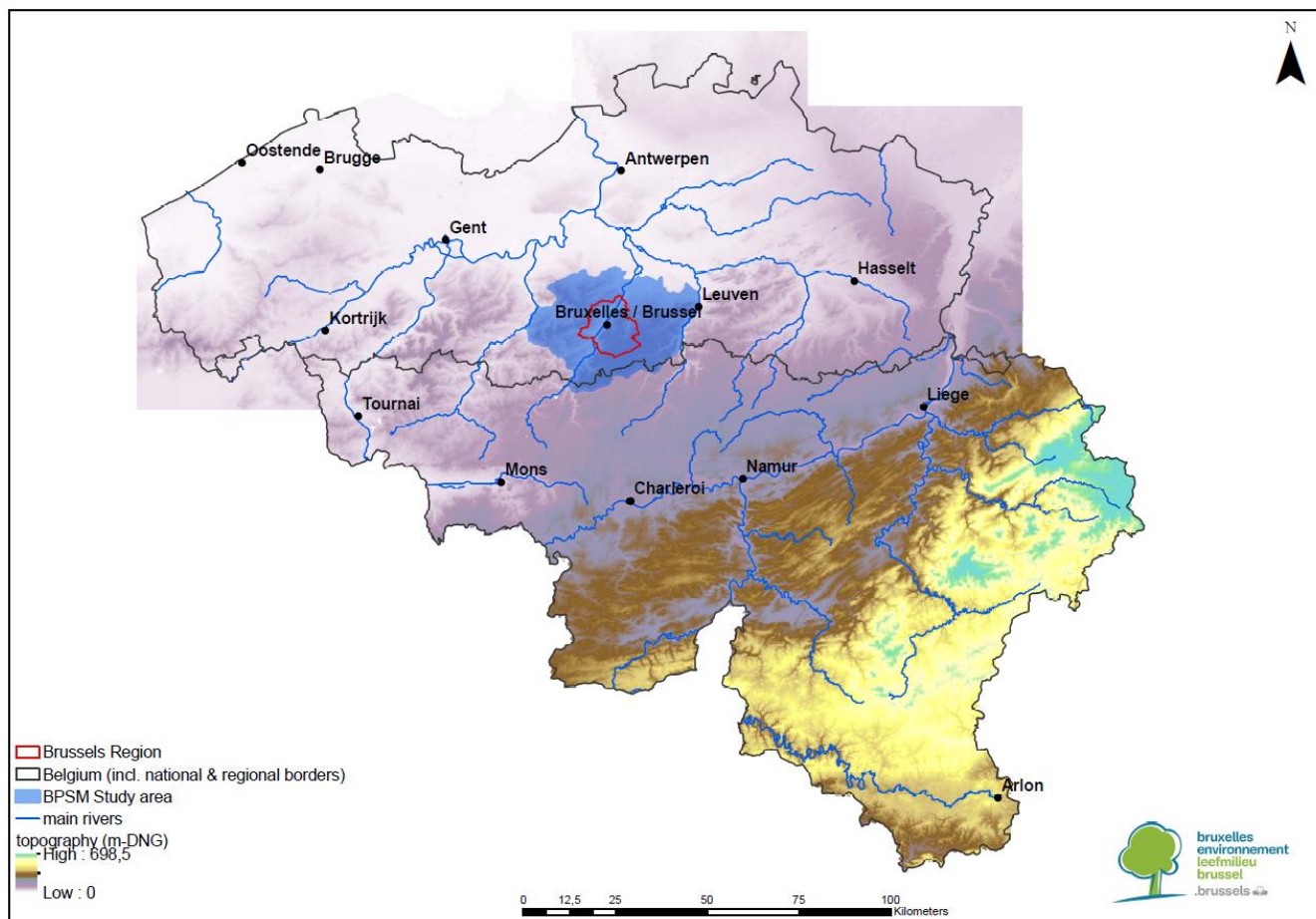


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Elle présente une superficie totale de 974,46 km² et est essentiellement délimitée par le réseau hydrographique hors région bruxelloise se comportant comme une limite hydrodynamique drainant majoritairement le système phréatique (§3.3.1). Ces limites sont plus précisément constituées :

- Au sud par l'*Hain*, le *Patiaux*, l'*Argentine* et la *Lasne* ;
- A l'ouest par la *Sennette*, la *Senne*, la *Dendre* et une série de ruisseaux constituant le réseau hydrographique du *Brabant flamand Ouest* (les crêtes de partage étant ici négligées) ;
- A l'est par la *Dyle* et la *Lasne* ;
- Au nord par un amas de ruisseaux et canaux (très dense) constituant le réseau hydrographique du *Brabant flamand Nord*.

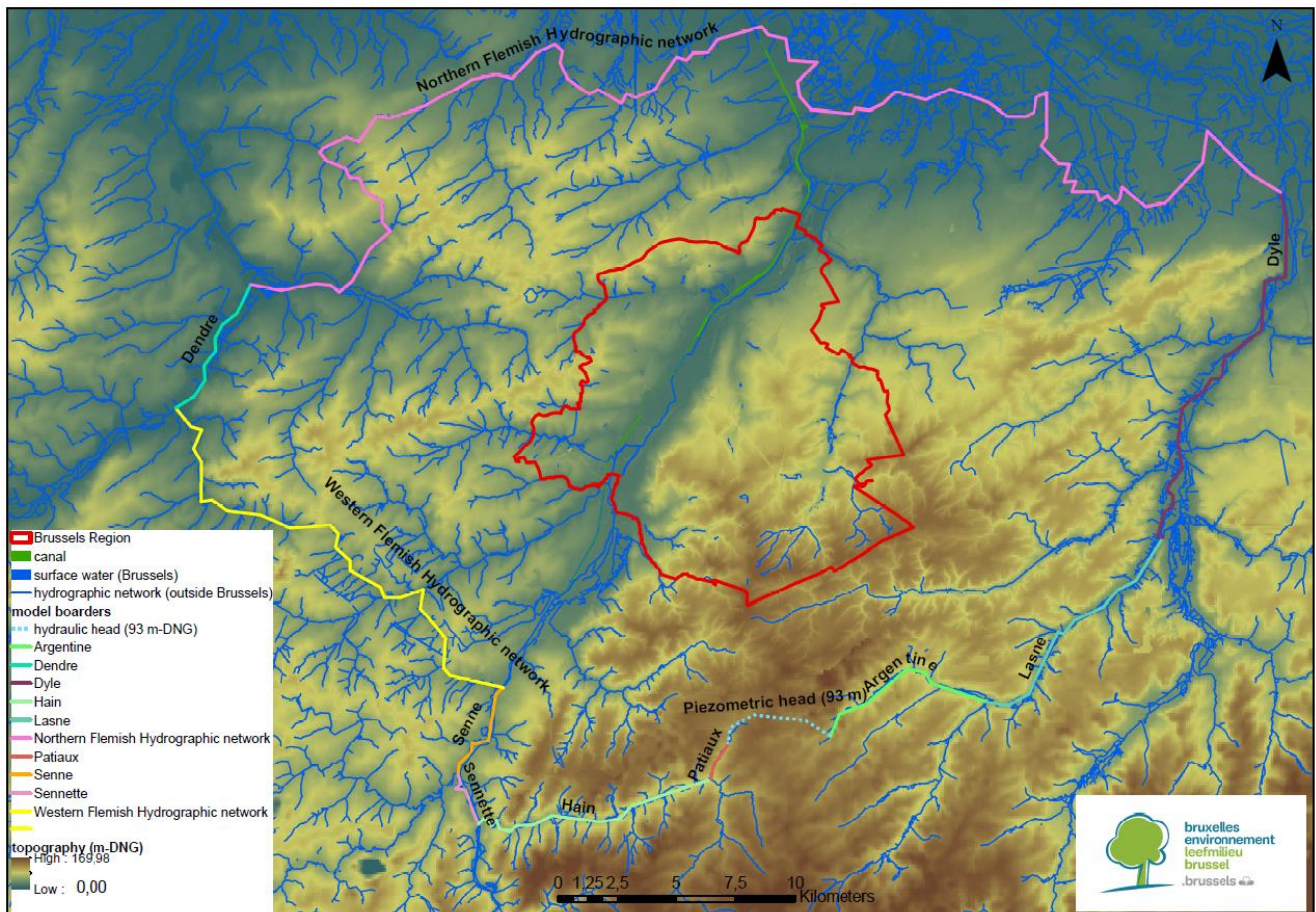


Figure 2 : Localisation de la zone d'étude (zoom)

La limite sud du modèle fait également apparaître une crête de partage des eaux au sein de l'aquifères des sables du Bruxellien (UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele) partageant les sous bassins versants hydrogéologiques du Patiaux et de l'Argentine. Au niveau de cette zone dépourvue de ruisseau, la piézométrie cartographiée a été exploitée pour la définition d'une « limite à flux imposé » (§3.3.3.2).

3.2 Topographie

La topographie de la zone d'étude est essentiellement marquée par l'érosion fluviale générée par les cours d'eau composant les bassins versants de la Senne, la Dendre et la Dyle (Figure 2). Elle est connue avec précision.

Au droit de la zone d'étude, le point le plus bas est identifié à la cote absolue 7.61 mètres, au nord de la zone d'étude en aval de la vallée de la Senne. Le point le plus haut est identifié à la cote absolue 145.09 mètres, au sud de la zone d'étude au niveau des plateaux de la forêt de Soignes en région flamande (Figure 3).

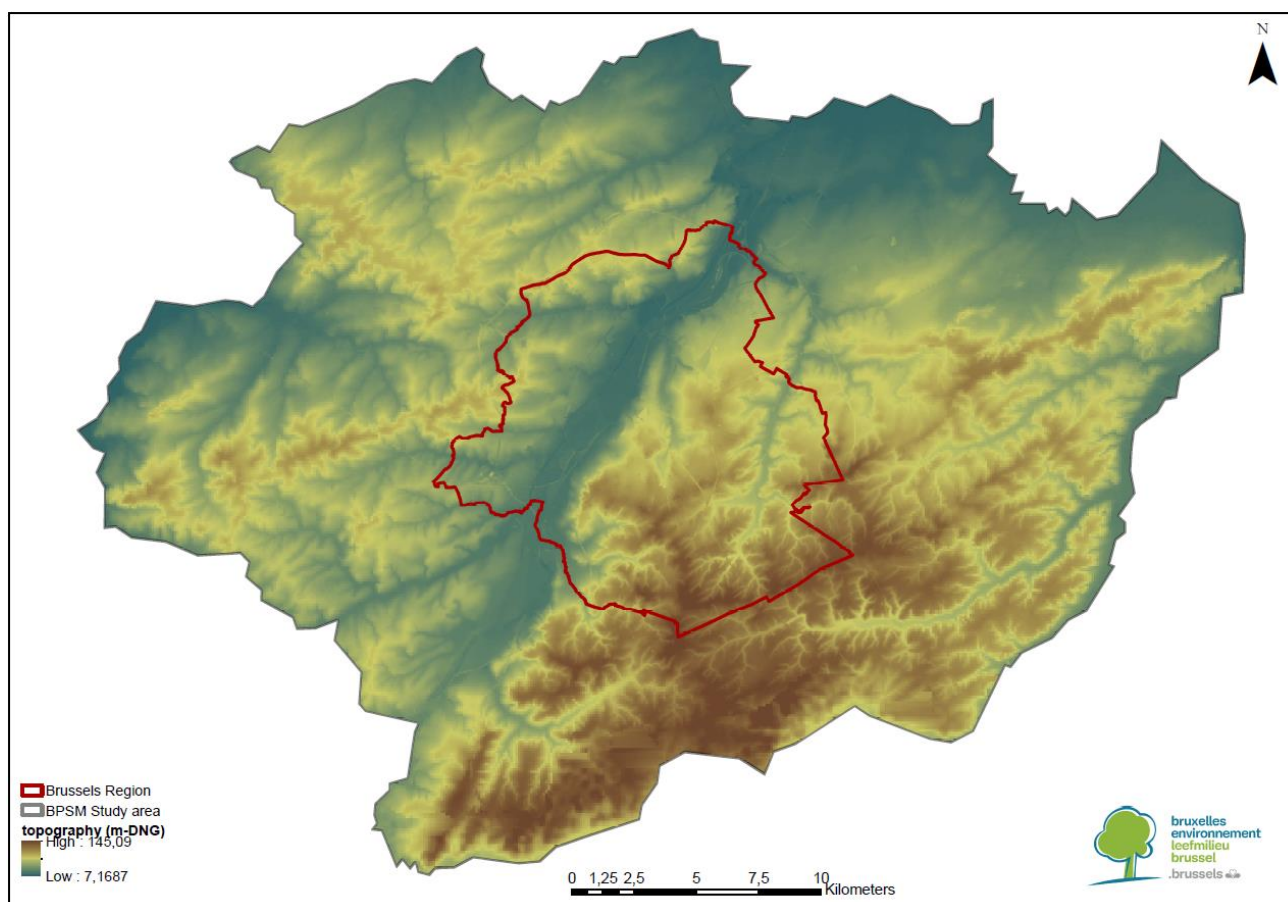


Figure 3 : Topographie de la zone d'étude

Une couche en format *raster* couvre l'ensemble de la zone d'étude par agrégation de trois modèles numériques de terrain disponibles (*MNT*) ci-dessous :

MNT	Description	Source	Format	Résolution (m)	Couverture
LIDAR	Llght Detection And Ranging	Urbis, 2013	Raster	1	région bruxelloise + 500 m
IGN	-	IGN, 2013	Raster	20	carré de 20 * 20 km autour de la région bruxelloise
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission	Nasa, 2013	Raster	80	toute la zone modélisée

Tableau 1 : Modèles Numériques de Terrain (*MNT*) au droit de la zone d'étude

3.3 Hydrographie

3.3.1 Description

La zone d'étude s'étale sur trois principaux bassins versants (**Figure 4**) :

- la *Senne* et la *Woluwe* dont l'extension combinée de leurs bassins versants respectifs recouvre la quasi-totalité du territoire de la région bruxelloise ;
- la *Dendre* longeant la frontière ouest de la zone modélisée ;
- la *Dyle* longeant la frontière est de la zone modélisée.



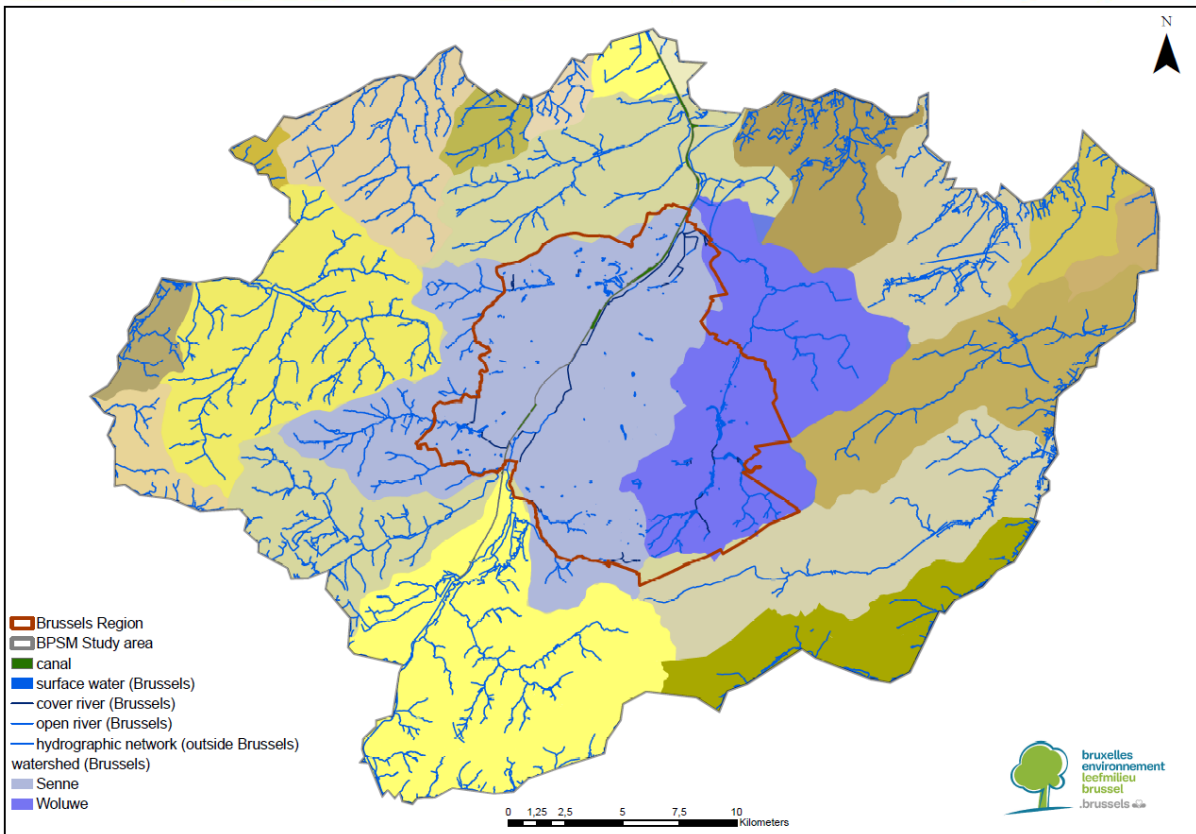
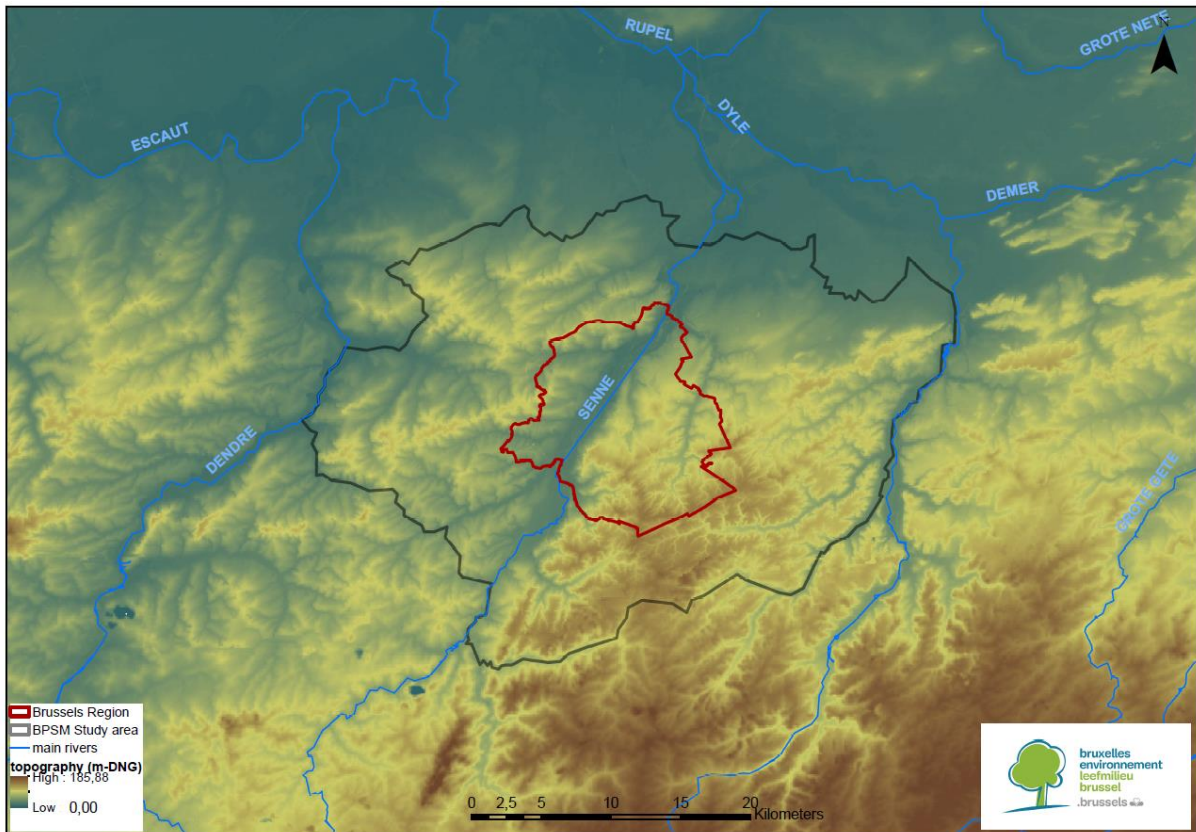


Figure 4 : Réseau hydrographique

La Région de Bruxelles-Capitale est établie dans la vallée de la *Senne*, rivière longue de 103 km incluse dans le bassin versant de *l'Escaut*.





Figure 6 : Chantier de voutement entre la rue des Teinturiers et la rue des Pierres, juillet 1870 – source : coordination Senne asbl

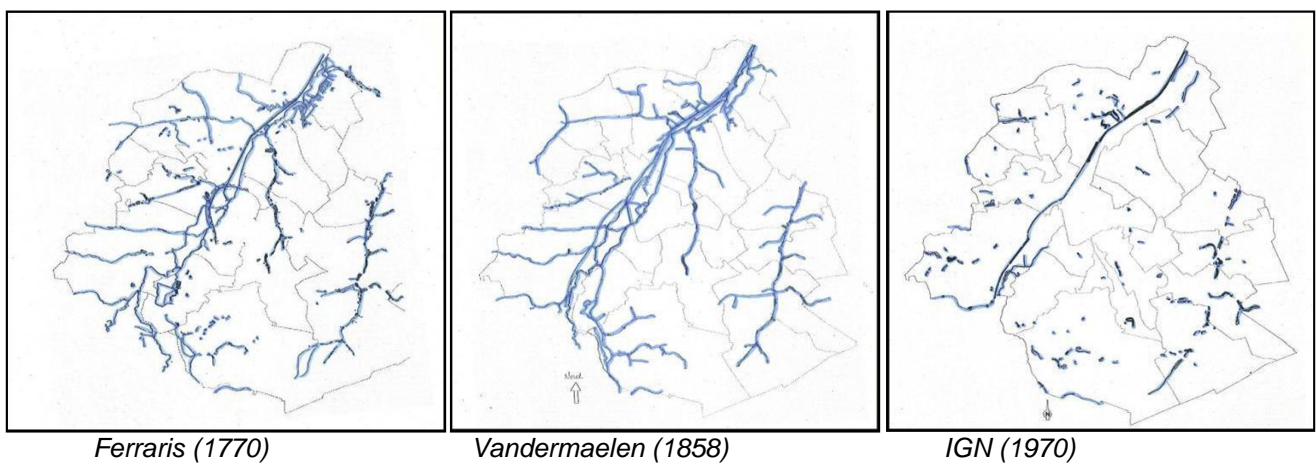


Figure 7 : Evolution du réseau hydrographique bruxellois



3.3.2 Bilan des débits entrants et sortants

Un bilan des *débits bruts* et des *débits de base*² entrant et sortants de la région bruxelloise a été réalisé au niveau des deux cours d'eau principaux bruxellois, à savoir la *Senne* et la *Woluwe*, par l'exploitation des données de monitoring de débit des eaux de surface *flowbru*³.

La *Woluwe* prenant sa source en région bruxelloise, seul le bilan des débits sortants est réalisé au droit de la station *Woluwe sortie region*.

En ce qui concerne la *Senne*, le bilan a pu être réalisé entre les débits entrants et sortants mesurés aux stations suivantes, localisées en **Figure 5** :

- Débits entrants :
 - o *Senne entrée Région* ;
 - o *Sint-Pieters-Leeuw/Zuunbeek* ;
 - o *Neerpedebeek* ;
 - o *Vogelzangbeek* ;
- Débits sortants :
 - o *Linkebeek/Verrewinkelbeek*;
 - o *Senne sortie Région*.

La station *Senne Paepsem*, par sa localisation juste en amont du voutement de la *Senne*, apparait comme une station intermédiaire intéressante à l'analyse. Elle s'avèrera également très utile dans le cadre de l'analyse de la bonne calibration du modèle (§5.2.3).

La **Figure 8** reprend les *débits bruts* ainsi que les *débits de base* mesurés, au pas de temps de 15', au droit de chaque station entre le 01/01/2013 et le 31/12/2013. Il y a lieu de noter qu'en l'absence de données exploitables sur l'entièreté de l'année 2013, les données des stations *Woluwe sortie region* et *Linkebeek/Verrewinkelbeek* de 2014 sont exploitées et présentées en superposition.

² Débit minimum enregistré sur au moins 6 jours consécutifs sensé représenté le débit provenant du drainage des eaux souterraines (valeur potentiellement surestimée)

³ Réseau de surveillance quantitative des eaux de surface et des eaux usées ainsi que de la pluviométrie en Région de Bruxelles-Capitale (<https://www.flowbru.be/fr>)



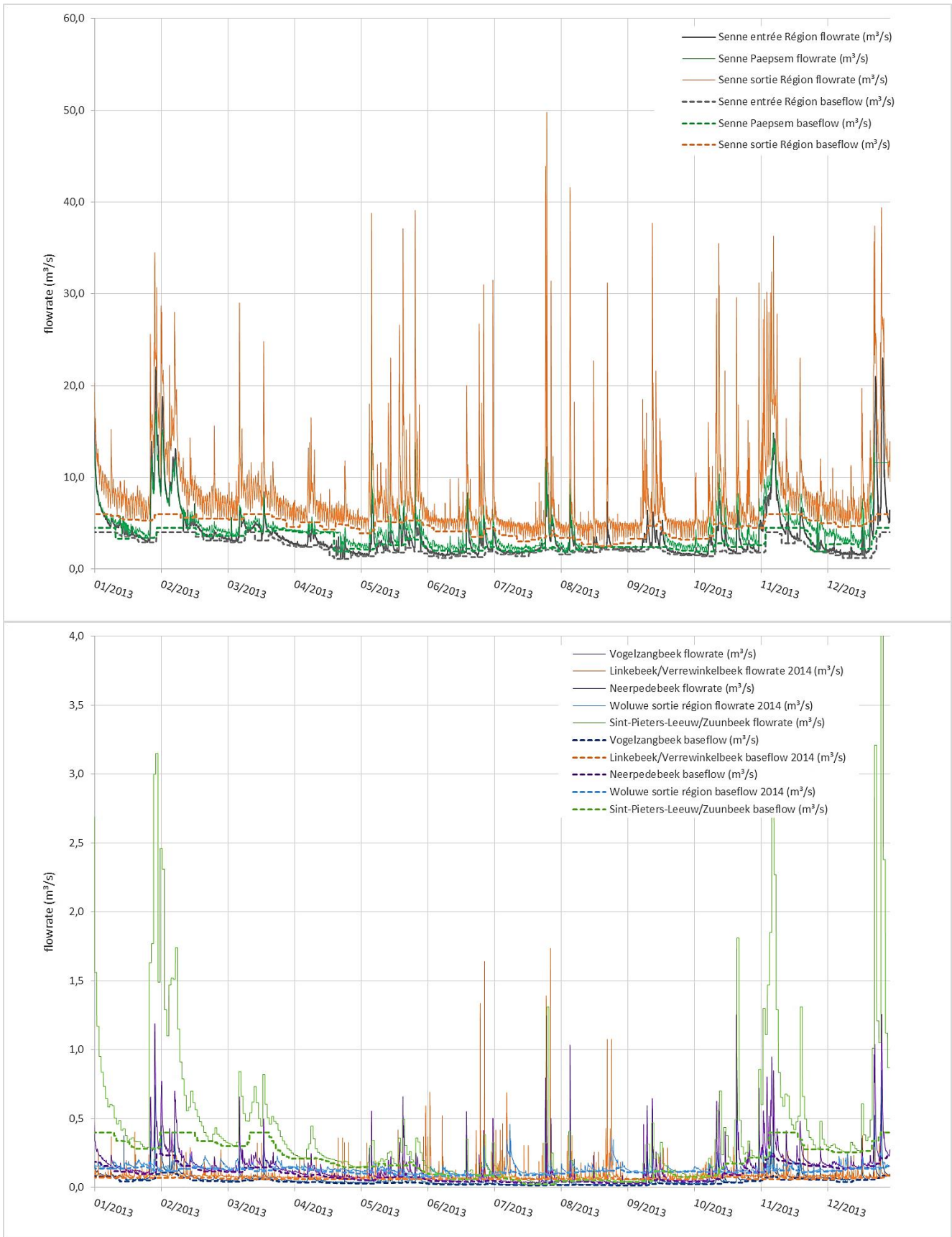


Figure 8 : Débits bruts (*flowrate*) et de base (*baseflow*) des cours d'eau principaux en entrée et sortie de la région bruxelloise



Le bilan entrée/sortie des débits bruts et volumes totaux cumulés sur l'année de référence (2013) au niveau de la Senne et la Woluwe est présenté au **Tableau 2**.

Bassin versant	Station	Volume total 2013 (m³)	Volume "Baseflow" 2013 (m³) (optimiste)	% d'eau souterraine (optimiste)
Woluwe	Woluwe sortie Région (OUT)	5.387.342	4.481.648	
	SOMME (IN)	0	0	
	SOMME (OUT)	5.387.342	4.481.648	
	BALANCE	-5.387.342	-4.481.648	83,2%
Senne	Sint-Pieters-Leeuw/Zuunbeek (IN)	13.148.003	6.213.861	
	Neerpedebeek (IN)	4.567.874	2.994.764	
	Vogelzangbeek (IN)	1.932.399	1.262.775	
	Senne entrée Région (IN)	114.044.130	71.859.780	
	<i>Senne Paepsem</i>	137.763.270	94.086.360	
	Senne sortie Région (OUT)	252.399.330	146.288.070	
	Linkebeek/Verrewinkelbeek (OUT)	3.358.006	2.504.971	
	SOMME (IN)	133.692.406	82.331.180	
	SOMME (OUT)	255.757.336	148.793.041	
BALANCE	-122.064.930	-66.461.861	54,4%	

Bassin versant	Station	Débit max. (m³/jour)	Débit moyen 2013 (m³/jour)	Volume "Baseflow" 2013 (m³) (optimiste)	% d'eau souterraine (optimiste)
Woluwe	Woluwe sortie Région (OUT)	39.718	14.760	12.278	
	SOMME (IN)				
	SOMME (OUT)		14.760	12.278	
	BALANCE		-14.760	-12.278	83,2%
Senne	Sint-Pieters-Leeuw/Zuunbeek (IN)	34.560	36.022	17.024	
	Neerpedebeek (IN)	108.665	12.515	8.205	
	Vogelzangbeek (IN)	83.808	5.294	3.460	
	Senne entrée Région (IN)	1.987.200	312.450	196.876	
	<i>Senne Paepsem</i>	1.486.080	377.434	257.771	
	Senne sortie Région (OUT)	4.302.720	691.505	400.789	
	Linkebeek/Verrewinkelbeek (OUT)	149.999	9.200	5.522	
	SOMME (IN)		366.281	225.565	
	SOMME (OUT)		700.705	406.311	
BALANCE		-334.424	-180.746	54,0%	

Tableau 2 : Bilan entrée/sortie des débits bruts et volumes totaux cumulés sur l'année de référence 2013, Senne et Woluwe en région bruxelloise



On considère que le rapport $\frac{(volume\ ou\ débit\ de\ base)_{sortant}}{(volume\ ou\ débit\ total)_{sortant}}$ (%) issu des données extraites des *time series* de la

Figure 8 donne une approximation *optimiste* de la fraction d'eau de surface ayant une origine souterraine (paramètre % d'eau souterraine dans le Tableau 2). Le caractère *optimiste* étant induit par la méthode de calcul du *débit de base* s'appuyant sur le calcul d'un débit minimum enregistré sur 6 à 14 jours consécutifs. Cette approche est susceptible de comptabiliser des rejets/ruissellements d'eau de surface localisés en région bruxelloise dès lors que ces rejets sont relativement continus dans le temps. Cette approche s'avère par contre très efficace pour rejeter les apports d'eau de surface issus de processus « rapides » (< 6 jours) de rejets/ruissellement.

Il ressort de ces tableaux que la part d'eau souterraine pourrait atteindre en 2013 (valeurs optimistes) :

- **83.2%** du débit de la *Woluwe* ;
- **54,4 %** du débit de la *Senne*.

Il y a lieu de préciser que :

- les valeurs 2014 de *débit* et *volume* issues des stations *Woluwe sortie region* et *Linkebeek/Verrewinkelbeek* ont été corrigées d'un facteur 1.24 égal au rapport de la *pluie efficace* calculée entre l'année 2013 de référence (232.92 mm) et l'année 2014 (187.41 mm) selon la méthode de *Thornwaite* (§3.8.1) ;
- que le choix s'est porté sur les stations permettant au mieux d'effectuer un bilan *entrée/sortie* de région mais que ce choix est contraint par la disponibilité de stations stratégiquement placées en entrée/sortie de région et présentant des données de *débit* exploitables.

3.3.3 Conditions aux limites

3.3.3.1 Réseau hydrographique

Une condition de « transfert » (*3^{ème} type, Cauchy*) est appliquée au droit du réseau hydrographique, frontières de la zone d'étude incluses.

Cette condition applique des propriétés de transfert entre un potentiel de référence correspondant à l'altitude de la surface d'eau libre (limnimétrie) et la piézométrie calculée par le modèle. Le flux est conditionné par un terme de *conductance* décrivant les propriétés hydrodynamiques du lit du cours d'eau/étang. Il est défini comme suit :

$$\Phi = K_{surf} \times e$$

Équation 1

Avec :

- K_{surf} : conductivité hydraulique du lit du cours d'eau/étang (m/s) ;
- e : épaisseur du lit du cours d'eau/étang (m).

Le débit d'entrée/sortie est calculé de la manière suivante :

$$Q = A \times \Phi \times (h_{ref} - h)$$

Équation 2

Avec :

- Q : débit d'entrée ou sortie de/vers le modèle (m³/h) ;
- A : surface de contact eaux de surface/eaux souterraines (m²) ;
- Φ : conductance (1/s) ;
- h_{ref} : niveau d'eau de référence des eaux de surface (limnimétrie) (m-DNG) ;
- h : niveau piézométrique (m-DNG).



En fonction de la direction du gradient, le modèle distingue deux *conductances* différentes :

- alimentation, depuis les eaux de surface (*Transfer rate in*) ;
- drainage, vers les eaux de surface (*Transfer rate out*).

Généralement, le paramètre *Transfer rate out* (image de gauche dans la **Figure 9**) est supérieur au *Transfer rate in* (image de droite), car l'eau souterraine propre " chasse " l'espace poreux dans la couche de colmatage. Par contre, l'infiltration d'eau de surface généralement riche en matières en suspension a tendance à obstruer l'espace poreux (*clogging*) diminuant la perméabilité du lit.

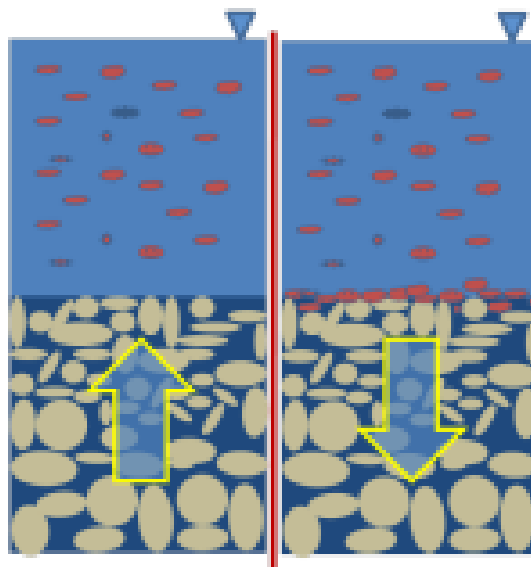


Figure 9 : Out vs In Transfer rate (source : <http://www.feflow.info>)

En ce qui concerne la définition des valeurs de *niveau d'eau de référence* h_{ref} au droit du réseau hydrographique à ciel ouvert :

Les valeurs de *niveau d'eau de référence* h_{ref} sont définies par le *MNT* (§3.2). Une comparaison des valeurs topographiques du *MNT* avec des mesures acquises entre 2009 et 2013, issues de 38 limnimètres installés par Bruxelles Environnement sur les différents étangs et cours d'eau à ciel ouvert bruxellois (**Figure 10**) a révélé :

- une surestimation par le *MNT* de la limnimétrie d'une valeur moyenne de 0.86 mètres, pour une médiane de 1.01 mètres (et un écart type élevé de 1.14 mètres) ;
- une forte stabilité (évolution saisonnières très faible) notamment au niveau des étangs, moins sensibles aux variations dues aux apports d'eau de ruissellement.

En l'absence de données limnimétriques assez précises et en quantité suffisante, l'usage du *MNT* apparaît comme une alternative acceptable pour la définition du *niveau d'eau de référence* h_{ref} au droit de la zone d'intérêt et par extrapolation au droit de la zone modélisée, selon la relation ci-dessous :

$$h_{ref} = \text{topographie MNT} - 1 \text{ m}$$

En ce qui concerne la définition des valeurs de *niveau d'eau de référence* h_{ref} au droit du réseau hydrographique en pertuis :

Une analyse similaire a pu être menée, avec moins de succès, par comparaison des valeurs topographiques du *MNT* avec des mesures acquises entre 2009 et 2013, issues de 19 limnimètres

installés par la *Société Bruxelloise de Gestion de l'Eau* (réseau *flowbru*⁴) sur les différents cours d'eau en pertuis bruxellois (**Figure 10**). Il ressort de cette synthèse que la corrélation entre les niveaux limnimétriques et le *MNT*, avec un écart moyen de 2,28 mètres pour une médiane de 2.17 mètres (et un écart type très élevé de 3.48 mètres), semble difficile. Dans ces conditions, ne disposant pas de données limnimétriques exploitables, il est proposé d'appliquer les mêmes hypothèses que celles définies pour le réseau hydrographique en ciel ouvert.

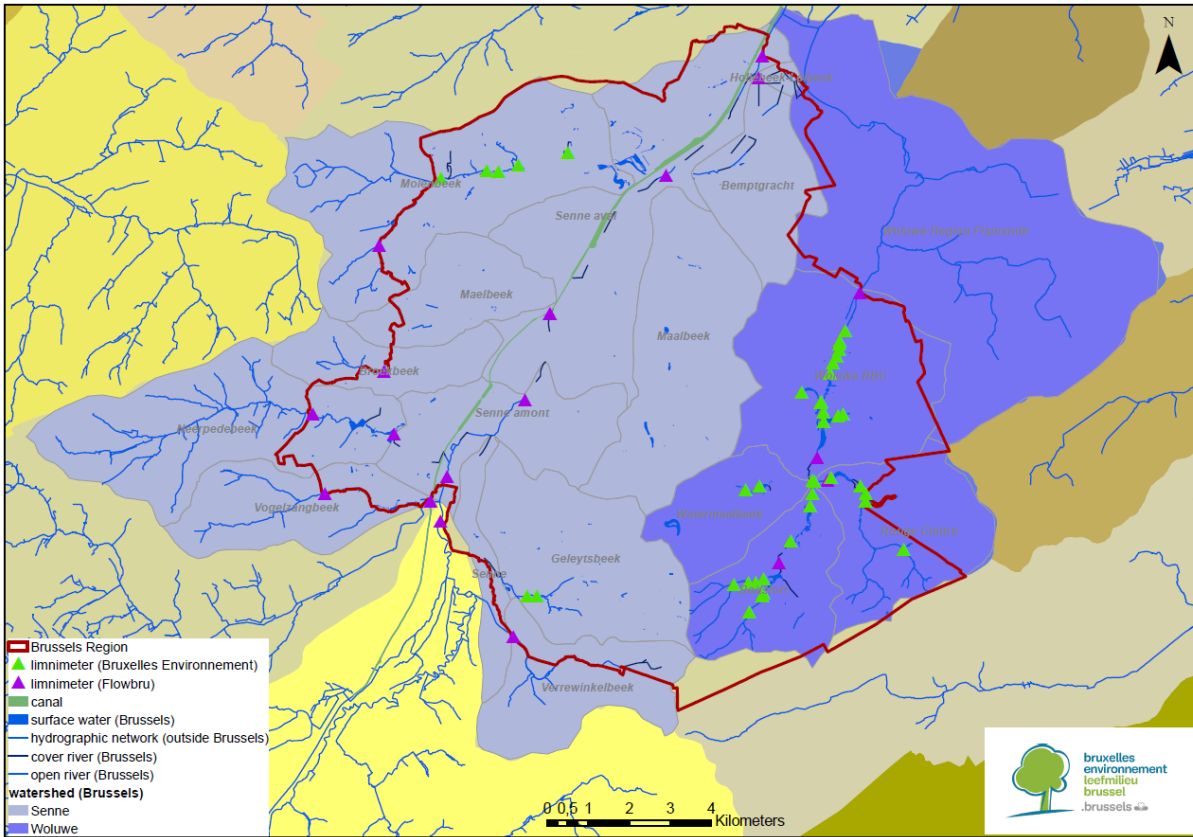


Figure 10 : Localisation des limnimètres de Bruxelles Environnement (ciel ouvert) et Flowbru (pertuis) – exemple en photo : limnimètre Woluwe Out

⁴ Réseau de surveillance quantitative des eaux de surface et des eaux usées ainsi que de la pluviométrie en Région de Bruxelles-Capitale (<https://www.flowbru.be/fr>)



En ce qui concerne la définition des valeurs des *conductances* :

Les valeurs de *conductance* (*Transfer rate in - Transfer rate out*) sont quant à elle estimées en première approche de manière arbitraire, sans distinction ciel *ouvert/pertuis*. Elles feront l'objet d'une calibration (§5) permettant leur ajustement aux propriétés hydrodynamiques du lit naturel ou aménagé des cours d'eau.

Paramètre	Valeur	Unité
Transfer rate in	2,00E-05	1/s
Transfer rate out	2,00E-04	1/s

Important : Il y a lieu de préciser que le processus de calibration est sensé compenser également l'erreur sur le flux initialement « conditionné » provenant du calcul de la *surface d'échange A* (Équation 2) basée sur la géométrie de la couche du modèle accueillant le tracé du cours d'eau (et notamment son épaisseur) plutôt que de la surface réelle de contact eaux souterraines/eaux de surface. La prise en compte de la *surface réelle de contact*, qui apparaît comme logique, s'avère complexe dans le cas d'un modèle de dimension régionale comme *BPSM*, puisque cette manœuvre nécessiterait une discréditation verticale relativement fine pour la reconstituer numériquement. De plus, ce paramètre n'est pas connu de manière très précise. L'erreur héritée devra donc être compensée dans le cadre de la calibration (§5), par ajustement des *conductances* qui par conséquent deviennent des *paramètres intégrés* plutôt que définissant un processus physique de pure *conduction*.

3.3.3.2 Crête de partage entre le Patiaux et l'Argentine

Une condition de « flux imposé » (2^{ème} type, Neumann) est appliquée au droit de la limite située sur la crête de partage délimitant les bassins versants hydrogéologiques du Patiaux et de l'Argentine au sein de l'*UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele* et plus précisément le long d'une ligne reprenant le tracé de l'isopièze 93 m-DNG issue du modèle *Hydrobrux* (2015). Il y a lieu de préciser que le flux est essentiellement assuré par l'*UH/RBC_4* au droit de cette section d'écoulement.

Cette condition aux limites applique un flux imposé (*flux de Darcy*) en *m/jour* rapporté en débit en *m³/jour* par intégration sur la section d'écoulement.

Les valeurs de *flux de Darcy* sont déterminées par le modèle *Hydrobrux* (Figure 11). Ce dernier à l'avantage de présenter une section d'écoulement similaire à *BPSM* du fait que les limites verticales des deux modèles sont similaires, à savoir la topographie MNT (§3.2) et le toit de l'*UH/RBC_7c Aquiclude des argiles de Saint-Maur* (§3.5.4).

Le champ de valeur *flux de Darcy* est directement calculé par *Hydrobrux* en fonction notamment de la *conductivité hydraulique* appliquée aux couches modélisées, du *gradient hydraulique* simulé par *Hydrobrux* et de la section d'écoulement.

$$Q_{in} = A \times K \times i$$

Avec :

- Q_{in} : flux imposé (m³/jour) ;
- A : section (m²) ;
- K : conductivité hydraulique (m/jour) ;
- i : gradient hydraulique (-).



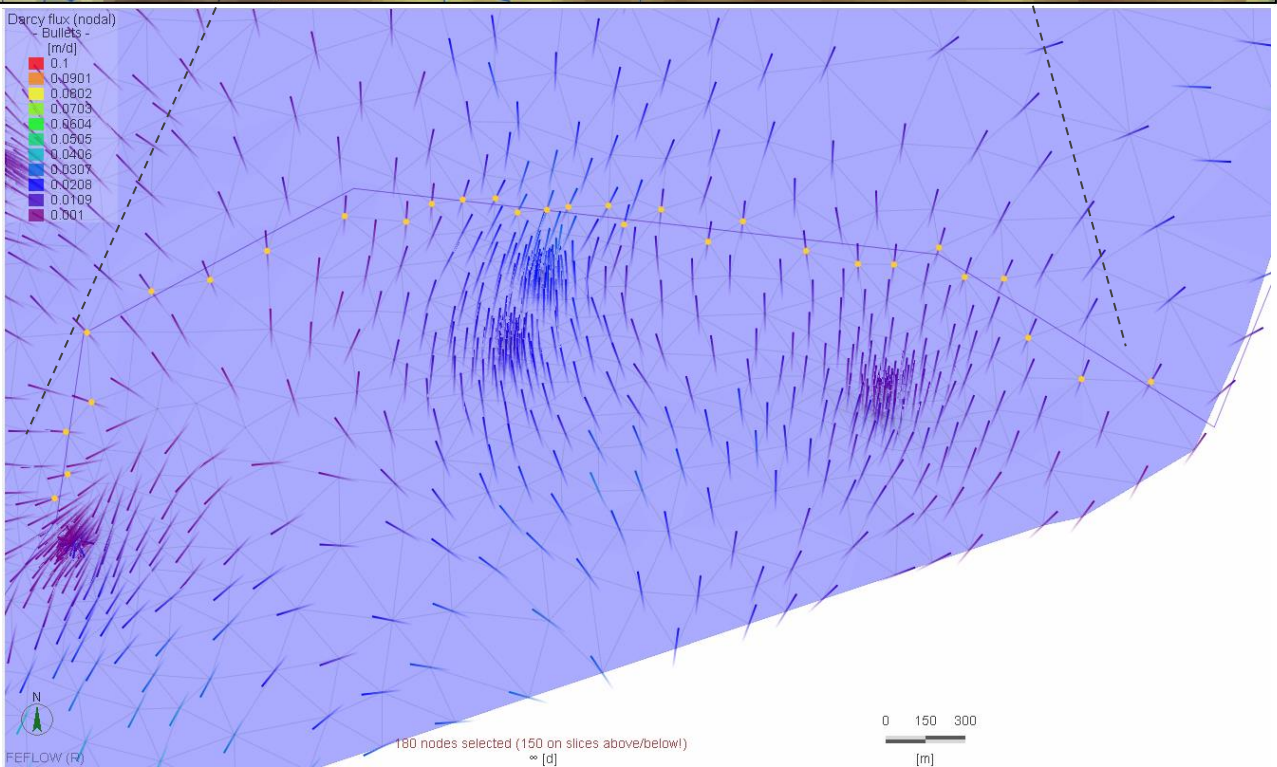
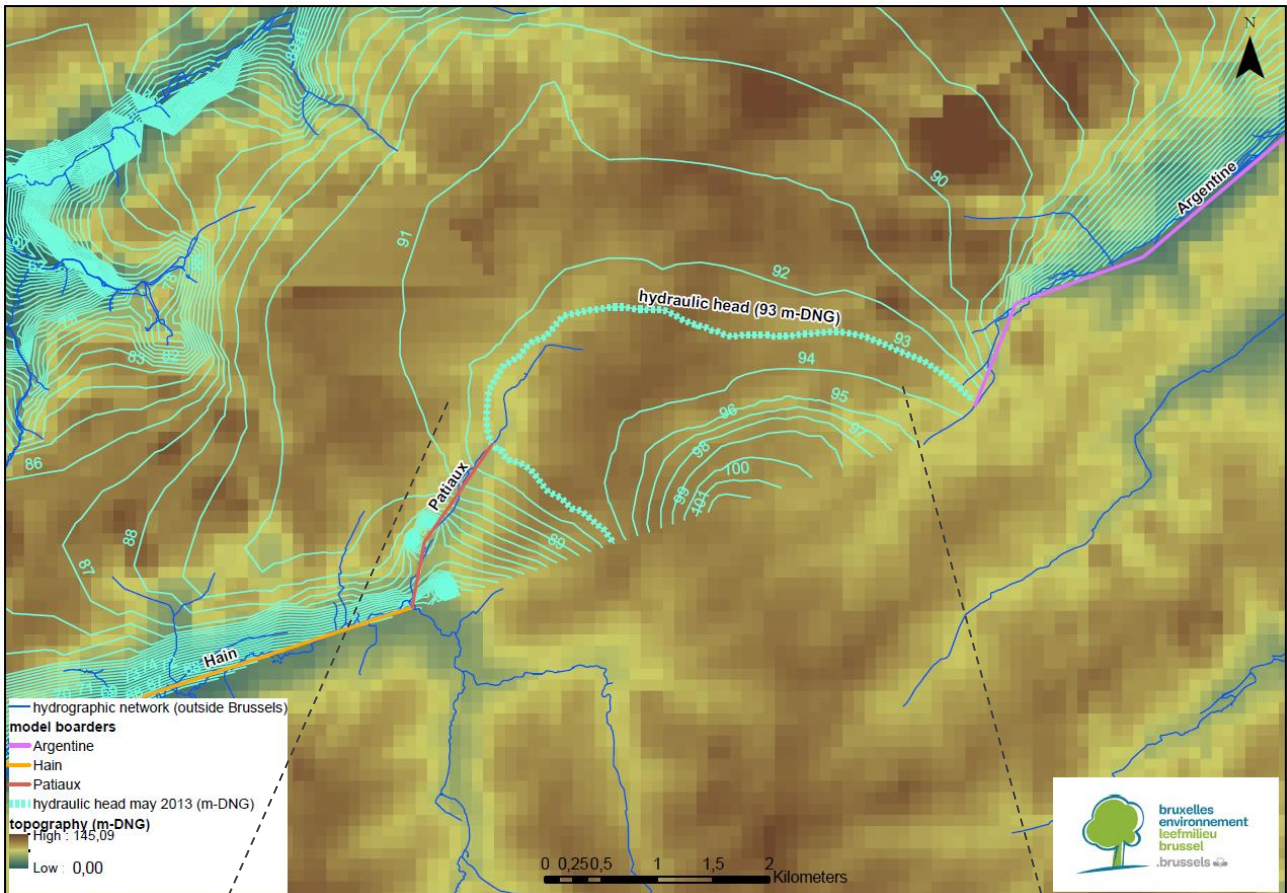


Figure 11 : Au-dessus, limite sud du modèle - condition de flux imposé (2eme type, Neumann) – En dessous, flux de Darcy au sein de l'UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vierzele (Hydrobrux, 2015)



3.4 Grands collecteurs (région bruxelloise)

3.4.1 Description

En Région de Bruxelles-Capitale, l'épuration des eaux résiduaires et des eaux de pluie est assurée par deux stations d'épuration (STEP). Le réseau d'égouttage menant les eaux à ces STEP est dit *unitaire*: il collecte à la fois les eaux usées et les eaux de ruissellement. Le traitement assuré par :

- La *STEP de Bruxelles-Nord* : active depuis 2007, elle présente une capacité d'épuration de l'ordre de 1.100.000 équivalents-habitants (EH). Elle traite les eaux usées et de ruissellement en provenance du bassin 'épuratoire' *Senne Nord* et du bassin 'épuratoire' de la *Woluwe* ;
- La *STEP de Bruxelles-Sud* : en service depuis août 2000, possède une capacité de 360.000 EH et gère l'épuration des eaux du bassin 'épuratoire' *Senne Sud*.

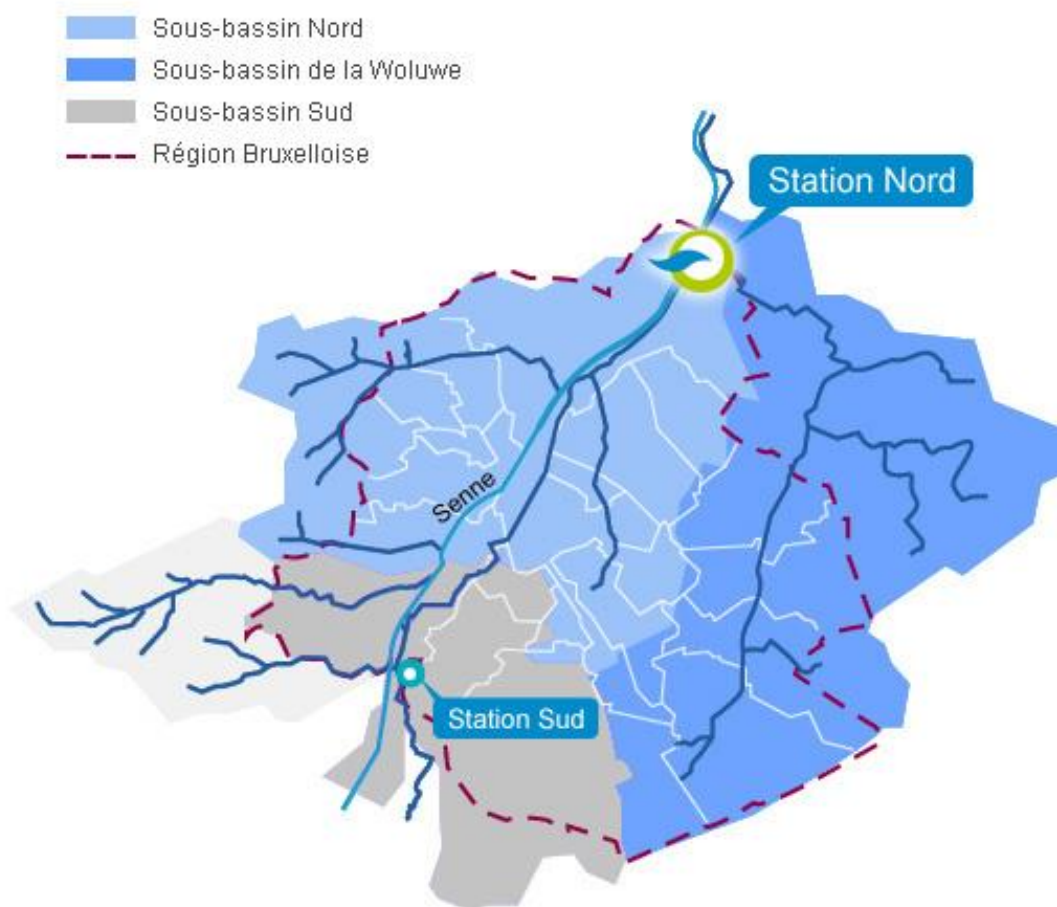


Figure 12 : Carte des bassins 'épuratoires' en Région de Bruxelles-Capitale et dans sa périphérie © AQUIRIS

Les « grands collecteurs » correspondent aux collecteurs recueillant les effluents provenant de l'ensemble des collecteurs secondaires gérés par VIVAQUA. Leur rôle est d'acheminer les eaux résiduaires et des eaux de pluie (réseau unitaire) vers les deux stations d'épuration bruxelloises. Le réseau de grands collecteurs est géré par la *Société Bruxelloise de Gestion de l'Eau* (SBGE).

Ils se concentrent généralement en fond de vallée alluviale où ils sont majoritairement immergés au sein de la zone saturée. Dans ces conditions et à l'instar des cours d'eau en pertuis, ils ont un rôle essentiellement drainant de la nappe phréatique. Ponctuellement ils peuvent alimenter cette dernière au droit de tronçons perchés (non immergés). Cette observation est notamment vraie pour les petits collecteurs des plateaux, non pris en considération dans *BPSM* faute de données exploitables.

Ce réseau de collecteur se confond très souvent avec le réseau hydrographique existant (**Figure 13**). Comme précisé précédemment au §3.3.1, une grande partie des affluents voutés a été historiquement reconvertie en égout si bien que le phénomène de drainage de la nappe phréatique est généré par la combinaison du système *réseau hydrographique / collecteur*.

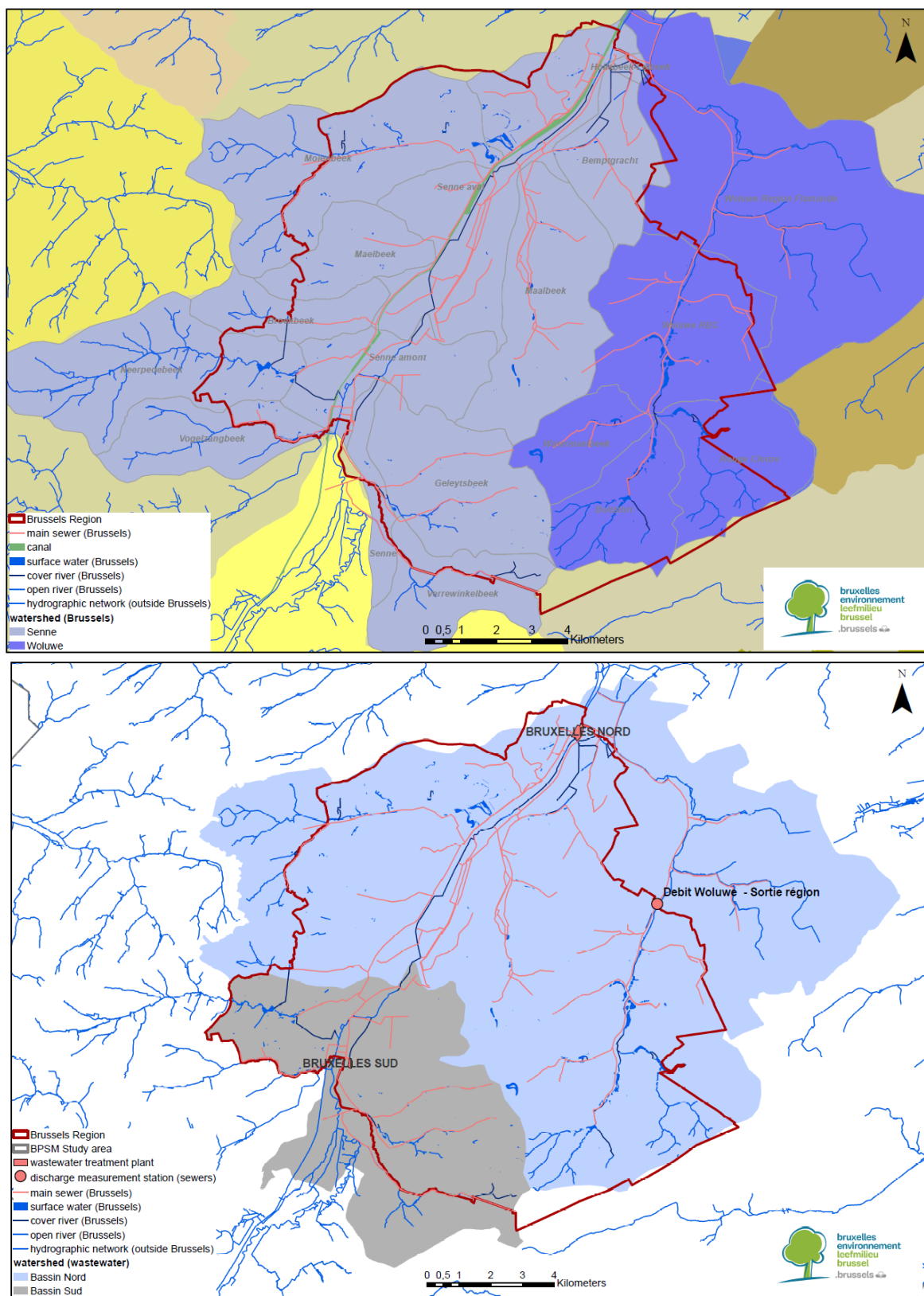


Figure 13 : STEP et réseau de grands collecteurs



3.4.2 Bilan des débits des grand collecteurs

Un bilan des *débits bruts* et des *débits de base*⁵ a été réalisé au niveau des sous bassins 'épuration' Woluwe (en excluant la partie flamande), Senne Sud et Senne Nord, tels que cartographiés en **Figure 12**, par l'exploitation des données de monitoring de débit des eaux usées *flowbru*⁶ relevées aux stations ci-dessous :

- bassin 'épuration' Woluwe (en excluant la partie flamande) :
 - o Woluwe sortie région (localisée sur la **Figure 13**)
- bassin 'épuration' Senne Sud (localisée sur la **Figure 13**) et plus précisément les deux points d'entrée suivants :
 - o STEP Sud - Uccle
 - o STEP Sud - Anderlecht
- bassin 'épuration' Senne Nord (localisée sur la **Figure 13**) et plus précisément les deux points d'entrée suivants :
 - o STEP Nord - Rive Gauche
 - o STEP Nord - Emissaire Nord

La **Figure 14** ci-dessous reprend les *débits bruts* ainsi que les *débits de base* mesurés, au pas de temps compris entre 1' et 60', au droit de chaque station précédente entre le 01/01/2013 et le 31/12/2013. Il y a lieu de noter qu'en l'absence de données exploitables sur l'entièreté de l'année 2013, les données de la station *STEP Nord - Rive Gauche* de 2019 sont exploitées et présentées en superposition.

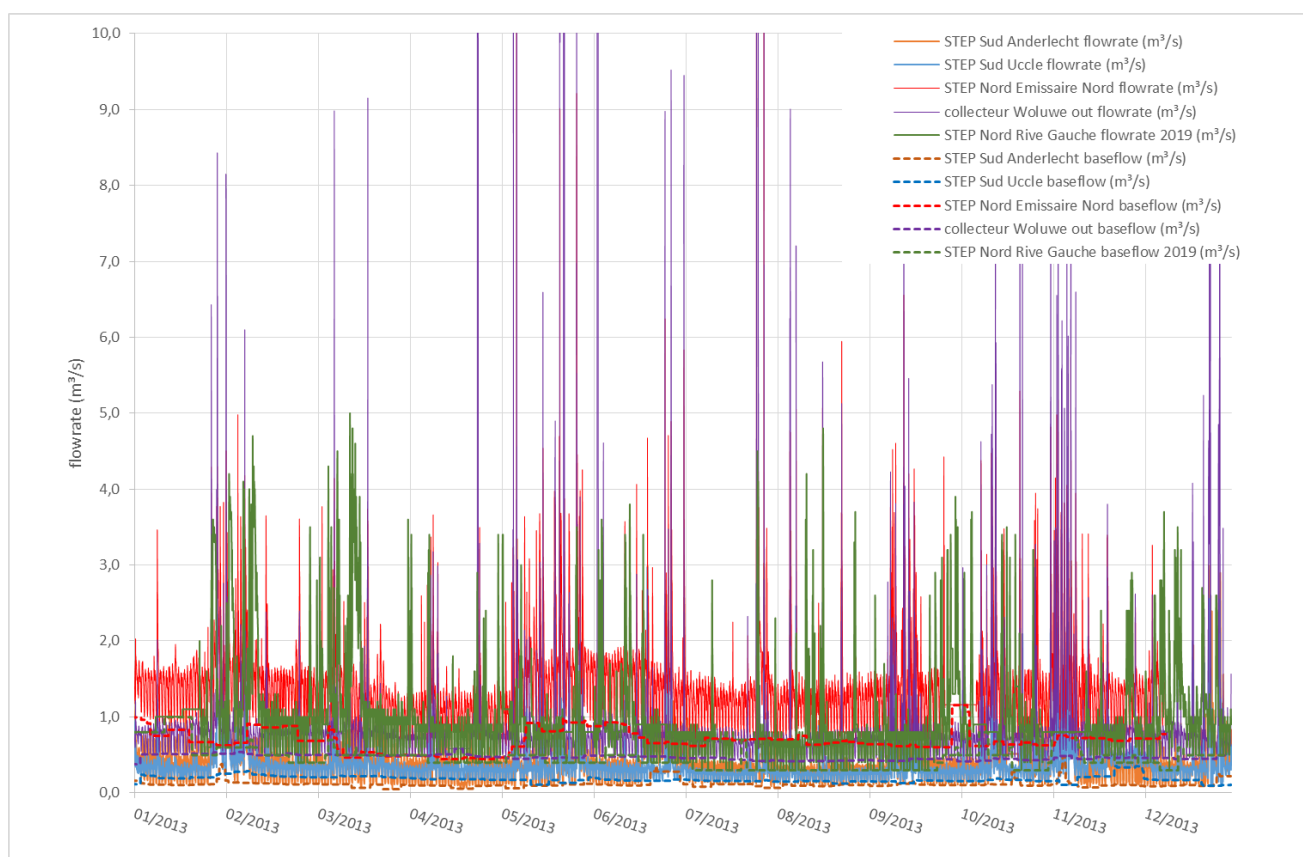


Figure 14 : Débits bruts (*flowrate*) et de base (*baseflow*) des grands collecteurs en sortie des bassins 'épuration' Woluwe (en excluant la partie flamande), Senne Sud et Senne Nord

⁵ Débit minimum enregistré sur au moins 6 jours consécutifs sensé représenter le débit provenant du drainage des eaux souterraines (valeur potentiellement surestimée)

⁶ Réseau de surveillance quantitative des eaux de surface et des eaux usées ainsi que de la pluviométrie en Région de Bruxelles-Capitale (<https://www.flowbru.be/fr>)



Un bilan des *débits bruts* et *volumes totaux cumulés* sortants sur l'année de référence (2013) est présenté au **Tableau 3**.

Bassin 'épuratoire' (STEP)	Collecteur	Volume total 2013 (m ³)	Volume "Baseflow" 2013 (m ³) <i>(calibré)</i>	% d'eau souterraine <i>(calibré)</i>
Woluwe ⁷	collecteur Woluwe (OUT)	31.857.592	11.067.918	34,7%
	BILAN	31.857.592	11.067.918	34,7%
Senne Sud	STEP sud Uccle (OUT)	12.005.387	4.147.187	34,5%
	STEP sud Anderlecht (OUT)	13.941.437	2.704.850	19,4%
	BILAN	25.946.824	6.852.038	27,0%
Senne Nord	STEP Nord Rive Gauche (OUT)	33.317.846	11.319.810	34,0%
	STEP Nord Emissaire Nord (OUT)	42.303.272	15.348.867	36,3%
	BILAN	33.317.846	11.319.810	34,0%

Bassin 'épuratoire' (STEP)	Collecteur	Débit max. (m ³ /jour)	Débit moyen 2013 (m ³ /jour)	"Baseflow" moyen 2013 (m ³ /jour) <i>(calibré)</i>	% d'eau souterraine <i>(calibré)</i>
Woluwe ⁶	collecteur Woluwe (OUT)	2.859.840	87.281	30.323	34,7%
	BILAN		87.281	30.323	34,7%
Senne Sud	STEP sud Uccle (OUT)	298.550	32.891	11.362	34,5%
	STEP sud Anderlecht (OUT)	349.173	38.196	7.411	19,4%
	BILAN		71.087	18.773	26,4%
Senne Nord	STEP Nord Rive Gauche (OUT)	432.000	91.282	31.013	34,0%
	STEP Nord Emissaire Nord (OUT)	1.659.571	123.333	44.749	36,3%
	BILAN		91.282	31.013	34,0%

Tableau 3 : Bilan débits bruts et volumes totaux cumulés sortants sur l'année de référence (2013), grands collecteurs

On considère que le rapport $\frac{(volume\ ou\ débit\ de\ base)_{sortant}}{(volume\ ou\ débit\ total)_{sortant}}$ (%) issu des données extraites des *time series* de la **Figure 14** donne une approximation *optimiste* de la fraction d'eau usée ayant une origine souterraine ou *eau claire parasite*⁸ (paramètre % d'eau souterraine dans le **Tableau 3**). Le caractère *optimiste* étant induit par la méthode de calcul du *débit de base* s'appuyant sur le calcul d'un débit minimum enregistré sur 6 à 14 jours consécutifs. Cette approche est susceptible de comptabiliser des rejets/ruissellements d'eau usée localisés en région bruxelloise dès lors que ces rejets sont relativement continus dans le temps. Cette approche s'avère par contre très efficace pour rejeter les apports d'eau usée issus de processus « rapides » (< 6 jours) de rejets/ruissellement, caractéristiques des rejets d'eaux usées pouvant être très variables sur une échelle de temps d'une journée.

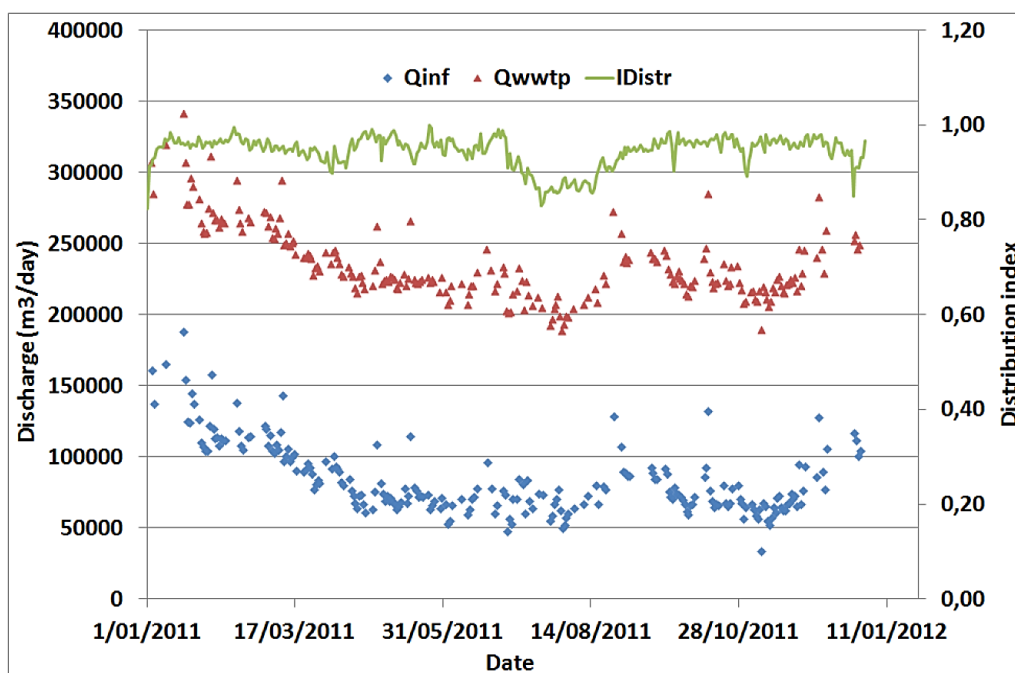
Afin d'ajuster ce paramètre à des valeurs jugées plus réalistes, une calibration du paramètre % d'eau souterraine a pu être réalisée sur le bassin 'épuratoire' *Senne Nord* par comparaison avec les résultats d'une étude de *N. de Ville, H.M. Le et M.A. Verbanck* de l'*Université Libre de Bruxelles (ULB)* de 2013 qui conclut que

⁷ Partie flamande non prise en compte en ce qui concerne le bassin épuratoire de la *Woluwe*

⁸ Cette fraction d'eau usée est couramment appelée « eau claire parasite » par les gestionnaires du réseau d'assainissement dès lors qu'elle vient « parasiter » le bon fonctionnement des STEP par un apport d'eau supplémentaire « non ou peu chargée » diluant la charge des effluents à traiter et impactant l'efficacité épuratoire.



sur une base annuelle (2011), environ 35 % du volume total traité quotidiennement en STEP Nord de Bruxelles correspond à des *eaux claires parasites* avec environ 65.000 m³/jour en été et 150.000 m³/jour en hiver.



In red: Total discharge entering the North WWTP in 2011. In blue: Parasitic clear water discharge entering. The North WWTP. In green: Distribution index. Rainy days have been removed.

Figure 15 : Débits totaux et débits d'eau claire parasite entrants à la STEP Nord (2011) - N. de Ville, H.M. Le et M.A. Verbanck, 2013

Sans calibration, le % d'eau souterraine est de 46.5% pour le bassin 'épuration' *Senne Nord*, ce qui permet d'en déduire un coefficient correcteur de $\frac{35}{46.5} = 0.75$ à appliquer sur chaque paramètre % d'eau souterraine quantifié par le rapport direct $\frac{(volume\ ou\ débit\ de\ base)_{sortant}}{(volume\ ou\ débit\ total)_{sortant}}$ (%) et sur chaque bassin 'épuration' respectif. Selon cette approche, sans calibration, on considère qu'une surestimation de l'ordre de 34% du débit d'eau claire parasite serait apportée par la méthode du « débit de base » ou « baseflow » au droit du bassin 'épuration' *Senne Nord* et par extrapolation au droit de l'ensemble des bassins 'épuration'.

Infine, il ressort de ces tableaux que la part d'eau souterraine dans le réseau de grands collecteurs pourrait atteindre en 2013 :

- 34.7% pour le bassin 'épuration' *Woluwe* (partie flamande non prise en compte) ;
- 27.0% pour le bassin 'épuration' *Senne Sud* ;
- 34.0% pour le bassin 'épuration' *Senne Nord*.

Il y a lieu de préciser que les valeurs de débit et volume issus de la station *STEP Nord - Rive Gauche* ont été corrigés d'un facteur 1.05 égal au rapport de la pluie efficace calculée entre l'année 2013 de référence (232.92 mm) et l'année 2019 (222.59 mm) selon la méthode de *Thornwaite* (§3.8.1).

3.4.3 Conditions aux limites

Une condition de « transfert » (3^{ème} type ou Cauchy) est appliquée au droit du réseau de collecteur. La méthodologie pour la définition de ce type de condition a déjà été abordée au §3.3.3.1.

Ne disposant pas de données exploitables pour la définition du niveau d'eau de référence h_{ref} , il est proposé de procéder comme dans le cas du réseau hydrographique (§3.3.3.1).

$$h_{ref} = \text{topographie} - 1\ m$$



Les valeurs de *conductance* (*Transfer rate in - Transfer rate out*) s'appliquent ici aux parois des grands collecteurs. Elles sont estimées en première approche de manière arbitraire comme équivalentes aux valeurs assignées au réseau hydrographique (§3.3.3.1). Elles feront l'objet d'une calibration (§5) permettant leur ajustement aux propriétés hydrodynamiques des parois des grands collecteurs.

Paramètre	Valeur	Unité
Transfer rate in	2,00E-05	1/s
Transfer rate out	2,00E-04	1/s

Important : Comme expliqué en détail dans le §3.3.3.1 (la problématique est exactement la même que pour le réseau hydrographique), il y a lieu de préciser que le processus de calibration est sensé compenser également l'erreur sur le flux initialement « conditionné » provenant du calcul de la *surface d'échange A* (Équation 2) basée sur la géométrie de la couche du modèle accueillant le tracé du collecteur (et notamment son épaisseur) plutôt que de la surface réelle de contact eaux souterraines/collecteur.

3.5 Hydrogéologie

3.5.1 Unités Stratigraphiques

3.5.1.1 Description

Le substratum de la Région bruxelloise est composé exclusivement de terrains sédimentaires. Il peut être divisé en 23 *Unités Stratigraphiques* (US/RBC). Ces 23 unités se retrouvent également dans la zone modélisée. La succession des dépôts *primaires* à *quaternaires* composant le sous-sol bruxellois est détaillée ci-dessous, depuis la base jusqu'à la surface :

- Dépôts primaires : socle rocheux du massif du Brabant

Ce massif ancien du Paléozoïque inférieur appelé *massif du Brabant* correspond à un biseau de roches (écaïlles) compressées, dont la partie centrale située au droit du territoire bruxellois est formée de formations sédimentaires déformées avec un pendage pseudo-vertical. Ces roches appartiennent à la formation de *Tubize*, d'âge Cambrien (en tout plus de 4 km de sédiments) et composée essentiellement d'une alternance de grès (voire quartzites) et phyllades, d'origine turbiditique. Ce cœur Cambrien est entouré sur les flancs NE and SW de formations sédimentaires appartenant à l'Ordovicien et au Silurien séparée de la partie centrale par des zones de cisaillements intenses.

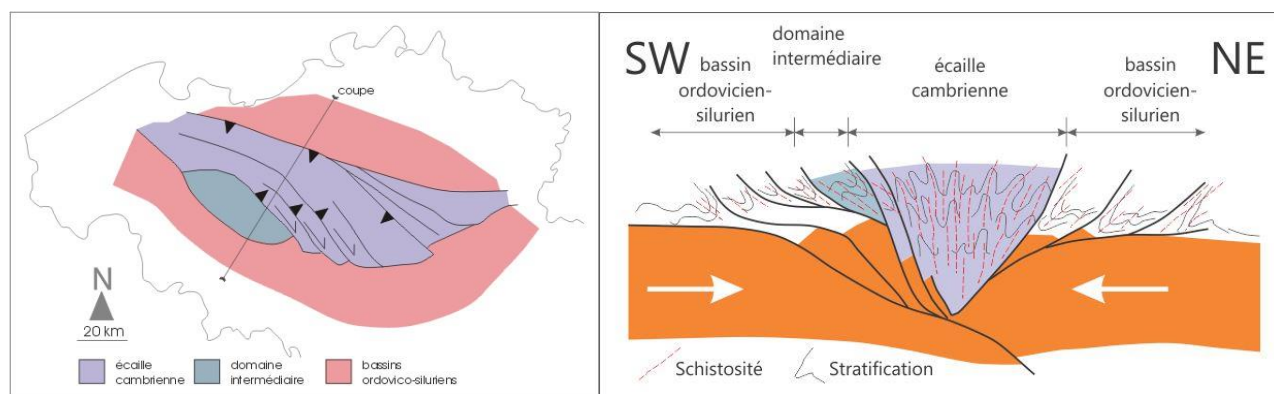


Figure 16 : Extension et coupe du massif du Brabant (source : <http://www.geolsed.ulg.ac.be/>)

En région bruxelloise, le *massif du Brabant* est recouvert en discordance par divers dépôts horizontaux (homoclinaux) d'âges Crétacé à Quaternaire. Il est utile de remarquer que la paléotopographie du socle paléozoïque inférieur affecte la structure tabulaire des couches supérieures dont les limites « ondulent » jusqu'à la base de l'Éocène inférieur.



- Dépôts secondaires : craies du Crétacé

Une craie blanche à grise, datée du Crétacé supérieur (Sénonien), existe entre les escarpements de la surface du *massif du Brabant*. En région bruxelloise, les craies ne sont présentes que sur la moitié Nord du territoire signifiant qu'au Crétacé, le « territoire bruxellois » disposait d'un littoral, le paléo rivage étant composé des reliefs marqués par le *massif du Brabant*.

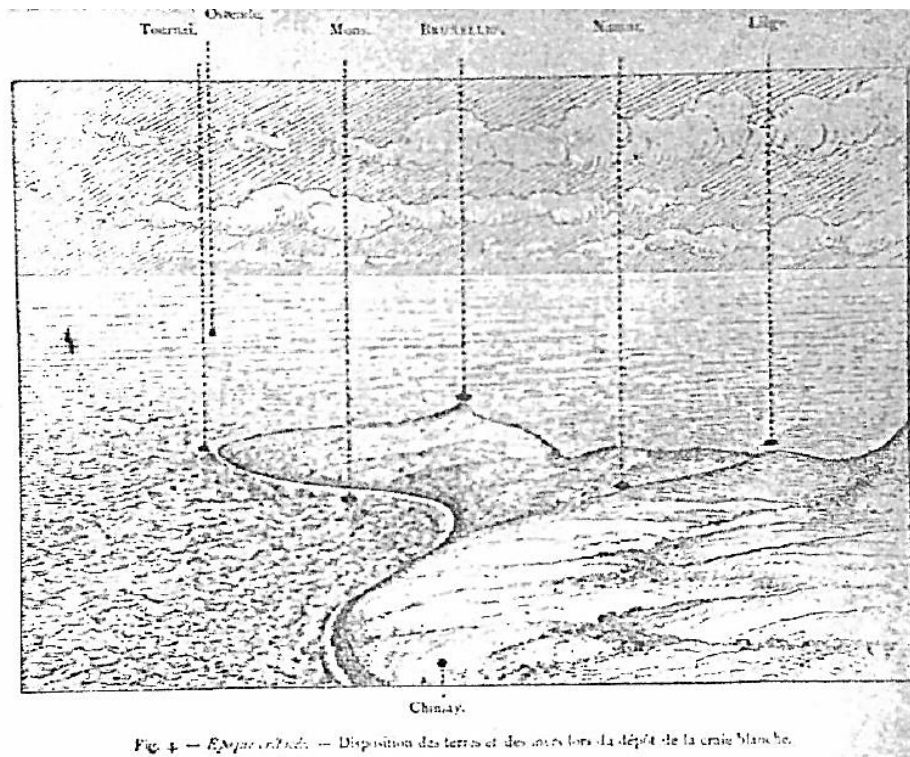


Figure 17 : Mer du Crétacé dessinant le paléo littoral bruxellois, source : *Le sol de Bruxelles à travers les âges géologiques*

- Dépôts tertiaires : sables, silts et argiles du Paléocène, Eocène et Miocène

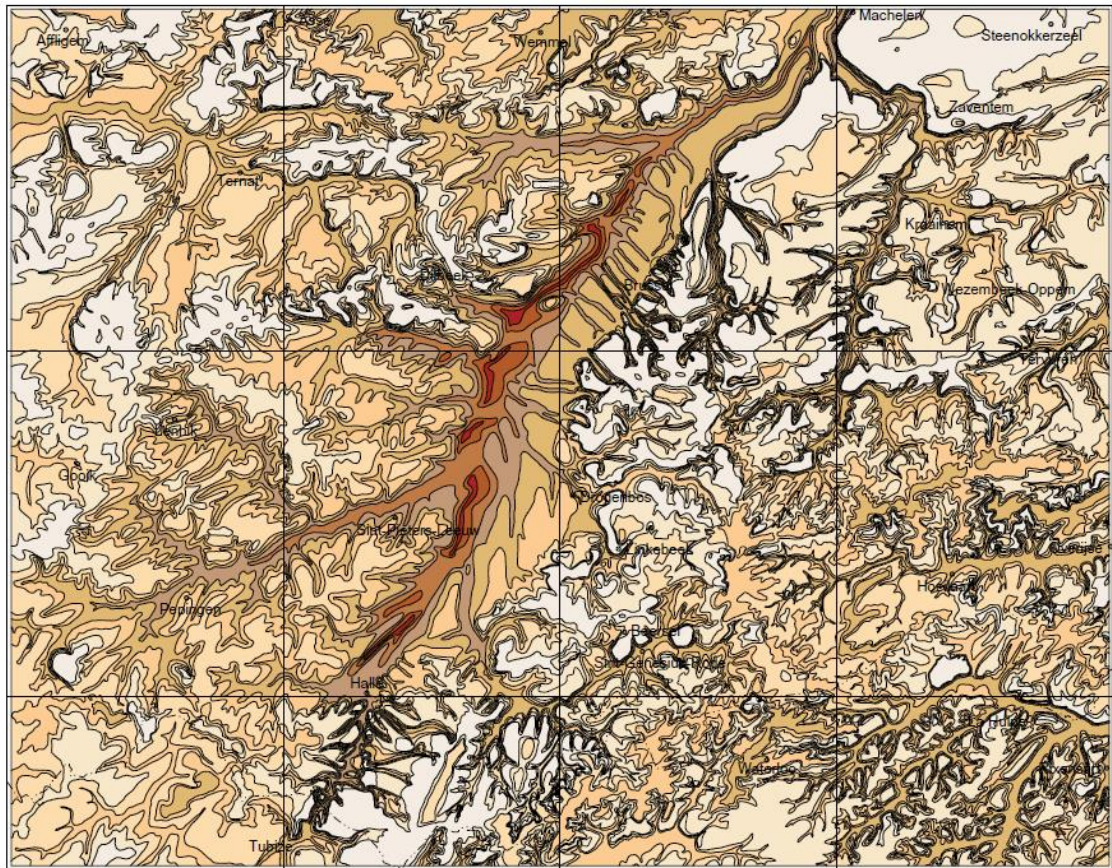
Les dépôts tertiaires, d'origine marine, constituent la majeure partie de la stratigraphie bruxelloise. Cette série sédimentaire épaisse d'environ 50 à 150 m est composée d'une alternance de sables, silts et argiles rendant la géologie de Bruxelles assez monotone. L'homogénéité lithologique de cette épaisse séquence complique l'identification des limites de formation. Cette couverture est discontinue tant spatialement que temporellement (hiatus) et repose en discordance sur les craies Crétacé ou à défaut sur les roches du socle Paléozoïque.

- Dépôts quaternaires : limons éoliens et alluvions du Pléistocène et Holocène

Les dépôts quaternaires recouvrent l'entièreté de la Région de Bruxelles Capitale. Ils possèdent diverses origines et sont spatialement très discontinus. Les vallées se composent de dépôts alluviaux pouvant atteindre une 30^{taine} de mètres d'épaisseur (Figure 18). On y trouve (Figure 19) :

- À la base, une couche d'âge Pléistocène (Weichselien) composée de sables grossiers, graviers et limons. On y observe également la présence de couches fines d'argiles et de silex ;
- Au-dessus, se trouvent des dépôts successifs de tourbes et d'argiles d'origine fluviale et d'âge Holocène.





LEGENDE

- | | | | |
|-----------------|-------------------|-------------------|---------------|
| □ Dikte 0m - 1m | □ Dikte 6m - 10m | □ Dikte 20m - 25m | — Gewestgrens |
| □ Dikte 1m - 3m | □ Dikte 10m - 15m | □ Dikte 25m - 30m | ○ Hoofdstad |
| □ Dikte 3m - 6m | □ Dikte 15m - 20m | □ Dikte 30m - 35m | • Gemeente |



Figure 18 : Isopaque du quaternaire, carte géologique de Bruxelles-Nevelles (31-39)

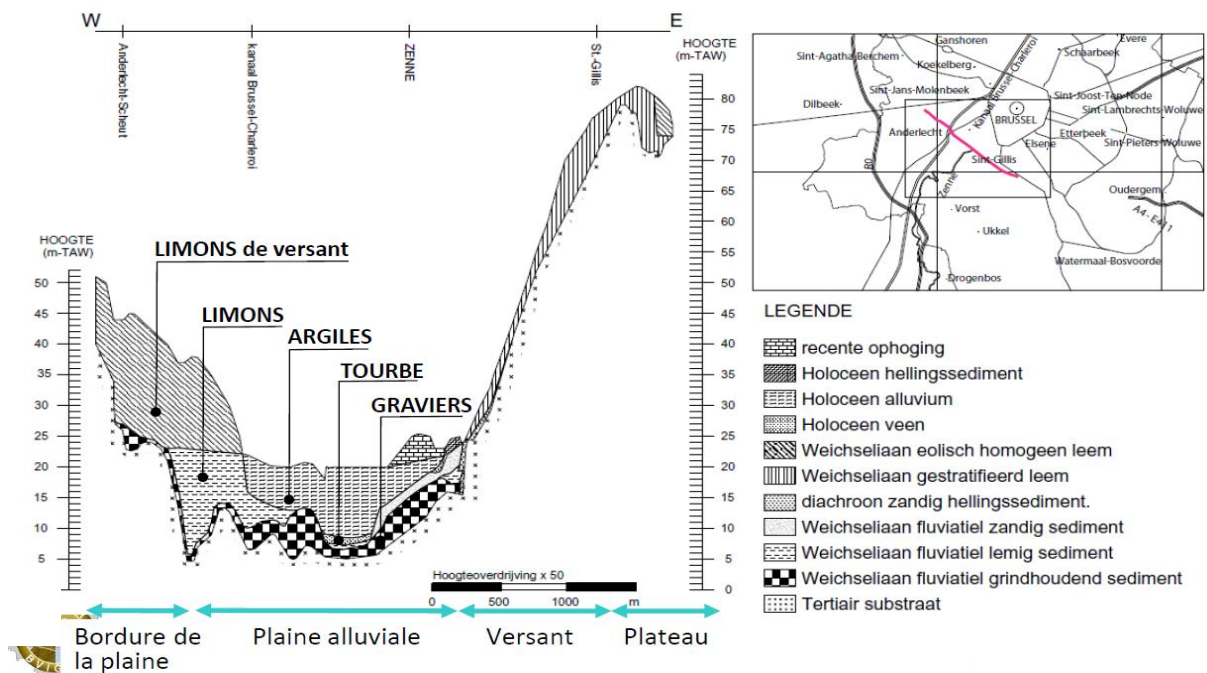


Figure 19 : Coupe transversale de la vallée de la Senne en région de Bruxelles-Capitale selon dov (<https://www.dov.vlaanderen.be/>)



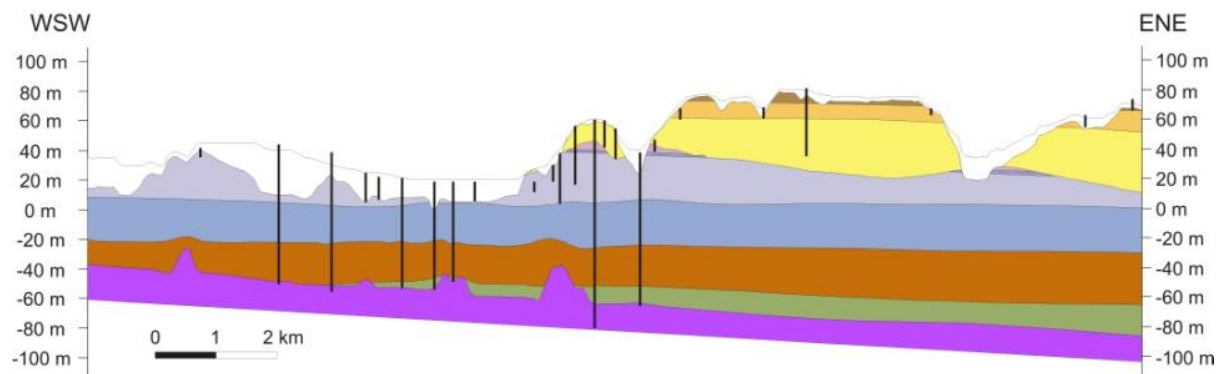
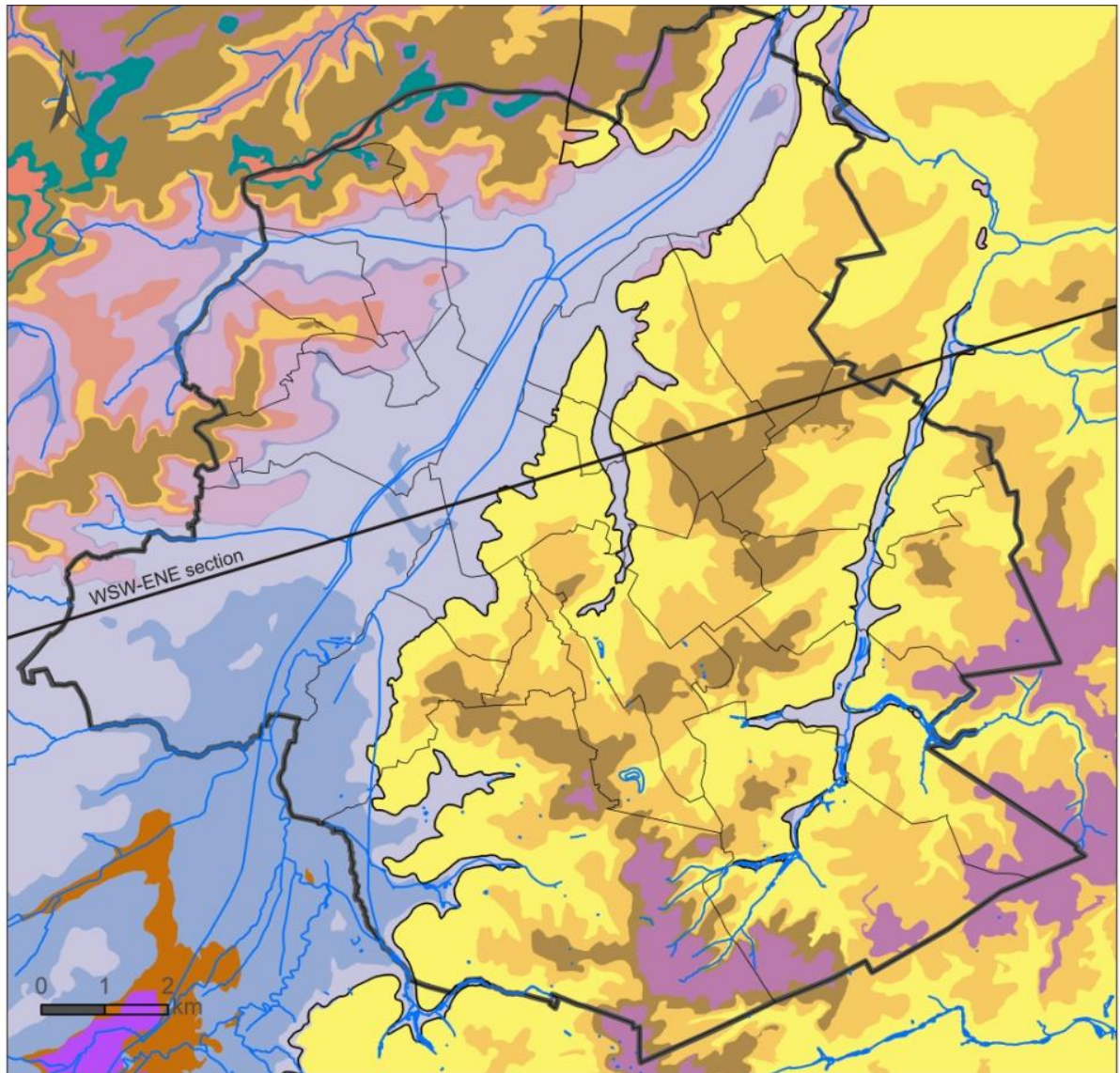
En quittant les vallées alluviales, on observe des sédiments d'âge Pléistocène à Holocène composés de colluvions et dépôts de lœss, fin, sableux stratifiés, chargés de matières argileuses et calcaires. Ces dépôts de lœss deviennent homogènes plus haut sur les plateaux. Ces sédiments d'origine éolienne recouvrent l'ensemble de la zone d'étude et ont des épaisseurs de plusieurs dizaines de centimètres à une dizaine de mètres ou plus dans les vallées alluviales.

Enfin, des remblais anthropogéniques sont présents quasi partout sur le territoire bruxellois et ont des épaisseurs de quelques dizaines de centimètres à environ 20 mètres.

La **Figure 20** reprend un extrait de la carte géologique *Bruxelles Nivelles* (31-39). Les limites administratives (régionales et communales, en traits noirs continus épais et fins respectivement) et le réseau hydrographique (traits bleus) y sont illustrés. Certains forages localisés sur le tracé de la coupe géologique sont également représentés (barres verticales).

Le **Tableau 4** reprend une description détaillée de la lithologie des diverses unités stratigraphiques observées en région bruxelloise.





- | | |
|--|--|
| Quaternary | Aalbeke Member (Lower Eocene) |
| Sint-Huibrechts-Hern Formation (Upper Eocene) | Moen Member (Lower Eocene) |
| Maldegem Formation (Middle Eocene) | Saint-Maur Member (Lower Eocene) |
| Lede Formation (Middle Eocene) | Hannut Formation (Upper Palaeocene) |
| Bruxelles Formation (Middle Eocene) | Cretaceous |
| Tielt Formation (Lower Eocene) | Palaeozoic |

Figure 20 : Carte et coupe géologiques de la Région Bruxelles-Capitale



Série	Etage	Unités Stratigraphiques (US/RBC)	Description
-	-	US/RBC_11 Remblais	Remblais.
Holocène / Pléistocène	-	US/RBC_12 Couverture limoneuse	Dépôt de loess, limons d'origine éolienne, fin, sableux, homogène sur les plateaux et stratifiés sur les versants, chargé de matières argileuses, calcaireux / Diluvium caillouteux des plateaux.
Holocène	-	US/RBC_13 Argiles alluviales	Dépôt successif de tourbes et d'argiles. Origine fluviale. Limité aux vallées alluviales.
Pléistocène	-	US/RBC_14 Limons, sables et graviers alluviaux	Dépôt de sables, grossiers, graviers et limons. Présences de couches fines d'argiles, de silex. Mouvements du sol dus aux gels et dégels successifs. Limité aux vallées alluviales.
Miocène supérieur	Diestien	US/RBC_21 Sables de Diest	Sable vert brun à rouille, mi-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 20m.
Miocène inférieur	Bolderien	US/RBC_22 Sables de Bolderberg	Sable fin, jaune pâle, micacé ("sable chamoisi"). A la base, présence d'un gravier de petits silex. L'épaisseur maximale atteint 7 m.
Eocène supérieur	Tongerien	US/RBC_23 Sables et argiles de Sint-Huilbrechts-Hem	Sable fin, jaune, micacé, passant graduellement de haut en bas à une argile ou un silt jaune blanc à gris rose ("l'argile saumon"), légèrement sableux et glauconieux, suivi d'une argile grise à grise verte, sableuse et plus glauconieuse. A la base, présence d'un gravier de quartz, de silex tantôt plats noirs, tantôt de plus grandes tailles et ovales. Parfois, présence de galets de grès vert cambrien. L'épaisseur est réduite au nord mais peut atteindre plus de 10 m au sud-est.
		US/RBC_25 Sables de Maldegem (membre de Onderdale)	Sable fin moyen, gris foncé, silteux, glauconieux et micacé. L'épaisseur moyenne est de 7 m (uniquement présent au nord).
	Complexe de Kallo	US/RBC_31 Argiles de Maldegem (membre de Urssel et Asse)	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.
		US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel)	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.
Eocène moyen	Ledien	US/RBC_42 Sables de Lede	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.
	Bruxellien	US/RBC_43 Sables de Bruxelles	Sables quartzeux, fins à grossiers, hétérogènes et très faiblement glauconieux, caractérisés par la présence de bancs durs (bancs de calcaire sableux "faciès de Gobertange - bancs de grès carbonaté, parfois silicifié) et/ou par des nodules de grès de formes très capricieuses. Quand le sédiment est calcaire, la présence de Nummulites laevigatus est typique. Etant donné la structure en chenaux érosifs à la base, l'épaisseur est très variable et peut atteindre dans un chenal plus de 70 m.
	Panisellien	US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vierzele)	Sable gris vert, très fin, glauconieux, plus argileux vers la base. L'épaisseur est restreinte à 4 m.
		US/RBC_51 Argiles de Gent (membre de Mèrelbeke)	Argile gris vert avec des zones sableuses vertes. Parfois, présence de pyrite. L'épaisseur maximale est de 4 m.
		US/RBC_61 Sables et argiles de Tielit	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 20m.
Eocène inférieur	Ypresien	US/RBC_71 Argiles de Kortrijk (membre d'Aalbeke)	Argile grise à gris brun, très finement silteuse. L'épaisseur moyenne est de 4 m.
		US/RBC_72 Sables et argiles de Kortrijk (membre de Moen)	Dépôt hétérogène de sable silteux à argileux, faiblement glauconieux, avec quelques couches d'argile. Présence de nummulites. L'épaisseur moyenne est de 35 m.
		US/RBC_73 Argiles de Kortrijk (membre de Saint Maur)	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.
Paléocène supérieur	Landénien	US/RBC_81 Sables de Hamut (Membre de Grandglise)	Sable fin, glauconieux, avec intercalations argileuses minces. L'épaisseur moyenne est de 8 m.
		US/RBC_82 Argiles de Hamut (Membre de Lincint)	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.
Crétacé supérieur	Maastrichtien (Sénonien)	US/RBC_91 Craies de Gulpen	Craies blanches à grise avec silex noirs, appartenant probablement à la formation de Gulpen.
Cambrien inférieur (?)	Dévilien (?)	US/RBC_92 Socle Paléozoïque	Dominance de bancs de grès feldspathique, schiste et quartzites d'âge supposé cambrien inférieur (ou éventuellement précambrien : l'absence de fossile rend leur datation difficile). Ces roches peuvent s'altérer sous la forme d'argile compacte.

Tableau 4 : Unités Stratigraphiques de la Région de Bruxelles-Capitale (US/RBC)



3.5.1.2 Modèle géologique

Une première version 1.0 du modèle stratigraphique du sous bruxellois *Brustrati3D* a été développée en collaboration avec le Service Géologique de Belgique en 2017. Elle reprend l'ensemble des hauteurs des toits et bases des différentes Unités Stratigraphiques de la Région de Bruxelles-Capitale (US/RBC) sous forme raster (résolution de 10*10 m), mise à part pour les dépôts quaternaires dont seul le toit et la base de l'ensemble sont modélisés. En effet les alluvions (Quaternaire) présentent une hétérogénéité lithologique trop importante pour être correctement discrétisés dans le modèle. La réalisation de cette version 1.0 s'est appuyée sur la constitution d'une base de données de 9266 points stratigraphiques (forages, piézomètres, affleurements, CPT,...) puis l'interpolation des toits et bases mesurés au droit de ces derniers. Plusieurs phases de correction ont ensuite été réalisées afin de corriger/adapter les toits/bases des couches et d'aboutir à des extensions réalistes. A cette fin, le géoréférencement digital et la vectorisation de l'ensemble des cartes géotechniques de Bruxelles a permis d'améliorer la qualité des corrections effectuées.

Une seconde version 1.1 du modèle *Brustrati3D* (2019) réalisée par Bruxelles Environnement a permis de finaliser les corrections et de standardiser les toits, bases et extensions des couches via un processus automatique issu d'algorithmes codés sous le langage de programmation PYTHON.

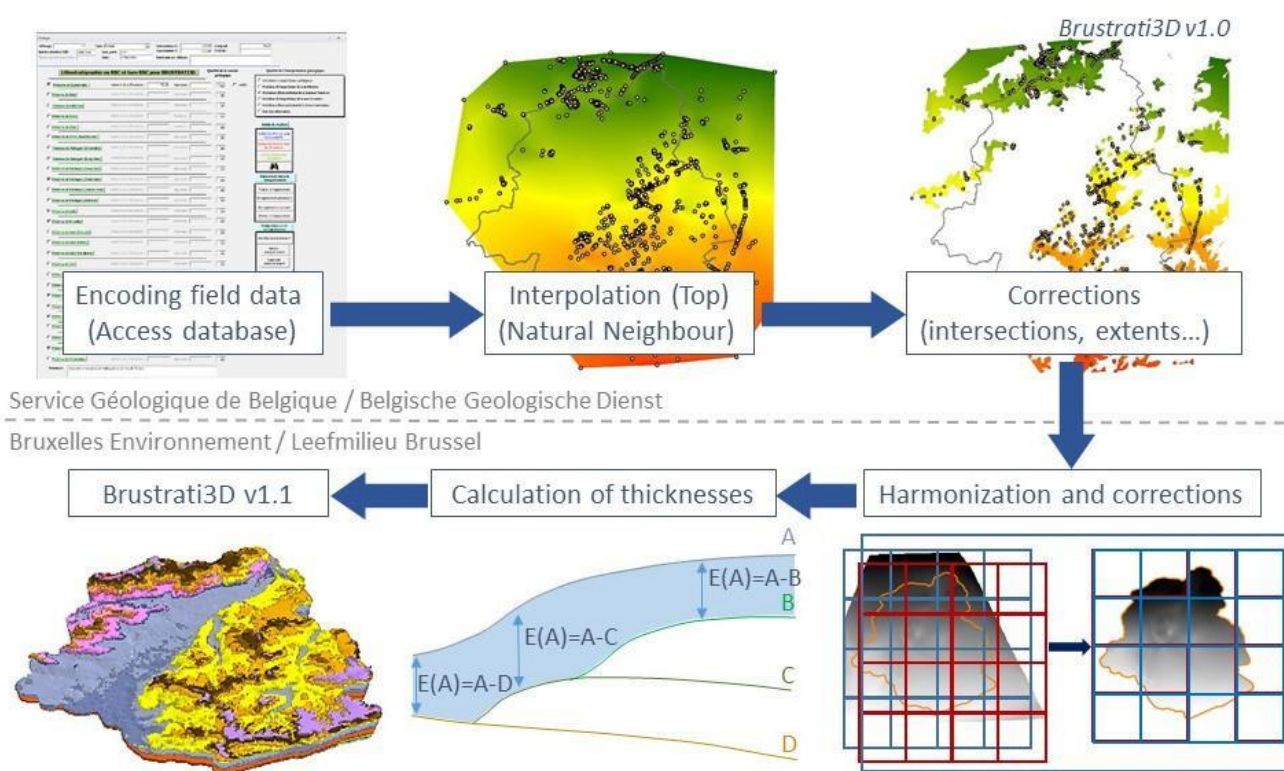
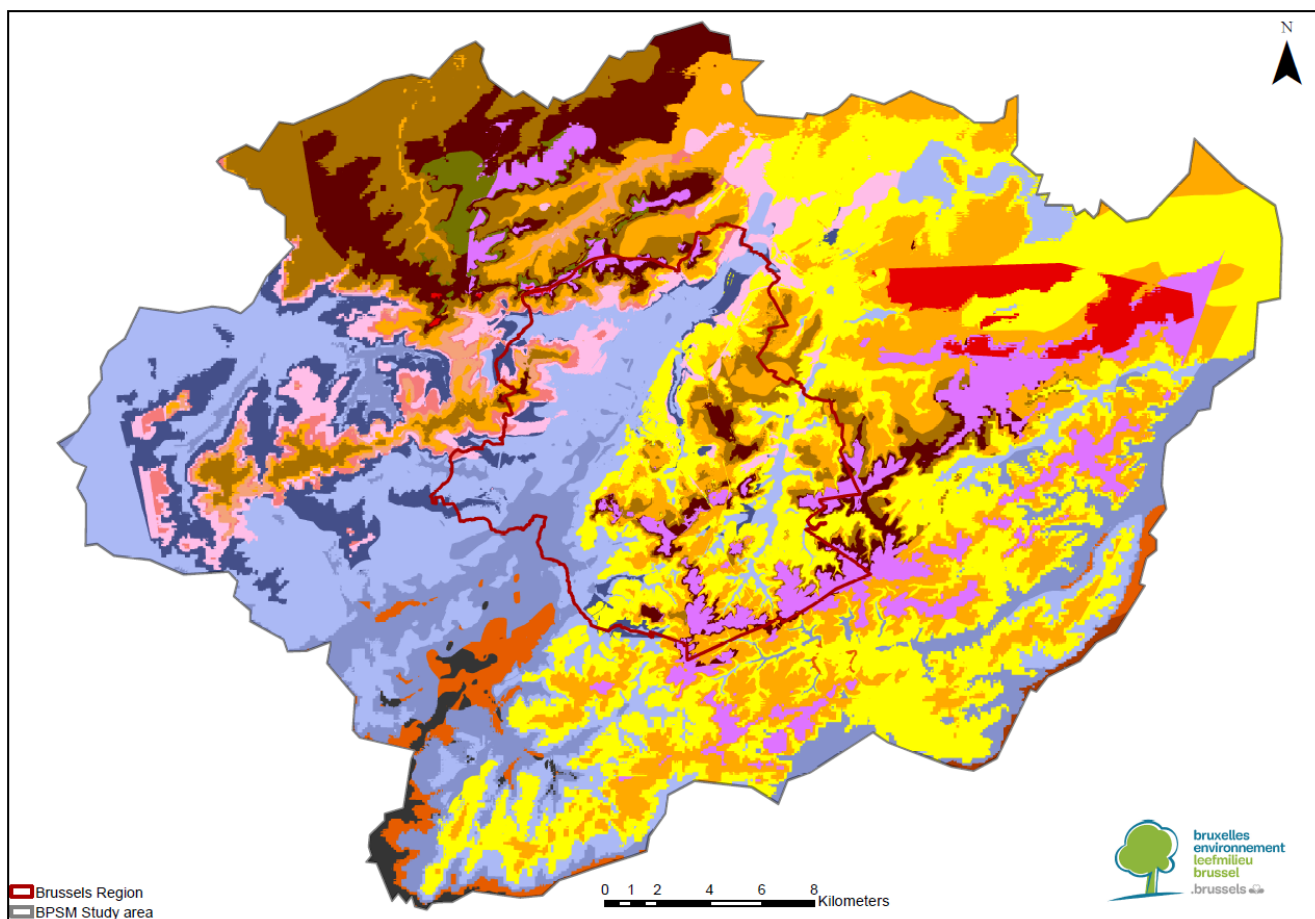


Figure 21 : Méthodologie suivie dans le cadre du projet Brustrati3D

Brustrati3D 1.1 ayant pour extension la surface de la région bruxelloise (plus une zone tampon de 500 m), des données de forage supplémentaires ont été exploitées pour étendre le modèle géologique à la zone de modélisation BPSM (Figure 22). Pour se faire la base de données de forage construite par le Service Géologique de Belgique dans le cadre du projet *Hydroland* (2015) a pu être exploitée. Cette base de données est documentée dans le rapport suivant, disponible sur la bibliothèque numérique de Bruxelles Environnement : *PROJET HYDROLAND, Etude hydrogéologique de la masse d'eau souterraine du Landénien, phase 1 : Modélisation géologique en 3D de l'aquifère du Landénien, Service Géologique de Belgique, 2015.*



Ere	Système	Série	Etage	Unités Stratigraphiques (US/RBC)		
IV (Cénozoïque)	Quaternaire	Holocène / Pléistocène		US/RBC_11 Remblais		
				US/RBC_12 Couverture limoneuse		
		Holocène		US/RBC_13 Argiles alluviales		
		Pléistocène		US/RBC_14 Limons, sables et graviers alluviaux		
III (Cénozoïque)	Néogène	Miocène supérieur	Diestien	US/RBC_21 Sables de Diest		
		Miocène inférieur	Bolderien	US/RBC_22 Sables de Bolderberg		
		Eocène supérieur	Tongerien	US/RBC_23 Sables et argiles de Sint-Huilbrechts-Hern		
	Paléogène	Eocène moyen	Complexe de Kallo		US/RBC_25 Sables de Maldegem (membre de Onderdale)	
					US/RBC_31 Argiles de Maldegem (membre de Ursel et Asse)	
					US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel)	
			Ledien	US/RBC_42 Sables de Lede		
			Bruxellien	US/RBC_43 Sables de Bruxelles		
		Eocène inférieur	Panisélien		US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vlierzele)	
					US/RBC_51 Argiles de Gent (membre de Merelbeke)	
				Ypresien		US/RBC_61 Sables et argiles de Tielt
						US/RBC_71 Argiles de Kortrijk (membre d'Aalbeke)
	US/RBC_72 Sables et argiles de Kortrijk (membre de Moen)					
		US/RBC_73 Argiles de Kortrijk (membre de Saint Maur)				
Paléocène supérieur	Landénien	US/RBC_81 Sables de Hannut (Membre de Grandglise)				
		US/RBC_82 Argiles de Hannut (Membre de Lincnet)				
II (Mésozoïque)	Crétacé	Crétacé supérieur	Maastrichtien (Sénonien)	US/RBC_91 Craies de Gulpen		
I (Paléozoïque)	Cambrien	Cambrien inférieur (?)	Dévilien (?)	US/RBC_92 Socle Paléozoïque		

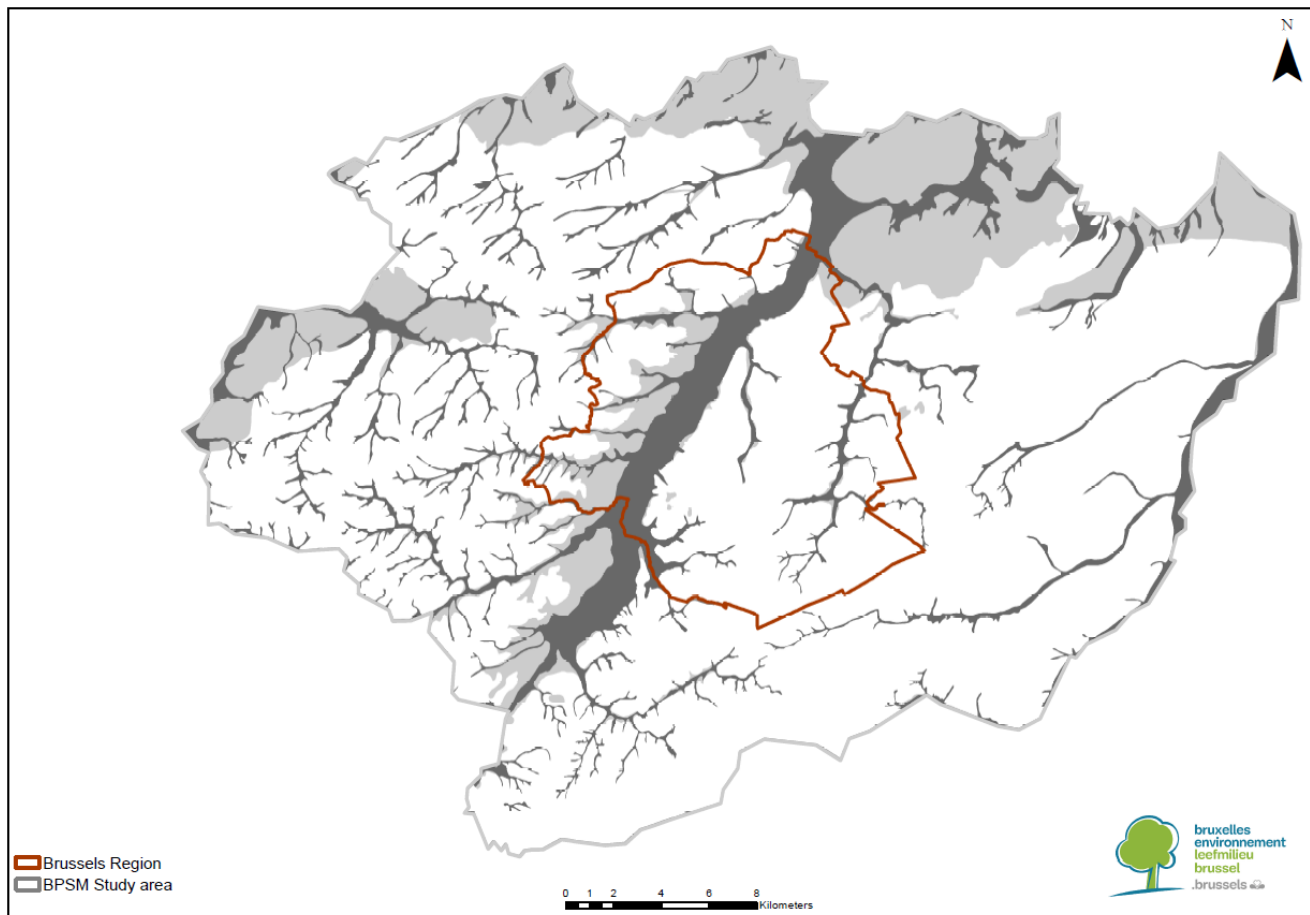
Figure 22 : Représentation 2D du modèle géologique au droit de la zone d'étude

A l'instar de *Brustrati3D*, le modèle géologique étendu sur la zone d'étude ne modélise que le toit et la base des formations quaternaires. Cette simplification ne pose pas de problème en ce qui concerne la représentation des limons de plateaux et versants (*US/RBC_12 Couverture limoneuse* en région bruxelloise). En revanche, les dépôts alluvionnaires se voient amalgamés sans discrétisation possible entre les couches basales grossières Pléistocène (*US/RBC_14 Limons, sables et graviers alluviaux* en région bruxelloise) et les couches superficielles plus argileuses Holocène (*US/RBC_13 Argiles alluviales* en région bruxelloise). Afin de prendre en compte ces différences lithologiques et d'approcher grossièrement les structures en place, les extensions de



ces unités cartographiées sur le site *Databank Ondergrond Vlaanderen* ont été exploitées (**Figure 23**) et des valeurs d'épaisseur arbitraires ont y été attribuées par *expert judgment* (§4.1.2) notamment sur la base de l'analyse des coupes et log de forages disponibles.

Enfin, il y a lieu de préciser que les remblais anthropogéniques (*US/RBC_11 Remblais* en région bruxelloise) n'ont pas été pris en compte.



Ere	Système	Série	Etage	Unités Stratigraphiques (US/RBC)		
IV (Cénozoïque)	Quaternaire	Holocène / Pléistocène	-	US/RBC_11 Remblais		
		Holocène	-	US/RBC_12 Couverture limoneuse		
		Holocène	-	US/RBC_13 Argiles alluviales		
		Pléistocène	-	US/RBC_14 Limons, sables et graviers alluviaux		
III (Cénozoïque)	Néogène	Miocène supérieur	Diestien	US/RBC_21 Sables de Diest		
		Miocène inférieur	Bolderien	US/RBC_22 Sables de Bolderberg		
		Eocène supérieur	Tongerien	US/RBC_23 Sables et argiles de Sint-Huilbrechts-Hern		
	Paléogène	Eocène moyen		Complexe de Kailo	US/RBC_25 Sables de Maldegem (membre de Onderdale)	
					US/RBC_31 Argiles de Maldegem (membre de Ursel et Asse)	
					US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel)	
					US/RBC_42 Sables de Lede	
					US/RBC_43 Sables de Bruxelles	
		Eocène inférieur			Ypresien	US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vierzele)
						US/RBC_51 Argiles de Gent (membre de Merelbeke)
						US/RBC_61 Sables et argiles de Tielt
						US/RBC_71 Argiles de Kortrijk (membre d'Aalbeke)
						US/RBC_72 Sables et argiles de Kortrijk (membre de Moen)
Paléocène supérieur			Landénien	US/RBC_73 Argiles de Kortrijk (membre de Saint Maur)		
				US/RBC_81 Sables de Hannut (Membre de Grandgise)		
				US/RBC_82 Argiles de Hannut (Membre de Lincent)		
II (Mésozoïque)	Crétacé	Crétacé supérieur	Maastrichtien (Sénonien)	US/RBC_91 Craies de Gulpen		
I (Paléozoïque)	Cambrien	Cambrien inférieur (?)	Dévilien (?)	US/RBC_92 Soles Paléozoïques		

Figure 23 : Extensions des unités stratigraphiques quaternaires (dovvlanderen) (<https://www.dov.vlaanderen.be/>).



3.5.2 Unités Hydrogéologiques

3.5.2.1 Description

Une *Unité Hydrogéologique de la Région de Bruxelles-Capitale* (UH/RBC) correspond à une ou un ensemble d'*Unités Stratigraphiques de la Région de Bruxelles-Capitale* (US/RBC) ayant des caractéristiques hydrogéologiques similaires ou proches. Ces unités peuvent constituer soit :

- des *aquifères*, c'est-à-dire des réservoirs géologiques accueillant une nappe pouvant être exploitée ;
- des *aquitards*, c'est-à-dire des réservoirs géologiques accueillant une nappe mais ne pouvant pas être exploitée d'un point de vue économique (trop faible perméabilité) ;
- des *aquicludes*, c'est-à-dire des unités hydrogéologiques imperméables, ayant pour effet de compartimenter hydrauliquement deux aquifères ou aquitards (ex : couche d'argile).

Le sous-sol Bruxellois se compose de (**Tableau 5**) :

- 6 unités aquifères (en considérant l'*UH/RBC_9b* *Système aquifère du socle Paléozoïque* comme aquifère) ;
- 3 unités aquitards ;
- 5 unités aquicludes.

Ere	Unités Stratigraphiques (US/RBC)	Unités Hydrogéologiques (UH/RBC)		Type	Etat de la nappe	SYSTÈME
IV (Cénozoïque)	US/RBC_11 Remblais	UH/RBC_1 Système aquifère du quaternaire	UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel	aquitard	libre	
	US/RBC_12 Couverture limoneuse					
	US/RBC_13 Argiles alluviales					
	US/RBC_14 Limons, sables et graviers alluviaux		UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux	aquifère	semi- captif	
III (Cénozoïque)	US/RBC_21 Sables de Diest	UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché		aquifère	libre	PHREATIQUE
	US/RBC_22 Sables de Bolderberg					
	US/RBC_23 Sables et argiles de Sint-Huilbrechts-Hern					
	US/RBC_25 Sables de Maldegem (membre de Onderdale)					
	US/RBC_31 Argiles de Maldegem (membre de Ursel et Asse)	UH/RBC_3 Aquiclude des argiles de Ursel et Asse		aquiclude	-	
	US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel)	UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele		aquifère	libre	
	US/RBC_42 Sables de Lede					
	US/RBC_43 Sables de Bruxelles					
	US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vlierzele)					
	US/RBC_51 Argiles de Gent (membre de Merelbeke)	UH/RBC_5 Aquiclude des argiles de Gent		aquiclude	-	
	US/RBC_61 Sables et argiles de Tielt	UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt		aquitard	libre (localement captif)	
	US/RBC_71 Argiles de Kortrijk (membre d'Aalbeke)	UH/RBC_7 Système aquitard des sables et argiles de Kortrijk	UH/RBC_7a Aquiclude des argiles de Aalbeke	aquiclude	-	
	US/RBC_72 Sables et argiles de Kortrijk (membre de Moen)		UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen	aquitard	libre (localement captif)	
	US/RBC_73 Argiles de Kortrijk (membre de Saint Maur)		UH/RBC_7c Aquiclude des argiles de Saint-Maur	aquiclude	-	
US/RBC_81 Sables de Hannut (Membre de Grandglise)	UH/RBC_8 Système aquifère des sables du Landénien	UH/RBC_8a Aquifère des sables du Landénien	aquifère	captif	CAPTIF	
US/RBC_82 Argiles de Hannut (Membre de Lincent)		UH/RBC_8b Aquiclude des argiles du Landénien	aquiclude	-		
II (Mésozoïque)	US/RBC_91 Craies de Gulpen	UH/RBC_9 Système aquifère des craies du Crétacé et du socle Paléozoïque	UH/RBC_9a Aquifère des craies du Crétacé	aquifère	captif	CAPTIF
I (Paléozoïque)	US/RBC_92 Socle Paléozoïque		UH/RBC_9b Système aquifère du socle Paléozoïque	aquifère/aquitard	captif	

Tableau 5 : Unités Hydrogéologiques de la Région de Bruxelles-Capitale (UH/RBC)

Le sous-sol bruxellois se divise en deux grands *systèmes hydrogéologiques* : le *système phréatique* et le *système captif*, séparés verticalement par un aquiclude, l'*UH/RBC_7c Aquiclude des argiles de Saint-Maur*.

Cet aquiclude, d'épaisseur moyenne de 30 m (4.5 à 52 m en région bruxelloise) et quasi continu sur la zone d'étude (**Figure 24**), est composé d'argile très finement silteuse avec quelques minces intercalations d'argile grossièrement silteuse ou de silt très fin argileux. Sa faible conductivité hydraulique verticale (K_v de l'ordre de $1E-9$ m/s selon l'état de nos connaissances) et son épaisseur marquée, limite fortement les flux de *drainance* entre systèmes, dont la piézométrie respective évolue de manière très indépendante.



A l'échelle de la zone modélisée, il y a lieu d'observer l'absence de l'*UH/RBC_7c Aquiclude des argiles de Saint-Maur* au droit des parties amonts des vallées alluviales de la Senne au sud-ouest (et de ses affluents Sennette/Hain) et de la Dyle au sud-est (et de son affluent la Lasne) (**Figure 24**). Au niveau de ces zones, apparaît directement sous la couverture quaternaire, les unités stratigraphiques Landéniennes et Paléozoïques appartenant au *système captif* qui devient donc localement phréatique (libre).

Ces zones constituent plus précisément des zones d'alimentation par *impluvium* du *système captif*. Il y a lieu d'y observer des échanges verticaux voire un équilibre hydrodynamique entre l'aquifère alluvial et les unités aquifères du *système captifs* sous-jacentes. Il y a lieu de noter que ces échanges interviennent à bonne distance en amont de zone d'intérêt constituée par les frontières de la région bruxelloise.

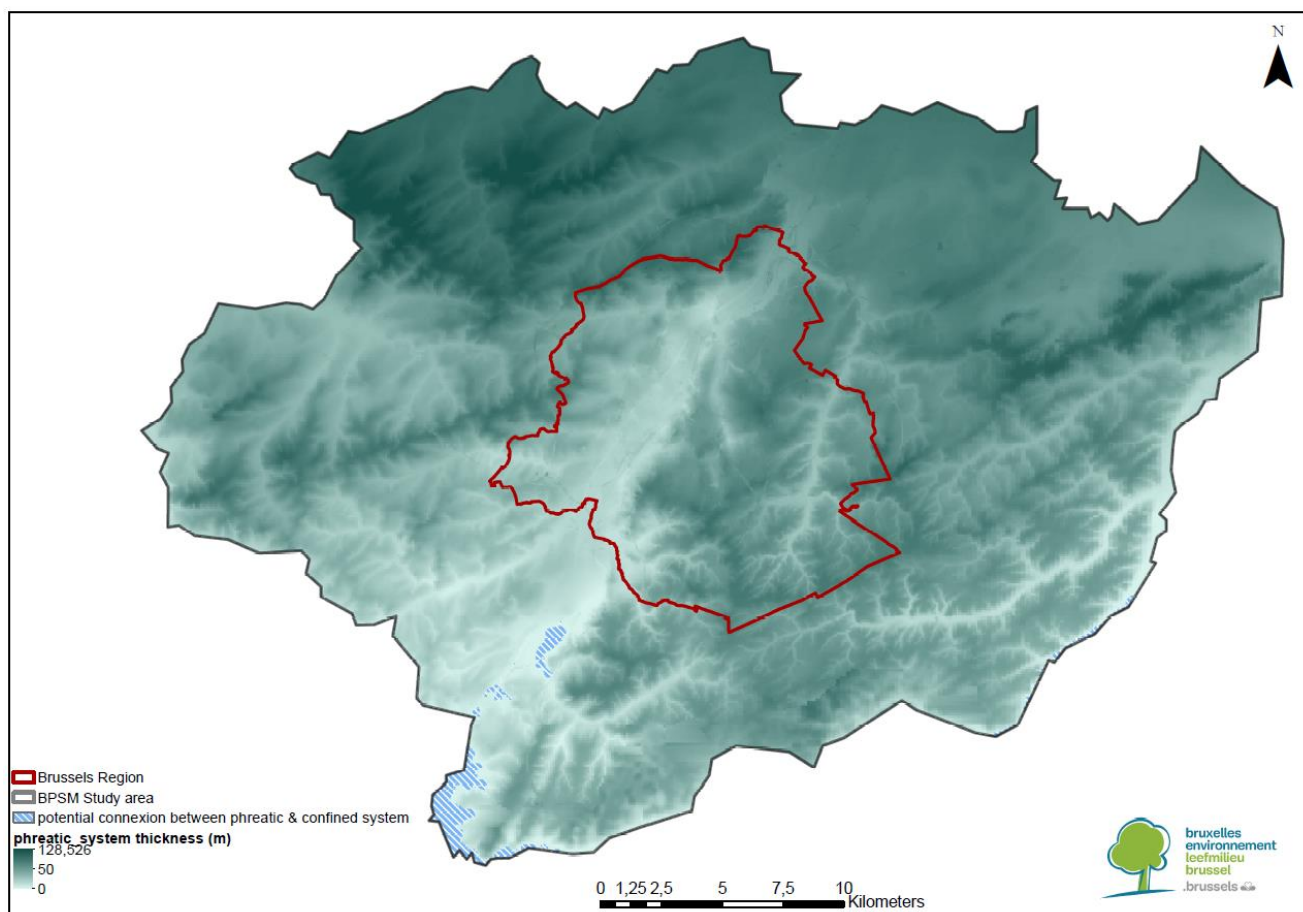


Figure 24 : Extension et épaisseur de l'*US/RBC_73 Argiles de Kortrijk (membre de Saint-Maur)* à l'échelle de la zone modélisée

3.5.2.2 Le système phréatique bruxellois

Le *système phréatique* englobe les unités comprises depuis la surface topographique jusqu'à l'*UH/RBC_7 Système aquitard des sables et argiles de Kortrijk* comprise (**Tableau 5**). Ce système se caractérise par la succession d'unités aquifères/aquitards et aquicludes et une assez forte hétérogénéité structurale. Il en résulte des communications verticales plus ou moins fortes entre unités aquifères et aquitards à la faveur de l'extension et des propriétés hydrodynamiques des unités aquicludes.

On y observe :

- la présence d'une **nappe libre « principale »**, appelée communément *nappe des sables du Bruxellien*, se développant sur les plateaux au sein des l'*UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele*, et s'écoulant vers les vallées alluviales. Cette nappe est particulièrement bien développée à l'est de la Senne, du fait d'une épaisseur aquifère plus grande, conséquence de l'érosion par des paléo-chenaux (**Figure 20**) des unités géologiques sous-jacentes jusqu'au sein de l'*UH/RBC_7*



Système aquitard des sables et argiles de Kortrijk préliminairement à la sédimentation de l'*US/RBC_43 Sables de Bruxelles*. L'écoulement depuis les plateaux sableux et perméables passe par une zone de transition moins perméable, au niveau des flancs des vallées alluviales, au sein du système composé des colluvions et limons stratifiés (*UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel*) reposant sur les unités peu perméables de l'Yprésien (*UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt, UH/RBC_7 Système aquitard des sables et argiles de Kortrijk*). Ce contraste de perméabilité est marqué par la présence de nombreuses sources. Enfin, l'écoulement rejoint la vallée alluviale qui se compose de deux nappes plus ou moins distinctes marquées par des gradients hydrauliques très faibles et dont la base, en région bruxelloise, est toujours constituée des unités peu perméables de l'*UH/RBC_7* :

- une **nappe alluviale libre superficielle** au sein des alluvions Holocène argilo-limoneux peu perméables de l'*UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire* et des remblais accompagnant le réseau hydrographique et le réseau de collecteurs avec lesquels des échanges sont observables (drainage plus généralement). Cette nappe apparaît sub-affleurante, discontinue, très hétérogène, plus ou moins compartimentée par les infrastructures urbaines (tunnels, galeries, bâtiments,...).

L'amplitude des échanges entre la nappe alluviale et le système *réseau hydrographique / grand collecteurs* dépend essentiellement

- des propriétés hydrodynamiques du *système phréatique* (et plus particulièrement de l'*UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire*). En l'absence de remblais perméables, la lithologie relativement argileuse des alluvions en contact avec le système *réseau hydrographique / grand collecteurs* laisse présager des échanges relativement limités ;
 - des propriétés hydrodynamiques du lit du réseau hydrographique ouvert ;
 - du degré d'étanchéité des collecteurs et des pertuis acheminant les cours d'eau ;
- une **nappe alluviale semi-captive** au sein des alluvions Pléistocène perméables de l'*UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux* notamment au droit des vallées alluviales principales. Les zones de captivité sont corrélées avec la présence de la couverture argileuse Holocène (*US/RBC_13 Argiles alluviales*), le reste étant généralement libre.

Un équilibre hydrodynamique est possible entre les deux nappes alluviales, dépendant des propriétés hydrodynamiques de l'*UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire* ;

- sur les hauteurs des plateaux exclusivement, la présence de petites **nappes perchées** au droit des zones de présence de l'*UH/RBC_3 Aquiclude des argiles de Ursel et Asse (Figure 28)*. Ces nappes discontinues et de très faibles extensions s'écoulent de manière radiale au sein de l'*UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché* et des loess quaternaires jusqu'aux limites de l'aquiclude sous-jacent ;
- plus particulièrement à l'ouest de la Senne, la présence d'un système de **nappes libres à captives** relativement peu développé. Une première nappe est identifiable au sein de l'*UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt* confinée entre l'*UH/RBC_7a Aquiclude des argiles d'Aalbeke* formant sa base imperméable et l'*UH/RBC_5 Aquiclude des argiles de Gent* formant son toit. La discontinuité de ces deux unités aquicludes engendre des contacts directs de cette nappe avec les nappes sous et sus-jacentes présentes respectivement au sein de l'*UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen* et l'*UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele*. L'extension de ces aquicludes, principalement à l'ouest de la Senne, conditionne la morphologie d'un système de nappes au sein des unités sableuses à argileuses *UH/RBC_4, UH/RBC_6, UH/RBC_7b*. Il y a lieu de noter que les *UH/RBC_6, UH/RBC_7b* présentent des perméabilités relativement faibles (aquitards).



3.5.2.3 Le système captif bruxellois

Le système captif englobe les unités hydrogéologiques sous l'UH/RBC_7 Système aquitard des sables et argiles de Kortrijk), à savoir :

- l'UH/RBC_8 Aquifère des sables du Landénien ;
- l'UH/RBC_9a Aquifère des craies du Crétacé ;
- l'UH/RBC_9b Système aquifère du socle Paléozoïque.

Ne faisant pas l'objet de la présente étude, le contexte hydrogéologique du système captif n'est pas développé plus en détail au sein de ce rapport.

3.5.3 Carte piézométrique du système phréatique

Une première carte piézométrique centrée sur la zone d'étude a été construite par interpolation en *Natural Neighbor* des niveaux piézométriques mesurés au droit de points (piézomètres, puits, sources) représentatifs des unités hydrogéologiques constituant le système phréatique.

Il y a lieu de souligner que cette approche basée sur l'interpolation simplifie le système phréatique en un aquifère unique homogène et isotrope, négligeant notamment tout phénomène de compartimentation interne (§3.5.2.2) ainsi que les processus d'écoulement logiquement contraints par l'hétérogénéité des propriétés hydrodynamiques du sous-sol. Néanmoins, bien que simpliste, l'exploitation de cette première carte dans le cadre du développement du modèle conceptuel apparaît très utile pour la compréhension générale du système hydrogéologique.

Les niveaux piézométriques issus de piézomètres de la région bruxelloise ont été acquis lors d'une première campagne piézométrique réalisée en mai 2013 sur 36 ouvrages de la région bruxelloise. Afin de maximiser le jeu de données et par conséquent d'optimiser la précision de l'interpolation, une série de données complémentaires est venue avantageusement compléter la campagne de mai 2013, à savoir :

- 69 ouvrages relevés en mars 2015. La période de mars 2015 présentant un régime piézométrique sensiblement similaire à celui observé en mai 2013 ;
- 50 données acquises entre mars et juin 2013 au droit de piézomètres en Flandres (VMM) et Wallonie (DGO3) ;
- 21 sources à l'émergence, plus précisément de l'UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele pour lesquelles la topographie a été mesurée ou définie via le MNT (§3.2) ;
- points fictifs au droit du réseau hydrographique et du réseau de grands collecteurs de la Société Bruxelloise de Gestion de l'Eau, pour lesquels on peut considérer un certain équilibre hydrodynamique eaux libres/eaux souterraines (à nuancer pour les grands collecteurs). A l'instar des hypothèses formulées au §3.3.3.1 et §3.4.3, une cote de référence égale à la topographie du MNT (§3.2) moins 1 mètre est appliquée à chaque point. Cette manœuvre permet notamment de contraindre la piézométrie en fond de vallée alluviale, assurant la représentativité des écoulements contraints par le caractère drainant du système réseau hydrographique / grands collecteurs en fond de vallée.

La **Figure 25** illustre la localisation des points de mesure piézométrique pour l'interpolation de la piézométrie par *Natural Neighbor*.



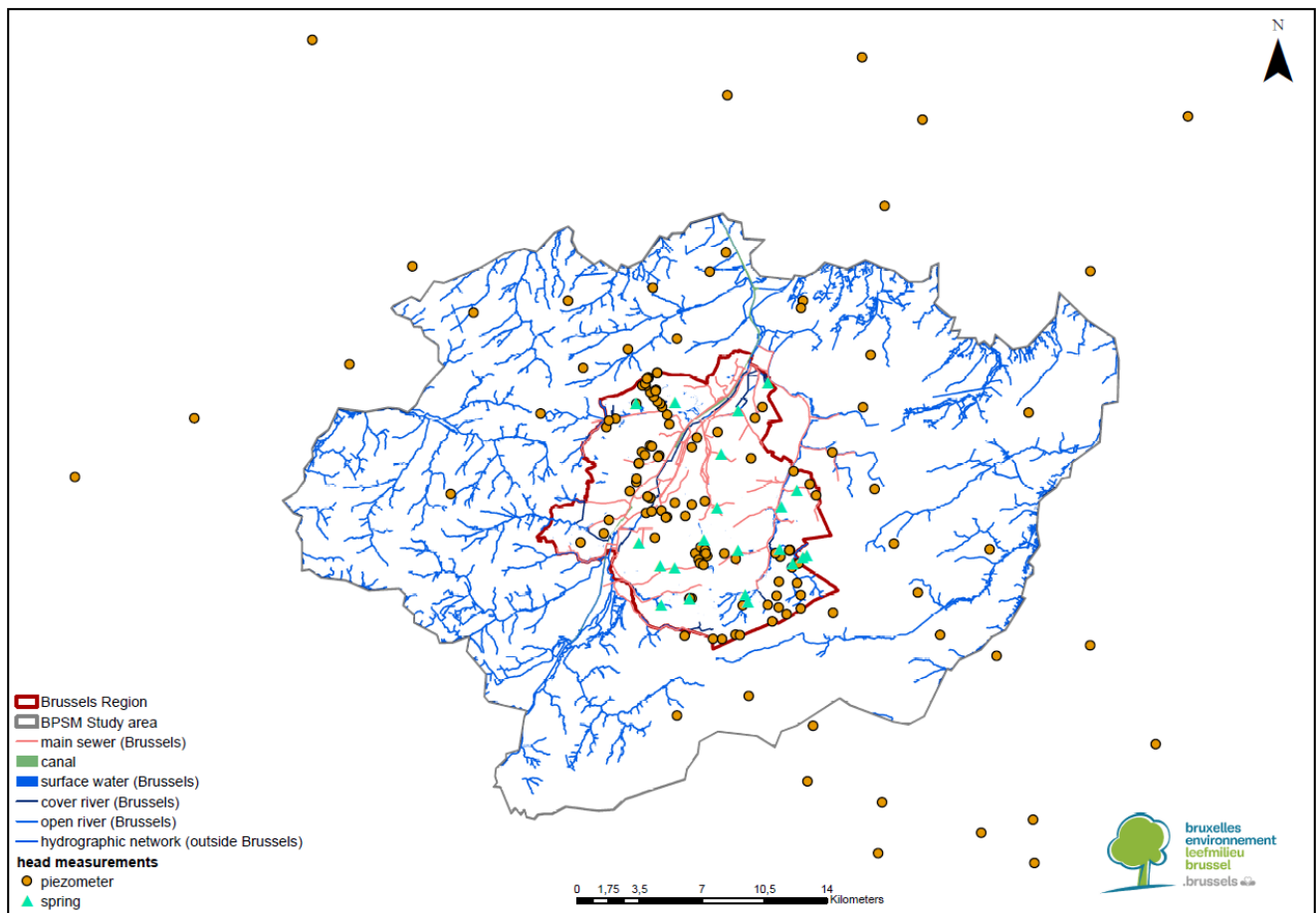


Figure 25 : Localisation des points de mesures piézométriques pour l'interpolation de la piézométrie par *Natural Neighbor*

Les **Figure 26** et **Figure 27**, illustrent respectivement :

- la piézométrie *absolue* (m-DNG) interpolée par *Natural Neighbor* ;
- la piézométrie *relative* (m/ surface) interpolée par *Natural Neighbor*.

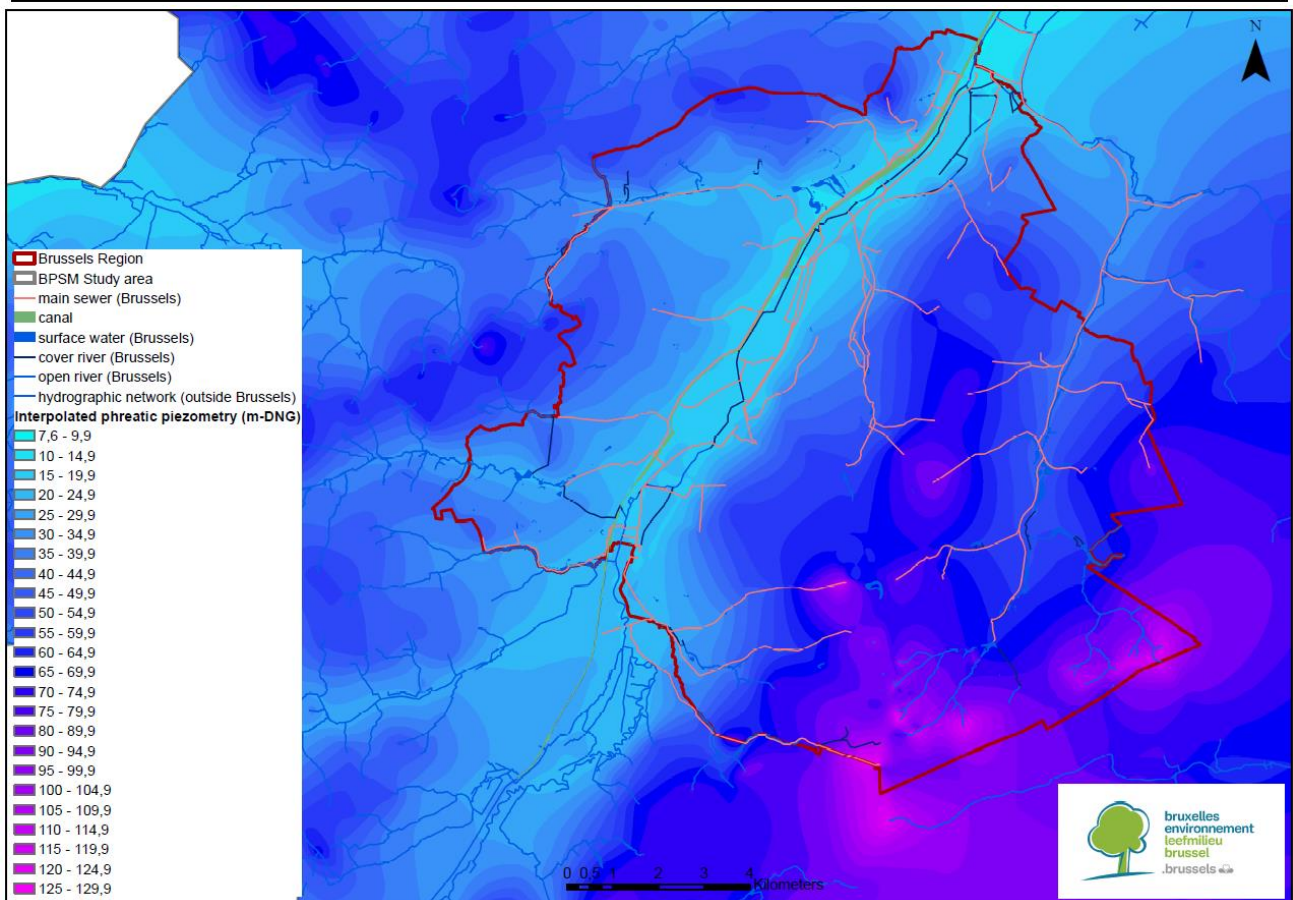
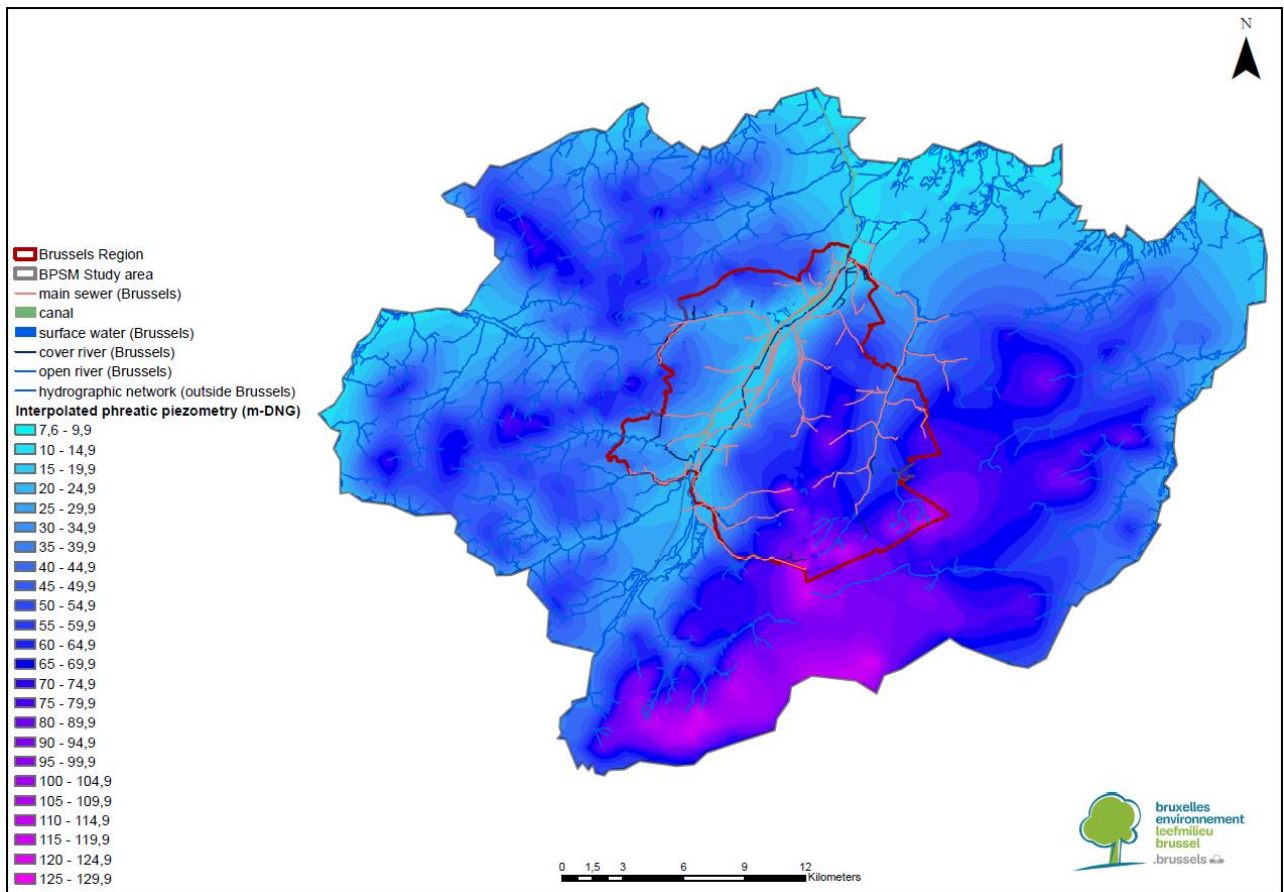


Figure 26 : Piézométrie absolue (m-DNG) interpolée par *Natural Neighbor*



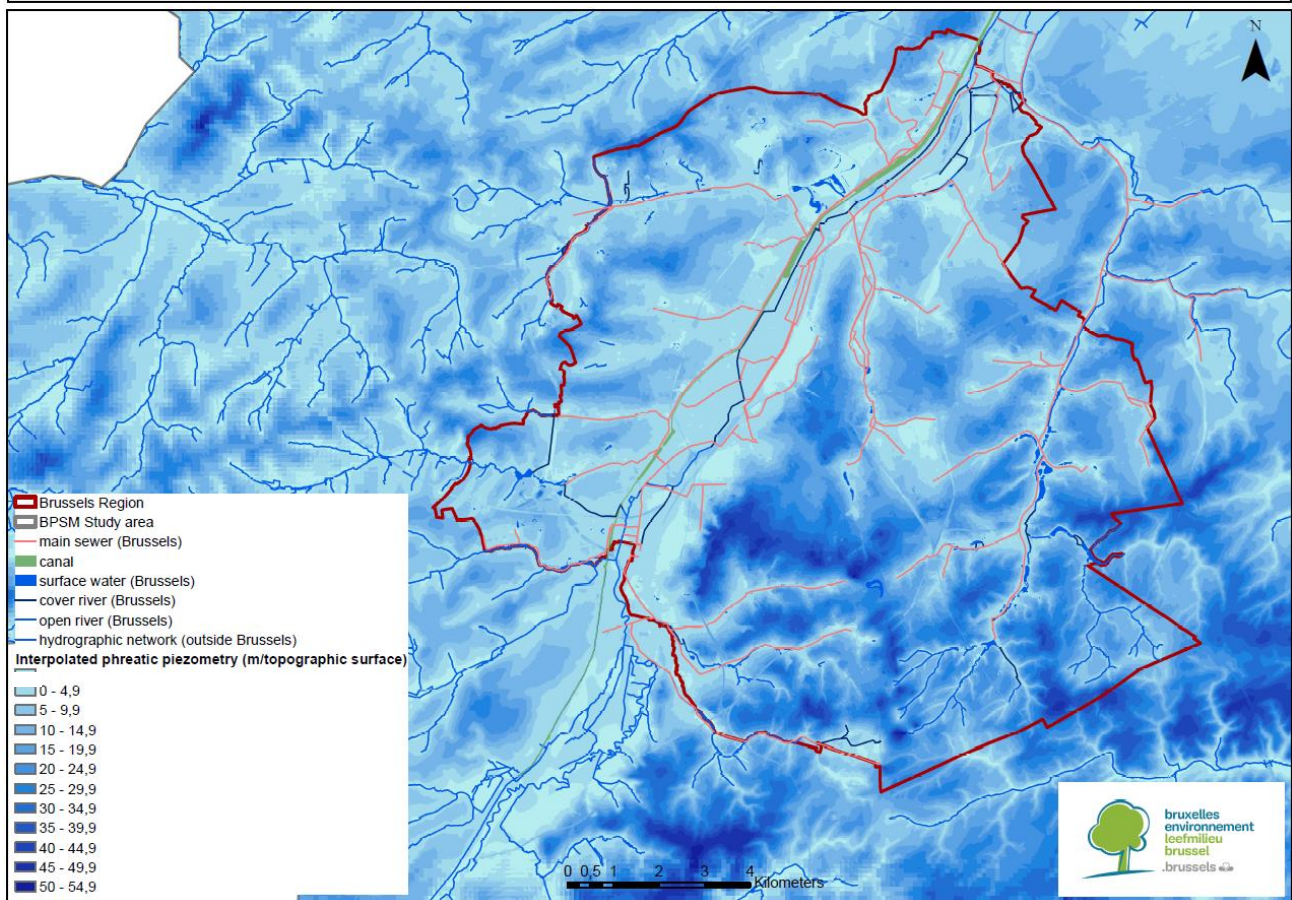
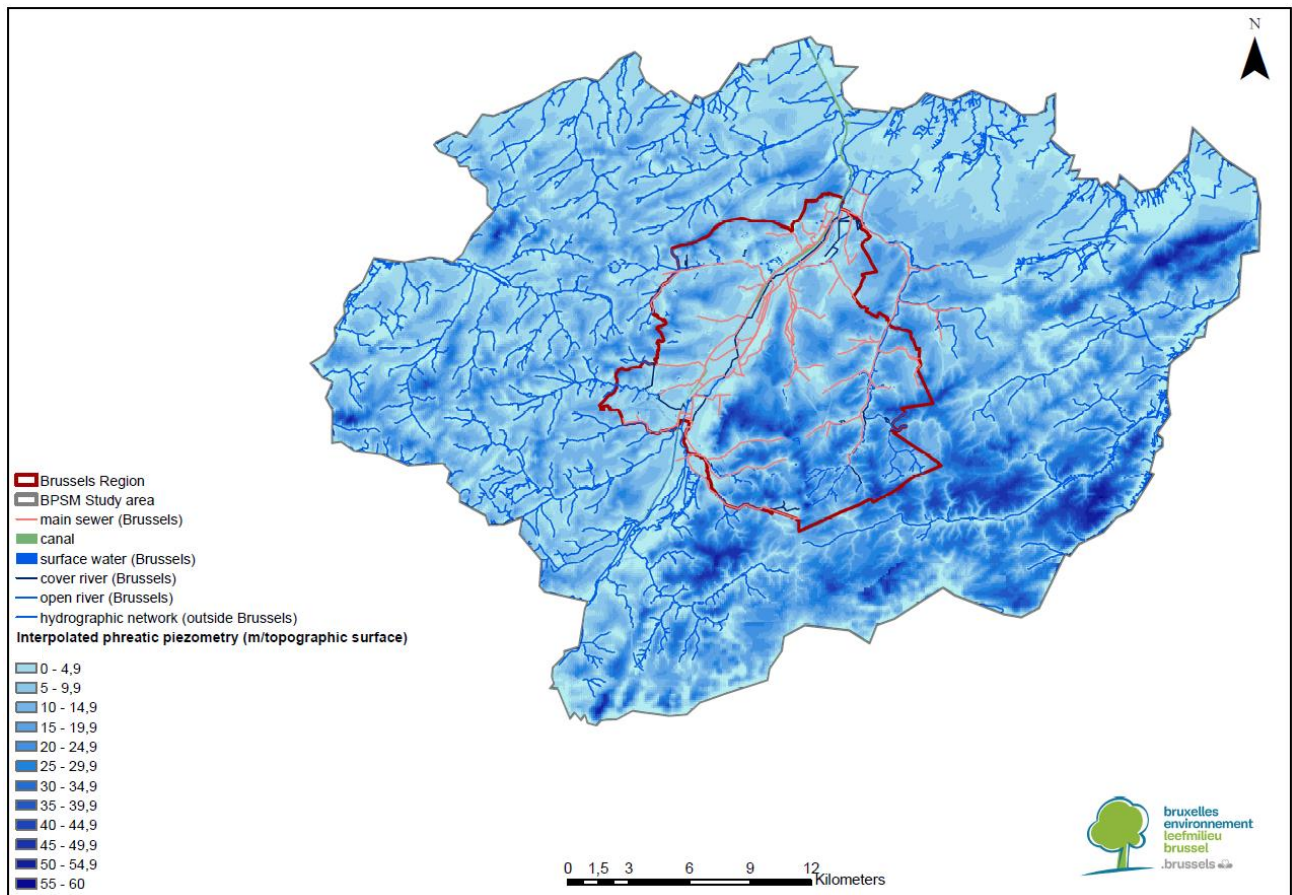


Figure 27 : Piézométrie relative (m/ surface) interpolée par *Natural Neighbor*



La **Figure 26** confirme les sens d'écoulements prévisibles, suivant globalement la topographie et convergeant depuis les plateaux marqués par des écoulements essentiellement radiaux vers les vallées alluviales et plus précisément le réseau hydrographique et les grands collecteurs, avec un gradient hydraulique moindre que le gradient topographique. Au droit de la zone d'étude, on quantifie un range de 7.6 – 130 m-DNG pour la piézométrie, avec un maximum observé au sud de la zone d'étude au droit des plateaux sableux, et un minimum observé au nord en aval de la vallée alluviale de la Senne.

Concernant la piézométrie relative décrite par la **Figure 27**, on note un range de profondeur de 0 - 60 m, marqué par des niveaux proches de la surface en fond de vallée alluviale et des niveaux relativement profonds sur les plateaux (> 20 m). Il y a lieu de constater, comme le montre la **Figure 28**, que ces zones de plateaux font généralement l'objet de la présence de l'*UH/RBC_3 Aquiclude des argiles de Ursel et Asse* au-dessus de laquelle on note la présence de *nappes perchées (UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché)* présentant des niveaux piézométriques intermédiaires entre la nappe phréatique « principale » faisant l'objet de l'interpolation et la surface topographique.

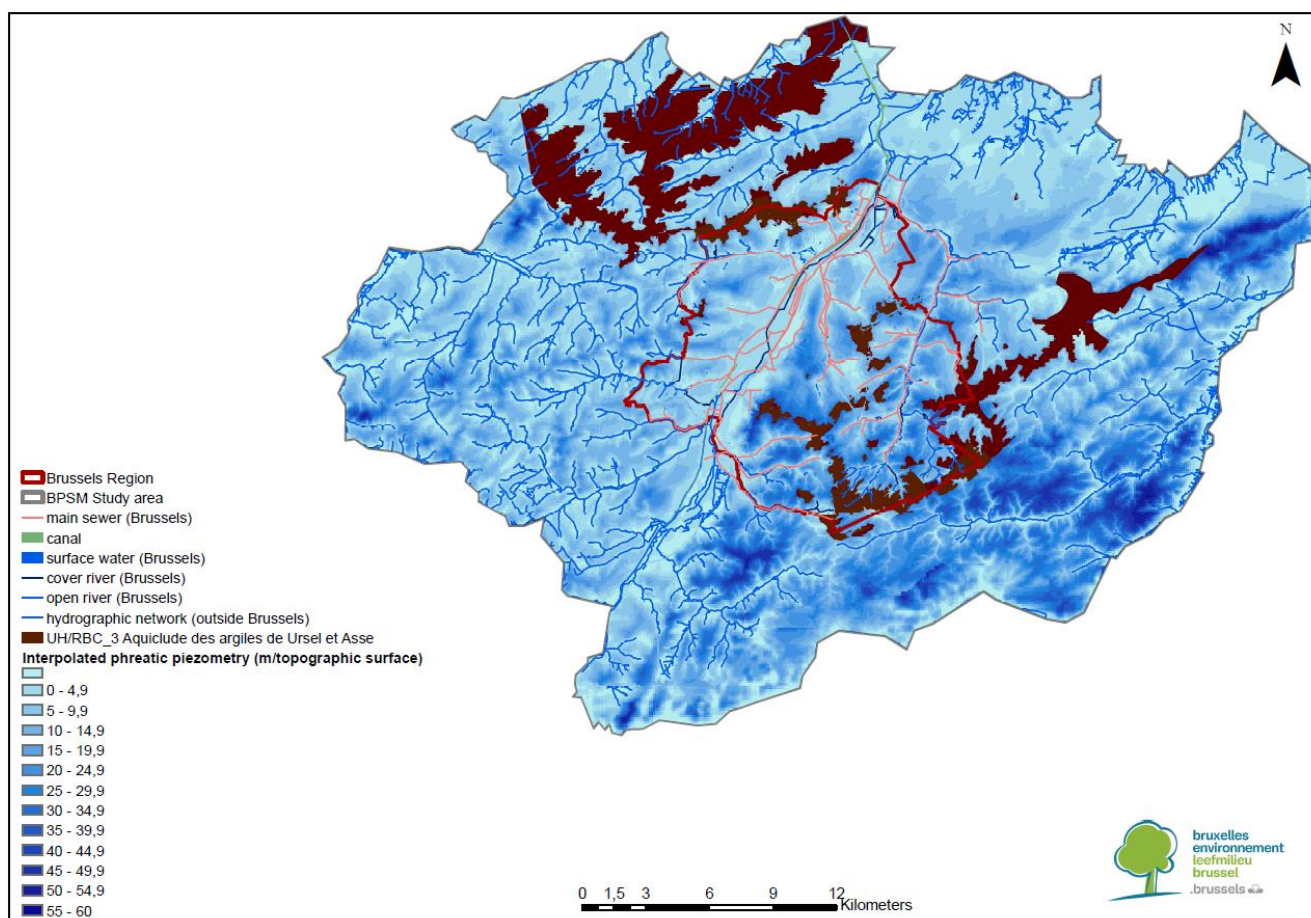


Figure 28 : Localisation de l'*UH/RBC_3 Aquiclude des argiles de Ursel et Asse* sur fond de piézométrie phréatique interpolée

3.5.4 Discrétisation verticale

Sur la base des hypothèses formulées au §3.5.2.1, on considère que l'*UH/RBC_7c Aquiclude des argiles de Saint-Maur* constitue une limite hydrogéologique au système phréatique. Par conséquent, cette unité définit la base du modèle hydrogéologique.

BPSM est composé d'un ensemble de 9 couches (layers) respectant une logique de découpage par unité hydrogéologique (UH/RBC) aquifère / aquitard / aquiclude (Tableau 6). Le modèle géologique (§3.5.1.2), incluant la topographie déjà documentée en §3.2, est exploité pour reproduire la structure de l'ensemble des couches modélisées.



Ere	Unités Stratigraphiques (US/RBC)	Unités Hydrogéologiques (UH/RBC)	Type	Layer	
IV (Cénozoïque)	US/RBC_11 Remblais	UH/RBC_1 Système aquifère du quaternaire	UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel	aquitard	1
	US/RBC_12 Couverture limoneuse				
	US/RBC_13 Argiles alluviales		UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux	aquifère	2
	US/RBC_14 Limons, sables et graviers alluviaux				
III (Cénozoïque)	US/RBC_21 Sables de Diest	UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché	aquifère	3	
	US/RBC_22 Sables de Bolderberg				
	US/RBC_23 Sables et argiles de Sint-Huilbrechts-Hern				
	US/RBC_25 Sables de Maldegem (membre de Onderdale)				
	US/RBC_31 Argiles de Maldegem (membre de Urse) et Asse	UH/RBC_3 Aquiclude des argiles de Urse et Asse	aquiclude	4	
	US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel)	UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele	aquifère	5	
	US/RBC_42 Sables de Lede				
	US/RBC_43 Sables de Bruxelles				
	US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vlierzele)				
	US/RBC_51 Argiles de Gent (membre de Merelbeke)	UH/RBC_5 Aquiclude des argiles de Gent	aquiclude	6	
	US/RBC_61 Sables et argiles de Tielt	UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt	aquitard	7	
	US/RBC_71 Argiles de Kortrijk (membre d'Aalbeke)	UH/RBC_7 Système aquitard des sables et argiles de Kortrijk	UH/RBC_7a Aquiclude des argiles de Aalbeke	aquiclude	8
	US/RBC_72 Sables et argiles de Kortrijk (membre de Moen)		UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen	aquitard	9
	US/RBC_73 Argiles de Kortrijk (membre de Saint-Maur)		UH/RBC_7c Aquiclude des argiles de Saint-Maur	aquiclude	Bottom
US/RBC_81 Sables de Hannut (Membre de Grandglise)	UH/RBC_8 Système aquifère des sables du Landénien	UH/RBC_8a Aquifère des sables du Landénien	aquifère	hors zone modélisée	
US/RBC_82 Argiles de Hannut (Membre de Lincet)		UH/RBC_8b Aquiclude des argiles du Landénien	aquiclude		
II (Mésozoïque)	US/RBC_91 Craies de Gulpen	UH/RBC_9 Système aquifère des craies du Crétacé et du socle Paléozoïque	UH/RBC_9a Aquifère des craies du Crétacé		aquifère
I (Paléozoïque)	US/RBC_92 Socle Paléozoïque		UH/RBC_9b Système aquifère du socle Paléozoïque		aquifère/aquitard

Tableau 6 : Discrétisation verticale : couches (layers)

3.6 Captages

3.6.1 Puits

3.6.1.1 Description

Un recensement des captages actifs sur la période mai 2013 a été réalisé au droit de la zone d'étude et pour chaque *unité hydrogéologique* modélisée (**Figure 29**). Les volumes déclarés par les exploitants de captage sur l'année 2013 ont été compilés (**Figure 30**). Ce travail a nécessité la bonne collaboration de la *Vlaamse Milieumaatschappij* et du *Service Public de Wallonie – DGO3*, gestionnaires des autorisations de captage respectivement en région flamande et wallonne. Il y a lieu d'observer :

- qu'au droit de la *zone d'étude*, les captages les plus importants sont localisés principalement en Flandres et exploitent l'aquifère des *sables du Bruxellien* ;
- qu'au droit de la *zone d'intérêt* (région bruxelloise), les captages les plus importants sont ceux du champs captant VIVAQUA (eau potable), situés dans le bois de La Cambre et la forêt de Soignes, exploitant l'*aquifère des sables du Bruxellien* (UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele). La galerie drainante VIVAQUA (voir description au §3.6.2.1), dont les débits dépassent les 5000 m³/jour en 2013 n'est ici pas compabilisée.

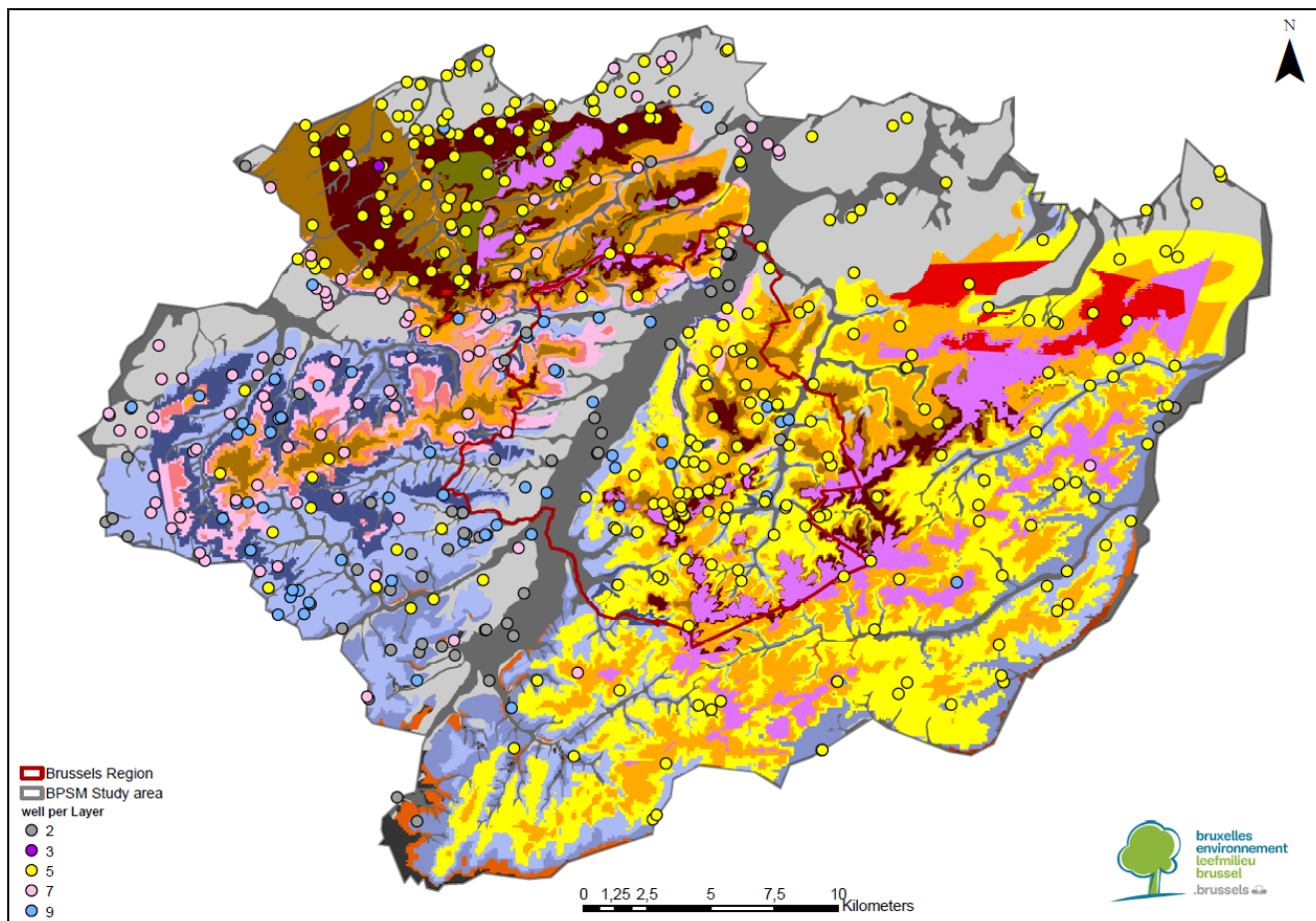
Faute d'une plus grande précision temporelle des données disponibles, hormis pour le champ captant VIVAQUA pour lequel des données journalières sont exploitables, les débits annuels 2013_sont par défaut implémentés au modèle et exprimés en m³/jour.



Il y a lieu de noter :

- qu'en l'absence de donnée pour un captage théoriquement actif, la valeur du volume annuel autorisé ajustée par un coefficient de 0.75 est retenue pour le calcul du débit journalier (*expert judgement* basé sur la comparaison entre les débits déclarés et autorisés) ;
- que les débits temporaires issus des activités de rabattement dans le cadre du génie civil ne sont pas pris en compte, faute de données exploitables.

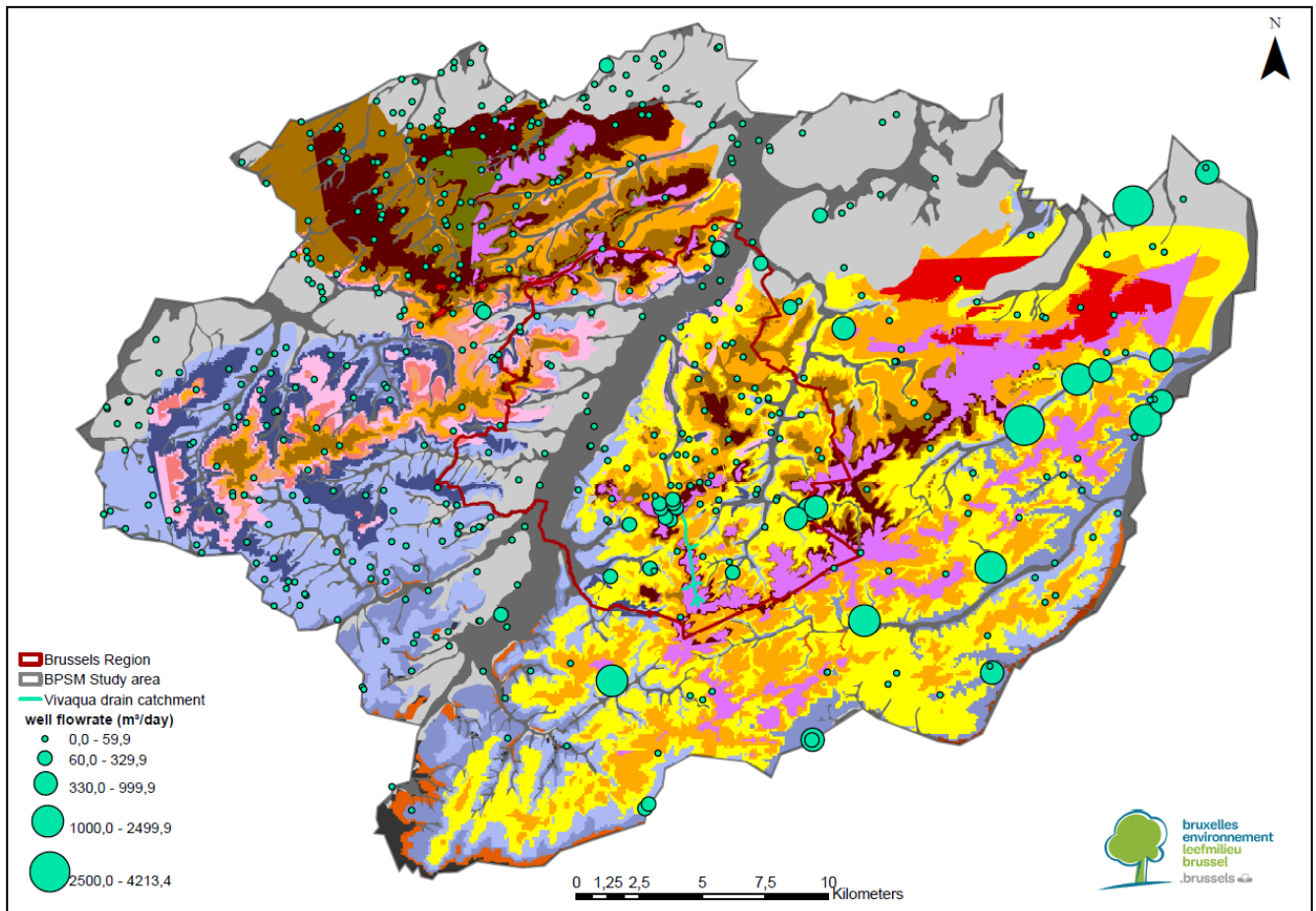




Ere	Unités Stratigraphiques (US/RBC)	Unités Hydrogéologiques (UH/RBC)		Type	Layer
IV (Cénozoïque)	US/RBC_11 Remblais	UH/RBC_1 Système aquifère du quaternaire	UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel	aquitard	1
	US/RBC_12 Couverture limoneuse		UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux	aquifère	2
III (Cénozoïque)	US/RBC_21 Sables de Diest	UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché		aquifère	3
	US/RBC_22 Sables de Bolderberg				
	US/RBC_23 Sables et argiles de Sint-Huilbrechts-Hern				
	US/RBC_25 Sables de Maldegem (membre de Onderdale)	UH/RBC_3 Aquiclude des argiles de Urssel et Asse	aquiclude	4	
	US/RBC_31 Argiles de Maldegem (membre de Urssel et Asse)				
	US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel)	UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele	aquifère	5	
	US/RBC_42 Sables de Lede				
	US/RBC_43 Sables de Bruxelles				
	US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vlierzele)	UH/RBC_5 Aquiclude des argiles de Gent	aquiclude	6	
	US/RBC_51 Argiles de Gent (membre de Merelbeke)				
	US/RBC_61 Sables et argiles de Tielt	UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt	aquitard	7	
	US/RBC_71 Argiles de Kortrijk (membre d'Aalbeke)	UH/RBC_7 Système aquitard des sables et argiles de Kortrijk	UH/RBC_7a Aquiclude des argiles de Aalbeke	aquiclude	8
	US/RBC_72 Sables et argiles de Kortrijk (membre de Moen)		UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen	aquitard	9
US/RBC_73 Argiles de Kortrijk (membre de Saint-Maur)	UH/RBC_7c Aquiclude des argiles de Saint-Maur		aquiclude	Bottom	
US/RBC_81 Sables de Hannut (Membre de Grandglise)	UH/RBC_8 Système aquifère des sables du Landénien	UH/RBC_8a Aquifère des sables du Landénien	aquifère	hors zone modélisée	
US/RBC_82 Argiles de Hannut (Membre de Lincet)		UH/RBC_8b Aquiclude des argiles du Landénien	aquiclude		
II (Mésozoïque)	US/RBC_91 Craies de Gulpen	UH/RBC_9 Système aquifère des craies du Crétacé et du socle Paléozoïque	UH/RBC_9a Aquifère des craies du Crétacé	aquifère	hors zone modélisée
I (Paléozoïque)	US/RBC_92 Socle Paléozoïque		UH/RBC_9b Système aquifère du socle Paléozoïque	aquifère/aquitard	

Figure 29 : Localisation des puits actifs sur la période mai 2013 par chaque couche modélisée (layer)





Ere	Unités Stratigraphiques (US/RBC)	Unités Hydrogéologiques (UH/RBC)		Type	Layer
IV (Cénozoïque)	US/RBC_11 Remblais	UH/RBC_1 Système aquifère du quaternaire	UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel	aquitard	1
	US/RBC_12 Couverture limoneuse		UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux	aquifère	2
	US/RBC_13 Argiles alluviales				
	US/RBC_14 Limons, sables et graviers alluviaux				
III (Cénozoïque)	US/RBC_21 Sables de Diest	UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché		aquifère	3
	US/RBC_22 Sables de Bolderberg				
	US/RBC_23 Sables et argiles de Sint-Huilbrechts-Hern				
	US/RBC_25 Sables de Maldegem (membre de Onderdale)				
	US/RBC_31 Argiles de Maldegem (membre de Urse) et Asse	UH/RBC_3 Aquiclude des argiles de Urse et Asse		aquiclude	4
	US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel)	UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vierzele		aquifère	5
	US/RBC_42 Sables de Lede				
	US/RBC_43 Sables de Bruxelles				
	US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vlierzele)	UH/RBC_5 Aquiclude des argiles de Gent		aquiclude	6
	US/RBC_51 Argiles de Gent (membre de Merelbeke)				
	US/RBC_61 Sables et argiles de Tielt	UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt		aquitard	7
	US/RBC_71 Argiles de Kortrijk (membre d'Aalbeke)	UH/RBC_7 Système aquitard des sables et argiles de Kortrijk	UH/RBC_7a Aquiclude des argiles de Aalbeke	aquiclude	8
	US/RBC_72 Sables et argiles de Kortrijk (membre de Moen)		UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen	aquitard	9
	US/RBC_73 Argiles de Kortrijk (membre de Saint-Maur)		UH/RBC_7c Aquiclude des argiles de Saint-Maur	aquiclude	Bottom
US/RBC_81 Sables de Hannut (Membre de Grandglise)	UH/RBC_8 Système aquifère des sables du Landénien	UH/RBC_8a Aquifère des sables du Landénien	aquifère	hors zone modélisée	
US/RBC_82 Argiles de Hannut (Membre de Lincet)		UH/RBC_8b Aquiclude des argiles du Landénien	aquiclude		
II (Mésozoïque)	US/RBC_91 Craies de Gulpen	UH/RBC_9 Système aquifère des craies du Crétacé et du socle Paléozoïque	UH/RBC_9a Aquifère des craies du Crétacé		aquifère
I (Paléozoïque)	US/RBC_92 Socle Paléozoïque		UH/RBC_9b Système aquifère du socle Paléozoïque		aquifère/aquitard

Figure 30 : Débits annuels 2013 au droit de la zone d'étude (galerie drainante VIVAQUA non comptabilisée)



3.6.1.2 **Conditions aux limites**

Une *condition de « flux imposé »* est appliquée au droit des captages actifs sur la zone d'étude. Ce type de condition génère une extraction en $m^3/jour$ (flux sortant apparenté à un captage) ou une injection (flux entrant) prédéfinie. C'est bien la première option qui est ici d'application.

Cette condition est accompagnée d'une *contrainte sur la piézométrie*. Celle-ci permet de limiter le rabattement induit soit à la base de l'ouvrage si l'équipement est connu avec assez de précision ou par défaut à la base de l'aquifère.

3.6.2 **Galerie drainante (région bruxelloise)**

3.6.2.1 **Description**

En 1873, une galerie drainante est creusée dans le Bois de la Cambre afin de capter la nappe des *sables du Bruxellien (UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele)* à des fins d'alimentation en eau potable. La galerie fait environ 5 500 m de long (**Figure 31**) et est profonde de 20 et 60 m (**Figure 32**).



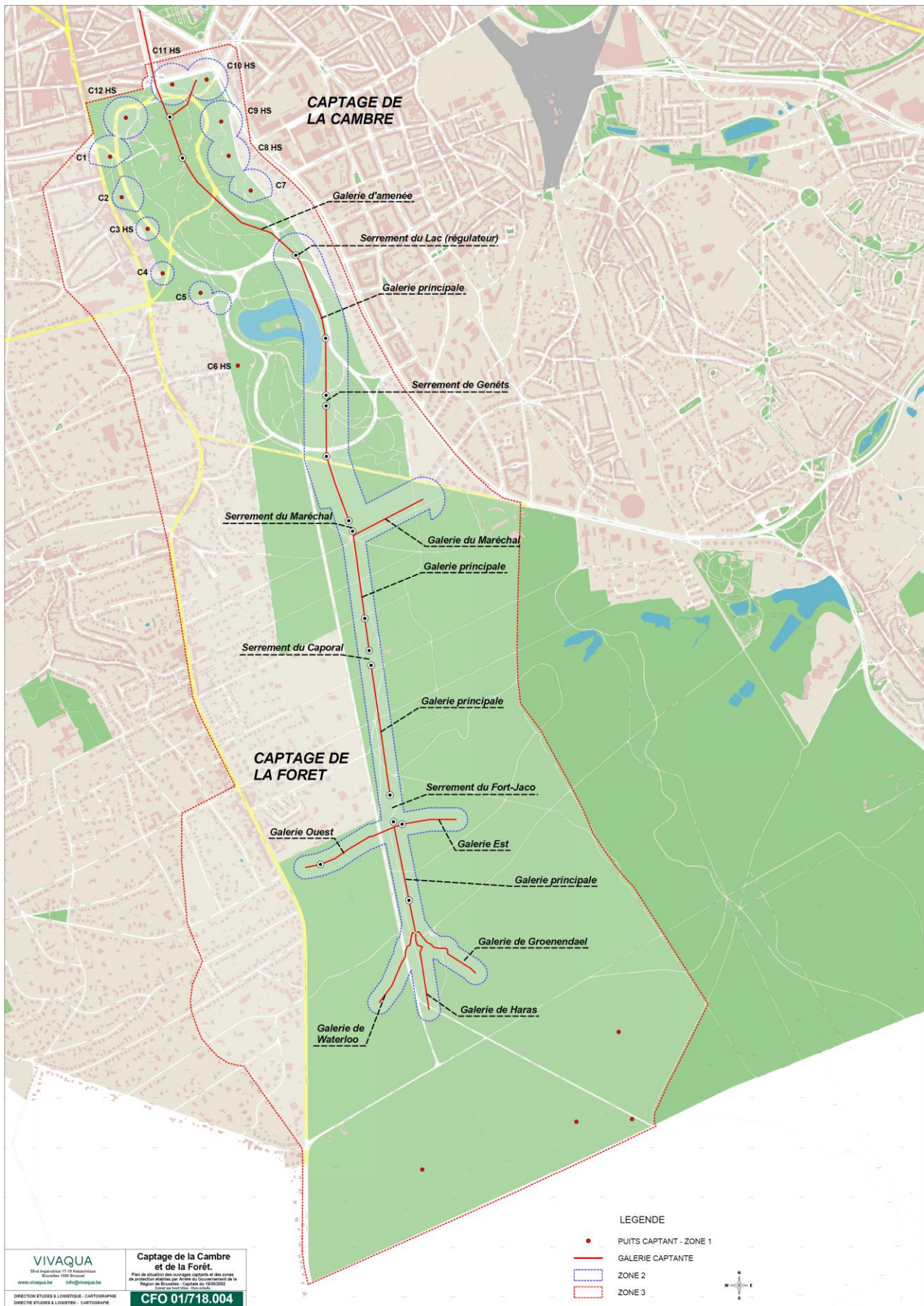


Figure 31 : Tracé de la galerie drainante, serrements - source : VIVAQUA



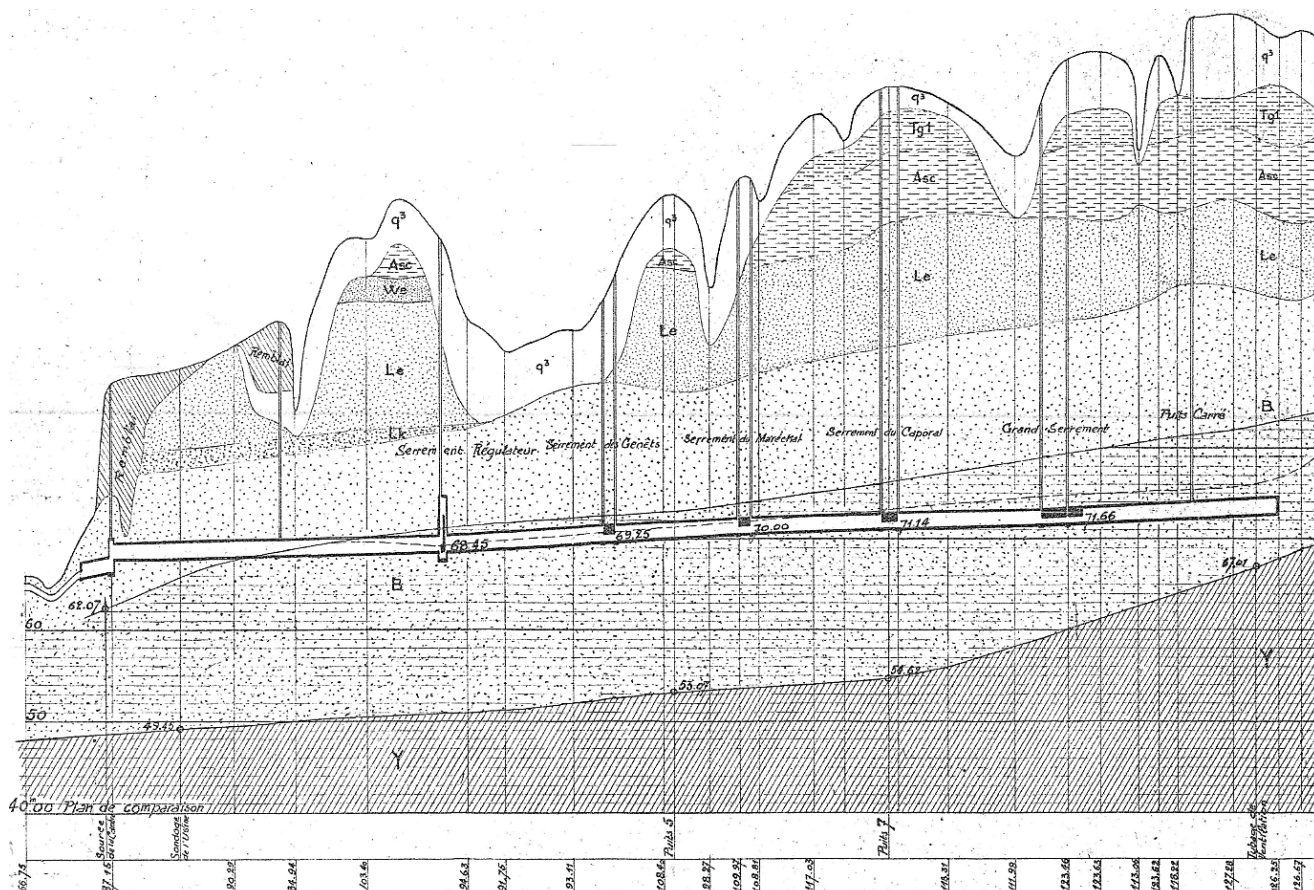


Figure 32 : Coupe Nord-Sud de la galerie drainante

La galerie dispose d'une section ovoïdale d'environ 1.80 m sur 1.20 m et est pourvue de barbacanes à sa base (**Figure 33**) permettant de capter les eaux souterraines sans intervention mécanique. L'eau est ensuite acheminée gravitairement vers l'*usine Cambre* en aval, située au niveau des *captages de La Cambre* et munie de pompes de refoulement permettant l'envoi de cette eau dans le réseau de distribution. La galerie est également munie d'une série de 5 *serrements* (vannes mécaniques) permettant de réguler le débit entrant dans l'ouvrage (**Figure 33**).



Figure 33 : Reproduction d'une section de la galerie Vivaqua (photo de gauche et milieu) - Serrement de la galerie (photo de droite) - source : VIVAQUA)

Aujourd'hui, ces serrements sont grippés et ne peuvent plus être manipulés. Par conséquent le débit sortant de la galerie est relativement stable dépendant notamment de la piézométrie relative à la nappe des sables *du Bruxellien (UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele)*. La **Figure 34** reprend l'évolution entre 2008 et 2014 du débit sortant de la galerie (m³/an) et des cotes m_DNG des lames d'eau mesurées au droit des 5 serrements (entre 2008 et 2011). Il y a lieu de constater :

- une forte stabilité de lame d'eau des serrements entre 2008 et 2011 ;
- une légère augmentation du débit de la galerie passant de 1.86 à 1.98 millions de m³/an entre 2008 et 2014, avec une pointe équivalente à 2.00 millions de m³/an enregistrée en 2013.

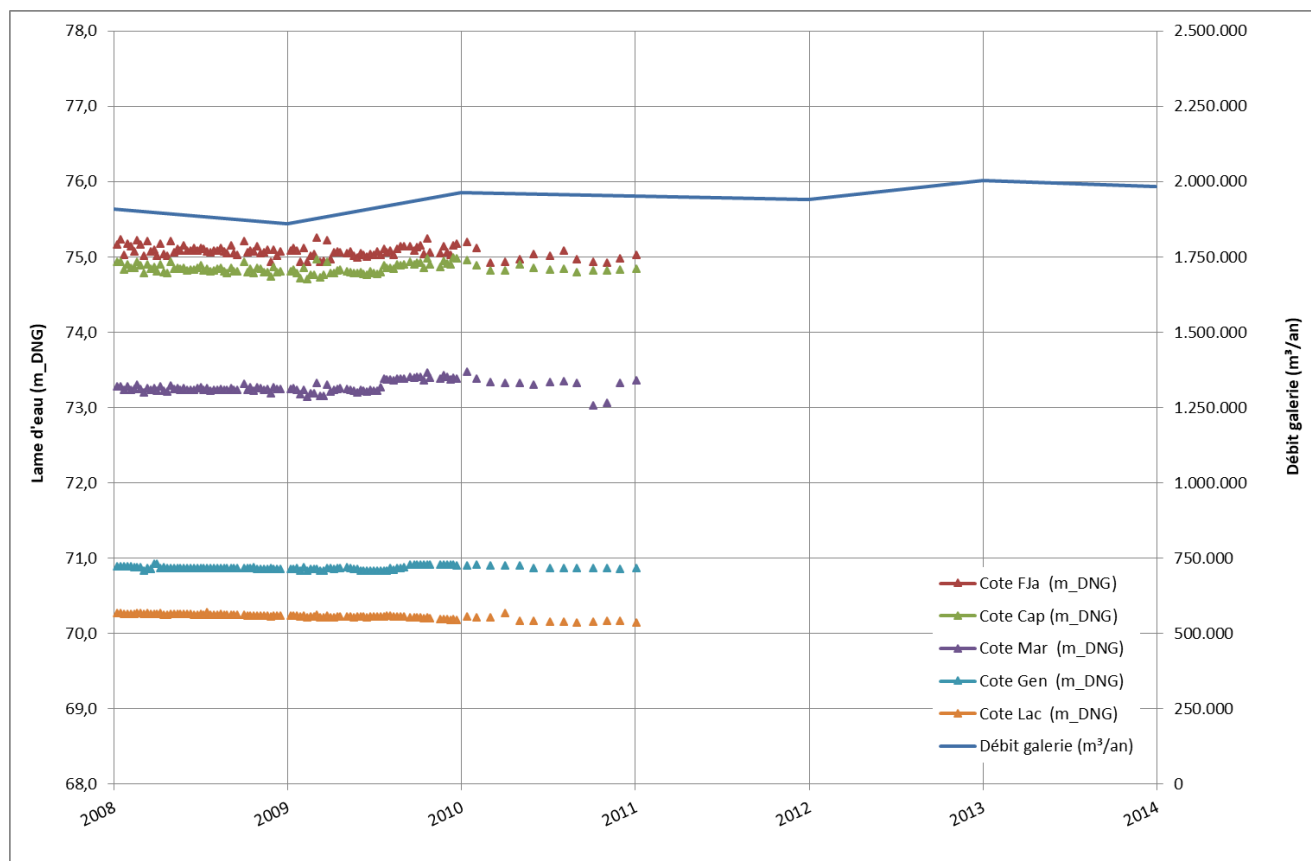


Figure 34 : Evolution entre 2008 et 2014 du débit sortant de la galerie (m³/an) et des cotes (m_DNG) des lames d'eau mesurées au droit des 5 serrements

Le tableau ci-dessous reprend une synthèse des valeurs moyennes, min et max des lames d'eau mesurées au droit des serrements entre 2008 et 2011 :

	Serrement du Lac	Serrement des Genêts	Serrement du Maréchal	Serrement du Caporal	Serrement du Fort-Jaco
Moyenne 2008-2011 (m_DNG)	70,35	70,95	73,29	75,11	75,44
Min 2008-2011 (m_DNG)	70,14	70,82	73,03	74,70	74,92
Max 2008-2011 (m_DNG)	70,56	71,20	73,90	75,74	76,20

Tableau 7 : Synthèse des valeurs moy, min et max des lames d'eau mesurées au droit des serrements entre 2008 et 2011



3.6.2.2 Conditions aux limites

Une condition de « transfert » (3^{ème} type ou Cauchy) est appliquée tout le long du tracé de la galerie. La méthodologie pour la définition de ce type de condition a déjà été abordée au §3.3.3.1.

Supposant de faibles différences de régime piézométrique entre 2011 et 2013, les hauteurs de lame d'eau moyennes (2008-2011) au droit des 5 serremments (Tableau 7) sont interpolées/extrapolées le long du tracé linéaire de la galerie et assignées au modèle comme niveau d'eau de référence h_{ref} .

Les valeurs de conductance (*Transfer rate in - Transfer rate out*) s'appliquent ici aux parois de la galerie drainante. Les photos de la Figure 33 semblent indiquer un slot (ouverture) des barbacanes très fort. Dans ces conditions, les flux drainés devraient plus logiquement être contraint par la conductivité hydraulique relative à la zone d'alimentation au sein de l'aquifère exploité qu'aux parois de la galerie. Par défaut, il est proposé d'appliquer les valeurs ci-dessous. Elles feront l'objet d'une calibration (§5) permettant leur ajustement aux propriétés hydrodynamiques des parois de la galerie.

Paramètre	Valeur	Unité
Transfer rate in	2,00E-05	1/s
Transfer rate out	2,00E-04	1/s

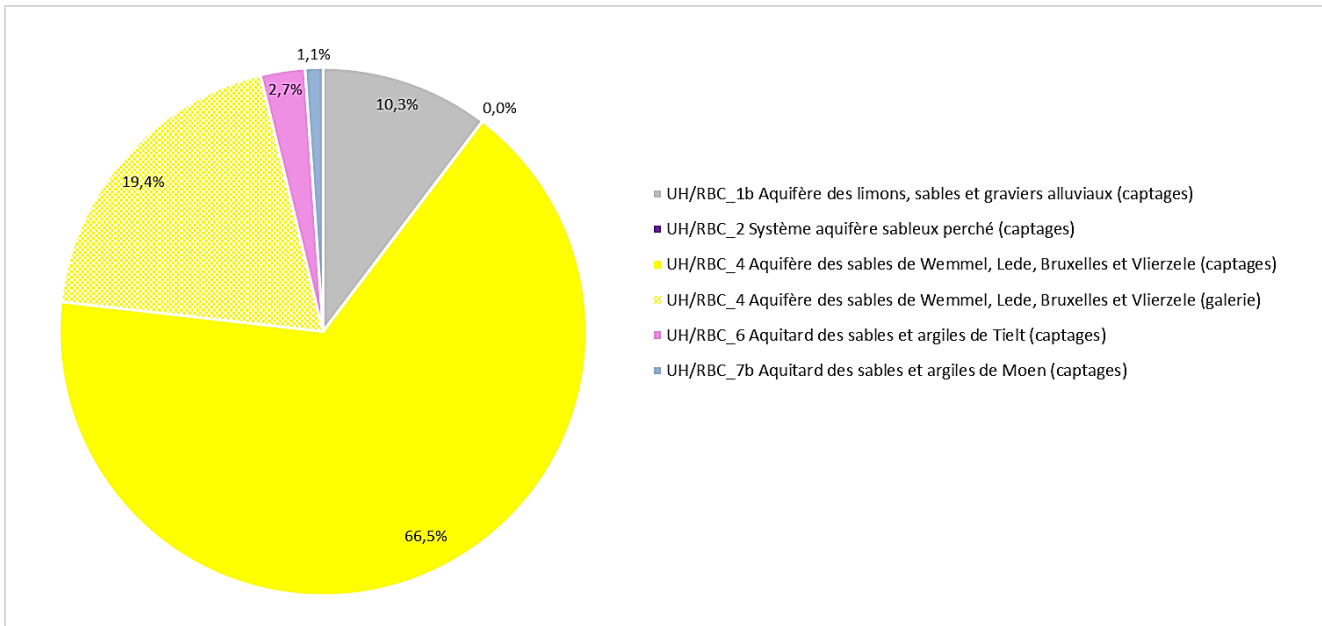
Il y a lieu de préciser qu'en toute logique seul le *Transfer rate out* ne devrait être exploité car la galerie est exclusivement drainante.

Important : Comme expliqué en détail dans le §3.3.3.1 (la problématique est exactement la même que pour le réseau hydrographique), il y a lieu de préciser que le processus de calibration est sensé compenser également l'erreur sur le flux initialement « conditionné » provenant du calcul de la surface d'échange A (Équation 2) basée sur la géométrie de la couche du modèle accueillant le tracé de la galerie (et notamment son épaisseur) plutôt que de la surface réelle de contact eaux souterraines/galerie.

3.6.3 Analyse des prélèvements par unité hydrogéologique

Au droit de la zone d'étude, un volume annuel d'eau souterraine de plus de 10 millions de m³ a été prélevé avec 85.8% des prélèvements relatifs à l'exploitation de la nappe des sables du Bruxellien (UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele), dont 19.4% sont directement attribués à la galerie drainante VIVAQUA en région bruxelloise.

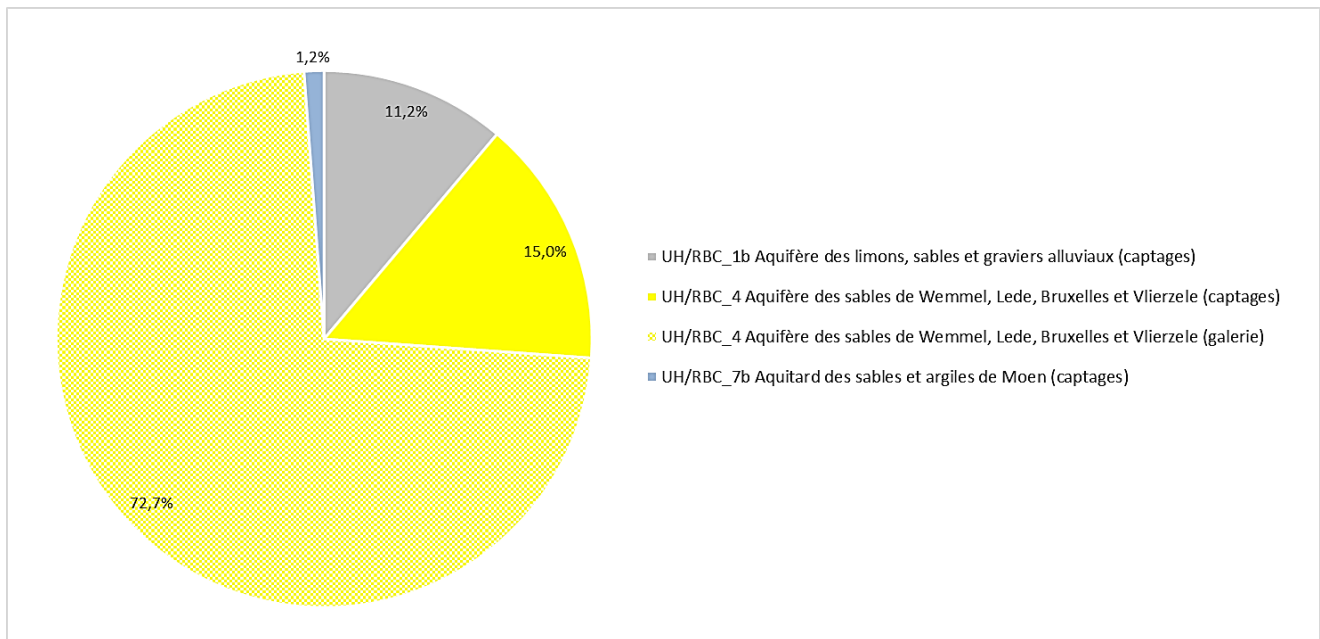




Unité Hydrogéologique	Débit journalier (m ³ /j)	Volume annuel 2013 (m ³)	Fraction (%)
UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux (captages)	2924	1.067.293	10,3%
UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché (captages)	2	734	0,0%
UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele (captages)	18818	6.868.493	66,5%
UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele (galerie)	5486	2.002.478	19,4%
UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt (captages)	772	281.685	2,7%
UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen (captages)	310	113.099	1,1%
Total	28312	10.333.782	100,0%

Figure 35 : Prelevements d'eau souterraine en 2013 par unité hydrogéologique au droit de la zone d'étude

Au droit de la zone d'intérêt (région bruxelloise), un volume annuel d'eau souterraine de plus de 2.7 millions de m³ a été prélevé avec 87.6% des prélèvements relatifs à l'exploitation de la nappe des sables du Bruxellien (UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele), dont 72.7 % sont directement attribués à la galerie drainante VIVAQUA.



Unité Hydrogéologique	Débit journalier (m³/j)	Volume annuel 2013 (m³)	Fraction (%)
UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux (captages)	844	307.903	11,2%
UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele (captages)	1129	412.023	15,0%
UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele (galerie)	5486	2.002.478	72,7%
UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen (captages)	90	32.919	1,2%
Total	7549	2.755.323	100,0%

Figure 36 : Prélèvements d'eau souterraine en 2013 par unité hydrogéologique au droit de la zone d'intérêt (région bruxelloise)

3.7 Sources (région bruxelloise)

3.7.1 Description

On dénombre 26 sources en région bruxelloise, toutes alimentées par l'aquifère des sables du Bruxellien (UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele).

Il y a lieu de préciser que ce nombre n'est pas exhaustif. Bruxelles Environnement procède à une recherche continue de nouvelles sources afin d'assurer une cartographie la plus complète possible.

Les Figure 37 et Figure 38 illustrent leurs localisations.

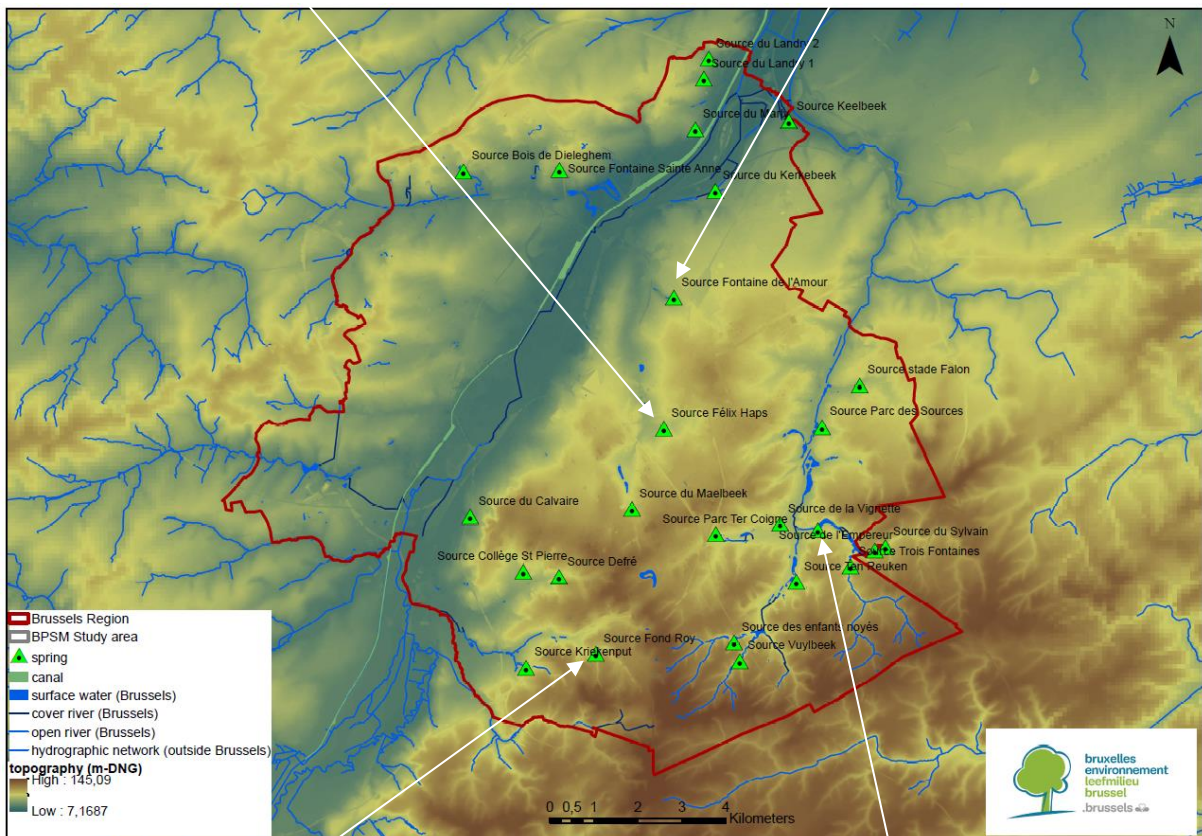
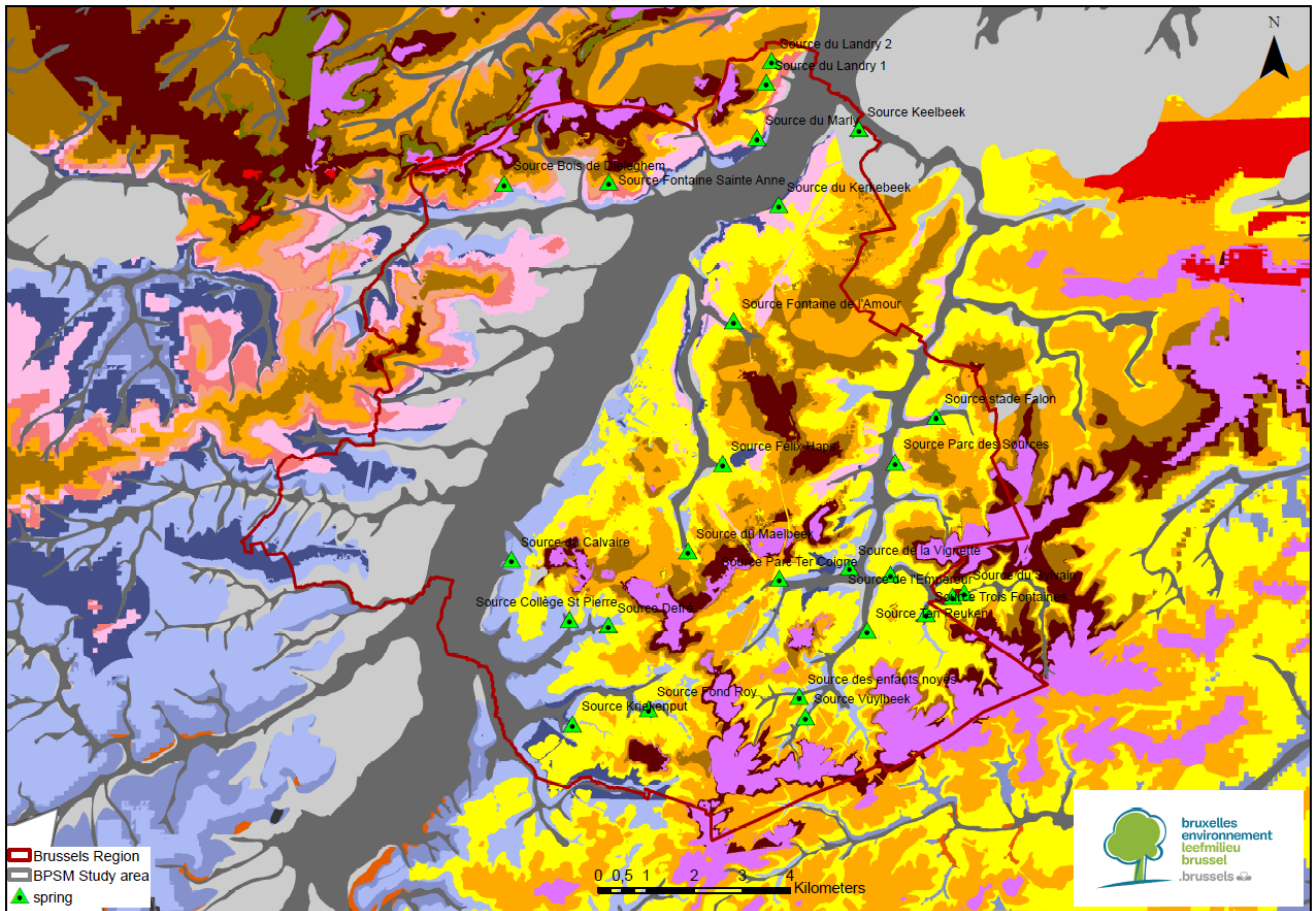


Figure 37 : Localisation des sources (région bruxelloise) sur fond topographique

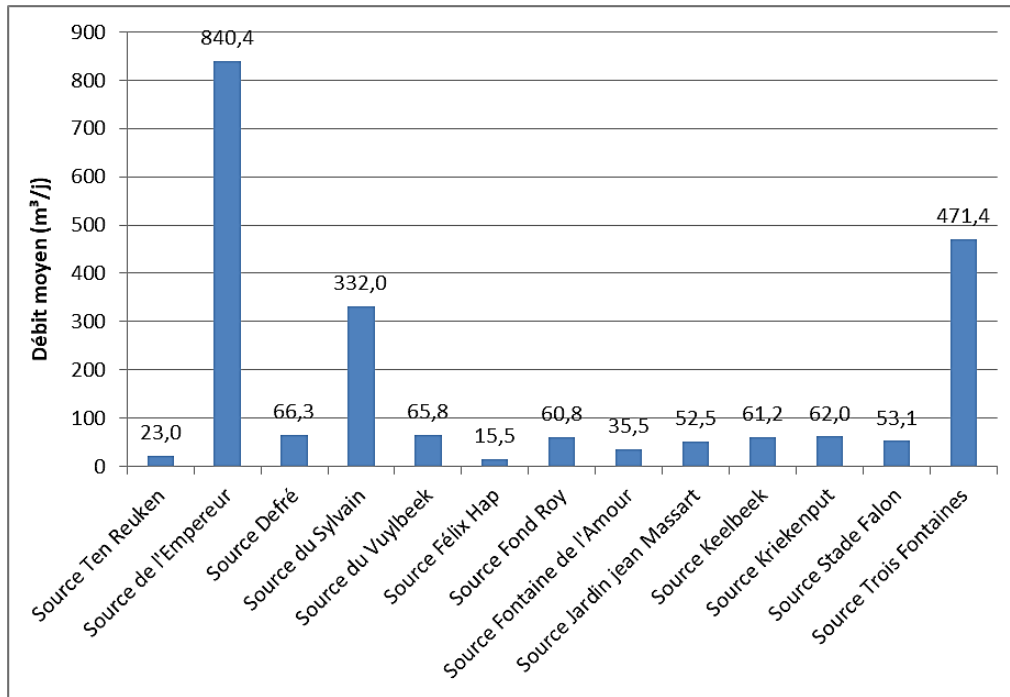


Ere	Système	Série	Etage	Unités Stratigraphiques (US/RBC)
IV (Cénozoïque)	Quaternaire	-	-	US/RBC_11 Remblais
		Holocène / Pléistocène	-	US/RBC_12 Couverture limoneuse
		Holocène	-	US/RBC_13 Argiles alluviales
		Pléistocène	-	US/RBC_14 Limons, sables et graviers alluviaux
III (Cénozoïque)	Néogène	Miocène supérieur	Diestien	US/RBC_21 Sables de Diest
		Miocène inférieur	Bolderien	US/RBC_22 Sables de Bolderberg
		Eocène supérieur	Tongerien	US/RBC_23 Sables et argiles de Sint-Huilbrechts-Hern
	Paléogène	Eocène moyen	Complexe de Kallo	US/RBC_25 Sables de Maldegem (membre de Onderdale)
				US/RBC_31 Argiles de Maldegem (membre de Ursel et Asse)
			Ledien	US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel)
			Bruxellien	US/RBC_42 Sables de Lede
		Eocène inférieur	Panisélien	US/RBC_43 Sables de Bruxelles
				US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vlierzele)
			Ypresien	US/RBC_51 Argiles de Gent (membre de Merelbeke)
	Paléocène supérieur	Landénien	US/RBC_61 Sables et argiles de Tielt	
			US/RBC_71 Argiles de Kortrijk (membre d'Aalbeke)	
		US/RBC_72 Sables et argiles de Kortrijk (membre de Moen)		
US/RBC_73 Argiles de Kortrijk (membre de Saint Maur)				
II (Mésozoïque)	Crétacé	Crétacé supérieur	Maastrichtien (Sénonien)	US/RBC_81 Sables de Hannut (Membre de Grandglise)
			US/RBC_82 Argiles de Hannut (Membre de Lincet)	
I (Paléozoïque)	Cambrien	Cambrien inférieur (?)	Dévilien (?)	US/RBC_91 Craies de Gulpen
				US/RBC_92 Socle Paléozoïque

Figure 38 : Localisation des sources (région bruxelloise) sur fond de carte géologique

13 de ces sources ont pu être jaugeées au micromoulinet ou par empotement jusqu'à deux fois par an (printemps / automne) entre 2013 et 2015 (Figure 39).





Source	Débit moyen (m³/jour)	Débit max (m³/jour)	Débit min (m³/jour)
Source Ten Reuken	23,0	23,0	23,0
Source de l'Empereur	840,4	1319,1	435,5
Source Deffré	66,3	75,4	58,9
Source du Sylvain	332,0	430,5	235,7
Source du Vuylbeek	65,8	115,3	46,4
Source Félix Hap	15,5	25,3	9,5
Source Fond Roy	60,8	115,5	18,0
Source Fontaine de l'Amour	35,5	82,9	8,3
Source Jardin Jean Massart	52,5	52,5	52,5
Source Keelbeek	61,2	67,5	58,1
Source Kriekenput	62,0	74,4	52,4
Source Stade Falon	53,1	118,2	20,0
Source Trois Fontaines	471,4	685,2	288,0
Moyenne	164,6	245,0	100,5

Figure 39 : Débits min, max et moyens des sources entre 2013 et 2015

Le débit minimum est mesuré au niveau de la source *Felix Hap* (environ 0.4 m³/h) et le débit maximum au niveau de la source de l'Empereur (environ 55 m³/h). Il y a lieu de souligner que la variabilité observée sur les débits est plutôt due aux erreurs de mesures inhérentes au matériel utilisé dans des conditions défavorables de faibles débits et sections d'écoulement qu'à la piézométrie de l'aquifère des *sables du Bruxellien*. En effet, celui-ci est marqué par une forte inertie piézométrique et donc de faibles variations saisonnières de l'ordre d'une vingtaine de cm entre 2013 et 2015.

3.7.2 Conditions aux limites

A l'instar des captages (§3.6.1.2), une *condition de type « puits »* est appliquée au droit des sources observées en région bruxelloise. Ce type de condition génère une extraction en m³/jour (flux sortant apparenté à un captage) ou une injection (flux entrant) prédéfinie. C'est bien la première option qui est ici d'application.



Du fait de la faible variabilité piézométrique de la nappe des *sables du Bruxellien* observée entre 2013 et 2015, le *débit moyen 2013-2015* (m^3/jour) (**Figure 39**) est assigné à chacune des 13 sources jaugées. Ce choix permet théoriquement de « lisser » l'erreur de mesure sur les débits, souvent grande.

Les 13 autres sources ne bénéficiant pas de mesure de jaugeage du fait de l'impossibilité technique d'en réaliser une (section impraticable, vitesse d'écoulement trop faible), une valeur par défaut de $50 \text{ m}^3/\text{j}$ est assignée, correspondant au percentile 25 des débits moyens 2013-2015. Cette valeur approchée permet de s'assurer que le modèle reproduise un débit d'ordre de grandeur réaliste.

3.8 Recharge

Le *système phréatique* est soumis à la *recharge* issue de l'infiltration des eaux pluviales (ou *impluvium*). L'amplitude de cette *recharge* dépend de divers facteurs, tels que la pluviométrie, l'évapotranspiration, la pente (topographie), la texture du sol et l'usage du sol.

3.8.1 Bilan hydrologique

Le *bilan hydrologique* est illustré en **Figure 40** et mis en équation par l'**Équation 3** :

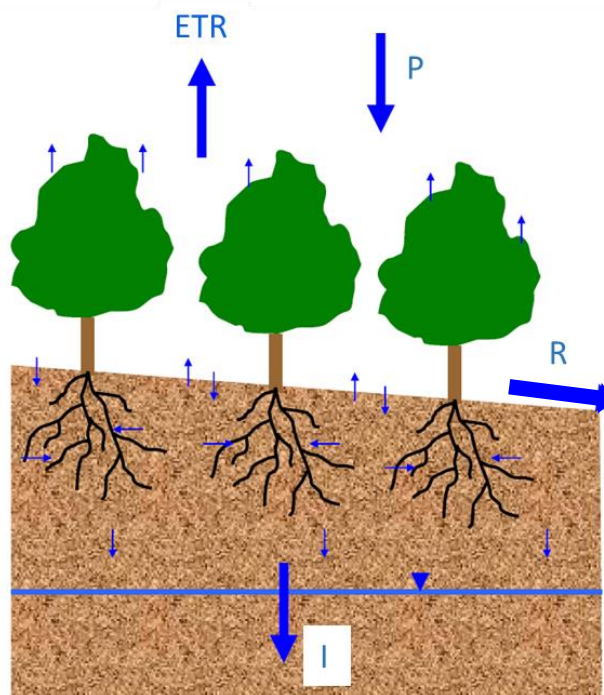


Figure 40 : Bilan hydrologique

$$P = ETR + P_{eff} \quad P_{eff} = R + I$$

Équation 3

Avec :

- P : précipitations brutes (mm/an) ;
- ETR : évapotranspiration réelle (mm/an) ;
- R : ruissellement (mm/an) ;
- I : recharge (mm/an).
- P_{eff} : pluie efficace (mm/an).

Afin de quantifier le paramètre *recharge* à intégrer comme paramètre d'entrée à *BPSM*, il est proposé de calculer l'*évapotranspiration réelle* (mm) puis la *pluie efficace* P_{eff} (*recharge* + *ruissellement*) selon la *méthode*



de Thornwaite appliquée aux données météorologiques de *précipitations brutes* et d'*évapotranspiration potentielle (ETP)*.

Les *précipitations brutes* sont acquises journalièrement en station d'Uccle (IRM⁹) sur l'année 2013, alors que l'*évapotranspiration potentielle* est calculée directement par l'IRM sur la base de la méthode de *Penman-Monteith* pour une surface de référence de type « gazon ».

Le bilan de *Thornwaite* est présenté en **Figure 41**. La discrétisation de la *pluie efficace* en fractions relatives au ruissellement et à la recharge est traitée au §3.8.2.

Date	Précipitations brutes (mm/mois)	ETP (GRASS) (mm/mois)	ETR (mm/mois)	P _{eff} (mm/mois)
janv.-13	59,6	5,5	5,5	54,2
févr.-13	57,6	9,0	9,0	48,6
mars-13	55,0	23,1	23,1	31,9
avr.-13	25,0	61,9	61,9	0,0
mai-13	125,9	72,7	72,7	16,2
juin-13	52,9	91,6	91,6	0,0
juil.-13	65,3	118,0	118,0	0,0
août-13	46,3	91,7	54,8	0,0
sept.-13	54,2	61,0	54,2	0,0
oct.-13	72,4	36,9	36,9	0,0
nov.-13	97,8	9,9	9,9	23,4
déc.-13	74,5	15,9	15,9	58,7
TOTAL	786,4	597,1	553,5	232,9

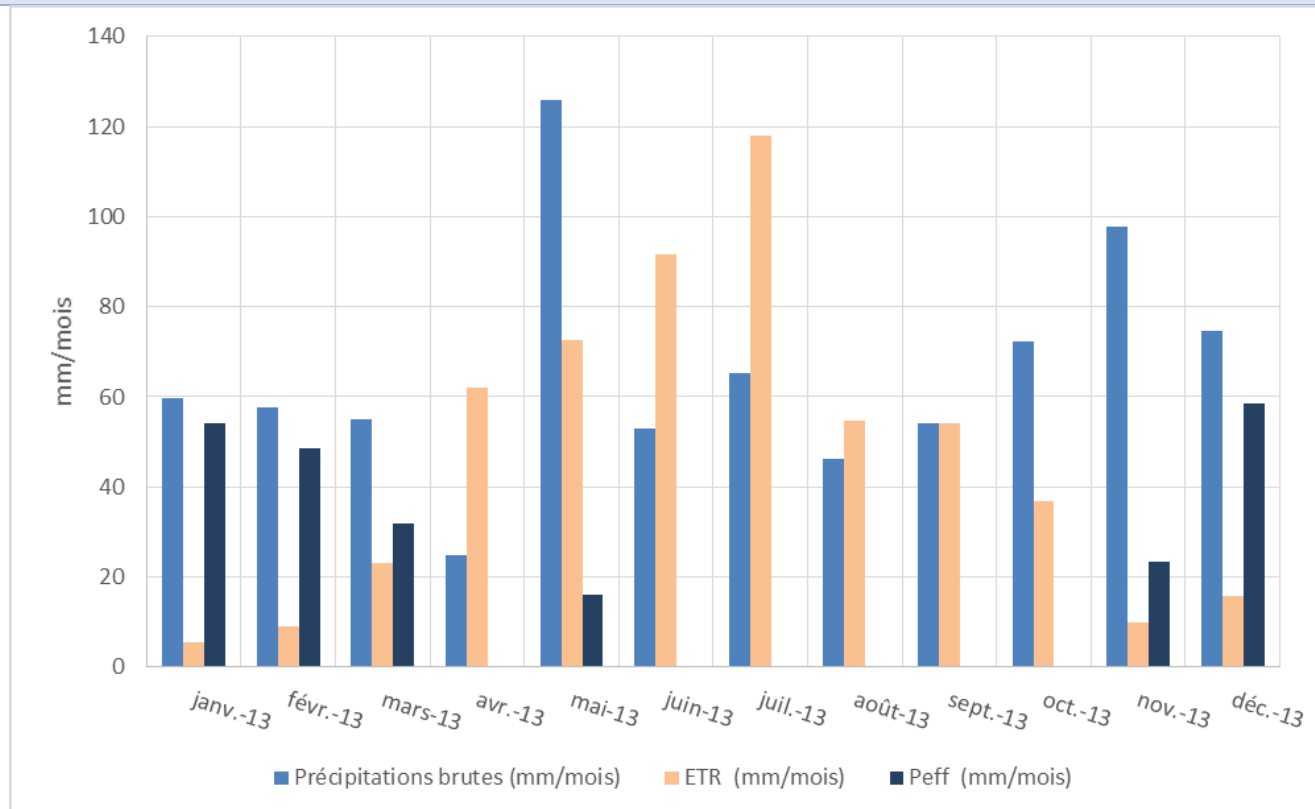


Figure 41 : Résultats du bilan de Thornwaite sur la station d'Uccle, IRM (2013)

⁹ Institut Royal Météorologique de Belgique



3.8.2 Modèle hydrologique *WetSpass* (2007)

Afin d'améliorer la gestion des eaux souterraines en région Flamande dont la pérennité est fortement liée au processus de recharge saisonnier, O. Batelaan (*Vrije Universiteit Brussel & K.U.Leuven*), Y. Meyus (*Vrije Universiteit Brussel*) et F. De Smedt (*Vrije Universiteit Brussel*) ont développé le modèle hydrologique **WetSpass (2007)** basé sur le traitement GIS de couches *raster* d'une résolution de 20*20 m avec pour objectif la quantification de la *recharge* à l'échelle de la Flandres (Bruxelles compris) pour plusieurs périodes de temps de référence.

Sur la base des *précipitations brutes* acquises historiquement sur la période 1833-1975, complétées des propriétés du sol telles que l'usage du sol, sa texture et la pente topographique, *WetSpass* quantifie au droit de chaque cellule du modèle, le *ruissellement* et l'*évapotranspiration réelle* pour en déduire enfin la *recharge* (**Figure 40**).

Ce bilan est réalisé pour trois périodes types :

- Bilan annuel sur la période 1833-1975 ;
- Bilan estival (6 mois les plus chauds) sur la période 1833-1975 ;
- Bilan hivernal (6 mois les plus froids) sur la période 1833-1975.

Dans la cadre de cette étude, seul le bilan annuel 1833-1975 est exploité. Le **Tableau 8** reprend les valeurs de *pluie efficace*, *recharge* et *ruissellement* résultant de *WetSpass* pour la zone totale couverte par ce dernier (soit Flandres et Bruxelles), ainsi que pour la zone d'étude *BPSM*. Il y a lieu d'observer un ratio moyen I / P_{eff} de 0.76 pour la zone *Flandres + Bruxelles*, passant à 0.70 pour la zone couverte par *BPSM*.

Méthode	Periode ref.	P_{eff} (mm/an)	I (mm/an)	R (mm/an)	ratio I / P_{eff}
WetSpass model (VUB) – couverture totale	1833 - 1975	282,1	215,8	66,4	0,76
WetSpass model (VUB) – zone BPSM	1833 - 1975	275,6	191,8	83,8	0,70

Tableau 8 : Pluie efficace, Recharge et Ruissellement selon *WetSpass*

La **Figure 42** illustre la spatialisation au droit de la zone d'étude de la *recharge moyenne* annuelle sur la période 1833-1975 telle que calculée par *WetSpass*.



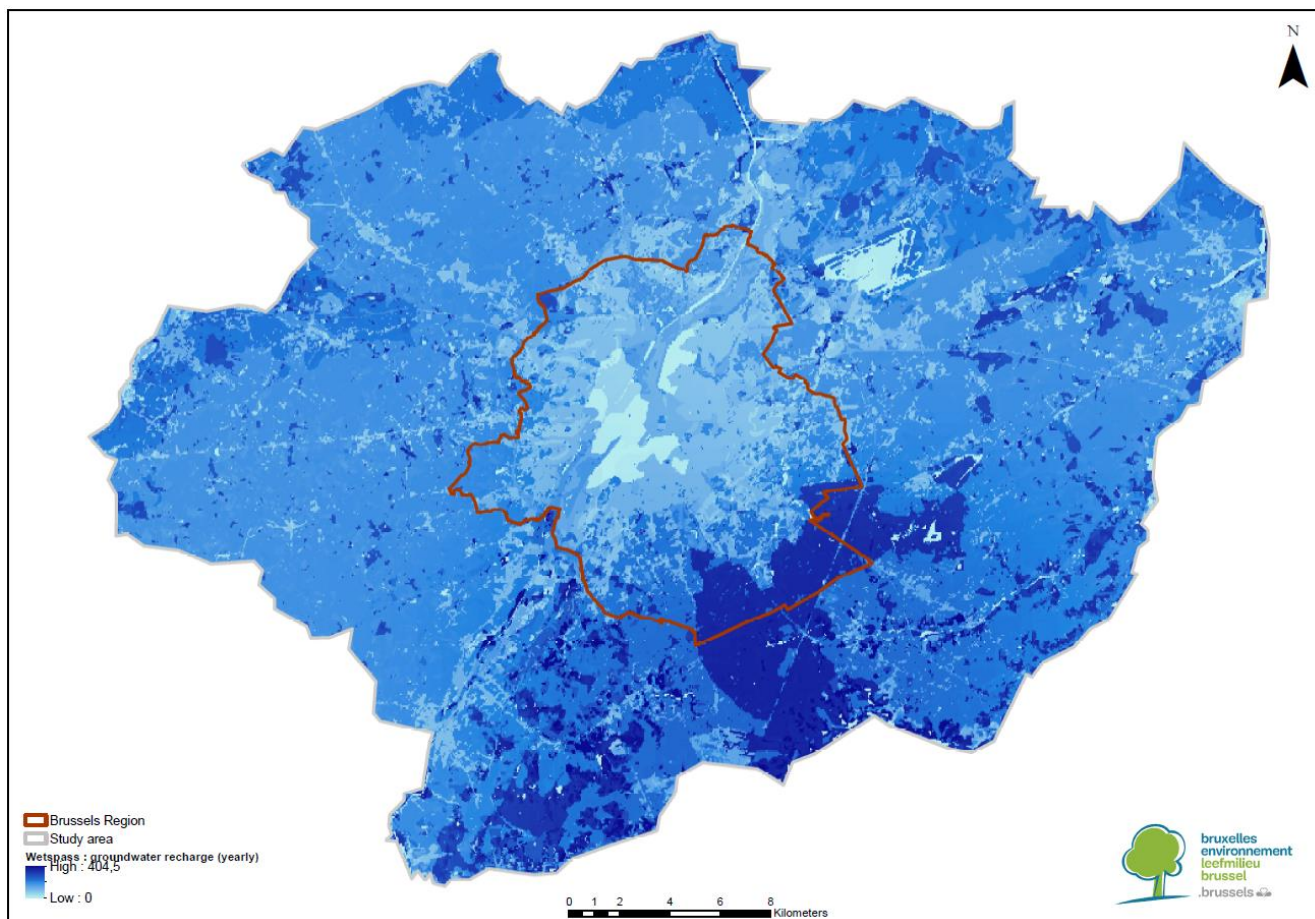


Figure 42 : Recharge moyenne annuelle en mm/an (1833-1975) selon *WetSpass* au droit de la zone d'étude

3.8.3 Synthèse

Il ressort des résultats des §3.8.1 et §3.8.2 que le rapport $\frac{P_{eff\ 2013}(Thornwaite, Uccle)}{P_{eff\ moy\ 1833-1975}(WetSpass)}$ est égal à **0.85** ($=\frac{232,9}{275,56}$) sur la zone d'étude *BPSM*. Par conséquent, dans le cadre du développement en régime permanent de *BPSM*, il apparaît opportun d'appliquer les valeurs du raster de *recharge moyenne* annuelles 1833-1975 *WetSpass* (mm/an)(**Figure 42**) corrigées d'un facteur multiplicateur de 0.85 pour une reproduction des conditions hydrologiques de 2013.

Sur la base des valeurs du **Tableau 8**, ce choix suppose que l'on considère pour 2013 :

- une *recharge annuelle* moyenne de 162,1 mm ;
- pour chaque cellule 20*20 m, un ratio *recharge/pluie efficace* identique à celui du raster de *recharge moyenne* annuelles 1833-1975 *WetSpass*. A l'échelle de la zone d'étude, ce ratio est égal à 0.70.

3.9 Fuites du réseau d'adduction

L'approvisionnement en eau potable de la Région bruxelloise représente près de 68,5 millions de m³ par an (moyenne sur la période 2012-2016, **Tableau 9**). Cette eau, produite et fournie par l'intercommunale VIVAQUA, est majoritairement captée en Région wallonne, soit dans les aquifères (environ 85%), soit dans les eaux de surface. Seuls 3,1% des besoins de la région (soit environ 2,1 millions de m³) sont couverts par des captages situés sur le territoire régional, en forêt de Soignes et au Bois de la Cambre. Ce champs captant exploite l'aquifère de *sables du Bruxellien* (*UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele*).

La différence entre l'approvisionnement total de la région bruxelloise en eau de distribution et la consommation des abonnés correspond aux « volumes non enregistrés ». Ces derniers oscillaient entre 11 et 14% de l'approvisionnement de la région entre 2012 et 2016 (**Tableau 9**). Ils s'élevaient à 9.2 millions de m³ en 2013 (13% de l'approvisionnement). Les « volumes non enregistrés » incluent :

- la consommation d'eau par les services incendie et les services communaux (nettoyage des voiries, etc.) ;
- les mètres cubes non comptabilisés par les compteurs d'eau ;
- les pertes dues aux fuites sur le réseau de distribution estimées par Hydrobru comme étant de l'ordre de 5%.

	Approvisionnement	Consommation des abonnés	Volume non enregistré* par compteurs abonnés	
	m ³	m ³	m ³	%
2012	68.600.637	58.676.383	9.924.254	14
2013	69.125.095	59.926.802	9.198.293	13
2014	68.744.958	60.983.902	7.761.056	11
2015	68.314.314	59.364.134	8.920.180	13
2016	67.909.077	59.376.423	8.532.654	13

Tableau 9 : Approvisionnement, consommation et volumes non enregistrés par les compteurs

Les fuites sur le réseau de distribution ont pour principale origine la corrosion des conduites en acier. En effet, selon VIVAQUA : « *le réseau d'adduction, de répartition et de distribution d'eau de VIVAQUA compte 5.200 kilomètres de conduites, dont la moitié est en acier. Par sa solidité et sa souplesse, ce matériau s'est majoritairement imposé pour les conduites stratégiques. Il présente cependant l'inconvénient d'être sujet à la corrosion.* » (Les services spécialisés, VIVAQUA, janvier 2012).

Afin de limiter à son maximum cette fraction d'eau potable perdue par fuites, VIVAQUA s'engage :

- dans une politique d'identification et de réparation des fuites ;
- dans la mise en œuvre de solutions durables telles que la protection cathodique des conduites en acier permettant de limiter ce phénomène chimique en portant l'acier à un potentiel électrique suffisamment inférieur au potentiel du milieu environnant (le sol par exemple).

Malgré ces efforts, les fuites restent inévitables. En émettant comme hypothèse que la part de fuite du réseau de distribution revient à 5% du *débit de distribution*, le *débit de fuite* 2013 en région bruxelloise s'élèverait à 3,5 millions m³/an, ce qui équivaudrait à une lame d'eau additionnelle de 21.3 mm/an à ajouter à la *recharge* 2013 (**Tableau 10**). Si on extrapolait à la zone d'étude, ceci reviendrait à un apport additionnel de 13% de la recharge 2013 (égale à 162.1 mm/an selon le **§3.8.3**).

	Débit (m ³ /an)	Equivalent lame d'eau (mm/an)
Approvisionnement 2013 zone Bruxelles	69.125.095	-
Estimation des fuites 2013 (5%) zone Bruxelles	3.456.255	21,3
Recharge moyenne 2013 zone BPSM	-	162,1

Tableau 10 : Débit de fuite du réseau de distribution Vs débit d'infiltration

Bien que ce débit additionnel puisse avoir un impact non négligeable sur la piézométrie du *système phréatique*, il apparaît complexe de pouvoir le considérer au sein du modèle numérique à cause des contraintes pratiques ci-dessous :



- le caractère « ponctuel » des fuites et l'absence de donnée sur la spatialisation et la temporalité de ces dernières : les fuites sont souvent la conséquence d'un dommage ponctuel à la fois dans l'espace et dans le temps ;
- l'absence de donnée sur les débits de fuite réels ;
- l'absence de donnée en ce qui concerne le reste de la zone d'étude (hors région bruxelloise donc).

C'est pourquoi, en l'état des connaissances acquises au terme de cette étape de construction du modèle conceptuel, il a été jugé opportun de ne pas prendre en considération, en première approche, l'apport d'eau de distribution au sein de *BPSM*.

Il y a lieu de préciser que la *sensibilité* du paramètre *recharge* est évaluée au §7.2. Les résultats de cette analyse de sensibilité permettent indirectement une quantification de l'impact de la « non prise en considération » des débits de fuite du réseau de distribution sur la représentativité du modèle *BPSM*.

Enfin, une *analyse d'incertitude* sur les résultats du modèle (piézométrie et débits) est évaluée au §7.1. Celle-ci tient compte de l'incertitude intrinsèque des paramètres d'entrée principaux, dont le paramètre *recharge* (englobant l'incertitude relative aux fuites du réseau d'adduction).

3.10 Paramètres hydrodynamiques

3.10.1 Conductivité hydraulique (K)

La *conductivité hydraulique* K exprimée en m/s apparait comme un des principaux paramètres d'entrée du modèle du fait de sa générale forte sensibilité sur les résultats de simulation. Le milieu étant considéré comme isotrope, les champs conductivité hydraulique horizontale K_x et K_y sont considérés égaux. Un ratio de 10, matérialisant une anisotropie, est par défaut appliqué au champ de conductivité hydraulique verticale K_z , jugé moins conducteur par rapport aux champs de conductivité hydraulique horizontale K_x et K_y :

$$K_z = \frac{K_x}{10} = \frac{K_y}{10}$$

Le **Tableau 11** reprend des valeurs caractéristiques selon Dassargues (2019) dépendantes du type de lithologie.



Lithology		K (m/s)
Granite and gneiss	with fissures	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-4}$
	without fissures	$1 \times 10^{-14} - 1 \times 10^{-10}$
Basalt	with fissures	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$
	without fissures	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-9}$
Quartzite	with fissures	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-4}$
	without fissures	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-9}$
Shales		$1 \times 10^{-13} - 1 \times 10^{-9}$
Schists and slates		$1 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-5}$
Limestone and dolomite	karstified	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-1}$
	with fissures	$1 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-3}$
	without fissures	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-9}$
Chalk		$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-3}$
Sandstone, siltstone	with fissures	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$
	without fissures	$1 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-5}$
Volcanic tuff		$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$
Gravels		$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-1}$
Sands		$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-2}$
Silts		$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-4}$
Loams, loess and clays		$1 \times 10^{-13} - 1 \times 10^{-7}$

Tableau 11 : *Conductivité hydraulique en fonction de la lithologie type de sédiments (d'après Dassargues, 2019)*

La *conductivité hydraulique* sujet au processus ultérieur de calibration (§5) nécessite une définition en première approche la plus réaliste possible. Pour se faire une valeur de référence K_{xy} jugée « moyenne » (ainsi que des limites min/max) sont définies pour chaque « zone » du modèle (Tableau 12) sur la base d'une synthèse bibliographique regroupant la documentation suivante :

- Résultats d'essais de pompage ;
- Etudes hydrogéologiques menées en région bruxelloise dans le cadre des permis d'environnement, autorisation de captage ou gestion de sites contaminés ;
- Publications scientifiques ;
- Informations liées la caractérisation des masses d'eau souterraines en Flandres et Wallonie.

Les « zones » constituent des volumes de *conductivité hydraulique* équivalente au sein du modèle. Il y a lieu de préciser qu'une zone peut correspondre à tout ou partie d'une *unité hydrogéologique*.



Zone	Description/Nom simplifié	Unités Stratigraphiques (US/RBC)	Unités Hydrogéologiques (UH/RBC)	Layer	K _{xy} (m/s) Valeurs initiales
A	IV-alluvial aquitard (phreatic)	US/RBC_13 Argiles alluviales	UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel	1	1,62E-06
B	IV-silt cover	US/RBC_12 Couverture limoneuse			1,29E-06
C	IV-alluvial aquifer (semi-confined)	US/RBC_14 Limons, sables et graviers alluviaux	UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux	2	2,31E-03
D	III-Shh. & On. perched aquifer	US/RBC_23 Sables et argiles de Sint-Huilbrechts-Hern US/RBC_25 Sables de Maldegem (membre de Onderdale)	UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché	3	1,50E-05
E	III-Diest perched aquifer	US/RBC_21 Sables de Diest			5,00E-05
F	III-U&A aquiclude	US/RBC_31 Argiles de Maldegem (membre de Ursel et Asse)	UH/RBC_3 Aquiclude des argiles de Ursel et Asse	4	7,00E-12
G	III-Bruxellian aquifer-West Bruxellien, rive gauche de la Senne	US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel) US/RBC_42 Sables de Lede US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vlierzele)	UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele	5	2,50E-05
H	III-Bruxellian aquifer-East Bruxellien, rive droite de la Senne	US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel) & US/RBC_42 Sables de Lede US/RBC_43 Sables de Bruxelles US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vlierzele)			2,00E-04
I	III-Merelbeke aquiclude	US/RBC_51 Argiles de Gent (membre de Merelbeke)	UH/RBC_5 Aquiclude des argiles de Gent	6	3,50E-08
J	III-Tielt aquitard	US/RBC_61 Sables et argiles de Tielt	UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt	7	3,50E-06
K	III-Aalbeke aquiclude	US/RBC_71 Argiles de Kortrijk (membre d'Aalbeke)	UH/RBC_7a Aquiclude des argiles de Aalbeke	8	2,00E-07
L	III-Moen aquitard	US/RBC_72 Sables et argiles de Kortrijk (membre de Moen)	UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen	9	1,00E-06

Tableau 12 : Conductivités hydrauliques assignées à BPSM (valeurs initiales)



3.10.2 Coefficient d'emménagement (S)

Le *coefficient d'emménagement* (S), paramètre adimensionnel, représente la quantité d'eau libérée (ou emmagasinée) par unité de surface d'un aquifère pour une perte (ou un gain) de charge hydraulique unitaire (soit 1 mètre). Il matérialise la capacité de stockage d'un aquifère.

Le *régime permanent* étant basé sur un bilan nul en termes de stockage (flux IN = flux OUT), ce paramètre est d'application seulement dans le cas de simulations réalisées en *régime transitoire*.

Les paramètres qui le régissent dépendent du caractère *libre* ou *captif* de la nappe :

- Dans le cas d'une nappe libre, l'eau est libérée par l'action des forces de gravité (drainage). Le *coefficient d'emménagement* est égal, en pratique, à la *porosité efficace* (n_e) (§3.10.2.1). On le nomme alors *specific yield* (S_y) (Équation 4).

$$S = S_y = n_e$$

Équation 4

Attention ! Outre la capacité de stockage en régime transitoire, la *porosité efficace* n_e conditionne le calcul de la vitesse réelle v de migration des eaux souterraines par *advection* (ou vitesse de pore) définie par l'Équation 5. Ce paramètre s'avère donc fondamental dans le cadre de simulations réalisées pour résoudre des problèmes de transport.

$$v = \frac{K \times i}{n_e}$$

Équation 5

Avec :

- K : conductivité hydraulique (m/s) ;
 - i : gradient hydraulique (-) ;
 - n_e : porosité efficace (-).
- Dans le cas d'une nappe captive ou semi-captive, l'expulsion de l'eau est le résultat de la baisse du niveau statique provoquant une baisse de pression interstitielle, une détente élastique et une déformation du solide libérant l'eau (action d'élasticité de l'eau et du solide). Le *coefficient d'emménagement* est alors fonction du *coefficient d'emménagement spécifique* (S_s) (Équation 6), lequel dépend directement de la *compressibilité de l'aquifère* α (§3.10.2.2).

$$S = S_s \times b$$

Équation 6

Avec :

- S_s : coefficient d'emménagement spécifique (1/m) ;
- b : épaisseur de l'aquifère (-).

Il y a lieu de préciser que la *compressibilité de l'aquifère* étant faible, le volume d'eau stocké dans un aquifère à nappe captive est 100 à 1 000 fois (voire 10 000 fois) plus petit que dans le cas d'un aquifère à nappe libre (Figure 43).



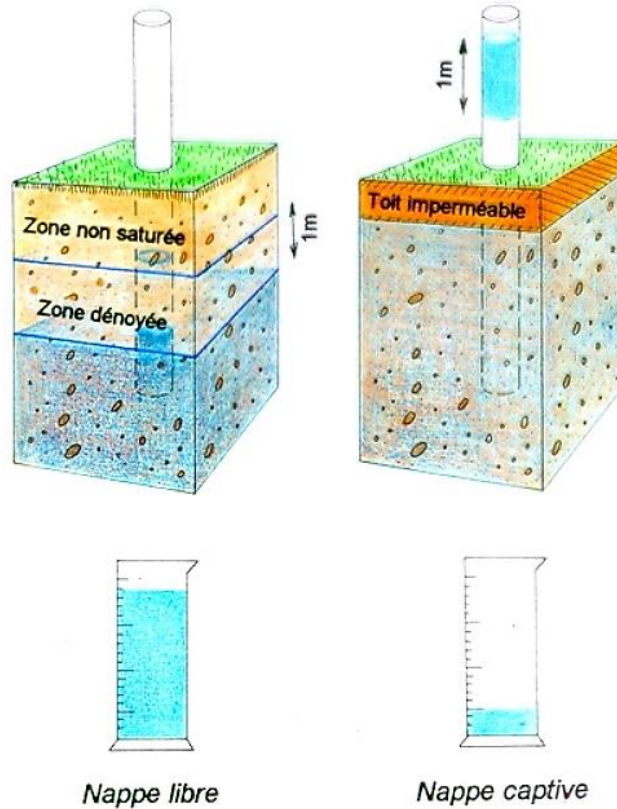


Figure 43 : Emmagasinement en nappe libre et en nappe captive (Source : BRGM)

3.10.2.1 Porosité efficace (n_e)

La *porosité totale* n est définie comme étant le rapport entre le *volume occupé par les pores* (V_v) d'un matériau (roche ou sédiment) et le *volume total* (V) de ce matériau (à la fois la matière solide et les vides interstitiels) (Équation 7).

$$n = \frac{V_v}{V}$$

Équation 7

La *porosité efficace* n_e ou *specific yield* S_y , (Équation 4), décrit la fraction du volume d'un matériau (roche ou sédiment) qui peut être drainée sous l'effet de la gravité. Bien que la *porosité totale* puisse être parfois élevée, la *porosité efficace* peut souvent être beaucoup plus faible (notamment dans les sédiments très fins – silts et argiles).

Il y a lieu de préciser que les zones définies pour la spatialisation des *conductivités hydrauliques* (Tableau 12) sont également utilisées pour la spatialisation des *porosités efficaces / specific yield*. Ces valeurs, issues de la littérature (N. KRESIC, 2007 et JOHNSON, 1967), sont déterminées arbitrairement sur la base de la description lithologique connue (Figure 44). Une valeur de référence jugée « moyenne » est alors attribuée à chaque zone (Tableau 14).

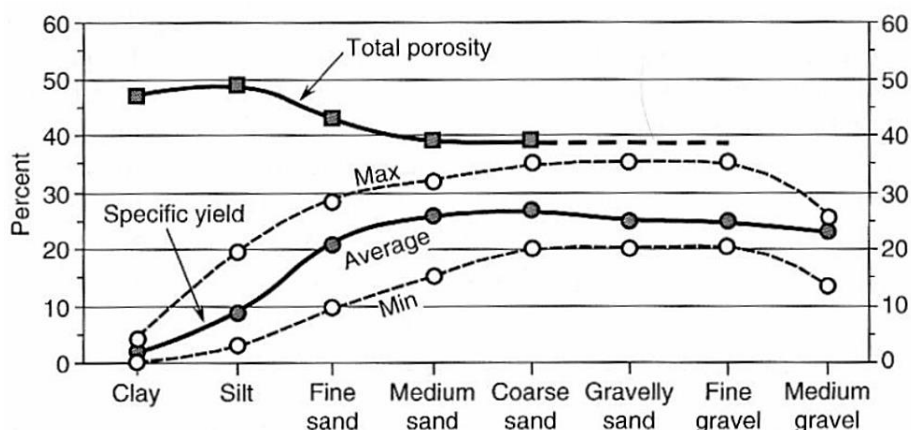


Figure 44 : Porosité totale et efficace en fonction de la lithologie type de sédiments déconsolidés (d'après N. KRESIC, 2007 et JOHNSON, 1967)

3.10.2.2 Coefficient d'emmagasinement spécifique (S_s)

Le coefficient d'emmagasinement spécifique S_s exprimé en m^{-1} est le volume d'eau par unité de volume du milieu saturé pouvant entrer ou sortir de l'aquifère lorsque le niveau piézométrique de l'aquifère s'accroît ou décroît d'une unité (Équation 8).

$$S_s = \rho \times g \times (\alpha + n \times \beta) \sim \rho \times g \times \alpha$$

Équation 8

Avec :

- α : compressibilité de l'aquifère (m^2/N ou Pa^{-1});
- ρ : densité du fluide (-) ;
- g : accélération de la pesanteur (N/kg) ;
- n : porosité (-) ;
- β : compressibilité de l'eau (m^2/N ou Pa^{-1}).

Le terme $n \times \beta$ étant très faible par rapport à α , l'équation peut être simplifiée par la relation $\rho \times g \times \alpha$. Il y a lieu de préciser que les zones définies pour la spatialisation des conductivités hydrauliques (Tableau 12) sont également utilisées pour la spatialisation du coefficient d'emmagasinement spécifique. Freeze et Cherry (1979), Carter et Bentley (1991) proposent des ranges de valeurs α fonction du type de lithologie (Tableau 13). Sur cette base, une valeur de référence jugée « moyenne » est attribuée à chaque zone (Tableau 14).



Lithology	Volume compressibility α (Pa^{-1})
Highly organic alluvial clays and peats, underconsolidated clays	1.5×10^{-6} – 1×10^{-6}
Normally consolidated alluvial clays	1×10^{-6} – 3×10^{-7}
Clays of lake deposits/outwash, normally consolidated clays at depth, weathered marls	3×10^{-7} – 1×10^{-7}
Tills and marls	1×10^{-7} – 5×10^{-8}
Over-consolidated clays	5×10^{-8} – 1×10^{-8}
Sand	5×10^{-7} – 1×10^{-9}
Gravel	5×10^{-8} – 1×10^{-10}
Fractured rock	5×10^{-8} – 1×10^{-10}
Hard rock	5×10^{-9} – 1×10^{-11}

(Freeze and Cherry 1979, Carter and Bentley 1991). Note that volume compressibility of a given porous medium is highly dependent on the effective stress.

Tableau 13 : Compressibilité de l'aquifère (m^2/N ou Pa^{-1}) par type de lithologie (source : Dassargue, 2019)

3.10.2.3 Synthèse

Il y a lieu de préciser que dans le cadre de cette version 1.0 de *BPSM*, le *coefficient d'emmagasinement* (S) et plus précisément les paramètres qui le définissent (§3.10.2), à savoir le *coefficient d'emmagasinement spécifique* (S_s) ou la *porosité efficace* (n_e) ne font pas l'objet du processus de calibration (§5). Leur calibration sera néanmoins abordée dans une prochaine version de *BPSM*.

Ceci étant dit, comme détaillé dans les §3.10.2.1 et §3.10.2.2, ces paramètres font l'objet d'une sélection sur la base de valeurs issues de la littérature jugées réalistes rendant *BPSM v1.0* exploitable pour résoudre des problèmes transitoires et des problèmes de transport sous réserve de la prise en compte de l'incertitude potentiellement grande sur ces paramètres d'entrée.

Une synthèse des paramètres par défaut de *porosité efficace* (n_e) et *coefficient d'emmagasinement spécifique* (S_s) est présentée au **Tableau 14**.



Zone	Description/Nom simplifié	Unités Stratigraphiques (US/RBC)	Unités Hydrogéologiques (UH/RBC)	Layer	n _e (-)	S _s (m ⁻¹)
A	IV-alluvial aquitard (phreatic)	US/RBC_13 Argiles alluviales	UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel	1	0,08	4,9E-03
B	IV-silt cover	US/RBC_12 Couverture limoneuse				
C	IV-alluvial aquifer (semi-confined)	US/RBC_14 Limons, sables et graviers alluviaux	UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux	2	0,2	4,9E-05
D	III-Shh. & On. perched aquifer	US/RBC_23 Sables et argiles de Sint-Huilbrechts-Hern	UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché	3	0,2	4,9E-05
		US/RBC_25 Sables de Maldegem (membre de Onderdale)				
E	III-Diest perched aquifer	US/RBC_21 Sables de Diest				
F	III-U&A aquiclude	US/RBC_31 Argiles de Maldegem (membre de Ursel et Asse)	UH/RBC_3 Aquiclude des argiles de Ursel et Asse	4	0,02	2,5E-04
G	III-Bruxellian aquifer-West Bruxellien, rive gauche de la Senne	US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel)	UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele	5	0,2	4,9E-05
		US/RBC_42 Sables de Lede				
H	III-Bruxellian aquifer-East Bruxellien, rive droite de la Senne	US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vlierzele)				
		US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel) & US/RBC_42 Sables de Lede				
		US/RBC_43 Sables de Bruxelles				
I	III-Merelbeke aquiclude	US/RBC_51 Argiles de Gent (membre de Merelbeke)	UH/RBC_5 Aquiclude des argiles de Gent	6	0,02	2,5E-04
J	III-Tielt aquitard	US/RBC_61 Sables et argiles de Tielt	UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt	7	0,08	4,9E-03
K	III-Aalbeke aquiclude	US/RBC_71 Argiles de Kortrijk (membre d'Aalbeke)	UH/RBC_7a Aquiclude des argiles de Aalbeke	8	0,02	2,5E-04
L	III-Moen aquitard	US/RBC_72 Sables et argiles de Kortrijk (membre de Moen)	UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen	9	0,08	4,9E-03

Tableau 14 : Porosités efficaces et coefficients d'emmagasinement spécifiques assignés à BPSM



4 Modèle numérique

Cette partie traite de l'implémentation au sein du modèle numérique des divers paramètres d'entrée et hypothèses formulées dans le cadre de la construction du *modèle conceptuel* décrit dans le chapitre §3.

4.1 Maillage (*supermesh*)

4.1.1 Horizontal (2D)

Un maillage (ou *supermesh*) horizontal en *éléments finis* est généré grâce au code de triangulation « *triangle* » développé par Jonathan Shewchuk (Université de Berkeley, États-Unis) permettant la production rapide d'un maillage complexe. Ce maillage se compose de *nœuds* (points) reliés entre eux pour former des *éléments* de forme triangulaire.

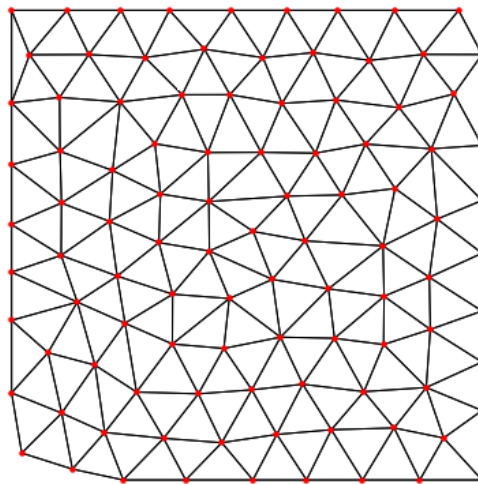


Figure 45 : Exemple de maillage en éléments finis (2D)

Dans le cas de *BPSM*, une série d'entités, représentées numériquement au travers de points ou de lignes, rentre en interaction avec le modèle hydrogéologique (**Figure 46**) :

- les lignes correspondent aux *éléments linéaires* tels que le réseau hydrographique, le réseau de collecteurs, la galerie drainante, le canal et le pourtour des étangs ;
- les points correspondent aux *éléments ponctuels* tels que les sources, les captages et les points d'observation (piézomètres).

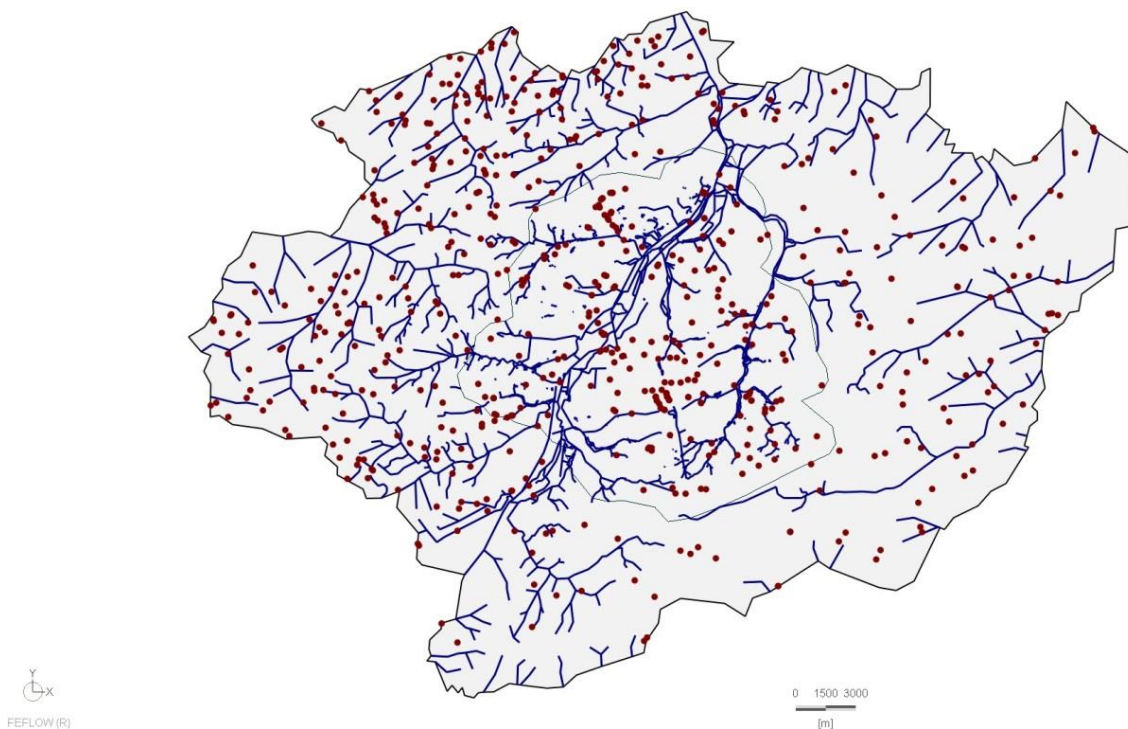


Figure 46 : Supermesh - Points et lignes

L'algorithme *triangle* prend en considération la présence de ces entités afin de générer un maillage en éléments finis épousant littéralement ces formes.

En outre, il y a lieu de distinguer trois zones :

- zone d'intérêt (région Bruxelles-Capitale), plus une zone buffer de 1 km autour de celle-ci au droit de laquelle on fixe une distance maximale entre deux nœuds de 100 m (**Figure 48**) ;
- zone tampon de 150 m autour de la galerie drainante VIVAQUA au droit de laquelle on fixe une distance maximale entre deux nœuds de 50 m (**Figure 49**) ;
- reste de la zone modélisée au droit de laquelle on fixe une distance maximale entre deux nœuds de 500 m (**Figure 47**).

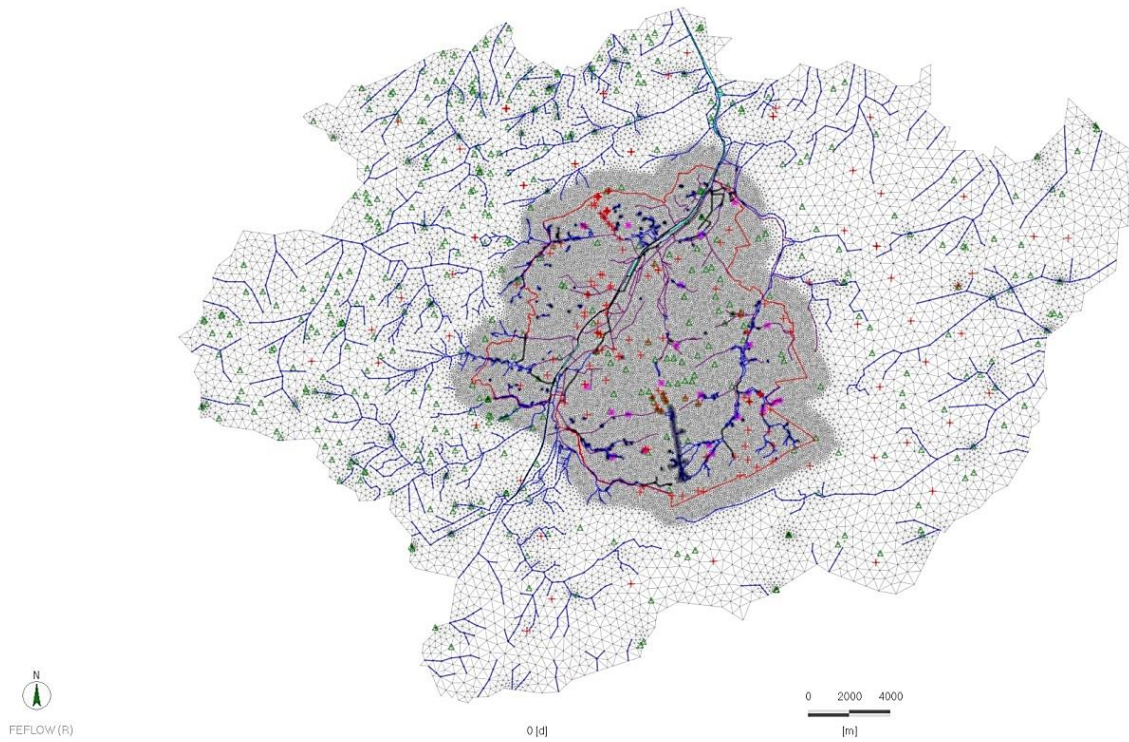


Figure 47 : Supermesh sur la zone d'étude (croix : piézomètre – triangle : captage – astérisque : source)

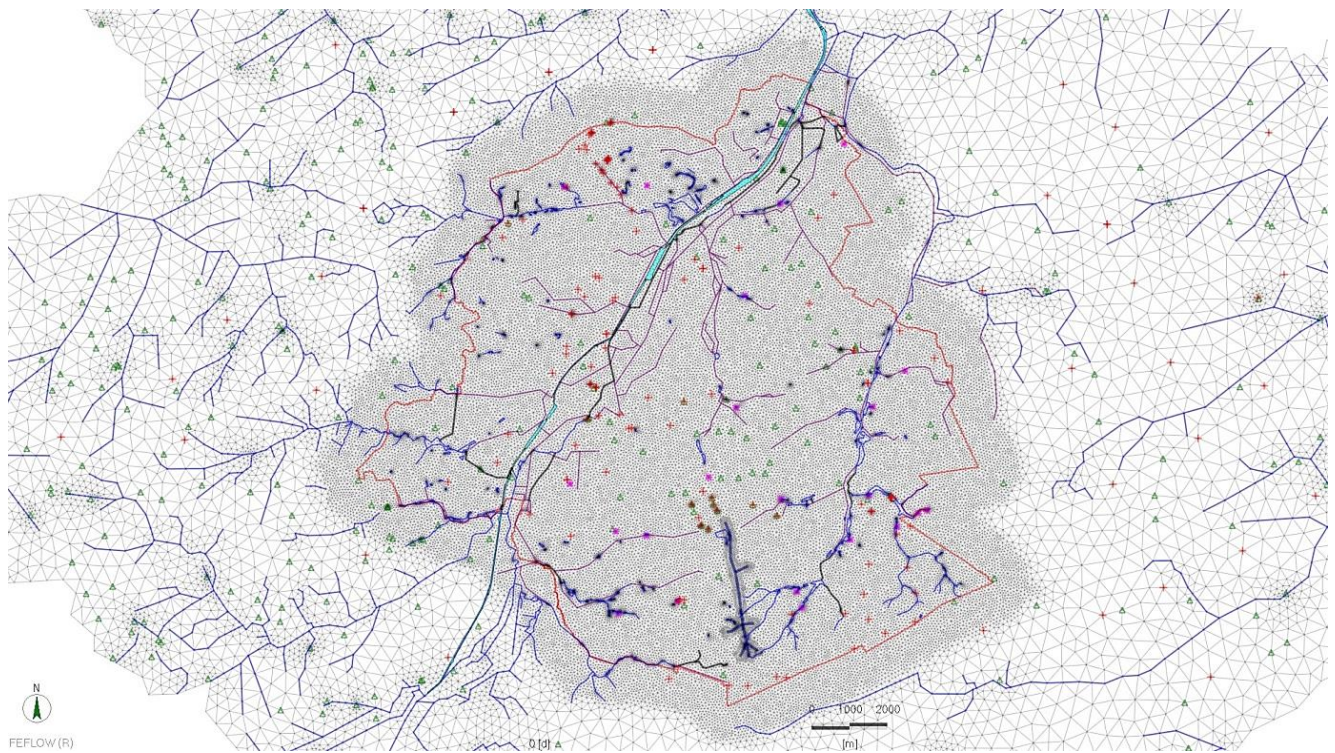


Figure 48 : Supermesh sur la zone d'intérêt (région Bruxelles-Capitale) augmentée d'un buffer de 1 km (croix : piézomètre – triangle : captage – astérisque : source)

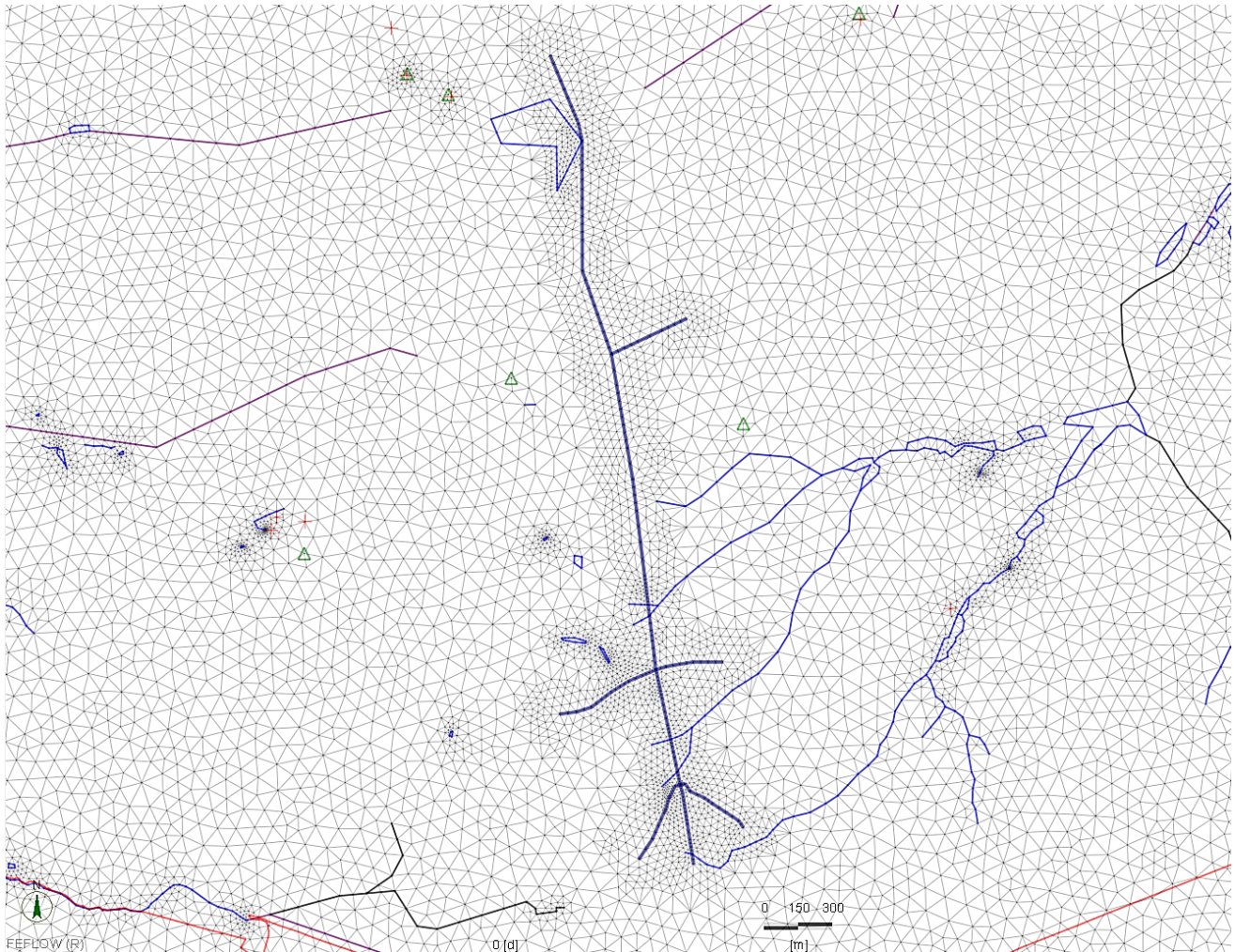


Figure 49 : Supermesh sur une zone tampon de 150 m autour de la galerie drainante (croix : piézomètre – triangle : captage – astérisque : source)

4.1.2 Vertical (3D)

Comme vu au §3.5.4, BPSM est composé d'un ensemble de 9 couches (layers) respectant une logique de découpage par unité hydrogéologique (UH/RBC) aquifère / aquitard / aquiclude (Tableau 6).

Sauf exception de l'UH/RBC_1 Système aquifère du quaternaire, le modèle géologique (§3.5.1.2), incluant la topographie déjà documentée en §3.2, est directement exploité pour définir les toits et bases (slices) de chaque couche du modèle BPSM. Concernant, l'UH/RBC_1 Système aquifère du quaternaire :

- il y a lieu de rappeler (§3.5.1.2) que le modèle géologique ne permet pas une discrétisation des unités quaternaires alluviales, plus particulièrement la distinction entre les argiles alluviales de l'UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel et l'UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux ;
- au niveau des plateaux limoneux, l'épaisseur modélisée des limons de l'UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel est relativement imprécise, dépendant surtout de la qualité de l'interpolation du toit des formations tertiaires sous-jacentes.

De ce fait, afin d'assurer une représentativité acceptable des structures quaternaires au sein du modèle BPSM, certaines hypothèses de travail ont été posées :



- Au niveau des zones alluvionnaires :
 - o une épaisseur fixe de 7.5 mètres pour l'UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel ;
 - o une épaisseur de l'UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux variable en fonction de la hauteur disponible entre la base des argiles alluviales sus-jacentes et le toit de la première formation tertiaire sous-jacente, avec une épaisseur minimale « garantie » de 1.5 mètres.

- Au niveau des plateaux limoneux : une épaisseur de l'UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel variable en fonction de la hauteur disponible entre la topographie et le toit de la première formation tertiaire sous-jacente, avec une épaisseur minimale « garantie » de 1.5 mètres.

Ces valeurs arbitraires d'épaisseur se veulent garantir une représentativité grossière des structures quaternaires observées sur le terrain. Elles se basent sur un *expert judgment* analysant les données de forage bruxellois et de la *Databank Ondergrond Vlaanderen* (Figure 18, Figure 19). Une prochaine version de *BPSM* appuyée par une représentation plus précise des structures quaternaires au sein du modèle géologique bruxellois *Brustrati3D* (et notamment des alluvions par nature très hétérogènes) devra améliorer ce point de faiblesse.

Les Figure 50 et Figure 51 illustrent une visualisation en coupe des couches modélisées de la zone d'étude.

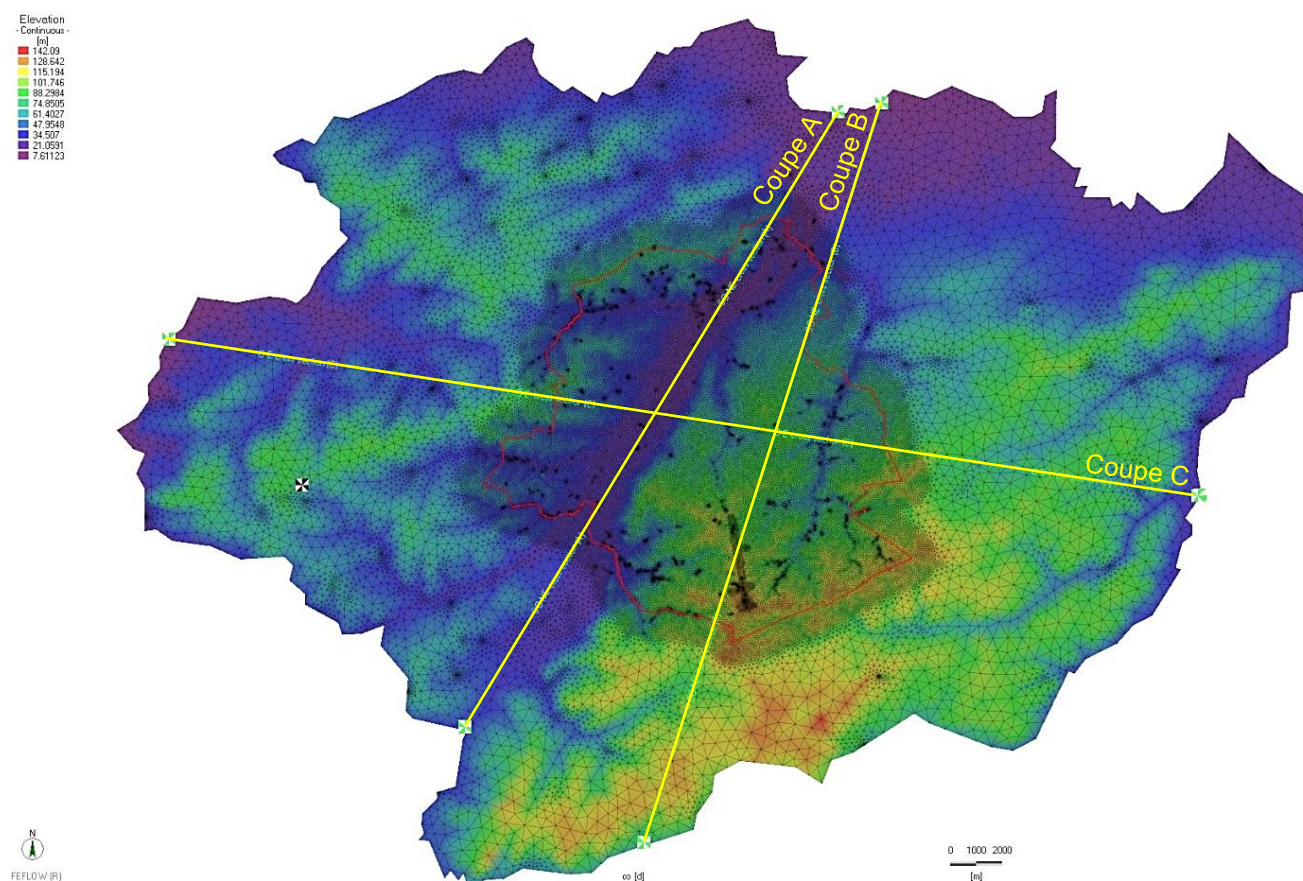


Figure 50 : Localisation des Coupes A (longitudinale N-S, vallée de la Senne), B (longitudinale N-S, entre vallées de la Senne et Woluwe) et C (transversale O-E)

Les Figure 52 à Figure 55 reprennent des visuels 3D de *BPSM* et son maillage en *éléments finis*, orientés respectivement vers le nord, l'est, le sud et l'ouest.

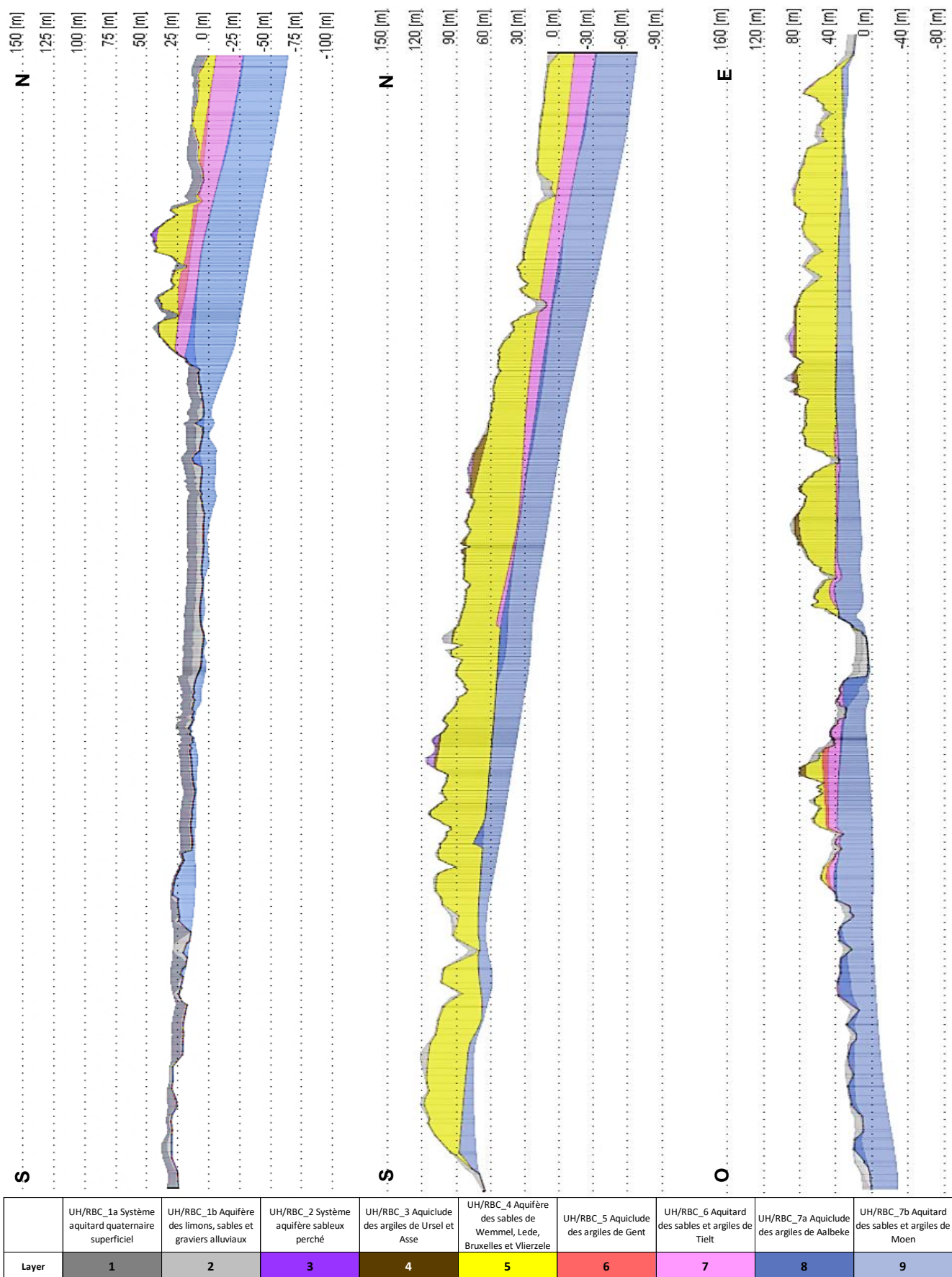


Figure 51 : (De gauche à droite) Coupes A (longitudinale N-S, vallée de la Senne), B (longitudinale N-S, entre vallées de la Senne et Woluwe) et C (transversale O-E) - axe z x 25 (m)



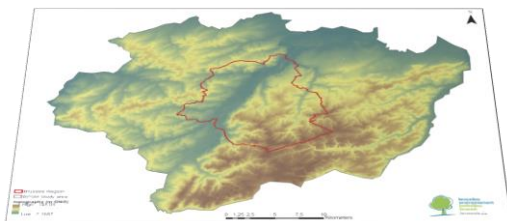
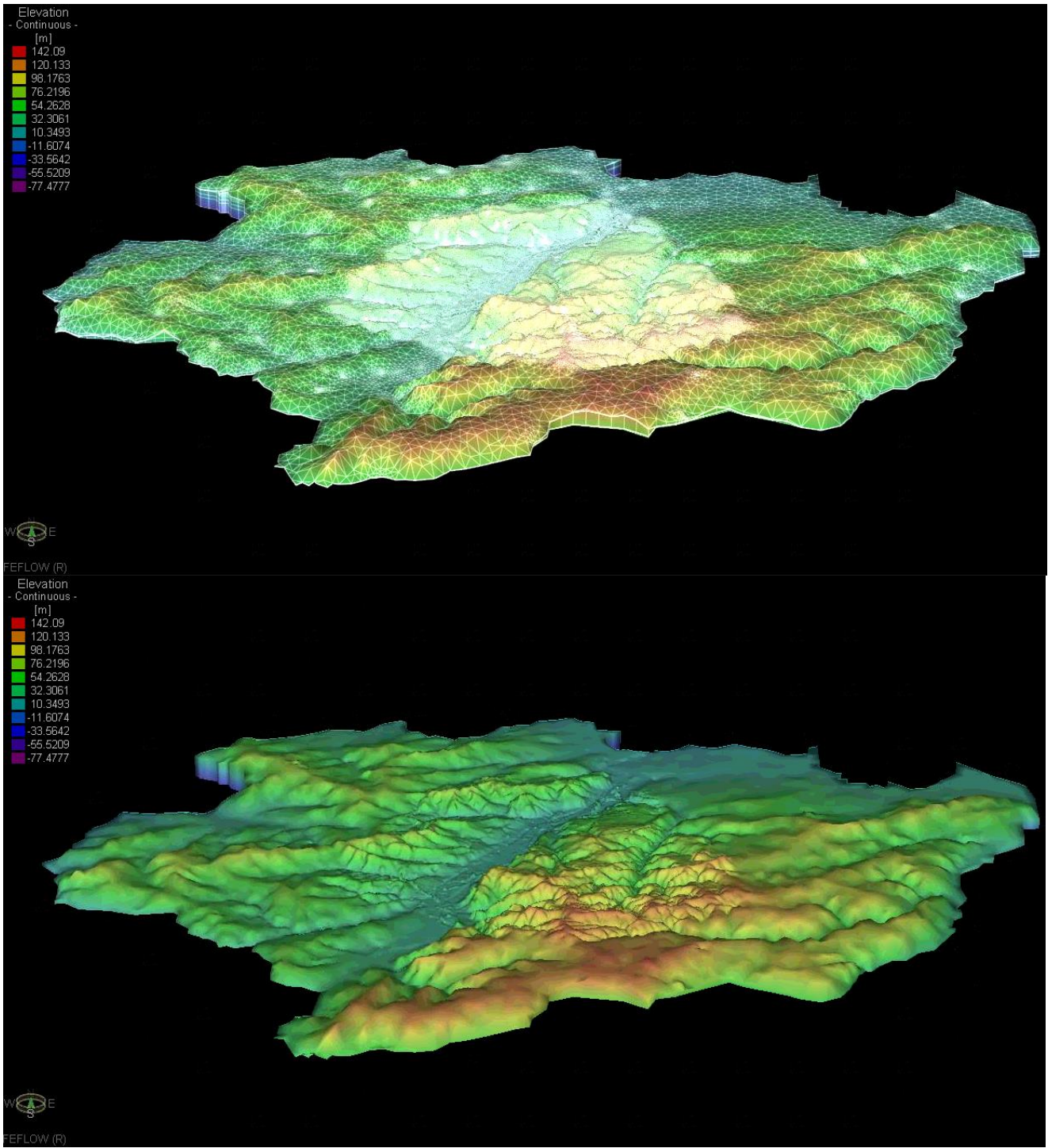


Figure 52 : Vue 3D de *BPSM*, orientation nord – axe z x 15 (m)



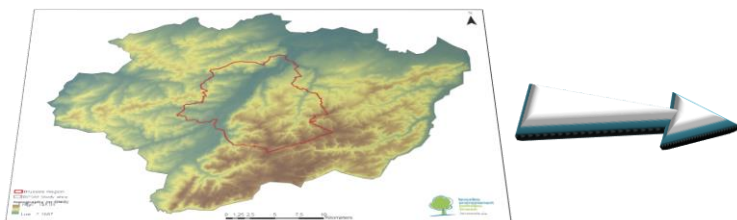
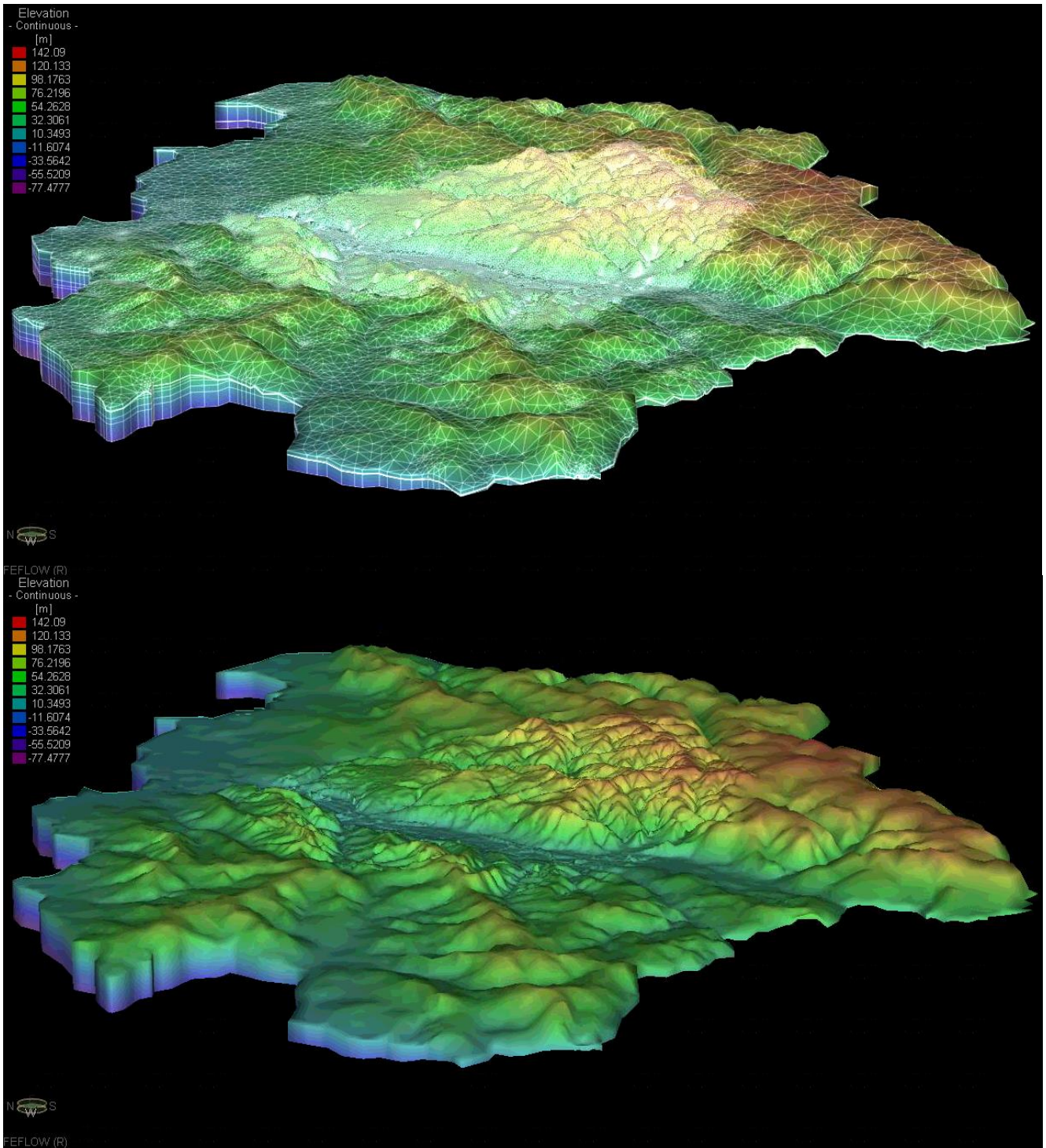


Figure 53 : Vue 3D de *BPSM*, orientation est – axe z x 15 (m)



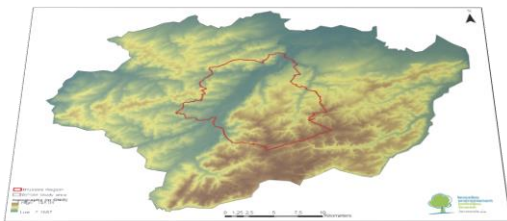
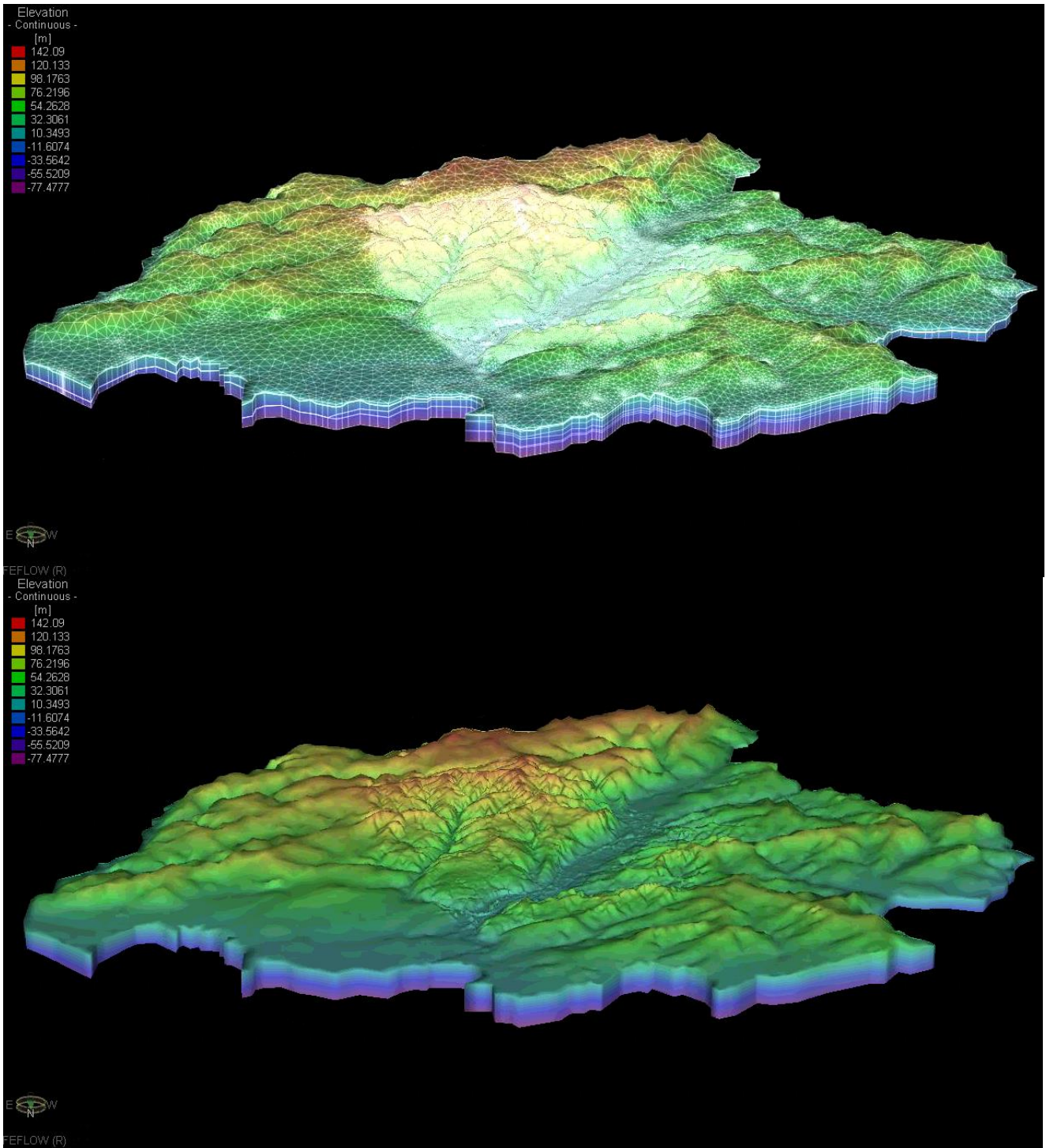


Figure 54 : Vue 3D de *BPSM*, orientation sud – axe z x 15 (m)



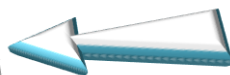
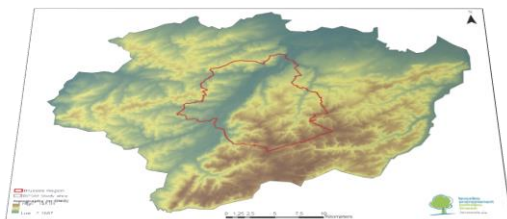
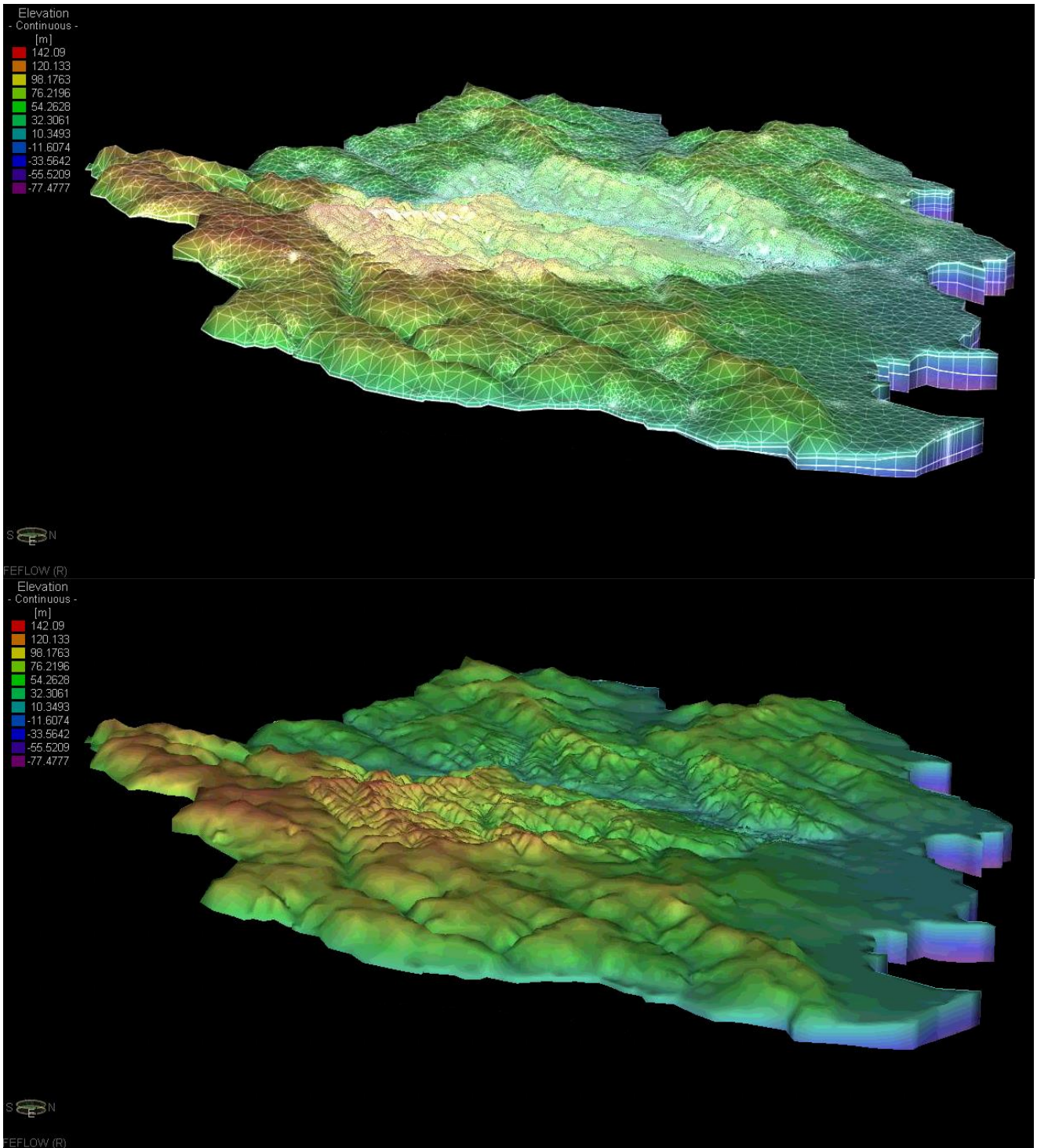


Figure 55 : Vue 3D de *BPSM*, orientation ouest – axe z x 15 (m)



4.2 Configuration du modèle

Le modèle est construit sous FEFLOW®. Afin de reproduire efficacement la piézométrie relativement complexe du système phréatique marquée localement par des zones semi-captives à captives, des gradients verticaux entre unités aquifères, le modèle est construit par défaut selon le mode « Phreatic ». Les éléments (§4.1.1) du modèle sont pris en charge par une approche de saturation partielle.

- pour les éléments partiellement saturés, la conductivité hydraulique est artificiellement réduite par un coefficient égal au rapport $\frac{\text{épaisseur saturée}}{\text{épaisseur totale}}$;
- pour les éléments totalement secs, une épaisseur minimale saturée est assignée par la définition d'un paramètre ajustable nommé *residual water depth*. Ce paramètre est par défaut égal à 1 mm, mais peut être augmenté pour éviter les instabilités numériques. La conductivité hydraulique est artificiellement réduite par un coefficient égal au rapport $\frac{\text{residual water depth}}{\text{épaisseur totale}}$.

Il y a lieu de noter que le mode « Confined » apparaît plus adapté pour reproduire les processus hydrodynamiques relatifs à des éléments totalement saturés et caractérisés par un phénomène de captivité du fait d'une couverture aquitard/ aquiclude. Toutefois, si FEFLOW® (dans sa version 7.1) peut conditionner le choix d'un mode Phreatic/Confined à appliquer aux éléments sur la base d'un critère de saturation, il ne peut conditionner ce choix sur la base du caractère aquifère/aquitard/aquiclude de l'unité sus-jacente. En d'autres termes, en mode Confined, tout élément saturé sera considéré comme captif et ce même si l'élément est recouvert d'une couche aquifère très perméable. Dans ces conditions et étant donné le caractère majoritairement libre du système phréatique, il n'est pas recommandé d'utiliser le mode Confined par défaut. En revanche son utilisation pourrait se faire dans le cadre de simulations spécifiques futures se focalisant sur une zone du système phréatique reconnue captive.

4.3 Conditions aux limites

4.3.1 Condition de « flux imposé » (2^{ème} type, Neumann)

Comme détaillé au §3.3.3.2, une condition de « flux imposé » (2^{ème} type, Neumann) est appliquée au droit de la limite située sur la crête de partage délimitant les bassins versants hydrogéologiques du Patiaux et de l'Argentine. Le champ de vitesses de Darcy (m/jour) est extrait des nœuds d'Hydrobrux composant cette section d'écoulement, puis est reporté aux nœuds de BPSM composant la même section (Figure 56).



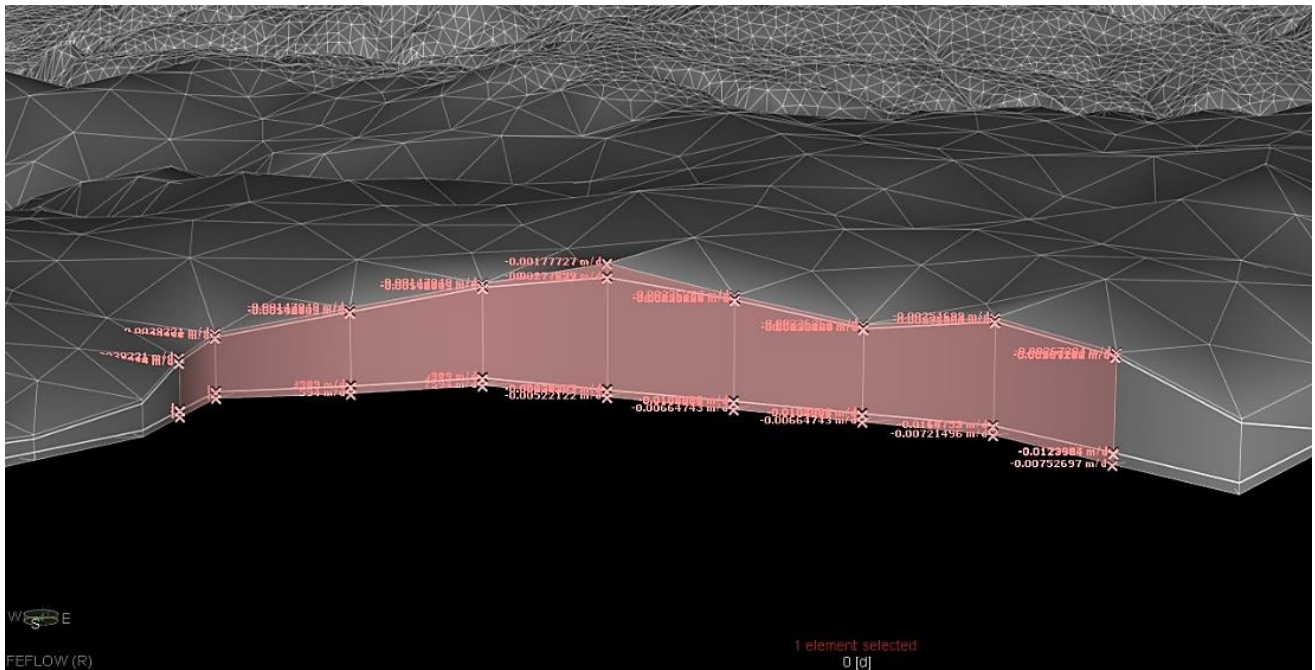


Figure 56 : Contours de flux imposés (2^{ème} type ou Neumann)

4.3.2 Condition de « transfert » (3^{ème} type ou Cauchy)

Une condition de « transfert » (3^{ème} type ou Cauchy) est appliquée :

- comme détaillé respectivement aux chapitres §3.3.3.1 et §3.4.3, au droit des nœuds composant le réseau hydrographique (ciel ouvert et pertuis) et le réseau de grands collecteurs, tous deux modélisés en Layer 1 (Tableau 6), sauf aux frontières du modèle où les conditions sont assignées sur l'ensemble des layers ;
- comme détaillé au §3.6.2.2, tout le long du tracé de la galerie drainante VIVAQUA, modélisée en Layer 5 (Tableau 6).

La Figure 57 illustre l'application des conditions de « transfert » au niveau du modèle numérique.

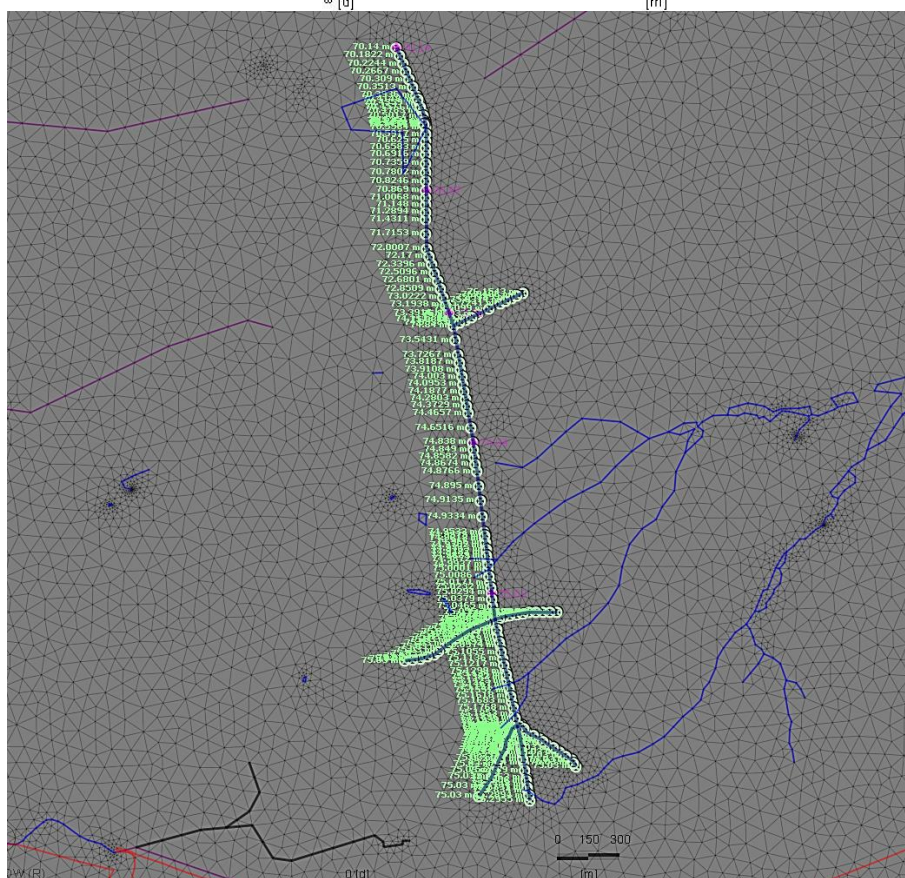
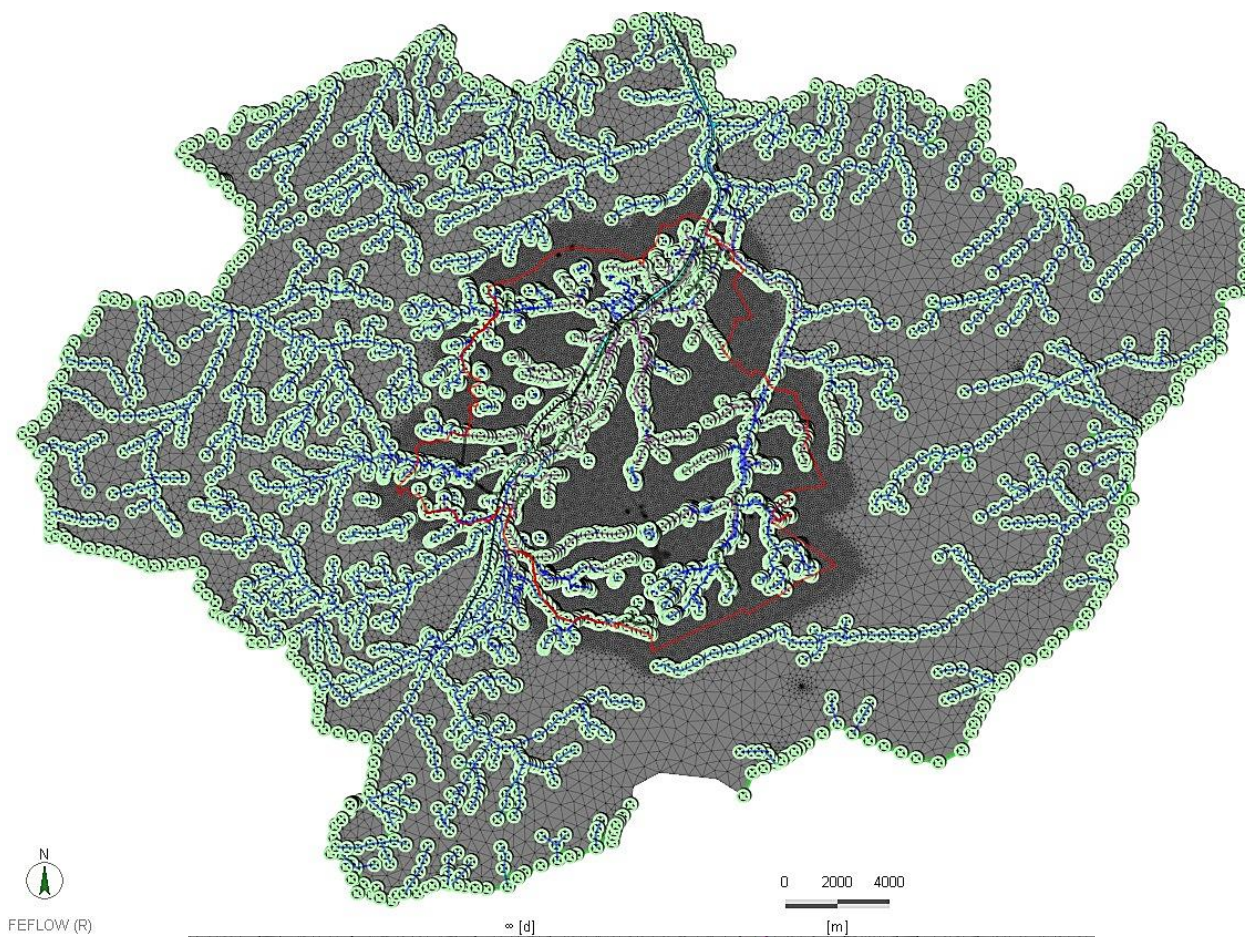


Figure 57 : Conditions de transfert (3^{ème} type ou Cauchy) - réseau hydrographique & grands collecteurs, layer 1 (en haut) - galerie drainante VIVAQUA, layer 5 (en bas)



4.3.3 Condition « puits »

Une *condition « puits »* est appliquée :

- comme détaillé au §3.6.1.2, au droit des captages actifs sur la zone d'étude, au niveau de la *couche* correspondante à l'*unité hydrogéologique* exploitée (**Tableau 6**). Les valeurs de débit et autres contraintes sont attribuées conformément aux hypothèses formulées au chapitre §3.6.1.2.
- comme détaillé au §3.7.2, au droit des sources de l'*UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele*, modélisées en *Layer 5* (**Tableau 6**). Les valeurs de débit sont attribuées conformément aux hypothèses formulées au §3.7.2.

La **Figure 58** illustre l'application des *conditions de « transfert »* au niveau du modèle numérique.



4.4 Recharge

La *recharge* est appliquée au niveau du *toit* du modèle (Layer 1, **Tableau 6**). Les valeurs de recharge sont attribuées aux éléments de cette couche par interpolation linéaire des valeurs discrétisées du raster de *recharge moyenne annuelle* 1833 - 1975 *WetSpass* corrigé selon les hypothèses formulées au chapitre §3.8.3.

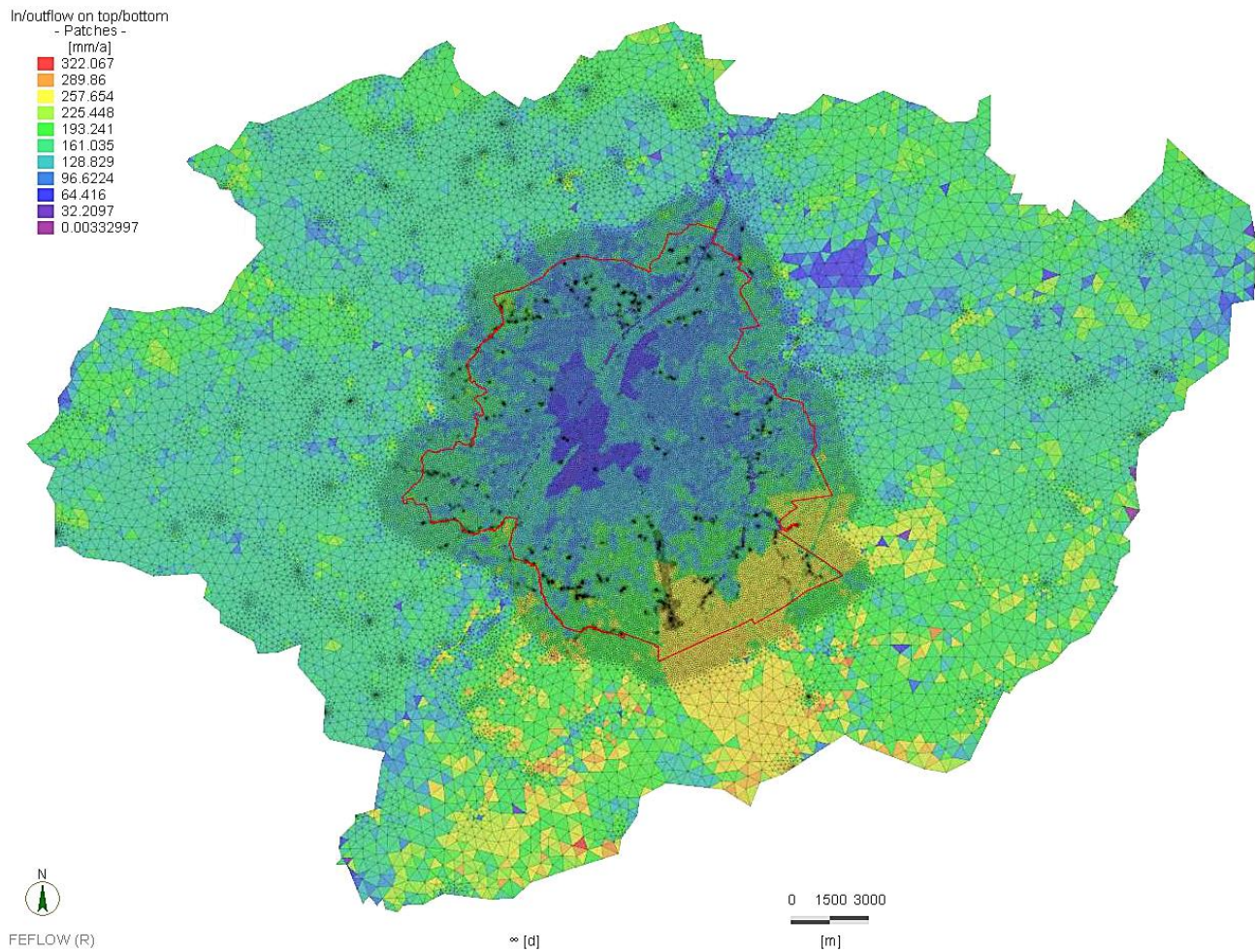


Figure 59 : Recharge, layer 1

4.5 Paramètres hydrodynamiques

Les champs initiaux de *conductivité hydraulique* (sujet ultérieurement à la calibration en régime permanent, §5) et finaux de *porosité efficace* et *coefficient d'emmagasinement spécifique* sont appliqués pour chaque *Layer* (Tableau 6) conformément aux hypothèses formulées aux chapitres respectifs §3.10.1 et §3.10.2.

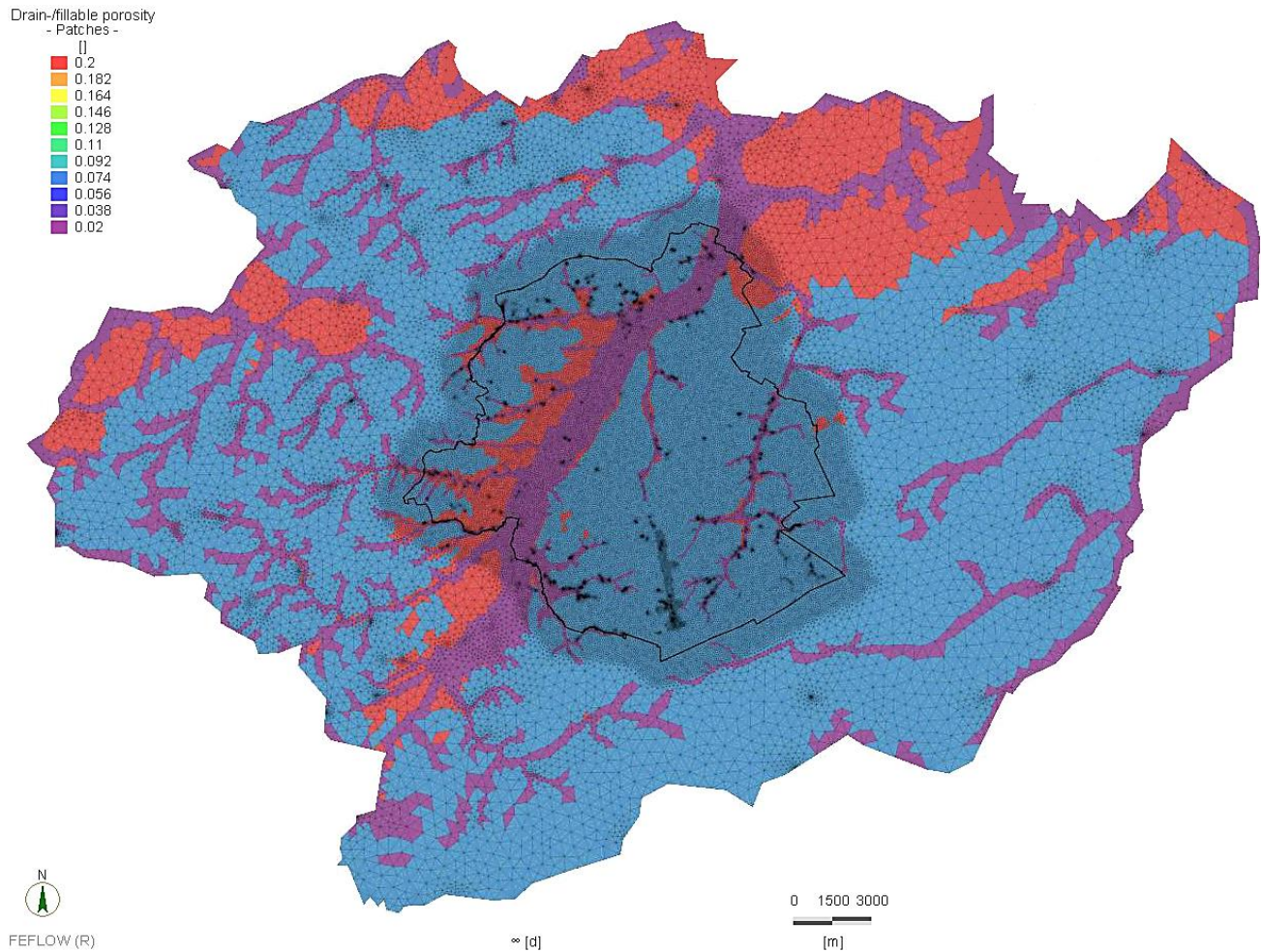


Figure 60 : Porosité efficace, layer 1

5 Calibration

5.1 Méthodologie

Le processus de *calibration* permet d'adapter les champs initiaux de certains paramètres d'entrée définis lors de la phase de construction du *modèle conceptuel* (§3) jusqu'à ce que le modèle reproduise des résultats fidèles à la réalité. Pour cela, le contrôle de la bonne représentativité de ces derniers est assuré au droit de points ou zones pour lesquelles des mesures historiques (observations) ont pu être préalablement synthétisées. Ces adaptations peuvent être plus ou moins significatives mais doivent logiquement respecter des *ranges min/max* préétablis représentatifs de la variabilité théorique des paramètres.

Les paramètres d'entrée sujets à la calibration sont :

- les *conductivités hydrauliques* horizontales (K_x , K_y) et verticales (K_z) (paramètres initiaux détaillés au §3.10.1) ;
- les *conductances* (*Transfert rate Out*, *Transfert rate In*) (paramètres initiaux détaillés au §3.3.3.1 et §3.4.3).

Tous les autres paramètres d'entrée restent par défaut fixes. En effet, les outils et mesures ayant permis de les spatialiser sont jugés assez précis au regard des objectifs de cette 1^{ère} version de *BPSM* pour qu'ils ne nécessitent pas d'adaptation. Il y a tout de même lieu de préciser que :

- dans le cas de difficultés à obtenir un résultat de calibration satisfaisant, les paramètres fixes par défaut pourraient faire l'objet d'adaptations plus ou moins significatives. On parle dans ce cas précis d'une *révision du modèle conceptuel* ;
- le *coefficient d'emmagasinement* (S) et plus précisément les paramètres qui le définissent (§3.10.2), à savoir le *coefficient d'emmagasinement spécifique* (S_s) ou la *porosité efficace* (n_e), feront l'objet d'une calibration en régime transitoire dans le cadre d'une prochaine version de *BPSM*.

Les paramètres observés, représentatifs de la période de *mai 2013*, sont les suivants :

- la *piézométrie* mesurée au droit des piézomètres d'observation répartis sur l'ensemble des unités hydrogéologiques aquifères/aquitard du *système phréatique* ;
- l'*altitude des sources* jugée représentative du niveau piézométrique phréatique local ;
- le *débit de la galerie drainante* VIVAQUA ;
- les *débites de drainage* du système *réseau hydrographique / grands collecteurs*.

La taille et la complexité du modèle *BPSM* nécessite de réaliser la calibration selon un processus itératif et de manière semi-automatique par l'exploitation, entre autres, de l'algorithme mathématique *PEST* (<http://www.pesthomepage.org>) permettant une automatisation de la calibration jusqu'à l'obtention d'un optimum acceptable respectant au mieux les hypothèses posées par le *modèle conceptuel* (§3). Pour chaque « *run* », les *conductivités hydrauliques* sont adaptées prioritairement (paramètre théoriquement le plus « *sensible* » sur l'état de calibration) et les *conductances* dans un second temps.

Les grandes étapes de calibration de *BPSM* sont définies ci-dessous :



- 1- **Paramétrage et précalibration manuelle** afin de rendre le modèle phréatique stable et exploitable en régime permanent ;
- 2- **Calibration** à l'échelle de la zone d'étude (*conductivités hydrauliques*) ;
- 3- **Calibration** à l'échelle de la zone d'intérêt (*conductivités hydrauliques*) ;
- 4- **Calibration** à l'échelle de la zone d'intérêt (*conductances*) ;
- 5- **Fine tuning** (*conductivités hydrauliques, conductances*), incluant potentiellement la révision du modèle conceptuel (*autres paramètres d'entrée*).



Chaque étape de calibration comprend un nombre +/- grand de *run*. Chaque *run* permet généralement soit la modification des champs de *conductivité hydraulique*, soit des champs de *conductance* en respectant un découpage en *zones de calibration* (**Tableau 11**).

Après chaque *run*, la progression de la calibration est évaluée au travers de l'analyse des *critères de validité* (§5.3). Si besoin, le processus revient en arrière de x *run(s)* voire même de x *étape(s) de calibration* et ce jusqu'à ce que toutes les parties du modèle présentent un degré de représentativité des valeurs observées jugé acceptable.

5.2 Observations

5.2.1 Piézométrie

5.2.1.1 Piézomètres

Un total de 174 points d'observation de type *piézomètre* a été exploité pour la calibration de *BPSM* en régime permanent. Ces valeurs sont principalement issues des données préalablement exploitées au niveau du *modèle conceptuel* pour dresser une première carte piézométrique (§3.5.3), complétées par l'ajout de nouveaux points d'observation représentatifs de la situation piézométrique de *mai 2013*.

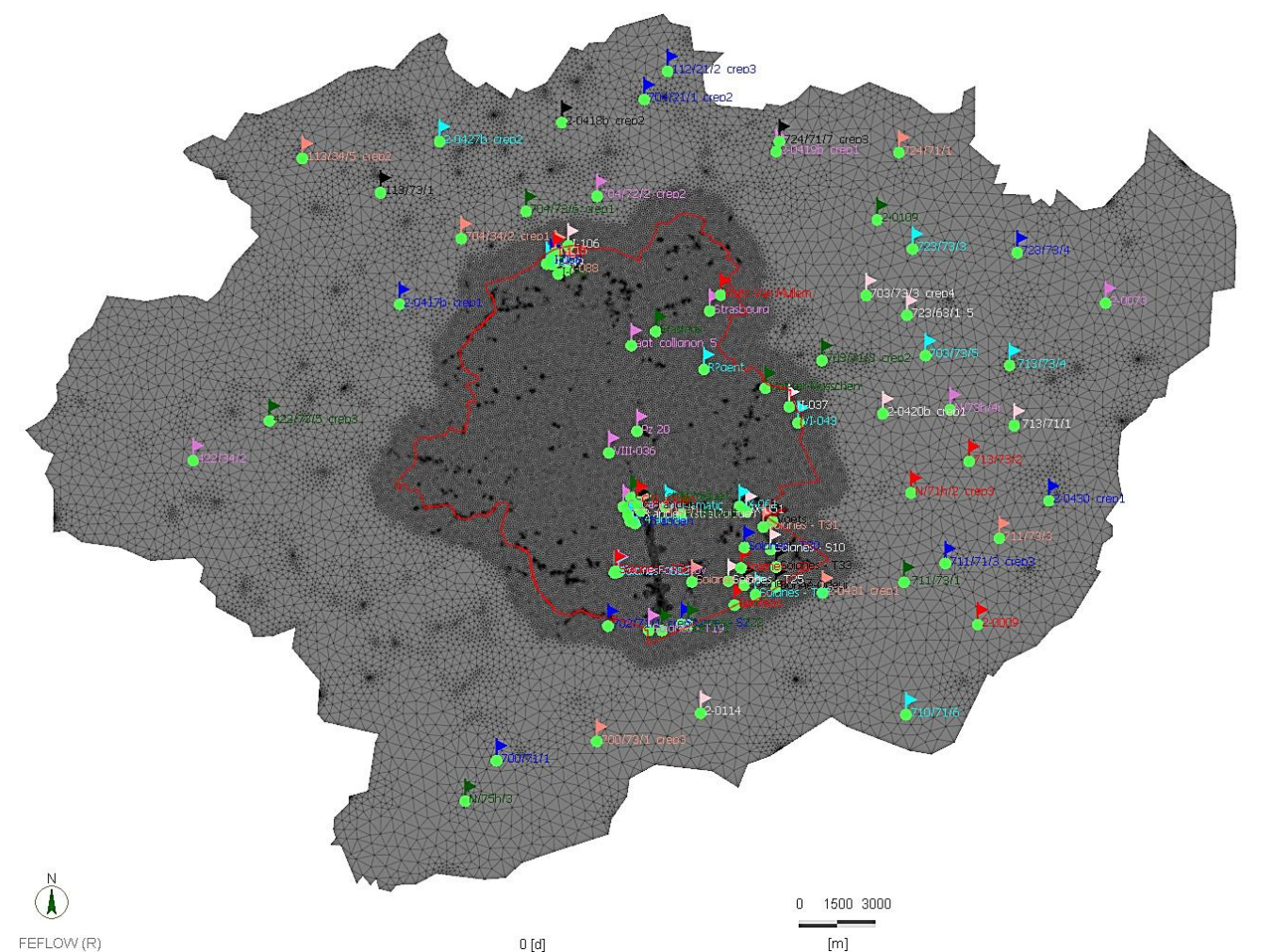
Au final, on dénombre :

- 114 points d'observation de type *piézomètre* au droit de la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un buffer de 1 km ;
- 60 pour le reste de la zone d'étude.

La **Figure 61** reprend la répartition des points d'observation par *layer* (**Tableau 6**) et par zone ainsi que - pour exemple - leur localisation en *layer 5* (couche modélisant l'*UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele*).

Il y a lieu de constater que l'*UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché* ne dispose pas de point d'observation au droit de la région bruxelloise, ce qui compromet d'ores et déjà la bonne calibration du modèle pour cette unité.





Unités Hydrogéologiques (UH/RBC)	Layer	Région bruxelloise (+ 1 km)	Reste du modèle	Total
UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel	1	8	0	8
UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux	2	30	2	32
UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché	3	0	5	5
UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele	5	49	41	90
UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt	7	11	10	21
UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen	9	16	2	18
TOTAL	-	114	60	174

Figure 61 : Répartition des points d'observation (piézométrie) par layer et par zone – localisation des points d'observation (piézométrie) en layer 5



5.2.1.3 Artefacts (réseau hydrographique / grands collecteurs)

A l'instar de ce qui a pu être fait préalablement lors de la constitution d'une première carte piézométrique (§3.5.3), 78 points d'observation « *artefact* » ont été arbitrairement ajoutés en *layer 1* (Tableau 6), au droit du système *réseau hydrographique / grands collecteurs* afin d'améliorer la calibration au niveau des principales vallées alluviales, marquées généralement par une convergence des écoulements et une piézométrie tendant à s'équilibrer avec le système *réseau hydrographique / grands collecteurs*.

Au total :

- 71 points d'observation « *artefacts* » ont été ajoutés au droit de la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un buffer de 1 km ;
- 7 points d'observation « *artefacts* » ont été ajoutés au droit du reste de la zoné d'étude.

Conformément aux hypothèses formulées pour l'interpolation de la carte piézométrique (§3.5.3), ou pour la définition du *niveau d'eau de référence* h_{ref} au droit du réseau hydrographique (§3.3.3.1) et des grands collecteurs (§3.4.3), ces observations « *artefact* » sont définies par la topographie du *MNT* (§3.2) diminuée d'un mètre.

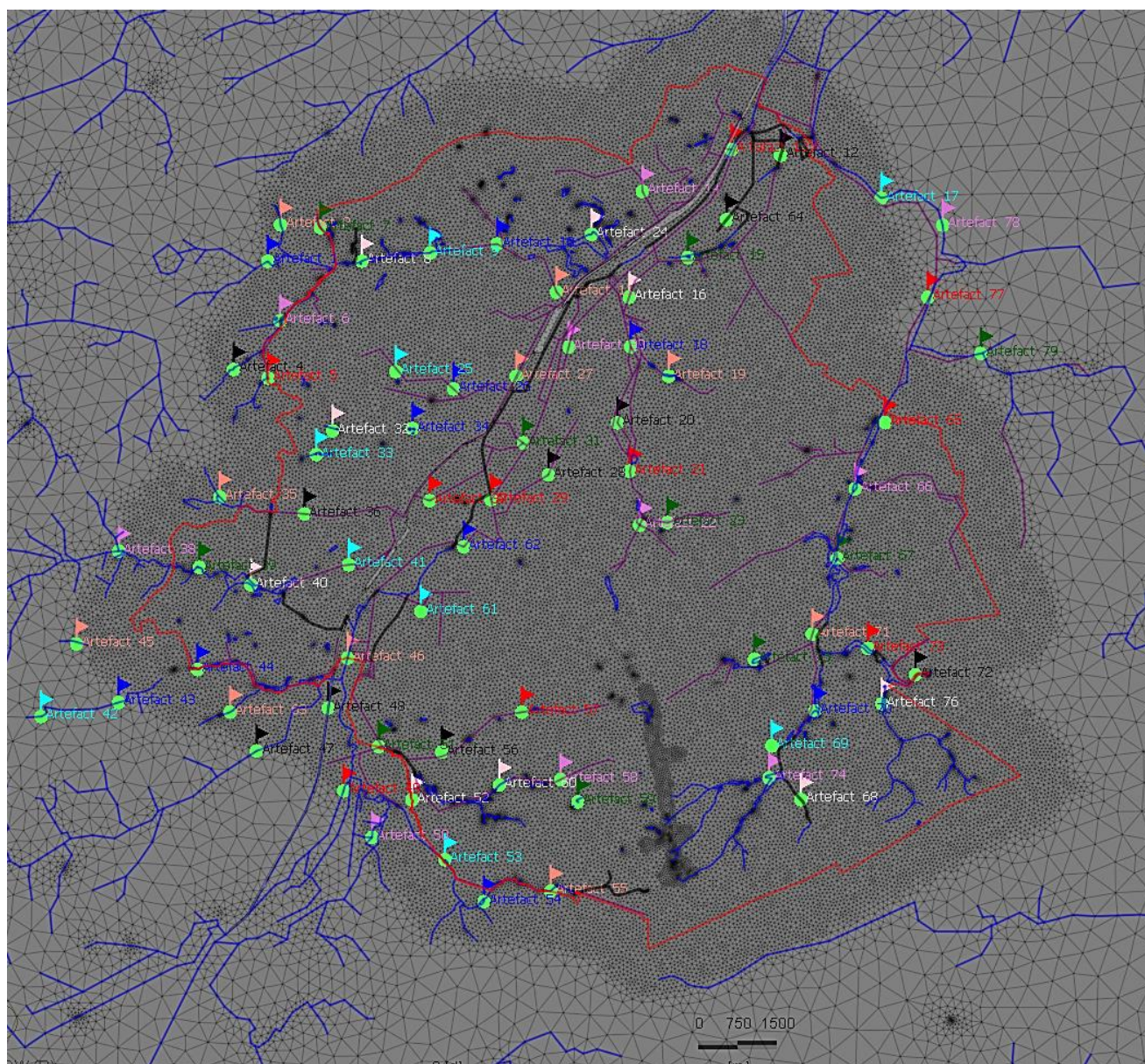


Figure 63 : Points d'observation, artefacts (piézométrie)



5.2.2 Débit de la galerie drainante VIVAQUA

Le débit sortant de la galerie drainante VIVAQUA constitue une observation complémentaire à la *piézométrie* dans le processus de calibration.

Pour rappel (§3.6.2.1), le monitoring des débits mesurés en sortie de galerie a démontré une légère augmentation entre 2008 et 2014, passant de 1.86 à 1.98 millions de m³/an, avec une pointe équivalente à 2.00 millions de m³/an enregistrée en 2013.

Le débit annuel extrait en sortie de galerie est donc connu avec précision pour 2013 : 2.002.478 m³/an, soit 5436,241 m³/jour. Cette valeur est retenue comme valeur de référence pour la calibration.

5.2.3 Débits de drainage du système *réseau hydrographique / grands collecteurs*

Les débits de drainage du système *réseau hydrographique / grands collecteurs* constituent des observations complémentaires à la *piézométrie* dans le processus de calibration.

Pour rappel, le réseau hydrographique (§3.3.3.1) et les grands collecteurs (§3.4.3) sont représentés comme une entité unique au sein de *BPSM*, par l'imposition de conditions du 3^{ème} type (ou *Cauchy*). De ce fait, on ne peut simuler la part de débit revenant au réseau hydrographique de celle revenant aux grands collecteurs.

Néanmoins, un contrôle des débits drainés par le système *réseau hydrographique / grands collecteurs* simulés par *BPSM* au droit des trois bassins « épuratoires » *Nord*, *Sud* et *Woluwe*¹⁰ (**Figure 12**) sur l'année de référence 2013 est possible par comparaison avec le bilan des *débits de base* observés respectivement pour le réseau hydrographique (**Tableau 2**) et les grands collecteurs (**Tableau 3**). Le **Tableau 15** reprend ce bilan.

¹⁰ Partie flamande non prise en compte en ce qui concerne le bassin épuratoire de la *Woluwe*



Bassin 'épurationnaire' (STEP)	Station	type	"Baseflow" moyen 2013 (m ³ /jour)
Woluwe ¹¹	collecteur Woluwe (OUT)	collecteur	30.323
	Woluwe sortie Région (OUT)	réseau hydrographique	12.278
	SOMME (IN)		0
	SOMME (OUT)		42.602
	<u>BALANCE</u>		<u>-42.602</u>
Senne Sud	Sint-Pieters-Leeuw/Zuunbeek (IN)	réseau hydrographique	17.024
	Neerpedebeek (IN)	réseau hydrographique	8.205
	Vogelzangbeek (IN)	réseau hydrographique	3.460
	Senne entrée Région (IN)	réseau hydrographique	196.876
	Linkebeek/Verrewinkelbeek (OUT)	réseau hydrographique	6.863
	<i>Senne Paepsem *</i>	<i>réseau hydrographique</i>	<i>257.771</i>
	<i>Senne inter bassins (OUT) *</i>	<i>réseau hydrographique</i>	<i>283.905</i>
	STEP sud Uccle (OUT)	collecteur	11.362
	STEP sud Anderlecht (OUT)	collecteur	7.411
SOMME (IN)		225.565	
SOMME (OUT)		309.542	
<u>BALANCE</u>		<u>-83.977</u>	
Senne Nord	<i>Senne inter bassins (IN) *</i>	<i>réseau hydrographique</i>	<i>283.906</i>
	STEP Nord Rive Gauche (OUT)	collecteur	31.013
	STEP Nord Emissaire Nord (OUT)	collecteur	44.749
	Senne sortie Région (OUT)	réseau hydrographique	400.789
	SOMME (IN)		283.906
SOMME (OUT)		476.551	
<u>BALANCE</u>		<u>-192.645</u>	

Tableau 15 : Bilan des débits drainés par le système *réseau hydrographique / grands collecteurs* au droit des trois bassins 'épurationnaires' *Nord, Sud* et *Woluwe* (partie flamande non prise en compte pour ce dernier)

Les valeurs nettes négatives (BALANCE, **Tableau 15**) attestent du caractère drainant du système *réseau hydrographique / grands collecteurs*.

Il y a lieu de préciser que :

- (*) la station *Senne inter bassins* est fictive. Elle constitue le point d'intersection entre la ligne définie par le tracé de la Senne et la frontière séparant les bassins 'épurationnaires' *Sud* et *Nord* (**Figure 13**). La valeur de *débit de base* à cette station (283.905 m³) est extrapolée linéairement des valeurs mesurées au droit des deux stations plus en amont (**Figure 5**) *Senne entrée Région* (196.876 m³/j) et *Senne Paepsem* (257.771 m³/j), en considérant une relation linéaire entre le *débit de base* de la Senne et la distance parcourue vers l'aval depuis la station *Senne entrée Région*. En effet, la station *Senne Paepsem* étant placée au sein du bassin 'épurationnaire' *Sud* (**Figure 13**), elle ne permet pas un calcul juste du *débit de base* de la Senne à la limite des deux bassins ;
- une analyse, dans les règles de l'art, à une échelle plus petite que celle des bassins 'épurationnaires' *Nord, Sud* et *Woluwe* apparaît compromise du fait des obstacles ci-dessous :

¹¹ Partie flamande non prise en compte en ce qui concerne le bassin épurationnaire de la *Woluwe*



- nombre limité de stations de mesure de débit et problèmes de validité et représentativité des données *flowbru*¹² ;
- modélisation du système *réseau hydrographique / grands collecteurs* comme un ensemble unique du fait de l'échelle régionale du modèle *BPSM*.

5.3 Critères de validité

5.3.1 Convergence

La convergence du modèle numérique est un élément essentiel pour assurer sa stabilité et la qualité des simulations qui en découlera. En effet, la modélisation numérique en *régime permanent* est basée sur un principe de convergence vers un résultat final stable. Cette convergence est obtenue par un processus itératif. L'*erreur de convergence* e_i (m-DNG) est quantifiée, à l'échelle de chaque nœud du domaine modélisé, par la différence entre le résultat d'une itération et celui de l'itération précédente :

$$|e_i| = |\psi^{\tau+1} - \psi^\tau|$$

Avec :

ψ : piézométrie (m-DNG) au nœud i ;
 τ : itération.

La convergence du modèle est validée par le respect des deux critères ci-dessous :

- *Maximum error norm*

Ce critère d'erreur est quantifié à chaque nœud de la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée de 1 km et doit respecter la valeur maximale de 1E-03 (0.1%).

$$\text{Maximum error norm} = \frac{|e_i|_{\max}}{\psi_{\max}}$$

- *Euclidian L2 integral RMS¹³ error norm*

Ce critère d'erreur est quantifié plus largement au droit de la zone d'étude et doit respecter la valeur maximale de 1E-04 (0.01%).

$$\text{RMS error norm} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_1^N |e_i|^2}{N}}}{\psi_{\max}}$$

Avec N : Nombre total de nœuds sur le domaine

5.3.2 Erreur maximale acceptable

La calibration peut être jugée valide dès lors que les résultats de *piézométrie* et *débits drainés* par la galerie drainante et le système *réseau hydrographique / grands collecteurs* sont compris dans un *intervalle d'erreur acceptable* au droit de l'ensemble des points et zones d'observation.

Le **Tableau 16** reprend les valeurs d'*erreur maximale acceptable* pour chaque type d'observation.

¹² Réseau de surveillance quantitative des eaux de surface et des eaux usées ainsi que de la pluviométrie en Région de Bruxelles-Capitale (<https://www.flowbru.be/fr>)

¹³ Root Mean Square



Observation	Zone concernée	Erreur maximale acceptable
Piézométrie (§5.2.1)	zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un buffer de 1 km	+/- 2 m
Piézométrie (§5.2.1)	reste de la zone d'étude	+/- 5 m
débit de drainage (§5.2.2)	galerie drainante	+/- 1% (m ³ /jour)
débîts de drainage (§5.2.3)	système <i>réseau hydrographique / grands collecteurs</i>	+/- 20% (m ³ /jour)

Tableau 16 : Erreur maximale acceptable pour chaque type d'observation



6 Résultats

6.1 Piézométrie

6.1.1 Scatter plot

Un *scatter plot* est une visualisation bidimensionnelle des *résultats* et des *observations* (en l'occurrence la piézométrie) qui utilise des points dont l'abscisse représente la *valeur observée* et l'ordonnée la *valeur simulée*. Il en résulte un nuage de point s'alignant le long de la droite $y = x$ caractérisant une calibration idéale.

La **Figure 64** reprend deux *scatters plot* :

- le premier est relatif aux *points d'observation* piézométriques (piézomètres, sources et artefacts) situés au droit de la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un buffer de 1 km (pour rappel *intervalle d'erreur acceptable* de +/-2m, **Tableau 16**) ;
- le second est relatif aux *points d'observation piézométriques* situés sur le reste de la zone d'étude (pour rappel *intervalle d'erreur acceptable* de +/-5m, **Tableau 16**).

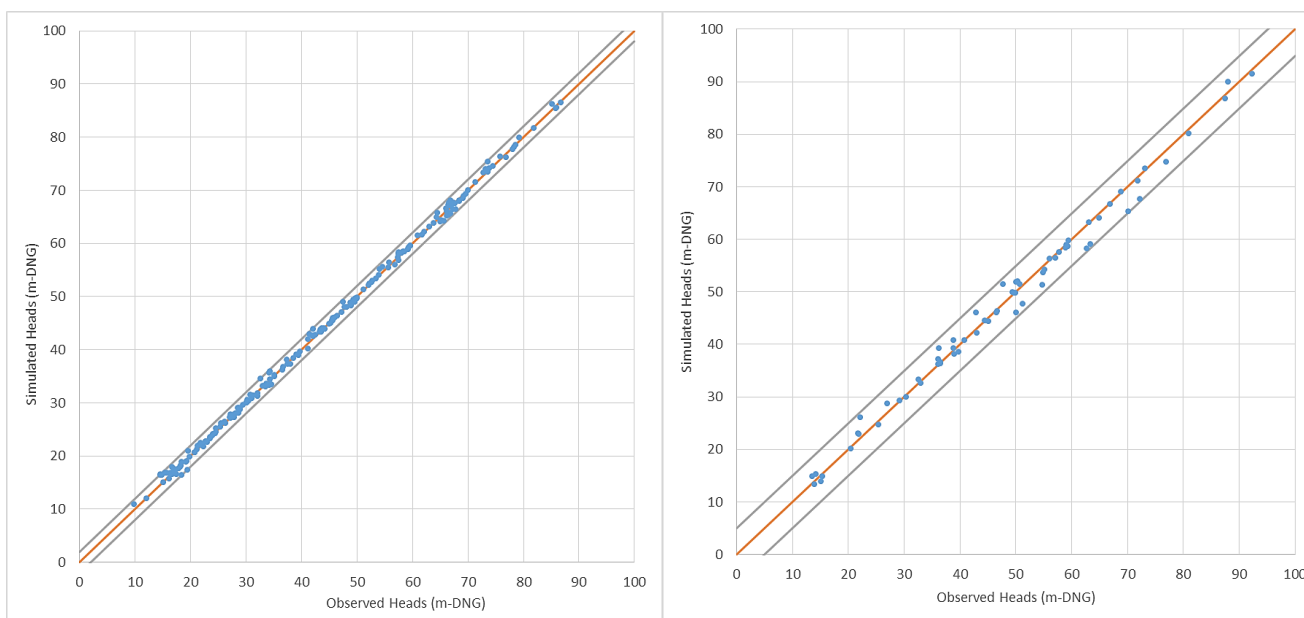


Figure 64 : *Scatter plot* - zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un buffer de 1 km (à gauche) - reste de la zone d'étude (à droite)

La **Figure 65** reprend dans l'ordre (de gauche à droite et de haut en bas), les *scatters plot* générés au droit de la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un buffer de 1 km pour les *unités hydrogéologiques* aquifère ou aquitard ci-dessous :

- UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel ;
- UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux ;
- UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele ;
- UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt ;
- UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen.



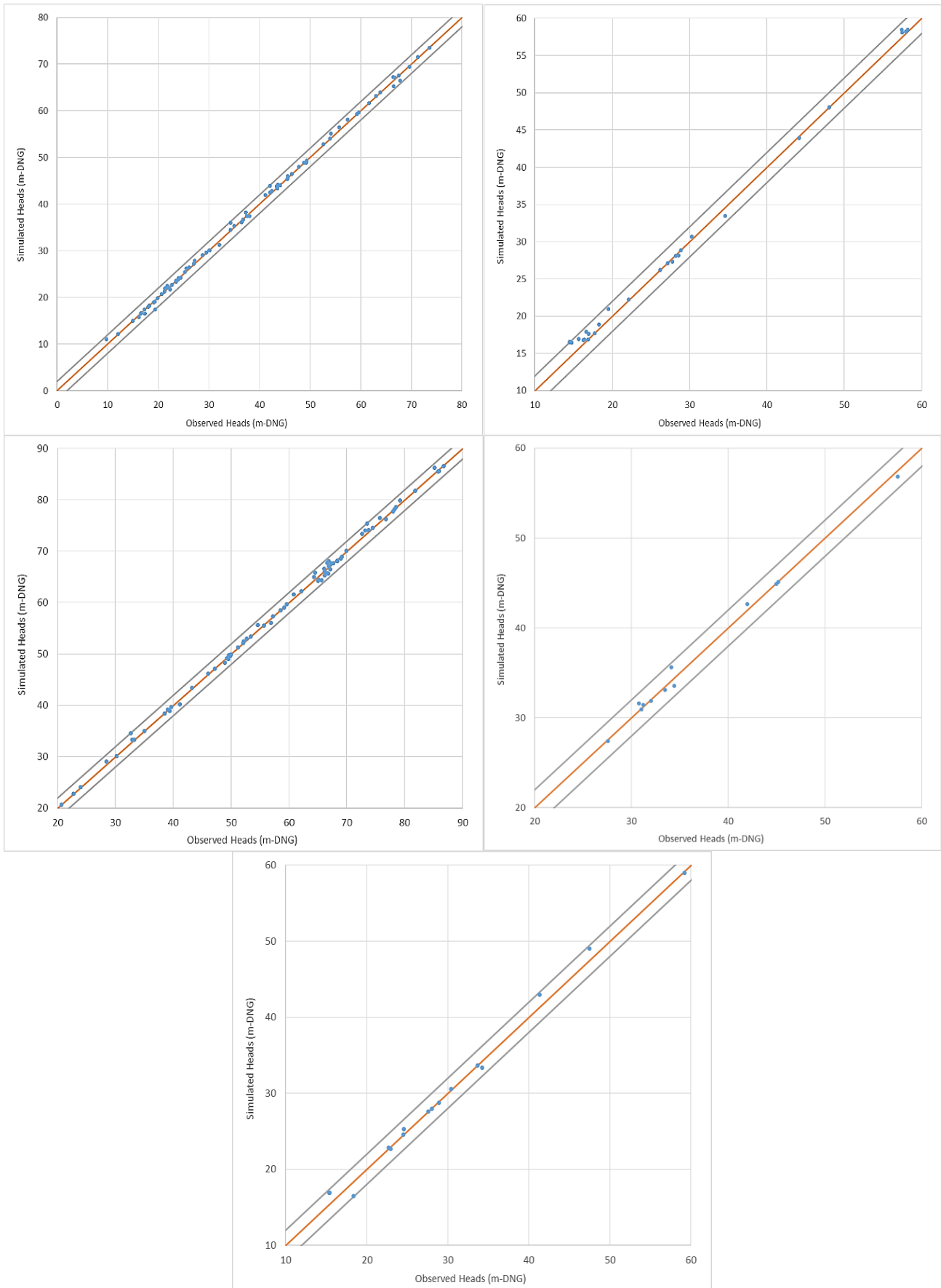


Figure 65 : Scatter plot - unités hydrogéologiques UH/RBC_1a, 1b, 4, 6, 7b (de gauche à droite et de haut en bas) – centré sur la zone d'intérêt (région bruxelloise) + 1km



L'UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché ne disposant d'aucun point d'observation dans la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un buffer de 1 km, son *scatter plot* a été généré au niveau des points d'observations piézométriques situés sur le reste de la zone d'étude (Figure 66).

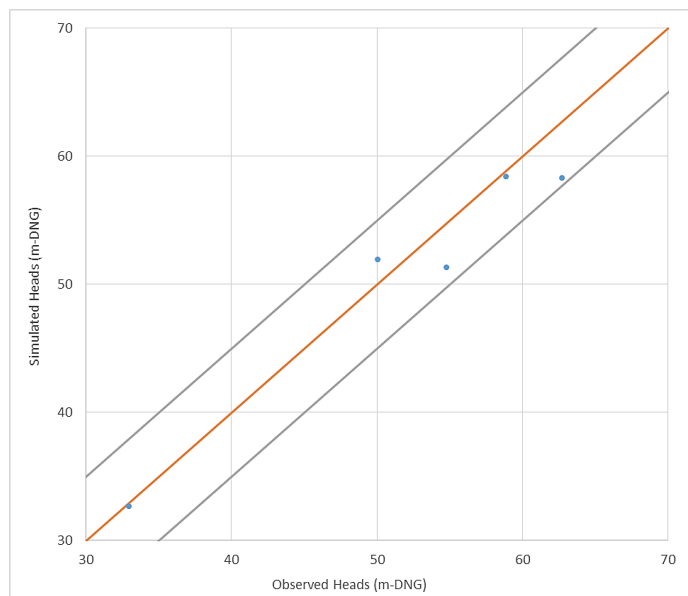


Figure 66 : Scatter plot - UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché – zone d'étude

Sur la base de ces divers *scatters plots*, il apparaît que le critère d'Erreur maximale acceptable (§5.3.2) est respecté pour 277/278 points d'observation. En effet, en dépit des efforts de calibration, un point d'observation piézométrique de l'UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux ne respecte pas le critère de d'Erreur maximale acceptable de +/- 2 mètres (point situé au droit de la zone d'intérêt) avec une valeur de piézométrie simulée de 2,12 mètres au-dessus de la valeur observée. Il a été décidé qu'il n'était pas opportun de plus forcer la calibration. L'objectif de calibration peut donc être considéré comme atteint.

6.1.2 Etat de calibration

Un script *Python* a permis le calcul automatique d'une série d'indicateurs de calibration (erreurs), calculés sur la base des piézométries observées et simulées, à savoir :

- Erreur moyenne arithmétique (absolue)(m) ou « Mean difference (MD) » :

$$MD = \frac{\sum_1^n |e_i|}{n} = \frac{|\psi_1 - obs_1| + |\psi_2 - obs_2| \dots + |\psi_n - obs_n|}{n}$$

- Erreur quadratique moyenne (m) ou « Root Mean Square (RMS) » :

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_1^n (e_i)^2}{n}} = \sqrt{\frac{(\psi_1 - obs_1)^2 + (\psi_2 - obs_2)^2 + \dots + (\psi_n - obs_n)^2}{n}}$$

A noter que la quantification d'un indicateur complémentaire appelé Erreur quadratique moyenne normalisée (%) ou « Scaled Root Mean Square (SRMS) » permet de normaliser le RMS par rapport au range défini par les valeurs piézométriques min/max observées.

- Ecart type (m) ou « Standard deviation (σ) » :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (e_i - \bar{e})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(\psi_1 - obs_1 - \bar{\psi}_l - \bar{obs}_l)^2 + (\psi_2 - obs_2 - \bar{\psi}_l - \bar{obs}_l)^2 + \dots + (\psi_n - obs_n - \bar{\psi}_l - \bar{obs}_l)^2}{n}}$$



Avec :

- e_i : erreur à un point d'observation i ($\psi_i - obs_i$) ;
- ψ_i : piézométrie simulée au droit d'un point d'observation (m-DNG) ;
- obs_i : piézométrie observée au droit d'un point d'observation i (m-DNG) ;
- n : nombre d'observations.

L'ensemble de ces indicateurs de calibration a été calculé (**Tableau 17**) :

- pour l'ensemble du domaine modélisé ;
- pour l'ensemble de la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un buffer de 1 km et pour le reste du domaine modélisé ;
- individuellement
 - o pour chaque *unité hydrogéologique* aquifère ou aquitard recoupant la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un buffer de 1 km ;
 - o pour l'*UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché*, ne disposant pas de points d'observation au droit de la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un buffer de 1 km, au droit du reste du domaine modélisé.

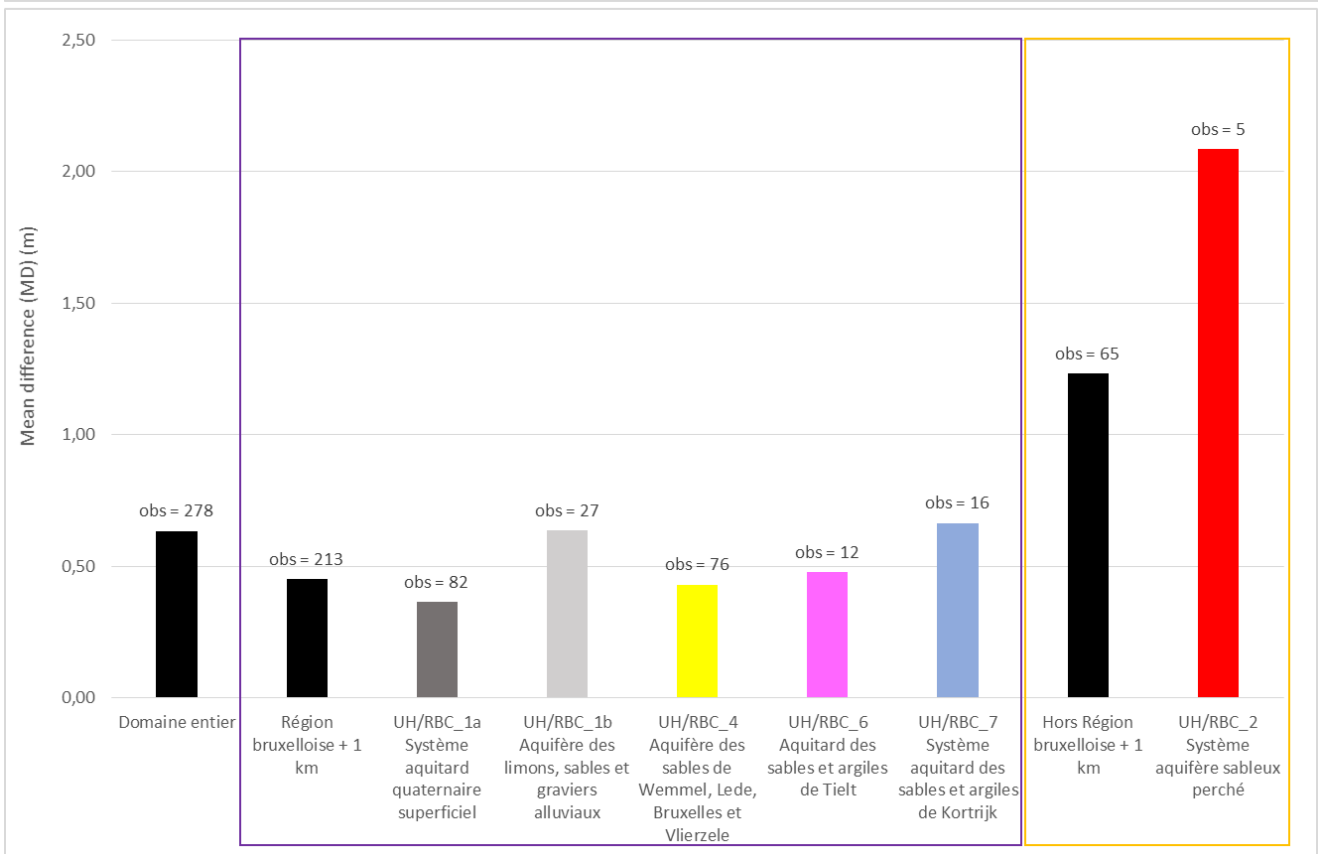
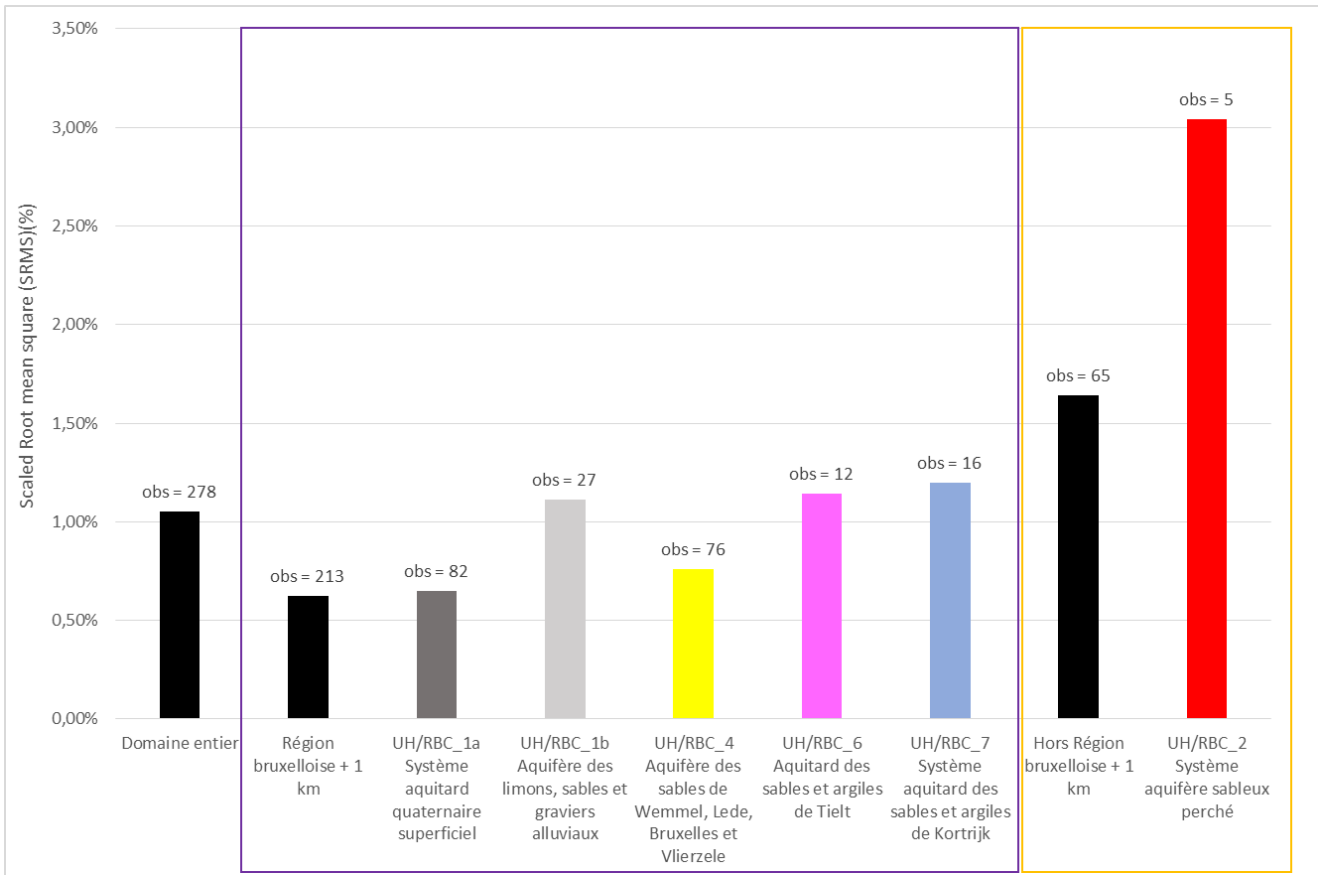
La **Figure 67** reprend une représentation graphique de l'*Erreur moyenne arithmétique (MD)* et de l'*Erreur quadratique moyenne normalisée (SRMS)*.



Unités Hydrogéologiques (UH/RBC)	Zone	Nombre de points	Erreur moyenne arithmétique (MD)	Ecart type (σ)	Erreur quadratique moyenne (RMS)	Erreur quadratique moyenne normalisée (SRMS)
Toutes UH	domaine entier	278	0,64	1,06	1,06	1,05%
Toutes UH	région bruxelloise + 1 km	213	0,45	0,66	0,67	0,63%
Toutes UH	<u>hors</u> région bruxelloise + 1 km	65	1,23	1,82	1,81	1,64%
UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel	région bruxelloise + 1km	82	0,37	0,55	0,56	0,65%
UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux	région bruxelloise + 1km	27	0,64	0,78	0,89	1,11%
UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché	<u>hors</u> région bruxelloise + 1km	5	2,09	2,56	2,65	3,04%
UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele	région bruxelloise + 1km	76	0,43	0,62	0,62	0,76%
UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt	région bruxelloise + 1km	12	0,48	0,67	0,64	1,14%
UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen	région bruxelloise + 1km	16	0,66	0,96	0,95	1,20%

Tableau 17 : Erreur moyenne arithmétique (MD), Ecart type (σ), Erreur quadratique moyenne (RMS), Erreur quadratique moyenne normalisée (SRMS)





6.1.3 Piézométrie simulée

Les **Figure 68** à **Figure 73** illustrent la piézométrie représentative de la période *mai 2013* (m-DNG) simulée *en régime permanent* par *BPSM* pour chaque *unité hydrogéologique* aquifère et aquitard du *système phréatique* bruxellois.

Les couleurs **verte** et **rouge** des « *jauges* » relatives aux points d'observation piézométriques indiquent respectivement un respect ou non-respect de l'*erreur maximale acceptable* relative à la piézométrie (**§5.3.2**).

Attention : Il y a lieu de préciser que ces figures représentent des résultats bruts qu'il y a lieu de post-traiter dans la perspective d'obtenir des cartes piézométriques de référence aptes à être diffusées par Bruxelles Environnement. Les post-traitements concernent entre autres les points ci-dessous :

- Correction de la piézométrie phréatique dépassant le niveau topographique ;
- Correction de la piézométrie relative à une unité aquifère/aquitard passant localement sous le toit d'une unité aquiclude sous-jacente ;
- Choix des cartes à diffuser et traitements numériques en vue de la diffusion (standardisation des données).



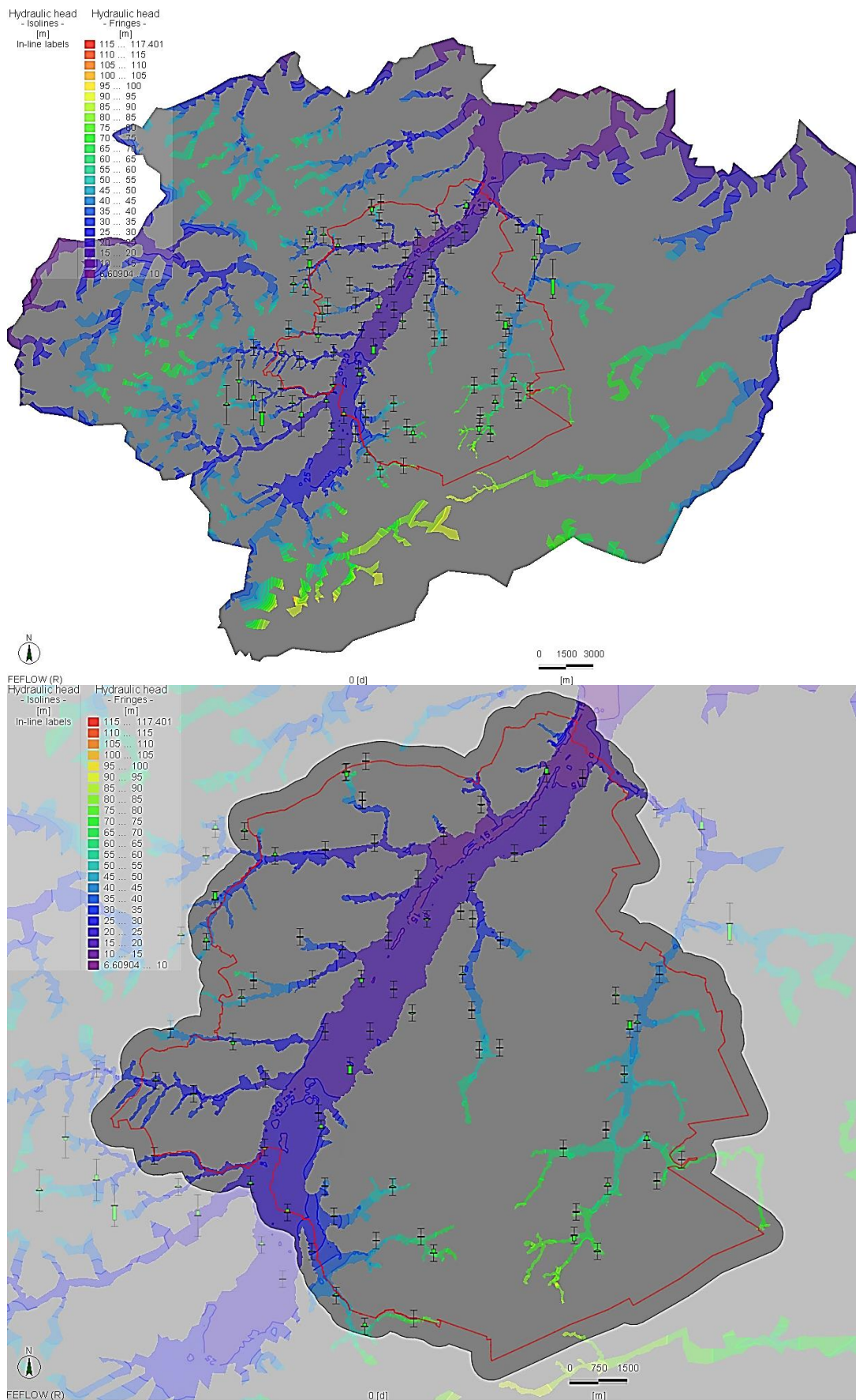


Figure 68 : Piézométrie de l'UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel simulée par BPSM (Layer 1) (m-DNG)



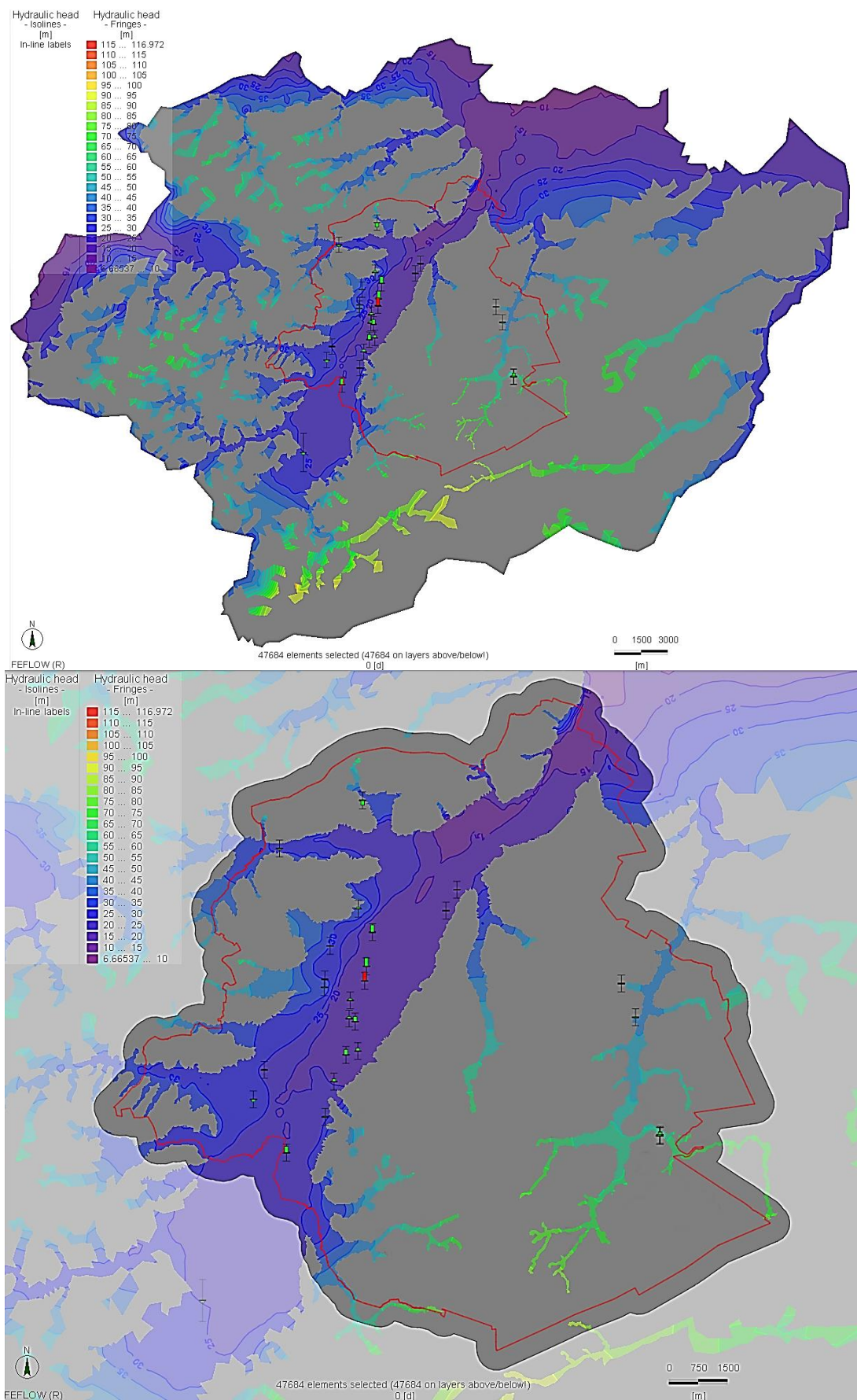


Figure 69 : Piézométrie de l'UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux simulée par BPSM (Layer 2) (m-DNG)



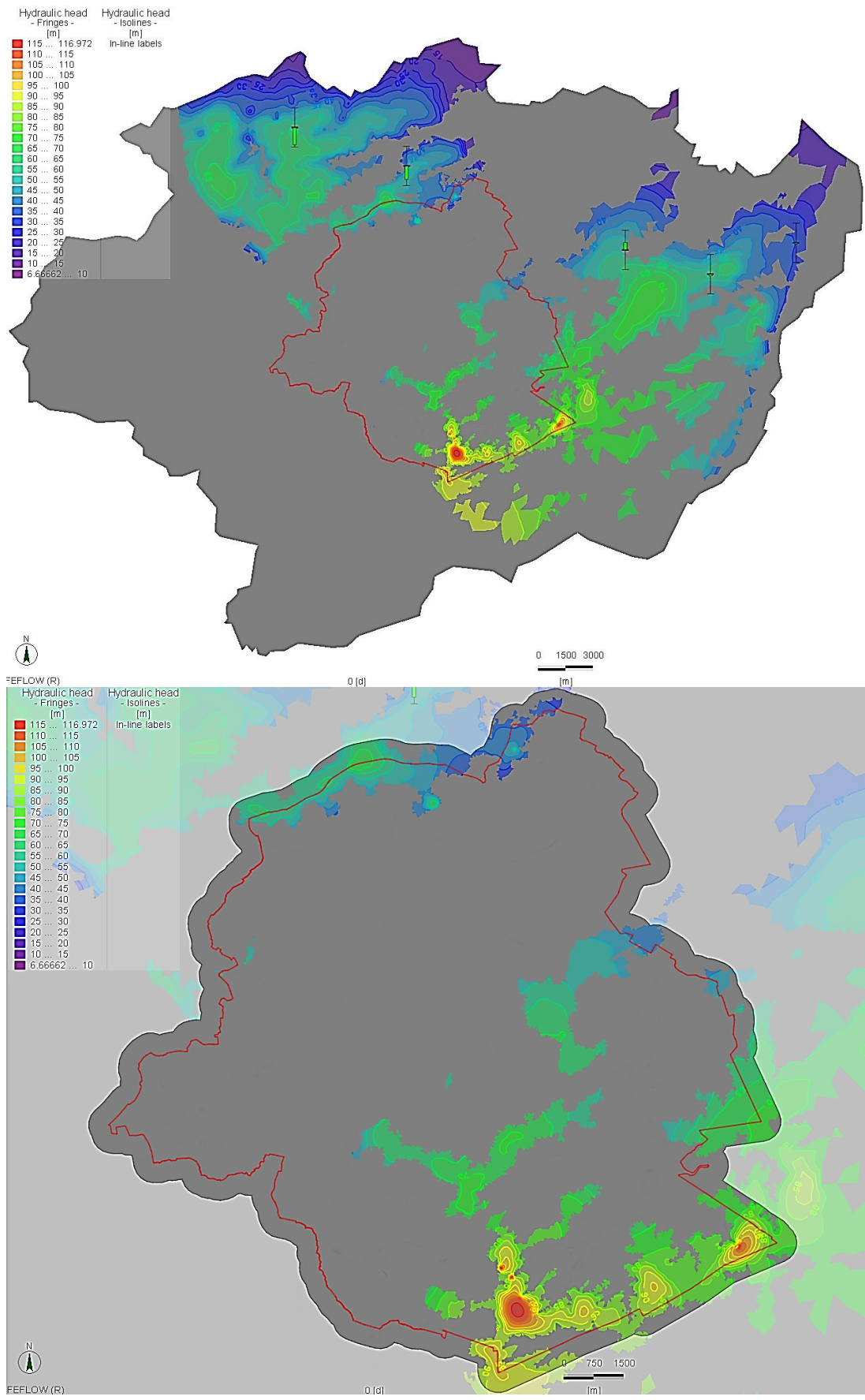


Figure 70 : Piézométrie de l'UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché simulée par BPSM (Layer 3) (m-DNG)



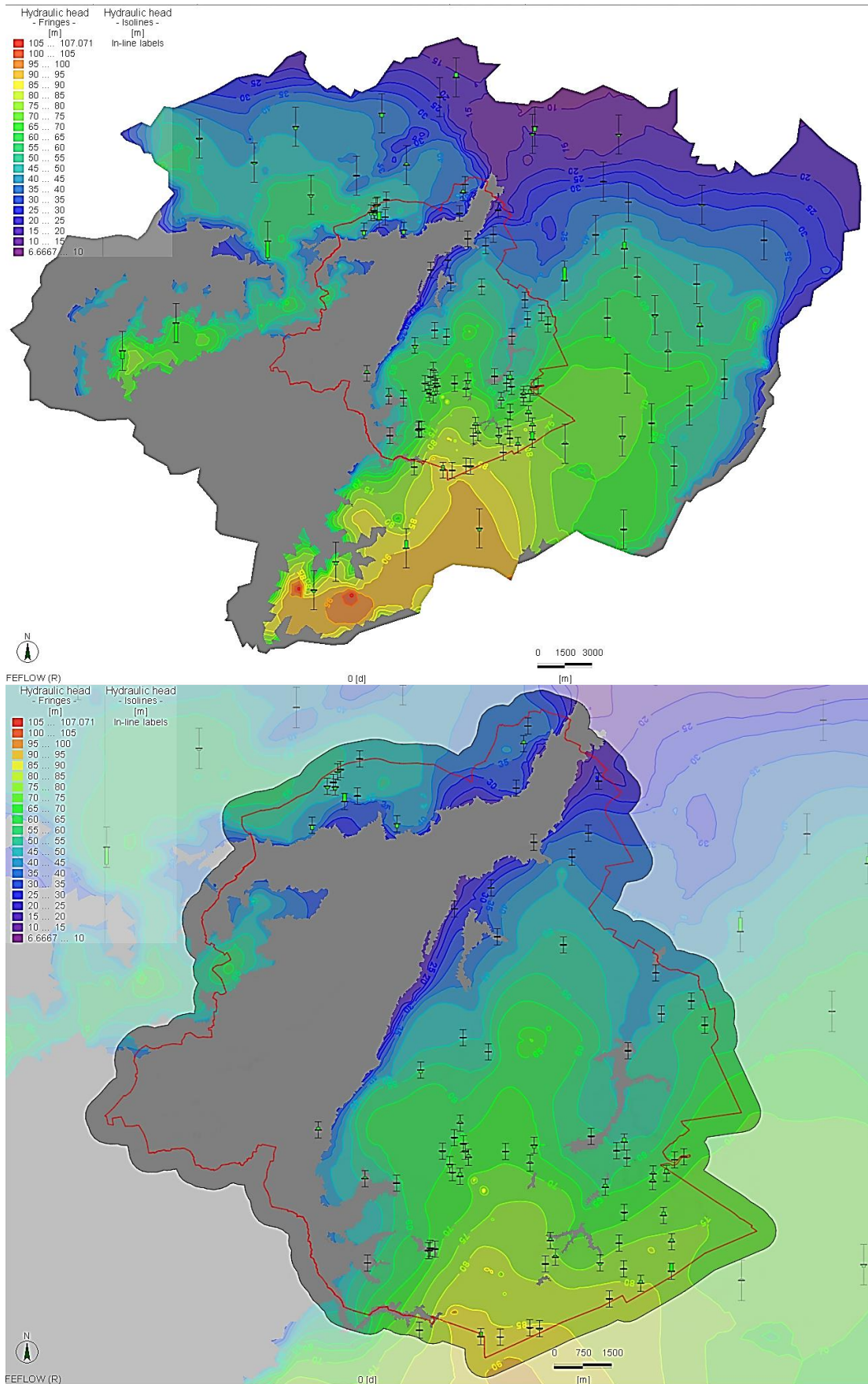


Figure 71 : Piézométrie de l'UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele simulée par BPSM (Layer 5) (m-DNG)



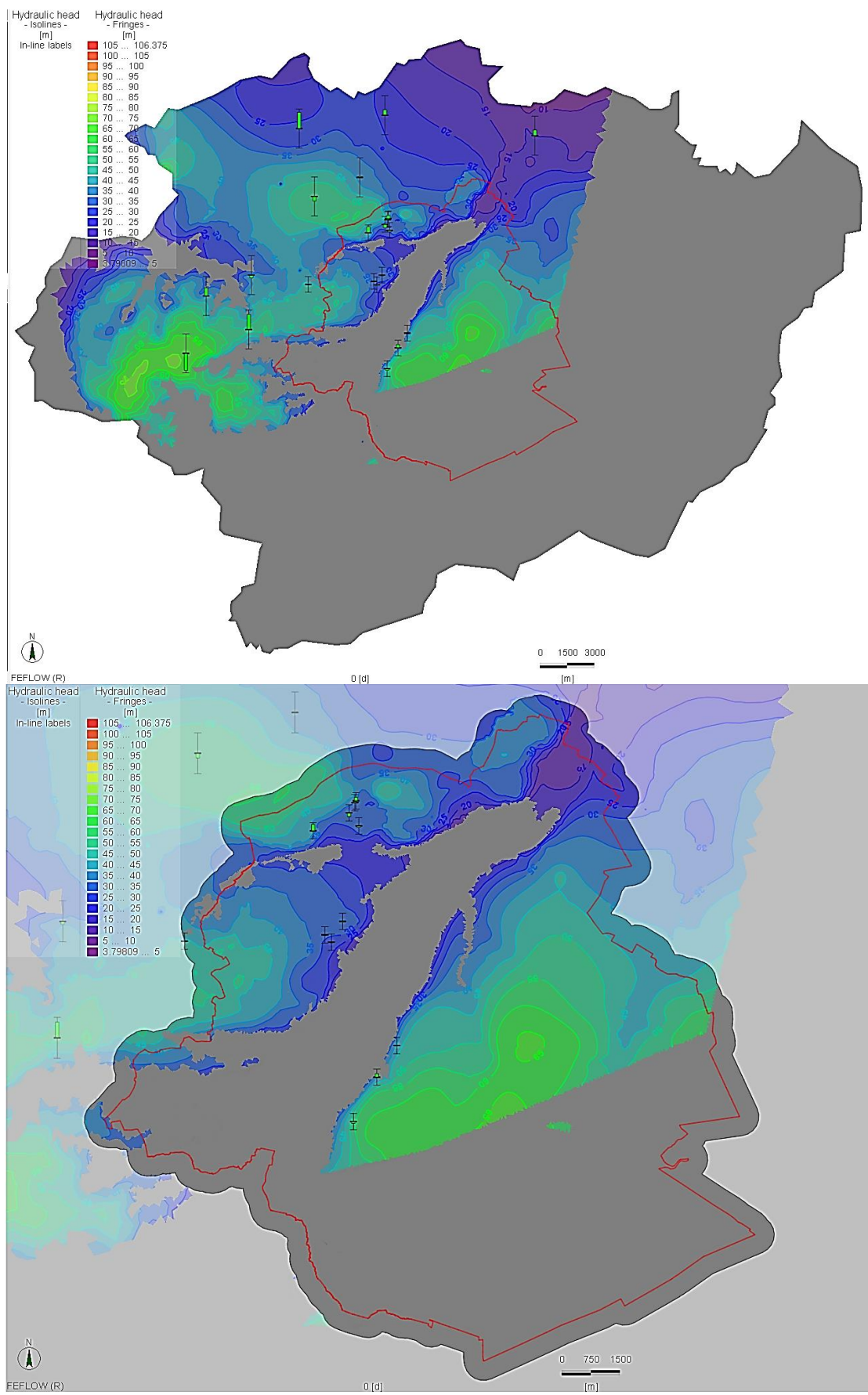


Figure 72 : Piézométrie de l'UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielst simulée par BPSM (Layer 7) (m-DNG)



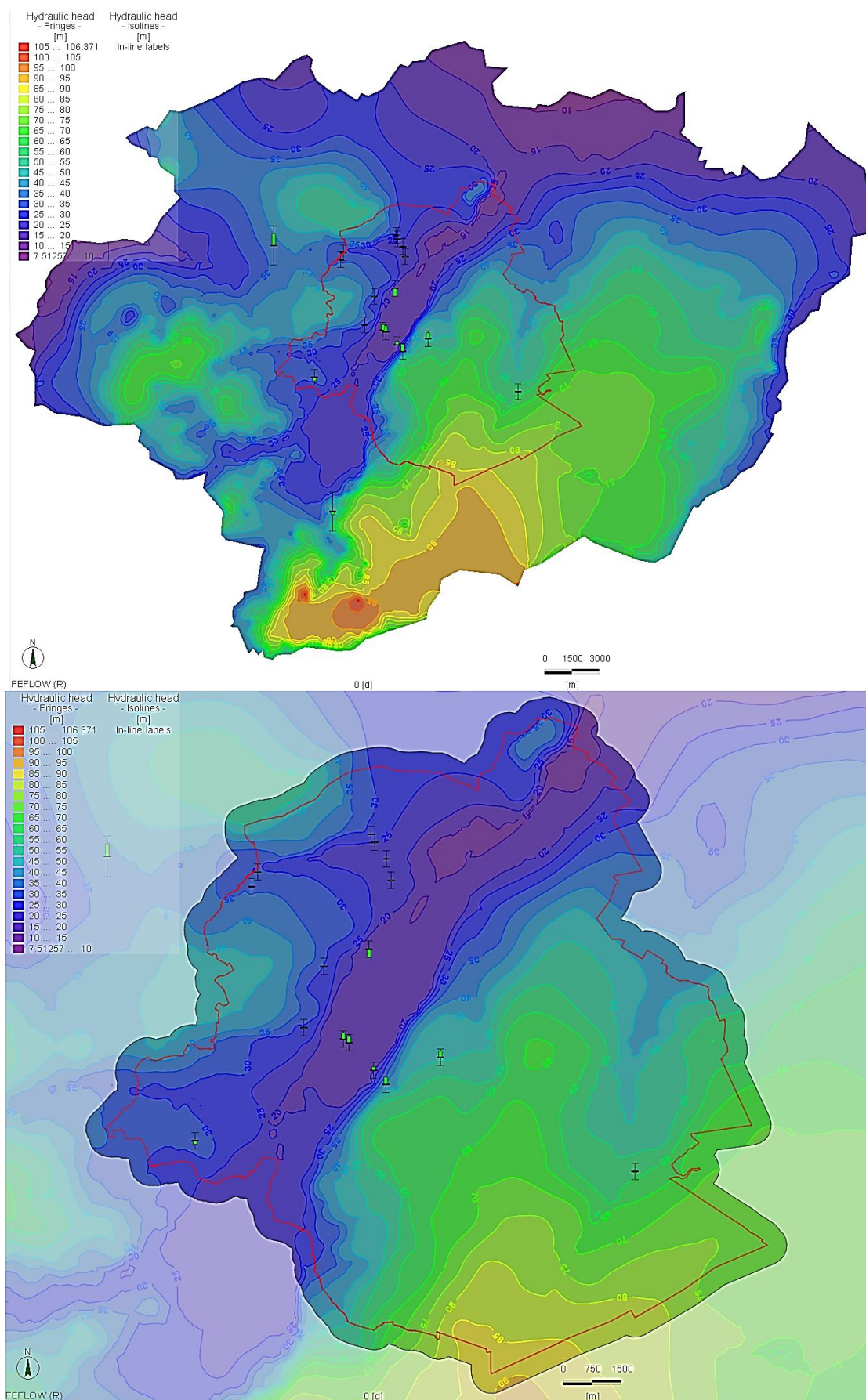


Figure 73 : Piézométrie de l'UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen simulée par BPSM (Layer 9) (m-DNG)



6.2 Débit de la galerie drainante VIVAQUA

A l'issu de la calibration, le débit de la galerie de drainante tel que simulé par *BPSM* est de 5444,0 m³/jour, soit une erreur de 0,14% par rapport à la valeur observée de 5436,2 m³/jour.

L'erreur maximale acceptable telle que définie par les critères de validité (§5.3.2) est ici bien respectée (erreur < +/- 1%).

6.3 Débits de drainage du système réseau hydrographique / grands collecteurs

A l'issu du processus de calibration, le débit total de drainage par le système réseau hydrographique / grands collecteurs a été quantifié par *BPSM* à l'échelle des trois bassins 'épuration' Nord, Sud et Woluwe¹⁴ (Figure 12).

Ces débits simulés sont comparés aux valeurs observées du Tableau 15. Pour rappel, ce dernier reprend un bilan global de l'ensemble des débits de base relatifs au réseau hydrographique (Tableau 2) et aux grands collecteurs (Tableau 3) effectué à l'échelle des trois bassins épuration sur l'année de référence 2013. Les résultats de cette analyse sont synthétisés au Tableau 18.

Bassin 'épuration' (STEP)	Débit de drainage observé (m ³ /jour)	Débit de drainage simulé (m ³ /jour)	erreur (%)
Woluwe ¹³	-42.602	-50.366	18.23%
Senne Sud	-83.977	-92.251	9,85%
Senne Nord	-192.645	-173.819	-9,77%

Tableau 18 : Comparaison des valeurs observées et simulées de débit drainé par le système réseau hydrographique / grands collecteurs à l'échelle des trois bassins 'épuration' Nord, Sud et Woluwe

L'erreur maximale acceptable telle que définie par les critères de validité (§5.3.2) est ici bien respectée (erreur < +/- 20%).

6.4 Conductivités hydrauliques

Le Tableau 19 reprend les résultats issus de l'analyse statistique menée à l'issu du processus de calibration au sein de la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un kilomètre sur les conductivités hydrauliques horizontales (K_h) pour chaque zone définie au Tableau 12.

¹⁴Partie flamande non prise en compte en ce qui concerne le bassin épuration de la Woluwe



Zone	Description/Nom simplifié	Unité Hydrogéologique (UH/RBC)	Layer	Nombre d'éléments	Volume total (m ³)	LOG (K _n)						
						Moyenne arithmétique pondérée (m/s)	Ecart type (m/s)	min (m/s)	P25 (m/s)	Médiane (m/s)	P75 (m/s)	max (m/s)
A	IV-alluvial aquitard (phreatic)	UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel	1	24.468	308.087.571	-4,51	0,35	-7,90	-4,63	-4,33	-4,29	-3,22
B	IV-silt cover			68.512	453.784.931	-3,88	0,42	-6,30	-4,24	-4,00	-3,54	-2,84
C	IV-alluvial aquifer (semi-confined)	UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux	2	34.139	149.392.213	-3,07	0,97	-6,78	-3,62	-2,90	-2,22	-1,63
D	III-Shh. & On. perched aquifer	UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché	3	15.921	122.797.500	4,93	0,32	-6,11	-4,86	-4,81	-4,78	-4,02
E	III-Diest perched aquifer			157	4.454.910	-4,46	0,16	-5,32	-4,50	-4,44	-4,39	-4,24
F	III-U&A aquiclude	UH/RBC_3 Aquiclude des argiles de Uysel et Asse	4	11.850	10.1625.393	-11,00	0,03	-11,16	-10,99	-10,99	-10,98	-10,88
G	III-Bruxellian aquifer-West	UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Ledde, Bruxelles et Vlierzele	5	9.782	321.123.917	4,48	0,65	-5,18	-5,10	-4,57	-4,15	-2,94
H	III-Bruxellian aquifer-East			56.253	3.571.391.767	-3,70	0,75	-5,03	-4,38	-3,79	-3,18	-2,25
I	III-Merebeke aquiclude	UH/RBC_5 Aquiclude des argiles de Gent	6	10.490	73.223.578	-8,37	0,58	-9,97	-8,70	-8,44	-8,17	-6,50
J	III-Tielt aquitard	UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt	7	42.586	856.383.821	-5,84	0,43	-6,58	-6,10	-5,63	-5,48	-4,40
K	III-Aalbeke aquiclude	UH/RBC_7a Aquiclude des argiles de Aalbeke	8	24.480	145.899.151	-8,00	0,01	-8,05	-8,01	-8,00	-8,00	-7,95
L	III-Moen aquitard	UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen	9	102.287	4.416.845.698	-5,36	0,62	-6,70	-5,76	-5,25	-4,88	-4,30

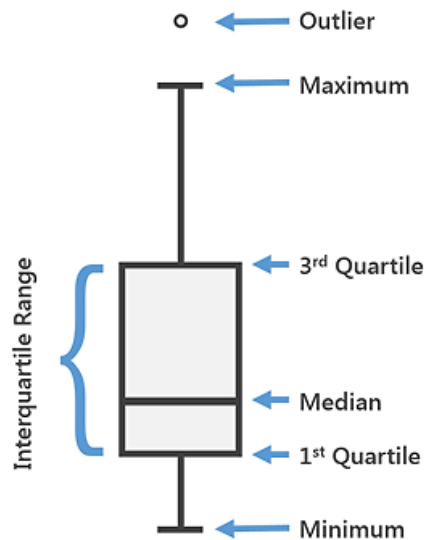
Zone	Description/Nom simplifié	Unité Hydrogéologique (UH/RBC)	Layer	Nombre d'éléments	Volume total (m ³)	K _n						
						Moyenne arithmétique pondérée (m/s)	-	min (m/s)	P25 (m/s)	Médiane (m/s)	P75 (m/s)	max (m/s)
A	IV-alluvial aquitard (phreatic)	UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel	1	24.468	308.087.571	3,13E-05	-	1,27E-08	2,32E-05	4,73E-05	5,10E-05	6,01E-04
B	IV-silt cover			68.512	453.784.931	1,32E-04	-	5,00E-07	5,72E-05	1,00E-04	2,89E-04	1,45E-03
C	IV-alluvial aquifer (semi-confined)	UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux	2	34.139	149.392.213	8,47E-04	-	1,64E-07	2,37E-04	1,27E-03	6,07E-03	2,33E-02
D	III-Shh. & On. perched aquifer			15.921	122.797.500	8,50E-04	-	7,84E-07	1,38E-05	1,56E-05	1,65E-05	9,58E-05
E	III-Diest perched aquifer			157	4.454.910	3,47E-05	-	4,82E-06	3,13E-05	3,60E-05	4,12E-05	5,79E-05
F	III-U&A aquiclude	UH/RBC_3 Aquiclude des argiles de Uysel et Asse	4	11.850	10.1625.393	1,01E-11	-	6,92E-12	1,02E-11	1,03E-11	1,05E-11	1,31E-11
G	III-Bruxellian aquifer-West	UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Ledde, Bruxelles et Vlierzele	5	9.782	321.123.917	3,02E+04	-	6,59E-06	7,93E-06	2,67E-05	7,14E-05	1,16E-03
H	III-Bruxellian aquifer-East			56.253	3.571.391.767	1,98E-04	-	9,26E-06	4,14E-05	1,64E-04	6,61E-04	5,64E-03
I	III-Merebeke aquiclude	UH/RBC_5 Aquiclude des argiles de Gent	6	10.490	73.223.578	4,22E-09	-	1,07E-10	2,01E-09	3,62E-09	6,84E-09	3,15E-07
J	III-Tielt aquitard	UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt	7	42.586	856.383.821	1,43E-06	-	2,61E-07	7,92E-07	2,36E-06	3,29E-06	4,02E-05
K	III-Aalbeke aquiclude	UH/RBC_7a Aquiclude des argiles de Aalbeke	8	24.480	145.899.151	9,97E-09	-	8,84E-09	9,84E-09	9,98E-09	1,01E-08	1,13E-08
L	III-Moen aquitard	UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen	9	102.287	4.416.845.698	4,38E-06	-	2,00E-07	1,75E-06	5,68E-06	1,32E-05	5,00E-05

Tableau 19 : Analyse statistique, $\log(K_n)$ à gauche et transformation des $\log(K_n)$ en K_n , à droite



Les **Figure 74** et **Figure 75** reprennent ces valeurs sous la forme de *boxspots* schématisant, pour chaque zone (**Tableau 12**), les valeurs statistiques ci-dessous :

- Médiane (percentile 50) ;
- 1^{er} et 3^{eme} quartiles (percentiles 25 et 75) ;
- Valeurs minimale et maximale réalistes (percentiles 5 et 95) ;
- Outliers (que l'on définit comme inférieurs au percentile 5 ou supérieurs au percentile 95).



Ce type de visualisation est particulièrement utile pour la comparaison de plusieurs distributions statistiques.



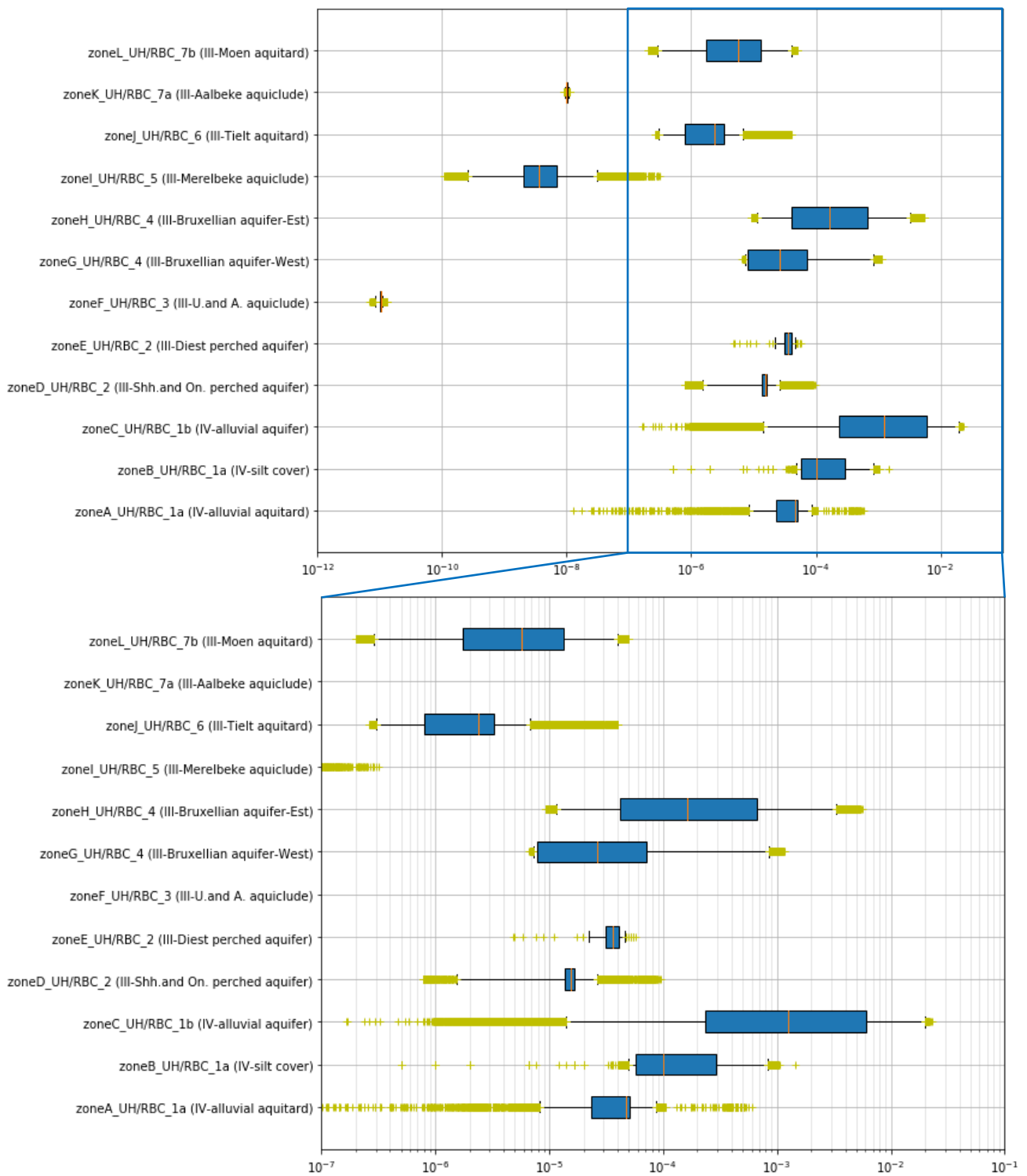


Figure 74 : K_v – analyse statistique – boxspot (1^{ère} partie)



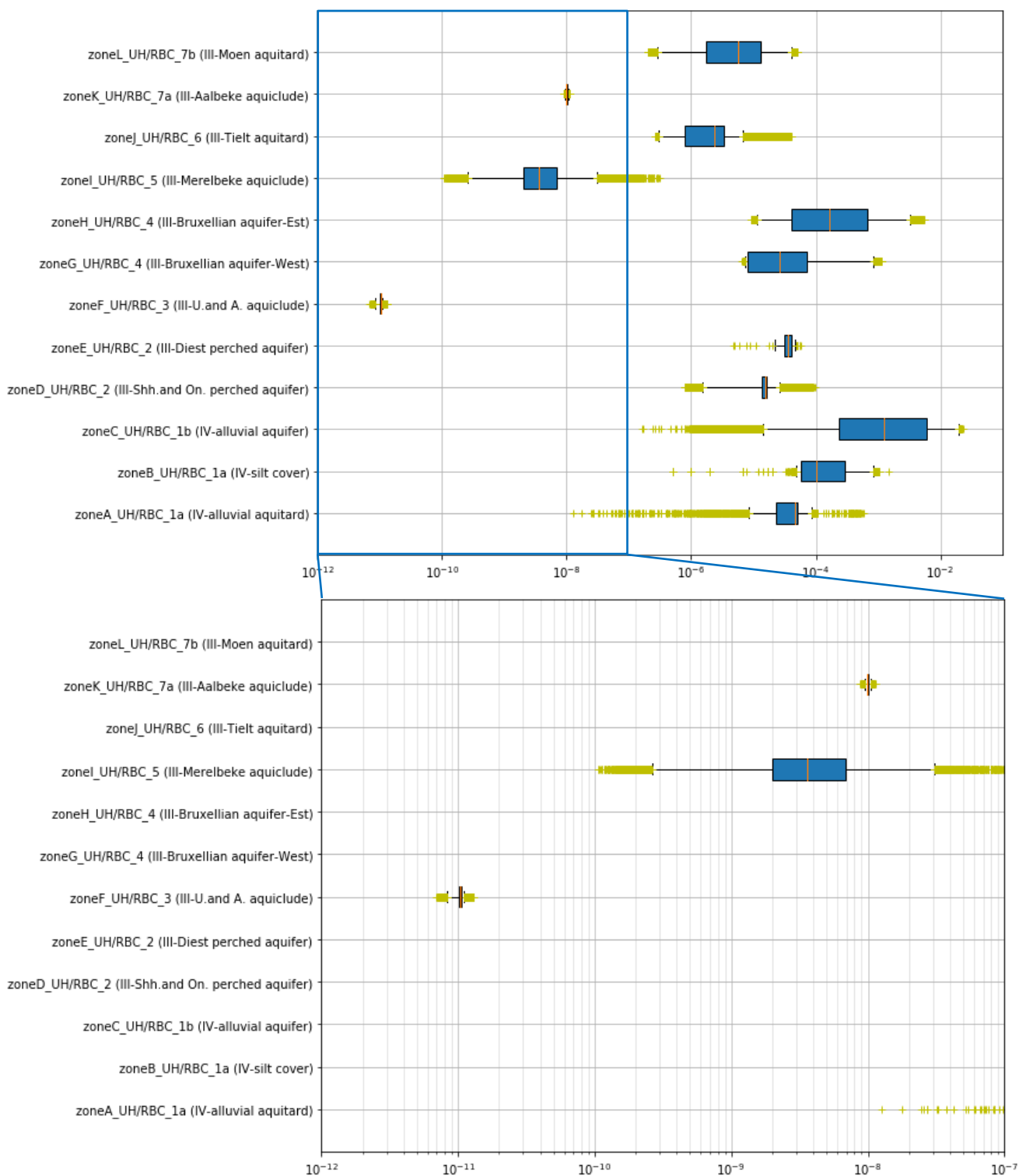
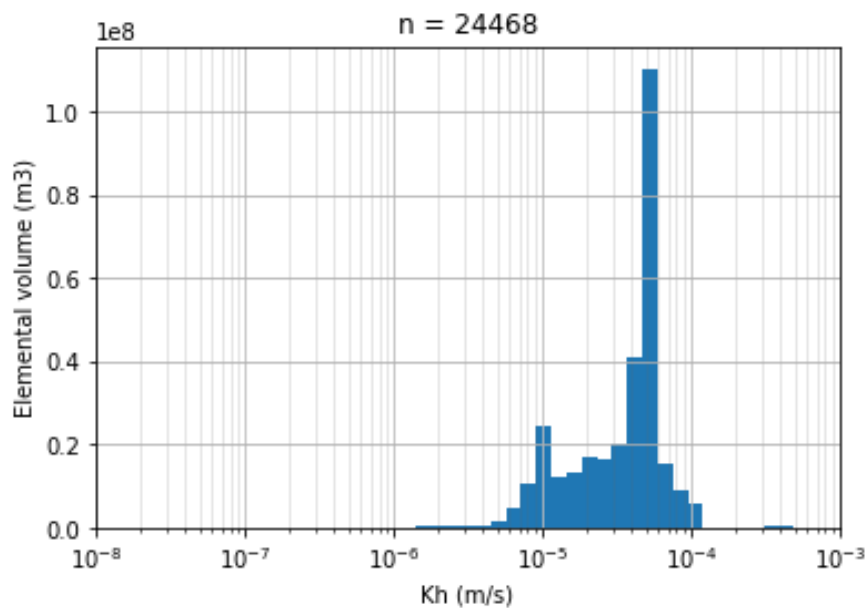
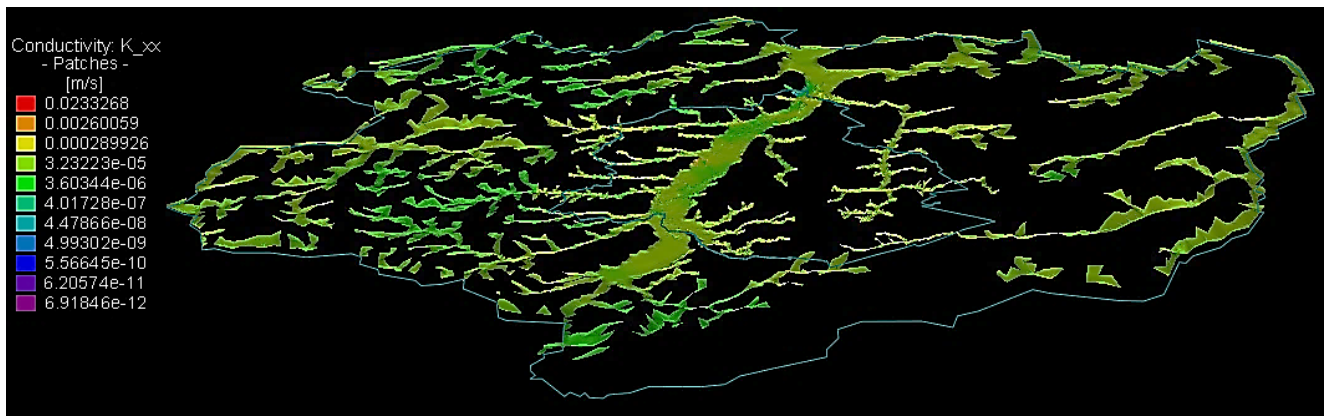


Figure 75 : K_h – analyse statistique – boxspot (2^{ème} partie)

Les **Figure 76** à **Figure 85** reprennent pour chaque *unité hydrogéologique* :

- les valeurs de K_h spatialisées au droit de la zone d'étude ;
- un ou des *histogrammes* permettant une visualisation des distributions statistiques des K_h au sein de la partie de l'unité recoupant la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un kilomètre.

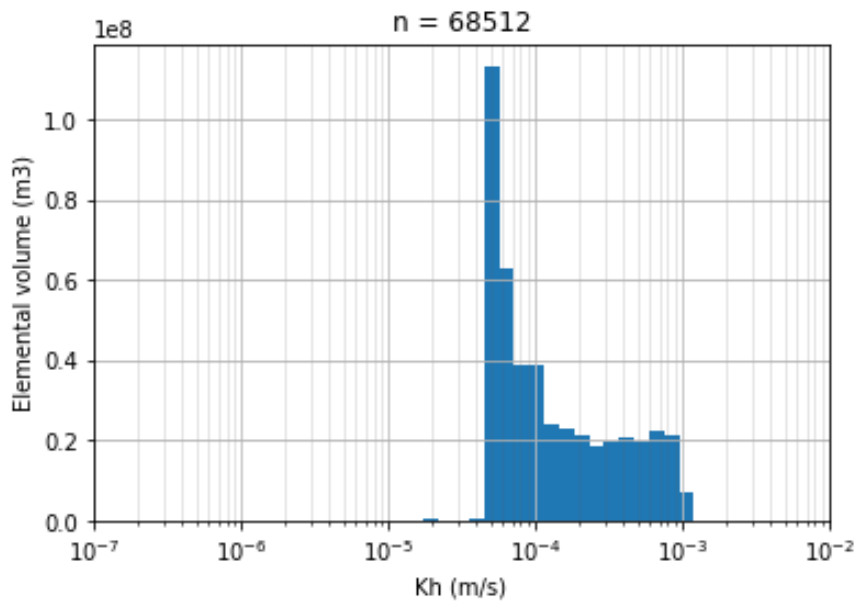
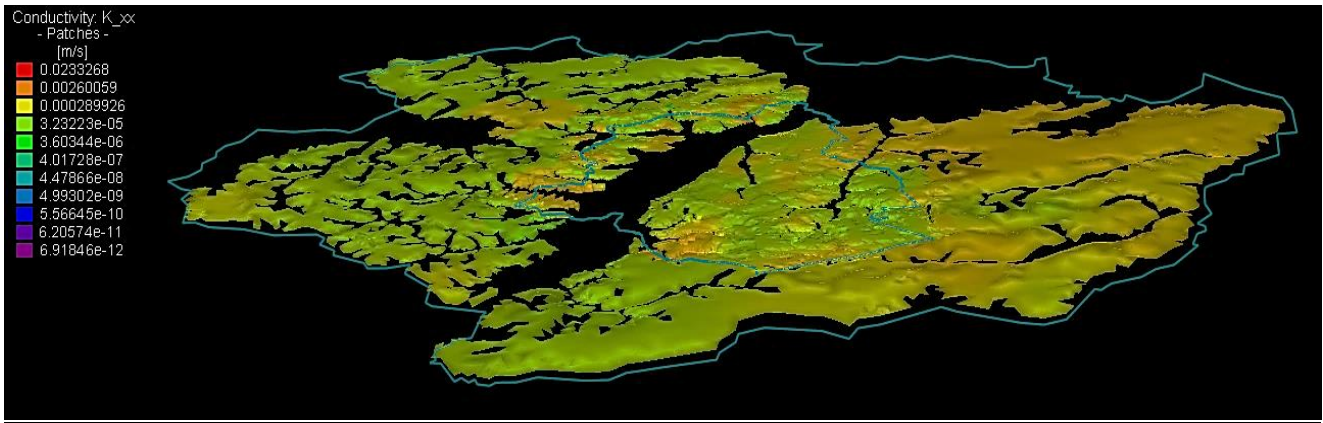




Zone	A
Description	IV-alluvial aquitard (phreatic)
Layer	1
Unité Hydrogéologique (UH/RBC)	UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel
Unité Stratigraphique (US/RBC)	US/RBC_13 Argiles alluviales

Figure 76 : K_h - analyse statistique – zone A_UHRBC_1a (IV-alluvial aquitard)

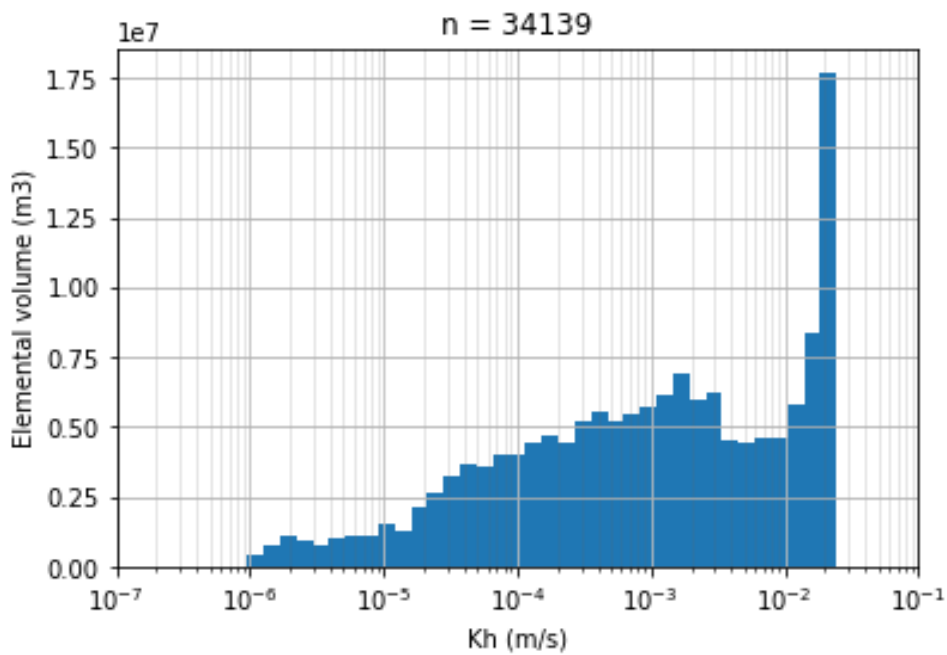
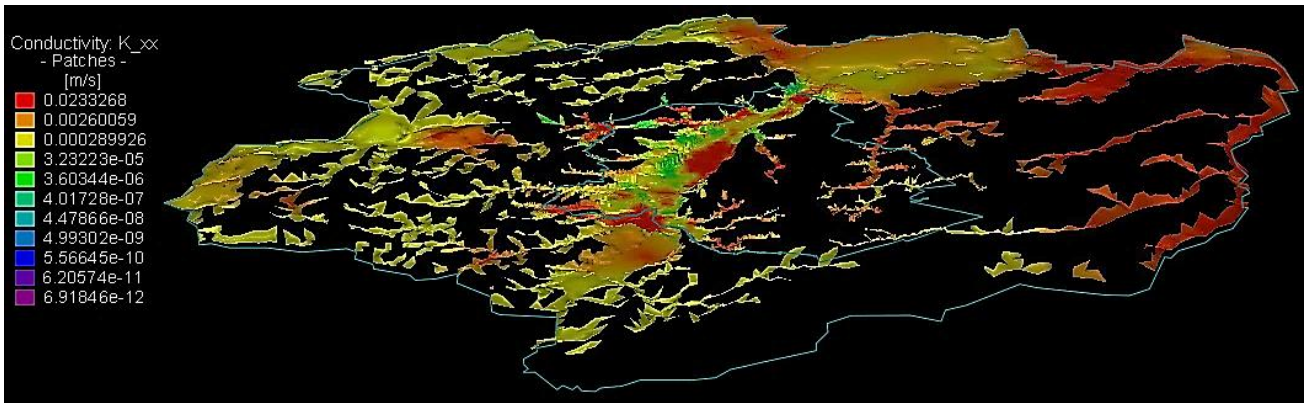
! Remarque : il apparaît que la *conductivité hydraulique* relative aux *Argiles alluviales* est beaucoup plus élevée qu'espérée (**Tableau 12**). La prochaine version de *BPSM* devra se pencher sur cette problématique liée potentiellement à des phénomènes de drainage non correctement appréhendés dans le cadre du modèle conceptuel et/ou des défauts numériques (discrétisation verticale non optimale par exemple).



Zone	B
Description	IV-silt cover
Layer	1
Unité Hydrogéologique (UH/RBC)	UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel
Unité Stratigraphique (US/RBC)	US/RBC_12 Couverture limoneuse

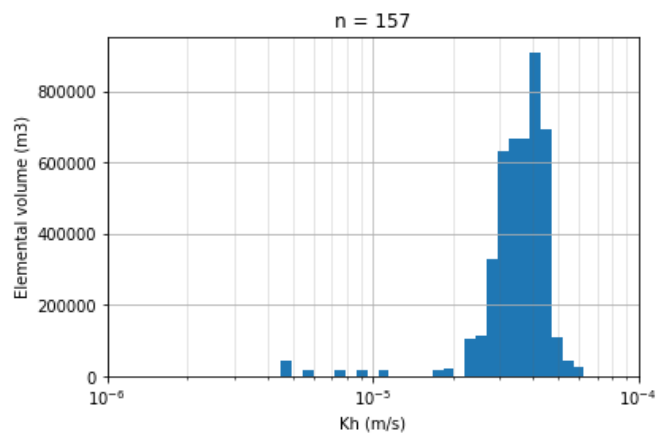
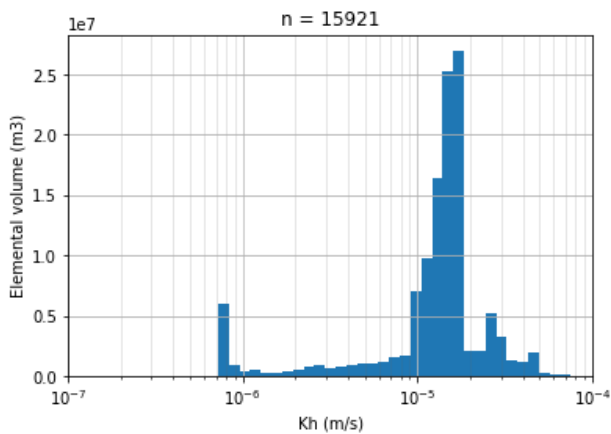
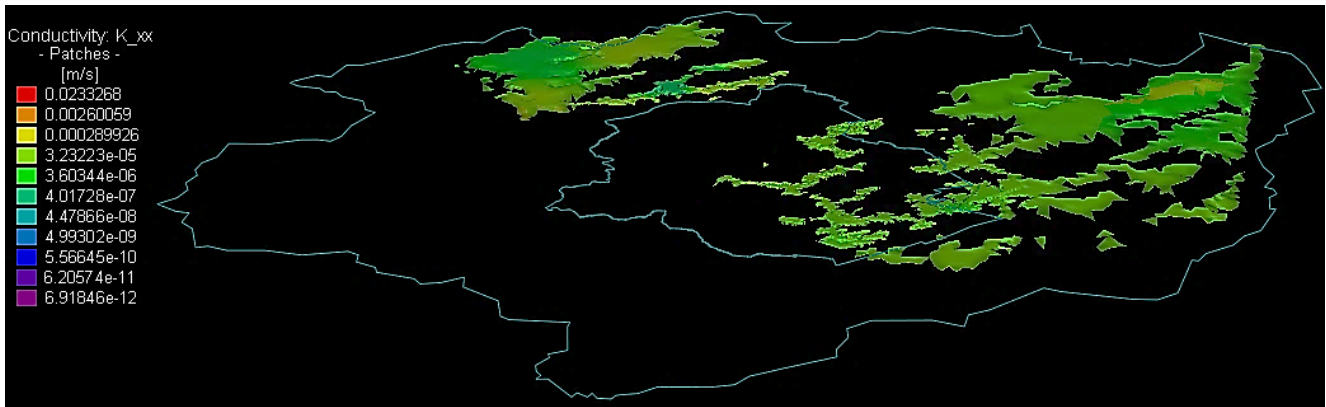
Figure 77 : K_h - analyse statistique – zone B_UHRBC_1a (IV-silt cover)

! Remarque : il apparaît que la *conductivité hydraulique* relative à l'*US/RBC_12 Couverture limoneuse* est plus élevée qu'espérée (**Tableau 12**). Cette dérive pourrait potentiellement être liée à des défauts numériques émanant du faible degré de saturation de cette couche (généralement non saturée). Un paramétrage plus optimal du modèle numérique incluant une meilleure discrétisation verticale pourrait s'avérer une piste à explorer dans une prochaine version de *BPSM*.



Zone	C
Description	IV-alluvial aquifer (semi-confined)
Layer	2
Unité Hydrogéologique (UH/RBC)	UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux
Unité Stratigraphique (US/RBC)	US/RBC_14 Limons, sables et graviers alluviaux

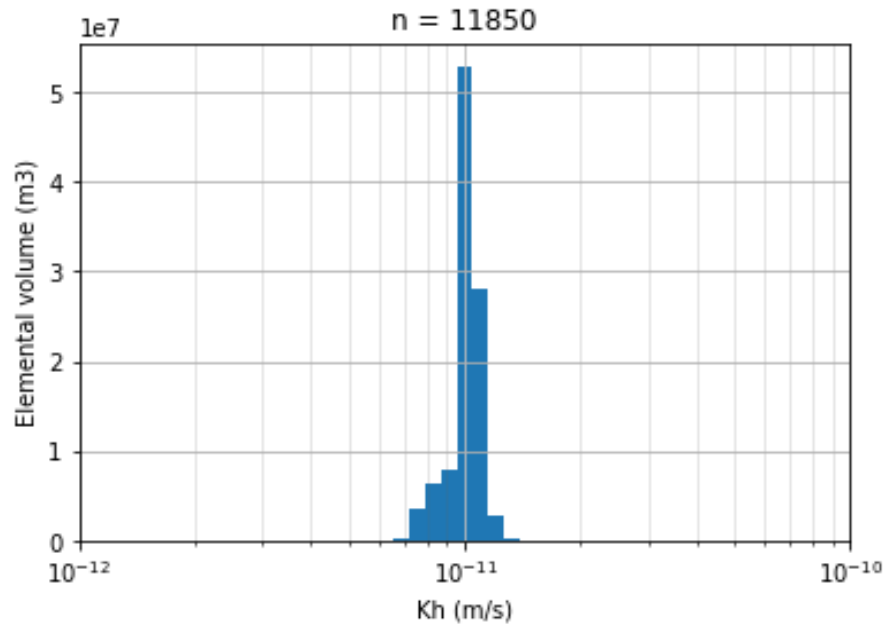
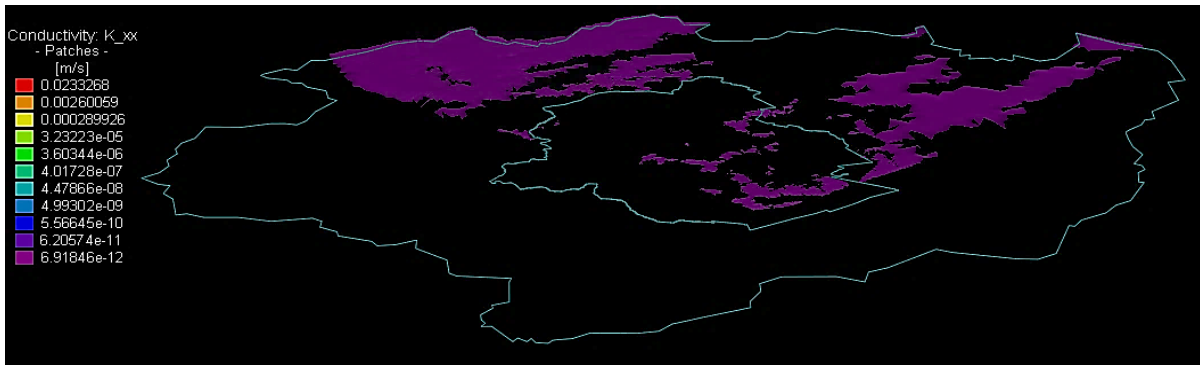
Figure 78 : K_h - analyse statistique – zone C_UHRBC_1b (IV-alluvial aquifer)



Zone	D (graphe de gauche)	E (graphe de droite)
Description	III-Shh. & On. perched aquifer	III-Diest perched aquifer
Layer	3	
Unité Hydrogéologique (UH/RBC)	UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché	
Unité Stratigraphique (US/RBC)	US/RBC_23 Sables et argiles de Sint-Huilbrechts-Hern US/RBC_25 Sables de Maldegem (membre de Onderdale)	US/RBC_21 Sables de Diest

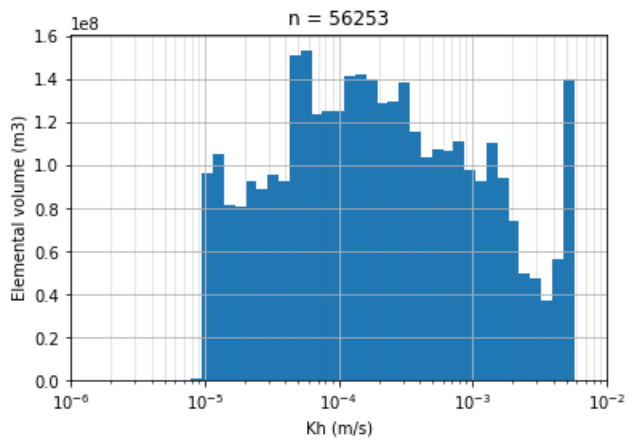
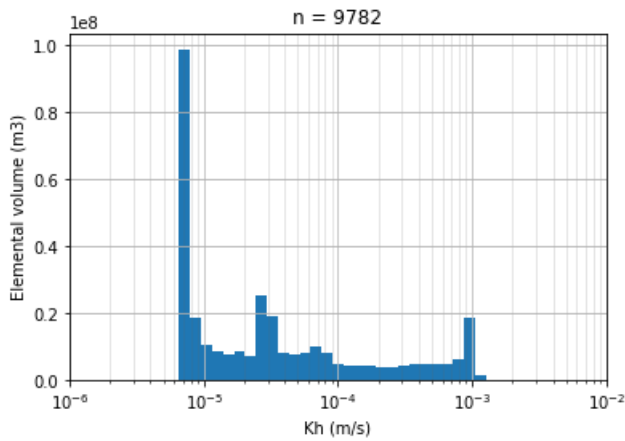
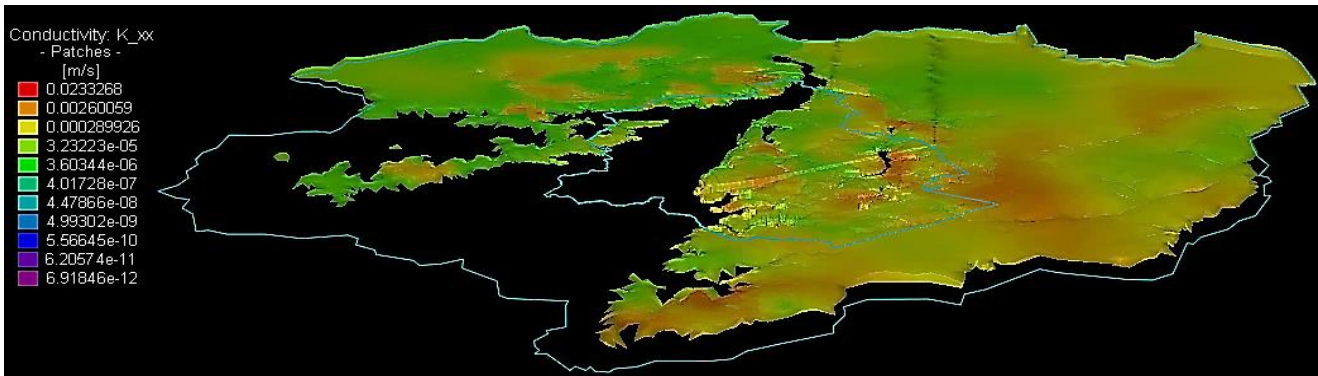
Figure 79 : K_x - analyse statistique – zone D_UHRBC_2 (III-Shh.and On. perched aquifer) & zone E_UHRBC_2 (III-Diest perched aquifer)





Zone	F
Description	III-U&A aquiclude
Layer	4
Unité Hydrogéologique (UH/RBC)	UH/RBC_3 Aquiclude des argiles de Ursel et Asse
Unité Stratigraphique (US/RBC)	US/RBC_31 Argiles de Maldegem (membre de Ursel et Asse)

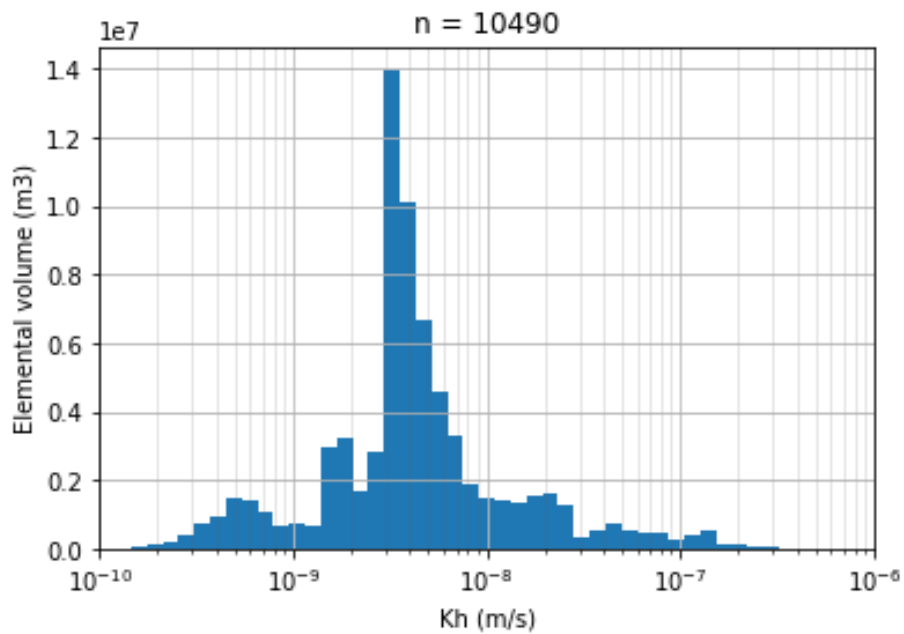
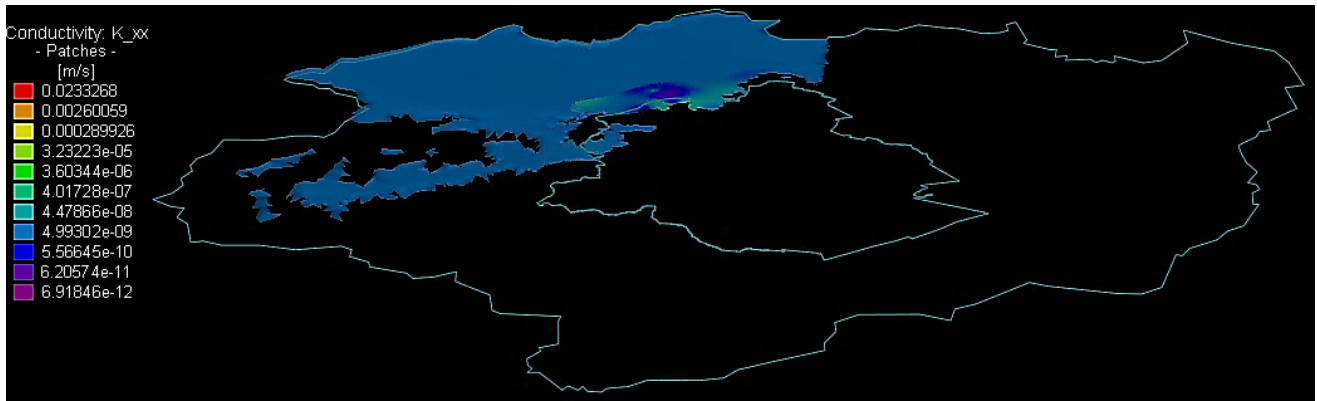
Figure 80 : K_x - analyse statistique – zone F_UHRBC_3 (III-U.and A. aquiclude)



Zone	G	H
Description	III-Bruxellian aquifer-West Bruxellien, rive gauche de la Senne (graphe de gauche)	III-Bruxellian aquifer-East Bruxellien, rive droite de la Senne (graphe de droite)
Layer	5	
Unité Hydrogéologique (UH/RBC)	UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele	
Unité Stratigraphique (US/RBC)	US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel) US/RBC_42 Sables de Lede US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vlierzele)	US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel) US/RBC_42 Sables de Lede US/RBC_43 Sables de Bruxelles

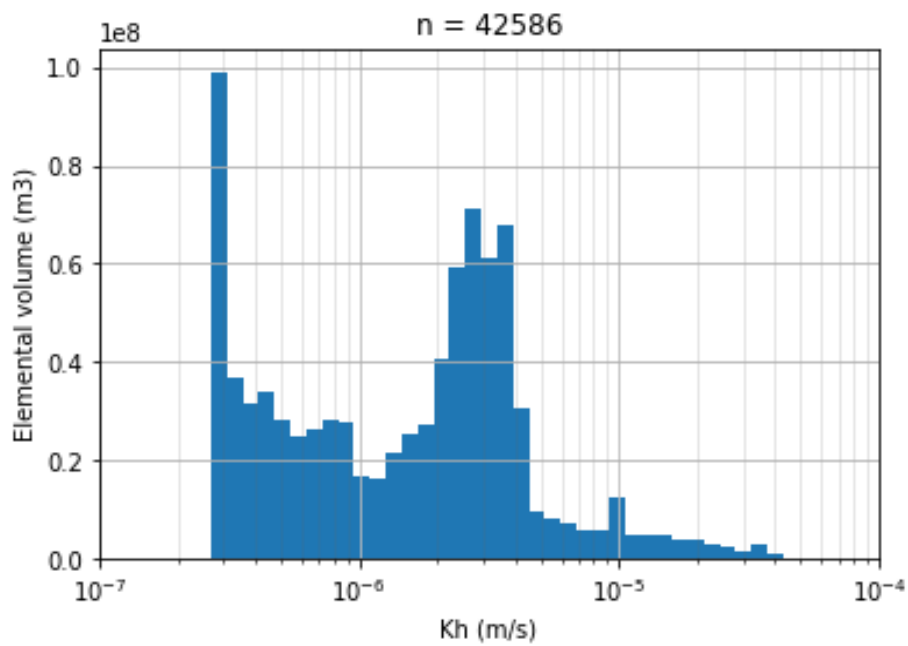
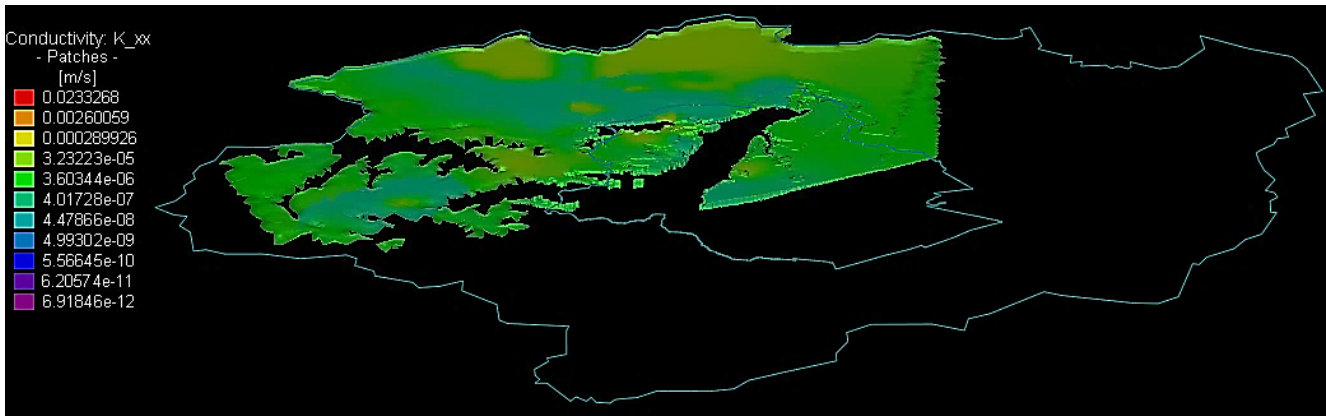
Figure 81 : K_h - analyse statistique – zone G_UHRBC_4 (III-Bruxellian aquifer-West) & zone H_UHRBC_4 (III-Bruxellian aquifer-East).





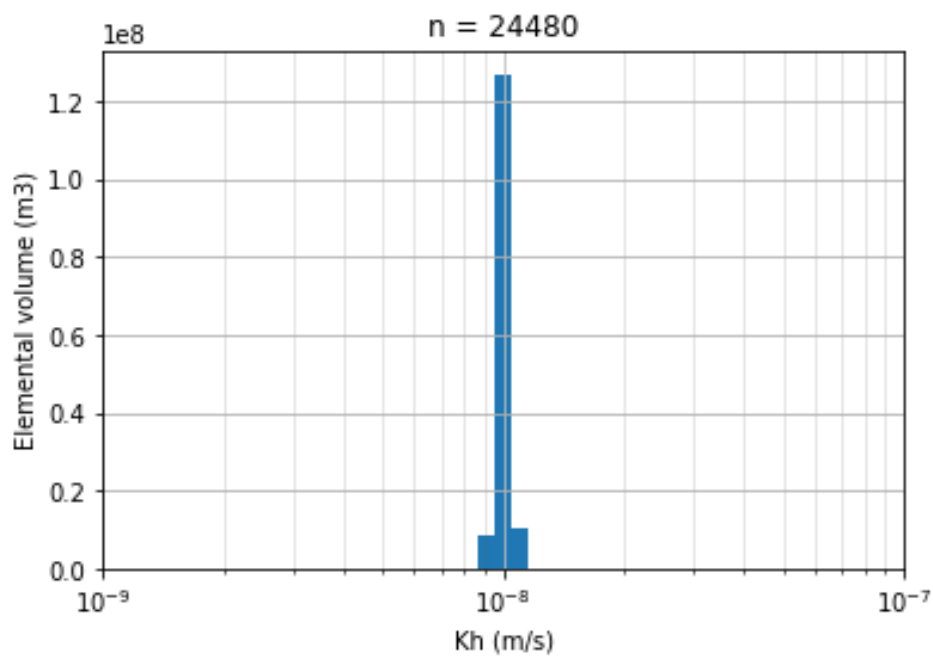
Zone	I
Description	III-Merelbeke aquiclude
Layer	6
Unité Hydrogéologique (UH/RBC)	UH/RBC_5 Aquiclude des argiles de Merelbeke
Unité Stratigraphique (US/RBC)	US/RBC_51 Argiles de Gent (membre de Merelbeke)

Figure 82 : K_h - analyse statistique – zone I_UHRBC_5 (III-Merelbeke aquiclude)



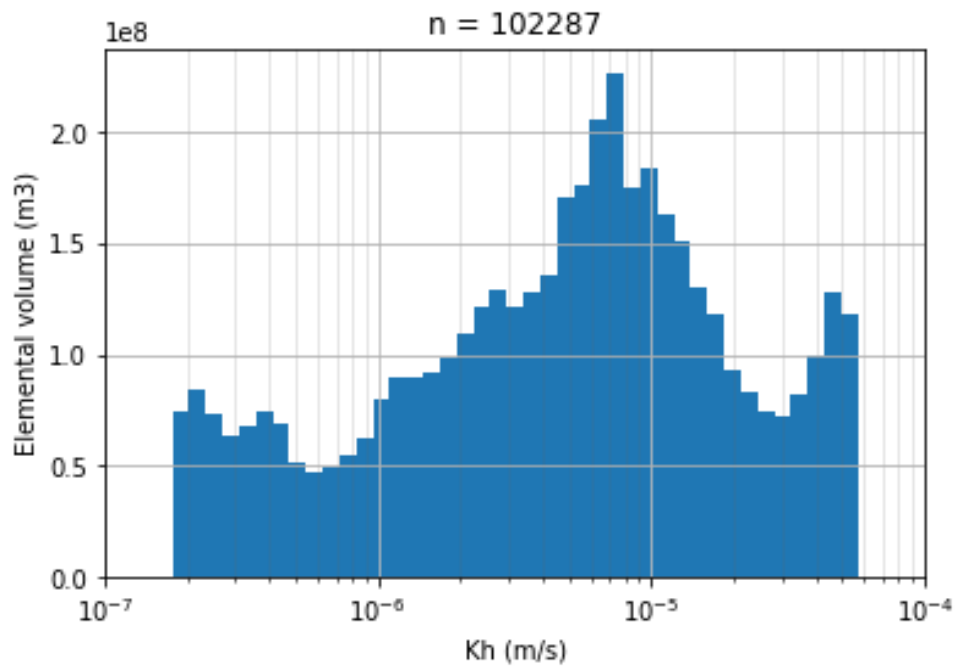
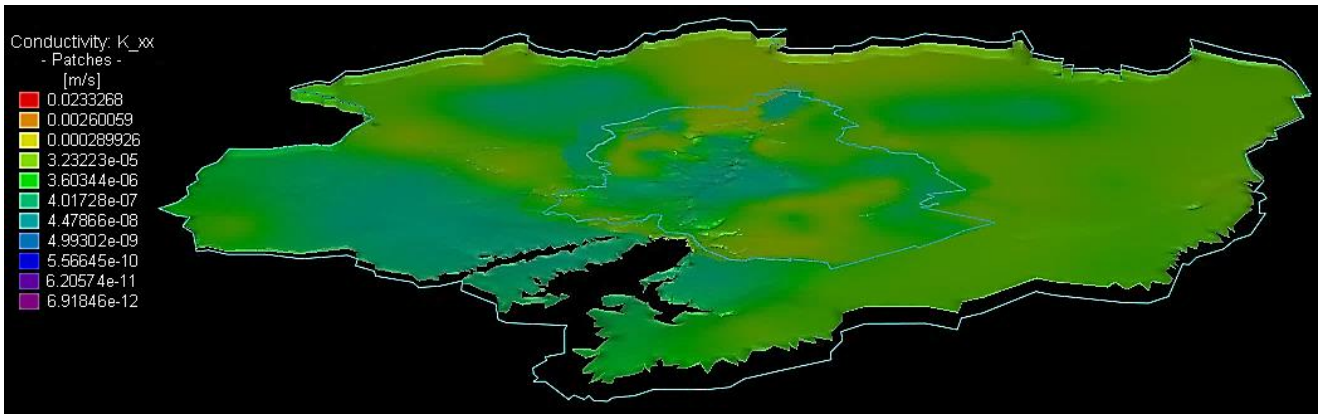
Zone	J
Description	III-Tielt aquitard
Layer	7
Unité Hydrogéologique (UH/RBC)	UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt
Unité Stratigraphique (US/RBC)	US/RBC_61 Sables et argiles de Tielt

Figure 83 : K_h - analyse statistique – zone J_UHRBC_6 (III-Tielt aquitard)



Zone	K
Description	III-Aalbeke aquiclude
Layer	8
Unité Hydrogéologique (UH/RBC)	UH/RBC_7a Aquiclude des argiles d'Aalbeke
Unité Stratigraphique (US/RBC)	US/RBC_71 Argiles de Kortrijk (membre d'Aalbeke)

Figure 84 : K_h - analyse statistique – zone K_UHRBC_7a (III-Aalbeke aquiclude)



Zone	L
Description	III-Moen aquitard
Layer	9
Unité Hydrogéologique (UH/RBC)	UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen
Unité Stratigraphique (US/RBC)	US/RBC_72 Sables et argiles de Kortrijk (membre de Moen)

Figure 85 : K_h - analyse statistique – zone L_UHRBC_7b (III-Moen aquitard)

6.5 Conductances

Le **Tableau 20** reprend les résultats issus de l'analyse statistique menée au sein de la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un kilomètre sur les *conductances* (*Transfer rate out*) à l'issu de la calibration :

- au droit du réseau hydrographique et des grands collecteurs ;
- au droit de la galerie drainante.

Zone	Unité Hydrogéologique (UH/RBC)	Layer	Nombre d'éléments	Volume total (m³)	LOG (Transfer Rate Out)			
					Moyenne arithmétique pondérée (1/s)	min (1/s)	Médiane (1/s)	max (1/s)
Réseau hydrographique / grands collecteurs	UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel	1	26953	176.669.153	-3,41	-7,21	-3,49	-0,32
Galerie drainante VIVAQUA	UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Ledde, Bruxelles et Vierzele	5	764	12.989.868	-3,71	-3,95	-3,70	-3,70
Zone	Unité Hydrogéologique (UH/RBC)	Layer	Nombre d'éléments	Volume total (m³)	Transfer Rate Out			
					Moyenne arithmétique pondérée (1/s)	min (1/s)	Médiane (1/s)	max (1/s)
Réseau hydrographique / grands collecteurs	UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel	1	26953	176.669.153	3,93E-04	6,22E-08	3,23E-04	4,80E-01
Galerie drainante VIVAQUA	UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Ledde, Bruxelles et Vierzele	5	764	12.989.868	1,97E-04	1,12E-04	1,99E-04	2,00E-04

Tableau 20 : Analyse statistique, *log(Transfer rate out)* à gauche et transformation des *log(Transfer rate out)* en *Transfer rate out* à droite



La **Figure 86** reprend les *histogrammes* permettant une visualisation des distributions des *conductances* (*Transfer rate out*) :

- au droit du réseau hydrographique et des grands collecteurs ;
- au droit de la galerie drainante.

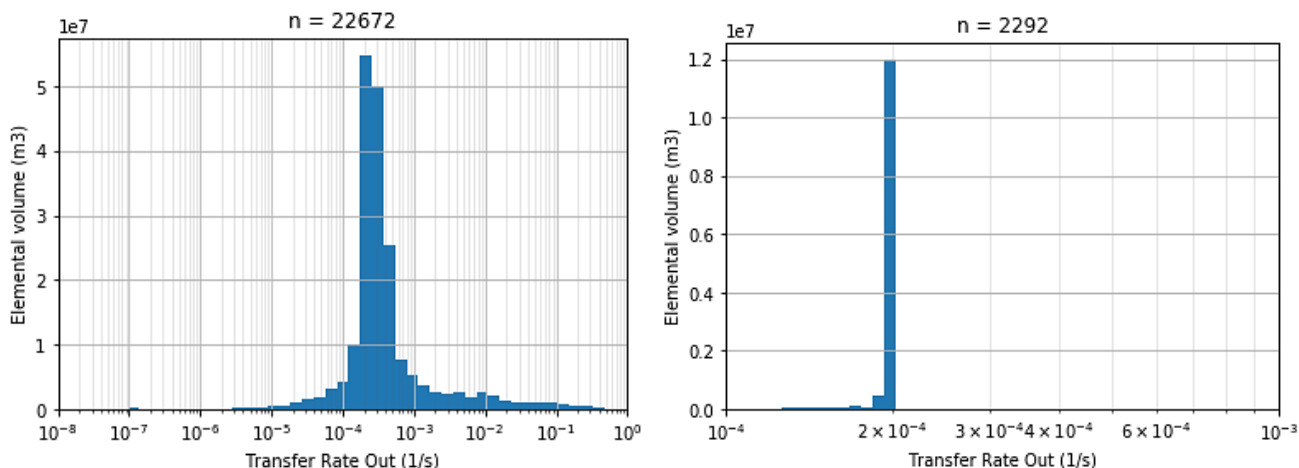


Figure 86 : Conductance (*Transfer rate out*) - analyse statistique – à gauche : réseau hydrographique et grands collecteurs – à droite : galerie drainante

6.6 Bilan hydrogéologique

Un bilan des flux entrants et sortants du modèle *BPSM* (et donc du système phréatique) a été réalisé au droit de la région bruxelloise (**Figure 87**) pour l'année de référence 2013. Ce bilan a pour but de quantifier pour chaque « entité » échangeant un flux d'eau avec le sous-sol:

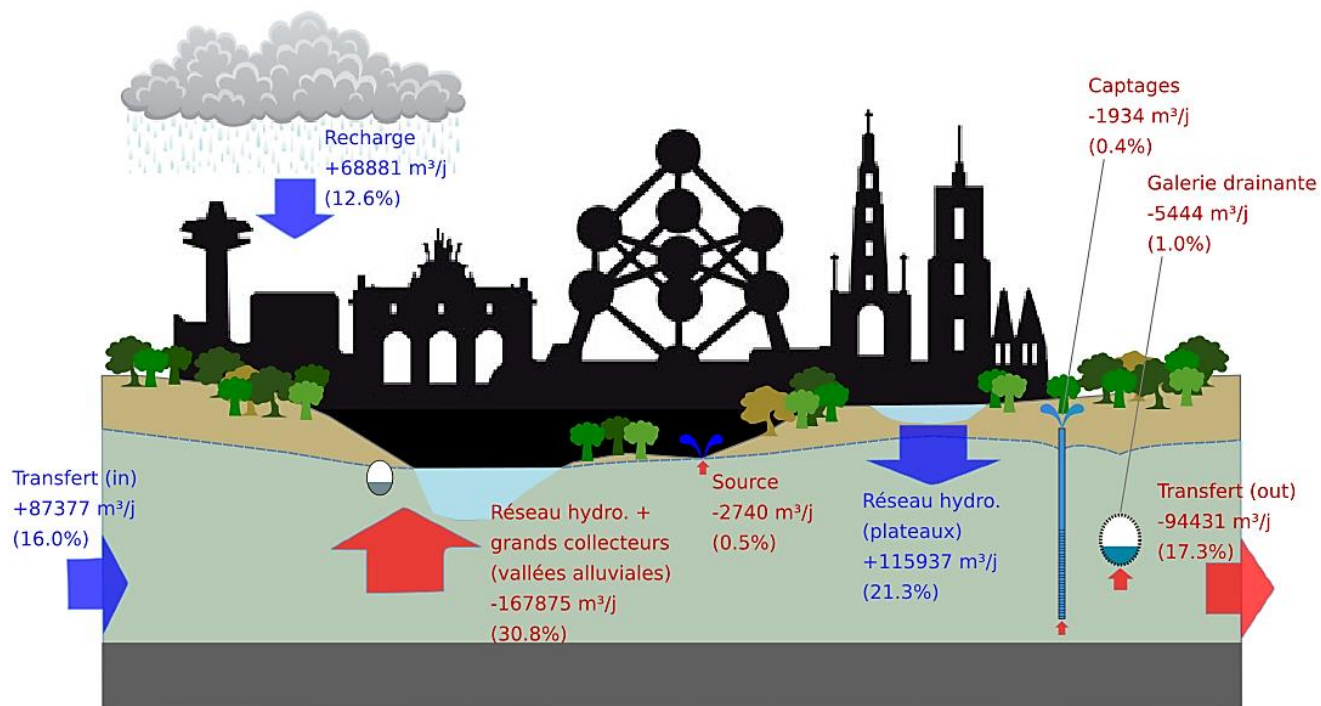
- le flux « entrant dans *BPSM* » (ou sortant de l'entité) caractérisant un processus d'alimentation des nappes (ex : recharge). Ces flux que l'on appellera *inflows* se caractérisent par des valeurs positives ;
- le flux « sortant de *BPSM* » (ou entrant dans l'entité) caractérisant un processus de drainage des nappes (ex : captages). Ces flux que l'on appellera *outflows* se caractérisent par des valeurs négatives.

Sur la base de ce bilan, il y a lieu d'observer que :

- le régime permanent est bien respecté. L'*erreur de conservation de masse* ($\frac{\Sigma_{inflow} - \Sigma_{outflow}}{\text{Flux total}}$) est égale à 0.04%. En d'autres termes, on peut considérer que la somme des flux entrants est égale à la somme des flux sortants (pas de stockage) ;
- la majorité des flux entrants est générée par les processus d'infiltration d'eau de surface du *réseau hydrographique sur les plateaux* (21.3 % de la totalité des flux). La *recharge* des eaux pluviales apparaît sensiblement plus faible avec 12,6 % de la totalité des flux échangés ;
- la majorité des flux sortants est la conséquence des processus de drainage des eaux souterraines en fond de vallée alluviale par le système *réseau hydrographique et grands collecteurs* (30.8 % de la totalité des flux échangés). Les flux sortants par la *galerie drainante VIVAQUA*, les *sources* ou les *captages* apparaissent très inférieurs avec respectivement 1.0, 0.5 et 0.4% de la totalité des flux échangés ;
- la résultante des transferts internes au système phréatique, calculée aux frontières strictes de la région bruxelloise, est négative (flux entrants à hauteur de 16,0% de la totalité des flux échangés contre 17.3% pour les flux sortants). Ce qui signifie qu'au droit de la région bruxelloise le *système phréatique* reçoit un flux majoritairement entrant donc une alimentation (de l'ordre de 7054 m³/jour) se justifiant notamment par l'influence combinée de l'infiltration d'eau de surface du *réseau hydrographique sur les*



plateaux et la recharge des eaux pluviales constituant à elles deux 33.9% de la totalité des flux échangés (et 67.9% des flux entrants).



Entité	Flux (m³/jour)	Flux (%)
Recharge	+68.881	12,6%
Sources	-2.740	0,5%
Captages	-1.934	0,4%
Galerie drainante VIVAQUA	-5.444	1,0%
Réseau hydrographique, grands collecteurs (vallées alluviales)	-167.875	30,8%
Réseau hydrographique (plateaux)	+115.937	21,3%
Transfert interne IN	+87.377	16,0%
Transfert interne OUT	-94.431	17,3%
Balance	-7.054	1,3%
FLUX TOTAL IN	+272.195	49,98%
FLUX TOTAL OUT	-272.423	50,02%
Erreur de conservation de masse	-228	0,04%
FLUX TOTAL IN + OUT	544.618	100%

Figure 87 : Bilan hydrogéologique du système phréatique au droit de la région bruxelloise (2013) – inflow (bleu) / outflow (rouge)



A titre indicatif, ce bilan a été introduit au sein du bilan hydrogéologique général de la région de Bruxelles-Capitale (**Figure 88**) incluant les unités hydrogéologiques constituant le système captif à savoir :

- l'UH/RBC_8 Aquifère des sables du Landénien ;
- l'UH/RBC_9 Système aquifère des craies du Crétacé et du socle Paléozoïque.

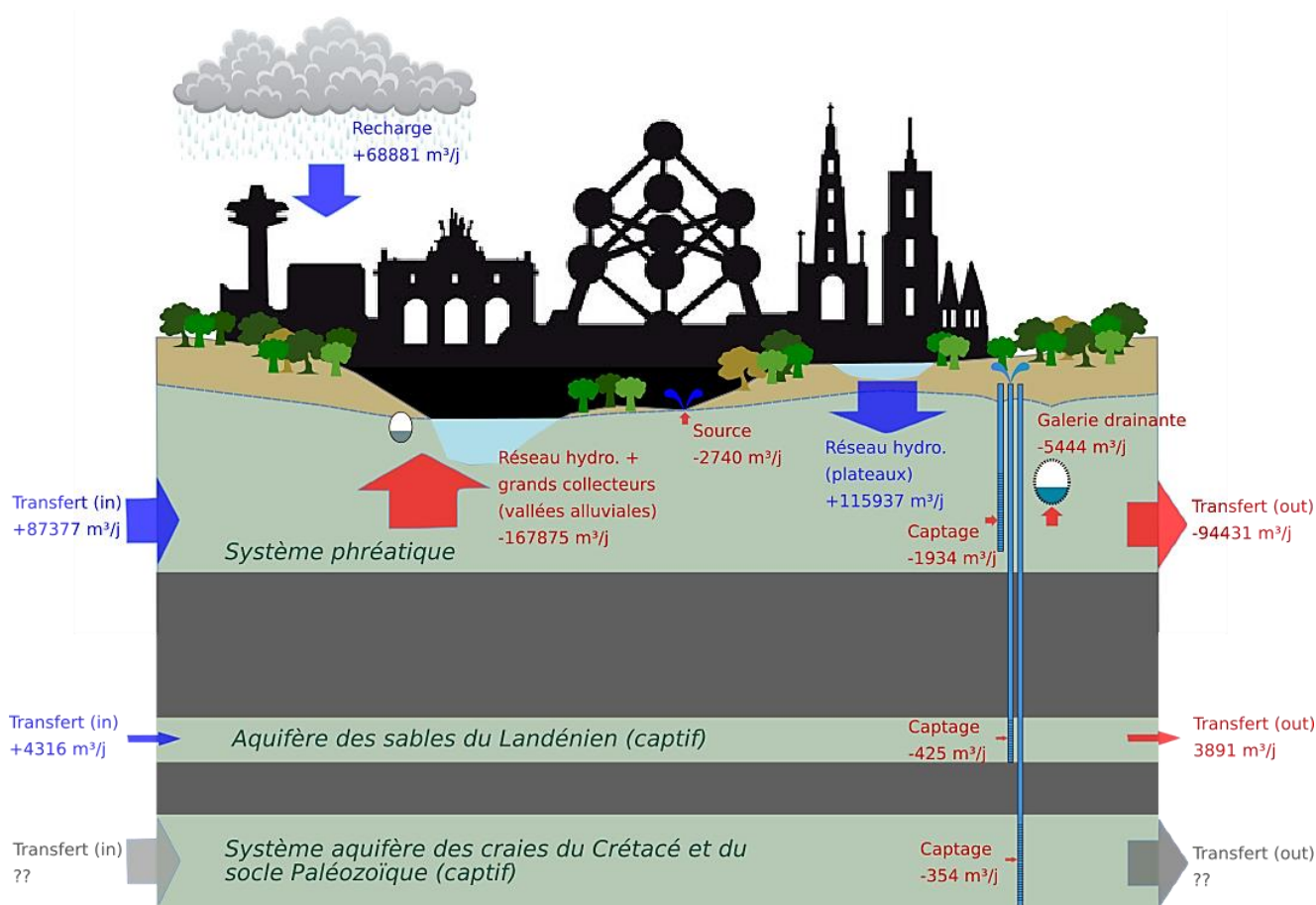


Figure 88 : Bilan hydrogéologique général au droit de la région bruxelloise (2013) – inflow (bleu) / outflow (rouge)



7 Analyse de sensibilité et d'incertitude

7.1 Analyse d'incertitude

Une *analyse d'incertitude* a été menée sur la *piézométrie* simulée par le modèle calibré en régime permanent (mai 2013), au droit de la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un kilomètre. Cette analyse se traduit par la quantification d'un intervalle d'incertitude (ou de confiance) $[\Delta head_{min}, \Delta head_{max}]$ à chaque nœud du modèle recoupant la zone investiguée. Ces intervalles étant plus ou moins linéaires (**Figure 89**).

Selon A. Dassargues (2019), la méthode la plus intuitive pour calculer les intervalles de confiance est de procéder à des simulations de type *Monte Carlo*. Selon cette dernière, de nombreuses simulations sont générées avec un jeu de paramètres d'entrée à chaque fois différent. Chaque paramètre d'entrée variant de manière aléatoire selon une distribution statistique donnée (ex : distribution normale) sur un intervalle équivalent à son incertitude de mesure. Cette dernière est estimée sur la base d'observations statistiques ou par défaut d'un *expert judgment*. Dans notre cas, un total de 500 simulations a été réalisée ce qui permet de disposer pour chaque nœud d'un échantillon statistique de 500 valeurs piézométriques dont la distribution finale renvoie à l'incertitude piézométrique du modèle au nœud en question (**Figure 89**).

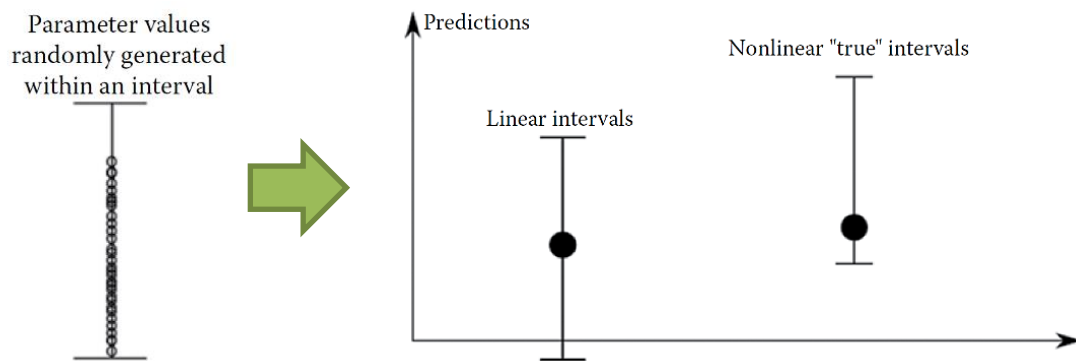


Figure 89 : Analyse d'incertitude, principe

Le **Tableau 21** synthétise les paramètres d'entrée rentrant en considération dans l'analyse d'incertitude par *Monte-Carlo* ainsi que la paramétrisation de cette dernière.

id	Paramètre d'entrée	Unité	Incertitude	Type	Distribution	Ecart type
1	log (conductivité hydraulique)	m/s	+/- 0,5	absolue	normale	0,17
2	recharge	mm/an	+/- 25	absolue	normale	8,33
3	débit des captages & sources	m ³ /h	+/- (parameter * 1,5 - parameter)	relative	uniforme	-
	log (conductance)					
4	galerie drainante VIVAQUA	1/s	+/- 0,5	absolue	normale	0,17
	réseau hydrographique, grands collecteurs (vallées alluviales)	1/s	+/- 0,5	absolue	normale	0,17
	réseau hydrographique (plateaux)	1/s	+/- 0,5	absolue	normale	0,17
	Hauteur de la lame d'eau					
5	galerie drainante VIVAQUA	m	+/- 1	absolue	normale	0,33
	réseau hydrographique, grands collecteurs (vallées alluviales)	m	+/- 1	absolue	normale	0,33
	réseau hydrographique (plateaux)	m	+/- 1	absolue	normale	0,33

Tableau 21 : Analyse d'incertitude par Monte-Carlo, paramétrisation

A l'issu des 500 simulations aléatoires, l'intervalle d'incertitude $[\Delta head_{min}, \Delta head_{max}]$ a été calculé pour chaque nœud considéré en prenant respectivement les percentiles 5 et 95 de l'échantillon statistique obtenu au nœud. Les valeurs dépassant ces percentiles sont considérées comme des *outliers*, valeurs extrêmes peu probables.

Important : Il y a lieu de préciser que ces intervalles sont particulièrement *conservatifs* puisqu'ils sont le résultat d'une analyse *Monte Carlo* basée sur des incertitudes de paramètres d'entrée ne prenant pas en compte de contrainte liée au degré de calibration du modèle. Cette méthodologie est donc susceptible de générer des amplitudes piézométriques et/ou de débits de drainage amenant à un dépassement plus ou moins fort des *erreurs maximales acceptables* définies comme *critères de validité* (§5.3.2). Un raffinement de cette analyse vers des intervalles d'incertitude piézométrique plus étroits est donc encore possible.

Les **Figure 90** à **Figure 95** illustrent, pour chaque *unité hydrogéologique* aquifère et aquitard du *système phréatique* bruxellois, la spatialisation des bornes d'incertitude piézométrique $[\Delta head_{min}, \Delta head_{max}]$. A noter que les valeurs extrêmes considérées comme *outliers* dans l'analyse statistique illustrée en **Figure 96** sont ici bien spatialisées, justifiant les valeurs ponctuellement très hautes/basses.



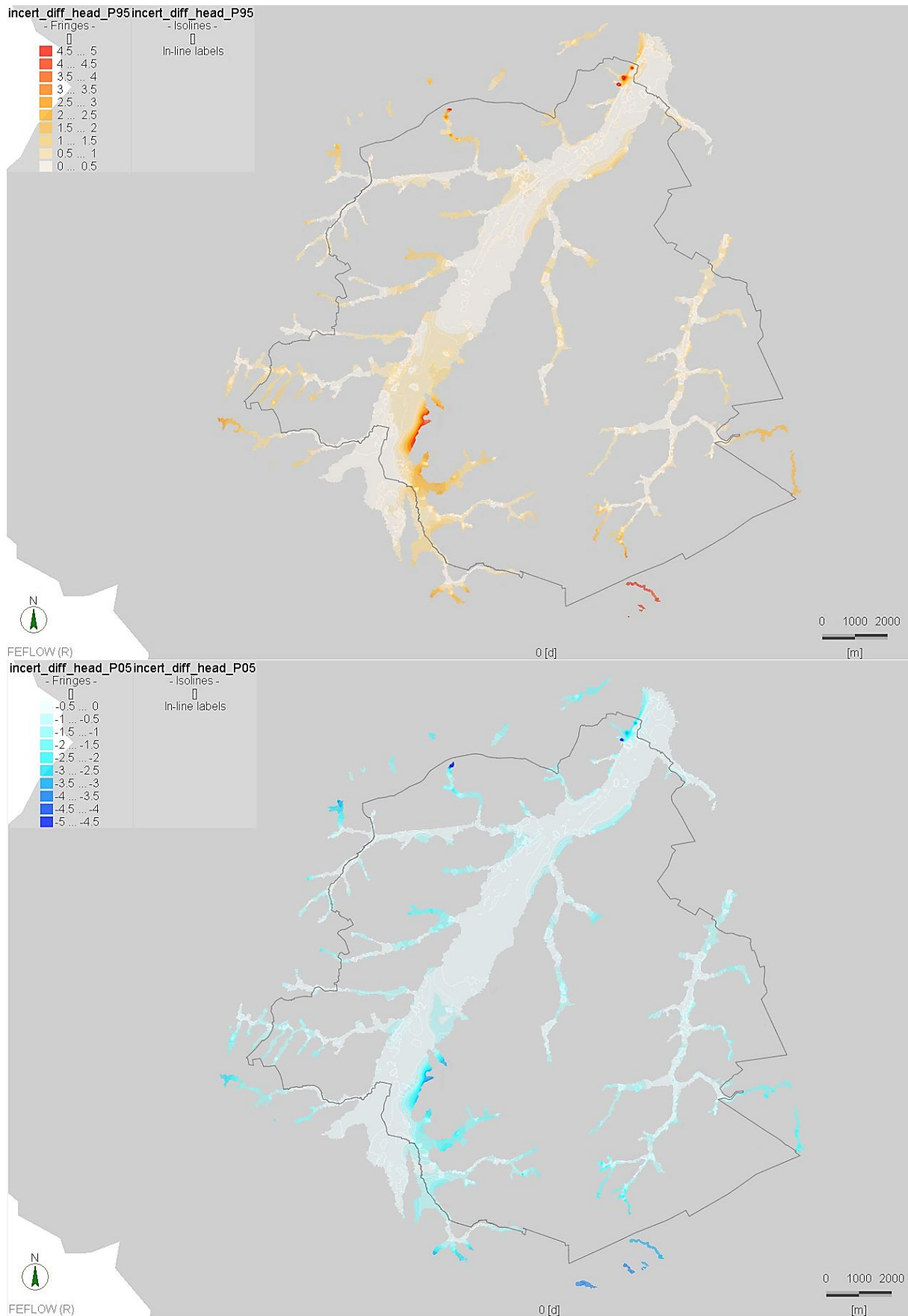


Figure 90 : $\Delta head_{min}$ (bleu) et $\Delta head_{max}$ (rouge) - analyse d'incertitude - UH/RBC_1a Système aquitard quaternaire superficiel



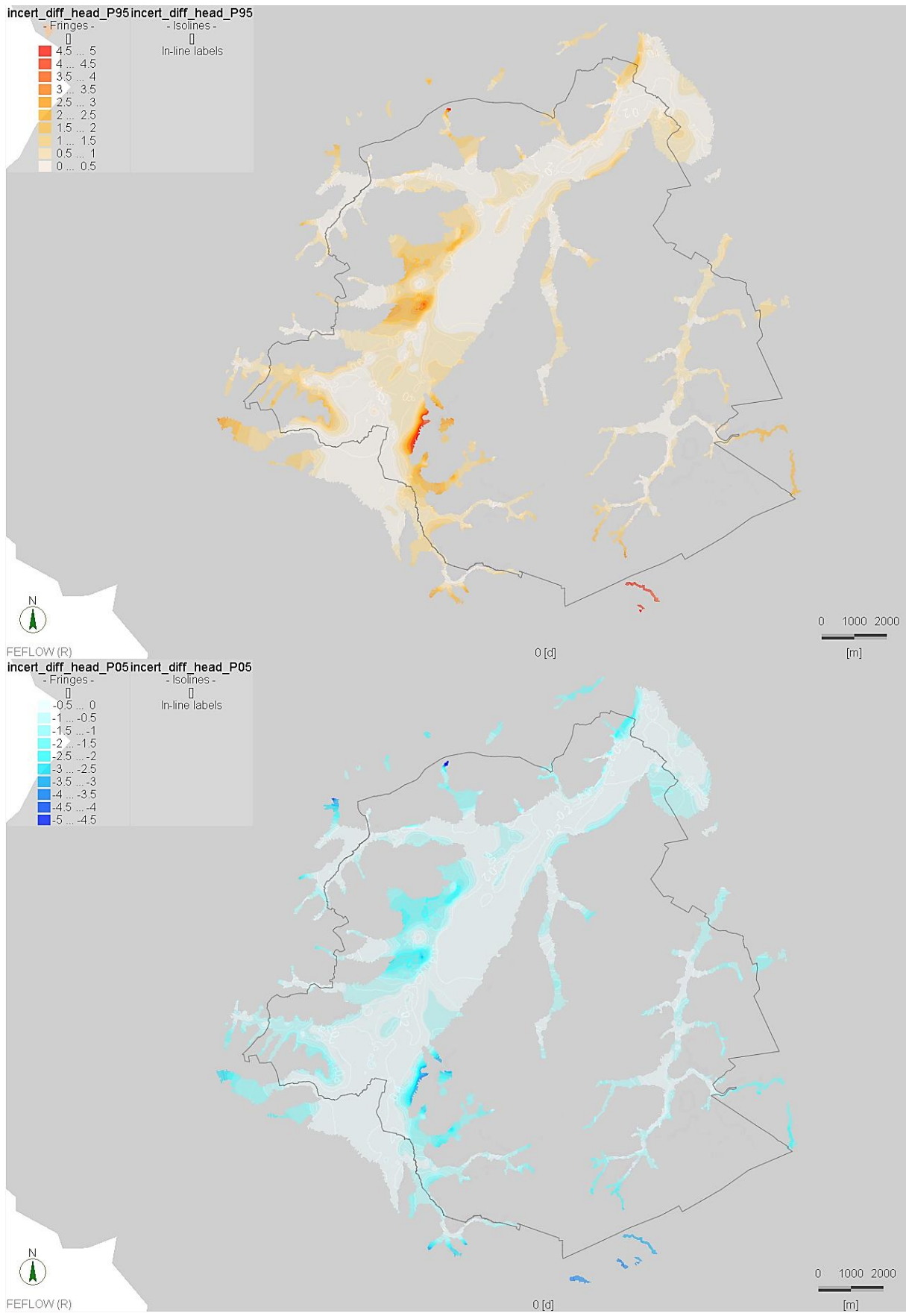


Figure 91 : $\Delta head_{min}$ (bleu) et $\Delta head_{max}$ (rouge) - analyse d'incertitude - UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux



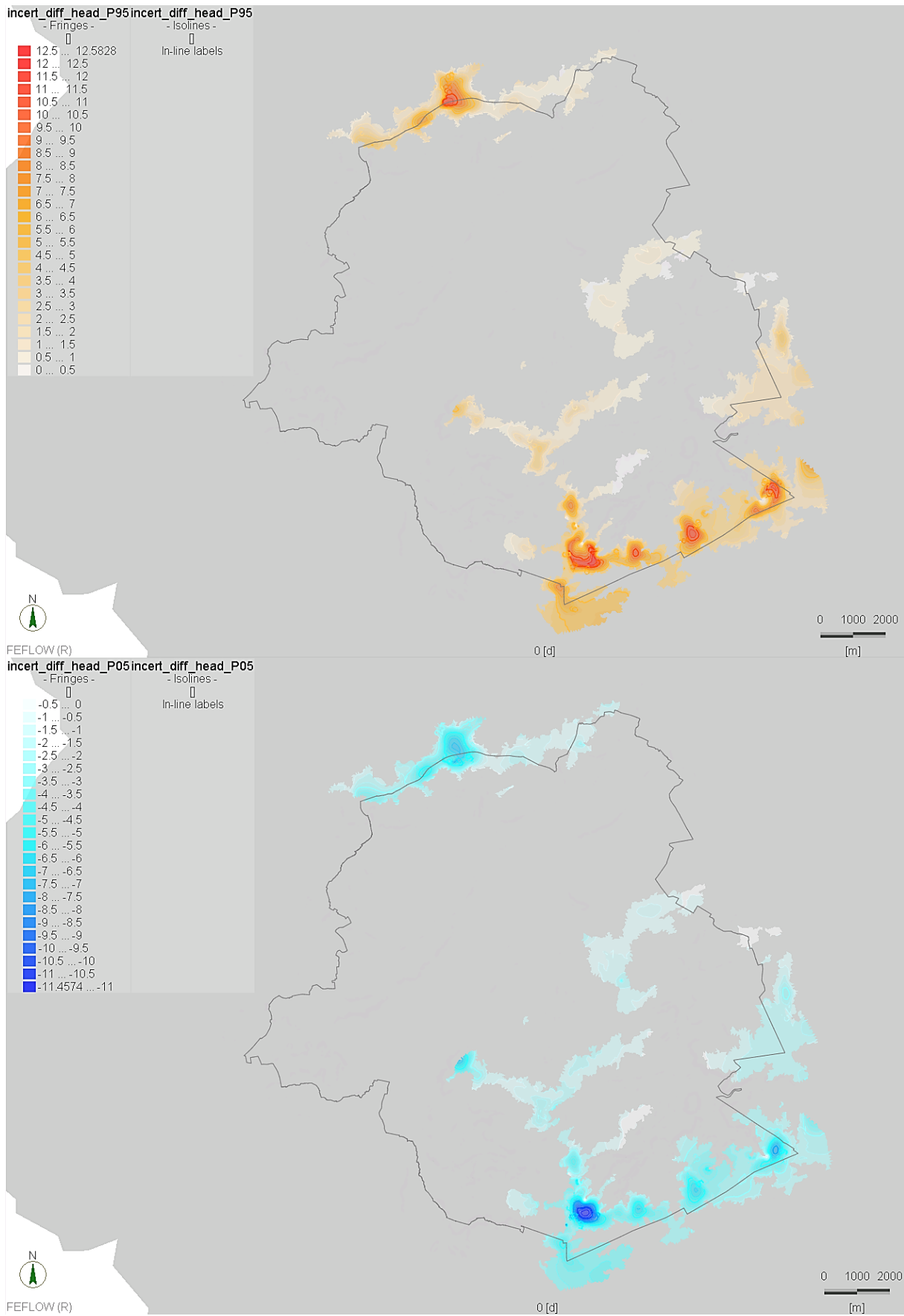


Figure 92 : $\Delta head_{min}$ (bleu) et $\Delta head_{max}$ (rouge) - analyse d'incertitude - UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché



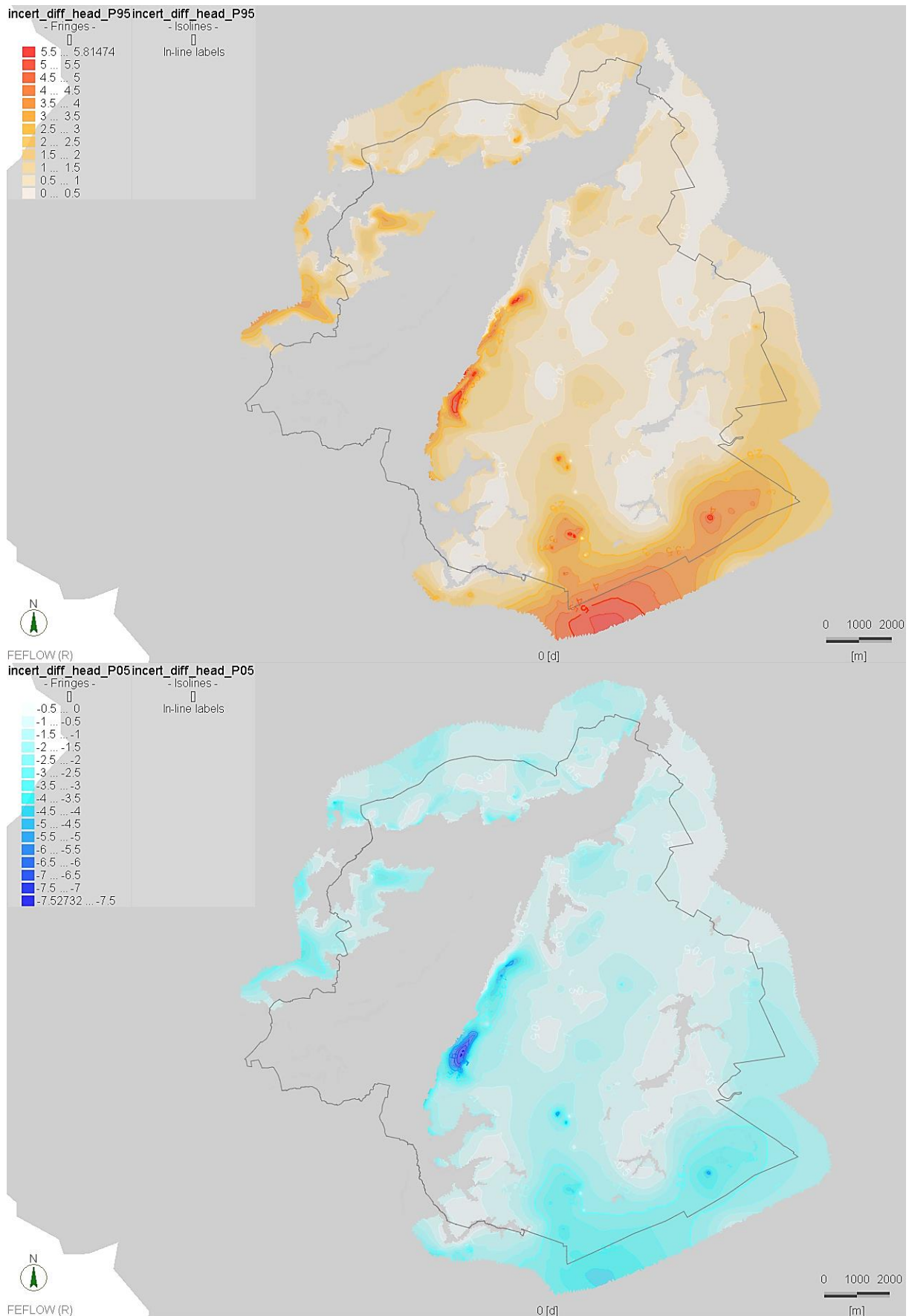


Figure 93 : $\Delta head_{min}$ (bleu) et $\Delta head_{max}$ (rouge) - analyse d'incertitude - UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele (Bruxellien)



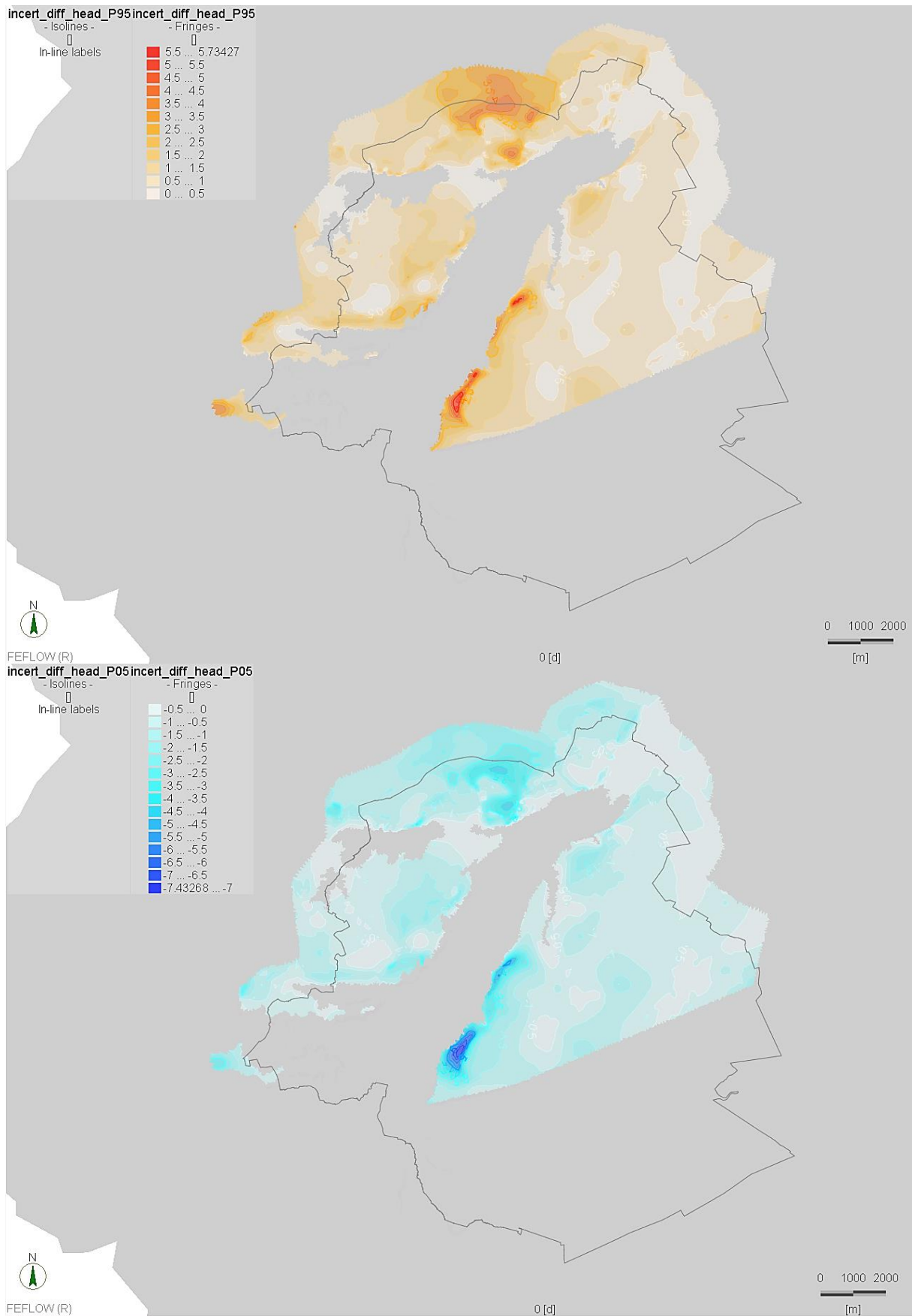


Figure 94 : $\Delta head_{min}$ (bleu) et $\Delta head_{max}$ (rouge) - analyse d'incertitude - UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tiel



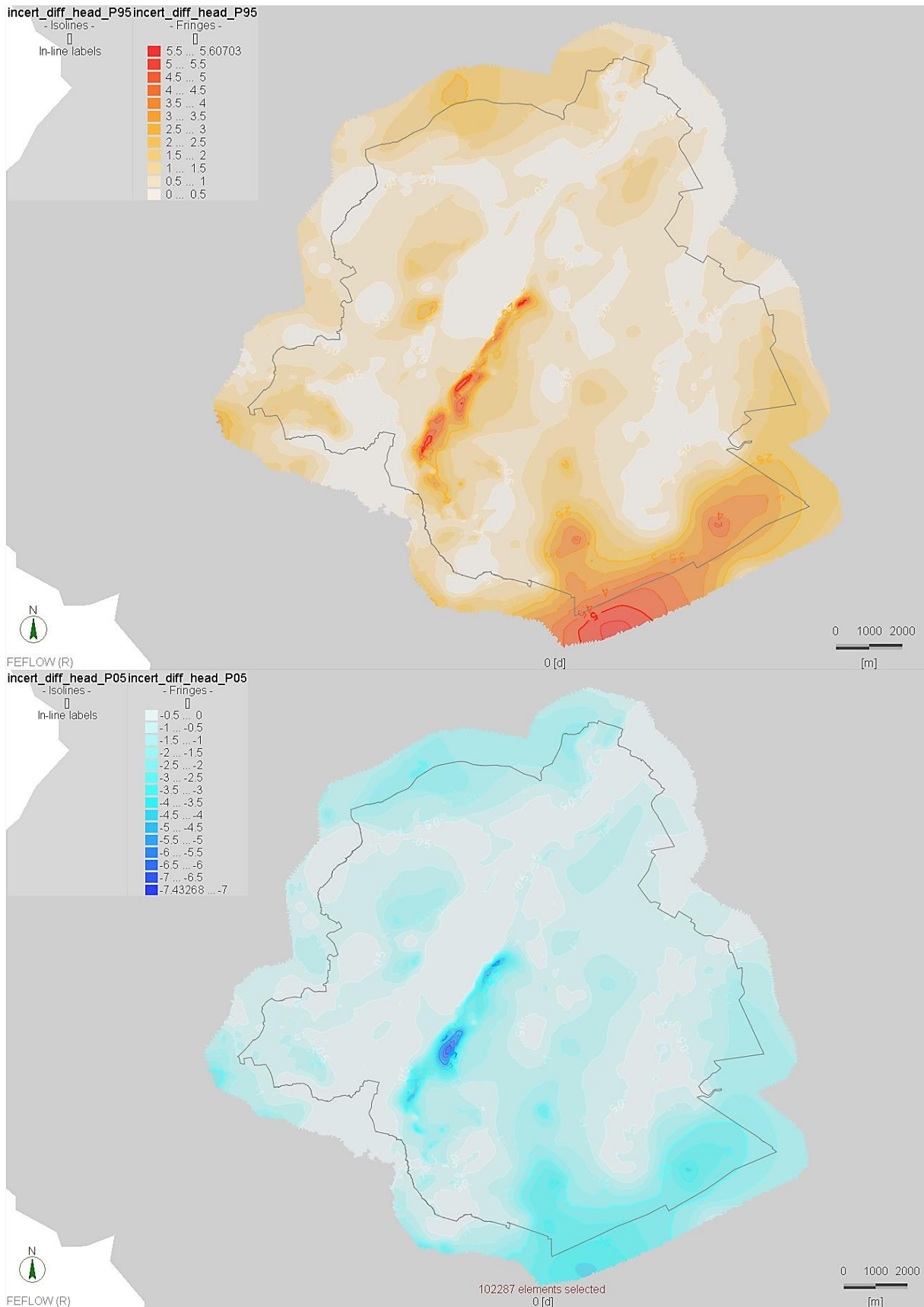
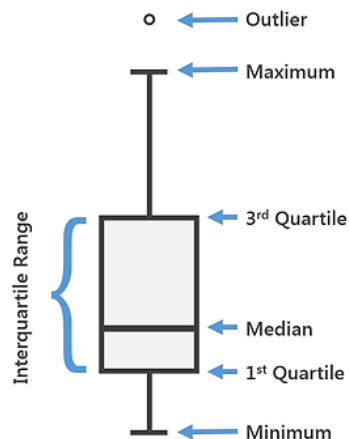


Figure 95 : $\Delta head_{min}$ (bleu) et $\Delta head_{max}$ (rouge) - analyse d'incertitude - UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen



Une analyse statistique des incertitudes nodales $[\Delta head_{min}, \Delta head_{max}]$ a été réalisée à l'échelle des *unités hydrogéologiques* aquifère et aquitard. La **Figure 96** reprend, sous la forme de *boxspots*, la distribution statistique de ces valeurs. Pour rappel, les *boxspots* schématisent les valeurs statistiques ci-dessous :

- Médiane (percentile 50) ;
- 1^{er} et 3^{eme} quartiles (percentiles 25 et 75) ;
- Valeurs minimale et maximale réalistes (percentiles 5 et 95) ;
- Outliers (que l'on définit comme inférieurs au percentile 5 ou supérieurs au percentile 95). Non représentés dans la **Figure 96**



Ce type de visualisation est particulièrement utile pour la comparaison de plusieurs distributions statistiques.

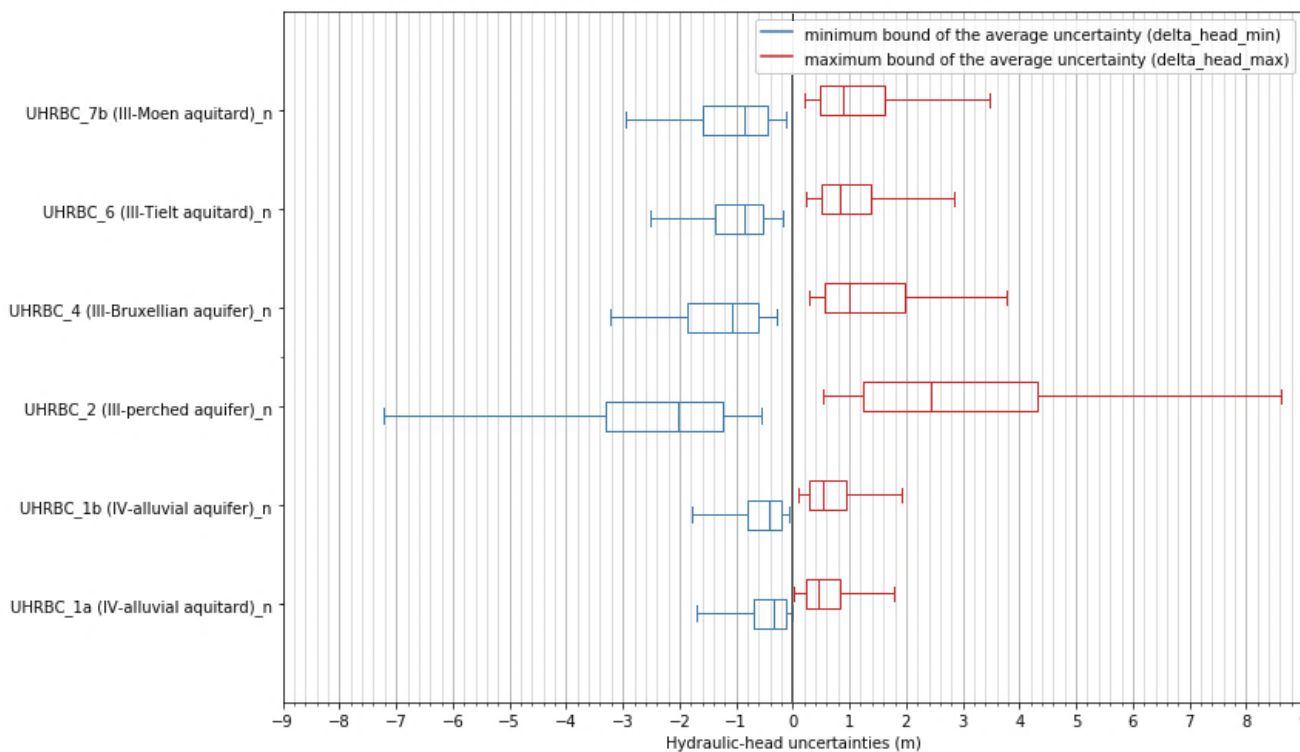


Figure 96 : $\Delta head_{min}$ (bleu) et $\Delta head_{max}$ (rouge) - analyse d'incertitude – boxspot

La **Figure 96** révèle entres autres que :

- les percentiles 50 sont inférieurs à +/- 1 m pour l'ensemble des *unités hydrogéologiques* ;
- les percentiles 25/75 sont généralement inférieurs à +/- 2m pour l'ensemble des *unités hydrogéologiques*.

Sauf pour l'*UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché* présentant des niveaux d'incertitude significativement plus élevés. Cette situation de forte incertitude relative à cette dernière unité est d'autant plus problématique qu'aucune observation (en l'occurrence piézométrique) susceptible d'optimiser (comprendre *diminuer*) son niveau d'incertitude n'est disponible.



7.2 Analyse de sensibilité

7.2.1 Méthodologie

Une *analyse de sensibilité* « globale » a été menée sur divers paramètres d'entrée. Selon A. Dassargues (2019)¹⁵, une analyse de sensibilité permet d'étudier les interactions *observations-paramètres-résultats* afin de mettre en lumière les processus et paramètres associés les plus influents sur les résultats. Une analyse de sensibilité fournit :

- de l'information sur la relation entre les *paramètres* et les *résultats* (pour " sentir " comment le modèle réagit) ;
- un feedback sur les hypothèses formulées au sein du modèle conceptuel (les processus simulés sont-ils sensibles aux paramètres choisis ?) ;
- une aide éventuelle pour l'étape de calibration, en identifiant les paramètres les plus sensibles qu'il y aurait lieu d'optimiser prioritairement.

Dans le cadre de ce rapport, l'analyse de sensibilité a principalement pour intérêt d'identifier les paramètres les plus sensibles vis-à-vis des résultats de simulation couverts par des observations, à savoir :

- la *piézométrie* des *unités hydrogéologiques* aquifère/aquitard (§5.2.1) ;
- le *débit de la galerie drainante* (§5.2.2) ;
- les *débites de drainage* du système *réseau hydrographique/grands collecteurs* à l'échelle des trois bassins 'épurationnaires' Nord, Sud et Woluwe (§5.2.3).

Les paramètres testés sont ceux préalablement étudiés pour l'analyse d'incertitude (§7.1) et synthétisés au **Tableau 21**, à savoir :

- la *conductivité hydraulique* (§3.10.1) ou plus précisément son logarithme ;
- la *recharge* (§3.8) ;
- le *débit des captages* (§3.6.1) / *débit des sources* (§3.7) ;
- la *conductance* ou plus précisément son logarithme et la *hauteur de la lame d'eau* (paramètres relatifs à la galerie drainante §3.6.2, au réseau hydrographique §3.3 et aux grands collecteurs §3.4).

La sensibilité S_{ij} relative au paramètre j vis-à-vis d'un résultat simulé γ_i^{sim} au point d'observation i est calculée comme le rapport entre la *dérivée du résultat de simulation* et la *dérivée du paramètre*.

$$S_{ij} = \left(\frac{d\gamma_i^{sim}}{db_j} \right) \Big|_b \sim \frac{\gamma_i^{sim}(b + \Delta b) - \gamma_i^{sim}(b)}{\Delta b_j}$$

Avec :

- γ_i^{sim} : valeur simulée au 'point d'observation' i ;
- b_j : valeur du paramètre d'entrée j ;
- b : vecteur des valeurs des paramètres d'entrée ;
- Δb : vecteur des incréments des paramètres d'entrée ;
- Δb_j : incrément assigné à la valeur du paramètre j .

Afin de permettre la comparaison de la sensibilité (vis-à-vis d'un résultat donné) entre paramètres ayant des unités différentes, une alternative réside dans l'expression d'une forme normalisée de la sensibilité, nommée S_{ij}^{scaled} :

$$S_{ij}^{scaled} \sim \gamma_i^{sim}(b + \Delta b^{incert}) - \gamma_i^{sim}(b)$$

Avec :

- γ_i^{sim} : valeur simulée au 'point d'observation' i ;
- b : vecteur des valeurs des paramètres d'entrée ;

¹⁵ Alain Dassargues, Hydrogeology - Groundwater science and engineering, Taylor & Francis (2019)



- Δb^{incert} : vecteur des incertitudes des paramètres d'entrée j (borne max), appliqués uniformément sur l'ensemble des nœuds ou éléments de la zone couverte par le modèle où le paramètre j est présent (les changements générés sur les paramètres d'entrée sont donc globaux et uniformes sur le modèle).

S_{ij}^{scaled} représente dès lors la différence induite sur un résultat donné (en l'occurrence *piézométrie* ou *débit*) après incrémentation d'un paramètre de sa valeur max d'*incertitude*. Cette normalisation :

- exploite les valeurs *incertitudes* des paramètres j (définies au **Tableau 21**) comme incréments à appliquer à ces derniers, partant du principe que faire varier de son incertitude chaque paramètre j permet de quantifier sa sensibilité propre vis-à-vis d'un résultat de simulation ;
- ne tient plus compte de Δb_j dans le calcul de sensibilité et la valeur S_{ij}^{scaled} s'exprime dès lors comme le résultat auquel elle est liée, à savoir en m pour la *piézométrie* et en $m^3/jour$ pour les *débites*.

Le calcul de S_{ij}^{scaled} vis-à-vis de la *piézométrie* est tout d'abord réalisé de manière discrète au droit de chaque nœud de la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée d'un kilomètre - i correspondant dans le cas présent au *numéro du nœud* (plutôt que de l'*observation piézométrique*). Précisons que cette étape est riche d'enseignement puisqu'elle permet la spatialisation de la sensibilité, rendant visibles les zones les plus sensibles. Par la suite, dans la perspective d'une analyse 'globale', une analyse statistique est menée au droit des nœuds couvrant l'extension de chacune des cinq *unités hydrogéologiques* aquifère/aquitard du *système phréatique*. Pour chaque *unité hydrogéologique* une valeur S_{ij}^{scaled} globale est approchée par la *médiane* de l'échantillon statistique S_{ij}^{scaled} .

Le calcul de S_{ij}^{scaled} vis-à-vis du *débit de la galerie drainante* et des *débites de drainage* du système *réseau hydrographique / grands collecteurs* est plus simple car réalisé respectivement directement à l'échelle de la galerie drainante et à l'échelle des trois bassins 'épurationnaires' *Nord, Sud* et *Woluwe*¹⁶ (**Figure 12**).

7.2.2 Résultats

Les résultats de l'étude de sensibilité globale, réalisée à l'échelle de la zone d'intérêt (région bruxelloise) augmentée de 1 km sont présentés en **Figure 97**, **Figure 98** et **Figure 99**.

¹⁶ Partie flamande non prise en compte en ce qui concerne le bassin versant (épurationnaire) de la *Woluwe*



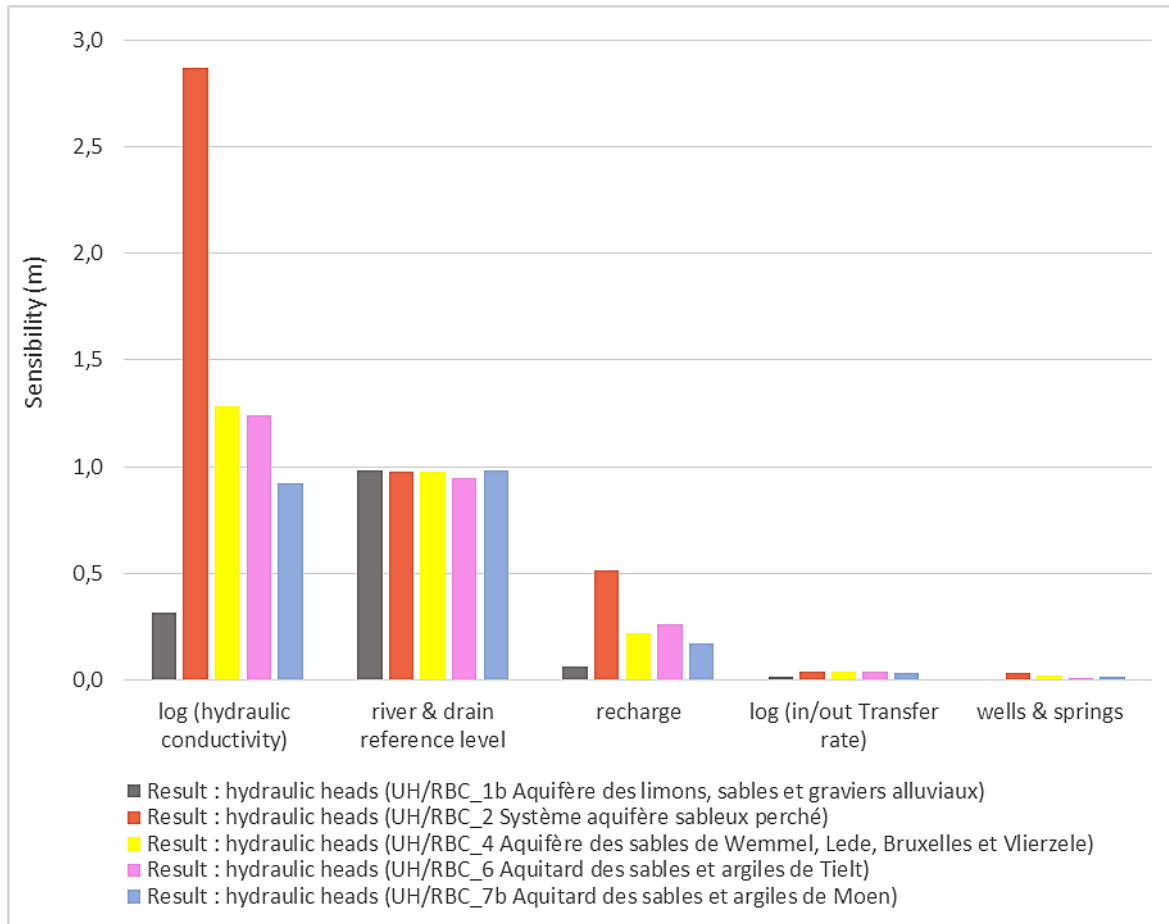


Figure 97 : Etude de sensibilité globale des paramètres principaux vis-à-vis de la piézométrie des unités hydrogéologiques aquifères & aquitards

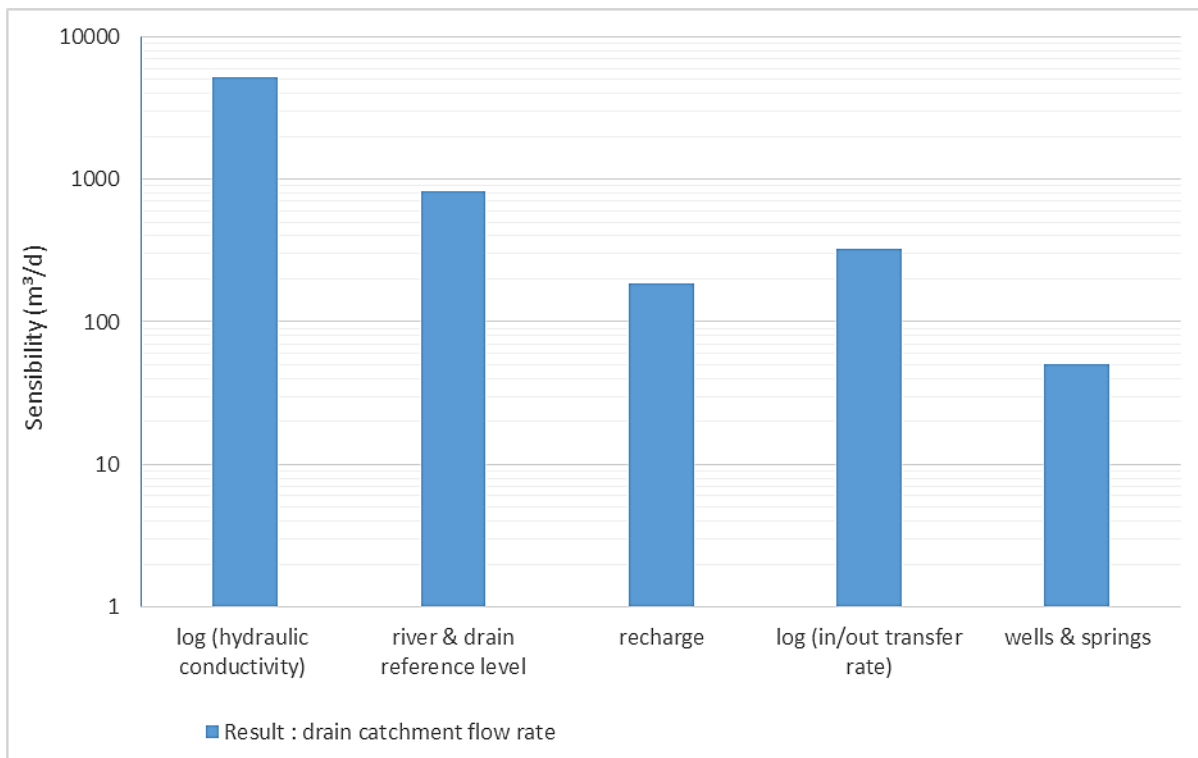


Figure 98 : Etude de sensibilité globale des paramètres principaux vis-à-vis du débit de la galerie drainante



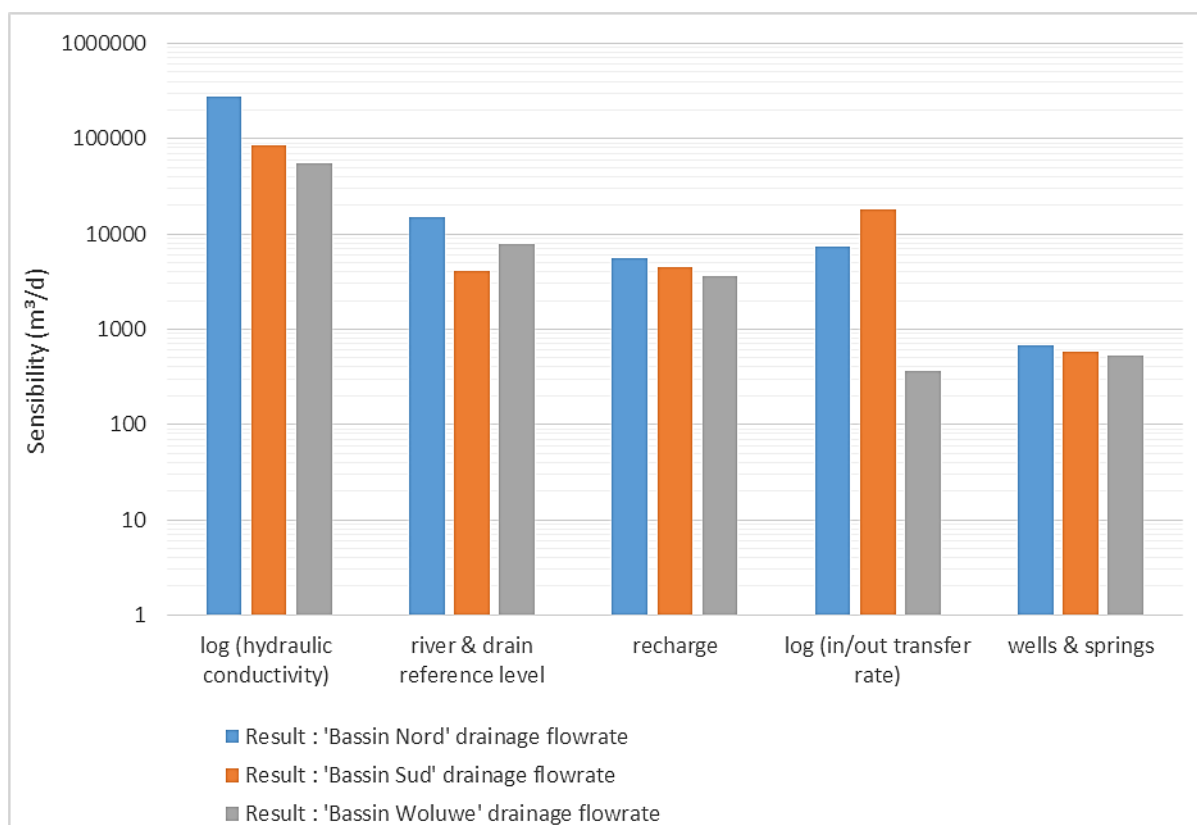


Figure 99 : Etude de sensibilité globale des paramètres principaux vis-à-vis des débits de drainage du système réseau hydrographique/grand collecteurs

En ce qui concerne la sensibilité vis-à-vis de la piézométrie :

- la *conductivité hydraulique* constitue globalement le paramètre le plus sensible plus particulièrement en ce qui concerne l'*UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché*. A noter toutefois que l'*UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux* présente quant à elle une sensibilité modérée, pouvant être expliquée par la présence en son sein ou à proximité de nombreuses conditions aux limites appliquées au réseau hydrographique et aux grands collecteurs ;
- la *hauteur de la lame d'eau* présente une sensibilité d'un ordre de grandeur similaire à la *conductivité hydraulique* avec la particularité d'être très uniforme sur l'ensemble des *unités hydrogéologiques* ;
- la *recharge* présente une sensibilité globalement moyenne à faible avec une variabilité entre *unités hydrogéologiques* très similaire à celle observée sur la *conductivité hydraulique* ;
- les paramètres *débit des captages/sources* et *conductance* présentent des sensibilités faibles pour l'ensemble des *unités hydrogéologiques*.

La sensibilité vis-à-vis du débit de la galerie drainante et des débits de drainage du système réseau hydrographique/grands collecteurs suivent les mêmes tendances :

- la *conductivité hydraulique* constitue clairement le paramètre le plus sensible ;
- la *hauteur de la lame d'eau*, *recharge* et *conductance* présentent des sensibilités globalement moyennes ;
- le paramètre *débit des captages/sources* apparaît peu sensible.

8 Conclusions et perspectives

Une meilleure maîtrise du système hydrogéologique bruxellois apparaît nécessaire pour 1/ faire face aux enjeux de développement urbain de la région bruxelloise dans un contexte de fortes pressions actuelles et futures sur le sous-sol (d'un point de vue hydrogéologique, géotechnique et environnemental) et ses ressources (en eau souterraine notamment et géothermie) et 2/ répondre aux objectifs de la *Directive Cadre Eau 2000/60/CE*.

Le développement de modèles numériques du sous-sol bruxellois et plus particulièrement le recours à la *modélisation hydrogéologique*, permettant de reproduire numériquement et simuler l'écoulement des eaux souterraines ainsi que les processus de transport de soluté (ex : pollutions) ou thermique (géothermie) existant au sein des nappes aquifères, apparaît opportun pour la mise à disposition d'outils d'aide à la décision exploitables par un hydrogéologue. Ce dernier étant en capacité de réaliser des simulations prédictives quantifiant l'ampleur des impacts à venir à court et long terme pour *in fine* conseiller au mieux les gestionnaires et décideurs institutionnels/politiques vis-à-vis de mesures de gestion du sous-sol.

Ci-dessous est reprise une série d'exemples d'analyse prédictive potentiellement réalisables avec ce type de modèle :

- impacts des changements climatiques sur la pérennité de la ressource en eau souterraine ;
- impacts d'ouvrages urbains ou d'aménagements sur les écoulements des eaux souterraines ;
- gestion du potentiel aquifère (captages) et géothermie exploitable et prévention des conflits d'usage entre ouvrages exploitant les ressources du sous-sol : captages, installations géothermiques sur sondes ou sur nappe ;
- gestion des eaux pluviales à la parcelle et plus particulièrement évaluation des incidences de projets à l'échelle communale/régionale visant à concentrer l'infiltration des eaux pluviales au droit de zones à potentiel élevé d'infiltration ;
- études des relations nappe/rivière ou nappe/collecteur ;
- définition des zones d'alimentation de captages, zones humides,...
- optimisation du réseau de monitoring de la qualité des eaux souterraines par la définition des zones d'influence des stations de mesure ;
- évaluation des risques de dispersion de pollution ;
- recherche de sources de pollution ;
- ...

Un modèle hydrogéologique FEFLOW® (*éléments finis*) relatif au système phréatique bruxellois, exploité en région bruxelloise par VIVAQUA (eau potable) - les secteurs industriels & tertiaires et propice au développement de la géothermie, a été développé : **Brussels Phreatic System Model (BPSM)**. Il est exploité depuis 2019 en complément d'**Hydroland (2016)** - lequel se focalise sur l'aquifère captif des *sables du Landénien*.

BPSM répond à deux principaux objectifs :

- **développer un outil de gestion stratégique de la ressource en eau souterraine (et en géothermie) du système phréatique.**
- **constituer des cartes piézométriques de référence (mai 2013) à savoir :**
 - o cartes piézométriques (m-DNG) des unités hydrogéologiques aquifères et aquitards composant le système phréatique bruxellois :
 - *UH/RBC_1b Aquifère des limons, sables et graviers alluviaux ;*
 - *UH/RBC_2 Système aquifère sableux perché ;*
 - *UH/RBC_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele (ou plus connu sous le nom de sables du Bruxellien) ;*
 - *UH/RBC_6 Aquitard des sables et argiles de Tielt ;*
 - *UH/RBC_7b Aquitard des sables et argiles de Moen.*
 - o hauteurs du niveau phréatique (m-DNG) ;



- profondeurs du niveau phréatique (m).

Il y a lieu de préciser qu'*Hydroland* répond à des objectifs similaires à ceux de *BPSM*, à savoir :

- développer un outil de gestion stratégique de la ressource en eau souterraine (et en géothermie) de l'aquifère des *sables du Landénien* ;
- constituer une carte piézométrique de référence de l'aquifère des *sables du Landénien* (mai 2013).

Le présent rapport s'est focalisé sur la documentation de la construction de *BPSM* dans sa version v1.0 (la documentation de la construction d'*Hydroland* dans sa version v1.0. est disponible sur le site internet de Bruxelles Environnement).

La méthodologie de construction de *BPSM* v1.0 s'est composée de 6 étapes :

- collecte des données de base : données géographiques, géologiques, hydrogéologiques, hydrologiques et environnementales ;
- développement d'un modèle conceptuel : analyse des données recueillies et simplification réaliste du système hydrogéologique. Définition de l'extension 3D du modèle, discrétisation verticale, conditions aux limites (potentiels imposés, flux imposés, drainage, ...), définition des sollicitations (recharge, captages,...) ;
- développement d'un modèle numérique : intégration du modèle conceptuel dans le logiciel de modélisation FEFLOW ;
- calibration en régime permanent sur la période *mai 2013* s'appuyant sur 3 objectifs :
 - reproduction de la piézométrie ;
 - reproduction des débits de la galerie drainante VIVAQUA ;
 - reproduction des débits de drainage entrants dans le système *réseau hydrographique / grands collecteurs* ;
- analyse des résultats : analyse des résultats de simulation du modèle calibré, analyse statistique des paramètres ayant été sujets à la calibration, génération des premières cartes piézométriques des unités hydrogéologiques aquifères et aquitards ;
- analyse de sensibilité et d'incertitude : estimation de la sensibilité des paramètres d'entrée principaux sur les résultats du modèle calibré (piézométrie et débits) et quantification de l'incertitude du modèle vis-à-vis de la piézométrie simulée.

BPMS étant mené à évoluer dans le futur, des phases de validation/amélioration sont à prévoir à moyen/long terme et notamment :

- validation : vérification de la capacité du modèle à reproduire d'autres événements passés en régime permanent (et si nécessaire adaptation de la calibration) ;
- calibration en régime transitoire (version 2 de *BPSM*).



9 Bibliographie

Alain Dassargues – Hydrogeology, Groundwater science and engineering (2019)

Mary P. Anderson, William W. Woessner, Randall J. Hunt – Applied Groundwater Modeling, Second Edition, Simulation of Flow and Advective Transport-Academic Press (2015)

Neven Kresic – Hydrogeology and Groundwater Modeling (2007)

Mary C. Hill, Claire R. Tiedeman – Effective Groundwater Model Calibration With Analysis of Data, Sensitivities, Predictions, and Uncertainty (2007)

Service Public de Wallonie – Masse d'eau souterraine RWE051, sables du Bruxellien (2006)

Vlaamse Milieu Maatschappij – Grondwater in Vlaanderen : het Brulandkrijtsysteem (2008)

Mathias Possemiers, Marijke Huymans, Luk Peeters, Okke Batelaan, Alain Dassargues – Relationship between sedimentary features and permeability at different scales in the Brussels Sands (2012)

N. de Ville, H.M. Le, M.A. Verbanck – Data-mining analysis of in-sewer infiltration patterns : seasonal characteristics of clearwater seepage into brussels main sewers (2013)

O. Batelaan, Y. Meyus, F. De Smedt – De grondwatervoeding van Vlaanderen (2006)

Y. Meyus, D. Adyns, S.T. Woldeamlak, O. Batelaan, F. De Smedt – Opbouw van een Vlaams Grondwatervoedingsmodel Eindrapport (2004)

Mario Schirmer, Sebastian Leschik, Andreas Musolff – Current research in urban hydrogeology, A review (2012)

Service Géologique de Belgique, BRUSTRATI3D Version 1.0, Modélisation stratigraphique en 3D du sous-sol de la Région de Bruxelles-Capitale (2017)

Bruxelles Environnement, BRUSTRATI3D Version 1.1, Harmonisation et corrections apportées aux rasters des toits des unités stratigraphiques du modèle BRUSTRATI3D version 1.0 et calcul des rasters d'épaisseurs - Addendum au rapport BRUSTRATI3D version 1.0 (Service Géologique de Belgique) (2018)

Service Géologique de Belgique, Aquale – Réalisation d'une étude hydrogéologique de la masse d'eau souterraine du Bruxellien, Rapports finaux (phase I & II) (2015)

Service Géologique de Belgique, Aquale – Réalisation d'une étude hydrogéologique de la masse d'eau souterraine du Landénien, Rapports finaux (phase I & II) (2016)

DHI – FEFLOW 7.0 user guide (2016)

DHI – FePEST in FEFLOW 7.0 user guide (2016)

WASY – FEFLOW White Papers (vol. 1 & 2) (2006)

Compagnie Intercommunale Bruxelloise des Eaux – Captage du Bois de La Cambre et de la Forêt de Soignes, zones de protection (1991)

VIVAQUA – Captages dans les sables Bruxelliens (2012)

VIVAQUA – Les services spécialisés (2012)

U.S. Geological – Survey Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the U.S. Geological Survey (1967)



Date : septembre 2020

Auteur :



Mathieu AGNIEL

Hydrogéologue

Tél: +32 2 5634381 - Gsm: 0488/230498

magniel@environnement.brussels

Ed. Resp. : F. Fontaine et M. Gryseels – Av du Port 86C/3000- 1000 Bruxelles