

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

Auteur : Monthe Kakanou, Idriss Arnaud

Promoteur(s) : Brouyere, Serge

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des mines et géologue, à finalité spécialisée en géologie de l'ingénieur et de l'environnement

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/15856>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



MODÉLISATION DE L'IMPACT DE LA CONSTRUCTION D'UN MUR EMBOUÉ SUR LES FLUX D'EAU SOUTERRAINE AU DROIT D'UN SITE CONTAMINÉ EN BORD DE RIVIÈRE

**Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade
de "Master Ingénieur Civil des Mines et Géologue"**

Par

MONTHE KAKANOU Idriss Arnaud

Matricule S196395

PROMOTEUR PROFESSIONNEL

Samuel WILDEMEERSCH
Hydrogéologue
SPAQUE

PROMOTEUR ACADÉMIQUE

Serges BROUYERE
Chargé de Cours
Université de Liège

Année académique 2021/2022

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui de près ou de loin ont exercé une influence sur le bon déroulement de ce travail. Je pense entre autres à :

- M. Frédéric Nguyen, président du jury d'admission de la section ingénieur civil des mines et géologue de l'université de Liège, qui m'a donné la chance de poursuivre cette formation à l'université de Liège ;
- M. Serge Brouyère, mon promoteur académique, qui a suscité en moi un réel attrait pour le domaine de la qualité des sols et des eaux. Merci pour votre patience et votre temps consacré lors de la rédaction de ce travail ;
- M. Philippe Orban, qui n'a jamais cessé d'être disponible pour moi et mes questions relatives à la réalisation d'un modèle hydrogéologique sur le logiciel GMS ;
- M. Samuel WILDEMEERSCH, mon promoteur professionnel, pour son encadrement durant mon stage, son professionnalisme et ses précieux conseils dans la réalisation de mon modèle ;
- Mes parents, M. et Mme KAKANOU, pour tous les efforts consentis pour que cette formation soit une réussite ;
- Mes frères et sœur TOUKAM Jeanne d'Arc, KAKANOU Albert, NGOUNOU Ludovic pour leur soutien moral dans les moments difficiles d'acclimatation à cette nouvelle vie ;
- Un merci tout particulier va à l'endroit de Mlle TSAJIO Victoire, qui a toujours été là pour moi contre vents et marées dans les bons et les mauvais moments, à me motiver et me conforter à l'idée que je pouvais y arriver ;
- La famille SIGNE TALLA, pour leur hospitalité et leurs précieux conseils lors de mon acclimatation dans cette formation à l'université de Liège ;
- Mes camarades de promotion, Georesse TATSA et Seydou Landouré, pour nos moments de motivation mutuelle et de travaux en commun ;
- Mesdemoiselles Habiba SAÏDOU GUIADEM et MEFOTIE Flavie, pour la relecture de ce travail.

Table des matières

REMERCIEMENTS	i
Table des matières	ii
Liste des Figures.....	iv
Liste des tableaux	vii
RÉSUMÉ	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I : CADRE DE L'ETUDE ET CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL.....	2
1. CADRE DE L'ETUDE.....	2
2. CADRE GEOGRAPHIQUE	3
3. CADRE GÉOMORPHOLOGIQUE.....	7
4. OCCUPATION DES SOLS	8
5. CADRE HYDROGRAPHIQUE	11
6. CADRE GEOLOGIQUE	12
6.1. Géologie régionale.....	12
6.2. Géologie locale.....	15
7. CADRE HYDROGEOLOGIQUE (SPAQuE, 2012)	17
7.1. Hydrogéologie régionale	17
7.2. Hydrogéologie locale.....	18
PARTIE 2 : MODELISATION DES ECOULEMENTS	29
1. MODÈLE CONCEPTUEL	29
1.1. Objectif et processus simulé	29
1.2. Géométrie et localisation du modèle	29
1.3. Régime d'écoulement.....	30
1.4. Paramétrisation.....	30

1.5. Discrétisation spatiale	31
1.6. Conditions frontières	32
1.7. Sollicitations externes	34
1.8. Conditions initiales	34
2. CALIBRATION DU MODÈLE.....	35
2.1. Observations	36
2.2. Paramètres à calibrer	38
2.3. Calibration manuelle	39
2.4. Calibration automatique.....	45
2.5. Validation du modèle	52
PARTIE 3 : MODELISATION DE L'EFFET DU MUR EMBOUÉ	54
1. IMPLÉMENTATION D'UN MUR DANS LE LOGICIEL GMS	54
1.1. Caractéristiques du mur sur le site d'étude	56
1.2. Caractéristiques de l'aquifère au droit du site	56
2. RÉALISATION DE LA SIMULATION.....	57
2.1. Simulation du mode « Full Barrier »	58
2.2. Influence du mur sur les écoulements	58
2.3. Influence du mur sur le gradient hydraulique.....	60
2.4. Influence du mur sur les flux d'eau souterraine	61
2.5. Modélisation du transport de particules à l'aide du module MODPATH.....	64
CONCLUSION	69
RÉFÉRENCES.....	I

Liste des Figures

Figure 1 : Variante d'assainissement avec confinement hydraulique par un mur emboué (Hydreau, 2012)	3
Figure 2 : Localisation du site d'étude (SPAQuE, 2012).....	4
Figure 3 : Parcellaire cadastral de la zone d'étude (SPAQuE, 2012)	5
Figure 4 : Plan de secteur de la zone d'étude (SPAQuE, 2012)	7
Figure 5 : Contexte géomorphologique de la zone d'étude (AMS Nord en contour foncé noir) après analyse du fichier DEM tiré de https://www.opendem.info/opendemeu_download_4258.html	8
Figure 6 : Profil topographique selon la coupe AA'	8
Figure 7 : Carte d'occupation des sols de la ville de Charleroi (CPDT, UCL/CREAT&Géomatique, & DGO4/SPW, 2022).....	9
Figure 8 : Evolution des grandes catégories d'occupation des sols dans la ville de Charleroi (CPDT – Observatoire du développement territorial, 2006)	10
Figure 9 : Superficie des zones d'affectation du plan de secteur dans la ville de Charleroi (CPDT (CREAT/UCL et Unité de géomatique/UCL) & Etat du territoire wallon, 2010).....	10
Figure 10 : Contexte hydrographique de la ville de Charleroi (HABILS, ROLAND, & RORIVE, 2014).....	11
Figure 11 : Hydrographie au droit du site AMS Nord (Hydreau, 2012)	12
Figure 12 : Carte géologique du site d'étude (DELCAMBRE & PINGOT, 2000).....	14
Figure 13 : Perméabilités obtenues à la suite de slugs tests (SPAQuE, 2012)	23
Figure 14 : Zones du site AMS Nord (Hydreau, 2012)	25
Figure 15 : Carte piézométrique de la zone d'étude (Hydreau, 2012)	26
Figure 16 : Géométrie du modèle.....	30
Figure 17 : Localisation des points de raffinage (points noirs) au droit du site AMS	31
Figure 18 : Conditions aux frontières de la couche supérieure (graviers).....	33
Figure 19 : Conditions aux frontières de la couche inférieure (bedrock)	34
Figure 20 : Représentation du résultat de la calibration en un point d'observation dans GMS (Aquaveo, 2022).....	36
Figure 21 : Anomalie rencontrée dans la partie Est du site	37
Figure 22 : Zonation des paramètres sur la base de la géologie (bedrock – plaine alluviale) ..	39

Figure 23 : Résultats après zonation des paramètres sur la base de la géologie (bedrock – plaine alluviale)	40
Figure 24 : Valeurs calculées aux points d'observation après zonation des paramètres sur la base de la géologie (couche supérieure)	41
Figure 25 : Valeurs mesurées - valeurs observées après zonation des paramètres sur la base de la géologie (couche supérieure)	42
Figure 26 : Zonation de la couche supérieure sur base de l'historique d'exploitation	42
Figure 27 : Valeurs calculées aux points d'observation après zonation des paramètres sur la base de la géologie (couche inférieure)	44
Figure 28 : Valeurs mesurées - valeurs observées après zonation des paramètres sur la base de la géologie (couche inférieure).....	44
Figure 29 : Zonation de la couche inférieure (I : Bedrock ; II : Bedrock faillé).....	45
Figure 30 : Hauteurs piézométriques et sens d'écoulement général (flèches noires) après calibration automatique	47
Figure 31 : Valeurs calculées aux points d'observation après calibration automatique (couche supérieure).....	48
Figure 32 : Valeurs mesurées - valeurs observées après calibration automatique (couche supérieure).....	48
Figure 33 : Valeurs calculées aux points d'observation après calibration automatique (couche inférieure).....	49
Figure 34 : Valeurs mesurées - valeurs observées après calibration automatique (couche inférieure).....	49
Figure 35 : Analyse de sensibilité sur les paramètres de recharge.....	50
Figure 36 : Analyse de sensibilité sur les paramètres de conductivité hydraulique.....	51
Figure 37 : Analyse de sensibilité sur tous les paramètres	51
Figure 38 : Valeurs calculées aux points d'observation avec les paramètres optimisés (couche supérieure).....	53
Figure 39 : Implémentation du mur emboué dans le programme GMS Modflow (BOUKHEMACHA, et al., 2013)	55
Figure 40 : Modes de pénétration de la barrière dans l'aquifère	55
Figure 41 : Localisation de la barrière hydraulique sur le site AMS Nord.....	56
Figure 42 : Epaisseur de la nappe alluviale au droit de la zone du mur (sud-ouest) (Hydreau, 2012).....	57

Figure 43 : Carte piézométrique de la zone d'étude après l'implantation du mur	58
Figure 44 : Carte piézométrique de la couche supérieure (au-dessus) et de la couche inférieure (en dessous), avant (à gauche) et après (à droite) l'implantation du mur	59
Figure 45 : Localisation des piézomètres pour le calcul des gradients hydrauliques (Jamin & Brouyère, 2020).....	60
Figure 46 : Vue rapprochée des vitesses d'écoulement au droit du mur avant (gauche) et après (droite) son implantation dans la couche supérieure	62
Figure 47 : Vitesses d'écoulements dans la couche supérieure (au-dessus) et dans la couche inférieure (en dessous), avant (à gauche) et après (à droite) l'implantation du mur	63
Figure 48 : zone de flux faible (Jamin & Brouyère, 2020) et écoulement préférentiel (en bleu) en aval du mur.....	64
Figure 49 : Effet de la barrière sur le parcours des particules au cœur de la nappe des graviers (à gauche : avant l'implantation de la barrière ; à droite : après l'implantation de la barrière).....	65
Figure 50 : Vue en 3D du transport des particules au cœur de la nappe des graviers après l'implantation de la barrière	66
Figure 51 : Effet de la barrière sur le parcours des particules situées à l'interface entre les deux nappes (à gauche : avant l'implantation de la barrière ; à droite : après l'implantation de la barrière).....	67
Figure 52 : Vue en 3D du transport des particules à l'interface des deux nappes après l'implantation de la barrière	68

Liste des tableaux

Tableau 1 : Parcelles cadastrales dans la zone d'étude (SPAQuE, 2006).....	6
Tableau 2 : Forages utilisés pour l'établissement de la carte géologique Fontaine L'Evêque - Charleroi 46/7-8 (SPAQuE, 2006)	12
Tableau 3 : Ouvrages miniers situés à moins de 25 m du périmètre d'étude (Hydreau, 2012) ..	16
Tableau 4 : Perméabilités moyennes calculées par zone (Hydreau, 2012).....	24
Tableau 5 : Vitesses d'écoulement calculées (SPAQuE, 2012).....	27
Tableau 6 : résultats des essais perméabilités en laboratoire sur le bed-rock (SPAQuE, 2012)	27
Tableau 7 : Coordonnées des points de raffinage	31
Tableau 8 : Points d'observation dans la nappe du bedrock houiller	36
Tableau 9 : Points d'observation dans la nappe alluviale	38
Tableau 10 : Valeurs initiales des paramètres à calibrer	39
Tableau 11 : Zonation des paramètres avant la calibration manuelle	39
Tableau 12 : Correspondance entre zones du site et zonation du modèle	43
Tableau 13 : Conductivités hydrauliques optimisées à l'issue de la calibration automatique..	46
Tableau 14 : Recharges optimisées après la calibration automatique	46
Tableau 15 : Relevés piézométriques du site AMS Nord en avril 2011.....	52
Tableau 16 : Caractéristiques hydrauliques du mur	57
Tableau 17 : Gradients hydrauliques calculés après simulations sur GMS	60
Tableau 18 : Gradients obtenus lors de l'étude FVPDM (Jamin & Brouyère, 2020).....	61
Tableau 19 : Comparaison entre variations de flux calculés et flux obtenus lors de l'étude FVPDM.....	61

RÉSUMÉ

Dans le cadre de sa candidature à l'organisation de la compétition de football Euro 2020, la Belgique entreprend la restauration d'un ancien site industriel, AMS Nord, en vue de la construction d'un nouveau stade de football dans la ville de Charleroi.

À la suite de plusieurs travaux antérieurs commandités par la SPAQUE, la méthode d'assainissement retenue est la mise en place d'un mur pour le confinement hydraulique d'une tâche de pollution présentant une menace pour la Sambre située aux abords. Le monitoring de cette méthode d'assainissement a permis à l'université de Liège de mettre en place une étude de flux basée sur la méthode FVPDM. Une des recommandations finales de cette étude est la mise en place d'un modèle d'écoulement pour corroborer les résultats obtenus à savoir que le mur joue son rôle de barrière sans pour autant totalement annuler les flux d'eau souterraine.

La mise en place d'un modèle d'écoulements permet de mettre en évidence deux sens d'écoulements orientés vers l'ouest pour l'un, et vers le sud-est pour l'autre en direction de la Sambre. Ce modèle d'écoulement est utilisé pour l'implémentation numérique d'un mur emboué à l'aide du logiciel GMS (Groundwater Modeling System). Les résultats de cette simulation de l'impact du mur montrent, au droit de 4 piézomètres implantés lors de l'étude FVPDM en amont (P701 et P703) et en aval (P702 et P704), que les gradients hydrauliques amont/aval du mur sont multipliés par plus de quatre, et les flux de Darcy sont réduits à plus de 80%, mis à part dans le piézomètre P701 où le flux est cinq fois supérieur à celui avant l'implantation du mur.

Globalement, ces résultats concordent avec ceux obtenus lors des essais FVPDM. La même conclusion est ainsi tirée : le mur joue effectivement son rôle de barrière sans pour autant être parfaitement imperméable. Notamment, un contournement par le bas de la barrière est observé. Un phénomène de retour vers l'aval du mur est observé lors de la simulation d'un transport de particules à l'aide du module MODPATH du logiciel GMS. Ce phénomène est interprété avec précaution car il pourrait être dû à des artefacts numériques liés aux conditions aux frontières de la Sambre et du mur.

Mots-clés : Modélisation hydrogéologique, écoulements, mur emboué, GMS, AMS Nord.

ABSTRACT

As part of its candidacy to organize the Euro 2020 football competition, Belgium is undertaking the restoration of a former industrial site, AMS Nord, with a view to the construction of a new football stadium in the city of Charleroi.

Following several previous works commissioned by SPAQUE, the remediation method adopted is the installation of a wall for the hydraulic containment of a pollution stain presenting a threat to the Sambre located in the vicinity. The monitoring of this sanitation method enabled the University of Liège to set up a flow study based on the FVPDM method. One of the final recommendations of this study is the establishment of a flow model to corroborate the results obtained, namely that the wall plays its role as a barrier without completely cancelling groundwater flows.

The implementation of a flow model makes it possible to highlight two directions of flow oriented towards the west for one, and towards the south-east for the other towards the Sambre. This flow model is used for the digital implementation of a mud wall using the GMS (Groundwater Modeling System) software. The results of this simulation of the impact of the wall show, in line with 4 piezometers installed during the FVPDM study upstream (P701 and P703) and downstream (P702 and P704), that the hydraulic gradients upstream/downstream of the wall are multiplied by more than four, and the Darcy fluxes are reduced to more than 80%, except in the P701 piezometer where the flux is five times greater than that before the installation of the wall.

Overall, these results are consistent with those obtained during the FVPDM trials. The same conclusion is thus drawn: the wall effectively plays its role as a barrier without being perfectly impermeable. In particular, a flashover from the bottom of the barrier is observed. A return phenomenon downstream of the wall is observed during the simulation of particle transport using the MODPATH module of the GMS software. This phenomenon is interpreted with caution because it could be due to digital artefacts linked to the conditions at the borders of the Sambre and the wall.

Keywords: Groundwater modeling, flows, mud wall, GMS, AMS Nord.

INTRODUCTION

Le processus de gestion des eaux et sols pollués prend en compte, avant l'action directe d'assainissement sur le polluant ; les mesures de sécurité, afin de limiter le potentiel d'utilisation des sols et des eaux pollués ; et le confinement, afin d'empêcher le contact entre la pollution et les récepteurs. Une des techniques généralement utilisées pour cette étape du confinement est celle du confinement hydraulique par la mise en place d'un mur emboué.

Dans le cadre de la restauration d'un site avec un lourd passé industriel, dénommé AMS Nord, devant abriter un stade de football dans la ville de Charleroi, un mur emboué est construit afin de confiner une tâche de pollution mettant en péril la qualité de la Sambre coulant aux abords.

La question de savoir si le mur emboué joue effectivement son rôle de barrière imperméable est donc d'une problématique capitale.

Une étude de flux a préalablement été menée par l'Université de Liège (Jamin & Brouyère, 2020) afin de contrôler l'aptitude du mur à empêcher les écoulements de la nappe alluviale vers la Sambre. Cette étude a révélé que le mur joue son rôle de barrière sans pour autant être imperméable. L'objectif de ce présent travail consiste à proposer un modèle d'écoulement afin d'étudier l'impact de la construction du mur emboué sur les écoulements d'eau souterraine au droit du site considéré, et par suite de corroborer les résultats de l'étude de flux précitée.

Outre l'introduction et la conclusion, ce travail abordera tour à tour la définition du cadre de l'étude et la présentation du contexte environnemental du site ; la modélisation des écoulements au droit du site ; la modélisation de l'impact du mur sur les écoulements d'eau souterraine.

PARTIE I : CADRE DE L'ETUDE ET CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

Avant de débiter tout travail scientifique, il convient de présenter le cadre de l'étude et le contexte environnemental du site d'étude. Ces deux thèmes constitueront la base des travaux ultérieurs.

1. CADRE DE L'ETUDE

Dans le cadre d'une possible candidature à l'organisation de la compétition européenne de football Euro 2020, la Belgique a entrepris des travaux pour la construction d'un nouveau stade dans la ville de Charleroi. Le site, dénommé « AMS Nord », devant accueillir ce futur stade est situé route de Mons et rue Gué Gobeau et correspond à l'ancien siège d'une usine sidérurgique et d'une cokerie établies sur les anciennes communes de Marchienne-au-Pont et Monceau-sur-Sambre, à l'Ouest de Charleroi. La longue période d'exploitation industrielle du site d'AMS Nord a conduit à une contamination des sols et des eaux souterraines au droit de celui-ci.

Le site a fait l'objet de plusieurs travaux initiés par la SPAQUE, notamment un projet d'assainissement qui a suggéré la construction d'un mur emboué devant servir comme barrière hydraulique (Figure 1).

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

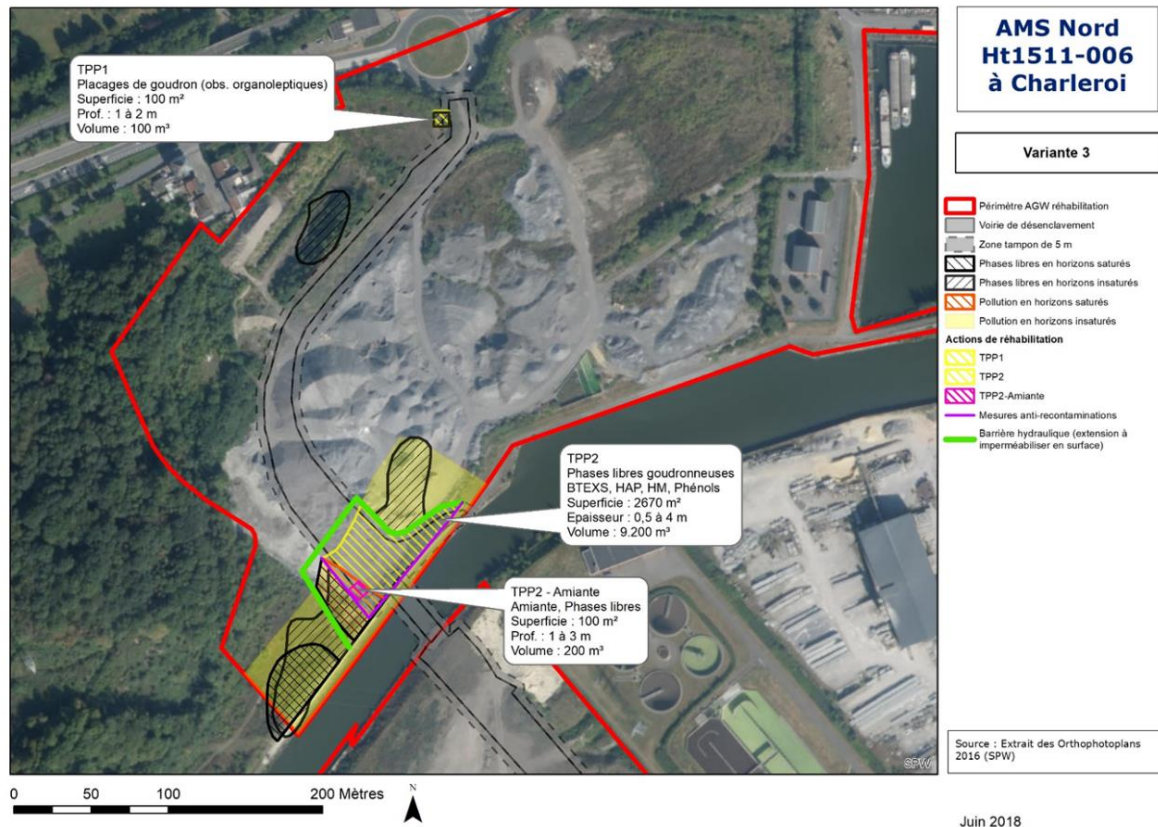


Figure 1 : Variante d'assainissement avec confinement hydraulique par un mur emboué (Hydreaux, 2012)

À la suite de l'implantation de ce mur, fin juin 2019, et à la demande de la SPAQUE, l'équipe HGE-ULiège a réalisé deux phases de mesure du flux d'eau souterraine par la méthode « FVPDM » (Finite Volume Point Dilution Method) (Jamin, 2019), l'une avant et l'autre après installation de la barrière. Les résultats de cette étude ont conclu que le mur jouait son rôle de barrière sans pour autant être totalement imperméable. Une recommandation a donc été faite pour qu'une modélisation hydrogéologique des écoulements soit effectuée afin de corroborer ces résultats.

2. CADRE GEOGRAPHIQUE

Le site AMS Nord est situé dans la province du Hainaut, précisément dans la ville de Charleroi, à cheval entre les sections de Monceau-sur-Sambre et de Marchienne-au-Pont. Il est bordé au Nord par la Route de Mons (RN90) et au Sud par la Sambre (Figure 2). Un bassin dit de virement permettant aux péniches d'opérer un demi-tour est inclus dans le périmètre d'étude. Les dernières constructions de Marchienne-au-Pont constituent la limite Est du site. Il s'agit essentiellement de bâtiments commerciaux et industriels. À l'Ouest, on trouve le terroir du Hameau et au Nord-Ouest, quelques maisons d'habitation.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière



Figure 2 : Localisation du site d'étude (SPAQuE, 2012)

Du point de vue cadastral, les différentes parcelles du site (Figure 3) appartiennent actuellement à plusieurs propriétaires (Tableau 1). Auparavant, ces parcelles propres au site étaient la propriété de propriétaires uniques et successifs parmi lesquels les « Acières et Minières de la Sambre » d'où a été tiré le nom AMS.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

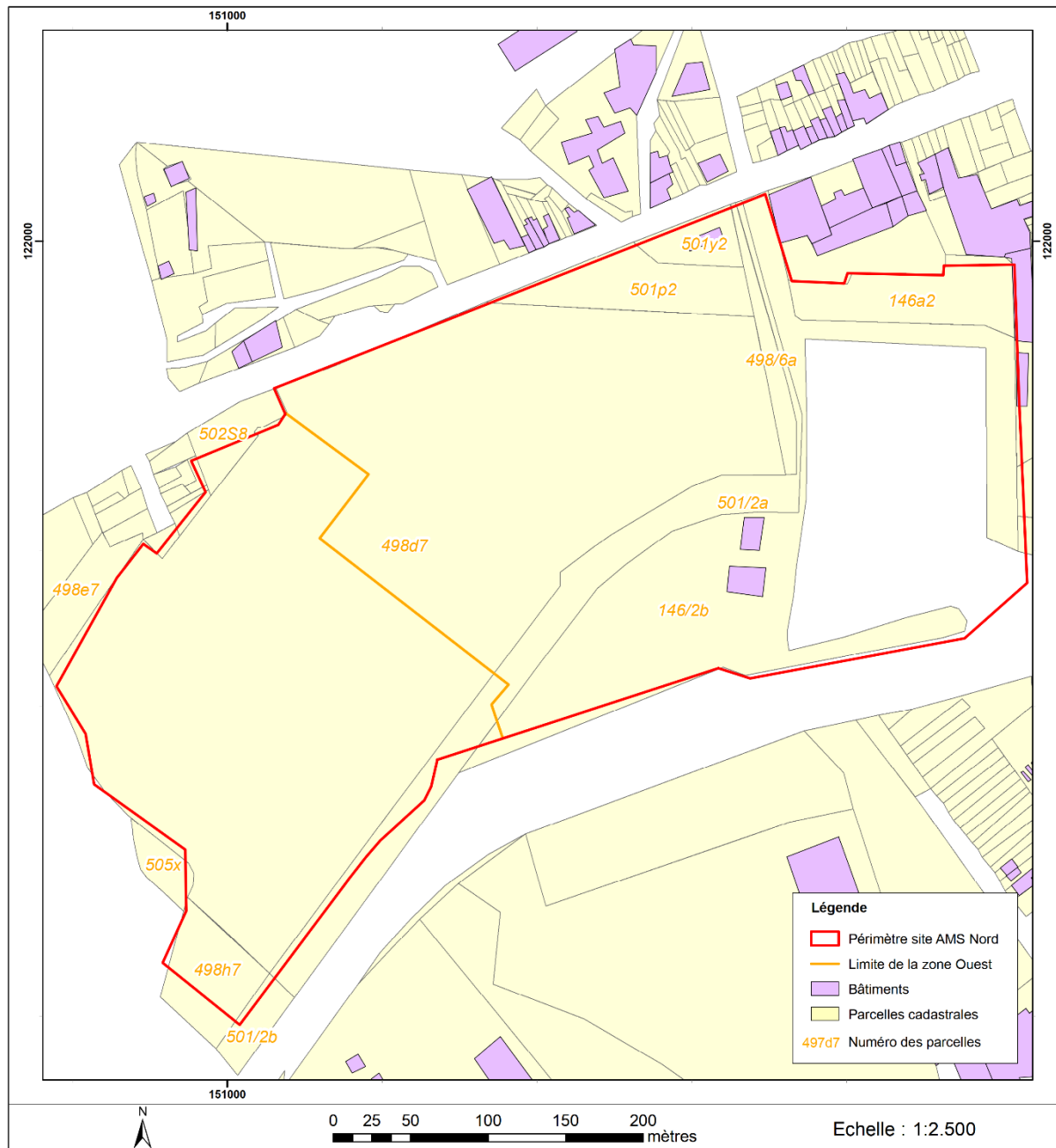


Figure 3 : Parcellaire cadastral de la zone d'étude (SPAQuE, 2012)

Certaines des parcelles gérées par le port autonome de Charleroi font l'objet de contrats de concessions avec diverses sociétés pour des utilisations industrielles. Il s'agit des parcelles suivantes :

- 146a2 : SA LIXON pour le stockage de matériaux de construction ;
- 146/2b : SC IGRETEC comme station de pompage ;
- 498d7, 501/2a, 146/2b : SA THY-MARCINELLE dans le cadre du stockage et traitement de scories de hauts-fourneaux.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

Tableau 1 : Parcelles cadastrales dans la zone d'étude (SPAQuE, 2006)

Parcelle	Superficie	Propriétaire	Adresse
498d7	9 ha 65 a 51 ca	Domaine de la Région Wallonne – Biens gérés par le Port Autonome de Charleroi	rue de Marcinelle, 88 6000 Charleroi
498/6a	16 a 60 ca	Domaine de la Région wallonne / Ministère de l'équipement et des Transports. / Direction de la Gestion Domaniale	rue Canal de l'Ourthe, 9 4031 Liège
501p2	41 a 21 ca	Domaine de l'Etat / SPF Mobilité et Transports / Administration du Transport Terrestre pour STIC-Metro	Cantersteen, 12 1000 Bruxelles
501y2	15 a 46 ca	Société Hydretlpha SA AFVR en clôture de dissolution c/o STELFAX société absorbante	Avenue du Sud, 7 6001 Charleroi
501/2a	1 ha 04 a 20 ca	Domaine de la Région wallonne / Ministère de l'équipement et des Transports. / Direction de la Gestion Domaniale	rue Canal de l'Ourthe, 9 4031 Liège
146a2	50 a 55 ca	Domaine de la Région Wallonne – Biens gérés par le Port Autonome de Charleroi	rue de Marcinelle, 88 6000 Charleroi
146/2b	3 ha 20 a 25 ca	Domaine de la Région Wallonne – Biens gérés par le Port Autonome de Charleroi	rue de Marcinelle, 88 6000 Charleroi
501/2b	12a 20ca	Electrabel	Rue Chauw à Roc, 6 – 6044 Roux
498h7	34a 1ca	Electrabel	Rue Chauw à Roc, 6 – 6044 Roux

En se basant sur le plan de secteur de la ville de Charleroi, la zone concernée est entièrement en zone d'activité économique industrielle (Figure 4), de même que les parcelles contiguës à l'est et au sud-ouest, ainsi qu'une partie des parcelles au sud de la Sambre, le reste étant en zone d'activité économique mixte. Les zones situées au nord de la route de Mons sont

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

en revanche en zone d'habitat. Le terail du Hameau formant quant à lui une zone forestière à l'ouest.

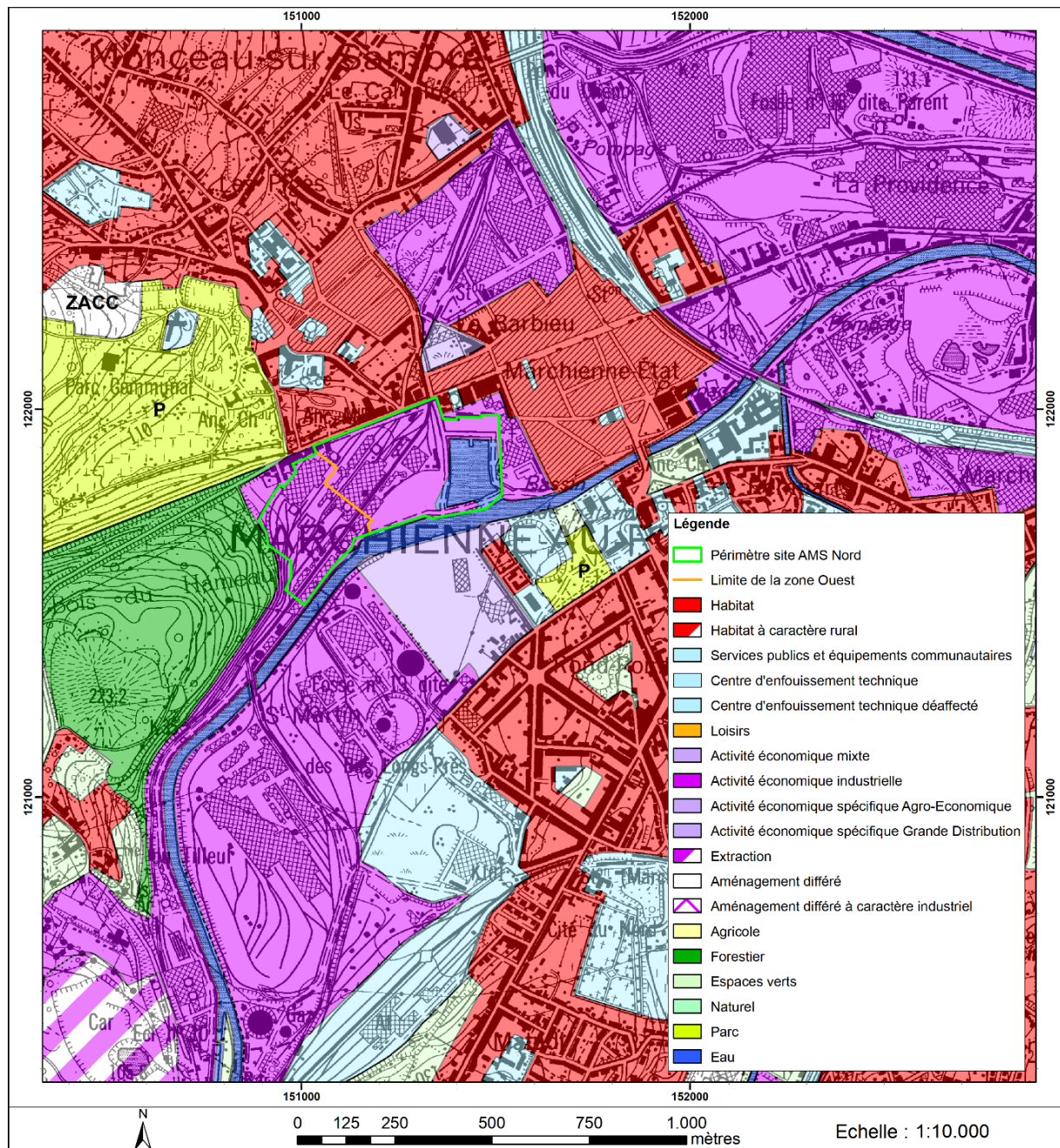


Figure 4 : Plan de secteur de la zone d'étude (SPAQuE, 2012)

3. CADRE GÉOMORPHOLOGIQUE

Le site AMS Nord est situé dans une zone d'altitude variant approximativement entre 95 et 120 m (Figure 5).

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

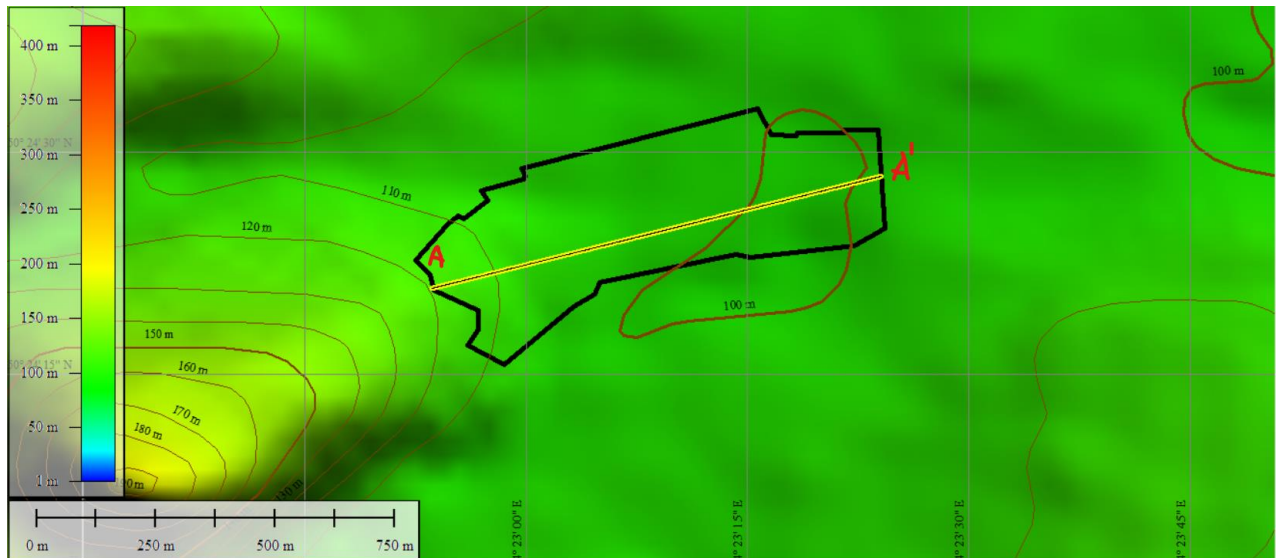


Figure 5 : Contexte géomorphologique de la zone d'étude (AMS Nord en contour foncé noir) après analyse du fichier DEM tiré de https://www.opendem.info/opendemeu_download_4258.html

L'analyse de cette carte géomorphologique à travers une coupe orientée O-E (Figure 6) montre successivement une pente suivie d'un plateau dans la partie centrale du site et une cuvette à l'Est du site. Cette cuvette est le siège du bassin de virement précédemment emménagé.

From Pos: 50° 24' 20.8848" N, 4° 22' 53.8833" E

To Pos: 50° 24' 28.4584" N, 4° 23' 24.0474" E

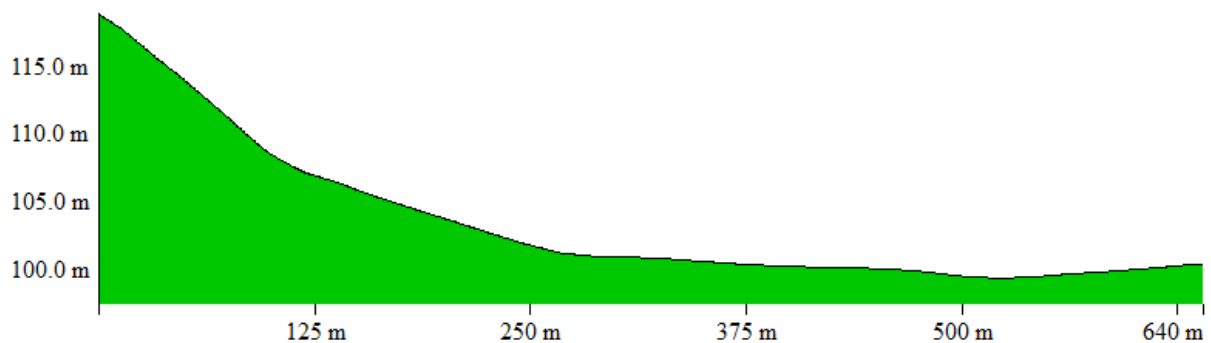


Figure 6 : Profil topographique selon la coupe AA'

4. OCCUPATION DES SOLS

L'occupation des sols dans la zone est majoritairement de type zone artificialisée (Figure 7). C'est une zone fortement urbanisée à usage majoritairement industriel et artisanal. On note la présence de plusieurs pôles urbains tout autour de la ville de Charleroi à l'instar de celui de Fontaine l'Evêque, situé à l'ouest du site AMS Nord.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

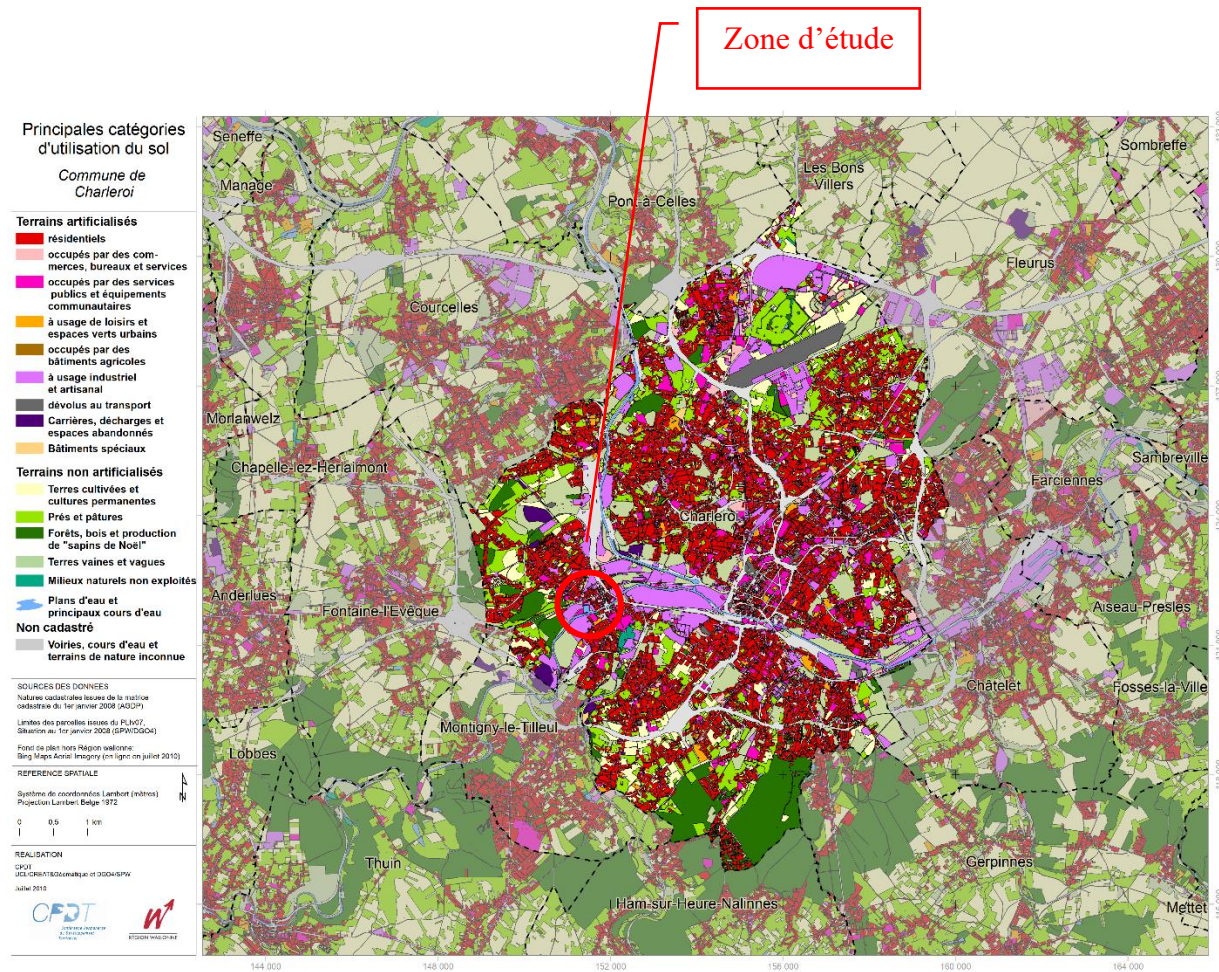


Figure 7 : Carte d'occupation des sols de la ville de Charleroi (CPDT, UCL/CREAT&Géomatique, & DGO4/SPW, 2022)

Depuis le début des années 1990, l'artificialisation des terrains s'accroît, au détriment des terrains agricoles principalement (Figure 8). La catégorie « autres » reprend les milieux semi-naturels, les zones humides, les surfaces en eau et les terrains non cadastrés ou de nature inconnue.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

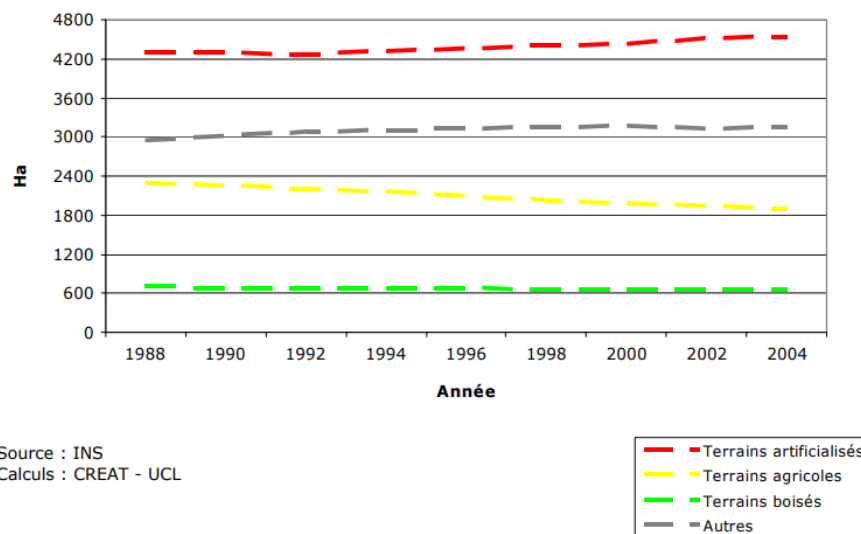


Figure 8 : Evolution des grandes catégories d'occupation des sols dans la ville de Charleroi (CPDT – Observatoire du développement territorial, 2006)

Les zones d'habitat représentent la plus grande superficie de la ville de Charleroi avec 44,4% de la superficie totale. Ensuite suivent les zones d'espace verts (13,8%) et les zones d'activité économique (12,7%), dont fait partie le site AMS Nord. Les autres zones d'affectation ne dépassant pas les 8% chacune.

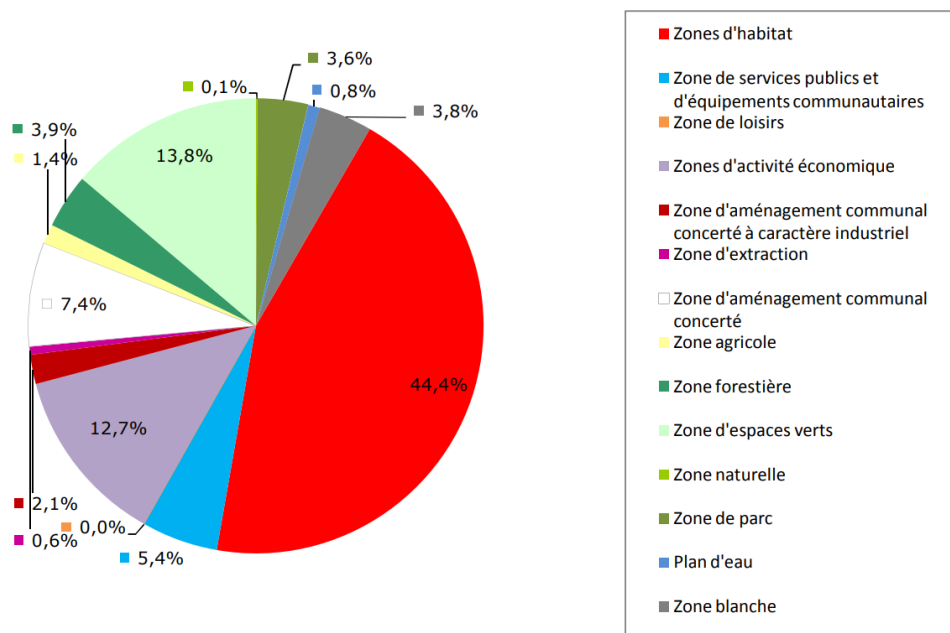


Figure 9 : Superficie des zones d'affectation du plan de secteur dans la ville de Charleroi (CPDT (CREAT/UCL et Unité de géomatique/UCL) & Etat du territoire wallon, 2010)

Concernant le milieu naturel, on note uniquement la présence d'un site NATURA 2000 à 1600 m à l'Ouest du périmètre d'étude. Il s'agit du site de la Haute Sambre en aval de Thuin.

5. CADRE HYDROGRAPHIQUE

Du point de vue hydrographique, la ville de Charleroi se trouve principalement dans le bassin versant de la Sambre. Elle est bordée par les bassins des affluents de la Sambre tels que le Piéton, l'Eau d'Heure et le Ruisseau de Soleilmont (Figure 10). Un bassin de virement pour le demi-tour des péniches est également présent en bordure Est du site d'étude. La cote de la Sambre a été mesurée à environ + 100,4 m le 10 août 2010 lors des relevés topographiques effectués. Les cotes de la rivière et du bassin de virement sont régulées par une écluse en aval du site avec des cotes de +100,2 m passant à +100,4 m en période d'étiage. La cote de base du bassin serait de +96,7 m (ancrage des perrés à la cote + 95,3 m) et celle de la Sambre de +96,4 m (ancrage des perrés à la cote + 95,2 m). L'Ernelle traverse le site du nord au sud pour se déverser dans la Sambre. Au droit du site, l'Ernelle est canalisée et son parcours est souterrain (Figure 11). L'Ernelle se jette dans la Sambre en immergé.

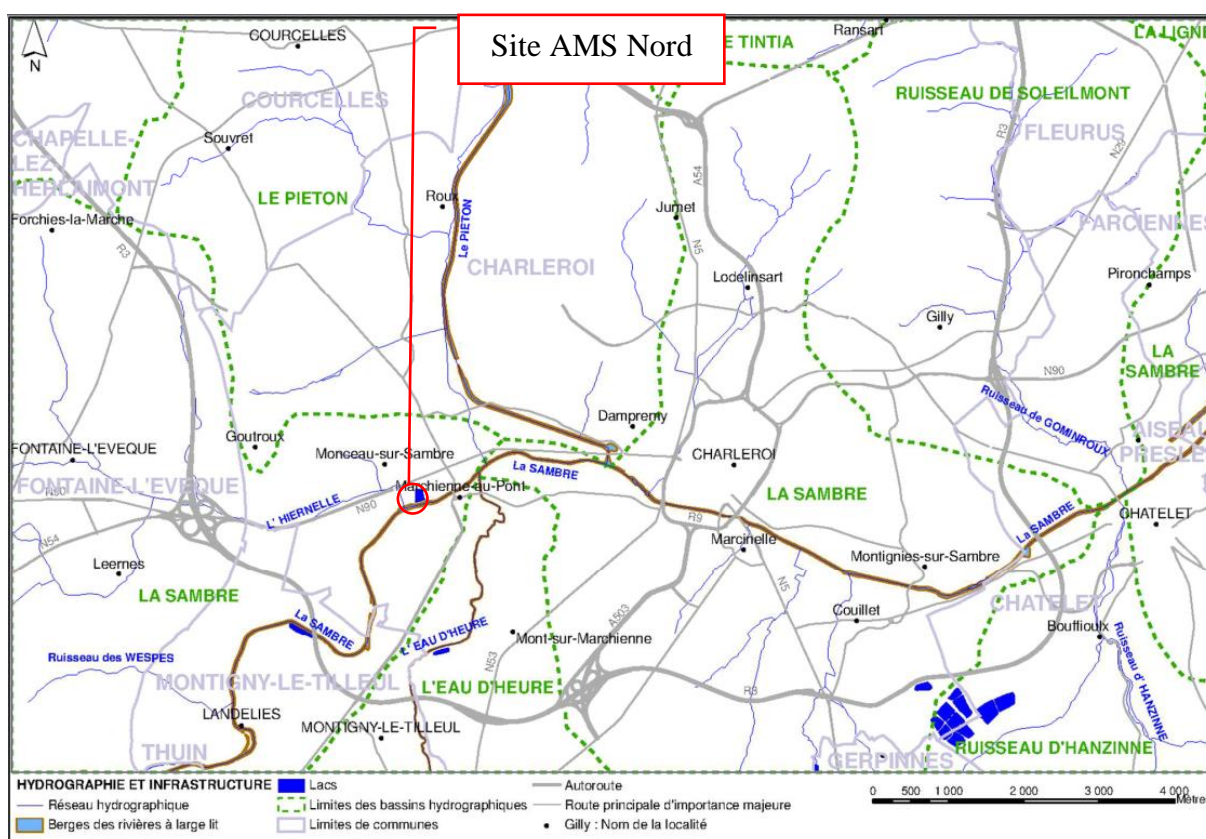


Figure 10 : Contexte hydrographique de la ville de Charleroi (HABILS, ROLAND, & RORIVE, 2014)

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière



Figure 11 : Hydrographie au droit du site AMS Nord (Hydreau, 2012)

6. CADRE GEOLOGIQUE

6.1. Géologie régionale

La zone d'étude est située dans le bassin paléozoïque du Houiller de Charleroi. A l'échelle régionale, les terrains affleurants appartiennent exclusivement au groupe Houiller avec un léger recouvrement d'alluvions modernes car l'altération du socle s'est accompagnée de dépôts alluvionnaires modernes. Dans le sous-sol du site étudié, la plaine de la Sambre est composée par des alluvions modernes (AMO, Holocène), exploitées par plusieurs prises d'eau situées en dehors du site (SPAQuE, 2006). L'épaisseur de ces alluvions modernes est comprise entre 7,4 et 10,9 m (Tableau 2).

Tableau 2 : Forages utilisés pour l'établissement de la carte géologique Fontaine L'Evêque - Charleroi 46/7-8 (SPAQuE, 2006)

Forage Alluvions	AMO (m)	Profondeur du forage
N° 48	7,40	33,0
N° 49	10,60	35,0
N° 50	10,90	20,0
N° 51	8,80	22,0

Sous ces couches quaternaires, le socle paléozoïque est représenté par les roches du Carbonifère (Houiller) dont les couches ont une orientation globale Est-Ouest et un pendage moyen de 50° vers le Sud. La carte géologique (Figure 12) renseigne une région très fracturée avec la présence d'une faille de chevauchement (Faille de Monceau) au droit du site sous les alluvions de la Sambre. Cette faille est de direction Sud-Est – Nord-Ouest et de pendage Sud-Ouest. Elle semble passer au Nord-Ouest de la partie Ouest investiguée.

Sur base des données de la carte géologique et des anciennes dénominations des cartes topographiques, le site appartient à la concession de houille des Charbonnages de Monceau-Fontaine et de Marcinelle Nord. Il est compris entre deux puits majeurs, référencé sous le N°37 (Puits n°19 Bas Longs Prés ou Fosse dite St Martin, puits de 740m) et le puits N°56 du quartier du Barbieu (SPAQuE, 2006). Les données disponibles et la position dans l'ancien lit de la Sambre, permettent de croire à l'absence d'ouvrages miniers dans le site étudié. Mais une attention doit être de mise lors des travaux de découverte, dans la recherche d'anciens ouvrages, un certain nombre de ceux-ci n'ayant pu être localisés et d'autres non répertoriés pouvant exister (SPAQuE, 2006).

Carte géologique de la zone d'étude

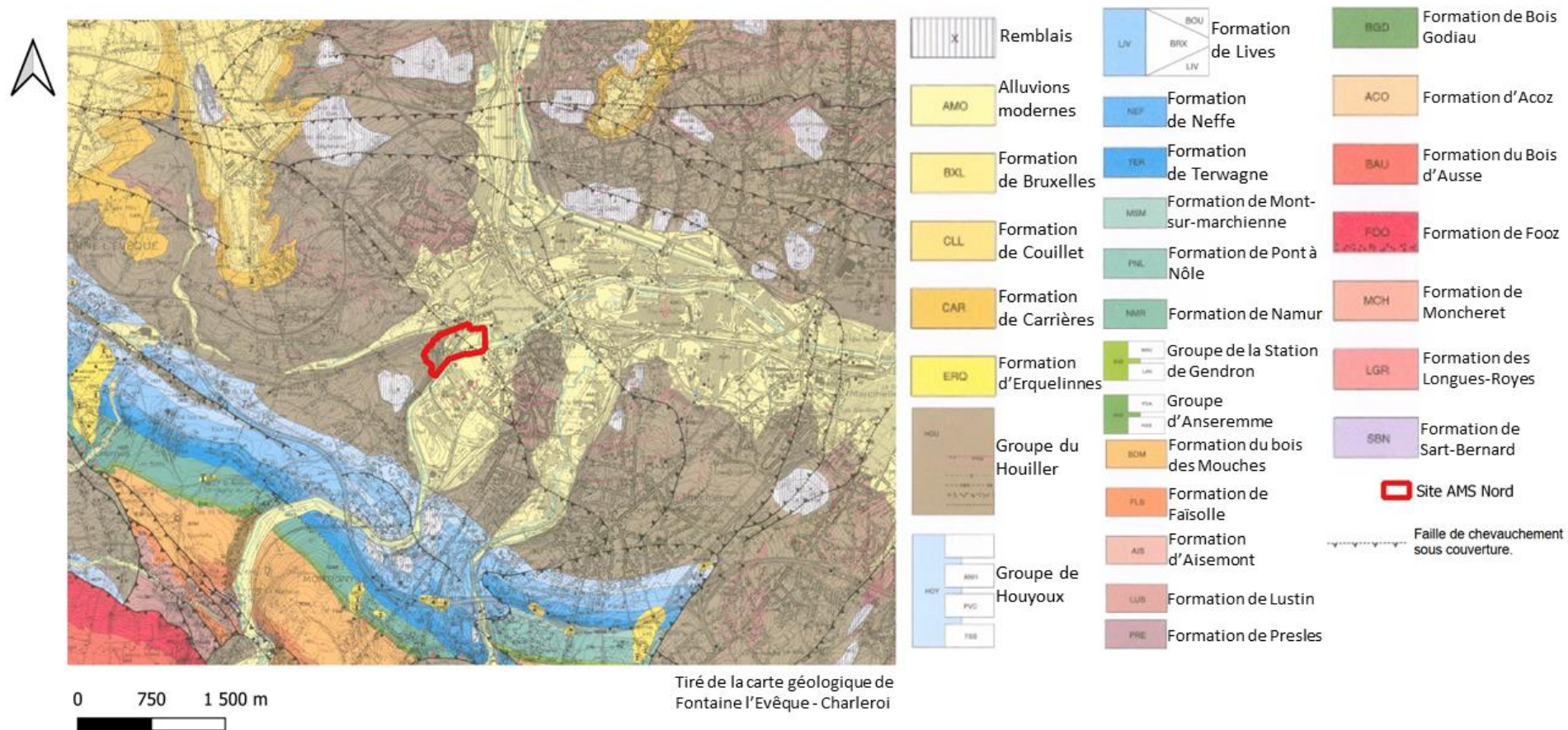


Figure 12 : Carte géologique du site d'étude (DELCAMBRE & PINGOT, 2000)

6.2. Géologie locale

A l'échelle locale, le sous-sol du site étudié montre du haut vers le bas :

Remblais

Des remblais sont présents sur une grande majorité du site. Ils sont cependant absents à certains endroits sur le plateau dominant la cokerie.

Dans la zone centrale et la zone au sud-est, les remblais débutent avec une couche de scories de 0,2 à 0,5 m d'épaisseur. Dans la zone imperméabilisée (bassin de décantation) exploitée par RIVA, ces scories surmontent une couche d'argile d'environ 0,2 à 0,5 m d'épaisseur.

Sous ces terrains, les remblais sont très hétérogènes (granulométrie très variable). Leur couleur est généralement grise à noire, voire brune, verdâtre ou même rougeâtre par endroit.

Quaternaire

AMO Alluvions modernes de la Sambre (Holocène et Pléistocène moyen, Campinien).

Passées de gravier roulé déposé irrégulièrement en alternance avec des limons, des argiles et des silts, ces niveaux peuvent avoir quelques mètres de puissance sous le site. Les données des archives du Service Géologique donnent pour les nombreuses reconnaissances de la plaine de la Sambre de 6 à 11 m d'alluvions sur le socle Houiller. Ces données sont concordantes avec celles obtenues au Sud Est du site pour les forages de reconnaissance du métro léger de Charleroi (en bordure de Sambre). Souvent ces alluvions sont recouvertes de 4 à 5 m de remblais anthropiques.

Paléozoïque (Primaire)

Carbonifère supérieur (HOU, Groupe Houiller)

Westphalien inférieur (H2, WA)

Grès, schistes et psammites à veines de charbon. Ces niveaux houillers constituent le substratum du site et ont été reconnus par l'activité minière sur plus de mille mètres sous le site. Ces niveaux comprennent sur base de la classification actuelle des niveaux de la Formation d'Andenne et de la Formation de Châtelet.

Si on se base sur les 4 sondages du forage géologique 434 réalisé dans la zone des hauts fourneaux, on peut dire que le houiller est présent entre 9,0 et 10 m sous la surface du sol. La

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

limite entre les remblais, le remanié et les alluvions n'a pas été donnée avec précision. Dans le sondage n°1, le remblai et remanié a été détecté jusqu'à 6,5 m. Dans le sondage n°2 les traces de remblais ont été détectées jusque 4,5 m. Dans le sondage n°3 les traces de remblais ont été détectées jusque 2,0 m. Il est à noter que la localisation exacte des différents sondages n'est pas connue.

Si on se base sur le forage géologique 646, réalisé dans le cadre de la mise en place du métro léger, au niveau de la pointe nord-est du bassin de virement, il a été rencontré 2,4m de remblais puis des alluvions modernes entre 2,4 et 10,9 m. A partir de 10,9 m, le houiller a été rencontré.

Le socle paléozoïque, plissé durant l'orogène hercynien, est représenté par les roches du Carbonifère (Groupe Houiller) dont les couches ont une orientation Est - Ouest ou Nord Est - Sud Ouest. Le sillon de la Sambre est constitué des roches du houiller du Nord de la Faille du Midi. Selon les affleurements proches, la direction des couches sous le site serait Est Ouest (de N85°E à N75°E) et le pendage serait à pente Sud (de 35 à 60° vers le SSE). Cette structure place la région dans le flanc Nord d'une structure synclinale. Selon la reconstitution des entités tectoniques, le site appartiendrait au Massif charrié de la Tombe (sur le sous-massif constitué exclusivement de Houiller de l'écaille de Foret).

La situation géologique se résume sous la couverture d'alluvions modernes à un substrat paléozoïque formé de grès, schistes et psammites du Westphalien A sur le flanc Nord d'un synclinal Houiller formé par les écailles de charriage du Massif de la Tombe.

L'examen des données et archives en possession de l'Administration en charge des risques miniers montre que des ouvrages miniers (galeries d'écoulement) sont connus dans le périmètre considéré ou à moins de 25 m (+ imprécision sur la position du puits). L'orifice de ces galeries est situé juste au Nord du site d'AMS-Nord, à proximité de la route de Mons.

Tableau 3 : Ouvrages miniers situés à moins de 25 m du périmètre d'étude (Hydreau, 2012)

N° Puits	N° Position	Dénomination	Coordonnées Lambert 72 approximatives		Précision (m)	Profondeur (m)	Section (m)	Revêtement
			X	Y				
038710	1	Orifice galerie d'écoulement	151.254	122.004	20	?	?	?
038711	1	Orifice galerie d'écoulement	151.168	121.974	20	?	?	?

7. CADRE HYDROGEOLOGIQUE (SPAQuE, 2012)

7.1. Hydrogéologie régionale

Le sous-sol de la vallée de la Sambre à Charleroi renferme plusieurs niveaux lithologiques susceptibles de contenir une nappe aquifère. La vulnérabilité de ces nappes est importante du fait de la forte urbanisation et des nombreuses activités économiques dans la zone.

Remblais

Les remblais, en fonction de leur perméabilité et de celle des terrains sous-jacents, peuvent renfermer localement des poches d'eau en fonction de la perméabilité du sol sous-jacent.

Quaternaire

Les alluvions de la Sambre et ses affluents renferment une nappe superficielle, principalement au niveau des faciès sablo-graveleux. Cette nappe est généralement libre et peu profonde (3-4 m environ). Les faciès graveleux constituent un réservoir d'eau important et productif. Cette nappe peut être libre ou captive sous les faciès alluviaux limoneux s'ils sont relativement imperméables.

L'exutoire principal de la nappe des alluvions est constitué par la Sambre. Afin de lutter contre les inondations et lors du développement industriel de la région (augmentation de la capacité de navigation), la Sambre a été plusieurs fois canalisée et son cours régulé par des écluses et des barrages. Le lit actuel de la Sambre ne correspond donc pas à son lit originel et bien que globalement drainante, la Sambre peut localement alimenter la nappe suite à ces modifications de tracé et à l'imperméabilisation de ses berges.

Cette nappe est également fortement exploitée par les industries jalonnant la vallée de la Sambre. La qualité de ces eaux est cependant médiocre, du fait de leur forte vulnérabilité face à une pollution en provenance de la surface.

Plusieurs points de démergement ont également dû être mis en place dans cette zone afin de pallier aux affaissements miniers (ancienne exploitation de la houille) et d'éviter une inondation des parties basses de l'agglomération carolorégienne.

L'alimentation de cette nappe se fait par apport météorique mais également par déversement des nappes présentes sur les versants.

Primaire

Le bedrock primaire peut localement constituer un aquifère en fonction des différents faciès qu'il présente (schistes, psammites, grès) et du degré de fracturation de la roche. Au niveau régional, la nappe présente dans le bedrock peut être captive sous les argiles d'altération. En général, les perméabilités sont faibles à moyennes en fonction du degré de fracturation et du remplissage ou non des fissures par les matériaux d'altération.

Cette nappe en raison de sa forte compartimentation est beaucoup moins vulnérable aux contaminations à partir de la surface. Les eaux prélevées dans le Houiller n'intéressent cependant pas les sociétés de distribution d'eau à cause de la présence de fer qui engendre des problèmes d'entretien des installations (rouille). Ces eaux sont également fortement chargées en sulfates (oxydation de la pyrite).

Via son déversement dans la nappe alluviale, l'exutoire principal de cette nappe est constitué par la Sambre. L'alimentation se fait principalement par apport météorique sur les versants.

7.2. Hydrogéologie locale

7.2.1. Description des nappes

Trois « nappes » peuvent être distinguées sur base des investigations réalisées :

- « nappe » dite des remblais logée à certains endroits à la base des remblais et localement dans le sommet du terrain naturel limoneux ;
- nappe alluviale logée dans les dépôts alluviaux sablo-graveleux de la Sambre mais aussi localement dans les limons alluviaux lorsque ceux-ci sont suffisamment perméables ;
- nappe du bedrock présente dans les niveaux fissurés du Houiller.

« Nappe » des remblais

En fonction des circonstances (profils de l'interface remblais/terrain naturel, imperméabilité des limons alluviaux sous-jacents), les remblais peuvent localement contenir des poches d'eau souterraine.

L'imperméabilisation de la zone du bassin de décantation a probablement également réduit l'infiltration nette sur le site et de ce fait, peut être diminué l'importance des poches d'eau

localisées sur les niveaux argileux. L'influence éventuelle de l'Ernelle, canalisée, sur ces eaux de remblais n'a pas pu être clairement identifiée.

Nappe alluviale

Au droit de la zone d'étude, cette nappe est généralement légèrement captive sous les limons alluviaux mais localement, on peut observer des remontées de cette nappe au sein des limons pouvant ainsi donner lieu à une nappe libre voir semi-captive (notamment dans la partie nord du site).

Au droit de l'ancien bras de la Sambre, les remblais sont directement en contact avec les graviers alluviaux et on observe à cet endroit une remontée de la nappe dans ces remblais la rendant ainsi libre, voir semi-captive selon le degré d'imperméabilisation des niveaux de remblais rencontrés dans cette zone.

Nappe du bed-rock primaire

Des venues d'eau ont été observées dans les niveaux fissurés du bed-rock primaire à partir de 15 à 26 m de profondeur selon les endroits. Il s'agit donc de venues d'eau bien distinctes de celles provenant de la nappe alluviale. Les faciès d'altération du bed-rock apparaissent ainsi comme relativement secs. Il est donc possible que la nappe du bed-rock puisse être parfois captive sous ces argiles d'altération. Cependant, la piézométrie de cette nappe du Houiller était à l'équilibre avec la nappe alluviale au nord du site lors des travaux ultérieurs, on peut donc exclure qu'il puisse exister localement sur site des communications entre la nappe du bed-rock et la nappe alluviale qui en constitue son exutoire principal.

7.2.2. Piézométrie

Des relevés piézométriques des ouvrages présents sur l'ensemble du site AMS- Nord ont été réalisés en juillet et août 2010. Un relevé piézométrique de l'ensemble des ouvrages présents a également réalisé le 20 avril 2011. Il est fait remarquer qu'à cette époque, plusieurs ouvrages installés précédemment n'ont pas été retrouvés ou n'étaient plus utilisables suite aux différents chantiers qui se sont déroulés sur le site.

« Nappe » des remblais

Le niveau piézométrique des poches d'eau localement présentes dans les remblais est compris au droit des points de mesure entre 3 et 4,5 m de profondeur. Ces poches d'eau

présentent généralement une trentaine de centimètres d'épaisseur (maximum +/- 1 mètre d'épaisseur).

Nappe alluviale

Le niveau piézométrique de la nappe alluviale se stabilise entre 2,5 et 6 m de profondeur suivant les endroits. Ces niveaux stabilisés sont généralement plus élevés que le sommet des graviers et des principales venues d'eau témoignant d'une certaine captivité de cette nappe.

Les relevés de juillet 2010 correspondent à une période relativement sèche. En août/septembre, les pluies ont été nettement plus importantes occasionnant une remontée du niveau phréatique générale de 40 à 60 cm sauf dans la zone sud-ouest où les niveaux semblent être restés plus constants.

Les relevés en avril 2011 présentent des niveaux intermédiaires entre ceux de juillet et septembre 2010 (remontée de 10 à 50 cm par rapport à juillet 2010).

Dans la partie Est, le sens d'écoulement général est plutôt dirigé du Sud-Ouest vers le Nord-Est. L'exutoire de la nappe dans cette direction n'est pas connu. Aucun pompage, ni galeries d'extraction d'eau ne sont répertoriés. Il est probable que cette direction d'écoulement soit liée à l'ancien trajet de la Sambre couplé à une déviation des flux autour du bassin de virement. Dans la partie Ouest, ce sens d'écoulement a également été mis en évidence au droit de la zone nord-ouest.

Dans la partie sud-ouest ainsi que dans l'extrémité Sud de la partie Est (à proximité du bassin de décantation), il se confirme un écoulement plutôt dirigé d'Ouest en Est voire Nord-Ouest Sud-Est en direction de la Sambre.

Dans la partie Est, la Sambre ainsi que le bassin de virement présentent des cotes supérieures aux cotes piézométriques de la nappe. Ces côtes sont artificiellement induites par une écluse en aval du site pour réguler le débit du cours d'eau. A cet endroit, les eaux de surface sont donc en décrochage par rapport à la nappe et ne constituent donc pas l'exutoire direct de celle-ci.

Dans la partie Ouest par contre, les côtes de la Sambre deviennent inférieures aux côtes piézométriques de la nappe et le cours d'eau peut donc théoriquement jouer le rôle d'exutoire de la nappe. Il semblerait qu'à cet endroit les parois de la Sambre pourraient ne pas être

totalemant étanches et permettraient ainsi à la Sambre de jouer son rôle de drainage des eaux souterraines.

L'ancien bras de la Sambre, les fondations par lesquelles s'infiltrent les poches de remblais, les variations locales de perméabilité en fonction de la teneur en argile de la matrice des graviers alluviaux, ainsi que les différences de drainage de la Sambre en fonction de l'état de ses berges pourraient localement influencer l'écoulement.

Le gradient piézométrique de la nappe des graviers est de l'ordre de 0,5 à 1 % dans la partie Est (plus accentué vers le Nord-Est). Dans la partie Ouest, le gradient piézométrique est de l'ordre de 0,03 % au nord-ouest mais est plus important dans la zone sud-ouest (de l'ordre de maximum 2 %). Ces variations pourraient être liées à des contrastes de perméabilités ou des variations d'épaisseur des terrains aquifères. On remarquera également que la période considérée correspondait probablement à une période de basses eaux liée à la sécheresse.

Nappe du bed-rock

Le niveau piézométrique de la nappe du bed-rock se stabilise vers 3 à 4 m de profondeur au droit de la plaine alluviale.

Les côtes altimétriques de cette nappe sont comprises entre +100.6 et 100.8 m au sud-ouest. Dans la zone Est, les côtes sont comprises entre +100.2 et +100.6 m.

Les ouvrages réalisés sont implantés à proximité immédiate de piézomètres équipés dans les alluvions et il est donc possible d'y comparer les niveaux piézométriques. Dans la zone nord-ouest, les niveaux sont plus ou moins équivalents. Dans la zone sud-ouest, on constate que la nappe du bed-rock est sous-pression d'environ 15 à 40 cm par rapport à la nappe alluviale témoignant d'une certaine isolation des nappes à cet endroit.

Dans la partie Est, la nappe du bed-rock présente des côtes plus élevées que la nappe alluviale de 8 à 50 cm.

Suivi piézométrique

Un suivi piézométrique réalisé entre juillet et août 2010 sur 19 piézomètres, répartis selon trois lignes parallèles à la Sambre présente les conclusions suivantes :

- les niveaux d'eau dans les piézomètres sont relativement stables et ne suivent pas la pluviométrie, mis à part lors d'événement pluvieux intenses (50 l/m² en une journée) où l'ensemble des piézomètres, exceptés ceux situés le long de la Sambre, réagissent. Ceci

indique que la nappe même si généralement captive peut être localement réalimentée par des infiltrations, probablement principalement par apport du versant ;

- la Sambre est stable car régulée par le barrage-écluse en aval du site.

Vitesses d'écoulement de la nappe alluviale

Données hydrogéologiques utilisées

Les perméabilités des horizons graveleux dans les alluvions peuvent être déduites des résultats des études des flux de polluants sur le site de 2008 et de 2011. Ces résultats proviennent d'essais de pompage réalisés dans des ouvrages équipés dans ces niveaux graveleux.

Des essais de pompage dans la partie est du site ont permis de déterminer des perméabilités de l'ordre de 1 à 4.10^{-4} m/s au nord de l'ancien bras de Sambre et de l'ordre de 1.10^{-4} à 3.10^{-5} m/s au sud de l'ancien bras de Sambre. Une perméabilité des graviers alluviaux de l'ordre de 1.10^{-4} à 5.10^{-5} m/s a aussi été mise en exergue, soit dans le même ordre de grandeur.

Une série de slug tests a été réalisée dans la partie Est et dans la partie Ouest. Les perméabilités calculées varient entre 5.10^{-4} m/s et 7.10^{-6} m/s (Figure 13).

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

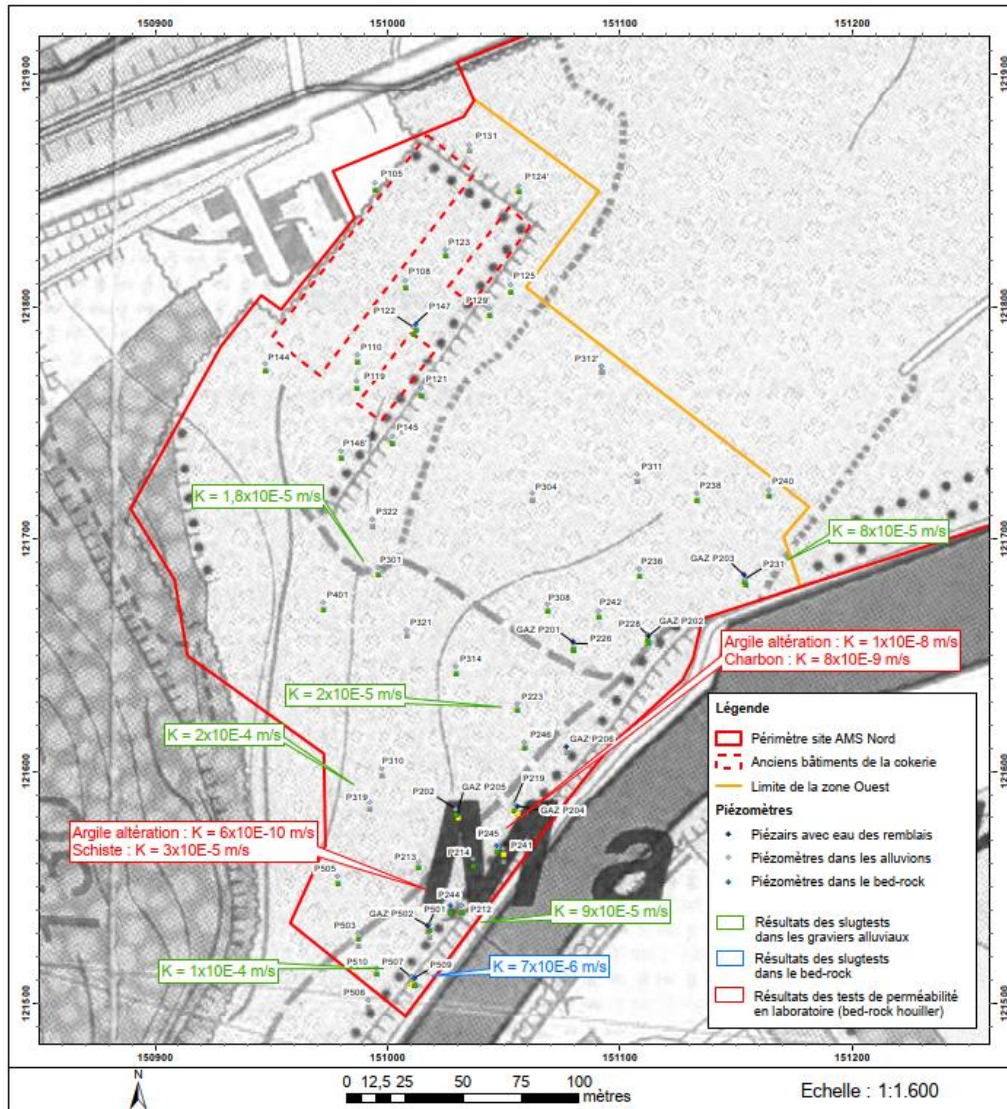


Figure 13 : Perméabilités obtenues à la suite de slugs tests (SPAQuE, 2012)

Dans la partie Ouest, les perméabilités dans les graviers alluviaux semblent être généralement de l'ordre de $8,5 \cdot 10^{-5}$ m/s. La zone sud-ouest semble présenter une perméabilité supérieure à la partie centrale (ordre de $2 \cdot 10^{-5}$ m/s). La partie sud de l'ancien bras de Sambre présente également une perméabilité plus élevée que la zone centrale, de l'ordre de $8 \cdot 10^{-5}$ m/s.

La partie supérieure de la nappe du Houiller présente une perméabilité de l'ordre de $7 \cdot 10^{-6}$ m/s, soit une perméabilité relativement élevée, probablement due à une fracturation plus intense du bedrock en surface.

Des slug tests réalisés dans les limons alluviaux ou les remblais avaient mis en évidence des perméabilités comprises entre $1,6 \cdot 10^{-8}$ m/s et $3,1 \cdot 10^{-6}$ m/s (SPAQuE, 2012).

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

Une zone de perméabilité plus importante ($1 \text{ à } 3.10^{-4} \text{ m/s}$) semble être présente dans la partie sud. On remarquera également qu'à certains endroits (notamment au niveau de la partie nord), ces terrains peuvent présenter de sédiments comprenant nettement moins de matrice et donc potentiellement plus perméables.

Sur base d'une modélisation numérique des écoulements commanditée par SPAQuE, les perméabilités semblent être plus faibles en pied de versant (5.10^{-6} à 1.10^{-5} m/s) et alterner dans la plaine alluviale entre 5.10^{-5} m/s et 4.10^{-4} m/s , de façon similaire aux essais hydrogéologiques (SPAQuE, 2012).

Tableau 4 : Perméabilités moyennes calculées par zone (Hydreau, 2012)

Zone	Type Géologie	Perméabilité moyenne (m/s)
Ancien bras de Sambre – partie Ouest Ernelle	remblais	7.10^{-5}
Ancien bras de Sambre – partie est Ernelle	remblais	3.10^{-5}
Nord de l'ancien bras de la Sambre	graviers/galets	3.10^{-4}
Sud ancien bras de Sambre	Graviers/galets	$6,5.10^{-5} \text{ }^1$
Zone Electrabel	graviers/galets	1.10^{-4}
Zone Sous-produits/Riva/Centrale	graviers	$1 - 5.10^{-5}$
Bedrock – partie supérieure	schiste	$4,5.10^{-6}$

Les différentes zones du site sont représentées à la Figure 14.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

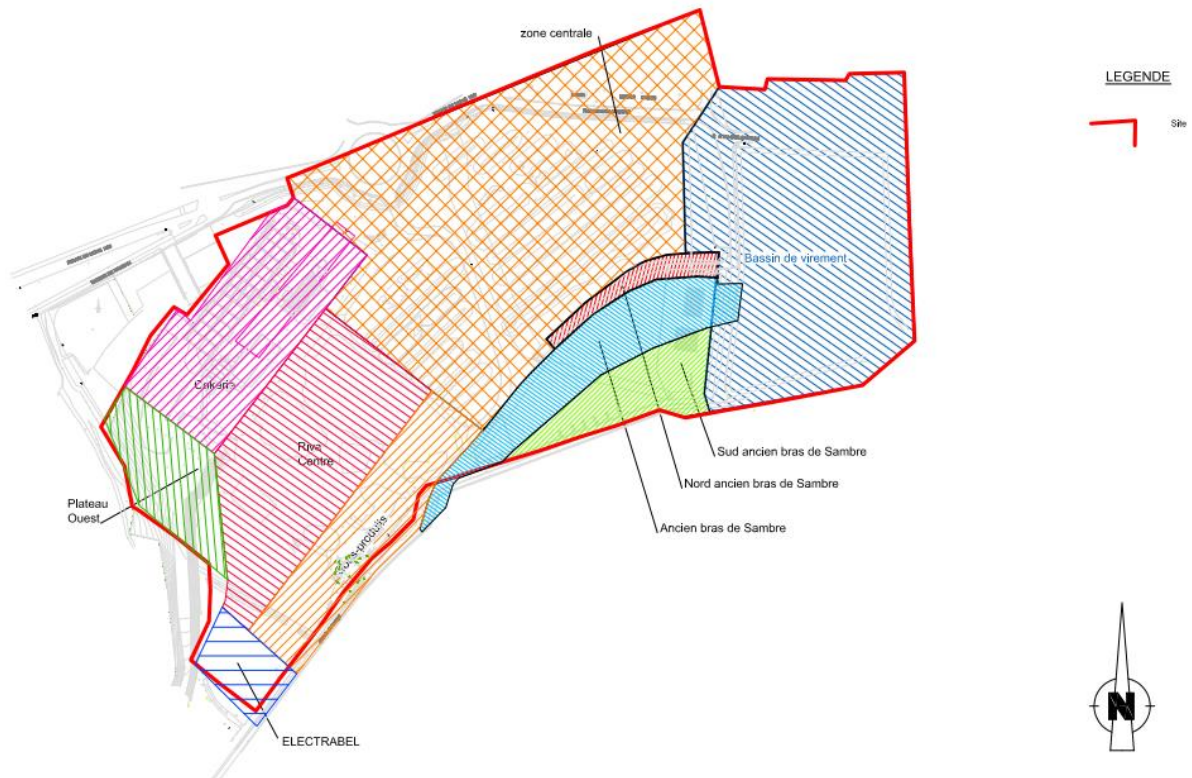


Figure 14 : Zones du site AMS Nord (Hydreau, 2012)

Les gradients piézométriques peuvent être déduits de l'examen de la carte piézométrique (Figure 15) :

- 0,03 à 0,3 % : zone nord-ouest et partie nord de la zone centrale selon les saisons,
- 2 % : zone sud et zone sud-ouest.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

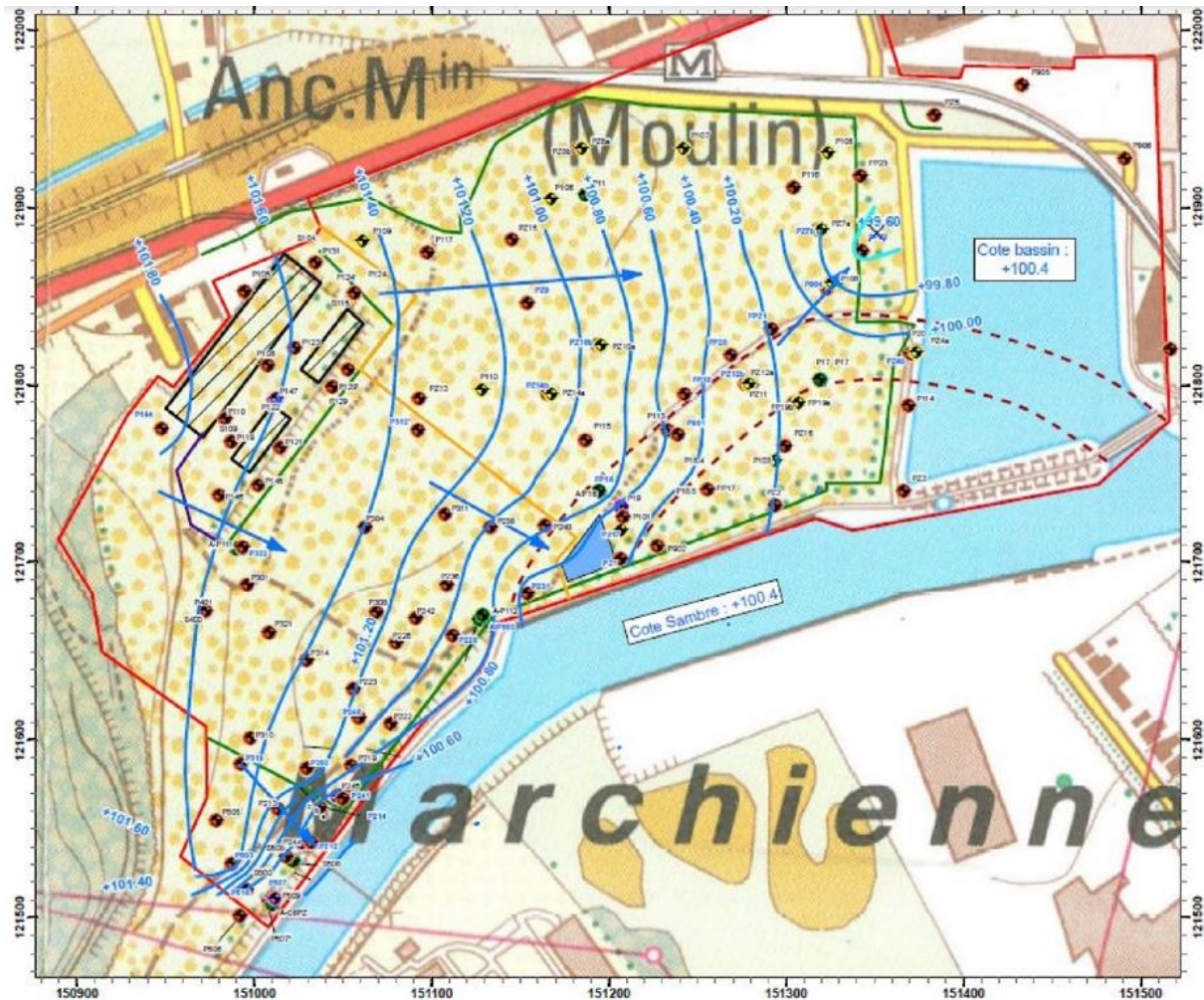


Figure 15 : Carte piézométrique de la zone d'étude (Hydreau, 2012)

En l'absence d'un monitoring détaillé à différentes saisons, les gradients piézométriques observés pourraient ne pas correspondre aux maximums présents en périodes de hautes eaux de la nappe. Les flux d'eaux souterraines calculés pourraient ainsi être légèrement sous-estimés.

Les porosités efficaces considérées sont issues de la littérature et de notre expérience de ces terrains :

- 2 % correspondant aux valeurs généralement obtenues lors d'essais de traçage (n_e de transport) et pouvant également être relié aux faciès à matrice franchement limoneuse,
- 10 % correspondant à des valeurs moyennes pour l'étude de flux, résultant de travaux antérieurs, et pouvant également correspondre aux faciès contenant peu de matrice.

Résultats des calculs

Le Tableau 5 montre le résultat des calculs en tenant compte des hypothèses ci-dessus.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

Tableau 5 : Vitesses d'écoulement calculées (SPAQuE, 2012)

Zone	Perméabilité	Vitesse d'écoulement (m/j)	
		ne = 2 %	ne=10 %
nord et zone centrale	K = 5.10 ⁻⁵ m/s	0,065 à 0,65	0,013 à 0,13
	K = 3.10 ⁻⁴ m/s	0,89 à 8,9	0,078 à 0,78
sud et sud-ouest	K = 5.10 ⁻⁵ m/s	4,320	0,864
	K = 3.10 ⁻⁴ m/s	25,20	5,184

Perméabilités du bed-rock

Quelques prélèvements d'échantillons non remaniés dans les forages carottés réalisés en zones Est et Ouest, aussi bien au niveau des argiles d'altération que du bed-rock schisteux et des veines de charbon ont subi des essais de perméabilité en laboratoire. Le tableau ci-dessous en présente une synthèse des résultats obtenus. Ils sont également présentés sur la figure 5.4 en annexe 1.

Tableau 6 : résultats des essais perméabilités en laboratoire sur le bed-rock (SPAQuE, 2012)

Zone	Profondeur	Nature	Perméabilité (m/s)	Remarques
Ouest	8,3-8,5 m	Argile d'altération	5,7.10 ⁻¹⁰	
Ouest	11,1-11,4 m	Schistes	3,1.10 ⁻⁵	Echantillon friable
Ouest	10,4-10,6 m	Argile d'altération	7,5.10 ⁻⁹	
Ouest	10,6-10,8 m	Charbon	8,3.10 ⁻⁹	Echantillon remanié
Est	10,5-10,7 m	Argile d'altération	1,0.10 ⁻⁸	
Est	11,5-11,7 m	Charbon	4,9.10 ⁻⁹	
Est	8,7-9,2 m	Argile d'altération	2,7.10 ⁻⁹	
Est	10,0-10,5 m	Schiste	1.10 ⁻¹² (incertain)	Estimation car pas d'essai réalisable

Les résultats de ces essais indiquent que la perméabilité de la couche d'argile d'altération du bed-rock semble être relativement faible, de l'ordre de 6.10⁻¹⁰ à 8.10⁻⁹ m/s.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

La roche sous-jacente semble présenter des perméabilités variables en fonction du degré de fracturation (1.10^{-12} (incertain) à 3.10^{-5} m/s). On fera remarquer que les premières venues d'eau dans le bed-rock ont été observées à des profondeurs importantes (entre 15 et 26 m), ce qui confirme le caractère globalement imperméable du sommet du bed-rock.

Les veines de charbon semblent elles aussi, relativement imperméables avec des perméabilités de l'ordre de 5 à $8 \cdot 10^{-9}$ m/s.

PARTIE 2 : MODELISATION DES ECOULEMENTS

Une fois que le contexte environnemental et la justification de l'étude ont été bien définis, il convient de passer à la modélisation numérique proprement dite. Ce travail est réalisé en utilisant le logiciel GMS de Aquaveo. Ce choix s'explique par la méthode de calcul utilisée par ce logiciel, à savoir la méthode des différences finies, qui se révèle être plus rapide que celle des éléments finis. De plus, ce logiciel nous est accessible car fourni par l'université de Liège.

Toute modélisation commence par la définition d'un modèle conceptuel, cela est en quelque sorte une simplification de la réalité afin de pouvoir l'implémenter dans le logiciel. Une fois cette étape achevée, il convient de calibrer puis de valider le modèle obtenu afin de l'utiliser pour des prédictions futures.

1. MODÈLE CONCEPTUEL

1.1. Objectif et processus simulé

Notre approche conceptuelle a principalement deux objectifs. La première étape consiste à créer un modèle d'écoulement des eaux souterraines au voisinage de notre région d'étude. Le second a pour but d'illustrer l'effet de la construction d'un mur emboué sur l'écoulement de l'aquifère vers la Sambre au droit de ce mur. La question fondamentale est :

Est-ce que le mur obstrue l'écoulement des eaux de la nappe alluviale vers la Sambre à travers la zone polluée située en aval ?

Nous simulerons donc un processus d'écoulement et ceci à une échelle régionale car nous ne nous intéresserons pas au transport de polluant, qui lui nécessite une échelle locale.

Notre modèle sera un modèle de type quasi-3D bicouche. En effet, ce choix nous permettra de représenter l'écoulement horizontal à travers chaque aquifère, mais également de prendre en compte l'interaction verticale entre les 2 nappes (alluviale et houiller).

1.2. Géométrie et localisation du modèle

Le modèle d'écoulement régional a une géométrie (Figure 16) déterminée par la géologie et le contexte géographique de la zone d'étude. Ainsi, il est considéré comme étant délimité au nord-ouest, au nord-est et à l'ouest par le bedrock houiller ; au sud par la Sambre ; et à l'est par la confluence entre le canal Bruxelles-Charleroi et la Sambre. Cette géométrie confère au modèle une superficie d'environ 227 km², pour un périmètre de 10,8 km.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

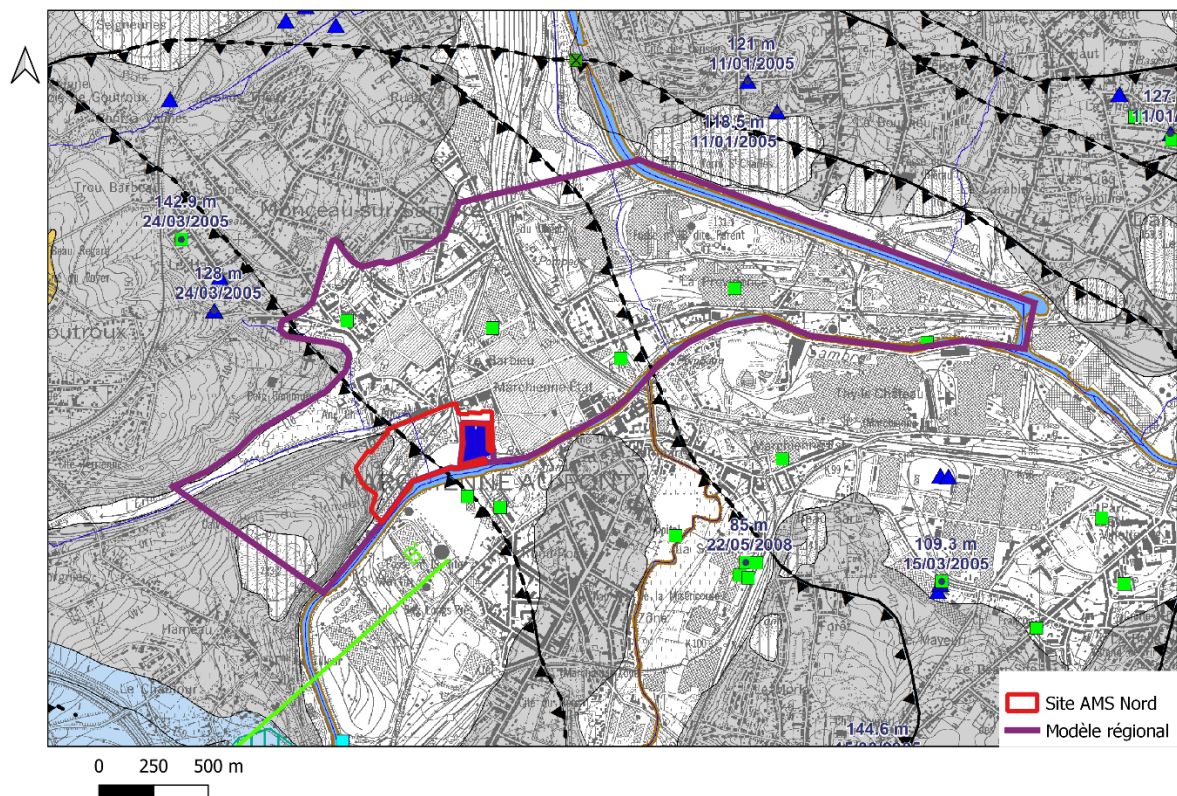


Figure 16 : Géométrie du modèle

1.3. Régime d'écoulement

Notre modèle sera réalisé uniquement en régime permanent. Cela nous permettra de réaliser nos simulations rapidement, malgré la taille conséquente de notre modèle. Ce choix est en concordance avec notre échelle régionale. De plus, l'absence de données piézométriques régulières sur une durée conséquente ne permet pas d'envisager de faire des simulations sous un régime transitoire.

1.4. Paramétrisation

Dans une modélisation d'écoulement en régime permanent, le paramètre utilisé est la conductivité hydraulique. Dans le cadre de notre étude, nous ferons naturellement une distinction entre la conductivité des graviers et celle du bedrock. Ceci induit de fait une hétérogénéité de la conductivité hydraulique ; ajouté à cela l'hétérogénéité de la géologie locale du site d'étude. En l'absence de données, on considèrera que la conductivité hydraulique verticale est identique à la conductivité hydraulique horizontale.

La variable principale sera la hauteur piézométrique, utilisée pour décrire l'écoulement de notre modèle régional.

1.5. Discretisation spatiale

Le modèle est conçu pour représenter des écoulements de nappe d'eau souterraine. Ainsi, il comprend une discrétisation horizontale dont la taille des cellules a été définie selon des points de raffinement (Figure 17). La taille minimale des cellules a été fixée à 5 m au droit des points de raffinement, et cette taille croît suivant un pas de 1,05 au fur et à mesure que l'on s'éloigne des points, ceci sans jamais dépasser la taille maximale de 20 m.

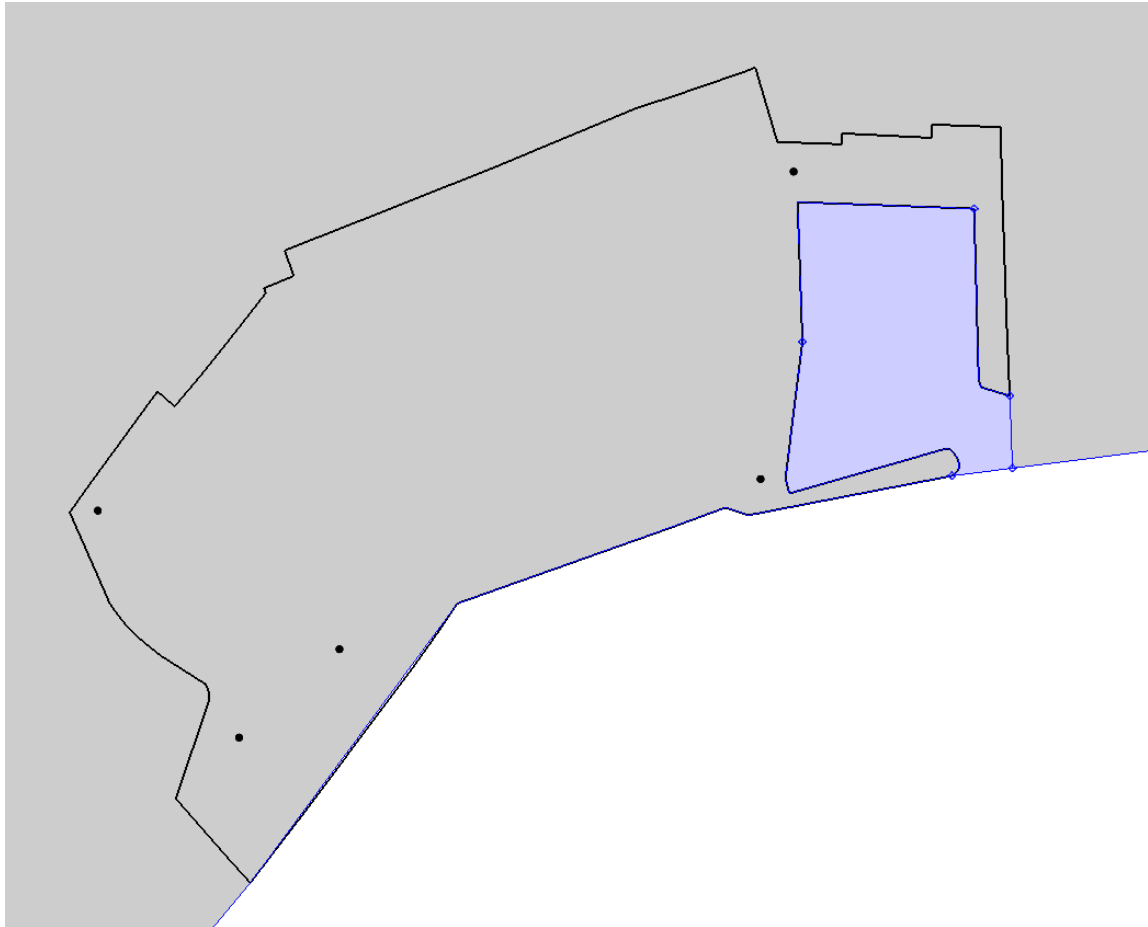


Figure 17 : Localisation des points de raffinement (points noirs) au droit du site AMS

Les coordonnées de ces points sont reprises dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Coordonnées des points de raffinement

X	Y
150999	121576
151067	121635
150905	121728
151371	121955
151349	121749

Afin de représenter les interactions entre la nappe des graviers et le bedrock, notamment à travers la partie supérieure fissurée de ce dernier, et un possible écoulement sous le mur emboué, une composante verticale de l'écoulement a aussi été prise en compte. Nous avons donc défini un modèle à 2 couches. La couche supérieure représente la nappe des graviers et a une taille de cellules qui est fonction de l'épaisseur de la couche des graviers. Cette épaisseur est précise à l'intérieur du site AMS mais a été maintenue à une épaisseur constante en dehors du site du fait de l'absence de données de forages à l'extérieur du site. La couche inférieure représente le sommet du bedrock. La base de cette couche a été délimitée arbitrairement à 15 m en dessous de la couche supérieure des graviers.

1.6. Conditions frontières

Les conditions frontières sont fixées en tenant compte des frontières de notre modèle. Ces conditions ont un impact significatif sur le modèle et doivent être choisies en concordance avec la réalité. Le modèle étant subdivisé en 2 couches, chaque couche a été affectée de conditions propres à ses frontières.

Pour la couche supérieure (Figure 18) :

- Au nord : une condition de Dirichlet avec une hauteur imposée à 100,7 m pour représenter l'écoulement du nord vers le sud ;
- Au nord-est, au nord-ouest et à l'ouest : pas de condition définie et donc une condition de Neumann à flux nul ;
- À l'est : une condition de Dirichlet avec une hauteur imposée à 100,2 m représentant le niveau du canal Bruxelles-Charleroi à cet endroit ;
- Au sud et au niveau du bassin de virement : une condition de Cauchy, dite condition de type rivière, avec des côtes variant de 100,4 m à 100,2 m de l'ouest à l'est de la Sambre pour simuler l'écoulement normal de la Sambre vers l'est, le niveau du bassin de virement est maintenu constant à 100,3 m ;
- Les frontières à conditions de Neumann situées au nord-ouest et à l'ouest sont reliées par une condition de Dirichlet pour représenter la plaine alluviale qui s'y trouve. Une hauteur y a été imposée à 100,5 m ;
- De même, la frontière ouest et la frontière sud sont reliées par une condition de Dirichlet pour représenter la plaine alluviale qui s'y trouve. Une hauteur y a été imposée à 100,5 m pour représenter l'écoulement de la nappe vers la Sambre.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

La prise en compte d'une condition de type rivière nécessite la définition d'une conductance pour représenter l'interaction entre la nappe alluviale et la Sambre à travers le mur de quai. Cette valeur de conductance a été initialement fixée à $1\text{E-}6$ m/s.

Concernant la recharge, la nappe étant considérée captive sur l'entièreté de la zone d'étude, une recharge inférieure à la recharge d'un terrain en zone urbanisée a été considérée. De plus, certaines zones du site ont été imperméabilisées durant l'exploitation antérieure du site. Une valeur initiale de recharge à $1\text{E-}10$ m/s a donc été prise en compte.

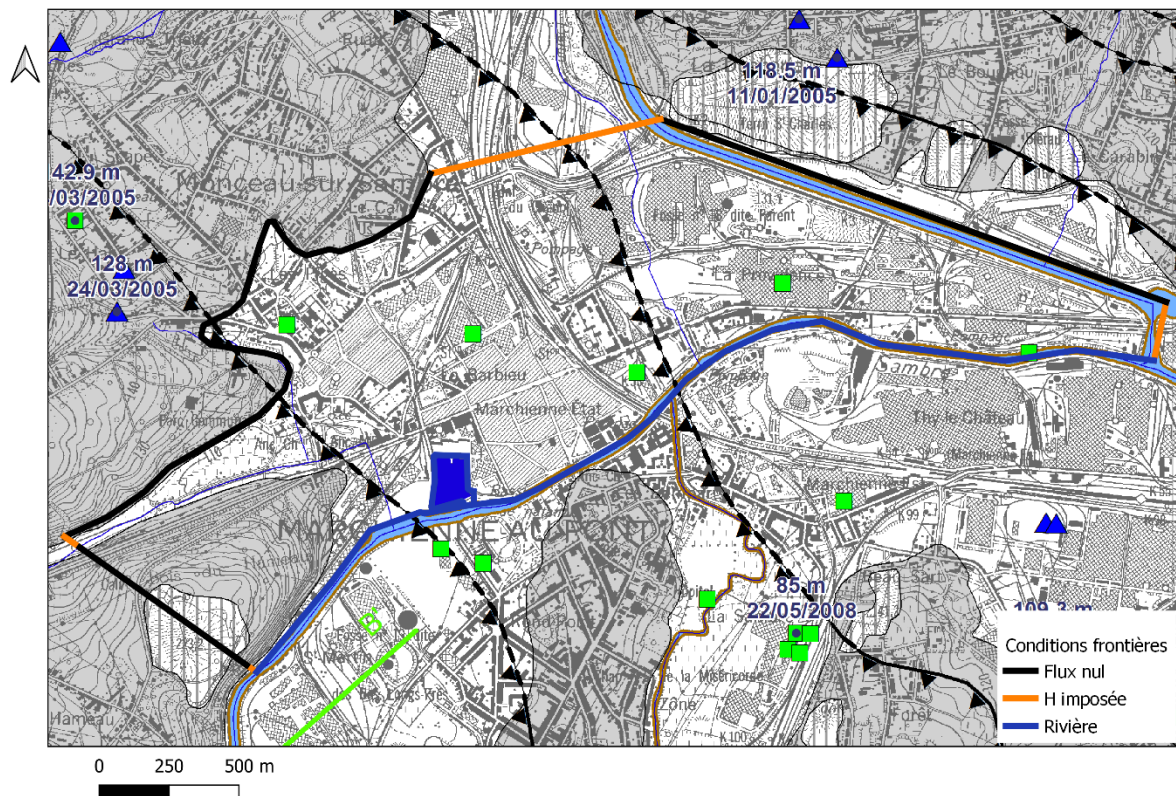


Figure 18 : Conditions aux frontières de la couche supérieure (graviers)

Pour la couche inférieure, des conditions à flux nul ont été définies (Figure 19).

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

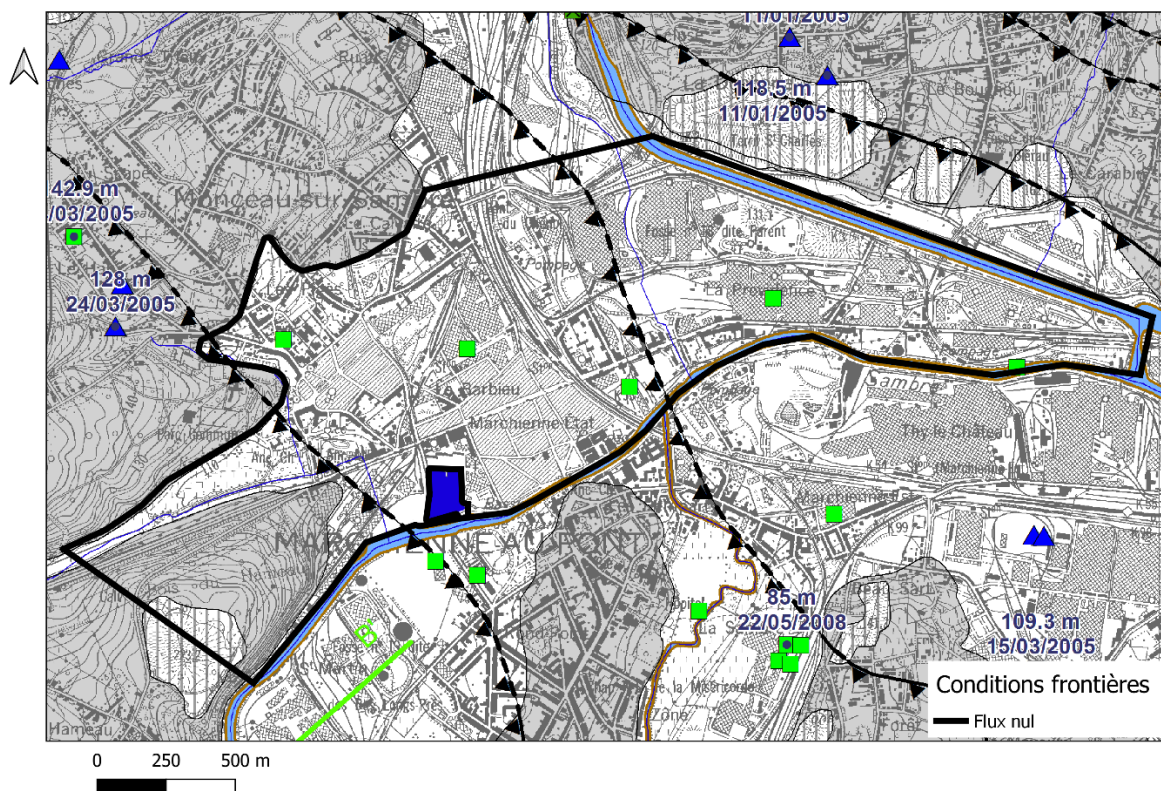


Figure 19 : Conditions aux frontières de la couche inférieure (bedrock)

1.7. Sollicitations externes

Une recherche géocentrique réalisée auprès de la Direction Générale des Ressources naturelles et de l'Environnement du Ministère de la Région wallonne, a permis de mettre en évidence plusieurs ouvrages de prises d'eau souterraine dans un rayon de 2 km autour du site (point : X : 151.513 m ; Y : 122.363 m), durant la période allant du 01/01/2000 au 31/12/2021. Néanmoins, aucun ouvrage en activité n'a été renseigné à l'intérieur des frontières de notre modèle.

1.8. Conditions initiales

Toute simulation a besoin de valeurs initiales de la variable afin de pouvoir les optimiser et atteindre un résultat final. En régime d'écoulement permanent, ces valeurs initiales ne sont pas importantes. Néanmoins, nous déciderons de les prendre comme étant égales à la valeur de l'altitude de la topographie aux points considérés ; ainsi nous serons en concordance avec le caractère captif de la nappe car le toit de celle-ci est inférieur à la topographie.

2. CALIBRATION DU MODÈLE

Toute modélisation des eaux souterraines doit inclure un mécanisme de calibration du modèle. Il doit être démontré qu'un modèle d'eau souterraine peut reproduire avec précision l'activité observée de l'aquifère avant de pouvoir être utilisé dans un quelconque rôle de prévision. Lorsqu'un modèle est calibré, certains paramètres du modèle, tels que la recharge et la conductivité hydraulique, sont systématiquement modifiés et le modèle est exécuté à plusieurs reprises jusqu'à ce que la réponse calculée ressemble étroitement aux valeurs observées sur le terrain avec un degré de précision acceptable. Ce processus de calibration peut être effectué aussi bien manuellement qu'automatiquement. En pratique, on effectue une calibration manuelle qui permet d'obtenir les conditions initiales d'une calibration automatique.

Pour comprendre l'influence sur le résultat final, et dans quelle proportion, qu'a chaque paramètre, il est particulièrement conseillé de les modifier un par un lors d'un calibrage manuel. Avec une calibration manuelle, il est déjà possible d'obtenir de bons résultats. Les résultats obtenus peuvent servir de base à une calibration automatique.

Ensuite, en fonction de l'homogénéité attendue des zones sélectionnées et de l'ensemble des données disponibles, la calibration automatique peut être combinée dans GMS à deux méthodes : la méthode des zones et la méthode des points pilotes.

Dans le cadre de notre travail, nous nous limiterons à combinaison avec la méthode des zones. Il s'agit de localiser des polygones à l'intérieur de la zone étudiée. Les zones sont sélectionnées en fonction de l'emplacement des points d'observations, de l'historique du site et des travaux antérieurs. Une fois ces zones définies, PEST, un outil d'estimation automatisé de GMS qui offre une analyse de sensibilité et d'incertitude du modèle, effectue la calibration automatique. En d'autres termes, PEST modifie les valeurs des paramètres spécifiques à la zone pour minimiser l'erreur résiduelle entre les valeurs estimées et observées. Une fois qu'une simulation est effectuée, GMS présente les résultats sous forme de carte avec un jeu de couleurs fonction des différences entre valeurs mesurées et calculées.

La marge d'erreur est introduite manuellement dans le logiciel GMS. Ceci est déterminé par les données observées sur les variations de la nappe phréatique, si elles sont disponibles, ou par la fluctuation anticipée basée sur la connaissance des caractéristiques du milieu et de toute influence potentielle de forces extérieures. Le modèle ne dispose pas de suffisamment de

données pour réduire l'erreur entre la valeur calculée et observée s'il n'y a pas de points d'observation dans une zone du site examiné.

Par conséquent, s'il y a un manque d'informations, il y a moins de chance de réduire correctement l'erreur. La cible de calibration dans GMS est représentée par une boîte à moustaches (Figure 20). La valeur observée s'aligne sur le centre de la cible. La valeur observée plus l'intervalle constitue le haut de l'objectif, tandis que la valeur observée moins l'intervalle constitue le bas. L'erreur est indiquée par la barre colorée. Le vert est dessiné sur la barre de couleur si la barre tombe complètement dans l'objectif. La barre est affichée en jaune si elle s'écarte de la cible mais que l'erreur est inférieure à 200 %. La barre s'affiche en rouge si l'erreur est supérieure à 200 % (Aquaveo, 2022).

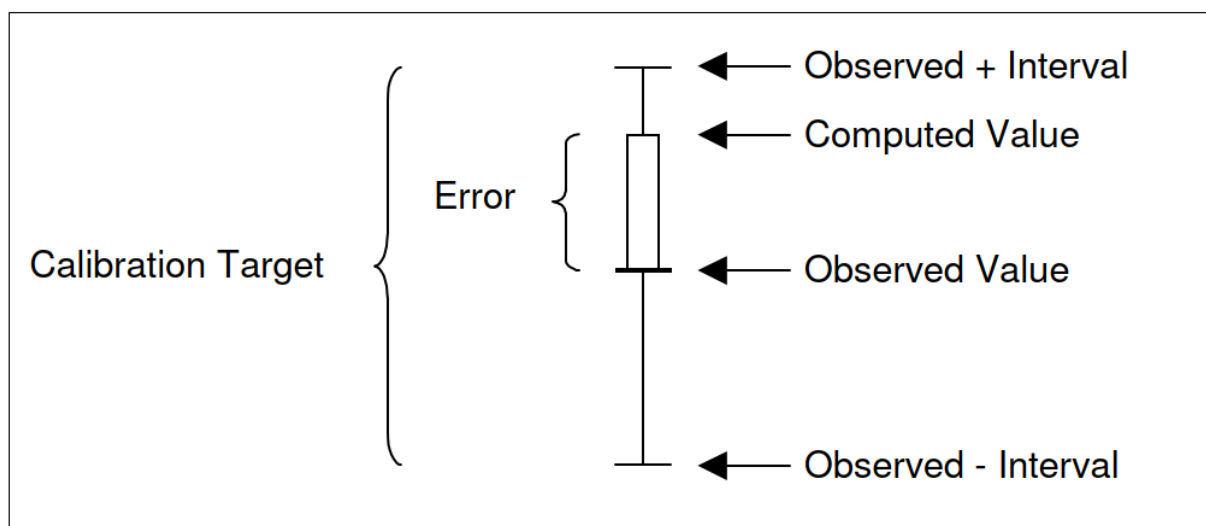


Figure 20 : Représentation du résultat de la calibration en un point d'observation dans GMS (Aquaveo, 2022)

Afin de pouvoir effectuer une calibration, il convient donc d'avoir des points d'observation. Ces points sont issus des données historiques du site étudié.

2.1. Observations

Les données d'observations correspondent aux relevés piézométriques effectués en juillet 2010. Au total, 64 points d'observations sont initialement considérés pour la nappe des graviers, et 3 points d'observations (Tableau 8) sont rencontrés dans la nappe du houiller.

Tableau 8 : Points d'observation dans la nappe du bedrock houiller

Nom	X	Y	Hauteur observée
PZ11	151280	121800	100.02
P147	151012	121793	101.91
P509	151012	121511	100.66

Certains points d'observations ont été signalés comme des anomalies dans les travaux antérieurs (Hydreau, 2012), ils n'ont pas été considérés dans le cadre de cette étude. Une première simulation (Figure 21) a été effectuée et sur la base de celle-ci, un affinage du nombre des points d'observation a été effectué.

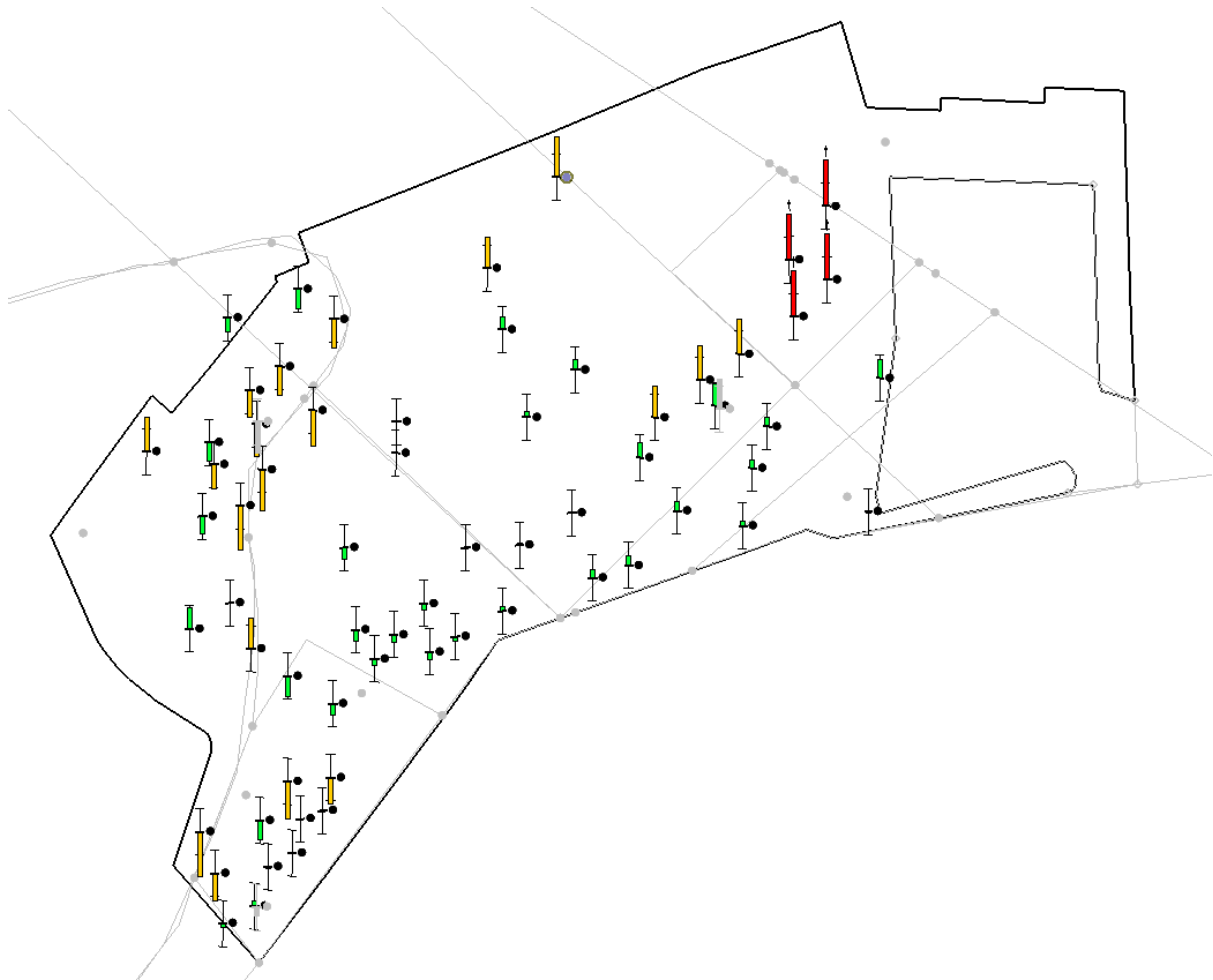


Figure 21 : Anomalie rencontrée dans la partie Est du site

La valeur de l'erreur acceptée dans le calcul de hauteur piézométrique a été fixée à 0,5m. Cette valeur est en corrélation avec la variation d'amplitude maximale des hauteurs observées sur le site en durant les différentes campagnes de relevés piézométriques (entre 0,4m et 0,6m). Sur la base du résultat obtenu après cette première simulation, une zone a été mise en évidence à l'est, avec des hauteurs piézométriques calculées très grandes par rapport aux valeurs observées. Cette zone correspondrait à un point bas mis en évidence dans les travaux antérieurs (Hydreau, 2012). Afin de pouvoir reproduire ce point bas, il faudrait implémenter un puits de pompage de ce côté du site. L'absence de puits de pompage réel dans la recherche géocentrique nous conduit à ne pas considérer cette option et plutôt à enlever ces points d'observation de

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

notre jeu de données d'observations. Finalement, nous avons ainsi un total de 59 points (Tableau 9) d'observations, dans la nappe alluviale, à utiliser pour notre calibration.

Tableau 9 : Points d'observation dans la nappe alluviale

Nom	X	Y	Hauteur observée		Nom	X	Y	Hauteur observée
PZ1	151207	121702	100.40		P131	151035	121870	101.90
PZ2	151294	121732	100.39		P144	150947	121775	101.42
PZ3	151366	121741	100.35		P145	151002	121744	101.98
Pz4b	151373	121818	99.92		P146'	150980	121738	101.90
Pz8b	151186	121935	100.37		P202	151029	121584	101.41
PZ9	151154	121846	100.84		P212	151032	121542	100.49
PZ10b	151196	121823	100.73		P213	151013	121561	100.96
PZ12b	151278	121802	100.21		P214	151037	121562	100.54
PZ13	151093	121793	101.04		P219	151055	121586	101.14
PZ14b	151168	121795	100.81		P223	151056	121629	100.95
PZ15	151145	121882	100.54		P226	151080	121655	100.87
PZ16	151299	121766	100.38		P228	151112	121659	100.84
FP16	151194	121740	100.75		P231	151154	121683	100.50
FP17	151256	121741	100.39		P236	151108	121687	100.89
FP18	151243	121795	100.10		P238	151133	121720	100.84
FP19b	151308	121790	100.37		P240	151164	121721	100.72
FP20	151269	121817	100.02		P241	151050	121567	100.49
FP21	151292	121832	99.96		P242	151091	121669	100.90
P901	151234	121772	100.40		P301	150996	121688	101.11
P902	151227	121709	100.35		P304	151062	121720	101.15
P903	151127	121668	100.76		P308	151069	121672	101.03
P105	150995	121853	101.98		P312'	151092	121775	101.00
P108	151008	121811	101.98		P314	151029	121645	101.21
P110	150984	121781	102.00		P401	150972	121672	101.11
P119	150987	121768	102.00		P501	151018	121534	100.52
P121	151014	121765	101.90		P503	150987	121530	101.13
P122	151011	121791	101.93		P505	150979	121555	101.64
P123	151025	121825	101.92		P506	150992	121501	100.58
P124'	151056	121852	101.89		P507	151010	121512	100.36
P129'	151044	121799	101.83					

2.2. Paramètres à calibrer

Les paramètres qui font l'objet d'une calibration dans le cadre de cette étude sont :

- La conductivité hydraulique de la couche des graviers ;
- La conductivité hydraulique du bedrock de la couche supérieure ;
- La conductivité hydraulique du bedrock de la couche inférieure ;
- La recharge de la couche supérieure au niveau des graviers ;

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

- La recharge de la couche supérieure au niveau du bedrock.

2.3. Calibration manuelle

Une première simulation est réalisée en considérant que le site est homogène du point de vue de la conductivité hydraulique et de la recharge de chaque couche.

Tableau 10 : Valeurs initiales des paramètres à calibrer

Couche supérieure	$K = 1E-5m/s$
	Recharge = $1E-10m/s$
Couche inférieure	$K = 1E-7m/s$

Sur la base des résultats des travaux antérieurs, nous considérons les valeurs suivantes :

Tableau 11 : Zonation des paramètres avant la calibration manuelle

	Graviers	Bedrock
Couche supérieure	$K = 1E-5m/s$	$K = 1E-6m/s$
	Recharge = $1E-10m/s$	Recharge = $1E-10m/s$
Couche inférieure		$K = 1E-7m/s$

Les différentes zones, plaine alluviale (graviers) et bedrock, sont représentées sur la Figure 22.

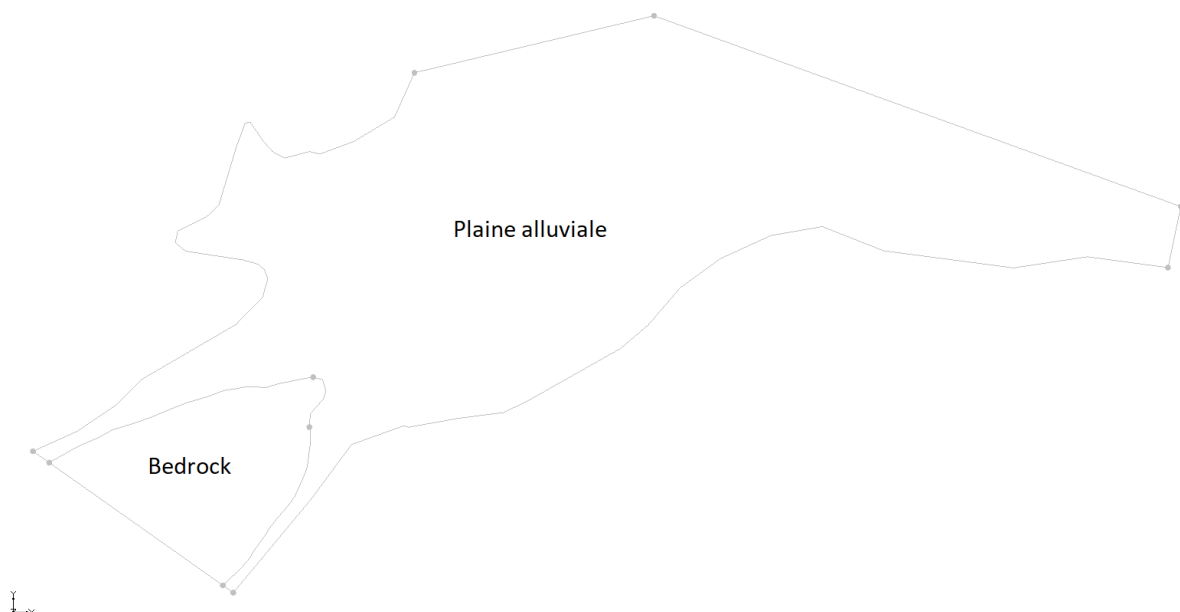


Figure 22 : Zonation des paramètres sur la base de la géologie (bedrock – plaine alluviale)

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

Sur base de ces différentes valeurs de paramètres, nous obtenons des résultats (Figure 23) assez proches de la réalité, notamment du point de vue du sens d'écoulement général (flèches noires sur la figure ci-dessous). L'écoulement au niveau du site est orienté sud-est et ouest. Ce qui confirme la présence d'une frontière hydrogéologique à l'ouest du site.

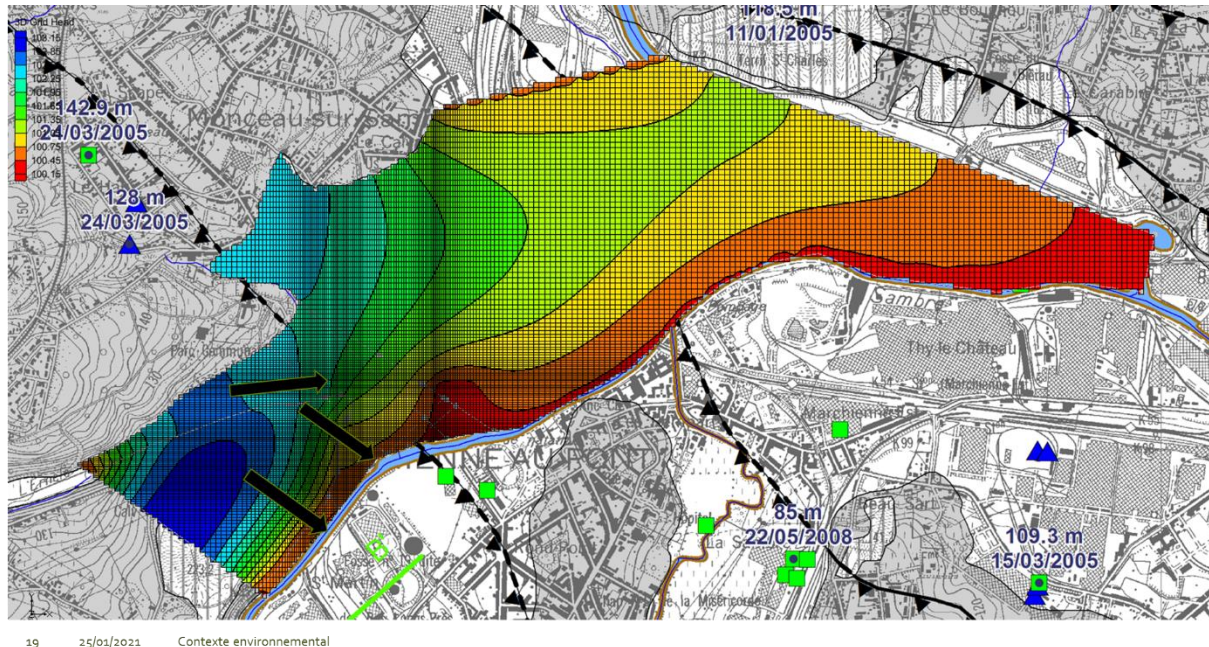


Figure 23 : Résultats après zonation des paramètres sur la base de la géologie (bedrock – plaine alluviale)

Au niveau des points d'observations (Figure 24), les valeurs calculées sont pratiquement toutes comprises dans l'intervalle d'erreur choisi ; mis à part un point au sud-ouest. Une tendance générale est néanmoins observée :

- Dans la partie ouest, les valeurs calculées sont toutes inférieures aux valeurs mesurées ;
- Dans la partie est, les valeurs calculées sont supérieures aux valeurs mesurées.

Ce phénomène de tendance ne doit pas être observé dans un résultat de calibration, preuve que cette dernière doit encore être affinée.

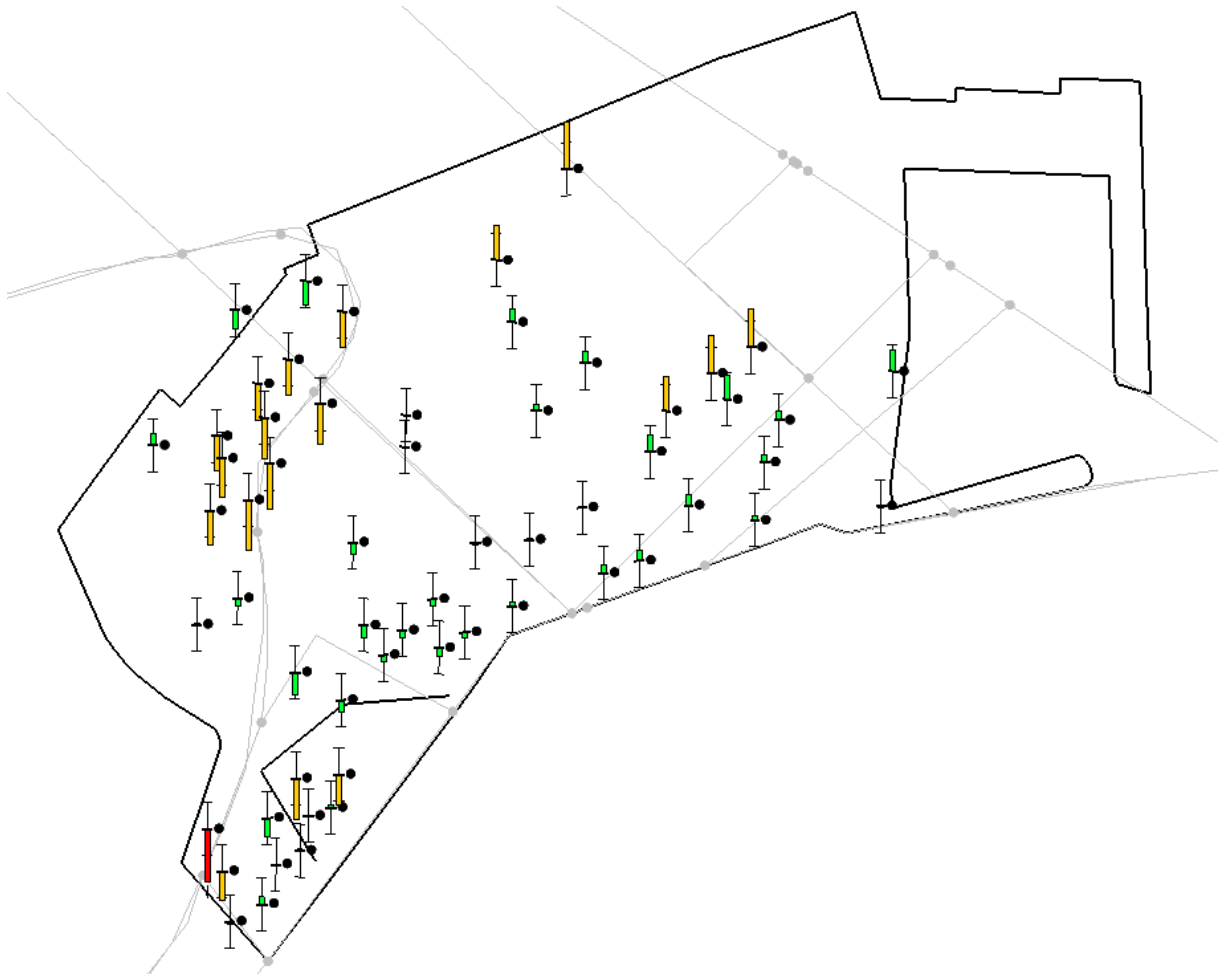


Figure 24 : Valeurs calculées aux points d'observation après zonation des paramètres sur la base de la géologie (couche supérieure)

De plus, l'analyse du graphe valeurs calculées – valeurs observées (Figure 25) montre que les valeurs obtenues ne représentent pas correctement la réalité. En effet, idéalement, les points du graphique doivent être alignés sur la première bissectrice pour une corrélation parfaite. Néanmoins, l'objectif d'une calibration n'est pas d'être sur cette droite mais de se rapprocher le plus possible d'elle. La tendance précédemment détectée sur la Figure 24 se retrouve aussi sur le graphe de la Figure 25 avec les points pratiquement tous sur une horizontale. Ainsi, les valeurs basses sont surestimées et les valeurs hautes sont sous-estimées.

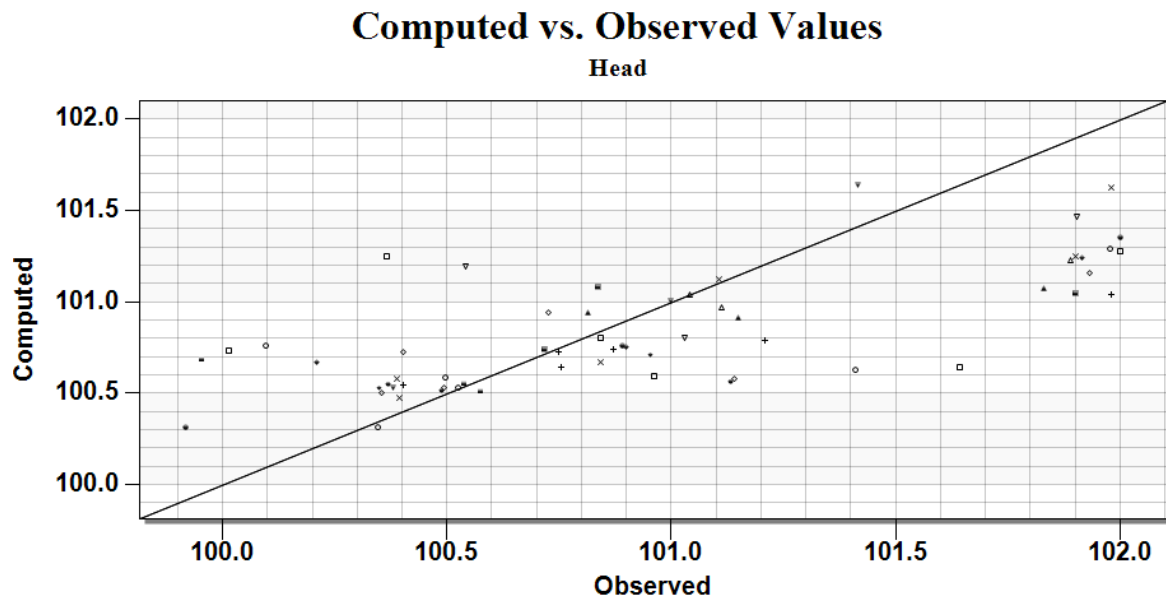


Figure 25 : Valeurs mesurées - valeurs observées après zonation des paramètres sur la base de la géologie (couche supérieure)

De plus, le comportement opposé des points d'observations situés dans la zone des graviers (ouest et est) nous suggère de sectionner à nouveau la couche supérieure en se basant sur les zones d'exploitation identifiées dans l'historique (Figure 26).

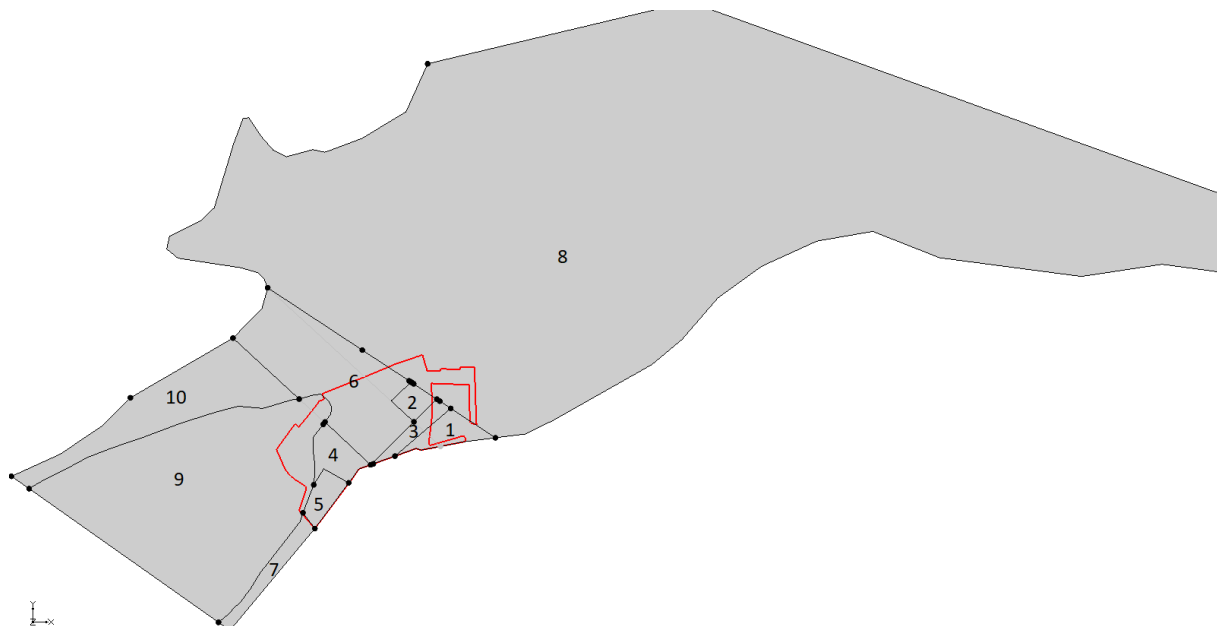


Figure 26 : Zonation de la couche supérieure sur base de l'historique d'exploitation

Les valeurs de conductivité hydraulique de départ des différentes zones sont ajustées sur base des résultats des travaux antérieurs (Tableau 12) :

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

Tableau 12 : Correspondance entre zones du site et zonation du modèle

Zone	Zone correspondante dans le modèle numérique	Perméabilité moyenne (m/s)
Ancien bras de Sambre – partie Ouest Ernelle	3	7.10^{-5}
Ancien bras de Sambre – partie est Ernelle	3	3.10^{-5}
Nord de l'ancien bras de la Sambre	2	3.10^{-4}
Sud ancien bras de Sambre	1	$6,5.10^{-5}$
Zone Electrabel	5	1.10^{-4}
Zone Sous-produits/Riva/Centrale	4 et 6	$1 - 5.10^{-5}$
Bedrock – partie supérieure	9	$4,5.10^{-6}$

Les zones 7, 8 et 10 ne disposant pas de données hydrogéologiques, elles ont été assignées d'une valeur initiale de conductivité hydraulique valant $1E-5$ m/s par analogie à la moyenne de la plaine alluviale dans le site.

Concernant la couche inférieure, les résultats obtenus dans la couche sont analogues aux résultats de la couche supérieure (Figure 27 et Figure 28). Les interprétations précédemment faites pour la couche supérieure sont donc valables pour la couche inférieure.

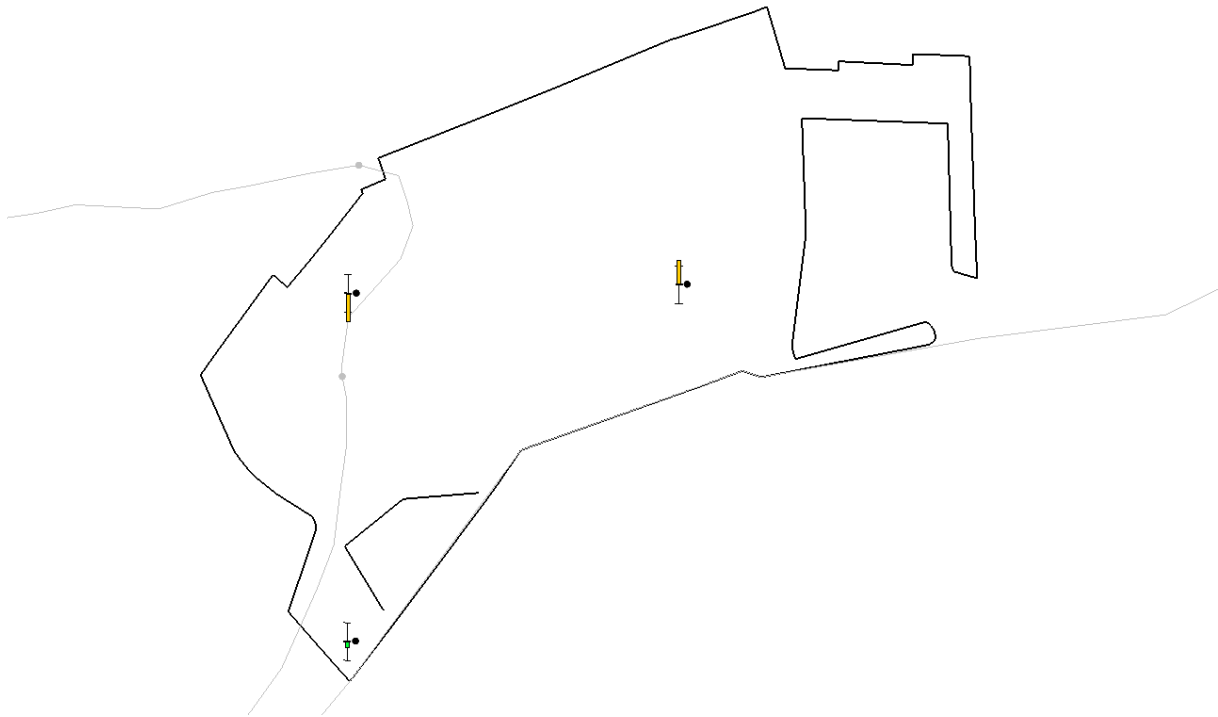


Figure 27 : Valeurs calculées aux points d'observation après zonation des paramètres sur la base de la géologie (couche inférieure)

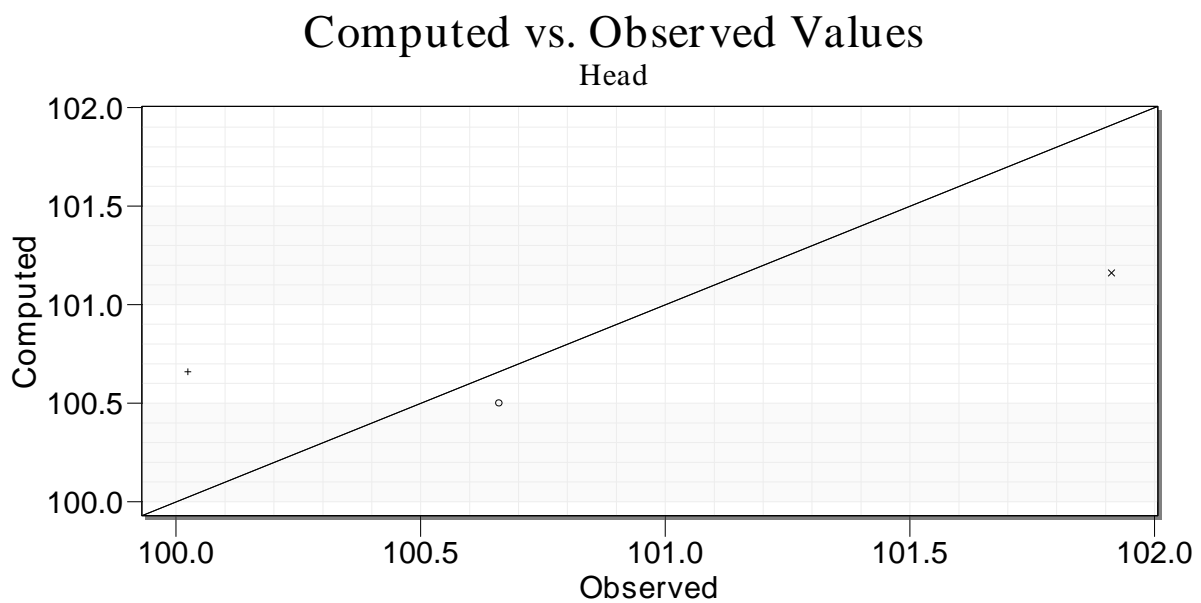


Figure 28 : Valeurs mesurées - valeurs observées après zonation des paramètres sur la base de la géologie (couche inférieure)

Comme précédemment, le comportement opposé des valeurs calculées dans la couche inférieure (inférieures aux valeurs mesurées dans la partie ouest et supérieures aux valeurs

mesurées dans la partie est), nous suggère d'effectuer une zonation de la couche inférieure. Cette zonation (Figure 29) est faite sur la base du passage d'une faille au droit du site.



Figure 29 : Zonation de la couche inférieure (I : Bedrock ; II : Bedrock faillé)

Pour améliorer notre calibration, nous pourrions à nouveau effectuer une calibration manuelle en abaissant la conductivité hydraulique dans les zones où les valeurs calculées sont inférieures aux valeurs observées. En effet, abaisser la conductivité hydraulique revient à retenir plus d'eau et donc, le niveau d'eau dans la zone va s'élever. Inversement, en augmentant la conductivité hydraulique dans les zones où les valeurs calculées sont supérieures aux valeurs observées, on abaissera le niveau d'eau dans ces zones. La zone faillée sera considérée comme étant plus perméable et donc aura une conductivité hydraulique plus grande que celle des autres zones de la couche inférieure. Une autre méthode serait d'augmenter la recharge dans les zones où les valeurs calculées sont inférieures aux valeurs mesurées, et inversement pour les zones où les valeurs calculées sont supérieures aux valeurs mesurées.

Vu le nombre conséquent de zones, et donc le nombre conséquent de paramètres à modifier par essai/erreur, nous nous tournons vers une méthode de calibration automatique. Cette calibration automatique est faite par le logiciel GMS Modflow à l'aide de l'algorithme PEST.

2.4. Calibration automatique

Le principe consiste à attribuer des intervalles de fluctuation de nos différents paramètres au logiciel. Ce dernier testera différentes valeurs à l'intérieur de ces intervalles afin

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

d'optimiser la solution finale, vis-à-vis des données d'observations fournies. Ces intervalles doivent être en concordance avec les valeurs réelles (mesurées) des paramètres.

Notre calibration automatique sera faite sur les différentes conductivités hydrauliques des zones ; et sur les recharges du bedrock et de la nappe des graviers.

Contrairement aux simulations précédentes où nous considérons les hauteurs piézométriques initiales comme étant égales aux hauteurs topographiques, ici nous considérerons le résultat de la calibration manuelle précédente comme point de départ. En faisant cela, le logiciel débutera la calibration à partir d'un point qui n'est pas très éloigné de la solution. Cela aura pour avantages :

- De réduire le temps de calcul ;
- D'éviter de tomber dans un minimum local (en lieu et place du minimum global de la fonction objectif de la calibration).

À l'issue de la calibration automatique, les valeurs optimisées des paramètres sont reportées dans le Tableau 13 et le Tableau 14.

Tableau 13 : Conductivités hydrauliques optimisées à l'issue de la calibration automatique

Couche	Zone	Valeur optimisée (m/s)
Supérieure	1	1,996E-5
	2	1,817E-4
	3	9E-5
	4	1E-5
	5	1E-4
	6	1E-5
	7	1E-5
	8	1E-5
	9	6,213E-6
Inférieure	I	8,013E-9
	II	1E-6

Les conductivités hydrauliques optimisées sont dans l'ordre de grandeur des conductivités mesurées sur le terrain, nous considérons donc ces valeurs comme plausibles.

Tableau 14 : Recharges optimisées après la calibration automatique

Couche	Zone	Valeur optimisée m(/s)
Supérieure	Bedrock	5,764E-10
	Graviers	7,468E-11

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

Les recharges des deux zones sont assez faibles, ce qui s'explique par le caractère captif de la nappe. De plus, paradoxalement, la recharge dans la partie concernée par le bedrock est plus grande que celle dans la partie de la nappe des graviers. Cela pourrait s'expliquer par :

- Les activités de remblayage de la partie du bedrock ont probablement fissuré ce dernier ;
- Le site AMS Nord a plusieurs zones imperméabilisées avec des géotextiles, ce qui entrainerait de facto une diminution de la recharge au droit du site.

Les hauteurs piézométriques calculées à l'issue de la calibration automatique sont reprises sur la Figure 30. Le sens général décrit par la carte piézométrique est globalement respecté au droit du site, là où les données d'observation ont été validées.

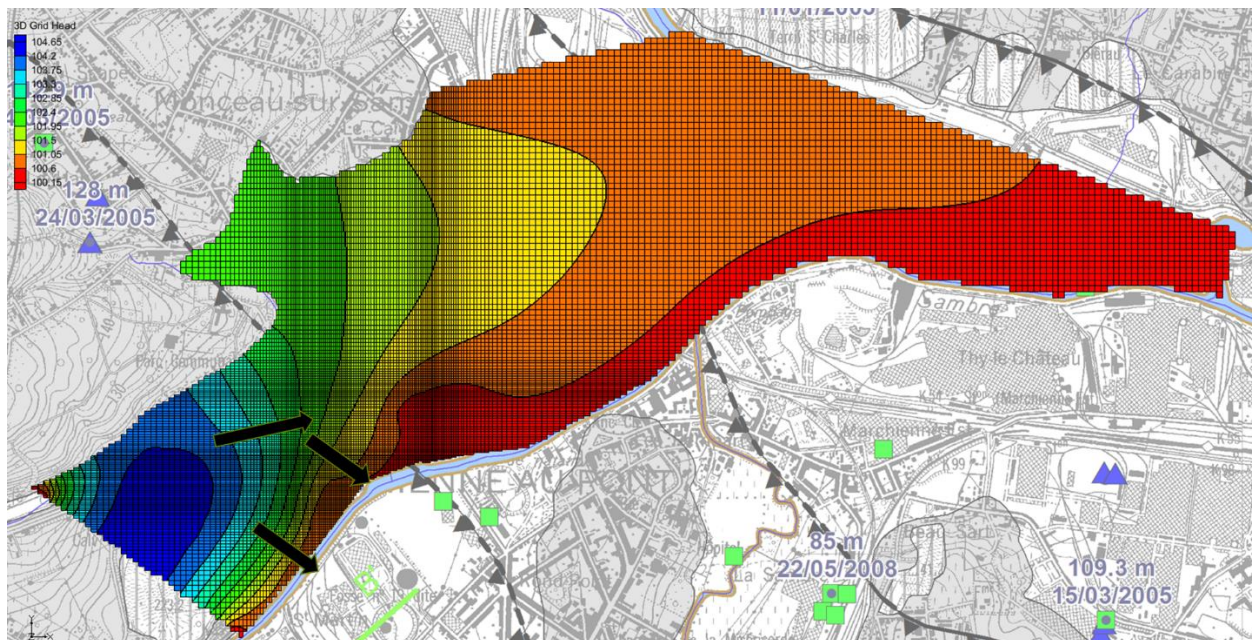


Figure 30 : Hauteurs piézométriques et sens d'écoulement général (flèches noires) après calibration automatique

En regardant de plus près les résultats au droit des points d'observation (Figure 31), on remarque les valeurs calculées reproduisent mieux les valeurs mesurées sur le terrain.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

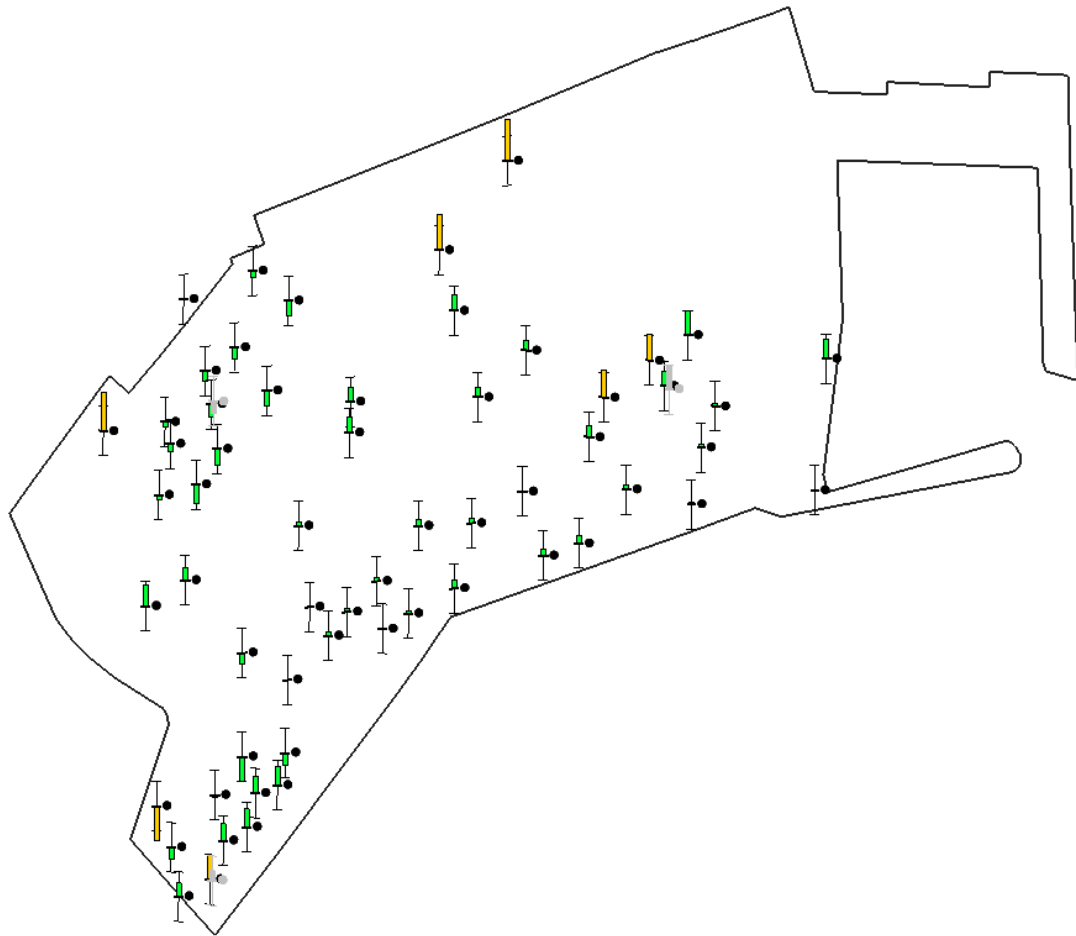


Figure 31 : Valeurs calculées aux points d'observation après calibration automatique (couche supérieure)

Cette meilleure corrélation est confirmée par le graphe valeurs mesurées – valeurs (Figure 32) calculées avec des points qui sont mieux distribués contrairement aux points avant la calibration automatique.

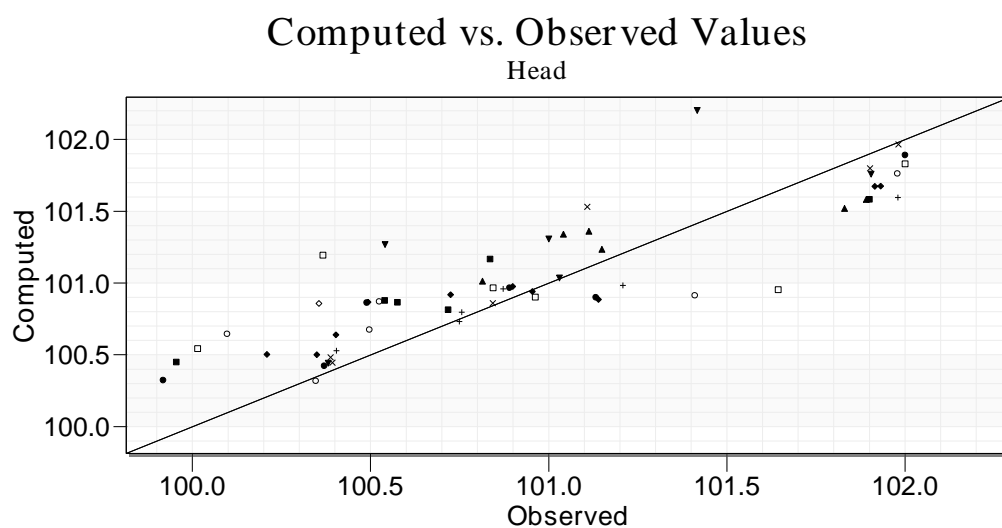


Figure 32 : Valeurs mesurées - valeurs observées après calibration automatique (couche supérieure)

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

Concernant la couche inférieure, la Figure 33 montre que les valeurs aux points d'observation sont relativement bien reproduites.

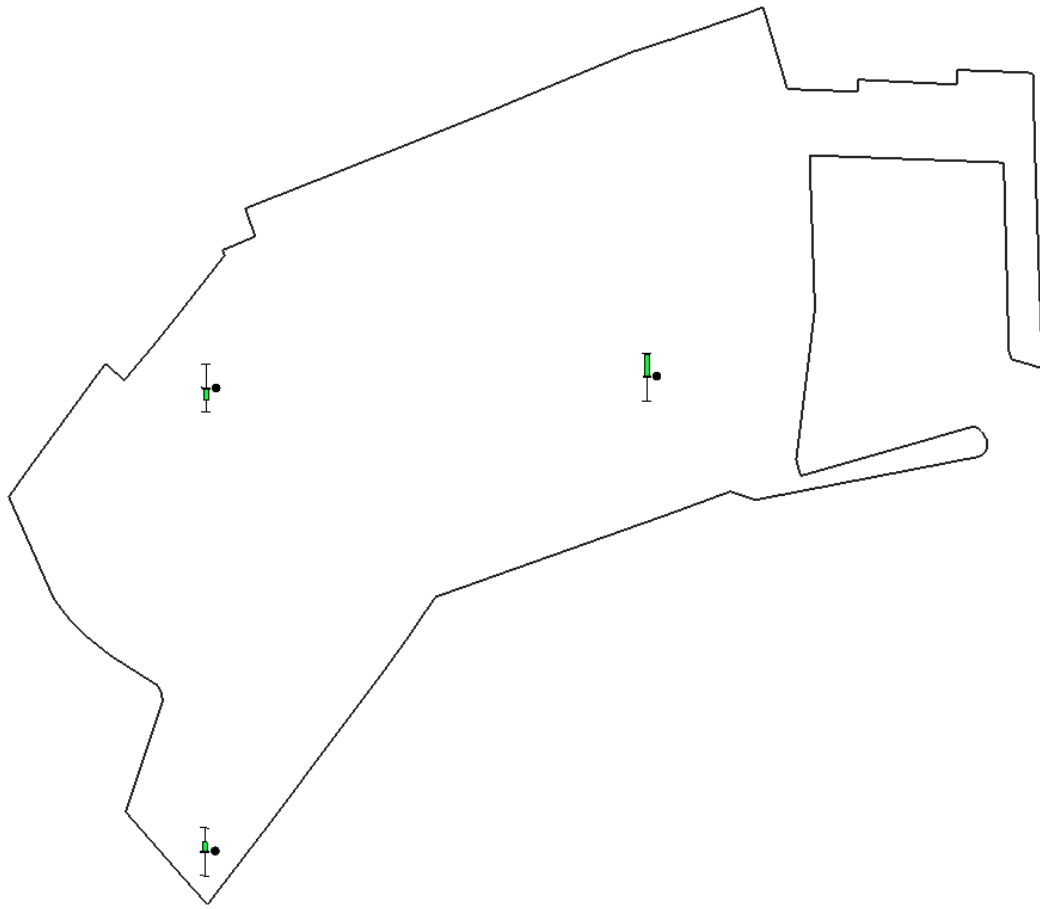


Figure 33 : Valeurs calculées aux points d'observation après calibration automatique (couche inférieure)

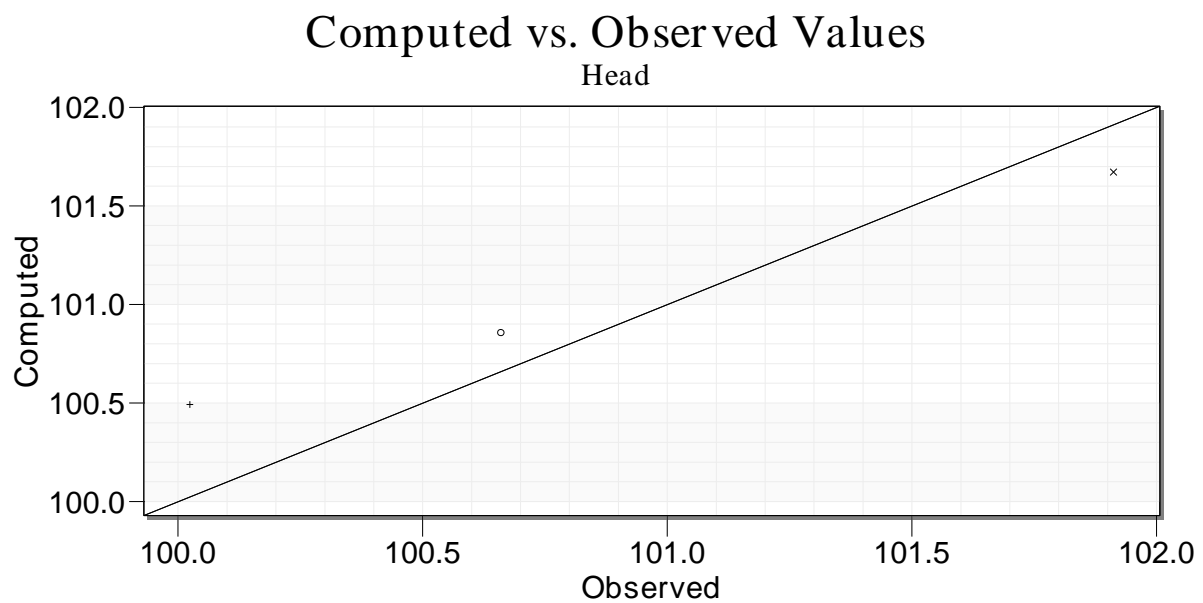


Figure 34 : Valeurs mesurées - valeurs observées après calibration automatique (couche inférieure)

Analyse de sensibilité

Cette analyse est utile afin d'analyser l'effet de chaque paramètre sur le modèle. Elle permettrait aussi de réduire la quantité de paramètre en supprimant ceux dont la sensibilité serait moindre. D'une part nous ferons une analyse de sensibilité sur les paramètres de chaque type (conductivité hydraulique, recharge) et ensuite nous ferons une analyse de sensibilité globale en considérant tous les paramètres.

La Figure 35 montre l'importance des paramètres de recharge vis-à-vis de notre modèle. La recharge du bedrock de la couche supérieure est largement plus influente sur le modèle que la recharge de la partie des graviers de la couche supérieure. Cela est logique car l'écoulement entrant dans le site provient de la colline du bois du Hameau (partie du bedrock) par infiltration latérale. Ainsi, l'influence de la recharge sur la quantité d'eau contenue au niveau de la colline du bois de Hameau a un impact direct sur la quantité d'eau qui entrera par les flancs de la colline dans le modèle.

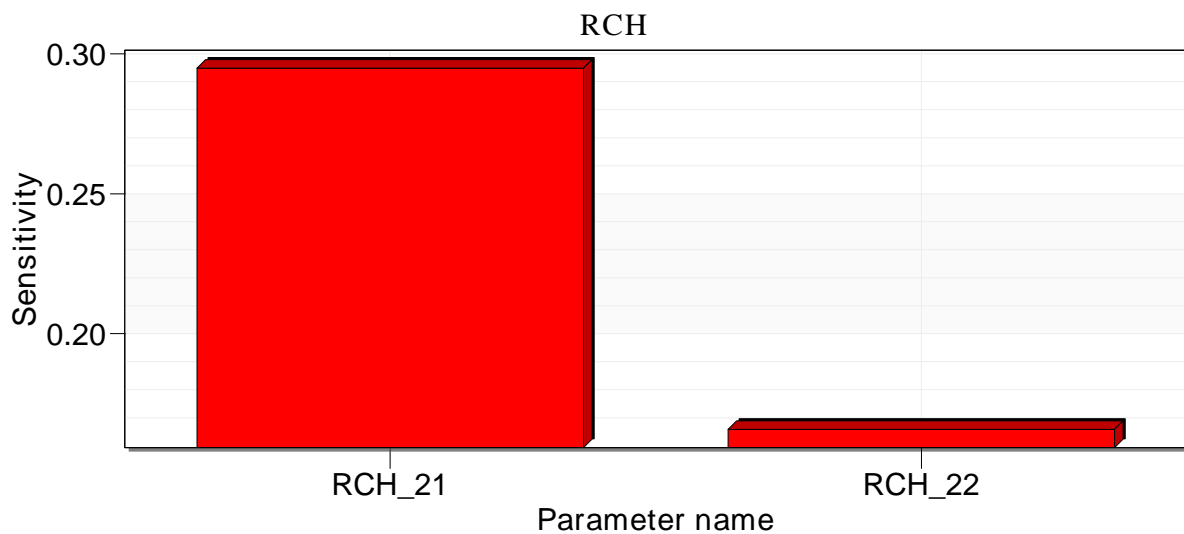


Figure 35 : Analyse de sensibilité sur les paramètres de recharge

La Figure 36 montre que le modèle est plus sensible aux conductivités hydrauliques des zones 2, 4, 5 et 6. D'une manière générale, le modèle est relativement sensible aux différentes conductivités hydrauliques mis à part la conductivité hydraulique de la zone 1. Cela pourrait s'expliquer par l'absence de points d'observation dans cette zone, additionné au fait que cette zone se situe à l'exutoire et donc n'influence aucun point d'observation en aval, et par continuité le modèle n'ajuste pas cette conductivité hydraulique pour optimiser les hauteurs piézométriques aux points d'observation.

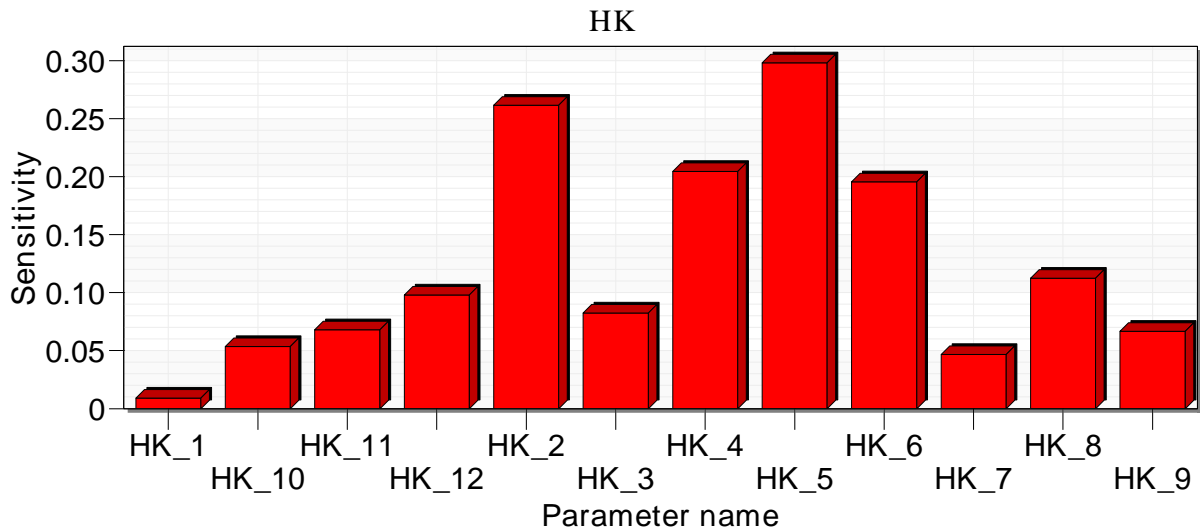


Figure 36 : Analyse de sensibilité sur les paramètres de conductivité hydraulique

La Figure 37 permet de se faire une idée de la sensibilité des paramètres de recharge et conductivités hydrauliques simultanément. Ainsi, le modèle se révèle être aussi sensible vis-à-vis de la recharge du bedrock de la couche supérieure que des conductivités hydrauliques des zones 2, 4, 5 et 6.

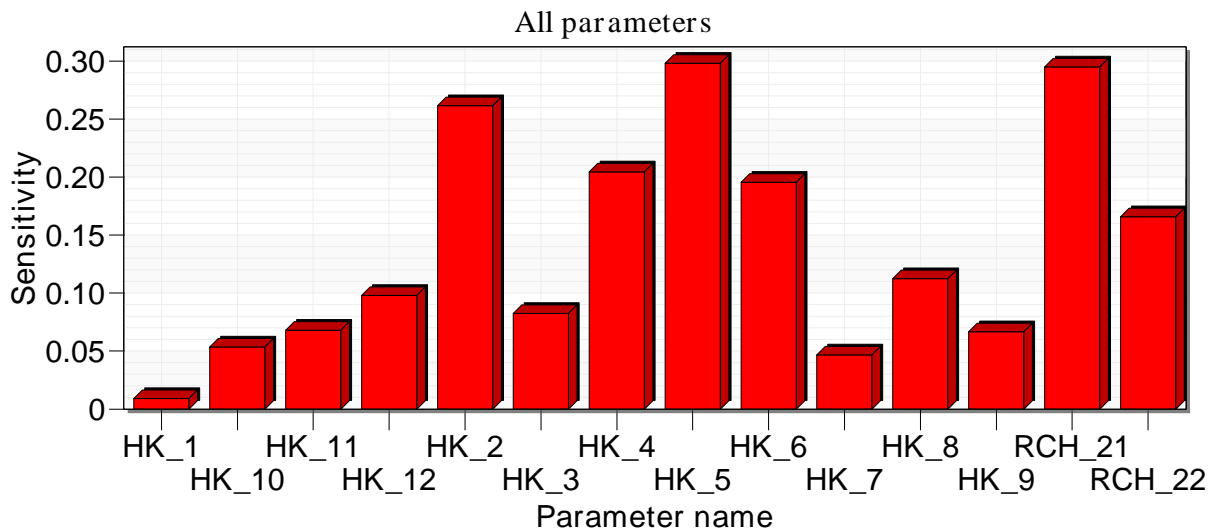


Figure 37 : Analyse de sensibilité sur tous les paramètres

Cette analyse de sensibilité devrait nous suggérer de refaire une calibration en supprimant les paramètres dont la sensibilité est pratiquement nulle. Néanmoins, le logiciel GMS Modflow, grâce à son algorithme PEST, réduit les soucis liés aux paramètres non sensibles en les gelant successivement lors du processus d'optimisation (Dassargues, 2020). Nous considérons donc notre modèle étant déjà bien calibré. Une fois notre modèle calibré, il convient de le tester sur d'autres données historiques afin de le valider.

2.5. Validation du modèle

Nous validerons notre modèle en utilisant les données piézométriques d'avril 2011 (Tableau 15).

Tableau 15 : Relevés piézométriques du site AMS Nord en avril 2011

Nom	X	Y	Hauteur observée		Nom	X	Y	Hauteur observée
PZ1	151207	121702	100.54		P17	151319	121803	100.42
Pz4b	151373	121818	100.1		Pz17	151207	121719	100.26
PZ8a	151185	121934	100.92		Pz19	151207	121732	100.57
PZ9	151154	121846	101.12		Pz20	151374	121819	100.6
PZ10a	151196	121822	101.22		P144	150947	121775	101.89
PZ10b	151196	121823	101		P202	151029	121584	101.53
PZ11	151280	121800	100.24		P212	151032	121542	100.44
PZ12a	151279	121801	100.81		P214	151037	121562	100.49
PZ12b	151278	121802	100.39		P228	151112	121659	101.06
PZ14a	151168	121795	101.09		P231	151154	121683	100.53
PZ14b	151168	121795	101.06		P241	151050	121567	100.42
PZ15	151145	121882	101.11		P244	151027	121542	100.84
FP16	151194	121740	100.97		P245	151047	121568	101.38
FP18	151243	121795	100.4		P246	151059	121613	101.12
FP20	151269	121817	100.33		P312'	151092	121775	101.4
FP21	151292	121832	100.28		P319	150992	121587	101.46
P101	151208	121725	100.49		P322	150993	121708	101.2
P112	151129	121671	100.94		P501	151018	121534	100.54
P113	151233	121775	100.64		P503	150987	121530	101.66
P115	151186	121769	100.65		P507	151010	121512	100.32
P901	151234	121772	100.59		P509	151012	121511	100.73
P903	151127	121668	100.92		P510	150995	121516	100.51

La Figure 38 montre que notre modèle reproduit assez bien les données d'avril 2011. En effet, la majeure partie des points d'observations apparaît en vert. De plus, on remarque que 80% des points apparaissant en jaune correspondent à des valeurs calculées inférieures aux valeurs mesurées. Cela pourrait trouver une explication dans le fait que notre modèle a été calibré avec des données de juillet 2010, un été particulièrement chaud où les hauteurs piézométriques étaient très basses. Au vu de ces observations, nous pouvons considérer notre modèle comme étant validé.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

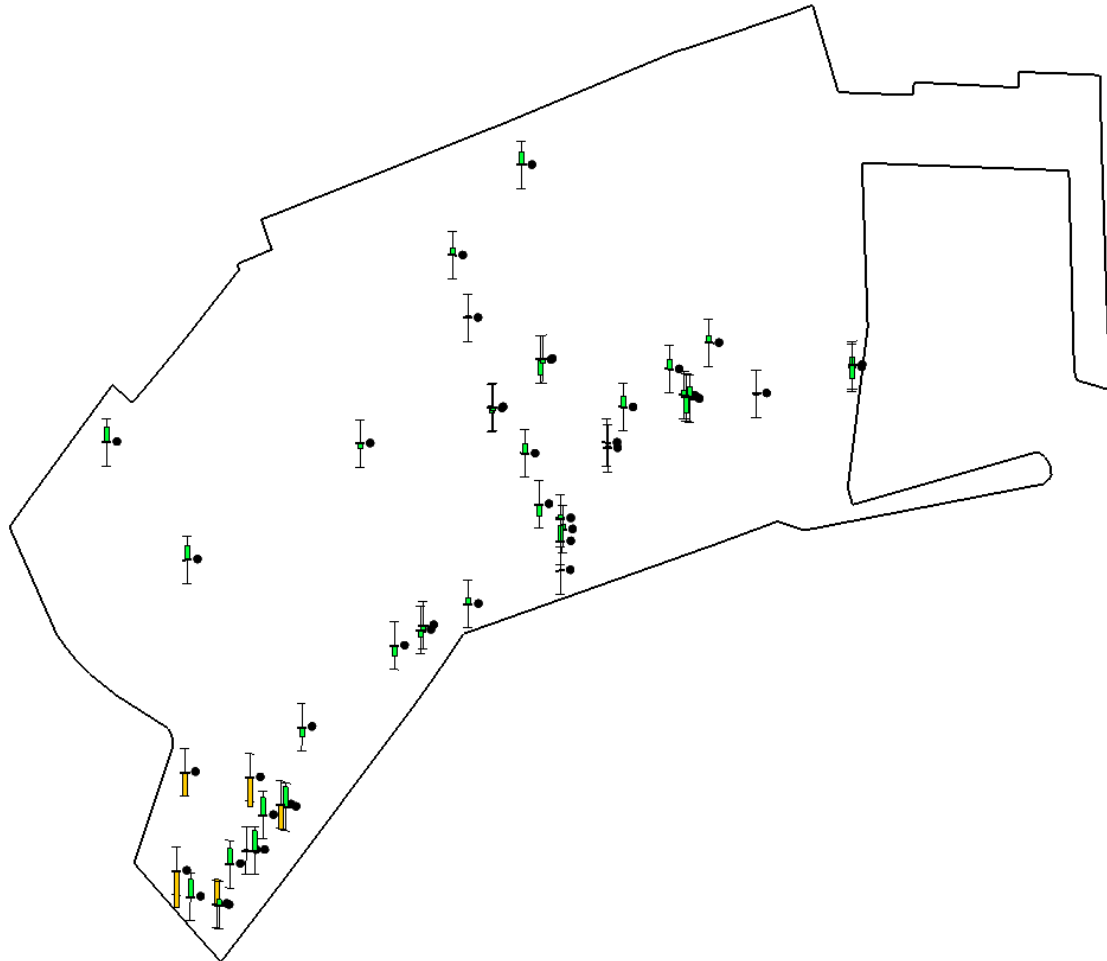


Figure 38 : Valeurs calculées aux points d'observation avec les paramètres optimisés (couche supérieure)

Notre modèle à ce stade est jugé apte à reproduire relativement bien la réalité, nous pouvons donc implémenter la mise en place du mur emboué.

PARTIE 3 : MODELISATION DE L'EFFET DU MUR EMBOUÉ

L'utilisation du mur emboué est une technique de confinement hydraulique utilisée dans le cadre de l'assainissement de sols pollués. Il sert à empêcher une nappe d'eau polluée d'atteindre des récepteurs à risques. Dans le cadre de ce travail, le récepteur principal est la Sambre située en bordure du site AMS Nord.

Nous utiliserons le logiciel GMS Modflow avec son package HFB (Horizontal Flow Barrier) pour simuler l'effet d'un mur emboué.

1. IMPLÉMENTATION D'UN MUR DANS LE LOGICIEL GMS

La modélisation de murs dans le logiciel GMS Modflow est possible grâce à son package HFB (Horizontal Flow Barrier). Ce package réduit la conductance entre des paires spécifiques de cellules pour reproduire les obstacles à l'écoulement tels que des murs emboués. La caractérisation hydraulique de ces obstacles est nécessaire pour le développement de modèles d'écoulement des eaux souterraines dans le programme choisi, GMS Modflow. Un paramètre appelé caractéristique hydraulique (HC) peut être utilisé pour effectuer une telle caractérisation hydraulique (hydraulic conductivity equivalent). C'est le rapport de la transmissivité équivalente (du système constitué de la barrière et de l'épaisseur restante de l'aquifère) à la largeur de barrière (BOUKHEMACHA, et al., 2013).

$$HC = \frac{T_{eq}}{a} = \frac{\frac{bK_b + (B-b)K}{B} B}{a} = \frac{bK_b + (B-b)K}{a}$$

Avec :

T_{eq} [L^2/T] : transmissivité équivalente du système barrière + épaisseur restante de l'aquifère

HC [L/T] : caractéristique hydraulique de la barrière

a [L] : épaisseur de la barrière

b [L] : hauteur de barrière traversant la partie saturée de l'aquifère

B [L] : épaisseur saturée de l'aquifère

K [L/T] : conductivité hydraulique horizontale de l'aquifère

K_b [L/T] : conductivité hydraulique de la barrière.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

La Figure 39 illustre la correspondance entre la réalité et l'implémentation du mur dans le programme.

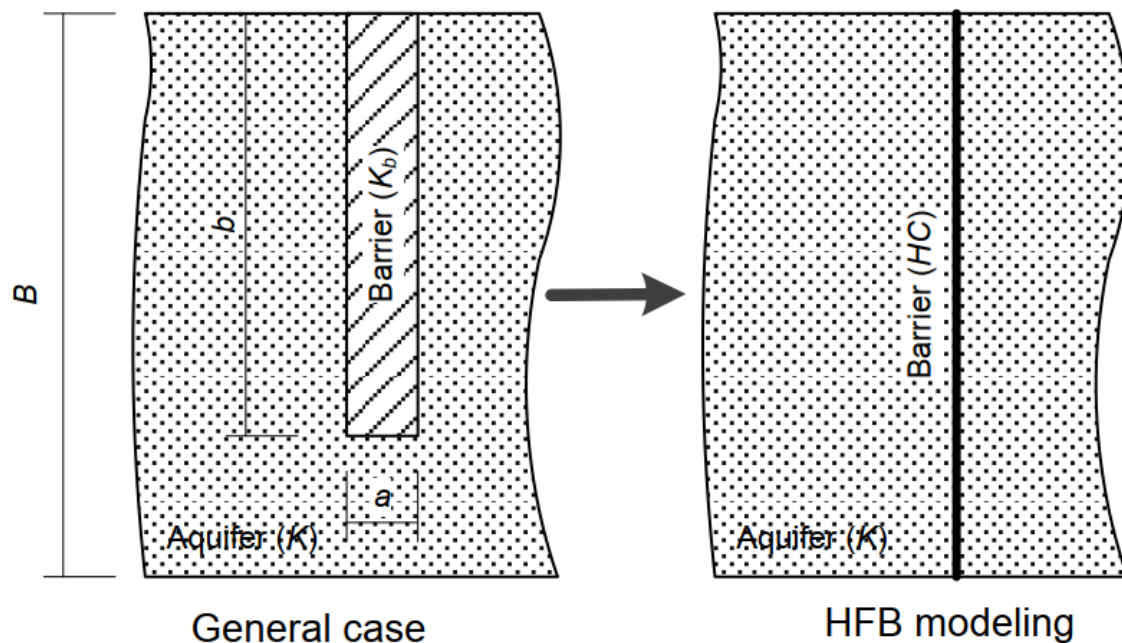


Figure 39 : Implémentation du mur emboué dans le programme GMS Modflow (BOUKHEMACHA, et al., 2013)

Nous pouvons ainsi constater la géométrie de la barrière est un des paramètres principaux à prendre en compte. En effet, la quantification de la conductivité hydraulique équivalente de la barrière nécessite :

- la largeur de la barrière ;
- le toit et le mur de la barrière dans le plan vertical.

Grâce à ce dernier paramètre, nous pourrions identifier le mode de pénétration de la barrière dans l'aquifère.

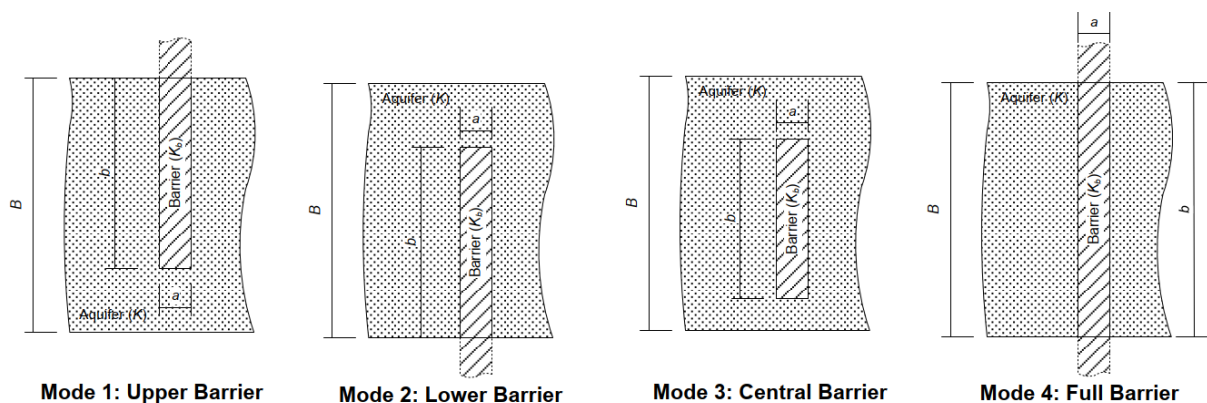


Figure 40 : Modes de pénétration de la barrière dans l'aquifère

1.1. Caractéristiques du mur sur le site d'étude

Le type de mur choisi pour le confinement hydraulique de la pollution sur le site AMS Nord correspond aux pieux sécants. Ce sont des pieux qui sont mis en place de telle sorte qu'au final, ils s'entrecoupent entre eux, ce qui leur confère une certaine imperméabilité.

La largeur du mur emboué est égale au diamètre des pieux (0,88m). Nous prendrons une largeur valant 1m pour se mettre du côté de la sécurité. La hauteur des pieux utilisés sur le site varie quant à elle entre 9,08 m et 11,40 m. Nous considérons une hauteur constante de pieux pénétrant totalement l'aquifère pour simuler un mode de pénétration de type « full barrier » et se positionner du côté de la sécurité.

La conductivité hydraulique d'un mur emboué est généralement très faible afin que ce dernier soit assimilé à une paroi imperméable. Dans ce travail nous prendrons une valeur de l'ordre de $1\text{E-}9\text{m/s}$ (Skutnik, Bajda, & Lech, 2019).

1.2. Caractéristiques de l'aquifère au droit du site

Le mur emboué est implanté dans la zone sud-ouest du site (Figure 41). Cela correspond à la zone Electrabel (zone 6 dans notre modèle).

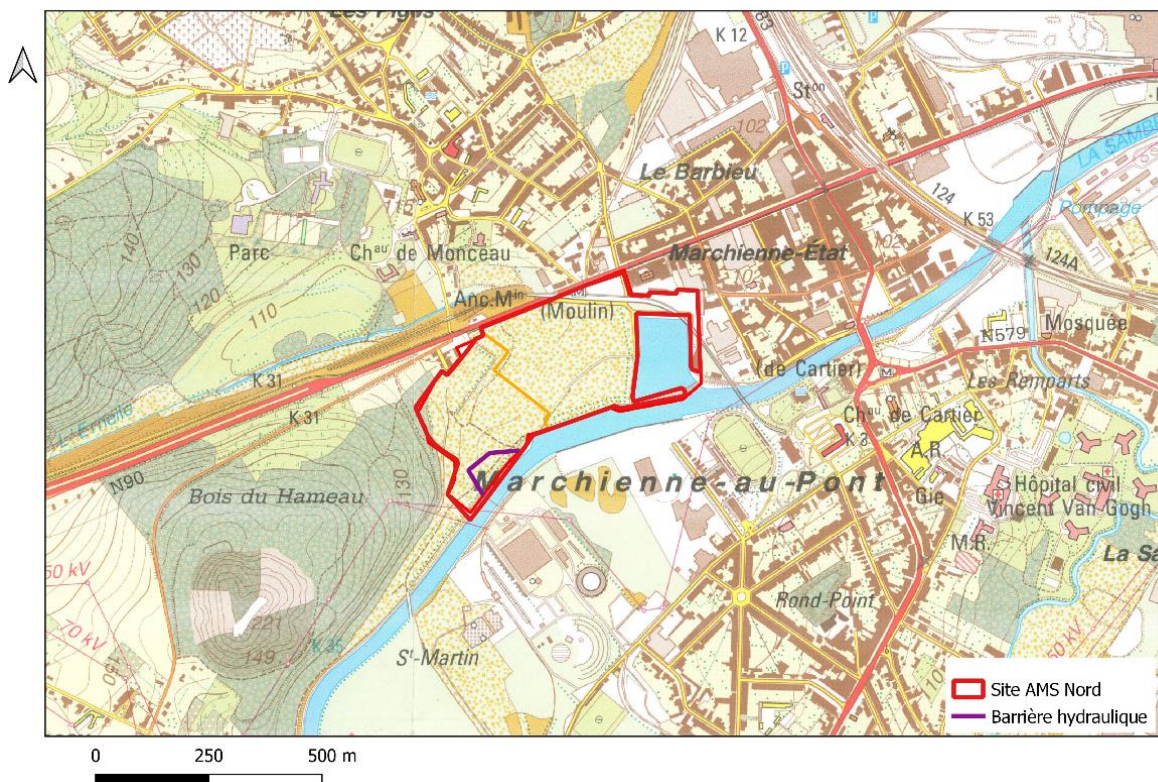


Figure 41 : Localisation de la barrière hydraulique sur le site AMS Nord

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

La conductivité hydraulique calculée en cette zone vaut 1E-4m/s. Pour des besoins de simplification, nous considérerons cette conductivité hydraulique comme étant homogène au droit de la zone du mur. Toujours pour ces mêmes raisons, l'épaisseur de la nappe des graviers sera prise égale à 2m (Figure 42).

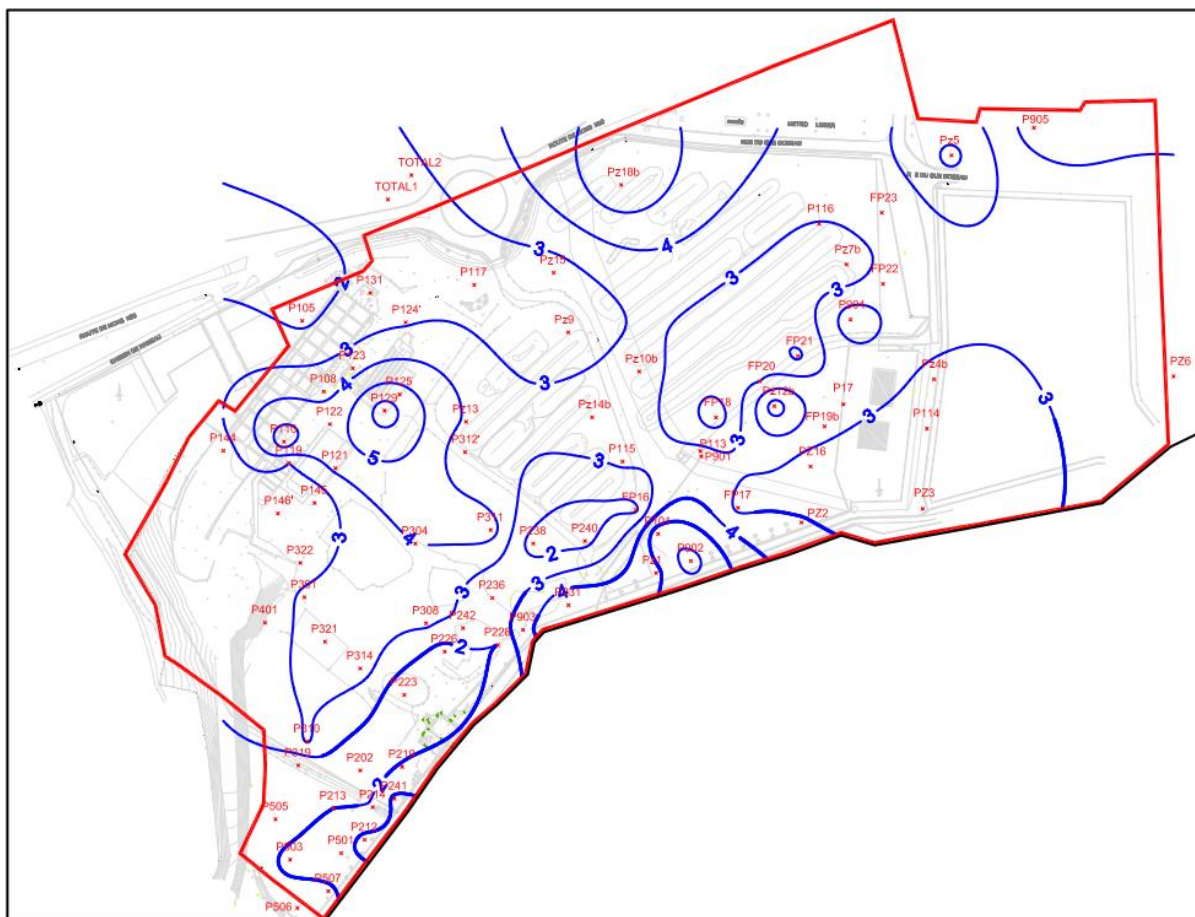


Figure 42 : Epaisseur de la nappe alluviale au droit de la zone du mur (sud-ouest) (Hydreau, 2012)

2. RÉALISATION DE LA SIMULATION

Le mode de pénétration choisi constitue la base des simulations implémentées dans ce travail. Les caractéristiques hydrauliques du mur sont calculées grâce à la formule précédemment renseignée :

$$HC = \frac{bK_b + (B - b)K}{a}$$

Tableau 16 : Caractéristiques hydrauliques du mur

Simulation	a (m)	K _b (m/s)	B (m)	K (m/s)	b (m)	HC (m/s)
Full barrier	1	1E-9	2	1E-4	2	2E-9

2.1. Simulation du mode « Full Barrier »

Sur la base des informations précédemment renseignées, une simulation est effectuée dans le logiciel GMS. La Figure 43 montre l'effet du mur sur la piézométrie générale de la zone d'étude.

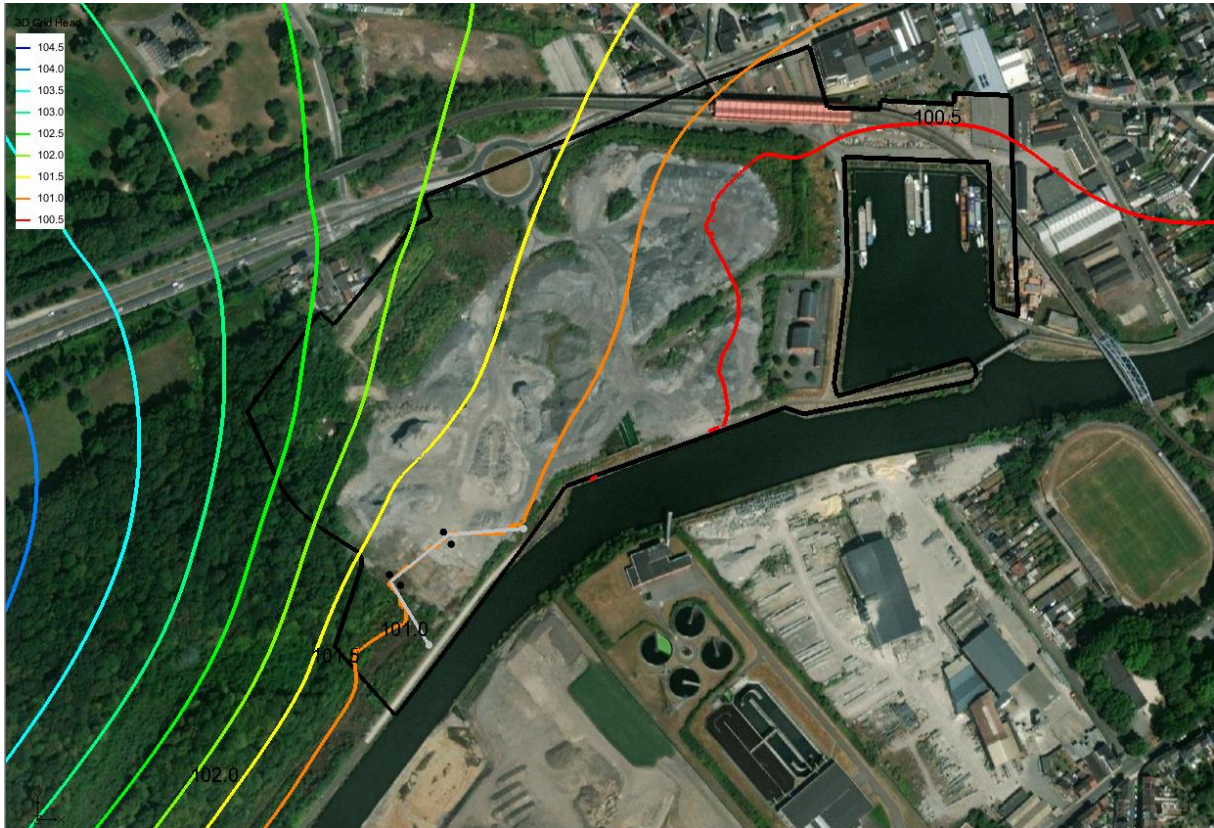


Figure 43 : Carte piézométrique de la zone d'étude après l'implantation du mur

Afin de bien comprendre l'impact de la construction du mur, une interprétation est faite sur les écoulements, le gradient hydraulique, les vitesses d'écoulement, et un essai simplifié de transport de particules à l'aide du code MODPATH.

2.2. Influence du mur sur les écoulements

La Figure 44 montre une comparaison de la piézométrie avant et après la construction du mur, sur la couche supérieure des graviers et sur la couche inférieure du bedrock. Aussi bien que pour la couche supérieure que pour la couche inférieure, la piézométrie est modifiée au droit du mur. En effet, le mur provoque une accumulation, et donc une hausse de la hauteur d'eau ce qui a pour effet de modifier l'allure de la courbe piézométrique à ce niveau. Mieux encore, une isopièze se forme le long du mur perpendiculairement à l'écoulement, témoignant du contournement de ce mur par l'eau.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

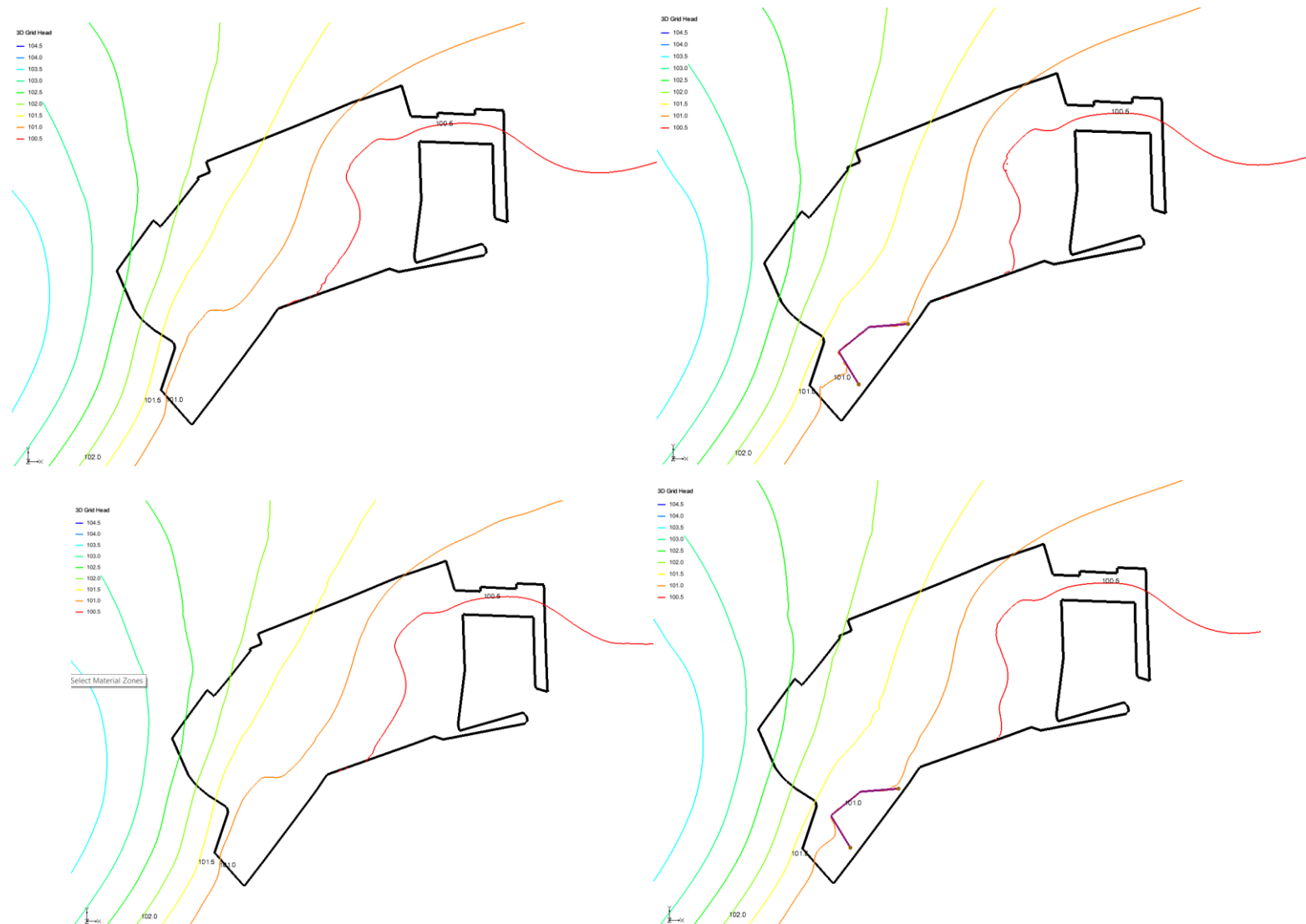


Figure 44 : Carte piézométrique de la couche supérieure (au-dessus) et de la couche inférieure (en dessous), avant (à gauche) et après (à droite) l'implantation du mur

2.3. Influence du mur sur le gradient hydraulique

Afin de confirmer l'observation visuelle faite sur les hauteurs piézométriques après l'implantation du mur, le calcul des gradients hydraulique avant et après l'implantation du mur est effectué. En effet, une variation des niveaux se répercuterait d'office sur les gradients hydrauliques. Nous travaillons sur les piézomètres P701, P702, P703 et P704 implantés durant la phase de mesure des flux suivant la méthode FVPDM (Figure 45). P701 (respectivement P703) est en amont de P702 (respectivement P704).

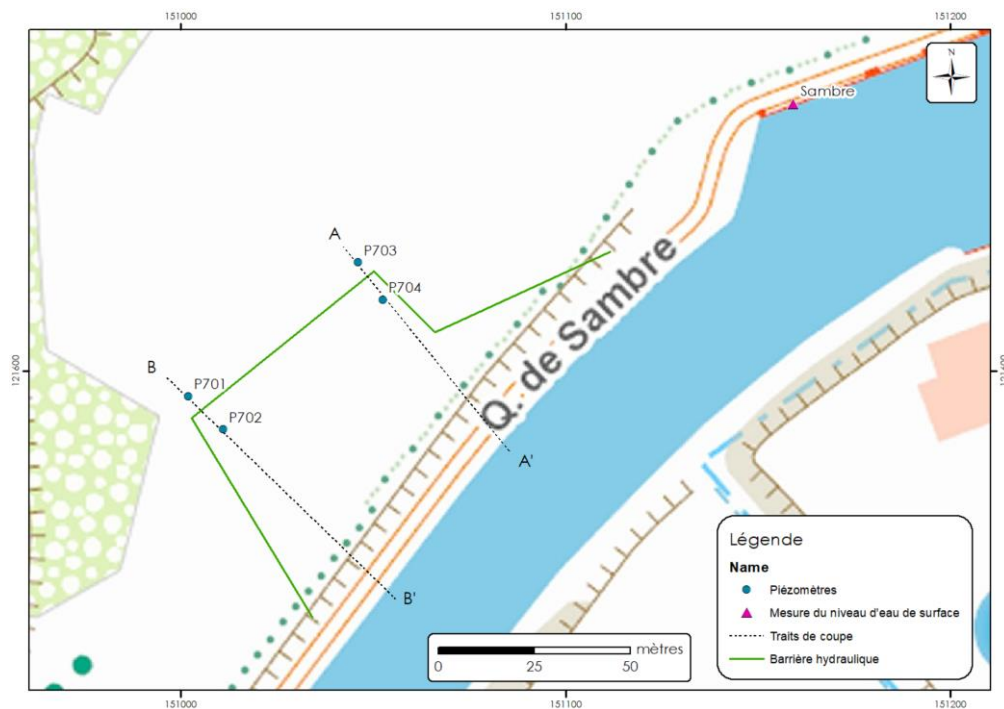


Figure 45 : Localisation des piézomètres pour le calcul des gradients hydrauliques (Jamin & Brouyère, 2020)

Le Tableau 17 synthétise les résultats calculés obtenus lors de nos simulations.

Tableau 17 : Gradients hydrauliques calculés après simulations sur GMS

Noms	X [m]	Y [m]	HPiézo Avant [m]	Hpiézo Après [m]	Distance [m]	Gradient avant [%]	Gradient après [%]
P701	151001	121593	100.944	101.225	12.5	0.104	4.3
P702	151010	121584	100.931	100.683			
P703	151045	121628	100.948	101.349	11.76	0.187	5.9
P704	151052	121618	100.926	100.655			

Comme attendu, nous avons une variation dans les gradients hydrauliques avant et après implantation du mur. En effet, l'augmentation du niveau d'eau en amont du mur et sa diminution en aval entraînent une augmentation de la variation du niveau d'eau entre

piézomètres amont/aval. Ce gradient passe de moins de 1% à plus de 4%. Cette augmentation est du même ordre de grandeur que celle obtenue lors de l'étude FVPDM (Tableau 18).

Tableau 18 : Gradients obtenus lors de l'étude FVPDM (Jamin & Brouyère, 2020)

	Unité	Date	P701	P702	P703	P704
Gradient hydraulique entre couple de piézomètres amont/aval	%	05/2019	0.08		0.77	
		09/2019	2.09		1.87	
		12/2019	3.85		4.17	

2.4. Influence du mur sur les flux d'eau souterraine

Une étude sur les flux d'eau souterraine au droit du site est menée au regard des résultats obtenus lors de nos différentes simulations. L'ordre grandeur des flux calculés est de 10^{-7} m/s. Cet ordre de grandeur est inférieur à celui obtenu lors des travaux de l'étude FVPDM, 10^{-5} m/s (Jamin & Brouyère, 2020). Cependant, les flux obtenus lors des essais FVPDM ont été surestimés. Nous étudions donc les variations de flux afin de corroborer les variations obtenues lors de l'étude FVPDM. Le Tableau 19 récapitule les résultats obtenus :

Tableau 19 : Comparaison entre variations de flux calculés et flux obtenus lors de l'étude FVPDM

Piézomètres	Flux avant le mur (m/s)		Flux après le mur (m/s)		Variations (%)	
	Simulation	FVPDM	Simulation	FVPDM	Simulation	FVPDM
P701	1,23E-7	6,65E-5	8,08E-7	2,186E-5	557	-67
P702	1,43E-7	1,57E-5	4,27E-9	1,655E-5	-97	+5
P703	1,60E-7	4,41E-5	3,37E-8	1,156E-5	-78	-74
P704	2,06E-7	4,7E-5	5,20E-8	1,149E-5	-75	-76

Les variations calculées en P703 et 704 sont pratiquement similaires aux variations rencontrées lors de l'étude FVPDM. En revanche, les résultats obtenus en P701 et P702 sont très différents. La différence significative obtenue pourrait confirmer l'hypothèse d'un ancrage imparfait du mur, dans cette zone, suggérée lors de l'essai FVPDM. De plus, P701 étant situé à la limite entre la zone de faible flux et celle à flux fort, il est probable que le programme GMS l'inclut dans une cellule à flux élevé contrairement à ce qu'il en est réellement (Figure 48).

L'observation de la Figure 46 et la Figure 47 nous permet de nous faire une idée sur l'influence qu'a le mur sur les vitesses d'écoulement. L'échelle de couleur de la légende située en haut à gauche nous montre l'amplitude des différentes vitesses. Ainsi, le mur réduit les vitesses

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

d'écoulement observées avant sa construction. Cette observation est valable principalement dans la couche des graviers. Cela s'explique par le fait que nous considérons que le mur est implanté uniquement dans toute l'entièreté de la couche des graviers.

Néanmoins, au niveau de la couche inférieure du bedrock, une composante de vitesse d'écoulement dirigée sud-ouest nord-est, de la Sambre vers la nappe alluviale, semble se former.

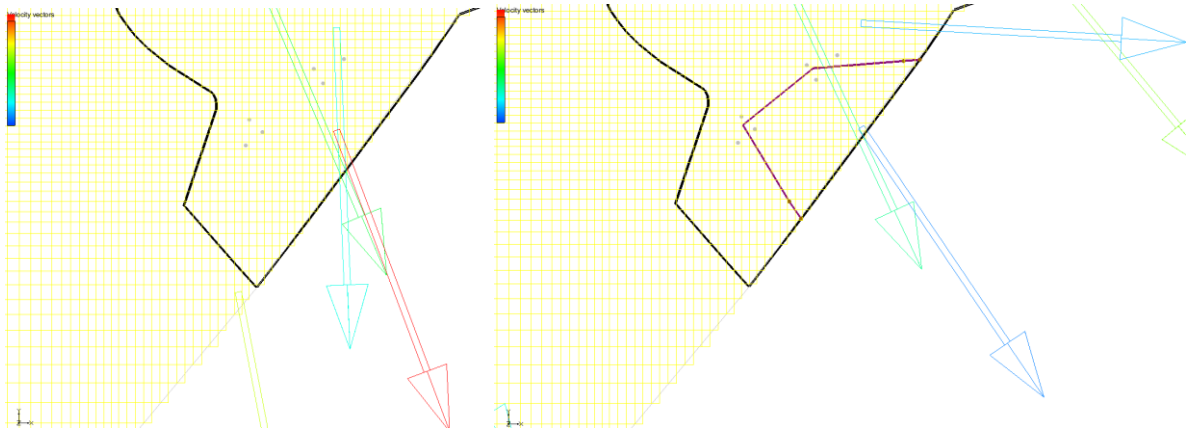


Figure 46 : Vue rapprochée des vitesses d'écoulements au droit du mur avant (gauche) et après (droite) son implantation dans la couche supérieure

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

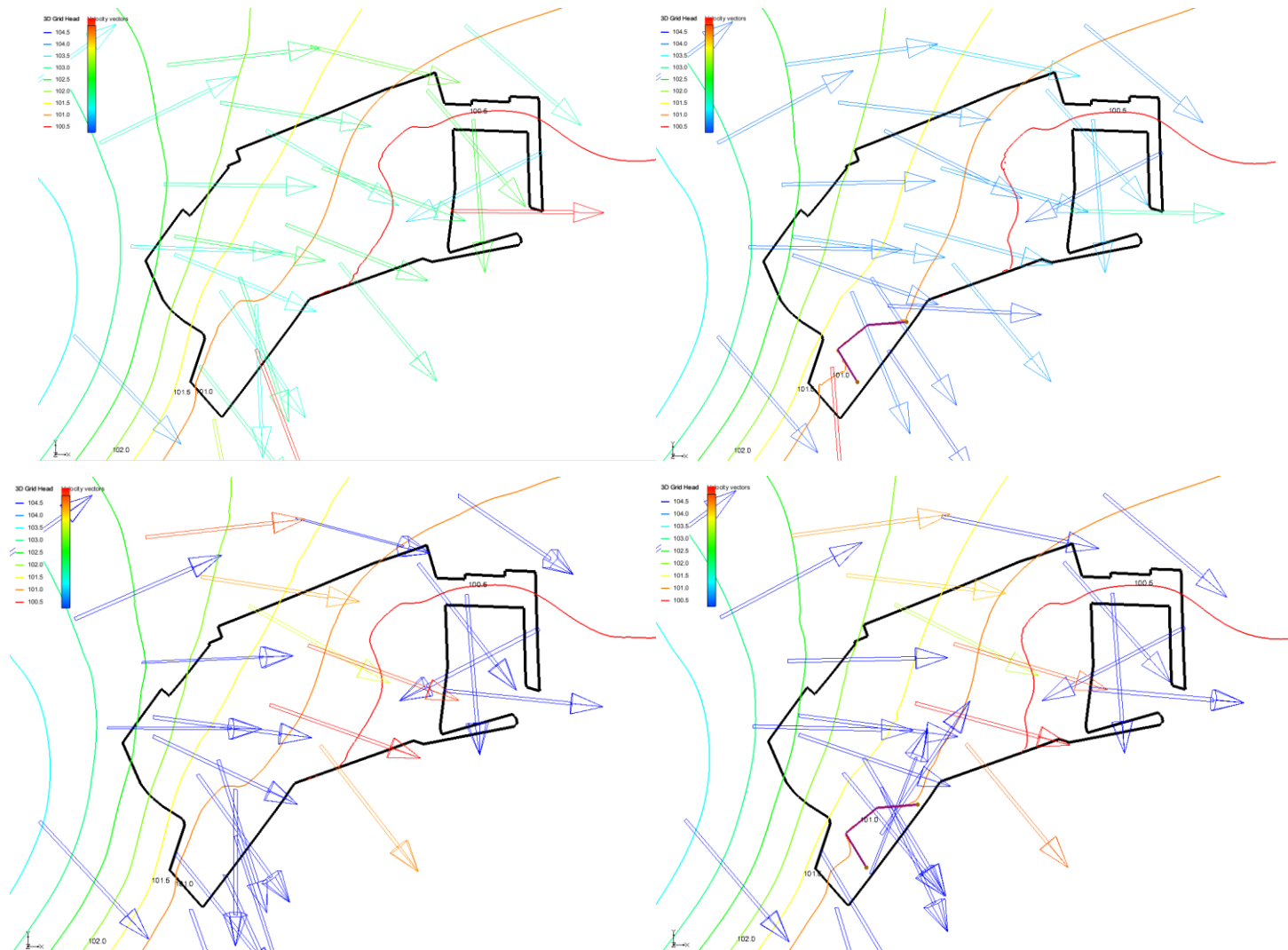


Figure 47 : Vitesses d'écoulements dans la couche supérieure (au-dessus) et dans la couche inférieure (en dessous), avant (à gauche) et après (à droite) l'implantation du mur

Il semblerait donc qu'au final, un écoulement secondaire dirigé de l'ouest vers l'est semble se former dans les deux couches. Cela pourrait être dû à la configuration du mur. En effet, une zone de flux faible se forme en amont de ce dernier (Jamin & Brouyère, 2020), ce qui conduit à son contournement de part et d'autre de sa structure. L'eau, une fois arrivée à son extrémité inférieure gauche, semble revenir à l'intérieur du mur du fait de la différence de hauteur piézométrique entre les deux zones concernées.

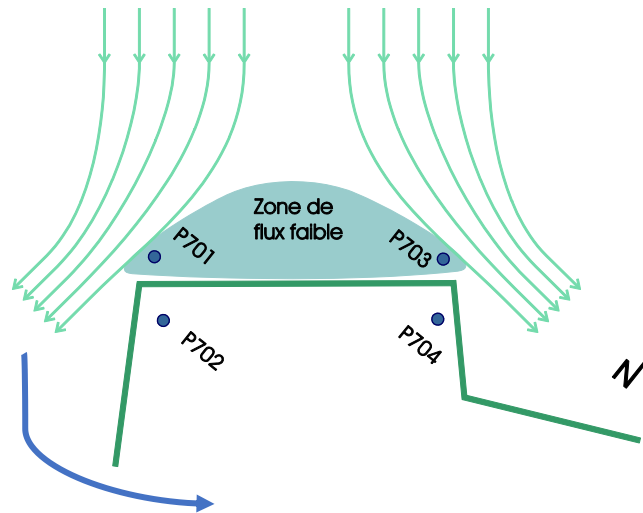


Figure 48 : zone de flux faible (Jamin & Brouyère, 2020) et écoulement préférentiel (en bleu) en aval du mur

Nous pouvons mettre en relation cette conclusion avec un essai de simulation de transport de polluants. Cet essai est fait sur la base d'une simplification majeure. En effet, nous ne nous préoccupons pas du type de polluant et donc des éventuelles interactions de ce dernier avec le milieu. Nous faisons plutôt une simple analyse de transport de particules avec le module MODPATH du logiciel GMS afin de corroborer les sens d'écoulement précédemment identifiés à la suite de l'implantation du mur.

2.5. Modélisation du transport de particules à l'aide du module MODPATH

Nous implantons des particules au cœur de cellules de la couche supérieure des graviers supérieure situées en amont du mur afin de simuler l'écoulement de la nappe des graviers au droit du mur. Une porosité cinématique moyenne de 2% est choisie sur base des travaux antérieurs (DELCAMBRE & PINGOT, 2000). La Figure 49 montre le chemin suivi par ces particules avant et après l'implantation du mur. En analysant ce chemin parcouru, nous pouvons nous faire une idée sur le sens d'écoulement au droit du mur.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

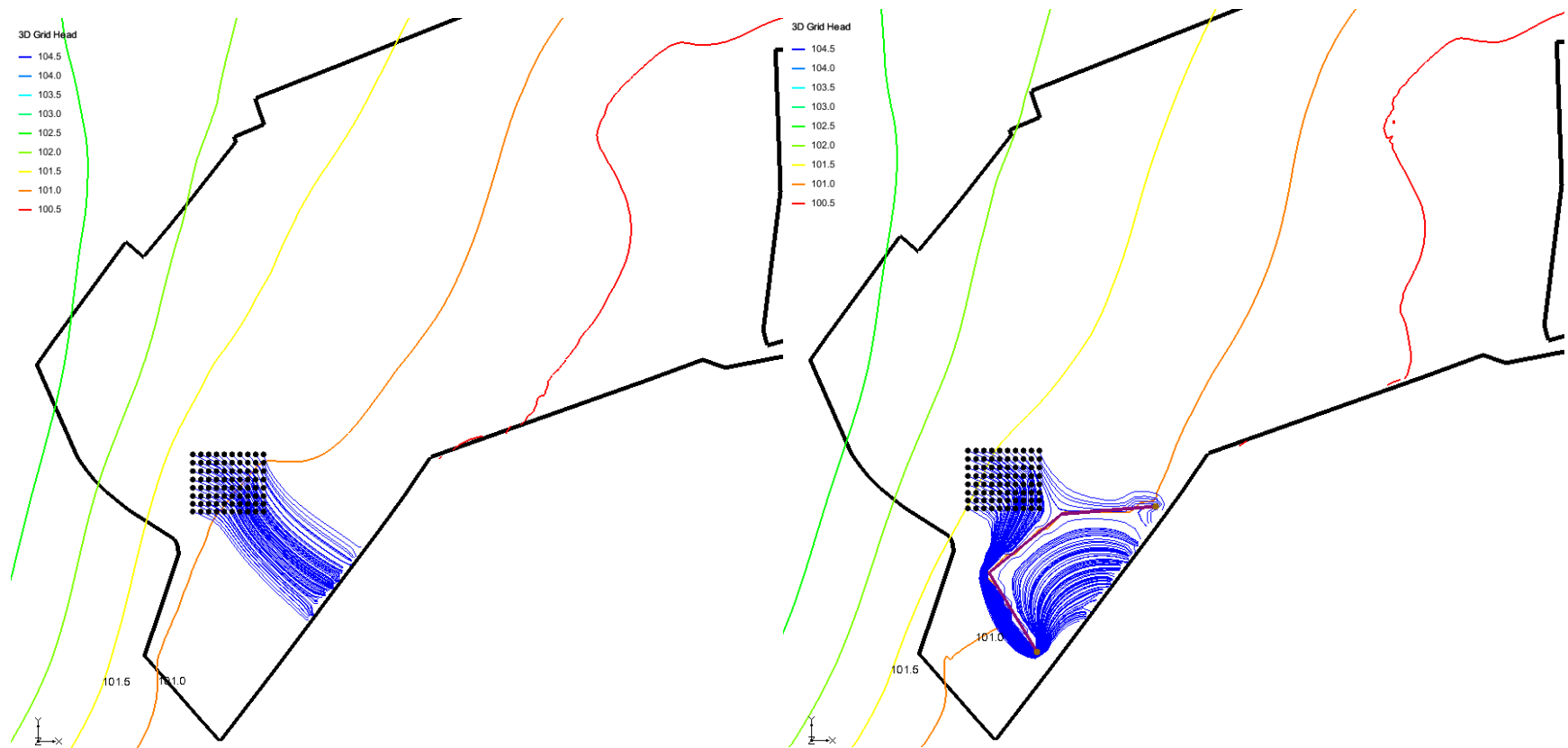


Figure 49 : Effet de la barrière sur le parcours des particules au cœur de la nappe des graviers (à gauche : avant l'implantation de la barrière ; à droite : après l'implantation de la barrière)

Les particules semblent effectivement déviées par la barrière. Néanmoins, le chemin préférentiel identifié d'ouest en est après l'implantation de la barrière semble se confirmer. En effet, plusieurs particules tendent à suivre ce chemin et ainsi à revenir en aval de la barrière. Cette hypothèse est tout de même à prendre avec précaution car cela pourrait dû à des artefacts numériques du fait des contraintes imposées aux frontières du mur et de la Sambre.

Cette relative imperméabilité de la barrière est confirmée par la Figure 50. Cette vue en 3D nous montre que le mur joue son rôle de barrière imperméable. De plus, le temps de parcours des particules avant et après l'implantation du mur est multiplié par 8, d'après les résultats de la simulation MODPATH.

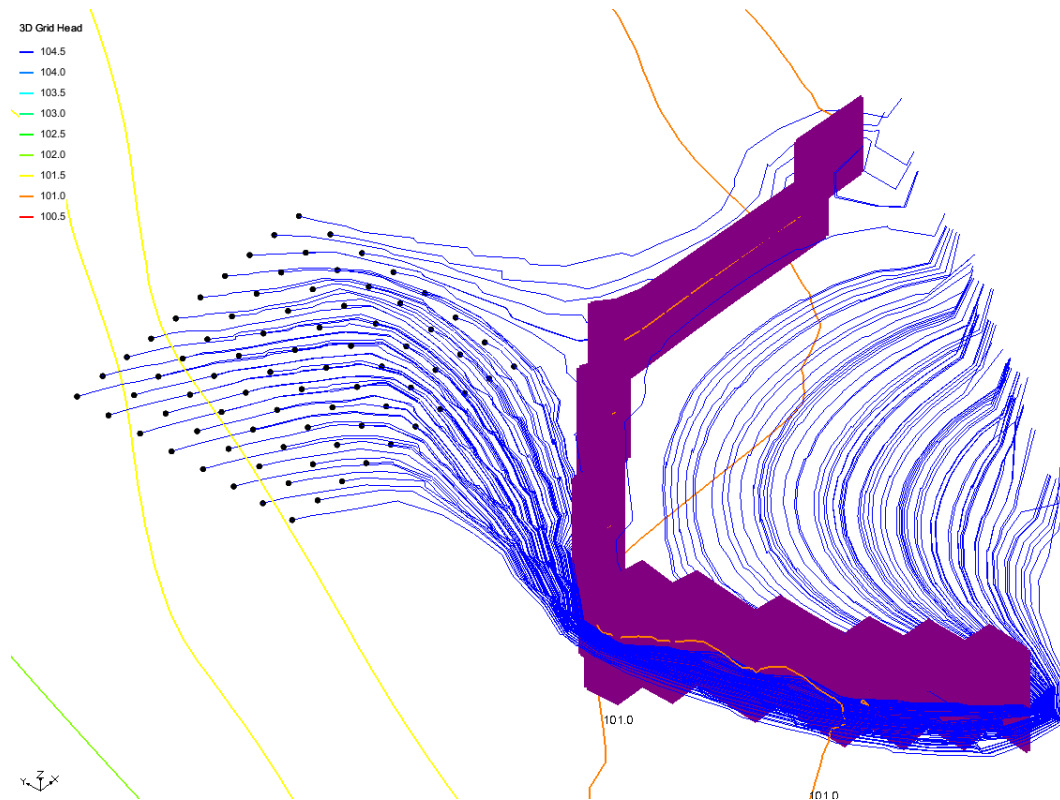


Figure 50 : Vue en 3D du transport des particules au cœur de la nappe des graviers après l'implantation de la barrière

Afin d'avoir une interprétation globale de l'écoulement de la nappe des graviers, il est judicieux d'observer le transport de particules situées à l'interface entre la nappe des graviers et la nappe du bedrock. Cette observation est faite particulièrement aux endroits intensément altérés et donc, où l'interaction entre ces deux nappes est possible. Ces particules sont donc implantées au sommet de la couche inférieure et non plus au cœur comme précédemment. La Figure 51 nous montre le chemin de ces particules situées aux interfaces précitées.

Modélisation de l'impact de la construction d'un mur emboué sur les flux d'eau souterraine au droit d'un site contaminé en bord de rivière

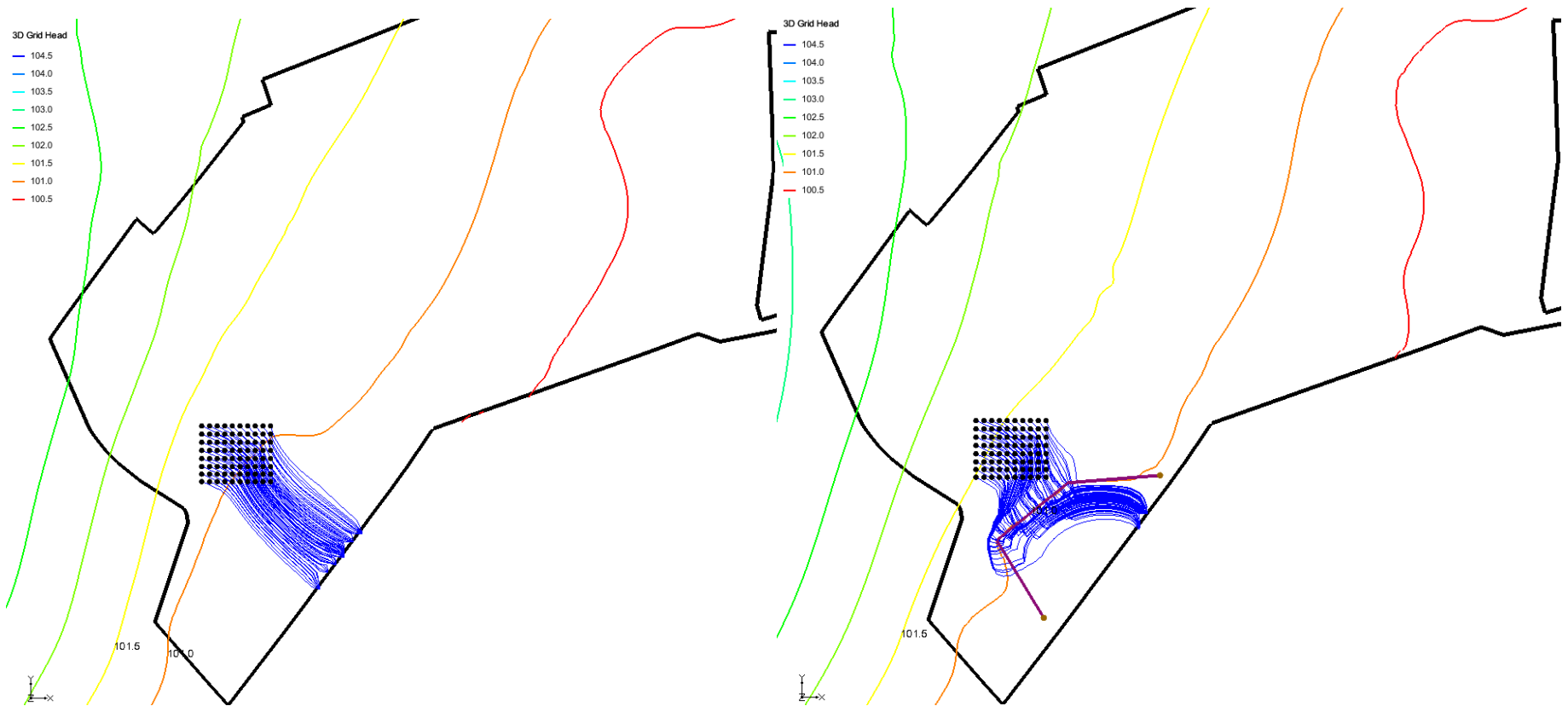


Figure 51 : Effet de la barrière sur le parcours des particules situées à l'interface entre les deux nappes (à gauche : avant l'implantation de la barrière ; à droite : après l'implantation de la barrière)

Dans cette nouvelle configuration, il semblerait que toutes les particules traversent le mur. Ce n'est pas tout à fait vrai. En effet, le mur n'étant implanté que dans la couche supérieure et les particules à l'interface entre les deux couches, il serait logiquement possible que certaines particules puissent passer en dessous du mur. Le mur peut donc rester imperméable sans pour autant empêcher sa traversée par le dessous.

La Figure 52 confirme l'affirmation précédente. Dans cette vue en 3D, les particules passent en dessous du mur avant de remonter dans la nappe des graviers après avoir traversé la barrière.

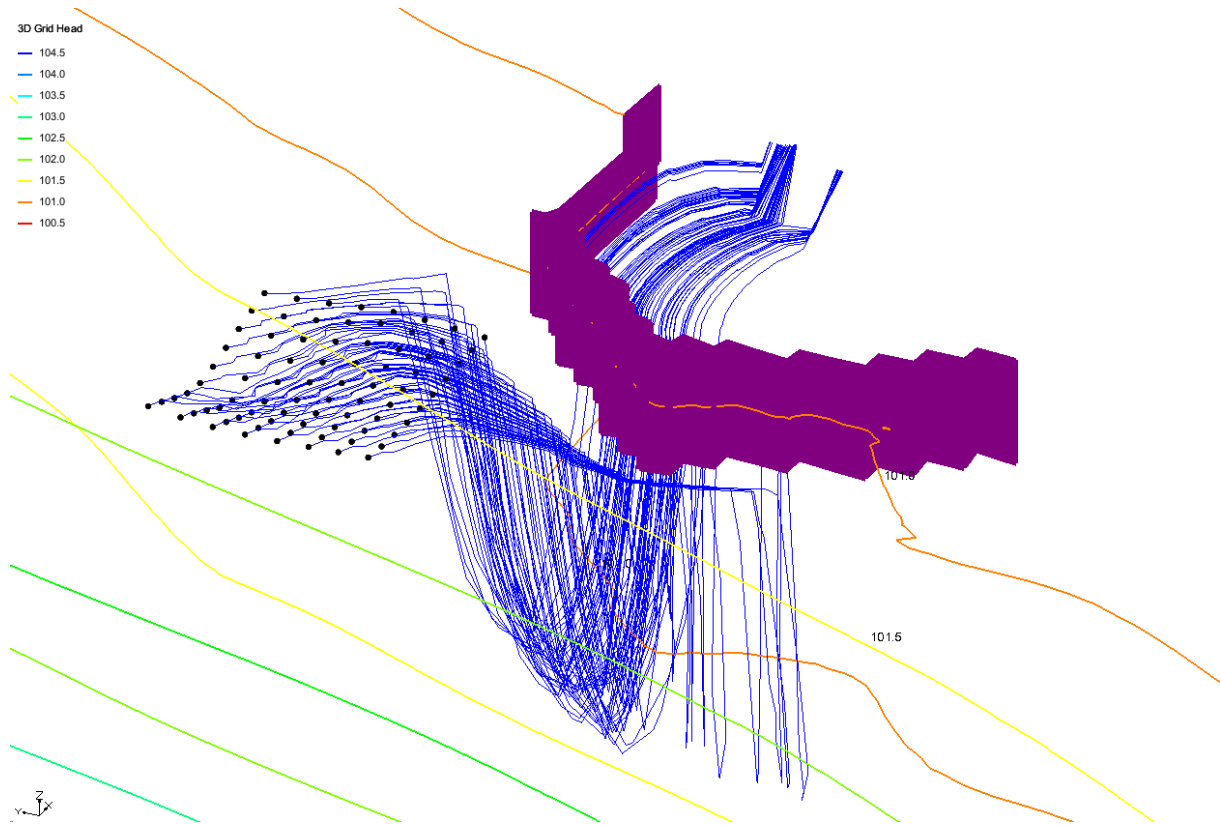


Figure 52 : Vue en 3D du transport des particules à l'interface des deux nappes après l'implantation de la barrière

Il est donc possible qu'un abaissement insuffisant de la barrière, du moins à quelques endroits clés permette un contournement de la barrière par le bas. Une partie du débit d'eau souterraine de l'amont passerait sous la barrière par des zones, dans les schistes, altérées de façon plus importante à proximité de l'aquifère alluvial au lieu d'être détournée latéralement. Ce contournement de l'écoulement sous la barrière serait favorisé par une augmentation du différentiel de niveau d'eau entre la crête hydraulique et la vallée créée en aval de la barrière.

CONCLUSION

Ce travail a été réalisé dans l'optique de proposer un modèle d'écoulement afin d'étudier l'impact de la construction d'un mur emboué sur les écoulements d'eau souterraine, et par suite, de corroborer les résultats d'une étude de flux montrant la perméabilité du mur malgré son rôle effectif de barrière.

Il a d'abord été question de présenter le cadre de l'étude et le contexte environnemental du site d'étude. Ce site se révèle ainsi être le siège d'une nappe alluviale principalement captive, surplombant une nappe du bedrock. Ces deux nappes étant interconnectées par endroit. Par la suite, un modèle d'écoulement a été proposé, après calibration, par des données de juillet 2010, et validation par des données d'avril 2011. Deux sens d'écoulement ont été ainsi mis en exergue, un écoulement dirigé vers l'ouest et un écoulement orienté sud-est en direction de la Sambre ; avec des hauteurs piézométriques variant entre 100m et 104m. Enfin, un mur emboué a été implémenté dans le modèle afin d'étudier l'impact du mur sur les écoulements d'eau souterraine. Cette implémentation montre que les gradients hydrauliques amont/aval du mur passent de 1% à 4%. De plus, les flux de Darcy dans les piézomètres de l'étude FVPDM sont considérablement réduits, à plus de 80% ; mis à part dans un piézomètre qui se trouve dans une zone à flux élevé (augmentation du flux de plus de 500%) mise en place du fait du contournement du mur. Les flux calculés dans le modèle se révèlent être bien inférieurs à ceux de l'étude FVPDM, cela s'explique par le fait que les flux de l'étude FVPDM ont été surestimés. Globalement, les résultats de l'étude FVPDM sur les gradients hydrauliques et les variations de flux de Darcy sont similaires aux résultats obtenus grâce à notre modèle. Une simulation de transport de particules, ne prenant en compte que les lignes de courant des écoulements, montre le contournement du mur par ces particules et la traversée du mur par le bas, au niveau des zones plus altérées du bedrock. Un phénomène de retour des particules vers l'aval du mur après sa traversée est aussi observé. Ce phénomène est interprété avec précaution car il pourrait être le fait d'artéfacts numériques dus aux conditions imposées aux frontières de la Sambre et du mur.

À la lumière des résultats obtenus dans ce travail, nous concluons sur certains points et perspectives. Ainsi, le mur joue effectivement son rôle de barrière hydraulique sans pour autant être parfaitement imperméable. La mise en place de travaux ultérieurs notamment des essais FVPDM ou de traçage pourraient confirmer ou infirmer le phénomène de retour vers l'aval du mur observé lors des simulations du transport de particules.

RÉFÉRENCES

- Aquaveo. (2022, Juillet 18). *GMS TUTORIALS - MODFLOW – Model Calibration*. Récupéré sur Science Engineering Research Institution : New Mexico Tech:
http://www.ees.nmt.edu/outside/courses/hyd547/supplemental/MODFLOW_Tutorial/MODFLOW-ModelCalibration.pdf
- BOUKHEMACHA, M., GOGU, C., SERPESCU, I., GAITANARU, D., BICA, I., DIACONESCU, A., & BRUSTEN, A. (2013). HYDRAULIC CHARACTERIZING OF TUNNEL'S BARRIER EFFECT FOR GROUNDWATER FLOW MODELING- APPLICATION FOR BUCHAREST CITY. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*.
doi:10.5593/SGEM2013/BA1.V2/S02.024
- CPDT – Observatoire du développement territorial. (2006, septembre). Fiche d'occupation et d'affectation du sol : Commune de Charleroi. CREAT – UCL & MRW/DGATLP/DAU/DAR.
- CPDT (CREAT/UCL et Unité de géomatique/UCL), & Etat du territoire wallon. (2010, Septembre). Fiche d'utilisation du sol. Charleroi.
- CPDT, UCL/CREAT&Géomatique, & DGO4/SPW. (2022, mai 18). *charleroi_3.pdf*. Récupéré sur Conférence Permanente du Développement Territorial:
https://cpdt.wallonie.be/sites/default/files/cartes_fiches/charleroi_3.pdf
- Dassargues, A. (2020). *Hydrogéologie appliquée : science et ingénierie des eaux souterraines*. Malakoff: Dunod.
- DELCAMBRE, B., & PINGOT, J.-L. (2000). *Carte géologique de Fontaine L'Evêque - Charleroi*. Namur: Ministère de la Région Wallone.
- HABILS, F., ROLAND, S., & RORIVE, A. (2014). Notice explicative de la carte hydrogéologique de la wallonie, Fontaine-L'Evêque - Charleroi 46/7-8. Belgique: SPW Editions.
- Hydreau. (2012). *Etude des Faisabilités : Site "AMS Nord" à Charleroi, Partie Hydrogéologique*.
- Jamin, P. (2019). *Groundwater and contaminant mass fluxes monitoring in heterogeneous aquifers*. [Thèse de Doctorat non publiée]. Université de Liège.

- Jamin, P., & Brouyère, S. (2020). *Mesure du flux d'eau souterraine dans l'aquifère alluvial de la Sambre au droit de la barrière hydraulique mise en place sur le site AMS Nord à Monceau-sur-Sambre*. Liège.
- Skutnik, Z., Bajda, M., & Lech, M. (2019). The selection of sealing technologies of the subsoil and hydrotechnical structures and quality assurance. *Open Engineering*, 420-427. doi:<https://doi.org/10.1515/eng-2019-0050>
- SPAQuE. (2006). *Etude de caractérisation du site «AMS» à Charleroi, « Ht1511-06 »*. Liège.
- SPAQuE. (2012). *Rapport de l'étude des faisabilités "AMS Nord (Phase 2 - Partie Ouest)" Charleroi*.