

PROJET BRUSTRATI3D

Version 1.0

« Modélisation stratigraphique en 3D du sous-sol de la Région de Bruxelles-Capitale »

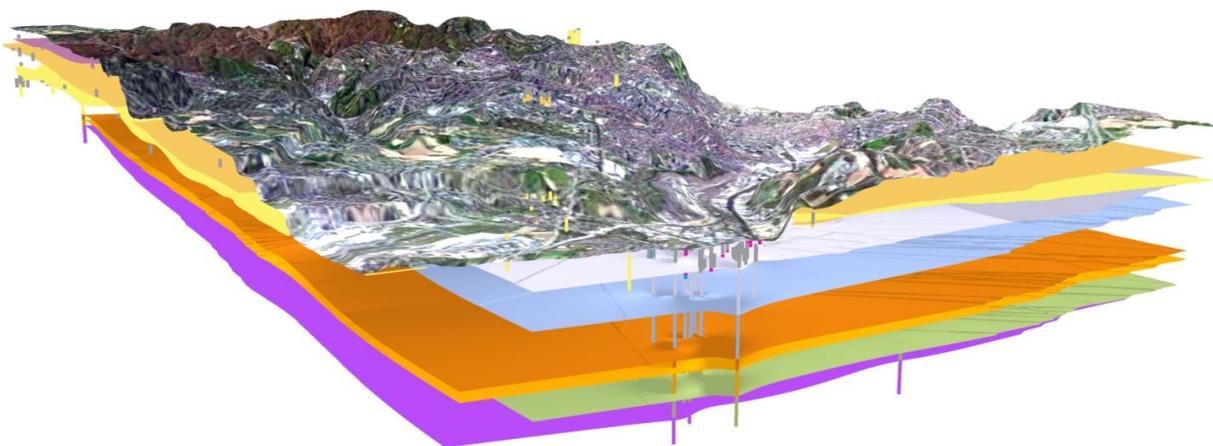
Projet référence n°2016B0512

Rapport final du projet BRUSTRATI3D Version 1.0

Rédigé par l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique
(D.O. Terre et Histoire de la Vie), Service Géologique de Belgique

X. Devleeschouwer, C. Goffin, J. Vandaele & B. Meyvis

**Modélisation stratigraphique en 2D et 3D
du sous-sol de la Région de Bruxelles-Capitale**



Sommaire

1	Introduction.....	4
2	Contextes géographique et géologique de la zone étudiée.....	8
2.1	Région bruxelloise.....	8
2.2	Synthèse des unités stratigraphiques.....	14
3	Collecte de nouvelles données dans et autour de la RBC.....	18
4	Cartes géotechniques de la Région de Bruxelles-Capitale.....	21
4.1	Introduction.....	21
4.2	Données cartographiques disponibles.....	21
4.2.1	Zone d'étude.....	21
4.2.2	Description des données cartographiques.....	21
4.2.3	Inventaire des données géotechniques.....	23
4.2.4	Numérisation et géoréférencement.....	31
4.3	Vectorisation.....	32
4.3.1	Méthode.....	32
4.3.2	Éléments vectorisés.....	34
4.4	Résultats.....	35
4.5	Problèmes rencontrés.....	54
4.6	Projet ARCGIS.....	55
5	Principes de la modélisation du système sédimentaire bruxellois.....	55
6	Données.....	57
6.1	Données stratigraphiques.....	57
6.2	Modèle Numérique de Terrain.....	63
6.3	Données cartographiques.....	64
7	Base de données stratigraphiques.....	65
7.1	Tables, requêtes et formulaires Microsoft Access.....	65
7.2	Contrôle des données.....	68
7.3	Hyperliens entre les fiches et la table Fforage.....	68
8	Géostatistiques et modélisation bidimensionnelle.....	68
8.1	Création du sommet des couches géologiques.....	71
8.2	Importation des données.....	71
8.2.1	Création des « layers ».....	72
8.1.3	Interpolation spatiale des données de forage par Natural Neighbour.....	74

8.3	Création de la base des couches géologiques.....	77
8.3.1	Réalisation des surfaces basales des différentes couches géologiques.....	77
8.4	Corrections réalisées sur le toit des couches géologiques.....	80
8.4.1	Correction liée à l'influence de la base du Quaternaire sur l'extension spatiale du sommet de la couche géologique.....	80
8.4.2	Correction liée à la présence du sommet de la couche dans les vallées (la pente joignant le sommet à la base).....	87
8.4.3	Correction liée à l'extension d'une couche par estimation à partir du dernier point connu de cette couche.....	88
8.4.4	Correction manuelle pour les couches érosives.....	93
8.4.5	Correction manuelle pour les recoupements entre des couches géologiques liées à des mauvaises interprétations géologiques.....	93
8.5	Corrections réalisées sur la base des couches géologiques.....	94
8.6	Modèle synthétique rassemblant les interpolations réalisées pour les sommets des couches géologiques en 2D.....	94
9	Construction du modèle géologique 3D.....	98
9.1	Représentation 3D des forages.....	98
9.2	Représentation 3D de l'ensemble des couches géologiques dans la zone d'étude.....	102
9.3	Corrections apportées au modèle développé	104
10	Conclusions et perspectives.....	105
11	Samenvatting.....	107
12	Références bibliographiques.....	108

1. Introduction

D'une superficie de 161,38 km², la Région Bruxelles-Capitale intègre la plus grande aire urbaine de Belgique et présente une densité de population élevée dépassant les 7000 habitants par km² (en 2012). La population grandissante (supérieure à 1,18 millions d'habitants en 2016) et l'urbanisation croissante de la région nécessitent une gestion réfléchie et rationnelle du sous-sol de la ville et par conséquent, une meilleure compréhension de son environnement géologique.

Bruxelles fait actuellement face à de nombreux problèmes de stabilité, probablement liés à la géologie de son sous-sol. Les exemples suivants peuvent être cités : les fissures apparaissant au sein de poutres porteuses de l'hémicycle du Parlement Européen (Banks, 2012), les fissures présentes dans de nombreuses maisons particulières et monuments historiques tels que la Bourse de Bruxelles et probablement dues à des mouvements différentiels de terrain (Devleeschouwer *et al.*, 2006). On notera encore les multiples affaissements de voiries caractéristiques des canalisations d'eau placées dans les sables de la Formation de Bruxelles (comme l'atteste encore le récent effondrement survenu chaussée de Louvain le 7 septembre 2017 avec un trou d'une superficie de 36 m² relaté dans l'article sur www.lesoir.be) par rupture de canalisations impliquant l'érosion et le transport subséquent de grandes quantités de sables supportant les infrastructures routières. Ces nombreux exemples reflètent l'influence substantielle de la géologie sur les infrastructures urbaines et renforcent les besoins d'une connaissance géologique détaillée du sous-sol bruxellois ainsi que d'une banque de données et d'un outil géoscientifique pour le développement et la maintenance urbaine.

C'est dans ce contexte que le projet « Brussels Urban Geology » (BUG) a vu le jour en 2004, initié par le Service Géologique de Belgique, avec comme objectif de développer une « méthodologie SIG » (méthode s'appuyant sur un Système d'Information Géographique, en l'occurrence le software ArcGIS) pour la construction de modèles géologiques tridimensionnelles (Devleeschouwer & Pouriel, 2006). Cette étude a pris en compte plus de 900 puits de forage et CPT (« Cone Penetration Test ») localisés dans le centre historique de Bruxelles, soit couvrant une surface de 45 km². Le projet BUG fut donc restreint à une petite zone modélisée et les perspectives d'extension géographique et de prise en compte d'autres types de données avaient été proposées.

La modélisation stratigraphique du territoire de la Région de Bruxelles-Capitale (RBC) fait l'objet du projet BRUSTRATI3D qui a débuté au 1^{er} janvier 2017. Les objectifs du projet sont répartis au sein de 4 workpackages (appelés WP) dont l'ambition est de proposer une mise à jour du modèle stratigraphique

de la RBC par la collecte de nouvelles données historiques et plus récentes (WP1), par la réalisation d'un géoréférencement digital et d'une vectorisation de l'ensemble des cartes géotechniques (WP2), par l'amélioration structurelle et fonctionnelle de la banque de données (BDD) représentant le WP3 et enfin par l'interpolation des toits et des bases des couches géologiques servant à la modélisation en 3D du sous-sol de la RBC (WP4). Ce travail servira de point de départ à la construction d'un outil de type webGIS développé par l'IBGE qui permettra la consultation au public des données géologiques du sous-sol de la RBC.

L'objectif de ce rapport est de présenter en détails la méthodologie adoptée pour la construction de ce nouveau modèle géologique 3D. Il est généré globalement dans un contexte sédimentaire composé de couches stratifiées subhorizontales (tabulaires) et est appliqué aux formations géologiques rencontrées au droit de la RBC. Il convient de noter d'ores et déjà que la zone géographique retenue dans le cadre du projet BRUSTRATI3D a été élargie légèrement au-delà des frontières de la RBC en Région flamande (figure 1).

La modélisation est basée sur des travaux antérieurs et réutilise la méthode établie historiquement dans le projet BUG du Service Géologique de Belgique et améliorée via les projets successifs d'Hydrobrux et Hydroland financé par l'IBGE. Brièvement, la méthode s'appuie sur la création d'une banque de données Microsoft Access couplée à un SIG (en l'occurrence ArcGIS) et comprend 3 étapes : la première partie, relativement longue, vise à collecter un maximum de données stratigraphiques, à les encoder manuellement et à les structurer au sein de la base de données relationnelle (Microsoft Access). La deuxième étape consiste en l'importation, sous ArcGIS, et en l'interpolation spatiale des données ponctuelles (ou discrètes) de forage pour produire des surfaces continues représentant les « toits » et les « bases » de l'ensemble des couches géologiques. Finalement, la troisième étape exploite l'extension « 3D Analyst » du logiciel ArcGIS et son application ArcScene afin de construire et visualiser le modèle 3D en superposant les différentes formations (surfaces 2D) modélisées.

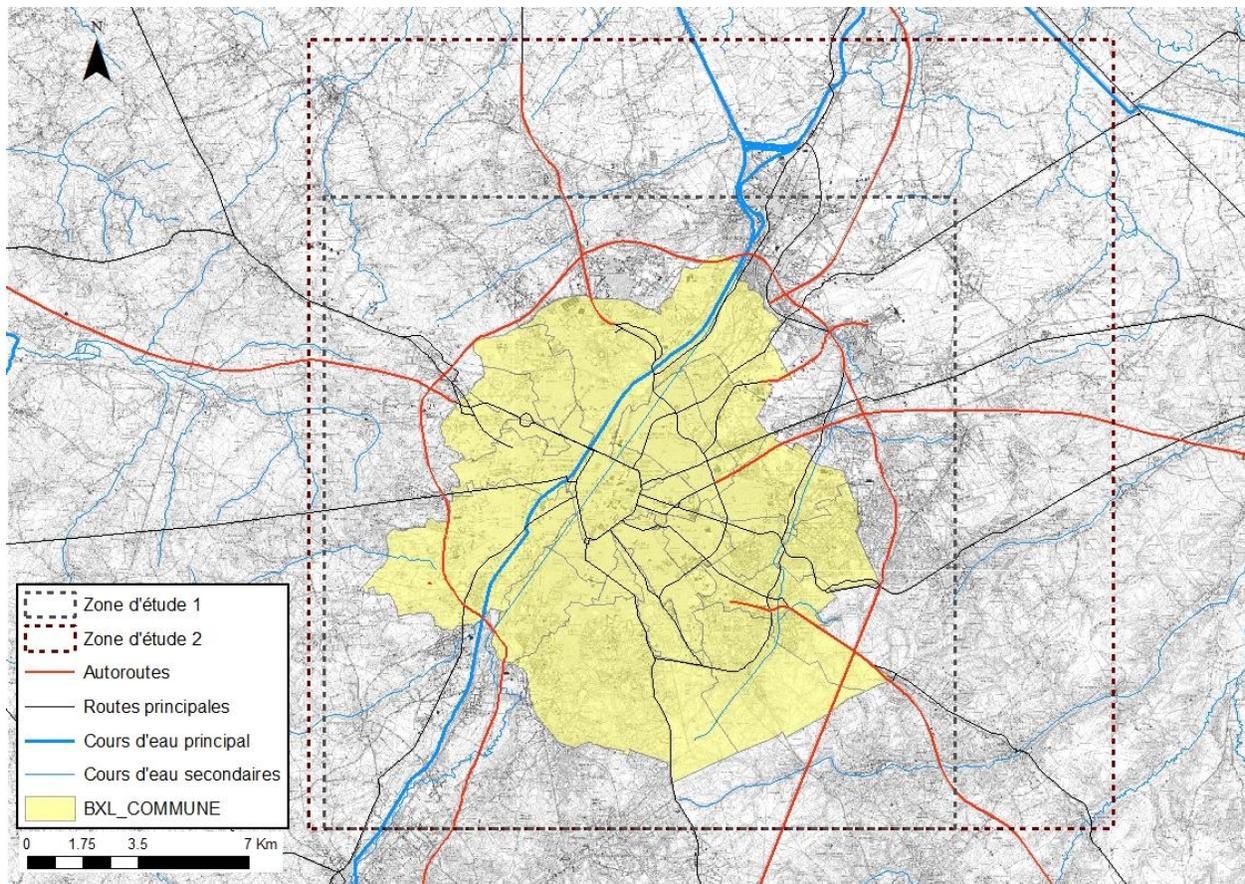


Figure 1. Localisation géographique des zones d'étude relative au projet BRUSTRATI3D. Le cadre de la zone d'étude 1 (en traits pointillés noirs) comprend la RBC et une zone tampon autour de la RBC pour intégrer l'ensemble des forages disponibles jusqu'à la Formation de Kortrijk. Le cadre en traits pointillés bruns (zone d'étude 2) est plus large pour aller chercher les forages plus profonds qui permettent d'affiner les modèles et les interpolations pour chaque couche géologique profonde. Cette zone d'étude 2 est celle reprise pour les couches situées à partir de la Formation de Kortrijk.

Dans la figure 1, on retrouve les limites territoriales de la RBC et des 19 communes de la RBC avec les deux zones d'extension du modèle stratigraphique entourant la RBC choisie dans le cadre de ce projet. Les zones d'extension permettent d'intégrer les points des campagnes géotechniques réalisés pour les grands travaux autoroutiers autour de Bruxelles (le Ring) et des axes autoroutiers pénétrant en RBC venant de Flandre. La zone d'étude 2 est plus large car il est nécessaire pour affiner les interpolations et le modèle 3D qui en découle d'aller chercher les forages profonds situés hors RBC. Les données géologiques présentes dans la BDD à l'issue du projet Hydroland sont reprises en carrés noirs et celles liées aux campagnes géotechniques répertoriées sous forme d'essais de pénétrations sont reprises en orange (figure 2). Cette carte permet rapidement de voir l'utilité d'intégrer l'ensemble de ces données. Elles sont situées dans des zones moins denses ou pauvres en données géologiques au sein de la précédente version de la BDD, elles forment des linéaments qui permettent de mieux visualiser l'évolution de certaines couches géologiques latéralement, enfin elles fournissent une quantité

d'informations complémentaires dans et juste autour de la RBC qui permettent de bien mieux contraindre les limites des différentes couches géologiques reconnues.

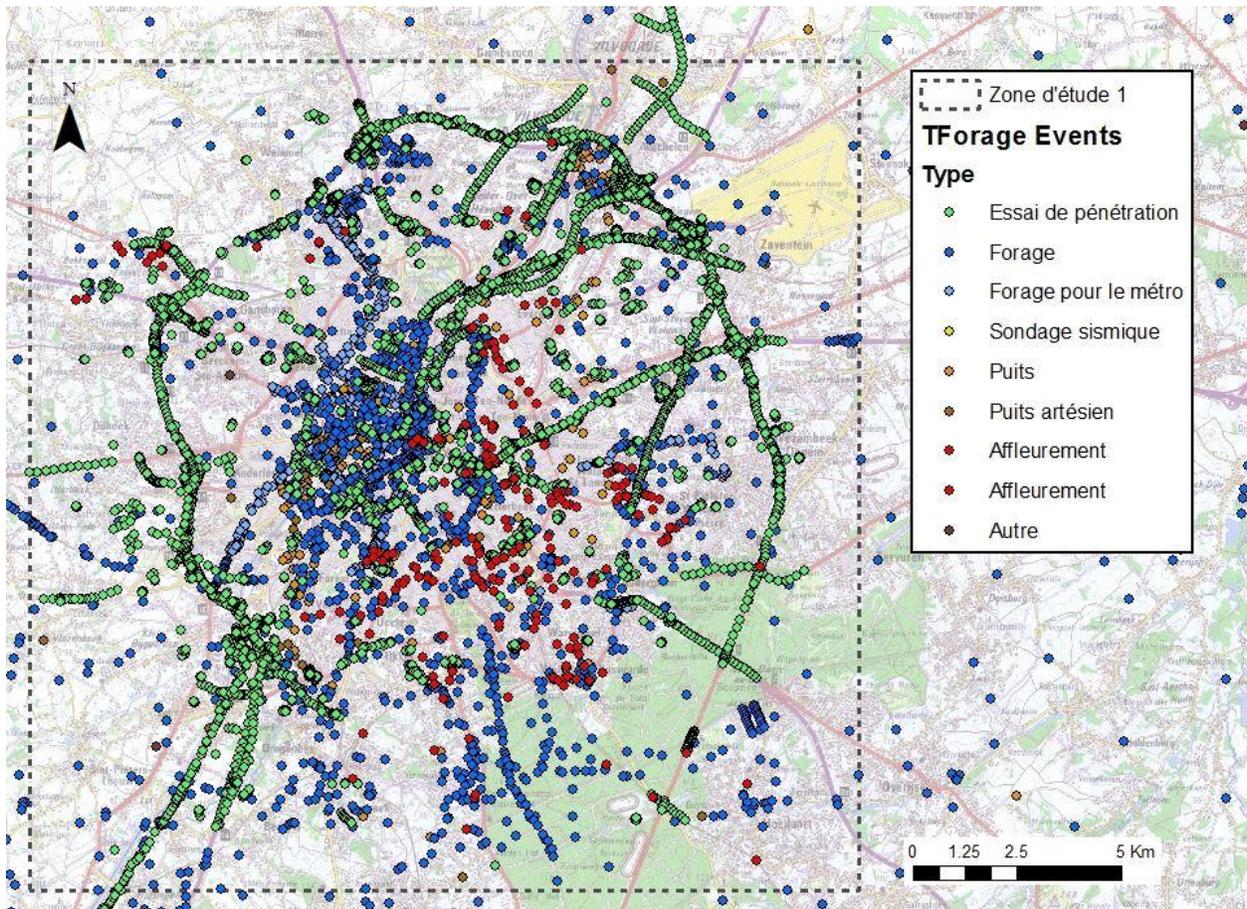


Figure 2. Localisation géographique de la zone d'étude 1 relative au projet BRUSTRATI3D. Les données ponctuelles de l'actuelle version de la BDD sont illustrées sous la forme de cercles de couleur (cfr légende pour l'identification de la nature de chaque point de données). Les points verts représentent les essais de pénétration (CPT) qui forment les campagnes géotechniques des grands axes autoroutiers. Le fond topographique est celui des cartes topographiques couleurs de l'IGN à l'échelle 1/100 000.

La banque de données contient donc 4722 nouveaux points issus des campagnes géotechniques représentés par des cercles verts qui permettent de couvrir une série de zones moins fournies autour et dans la RBC.

2. Contextes géographique et géologique de la zone étudiée

2.1. Région bruxelloise

La Région de Bruxelles-Capitale est établie dans la vallée de la Senne, rivière longue de 103 km incluse dans le bassin versant de l'Escaut. Au cours du 19^{ème} siècle, en raison des risques sanitaires et naturels, la Senne fût l'objet de grands travaux pour se retrouver aujourd'hui presque entièrement recouverte sur le territoire de la Région. La plaine alluviale, large d'environ 2 km à Bruxelles, s'incline légèrement vers le nord évoluant à une altitude comprise entre 20 m au sud et 11 m au nord (Figure 1). La rive droite est vallonnée avec des altitudes comprises entre 40 m dans les vallées relativement encaissées (pente jusqu'à 40%) et 140 m sur les sommets des collines. À l'Ouest de la Senne commence la région dite « Pajottenland », une aire agricole moins vallonnée avec des altitudes plus basses de 40-50 m que la rive Est (Buffel & Matthijs, 2009).

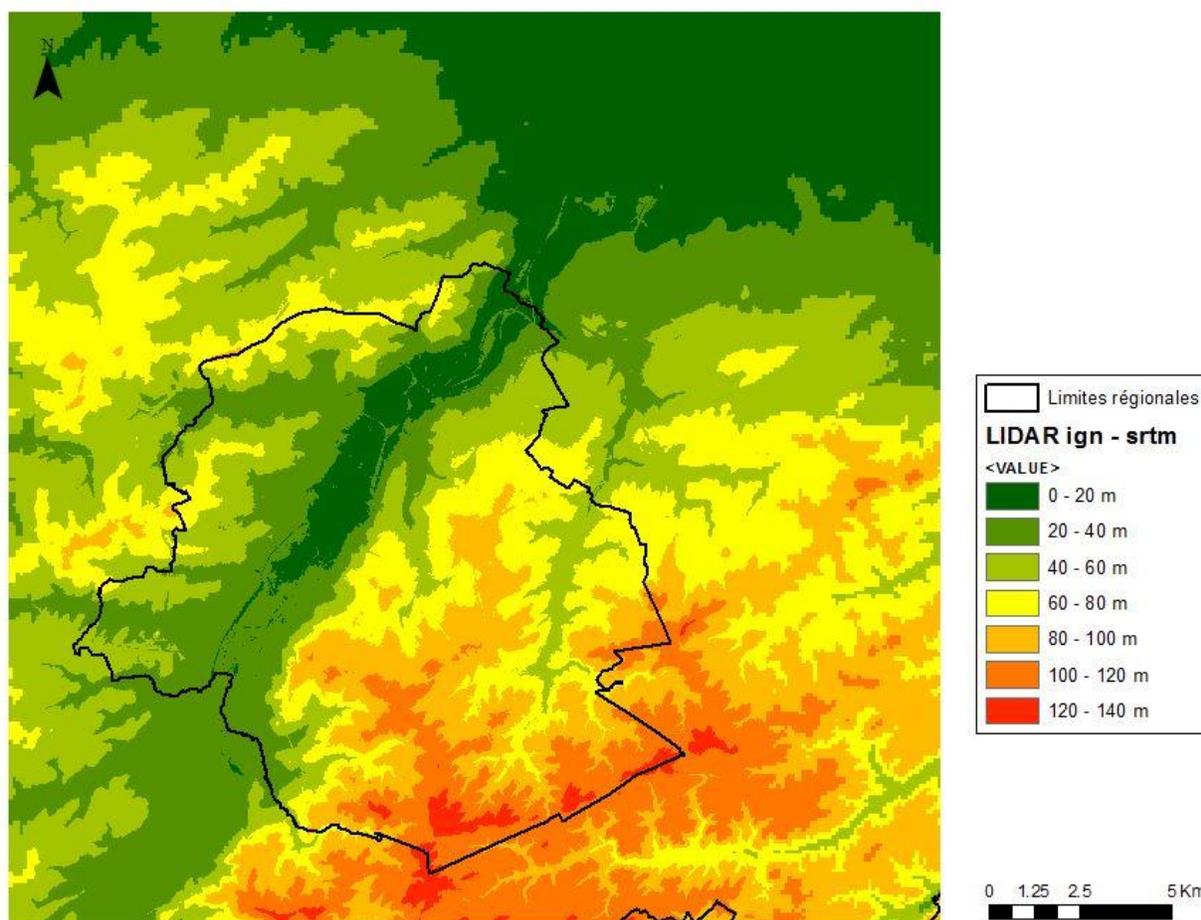


Figure 3. Topographie de la Région de Bruxelles-Capitale reprise au sein de la zone d'étude étendue à partir d'un modèle numérique de terrain combinant les données de la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), et les données LIDAR de l'IBGE.

Des vallées alluviales plus petites qui sont des affluents de la Senne découpe le paysage bruxellois par de petites vallées comme celles du Maelbeek et de la Woluwe. Tout comme d'autres capitales européennes, Bruxelles est fortement urbanisée. Toutefois, les surfaces vertes (bois, parcs, étangs, jardins, etc.) représentent 50% du territoire de la Région (IBGE, 2014), la plus grande d'entre-elles étant la Forêt de Soignes au SE d'où s'écoulent de nombreuses sources.

Le substratum de la Région bruxelloise est composé exclusivement de terrains sédimentaires (Buffel & Matthijs, 2002). De façon détaillée, la succession stratigraphique comprend un socle calédonien du Paléozoïque inférieur appelé Massif du Brabant qui couvre une grande partie du territoire de la Belgique et qui se poursuit en Mer du Nord et en Angleterre. Ce socle calédonien s'étend largement sur la Belgique septentrionale et centrale et affleure dans quelques vallées telles que la Senne, la Dyle et la Dendre. Ce massif ancien correspond à un biseau de roches compressées dont la partie centrale est formée de formations sédimentaires déformées avec un pendage pseudo-vertical appartenant au Cambrien (Sintubin & Everaerts, 2002). Ce cœur est entouré sur les flancs NE and SW de formations sédimentaires appartenant à l'Ordovicien et au Silurien séparée de la partie centrale par des zones de cisaillements intenses (Piessens et al., 2004). La surface paléotopographique du socle Cambrien du Massif du Brabant est très mal connue et liée essentiellement aux forages profonds (> 100-150 m en RBC) ayant traversé la couverture sédimentaire et touchant le socle. Le nombre de forages (cfr Table 3) ne permet pas d'avoir une idée très précise de la paléotopographie vu le peu de données disponibles et l'interpolation de la surface de cette couche est relativement plate avec quelques bombements dans la vallée de la Senne (cfr couche digitale du toit du socle fournie par le projet Hydroland). Cependant, Matthijs et al. (2005) ont suggéré que la surface paléotopographique du Massif du Brabant est légèrement inclinée vers le nord et est affectée, le long de l'axe de la Senne, par des chaînes correspondant à des alternances de rides (escarpement jusqu'à 35 mètres) et de vallées, dont la largeur atteint 0,5 à 1 km et un espacement de 1 à 1,5 km, orientées SE-NW. Les couches très verticales du Paléozoïque Inférieur qui apparaissent dans la surface cartographiée dans et autour de la RBC appartiennent à la Formation de Blanmont (qui est relativement homogène et contient des quartzites de couleurs pâles essentiellement avec de temps en temps des intercalations de passées plus argileuses (phyllades) épaisses de quelques mètres à une dizaine de mètres). Stratigraphiquement parlant, les Quartzites de Blanmont sont recouverts par la Formation de Tubize (regroupant de nombreuses séquences de turbidites essentiellement de couleurs verdâtres composées globalement de sédiments hétérogènes allant des shales/siltites, à des greywackes, des arkoses et des grès grossiers avec une prédominance pour les sédiments plus finement grenus). La Formation d'Oisquercq qui recouvre la Formation de Tubize consiste en phyllades argileuses et siltites de couleurs mauves, verdâtres et grises (Piessens et al., 2004, Verniers et al., 2001). Le Massif du Brabant était une zone positive (en altitude) émergée de façon intermittente permettant une sédimentation réduite à la fin du Paléozoïque via du matériel clastique au Dévonien et des sédiments carbonatés au cours du Carbonifère. Ce dernier a probablement disparu pendant une phase érosive au cours d'un épisode de soulèvement

(uplift) au Jurassique (Vercoutere, C. & Van Den Haute, P., 1993). Des dépôts du Crétacé terminal (d'âge Sénonien) sont partiellement préservés et sont partiellement érodés pendant une autre phase de soulèvement (uplift) du Massif du Brabant ayant eu lieu au cours de la phase Laramide au milieu du Paléocène (Deckers and Matthijs, 2016). Ce Massif du Brabant est donc recouvert en discordance par divers dépôts horizontaux (homoclinaux) d'âges Crétacé à Quaternaire (Figure 4). Cette couverture Mésocénozoïque est discontinue tant spatialement que temporellement (hiatus).

Pour le territoire bruxellois, une craie blanche à grise, datée du Crétacé supérieur (Sénonien), existe localement entre ces escarpements. Il est utile de remarquer que la paléotopographie du socle paléozoïque inférieur affecte la structure tabulaire des couches supérieures dont les limites « ondulent » jusqu'à la base de l'Éocène inférieur (Figure 4).

Les dépôts tertiaires, d'origine marine, constituent la majeure partie de la stratigraphie bruxelloise. Cette série sédimentaire épaisse d'environ 50 à 150 m est composée d'une alternance de sables, silts et argiles rendant la géologie de Bruxelles assez monotone. L'homogénéité lithologique de cette épaisse séquence complique l'identification des limites de formation. Les principales unités géologiques sont décrites par ordre stratigraphique reprises dans la table 1 (issus de la carte géologique de Buffel & Matthijs, 2002).

Des remblais anthropogéniques sont présents quasi partout sur le territoire de la RBC et ont des épaisseurs de quelques dizaines de cm à environ 20 mètres (*cf* § 4). Les dépôts quaternaires recouvrent l'entièreté de la Région de Bruxelles Capitale. On peut les diviser en deux unités principales. Tout d'abord, les dépôts modernes de sédiments (composés essentiellement d'argiles, de silts, de sables, de graviers, de limons et de tourbes) de plaine alluviale au cours de l'Holocène localisée essentiellement dans les vallées. L'épaisseur de la série Holocène atteint 10 à 20 m en règle générale. Ensuite viennent les sédiments du Pléistocène (essentiellement des loess d'origine éolienne et des limons ainsi que des dépôts fluviaux) qui recouvrent l'ensemble de la zone d'étude et qui ont des épaisseurs de plusieurs dizaines de cm à une dizaine de mètres ou plus dans les vallées alluviales. Les sédiments quaternaires possèdent diverses origines (Schroyen, 2003) et sont spatialement très discontinus. En-dessous des sédiments continentaux du Quaternaire, on trouve les formations marine du Cénozoïque, leurs âges va du Miocène Supérieur au Paléocène Supérieur (Figure 4).

La Formation de Diest (Miocène Supérieur) et la Formation de Bolderberg (Miocène Inférieur) correspondent à des dépôts de sables d'extension réduite au sommet des collines que l'on trouve dans la partie nord de la RBC. Ces formations sont partiellement préservées de l'érosion et peuvent atteindre une épaisseur maximale de 10 mètres. La Formation sableuse de Sint-Huibrechts-Hern (Eocène Supérieur) a une épaisseur réduite dans la partie nord de la RBC alors que dans la partie SE, elle peut atteindre plus de 10 mètres. La Formation de Maldegem (Eocène Moyen) contient 7 membres. La succession stratigraphique comporte d'abord trois membres qui ne sont pas rencontrés dans la zone d'étude étendue

de ce projet. On retrouve ensuite des sables gris et glauconieux du Membre d'Onderdale qui atteignent 7 mètres d'épaisseur. Ce membre n'est pas représenté en RBC sensu stricto mais bien dans les collines au nord de la RBC. On retrouve ensuite les Membres d'Ursel et Asse composé de 12 mètres de sédiments argileux homogènes et de couleurs gris à verts. A la base de la Formation de Maldegem, on retrouve 5 mètres de sables à glauconies grisâtres du Membre de Wommel. La teneur en argile augmente vers le sommet de ce membre. La Formation de Maldegem est relativement bonne comme base pour les fondations pour des habitations à l'exception des zones où elle est saturée en eau. La Formation de Lede (Miocène Moyen) est composée de sables et de bancs calcaires gréseux sur une épaisseur maximale de 12 m (avec une moyenne de 7 m) au total avec un gravier à la base. La Formation de Lede est bien visible dans la plupart des collines de la RBC. La partie inférieure de la formation comprends entre 5 et 12 bancs carbonatés durs qui furent exploités de manière artisanale en galeries souterraines parfois connectés à des puits. Il n'est pas rare de les rencontrer lors de travaux de construction de parkings souterrains ou de nouveaux bâtiments. Il n'existe aucun plan de ces galeries anciennes. L'exploitation de ces grès carbonatés est relativement ancienne et date du Moyen-Age probablement.

Les sables jaunes de la Formation de Bruxelles (Eocène Moyen) sont plus grossiers que ceux de la Formation de Lede, ils apparaissent d'ailleurs dans les essais de pénétrations par de multiples pics de résistance avec une friction assez élevée. Parfois, des sables plus carbonatés existent dans la partie supérieure de la formation alors que des sables silicifiés et des lentilles gréseuses sont présentes dans la partie inférieure de la formation. Dans certaines zones, les sables de Bruxelles sont altérés et deviennent plus blanchâtres et plus argileux. Globalement, la formation a une épaisseur de 30-35 mètres mais peut atteindre 70 m d'épaisseur dans la zone de chenal érosif la plus épaisse (Houthuys, 2011). La Formation de Gent (Eocène Inférieur) comporte dans la partie supérieure le Membre de Vlierzele (plus sableux) et dans la partie inférieure le Membre de Merelbeke (plus argileux). L'ensemble a une épaisseur de 8 m globalement et est assez bien observée dans les collines au nord-ouest de la RBC. Les argiles et sables de la Formation de Tielt (Eocène Inférieur) sont généralement épais de 20 m. La Formation de Kortrijk (Eocène Inférieur) est subdivisée en trois membres et composée d'argiles (Membre d'Aalbeke – 4 mètre (sommet de la F. de Kortrijk) et Membre de Saint-Maur - 30 mètres (base de la F. de Saint-Maur)) et de sables interstratifiés avec des passées parfois épaisses de plusieurs mètres d'argiles (Membre de Moen - 35 mètres, partie médiane de la F. de Kortrijk). L'épaisseur totale de la F. de Kortrijk atteint 65 m quand les trois membres sont présents et complets. Cette formation est présente sur l'ensemble du territoire de la RBC. La présence de la Formation de Tielt protège souvent le Membre d'Aalbeke sauf lorsque la F. de Bruxelles érode l'ensemble. Dans la vallée de la Senne, le Membre d'Aalbeke n'est pas toujours conservé. Au NO de la RBC, le Membre d'Aalbeke semble se réduire à 2 – 2,5 mètres dans la région de Groot-Bijgaarden. En-dessous, la Formation de Hannut (Paléocène Supérieur) contient le Membre de Grandglise (partie supérieure de la formation) fortement enrichi en sables alors que le Membre de Lincent (à la base) est plus nettement argileux et glauconieux. L'épaisseur varie de 15-20 au sud à 28 mètres au

maximum dans la partie située au nord de la RBC. Les dépôts du Crétacé sont présents dans la partie nord de la RBC. Ce sont des craies blanches à grises avec des cherts noirs appartenant à la Formation de Gulpen qui sont uniquement décrits à partir de forages. Aucun affleurement ne permet de voir ces craies. Par ailleurs, les craies semblent parfois préservées dans les sillons du relief du toit du Paléozoïque sous forme de lambeaux. Le Crétacé disparaît au SO et au Sud de la RBC alors que son épaisseur augmente vers le nord de la région bruxelloise. Les couches du Crétacé et du Tertiaire se retrouvent en discordance sur le socle du Paléozoïque.

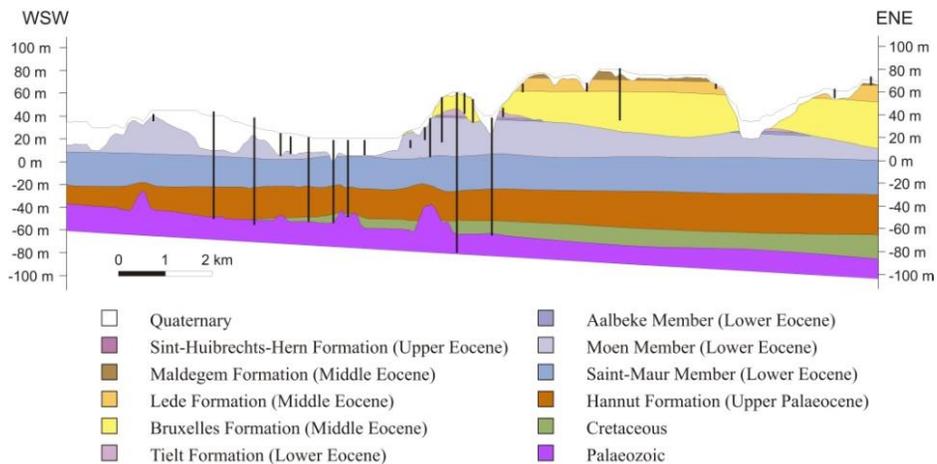
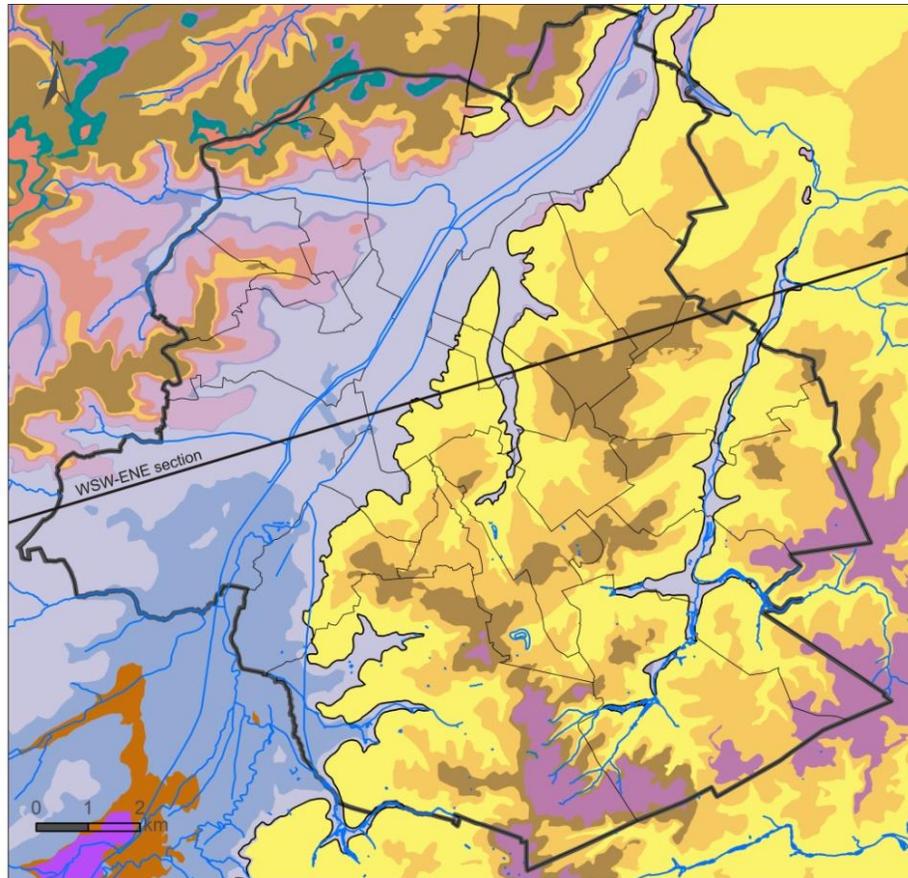


Figure 4. Carte et coupe géologiques de la Région Bruxelles-Capitale (modifiées d'après Buffel & Matthijs, 2002). Les limites administratives (régionales et communales, en traits noirs continus épais et fins respectivement) et le réseau hydrographique (traits bleus) sont présents de même que les limites de l'aquifère des sables de la Formation de Bruxelles sont sur-imprimées. Les forages localisés sur le tracé de la coupe géologique sont également représentés (barres verticales).

Nous renvoyons le lecteur aux différentes cartes géologiques et notices explicatives pour de plus amples informations sur la géologie locale.

En revanche, dans la partie nord de la zone d'étude c'est-à-dire en Flandre, la géologie tabulaire des terrains Cénozoïques est très similaire à celle observée à Bruxelles. Seules quelques formations et membres sont ajoutés à la stampe stratigraphique établie d'après la carte géologique de Bruxelles. Il s'agit respectivement dans l'ordre stratigraphique de la Formation de Heers, du Membre de Waterschei (Formation d'Hannut), des Membres de Merelbeke et de Pittem (Formation de Gent), des Membres de Onderdijke et de Buisputten (Formation de Maldegem), de la Formation de Bilzen, de la Formation de Boom et enfin de la Formation de Bolderberg.

Nous renvoyons le lecteur aux différentes cartes géologiques et notices explicatives pour de plus amples informations sur la géologie locale de la Flandre.

Les cartes géologiques à l'échelle 1/50 000 listées ci-après sont disponibles et publiées par la Région Flamande : kaartblad 31-39 (Brussel-Nijvel), kaartblad 23 (Mechelen),

Les notices explicatives de ces cartes sont disponibles gratuitement en téléchargement à l'adresse suivante : <https://dov.vlaanderen.be/dovweb/html/2tertiair.html#bestellen>.

2.2. Synthèse des unités stratigraphiques

La table 1 ci-après reprend l'âge stratigraphique, l'épaisseur moyenne et la lithologie des unités stratigraphiques rencontrées au droit de la zone d'étude :

Formation	Membre	Âge	Epaisseur moyenne (m)	Lithologie	Commentaires
Diest		Miocène supérieur	6	Sable vert brun à rouille, mi-fin à grossier, parfois glauconieux	Cette formation est présente hors RBC et ponctuellement au Nord et NE de la RBC. En Flandre, l'épaisseur peut atteindre plus de 60 m avec une structure érosive ou chenalisante à la base.
Bolderberg		Miocène inférieur	7	Sable fin jaune-pâle micacé avec un gravier de petit silex à la base	Cette formation est présente en RBC au sommet des collines dans la partie Nord uniquement.
Sint-Huibrechts-Hern		Eocène supérieur	10	Sable fin jaune micacé puis argile ou silt jaune-blanc à gris-rose vers le bas. Un gravier de silex, quartz ou grès cambriens est présent à la base	Cette formation est présente en RBC au sommet des collines.
Maldegem	Onderdijke*	Eocène moyen	?	Argile gris-bleue	Ces formations constituent la partie sommitale de la succession stratigraphique. Elles ont été partiellement préservées de l'érosion et n'existent que sur les sommets des collines. * Non reconnue dans le cadre de la zone d'étude du projet Brustrati3D.
	Buisputten*		?	Sable gris-foncé parfois silteux avec de la glauconie	
	Zommergem*		2	Argile gris-bleue sans glauconie	
	Onderdale		7	Sable fin gris, silteux, glauconieux et micacé	
	Ursel et Asse		12	Argile grise glauconieuse. À la base sable glauconieux (bande noire)	
	Wemmel		5	Sable fin gris glauconifère avec Nummulites wemmelensis. À la base, fragments de grès remaniés et de nummulites roulées et remaniées	
Lede		Eocène moyen	7	Sable fin gris localement calcaireux et glauconifère	Présent principalement sur la rive droite vallonnée de la Senne. Les strates de calcaires sableux dans la partie inférieure de la formation ont été localement exploitées comme pierre de construction dans des galeries souterraines, cavités et puits depuis le Moyen-Âge jusqu'au 18 ^{ème} Siècle (Camerman, 1955). L'extension maximale est de 12 mètres.
Bruxelles ou Brussel ou "Sables de Bruxelles"		Eocène moyen	30	Sable finement à moyennement grenu avec concrétions gréseuses et grès lenticulaires dans la partie inférieure et sable carbonaté dans la partie supérieure	Localisé principalement sur la rive Est de la Senne. Contrairement aux autres formations tabulaires (horizontales), la surface inférieure des Sables de Bruxelles est complexe et représente des anciennes vallées marines à estuariennes (Houthuy, 1990, 2011). L'épaisseur varie de quelques mètres à généralement 30 m en RBC et jusqu'à 80 m dans les chenaux

					les plus profonds (Brabant).
Gent (ou Gentbrugge, NCS 2017)	Vlierzele	Eocène inférieur	4	Sable gris-vert glauconieux	Ces membres sont peu représentés sur la carte de la RBC mais sont plus clairement distincts en Flandre. * Non reconnue dans le cadre de la zone d'étude du projet Brustrati3D.
	Pittem*		?	Sable et argile mélangés gris-vert	
	Merelbeke		4	Argile gris-vert	
Tielt		Eocène inférieur	20	Alternance de sables fins glauconieux et micacé avec des couches d'argile	Devient la Formation de Hyon en RBC (NCS 2017).
Kortrijk	Aalbeke	Eocène inférieur	4	Argile foncée homogène et compacte	Le membre d'Aalbeke est difficile à identifier en RBC vu sa faible épaisseur et son érosion potentielle. Mons-en-Pévèle et Orchies sont présents en RBC. Mont-Héribu ne serait connu que dans la partie entre Mons et jusqu'à la partie SO de la RBC.
	Moen = NCS 2017 Mons-en-Pévèle	Eocène inférieur	35	Sable hétérogène argileux	
	Saint-Maur = NCS 2017 Orchies (sommet) + Mont-Héribu (à la base)	Eocène inférieur	30	Argile	
Hannut	Grandglise	Paléocène supérieur	8	Sable fin glauconifère	* Non reconnue dans le cadre de la zone d'étude du projet Brustrati3D.
	Lincent		20	Argile grise à verte	
	Waterschei *		?	Sable argileux	
Heers*		Paléocène moyen	60	Sable et marnes	Epaisseur variable mais la formation n'est pas reconnue en RBC. * Non reconnue dans le cadre de la zone d'étude du projet Brustrati3D.
Crétacé		Sénonien	20	Craie grise à blanche avec silex noirs	Epaisseur variable tant en RBC que dans les Régions flamande et wallonne.
Paléozoïque		Cambrien	> 120 m	grès feldspathiques, phyllades, quartzites	Cette série constitue le socle ancien correspondant au Massif du Brabant-Londres. Il est présent partout en RBC.

Table 1. Description lithostratigraphique de la série sédimentaire rencontrée sur l'ensemble de la zone modélisée comprenant le substratum des régions Bruxelles-Capitale et de Flandre pro-parte. Certains Membres n'ont pas d'épaisseur moyenne mentionnée ou connue dans la littérature, un « ? » mentionne donc cette incertitude.

On notera que l'Yprésien a subi d'importants changements stratigraphiques et qu'un guide de la Commission Nationale de Stratigraphie révisé la lithostratigraphie du Groupe de Ypres (NCS, 2017). Les changements les plus importants correspondent aux noms des Membres de la Formation de Kortrijk qui comporte stratigraphiquement de bas en haut:

- au SO de la RBC, le Membre de Mont-Héribu est surmonté par le Membre d'Orchies (présent en RBC et subdivisés en réalité entre 3 membres : le Membre inférieur d'Orchies (de 1-15 m), le Membre Moyen d'Orchies (de 15-20 m) et le Membre Supérieur d'Orchies (de 10 m) soit 45 m d'épaisseur maximale). Ces 2 membres sont équivalents au Membre de Saint-Maur.

- le Membre de Mons-en-Pévèle (présent en RBC) qui est l'équivalent du Membre de Moen
- le Membre d'Aalbeke qui n'a pas changé

On notera également que la Formation de Tielt qui surmonte la Formation de Kortrijk en RBC devient La Formation d'Hyon pour une épaisseur maximale de 49 m. Elle est subdivisée en trois membres de bas en haut : le Membre de Egem (< 25 m), le Membre de Bois-la-Haut (3-4 m), le Membre de Mont-Panisel (< 20 m).

Enfin, au-dessus de la Formation de Tielt se trouve la Formation de Gentbrugge (ou anciennement Formation de Gent) qui contient 4 Membres de bas en haut :

- le Membre de Kwatrecht (environ 5 m), le Membre de Merelbeke (environ 6-7 m), le Membre de Pittem (environ 15-20 m) a priori érodé en RBC, le Membre de Vlierzele (environ 20 m) qui est érosif en RBC

Dans le cadre de ce projet, la nouvelle nomenclature stratigraphique est arrivée au dernier quadrimestre 2017 et n'a pas été intégrée dans la banque de données parce qu'elle implique de nombreux changements tant dans la visualisation des couches que de l'encodage. Le meilleur exemple est la Formation de Tielt qui a toujours été identifiée comme une seule couche et sa subdivision en trois nouveaux membres implique une nouvelle étude de l'ensemble des forages, des essais de pénétration etc. Ce travail est fastidieux et suggère de profonds changements tant dans les interprétations géologiques que dans la banque de données et surtout dans la création de nouvelles couches d'interpolation et de modélisation. Ce travail en lui seul pourrait constituer un très gros changement vers une version 2.0 du modèle géologique développé en RBC.

Dans la table 2, la même nomenclature stratigraphique est utilisée hormis que le Quaternaire est inséré et qu'une colonne reprenant les codes de l'IBGE associés aux différentes couches géologiques est ajoutée.

Formation	Membre	Âge	Epaisseur moyenne (m)	Code d'Identification de l'IBGE	Lithologie
Quaternaire		Quaternaire		US/RBC_11	Remblais
Quaternaire		Quaternaire		US/RBC_12	Couverture limoneuse
Quaternaire		Quaternaire		US/RBC_13	Argiles alluviales
Quaternaire		Quaternaire		US/RBC_14	Limons, sables et graviers alluviaux
Diest		Miocène supérieur	6	US/RBC_21	Sable vert brun à rouille, mi-fin à grossier, parfois glauconieux
Bolderberg		Miocène	7	US/RBC_22	Sable fin jaune-pâle

		inférieur			micacé avec un gravier de petit silex à la base
Sint-Huibrechts-Hern		Eocène supérieur	10	US/RBC_23	Sable fin jaune micacé puis argile ou silt jaune-blanc à gris-rose vers le bas. Un gravier de silex, quartz ou grès cambriens est présent à la base
Maldegem	Onderdijke*	Eocène moyen	?		Argile gris-bleue
	Buisputten*		?		Sable gris-foncé parfois silteux avec de la glauconie
	Zommergegem*		2	US/RBC_24	Argile gris-bleue sans glauconie
	Onderdale		7	US/RBC_25	Sable fin gris, silteux, glauconieux et micacé
	Ursel et Asse		12	US/RBC_31	Argile grise glauconieuse. À la base sable glauconieux (bande noire)
	Wemmel		5	US/RBC_41	Sable fin gris glauconifère avec Nummulites wemmelensis. À la base, fragments de grès remaniés et de nummulites roulées et remaniées
Lede		Eocène moyen	7	US/RBC_42	Sable fin gris localement calcaireux et glauconifère
Bruxelles ou Brussel ou "Sables de Bruxelles"		Eocène moyen	30	US/RBC_43	Sable finement à moyennement grenu avec concrétions gréseuses et grès lenticulaires dans la partie inférieure et sable carbonaté dans la partie supérieure
Gent (ou Gentbrugge, NCS 2017)	Vlierzele	Eocène inférieur	4	US/RBC_44	Sable gris-vert glauconieux
	Pittem*		?		Sable et argile mélangés gris-vert
	Merelbeke		4	US/RBC_51	Argile gris-vert
Tielt		Eocène inférieur	20	US/RBC_61	Alternance de sables fins glauconieux et micacé avec des couches d'argile
Kortrijk	Aalbeke	Eocène inférieur	4	US/RBC_71	Argile foncée homogène et compacte
	Moen = NCS 2017 Mons-en-Pévèle	Eocène inférieur	35	US/RBC_72	Sable hétérogène argileux
	Saint-Maur = NCS 2017 Orchies (sommet) + Mont-Héribu (à la base)	Eocène inférieur	30	US/RBC_73	Argile
Hannut	Grandglise	Paléocène	8	US/RBC_81	Sable fin glauconifère

	Linent	supérieur	20	US/RBC_91	Argile grise à verte
	Waterschei *		?		Sable argileux
Crétacé		Sénonien	20	US/RBC_101	Craie grise à blanche avec silex noirs
Paléozoïque		Cambrien	> 120 m	US/RBC_102	grès feldspathiques, phyllades, quartzites

Table 2. Description lithostratigraphique de la série sédimentaire rencontrée sur l'ensemble de la zone modélisée comprenant le substratum des régions de Bruxelles-Capitale et de Flandre pro-parte. Certains Membres n'ont pas d'épaisseur moyenne mentionnée ou connue dans la littérature, un « ? » mentionne donc cette incertitude. Le code d'identification interne à l'IBGE est fourni en sus des autres informations géologiques.

3. Collecte de nouvelles données dans et autour de la RBC

Cette partie concerne la collecte de nouvelles données géologiques (forages, essais de pénétration, etc.) et correspond au Work Package 1 du projet Brustrati3D.

La banque de données Access associée au projet Brustrati3D est la suite logique de celle développée dans le cadre du projet Hydroland. L'extension au cours du projet Hydroland n'est pas aussi large que le projet actuel et 4711 données (dont 4492 données réelles, la différence s'explique par de nombreux forages supprimés lors des précédents projets) existaient dans cette précédente version (Figure 5).

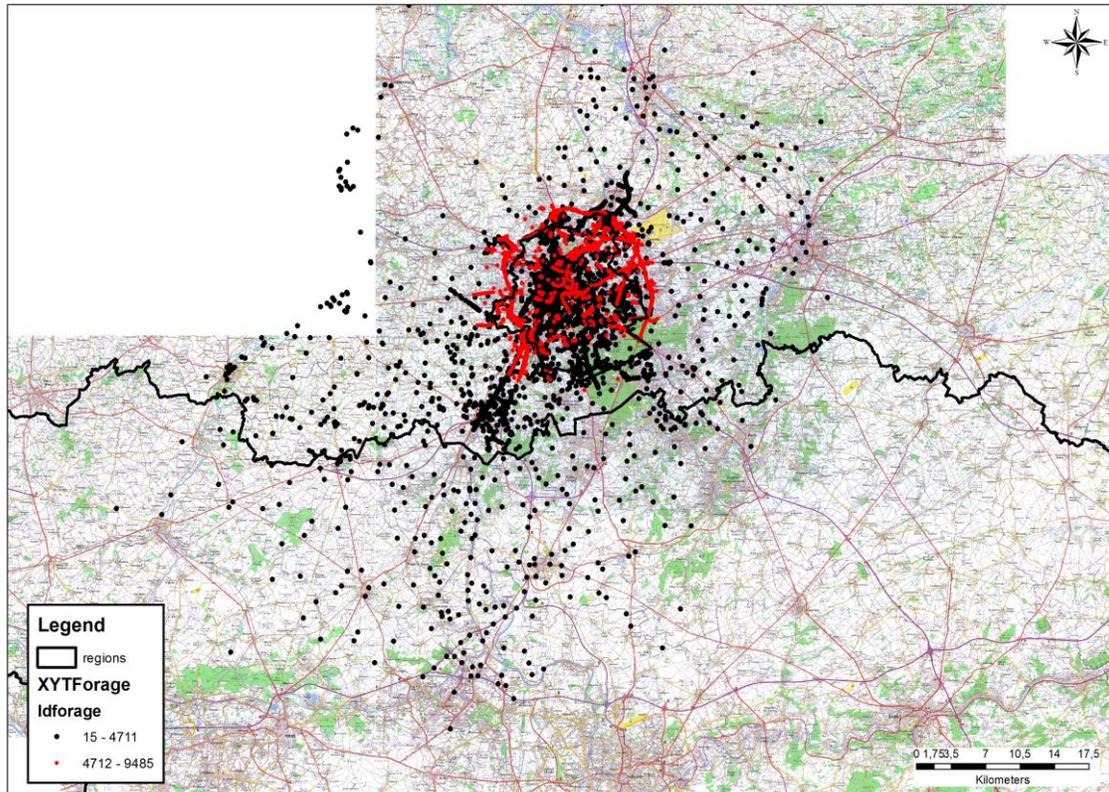


Figure 5 : Répartition géographique des 4711 données disponibles (points noirs) lors du projet Hydroland distribuées sur une superficie importante en Flandre, en RBC et en Wallonie. Les nouvelles données introduites dans la banque de données pour le projet Brustrati3D sont reprises en rouge et sont réparties autour et dans la RBC. Les limites administratives régionales (en trait noir continu épais) sont reprises sur un fond topographique à l'échelle 1/100 000 de l'IGN.

Les données provenant des dossiers de la géotechnique (équivalent du MET en Flandre) sont globalement reprises sur le site internet de la Région flamande (www.dov.be) mais ils ne contiennent pas d'interprétation géologique dans la plupart des cas, celle-ci a donc été réalisée pendant le projet Brustrati3D ou revue si elle existait. Dans ces dossiers, les essais de pénétration constituent une source importante de données qui sont associés à l'ensemble des grands travaux autoroutiers pénétrant dans la RBC et au développement du ring autour de la ville de Bruxelles. Nous avons extrait 4722 CPT (essais de pénétrations) qui ont été analysés, interprétés et encodés in extenso dans la BDD. Ils correspondent aux points rouges repris dans les figures 5 et 6.

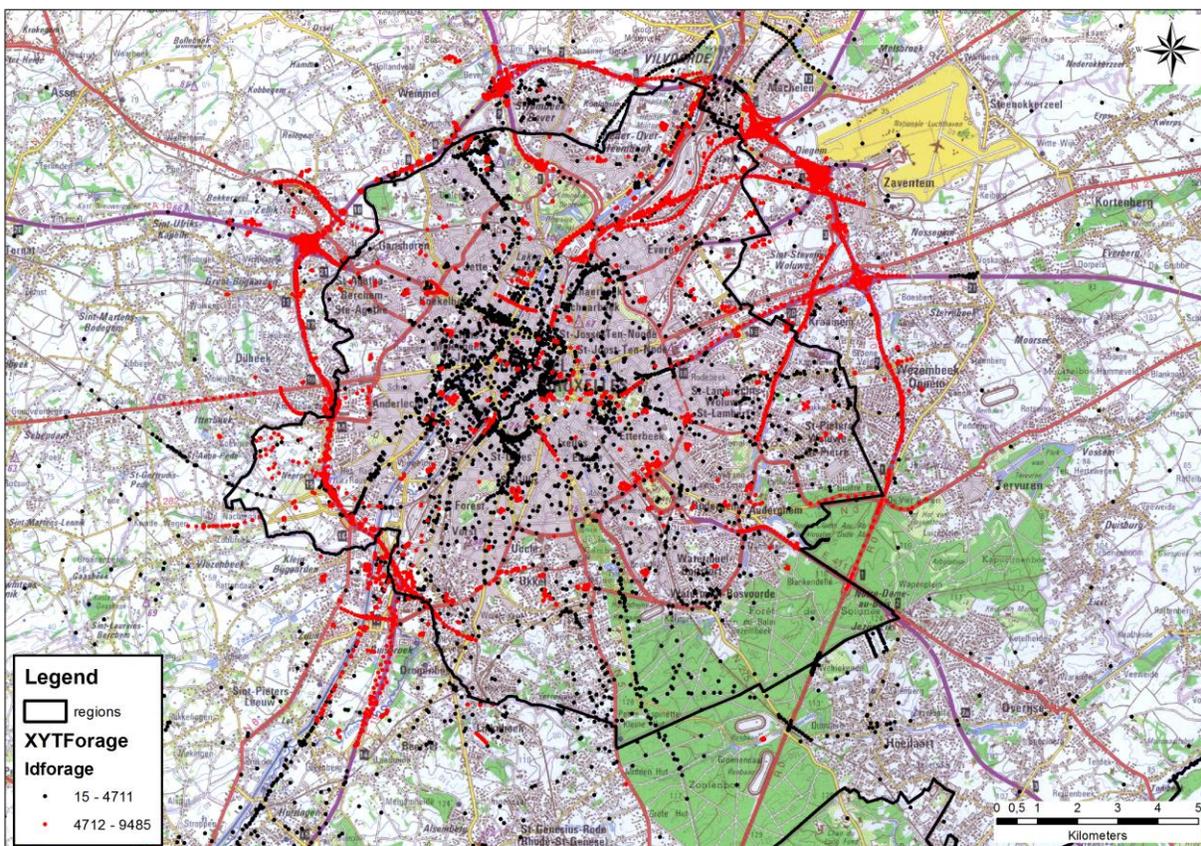


Figure 6 : Répartition géographique des 4774 nouvelles données (points rouges) intégrées dans le cadre du projet Brustrati3D. La répartition géographique de ces nouvelles données montre clairement qu'elles viennent utilement compléter les données existantes en ajoutant de nombreux points dans des zones pauvres en données ou le long de linéaments qui permettent de suivre l'évolution de certaines couches géologiques. Ces données sont réparties autour et dans la RBC. Les limites administratives régionales (en trait noir continu épais) sont reprises sur un fond topographique à l'échelle 1/100 000 de l'IGN.

D'autres sources de données sont envisagées pour compléter la banque de données et le projet Brustrati3D mentionnait les données de la Division Sol de l'IBGE. Cette BDD contient plus de 50 000 points pour lesquels à mi-chemin du projet Brustrati3D, un fichier correspondant à plusieurs centaines de forages relativement profonds semblaient prometteurs. La difficulté d'accès à ces données, la difficulté d'extraire l'information de fichiers pdf volumineux et la difficulté d'avoir l'ensemble des données (plan de localisation, coordonnées géographiques, description et interprétation préliminaire des forages) n'a pas permis de démarrer à l'heure de rédiger ce rapport le travail de vérification et d'encodage. Ce point reste donc à réaliser dans le futur.

Des données géologiques ou géotechniques existent dans de nombreuses entreprises de forages actives en et hors de la RBC. Un courrier envoyé en collaboration avec Estelle Petitclerc et Christian Buret (pour le projet BRUGEO) n'a pas permis de rencontrer l'enthousiasme attendu. L'absence de

réactions évidentes hormis pour consulter le SGB (avis sur la profondeur du socle) montre qu'il faut recontacter individuellement ces foreurs, aller les voir et discuter avec eux pour leur expliquer l'intérêt de voir leurs données rejoindre les modèles en cours.

Néanmoins, les contacts obtenus avec Vivaqua ont permis de récolter des données relatives à 35 points (CPT et forages) réalisées le long de l'Avenue de Fré à Uccle et dans son prolongement. Les travaux sont liés au forage d'un tunnel long de 2,2 km qui servira de bassin d'orage dans la zone d'Uccle (figure 6). Ces forages et CPT permettent d'avoir une bonne idée de la géologie locale car ils fournissent de nombreuses nouvelles données (géologiques, géotechniques, géomécaniques et sédimentaires (analyse d'argiles) ainsi que des estimations de perméabilité) jusque dans la Formation de Kortrijk, Membre de Saint-Maur.

Une campagne géotechnique relative au projet d'extension du métro vers l'Est en direction de Haeren. La firme Grontmij en collaboration avec Beliris (Manon Meyer supervise ce projet) s'était montré intéressée par un rapprochement avec nous dans le cadre de notre expertise. Vingt-six caisses d'échantillons prélevés lors de la campagne géotechnique sont arrivées chez nous mais ils restent en attente d'une description et d'une interprétation géologique car nous n'avons, à ce jour, aucune information relative à la localisation, aux données minimales permettant une description/interprétation de ces derniers.

Huit forages dont deux suivis par l'équipe mixte BRUGEO/SGB/IBGE en forêt de Soignes sont intégrés dans la BDD. Ces forages sont issus du suivi sur les chantiers par l'équipe du SGB et la collecte d'échantillons (cuttings) lors du creusement. Ces échantillons (cuttings) ont fait l'objet d'une description et d'une interprétation géologique. Celle-ci est parfois encore sujette à discussion comme celle des forages atteignant ou recoupant le socle en forêt de Soignes. La lithologie particulière et inattendue de la Formation de Hannut montre qu'une variation latérale de lithologie est clairement observée et montre une différence entre l'Est voir le NE et le sud de la RBC. La conductivité hydraulique mesurée dans le Pz1 correspond à celles des argiles silteuses du Membre de Lincent. La lithologie observée du Membre de Grandglise est différente et bien plus silteuse. Ce changement latéral de faciès montre que les sables connus plus à l'Est et au Nord de la RBC ne se conforment pas aux observations dans cette zone de la RBC. Le Membre de Grandglise devrait selon toute vraisemblance donné une conductivité hydraulique très faible et fortement similaire à celle du Membre de Lincent compte tenu des similitudes de lithologies observées. Ceci montre bien à quel point de nouvelles données géologiques continuent d'être nécessaires pour permettre une mise à jour des modélisations existantes tant géologiques qu'hydrogéologiques en RBC ou plus simplement pour continuer à valider l'extension des couches géologiques et leurs modélisations dans les zones de vallées de la RBC où le manque de données continuent de créer des irrégularités dans le modèle géologique.

4. Cartes géotechniques de la Région de Bruxelles-Capitale

4.1. Introduction

Le WP2 du projet Brustrati3D consiste à digitaliser (géoréférencer et vectoriser) l'information fournie par les cartes géotechniques du Centre de Cartographie Géotechnique Interuniversitaire de Bruxelles. Ces cartes ont été élaborées par J.P. Dam, et parfois A. Verhulst, sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard de l'Université Libre de Bruxelles et de la Vrije Universiteit Brussel entre les années 1970 et 1990. Ces données numérisées constituent une archive des données géologiques en RBC à conserver comme patrimoine géologique. Elles permettent pour les formations superficielles (et surtout pour le Quaternaire) d'avoir une très bonne idée de la distribution spatiale de certaines couches géologiques comme les argiles alluviales ou les sables et graviers alluviaux. Elles permettent d'aider à vérifier localement l'extension des couches superficielles dans le modèle géologique.

4.2. Données cartographiques disponibles

4.2.1. Zone d'étude

La zone étudiée se situe principalement en RBC mais certaines cartes débordent latéralement en dehors des limites régionales de la RBC. Elle est divisée selon les cartes géotechniques en 15 cartes numérotées sur base du découpage de la grille des cartes topographiques de la Belgique.

4.2.2. Description des données cartographiques

Les cartes géotechniques (figure 7) sont fournies sous format papier et souvent accompagnées de livrets explicatifs bilingues. Ces cartes sont publiées à l'échelle 1/5 000 entre les années 1970 et 1990. Pour chaque carte, plusieurs planches couvrant différentes thématiques sont disponibles. En général, chaque carte dispose également de deux livrets, l'un en français et l'autre en néerlandais.

Dans le livret, on retrouve une description des données utilisées pour la cartographie, la localisation géographique de la carte, un aperçu géologique de la zone couverte, une description des groupes et des formations qui s'y trouvent, la thématique reprise par chaque planche avec un bref descriptif, des coupes géologiques commentées et un exemple d'utilisation de l'atlas ainsi fourni.

Les différentes thématiques rencontrées dans les planches sont :

- la topographie : elle se présente sous forme d'isohypses ou de points cotés ;

- l'activité humaine : notamment les remblais fournis sous forme d'isopaques ;
- les différentes couches géologiques présentes sous forme d'isohypses, d'isopaques ou de points cotés ;
- l'hydrogéologie : plus précisément les piézomètres et les niveaux d'eau, sous forme de points cotés ;
- la zonation qui correspond aux formations présentes en surface et leurs courbes de niveaux.

Notons que les différentes couches géologiques ont été choisies par les auteurs des cartes selon une chronostratigraphie qui n'est plus utilisée de nos jours. Nous reviendrons à ce point ultérieurement car l'idée de réaliser à partir de ces cartes un modèle 3D semblait possible mais la difficulté réside dans le découpage et/ou l'assemblage de certaines couches géologiques qui n'ont pas permis de réaliser cet aspect (cfr § 4.5).

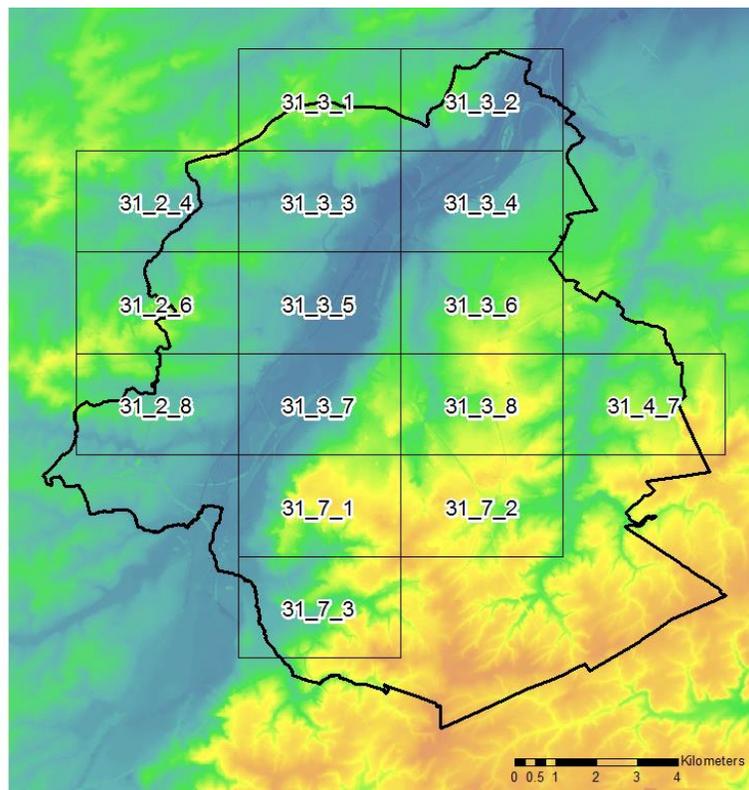


Figure 7. Les quinze cartes géotechniques publiées en RBC sont positionnées et identifiées par leurs numéros de carte correspondants (i.e. 31.7.3) sur un fond Lidar montrant l'altitude interpolée en RBC. La limite administrative régionale (en trait noir continu épais).

4.2.3. Inventaire des données géotechniques

- **Carte géotechnique 31.2.4 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1990.

Notice explicative en F et en NL (pages 1 - 66).

Coupes géologiques en F et en NL : 2 coupes SO – NE et O – E.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Limons et dépôts alluviaux argilo-limoneux.

Planche IV : Sables Diestiens.

Planche V : Argiles Asschiennes.

Planche VI : Sables et grès Lédiens (et sables Wemmeliens).

Planche VII : Complexes sablo-argileux et argileux Paniséliens.

Planche VIII : Sommet du complexe sablo-argileux Yprésien (avec indication ponctuelle du sommet du complexe argileux Yprésien, du complexe sableux Landénien, du complexe argilo-sableux Landénien, des craies et du socle Primaire).

Planche IX : Hydrogéologie.

Planche X : Carte de zonage, sommet des terrains tertiaires.

- **Carte géotechnique 31.2.6 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1987.

Notice explicative en F et en NL (pages 1 - 59).

Coupes géologiques en F et en NL : 2 coupes NO – SE et O – E.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Limons et dépôts alluviaux argilo-limoneux. Sables et graviers alluviaux.

Planche IV : Sables et grès Lédiens (et sables Wemmeliens).

Planche V : Complexes sablo-argileux et argileux Paniséliens.

Planche VI : Sommet du complexe sablo-argileux Yprésien (avec indication ponctuelle du sommet du complexe argileux Yprésien, du complexe sableux Landénien, du complexe argilo-sableux Landénien, des craies et du socle Primaire).

Planche VII : Hydrogéologie.

Planche VIII : Carte de zonage, sommet des terrains tertiaires.

- **Carte géotechnique 31.2.8 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1988.

Notice explicative en F et en NL (pages 1 - 67).

Coupes géologiques en F et en NL : 1 coupe NO – SE et 2 coupes N – S.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Argiles alluviales (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche IV : Limons et dépôts alluviaux argilo-limoneux (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche V : Sables et graviers alluviaux.

Planche VI : Sables et grès Lédiens (et sables Wemmeliens).

Planche VII : Complexes sablo-argileux et argileux Paniséliens.

Planche VIII : Sommet du complexe sablo-argileux Yprésien (avec indication ponctuelle du sommet du complexe argileux Yprésien, du complexe sableux Landénien, du complexe argilo-sableux Landénien, des craies et du socle Primaire).

Planche IX : Hydrogéologie.

Planche X : Carte de zonage, sommet des terrains tertiaires.

- **Carte géotechnique 31.3.1 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1984.

Notice explicative en NL (pages 1 - 64).

Coupes géologiques en F et en NL : 1 coupe NO – SE et 2 coupes N – S.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Limons et dépôts alluviaux argilo-limoneux (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche IV : Sables Diestiens et argiles Asschiennes.

Planche V : Sables et grès Lédiens (et sables Wemmeliens).

Planche VI : Complexes sablo-argileux et argileux Paniséliens.

Planche VII : Sommet du complexe sablo-argileux Yprésien (avec indication ponctuelle du sommet du complexe argileux Yprésien, du complexe sableux Landénien, du complexe argilo-sableux Landénien, des craies et du socle Primaire).

Planche VIII : Hydrogéologie.

Planche IX : Carte de zonage, sommet des terrains tertiaires.

- **Carte géotechnique 31.3.2 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1985.

Notice explicative en F et en NL (pages 1 - 71).

Coupe géologique en F et en NL : 1 coupe NO – SE.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Argiles alluviales (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche IV : Limons.

Planche V : Sables et graviers alluviaux.

Planche VI : Argiles Asschiennes.

Planche VII : Sables et grès Lédiens (et sables Wemmeliens).

Planche VIII : Sables Bruxelliens.

Planche IX : Complexes sablo-argileux et argileux Panisélien.

Planche X : Sommet du complexe sablo-argileux Yprésien (avec indication ponctuelle du complexe sableux Landénien, du complexe argilo-sableux Landénien, des craies et du socle Primaire).

Planche XI : Hydrogéologie.

Planche XII : Carte de zonage, sommet des terrains tertiaires.

- **Carte géotechnique 31.3.3 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1979.

Notice explicative en F et en NL (pages 1 - 58).

Coupes géologiques en F et en NL : 1 coupe NO – SE et 2 coupes N – S.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Argiles alluviales (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche IV : Limons et dépôts alluviaux argilo-limoneux (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche V : Sables et graviers alluviaux.

Planche VI : Sables Diestiens et argiles Asschiennes.

Planche VII : Sables et grès Lédiens (et sables Wemmeliens).

Planche VIII : Complexes sablo-argileux et argileux Panisélien.

Planche IX : Sommet du complexe sablo-argileux Yprésien (avec indication ponctuelle du complexe sableux Landénien, du complexe argilo-sableux Landénien, des craies et du socle Primaire).

Planche X : Hydrogéologie.

Planche XI : Carte de zonage, sommet des terrains tertiaires.

- **Carte géotechnique 31.3.4 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1984.

Notice explicative en F et en NL (pages 1 - 55).

Coupes géologiques en F et en NL : 1 coupe E – O et 2 coupes N – S.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Argiles alluviales (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche IV : Limons et dépôts alluviaux argilo-limoneux (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés)..

Planche V : Sables et graviers alluviaux.

Planche VI : Sables et grès Lédiens (et sables Wemmeliens).

Planche VII : Complexes sablo-argileux et argileux Panisélien et sables Bruxelliens.

Planche VIII : Sommet du complexe sablo-argileux Yprésien (avec indication ponctuelle du complexe sableux Landénien, du complexe argilo-sableux Landénien, des craies et du socle Primaire).

Planche IX : Hydrogéologie.

Planche X : Carte de zonage, sommet des terrains tertiaires.

- **Carte géotechnique 31.3.5 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1977.

Notice explicative en F (pages 1 - 69).

Coupes géologiques en F : 1 coupe NO – SE et 1 coupe O – E de moindre taille, passant par la gare de l'Ouest.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Argiles alluviales (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche IV : Limons.

Planche V : Sables et graviers alluviaux.

Planche VI : Sables et grès Lédiens, sables Bruxelliens, sables argileux et argiles Paniséliens.

Planche VII : Complexe sablo-argileux et complexe argileux Yprésien.

Planche VIII : Sommet du complexe sableux Landénien (avec indication ponctuelle du complexe argilo-sableux Landénien, des craies et du socle Primaire).

Planche IX : Hydrogéologie.

Planche X : Carte de zonage, sommet des terrains tertiaires.

- **Carte géotechnique 31.3.6 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1977.

Notice explicative en F et en NL (pages 1 - 60).

Coupes géologiques en F et en NL : 1 coupe O – E. 4 autres coupes de même axe mais de moindre longueur sont décrites dans la notice.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Limons et dépôts alluviaux argilo-limoneux (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche IV : Sables et graviers alluviaux.

Planche V : Sables et grès Lédiens (et sables Wemmeliens).

Planche VI : Sables Bruxelliens.

Planche VII : Sommet du complexe sablo-argileux Yprésien (avec indication ponctuelle du complexe sableux Landénien, du complexe argilo-sableux Landénien, des craies et du socle Primaire).

Planche VIII : Hydrogéologie.

Planche IX : Carte de zonage, sommet des terrains tertiaires.

- **Carte géotechnique 31.3.7 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1976.

Notice explicative en F (pages 1 - 58).

Coupes géologiques en F : 1 coupe NO – SE.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Argiles alluviales (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche IV : Limons.

Planche V : Sables et graviers alluviaux.

Planche VI : Sables et grès Lédiens, sables Bruxelliens.

Planche VII : Complexe sablo-argileux et complexe argileux Yprésien.

Planche VIII : Complexe sableux Landénien.

Planche IX : Complexe argilo-sableux Landénien.

Planche X : Sommet des craies et du socle Primaire.

Planche XI : Hydrogéologie.

Planche XII : Carte de zonage.

- **Carte géotechnique 31.3.8 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1978.

Notice explicative en F et en NL (pages 1 - 62).

Coupes géologiques en F et en NL : 1 coupe O – E. 3 autres coupes (2 d'axe O – E et 1 d'axe NO – SE) mais de moindre longueur sont décrites dans la notice.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Limons et dépôts alluviaux argilo-limoneux (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche IV : Sables et graviers alluviaux.

Planche V : Argiles Asschiennes, sables et grès Lédiens (et sables Wemmeliens).

Planche VI : Sables Bruxelliens.

Planche VII : Sommet du complexe sablo-argileux Yprésien (avec indication ponctuelle du sommet du complexe argileux Yprésien, du complexe sableux Landénien, du complexe argilo-sableux Landénien, des craies et du socle Primaire).

Planche VIII : Hydrogéologie.

Planche IX : Carte de zonage, sommet des terrains tertiaires.

- **Carte géotechnique 31.4.7 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam et A. Verhulst sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1992.

Notice explicative en F et en NL (pages 1 - 66).

Coupes géologiques en F et en NL : 1 coupe O – E.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Limons et dépôts alluviaux argilo-limoneux (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche IV : Sables et graviers alluviaux.

Planche V : Sables Tongriens et Asschiens.

Planche VI : Sables et grès Lédiens (et sables Wemmeliens).

Planche VII : Sables Bruxelliens.

Planche VIII : Sommet du complexe sablo-argileux Yprésien.

Planche IX : Hydrogéologie.

Planche X : Carte de zonage, sommet des terrains tertiaires.

- **Carte géotechnique 31.7.1 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1982.

Notice explicative en F et en NL (pages 1 - 56).

Coupes géologiques en F et en NL : 3 coupes NO – SE, N – S et O – E.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Argiles alluviales (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche IV : Limons.

Planche V : Sables et graviers alluviaux.

Planche VI : Argiles Asschiennes.

Planche VII : Sables et grès Lédiens (et sables Wemmeliens).

Planche VIII : Sables Bruxelliens.

Planche IX : Sommet du complexe sablo-argileux Yprésien (avec indication ponctuelle du sommet du complexe argileux Yprésien, du complexe sableux Landénien, du complexe argilo-sableux Landénien, des craies et du socle Primaire).

Planche X : Hydrogéologie.

Planche XI : Carte de zonage, sommet des terrains tertiaires.

- **Carte géotechnique 31.7.2 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1983.

Notice explicative en F et en NL (pages 1 - 62).

Coupes géologiques en F et en NL : 2 coupes O – E.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Limons et dépôts alluviaux argilo-limoneux (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche IV : Sables et graviers alluviaux.

Planche V : Argiles Asschiennes.

Planche VI : Sables et grès Lédiens (et sables Wemmeliens).

Planche VII : Sables Bruxelliens.

Planche VIII : Sommet du complexe sablo-argileux Yprésien (avec indication ponctuelle du sommet du complexe argileux Yprésien, du complexe sableux Landénien, du complexe argilo-sableux Landénien, des craies et du socle Primaire).

Planche IX : Hydrogéologie.

Planche X : Carte de zonage, sommet des terrains tertiaires.

- **Carte géotechnique 31.7.3 Bruxelles** élaborée par J.P. Dam sous la direction de J. Nuyens, V. Roisin et R. Thonnard (ULB) en 1986.

Notice explicative en F et en NL (pages 1 - 61).

Coupes géologiques en F et en NL : 2 coupes NO – SE et O – E.

Planche I : Documentation et topographie actuelle.

Planche II : Activités humaines, remblais.

Planche III : Argiles alluviales (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche IV : Limons et dépôts alluviaux argilo-limoneux (avec indications des forages où des terrains tourbeux ont été rencontrés).

Planche V : Sables et graviers alluviaux.

Planche VI : Argiles Asschiennes.

Planche VII : Sables et grès Lédiens (et sables Wemmeliens).

Planche VIII : Sables Bruxelliens.

Planche IX : Sommet du complexe sablo-argileux Yprésien (avec indication ponctuelle du sommet du complexe argileux Yprésien, du complexe sableux Landénien, du complexe argilo-sableux Landénien, des craies et du socle Primaire).

Planche X : Hydrogéologie.

Planche XI : Carte de zonage, sommet des terrains tertiaires.

4.2.4. Numérisation et géoréférencement

Afin de digitaliser l'information, chacune des planches est numérisée. Elles sont ensuite recoupées dans un logiciel de traitement d'image pour que seule l'information cartographique soit conservée. Nous disposons ainsi de cartes rastérisées, c'est-à-dire sous forme de données maillées, au format « TIF » ou « GIF ».

Ces rasters doivent ensuite être localisés dans un système de coordonnées choisi. Cette opération est effectuée sur ArcGIS. Premièrement, dans le menu ArcCatalog, le système spatial Lambert Belge 1972 est choisi dans les propriétés du raster. Deuxièmement, l'outil Georeferencing va permettre de localiser l'image dans ce système. Pour se faire, les quatre coins du raster peuvent être rattachés aux coordonnées mentionnées sur les planches initiales. Cependant, la qualité des cartes et leur état (gondolage, pliures, ...) lors de la numérisation peuvent entraîner des déformations dans nos données maillées. Pour pallier ces erreurs, un second géoréférencement plus précis est réalisé en se basant sur les cartes topographiques 1/10 000 de l'Institut Géographique National (IGN). Il consiste à repérer des points homologues sur les planches géotechniques et sur les cartes topographiques. Les points choisis doivent être le plus précis possible et ne pas avoir bougés au cours du temps étant donné que les deux supports comparés n'ont pas été conçus à la même époque. A titre d'exemple, les centres des carrefours sont des points facilement repérables et stables. Plus d'une centaine de points, répartis de façon homogène sur la carte, sont sélectionnés. Le logiciel permet une transformation polynomiale du premier degré, c'est-à-dire une transformation affine, à partir des points homologues. L'erreur résiduelle moyenne sur les points doit s'approcher des 5 mètres, ce qui équivaut à 1 mm sur nos cartes. Ce millimètre correspond donc notamment à un trait de crayon lors du traçage des éléments de la carte, il est donc difficile d'avoir une précision supérieure au millimètre qui influence la qualité du géoréférencement.

4.3. Vectorisation

La vectorisation des cartes géotechniques s'effectue à l'aide de l'outil Editor d'ArcGIS. Il permet de tracer des points, des lignes ou des polygones sur une couche éditable.

4.3.1. Méthode

Dans un premier temps, il est nécessaire de créer préalablement des couches éditables. Pour ce faire, on ajoute des nouveaux shapefiles dans le ArcCatalog. Pour chaque shapefile, il faut choisir le type d'élément vectorisé et les systèmes de projection et de coordonnées associés. Les attributs sont également ajoutés dans les propriétés du shapefile (figure 8).

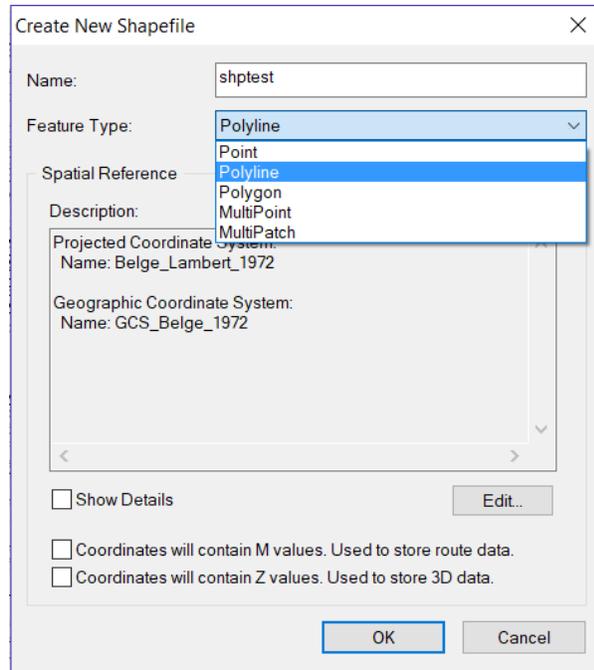


Figure 8. Capture d'écran montrant la fenêtre de création d'un nouveau shapefile.

Les shapefiles éditables préparés, les éléments peuvent enfin être vectorisés via l'outil Editor.

A) Manuelle

La méthode principalement utilisée lors de ce travail est manuelle. Chaque élément est vectorisé au point par point, et ces points sont ensuite reliés dans le cas d'éléments linéaires ou polygonaux. Notons que l'exactitude de vectorisation dépend essentiellement de l'utilisateur. En effet, puisque les éléments sont tracés selon des points, la rigueur de la localisation à l'aide du curseur de ces points par rapport au fond de carte géotechnique est essentielle. D'un utilisateur à l'autre, la vectorisation peut donc légèrement différer. Par ailleurs, pour vectoriser les polygones et les polygones, les points tracés sont reliés par des segments droits. Si les éléments à représenter présentent des courbes, elles seront donc fragmentées en segments, ce qui peut impliquer une perte de précision.

L'édition des couches est lancée dans le menu Editor. Dans la fenêtre Create Features, le shapefile dans lequel les éléments vont être créés est sélectionné. Le type d'élément est à préciser dans la fenêtre Construction Tool. La fenêtre Snapping permet de choisir à quoi peuvent se rattacher les segments. Dans le cas où ce sont des polygones ou des lignes fermées qui sont vectorisés, l'option Snapping Sketch doit être sélectionnée afin de les fermer.

Les valeurs des éléments sont entrées manuellement dans la table attributaire du shapefile.

B) Semi-automatique

Une autre méthode, qui se veut plus rapide, a également été utilisée. Elle n'est cependant possible que pour les images scannées où les isohypses ou les isopaques ressortent clairement et sont suffisamment espacés. Un traitement préalable des images rasters est également nécessaire. Celles-ci doivent être converties en format binaire à l'aide de l'outil Raster Calculator. Il ne faut que deux couleurs dans l'image.

La vectorisation semi-automatique s'effectue avec l'outil ArcScan. Cet outil permet de nettoyer l'image si nécessaire, pour diminuer les bruits ou les tracés qui ne sont pas à vectoriser. Il permet ensuite de tracer les éléments de façon automatique (l'outil sélectionne et trace tous les éléments automatiquement) ou interactive (le choix de la direction à prendre par le tracé est imposé par l'utilisateur). La seconde méthode a été utilisée dans notre cas, car elle permet d'ignorer les éléments qui ne sont pas à vectoriser et qui sont toujours présents sur le raster. Ainsi, aucun nettoyage supplémentaire n'est à réaliser.

Outre sa vitesse d'exécution, cette méthode est aussi plus précise et moins dépendante de la rigueur de l'utilisateur puisque le vecteur suit strictement le centre des lignes. L'utilisateur se contente de fournir le point de départ et la direction à suivre par le tracé. Il doit par contre encoder les valeurs manuellement dans la table d'attributs, à l'instar de la méthode manuelle.

4.3.2. *Eléments vectorisés*

Toutes les planches correspondantes à des couches géologiques sont vectorisées dans des shapefiles à l'aide de polygones lorsqu'elles sont représentées par des isohypses ou des isopaques, ou à l'aide de points lorsqu'il s'agit de points cotés. De plus, les planches des différentes cartes géotechniques correspondant à une même thématique sont assemblées en un seul shapefile.

Les couches définies par les auteurs correspondent en général aux différentes formations rencontrées dans le sous-sol de la RBC. Il convient de mentionner cependant qu'il s'agit

d'une ancienne chronostratigraphie, raison pour laquelle il est parfois nécessaire de préciser la formation ou les membres qu'ils incluent dans leurs dénominations.

Le Quaternaire a également été vectorisé, mais il se différencie en quatre planches distinctes comportant : l'activité humaine (les remblais), les argiles alluviales, les limons et finalement les graviers et sables alluviaux.

Les planches de zonation, d'hydrogéologie et de topographie n'ont pas été vectorisées. Un shapefile reprenant tous les points de données vectorisés a par ailleurs été conçu. Ces points correspondent à tous les éléments ponctuels utilisés pour la modélisation des isohypses et des isopaques par les auteurs. Il peut s'agir de forages, de CPT, de piézomètres ou d'affleurements.

4.4. Résultats

4.4.1. Base du Crétacé/Toit du Paléozoïque

Cette information n'est fournie que pour la carte 31_3_7 (figure 10), dans la vallée de la Seine. En effet, à cet endroit, le Paléozoïque est plus proche de la surface. Par conséquent, davantage de forages atteignent le socle.

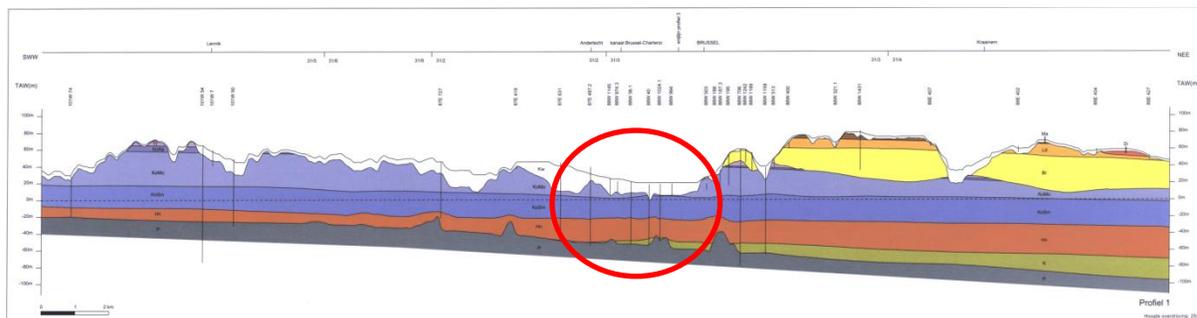


Figure 9: Coupe de profil 1. Indication (en rouge) de la carte 31_3_7 dans la vallée de la Seine où le Paléozoïque (en gris) et le Crétacé (en vert) sont plus proches de la surface (Buffel et Matthijs, 2001).

Les isohypses représentés correspondent à la base du tertiaire. Elles atteignent la valeur de -58 m au nord de la planche et -34 m au sud. La surface plonge donc vers le Nord, comme attendu sur la carte géologique actuelle (Buffel et Matthijs, 2001) dont le profil ci-dessus (figure 9) provient. L'épaisseur du Crétacé peut atteindre 22 mètres.

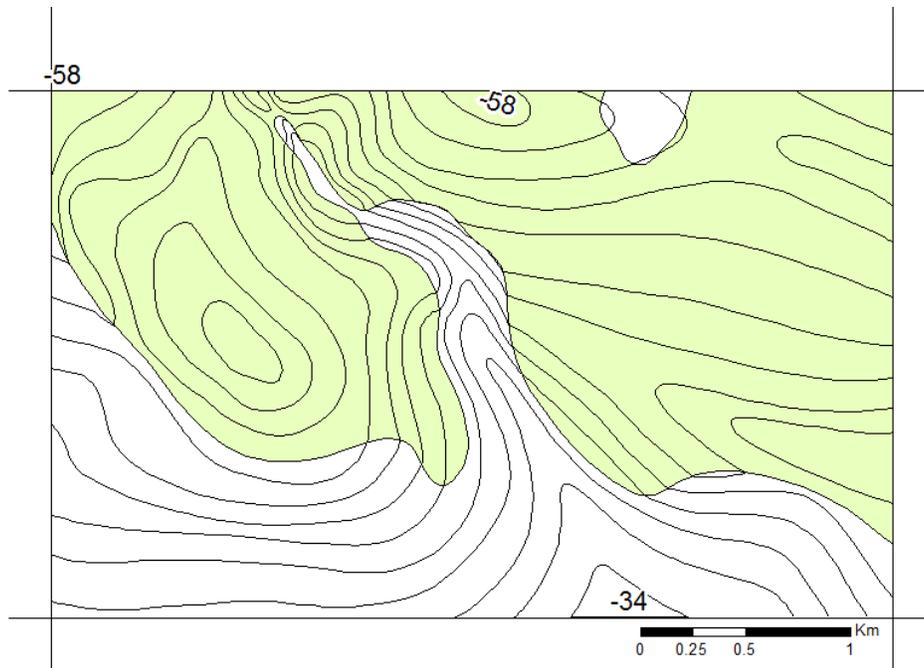


Figure 10: Crétacé (isohypses de son sommet dans la zone verte) et base du paléozoïque (isohypses en dehors de la zone verte) de la planche 31_3_7.

4.4.2. Le Landénien

Le Landénien est la dénomination donnée par les auteurs des cartes géotechniques pour la Formation de Hannut, constituée des Membres de Lincet et de Grandglise. Il n'a été tracé par les auteurs que sur les cartes 31_3_5 et 31_3_7 (figure 11). Pour la vectorisation, trois shapefiles ont été conçus. L'un reprend les isopaques du complexe sablo-argileux du landénién, c'est-à-dire l'équivalent du Membre de Lincet, sur la carte 31_3_7. Le second représente les isohypses du complexe sableux, c'est-à-dire l'équivalent du Membre de Grandglise, pour les deux cartes. Quant au dernier, il correspond aux isopaques du Membre de Grandglise pour la carte 31_3_7.

Sur les cartes géotechniques, les isopaques du Membre de Lincet atteignent 30 m d'épaisseur, et les isopaques du Membre de Grandglise 14 m. Sur la carte géologique (Buffel et Matthijs, 2001), les valeurs attendues sont respectivement de 20 m (au maximum) et 8 m (en moyenne). On constate donc qu'il y a une relative différence entre les deux estimations probablement issues de mauvaises interprétations géologiques basées sur les anciennes descriptions lithologiques. La somme des deux épaisseurs reste par contre très proche.

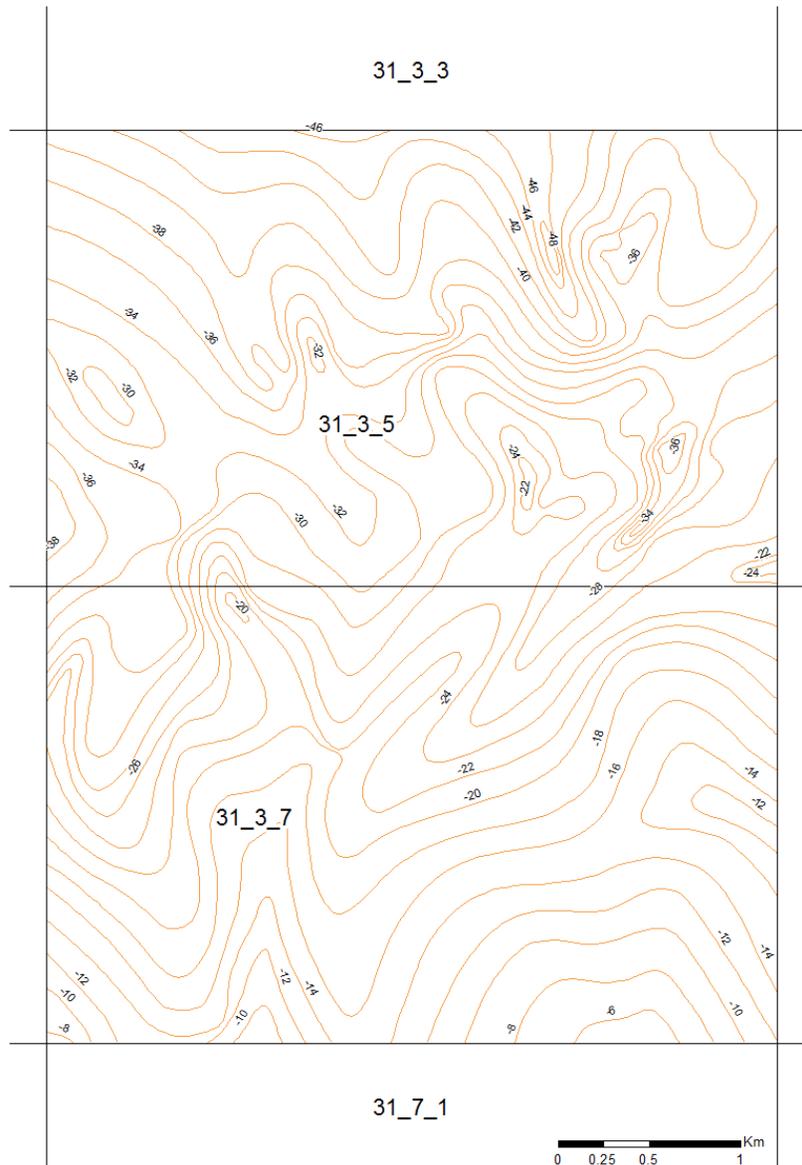


Figure 11: Isohypes pour le Membre de Grandglise appartenant à la Formation de Hannut mais repris comme le complexe sableux du Landénien anciennement pour les planches 31_3_5 et 31_3_7.

4.4.3. L'Yprésien

Il correspond à la Formation de Kortrijk dans la nouvelle échelle stratigraphique et reprend successivement les Membres de Mont-Héribu, de Saint-Maur, de Moen et d'Aalbeke. L'Yprésien est repris sur toutes les cartes sous forme d'isohypes, à l'exception des 31_3_5 et 31_3_7 où ce sont des isopaques qui sont tracées (figure 12).

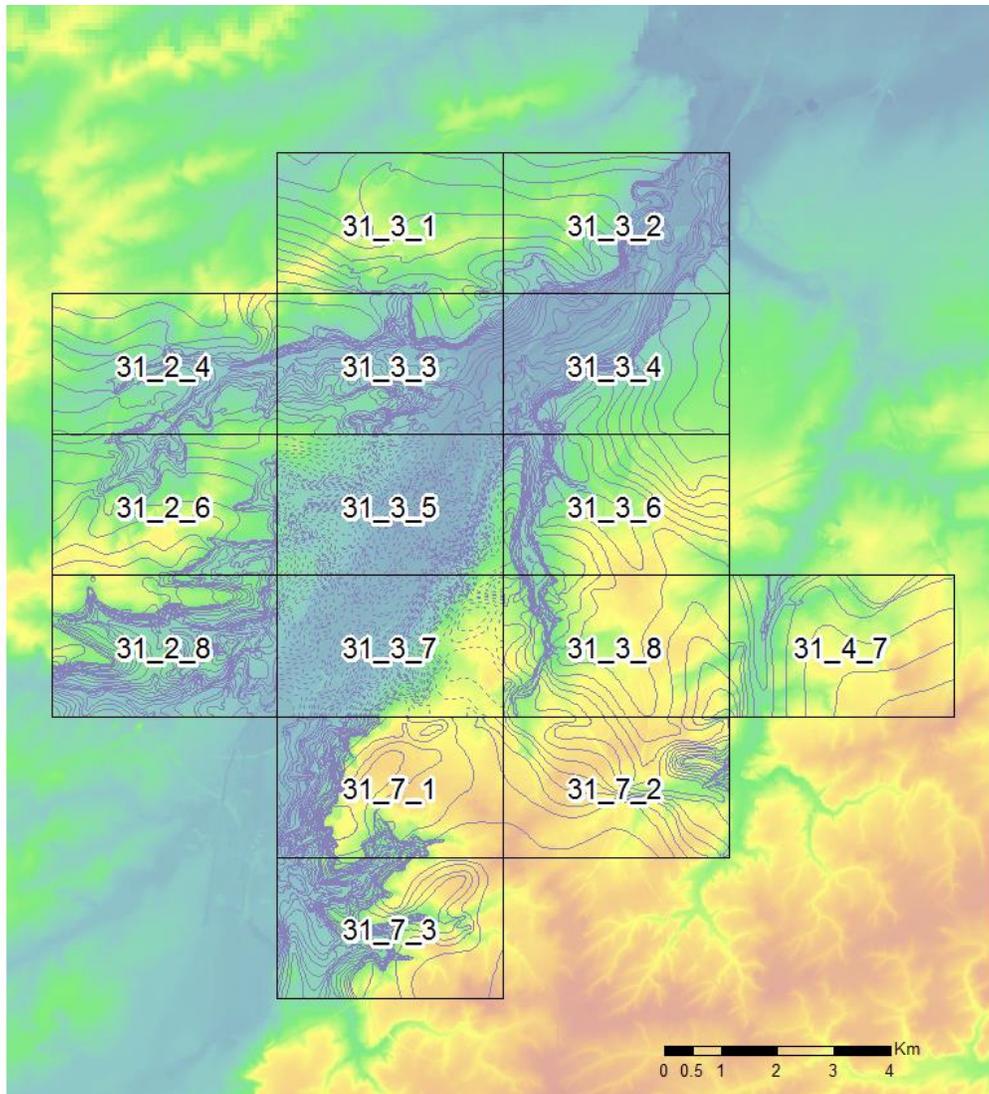


Figure 12: La position des différentes cartes géotechniques en RBC permet d'illustrer les éléments vectorisés pour l'Yprésien comprenant les isohypses vectorisés en lignes continues et les isopaques vectorisés en traits pointillés (seulement pour les planches 31_3_5 et 31_3_7). L'ensemble de l'Yprésien est l'équivalent de la Formation de Kortrijk subdivisée en ses différents membres dans la nomenclature actuelle. Le fond cartographique est celui du modèle numérique de terrain combinant les données SRTM de la NASA et celles du Lidar acquis par l'IBGE.

Les isohypses dépassent les 50 mètres en altitude au sud de la RBC, et descendent à 12 mètres en altitude au nord de la RBC (excepté dans les vallées) en accord avec le pendage vers le nord des couches géologiques du Tertiaire. L'épaisseur fournie par les isopaques atteint 82 mètres sur les deux planches 31_3_5 et 7 contre 69 mètres sur la carte géologique (Buffel et Matthijs, 2001). Ceci laisse supposer que les auteurs pourraient avoir : soit surestimé les épaisseurs de l'Yprésien s.s. ou bien qu'une bonne partie de la Formation de Tielt pourrait quand même avoir

été incluse. On constate que le réseau hydrographique actuel a fortement marqué la topographie et qu'il a incisé partiellement ou fortement les couches de l'Yprésien.

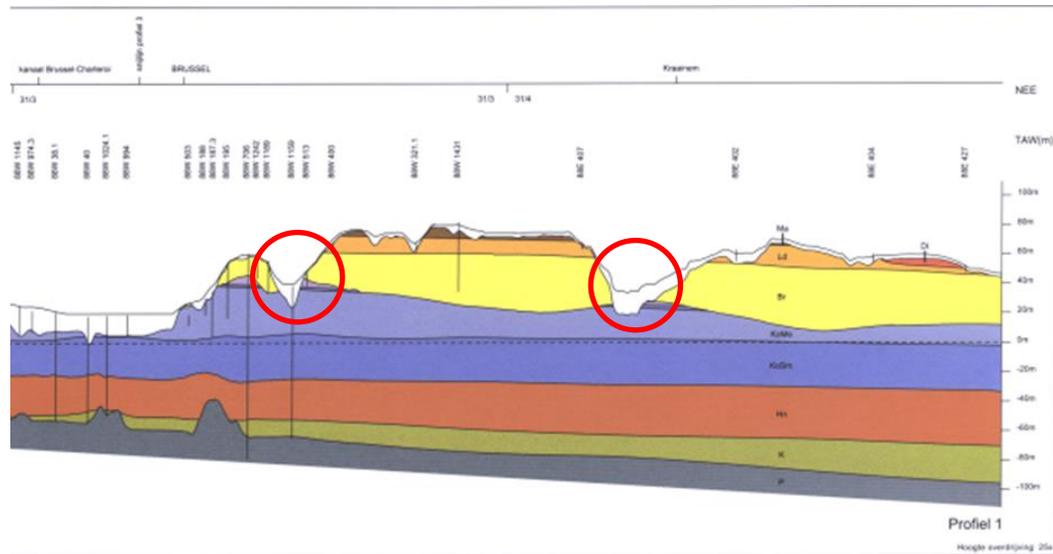


Figure 13: Coupe géologique (extrait du profil 1 de la carte géologique de Buffel et Matthijs de 2001). On aperçoit dans les cercles rouges les incisions topographiques des rivières à travers les couches de l'Yprésien (ou de la F. Kortrijk).

La Formation de Kortrijk est présente partout en RBC. Cependant, elle a connu une érosion significative au cours de l'Eocène via le dépôt des sables de la Formation de Bruxelles dans l'axe central des chenaux suggérant parfois une érosion très importante du Membre d'Aalbeke et d'une bonne partie du Membre de Moen (figure 13). Ce modelé entraîne des variations locales importantes de l'épaisseur des Membres de la Formation de Kortrijk. Par ailleurs, l'érosion fluviale au cours du Quaternaire a entaillé profondément également la Formation de Kortrijk.

4.4.4. Le Panisélien

Normalement, le terme Panisélien encadre les Formations de Gent et d'Aalter (lequel n'est pas présent dans la région de Bruxelles). Cependant, dans les cartes géotechniques, il englobe également la Formation de Tielt qui est généralement prise en compte dans l'Yprésien.

Les caractéristiques lithologiques du Panisélien (sables glauconieux) sont difficilement reconnaissables de celles de la Formation de Tielt. Pour représenter cette couche, ce sont des isopaques qui sont utilisées (figure 14). Leur épaisseur va jusqu'à 24 mètres contre un maximum de 28 mètres sur la carte géotechnique (Buffel et Matthijs, 2001).

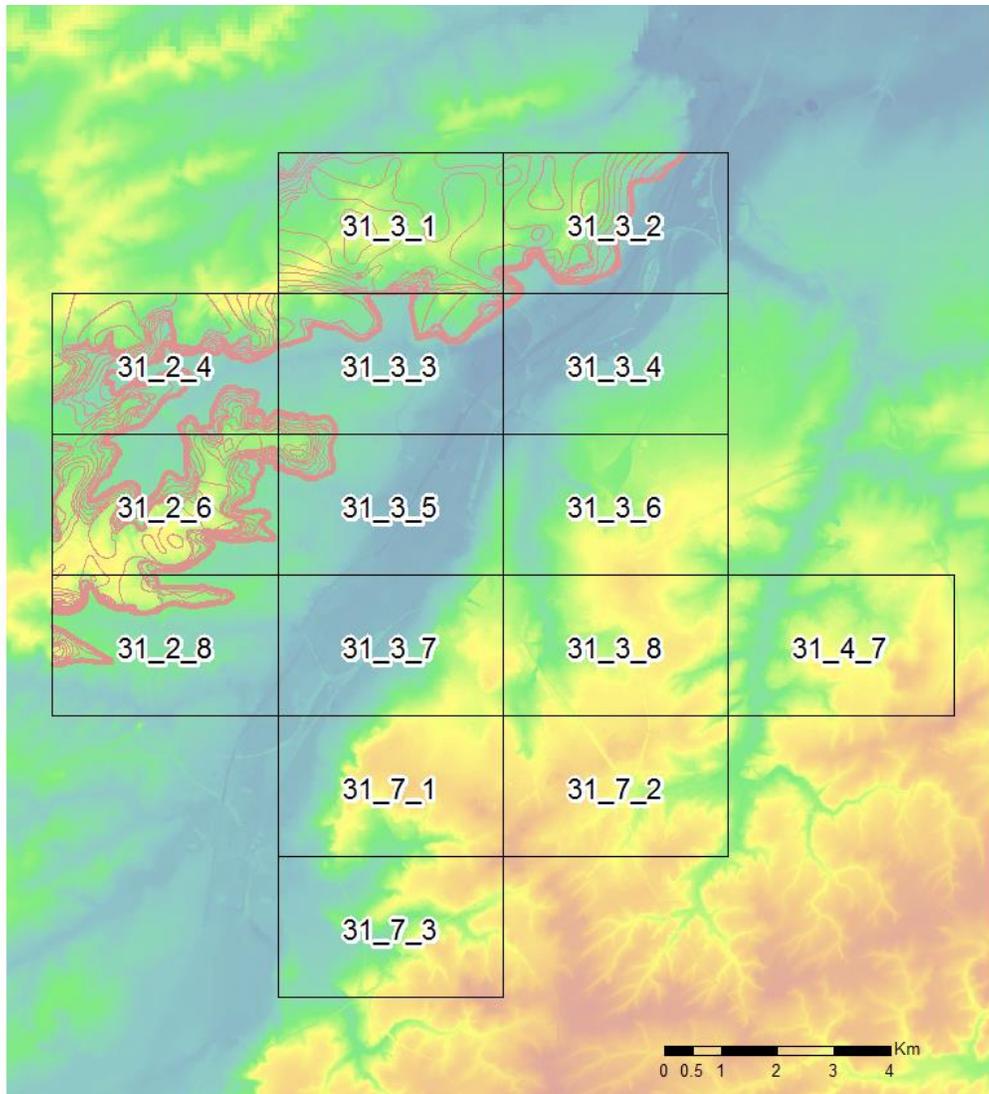


Figure 14 : La position des cartes géotechniques avec leurs numéros à travers la RBC permet de visualiser les isopaques vectorisés (en lignes continues) pour le Panisélien reprenant l'équivalent des Formations de Gent et de Tielt. Le Panisélien n'est cartographié dans les cartes géotechniques que dans la partie N et NO de la RBC. Le fond cartographique est celui du modèle numérique de terrain combinant les données SRTM de la NASA et celles du Lidar acquis par l'IBGE.

Tout comme l'Yprésien, le Panisélien a subi une érosion importante au cours de la mise en place des sables de la Formation de Bruxelles au cours de l'Eocène. Cependant, selon la carte géologique de Buffel et Matthijs (2001), des lambeaux de la Formation de Tielt sont préservés sur les flancs des vallées alluviales et à l'intérieur de petites collines (figure 15) lorsque la Formation de Bruxelles ne les a pas érodés. Dans les collines situées au NE de la RBC, la Formation de Gent est également présente au-dessus de la Formation de Tielt.

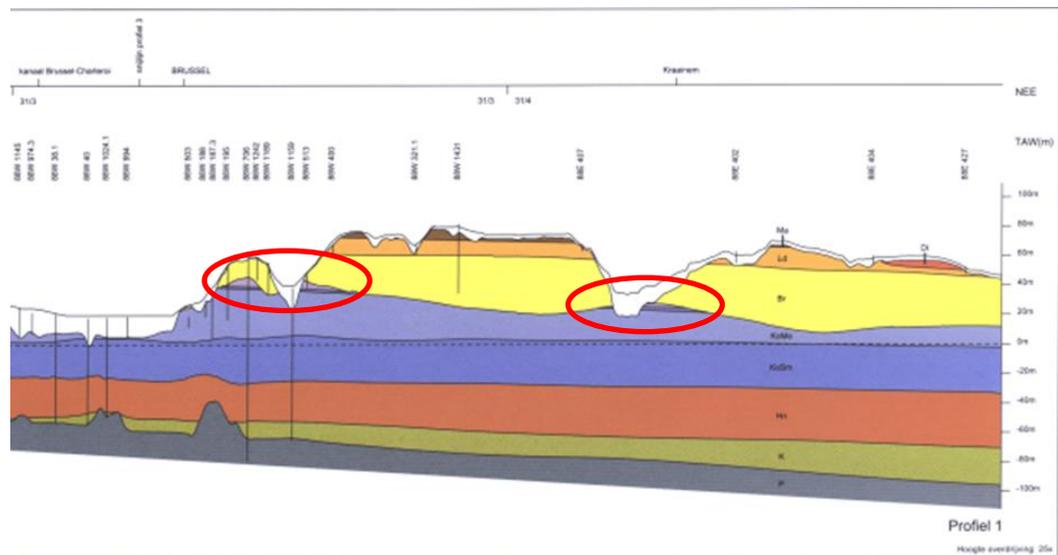


Figure 15: Coupe géologique (extrait du profil 1 de la carte géologique de Buffel et Matthijs de 2001). On aperçoit dans les cercles rouges les lambeaux de la Formation de Tielt préservés dans les collines de l’Est de la RBC.

4.4.5. Le Bruxellien

Le Bruxellien défini par les auteurs des cartes géotechniques correspond à la Formation de Bruxelles telle que définie aujourd’hui. Il est représenté par des isopaques dont l’épaisseur atteint 44 mètres au maximum (figure 16). La présence de chenaux dans la partie Est de la RBC et l’augmentation de l’épaisseur localement au centre de ces chenaux n’a pas été reconnue par les auteurs.

Il n’est pas présent au Nord-Ouest de Bruxelles à cause d’une importante érosion par le Quaternaire. Notons que l’épaisseur du Bruxellien était initialement plus faible à cet endroit qu’au Sud-Est depuis son dépôt lors de l’Eocène moyen. En effet, nous avons vu précédemment que l’Yprésien et le Panisélien ont été fortement érodés au début de l’Eocène moyen à l’Est et au Sud-Est. Cette dépression paléotopographique a ensuite été submergée par une transgression venant du côté Nord comprenant la mer ouverte à cette époque de l’Eocène, permettant le développement d’une baie comprenant de grands chenaux érosifs dans la partie centrale de cette baie et dont l’axe globalement OSO – ENE recoupait globalement la partie Est de la RBC (Houthuys, 2011). Cette baie énorme puisqu’elle explique le dépôt des sables de la Formation de Bruxelles en Wallonie également le long de cet axe comprenait des faciès de platiers tidaux sur ces pourtours, une zone de delta via l’arrivée de sédiments continentaux par un fleuve orienté SN (dont l’axe et l’embouchure dans la baie se situait en Wallonie aujourd’hui). Les courants tidaux affectaient l’ensemble de la baie. Il en résulte des dépôts Bruxelliens très amincis voire inexistantes au Nord-Ouest et à l’Ouest de la RBC.

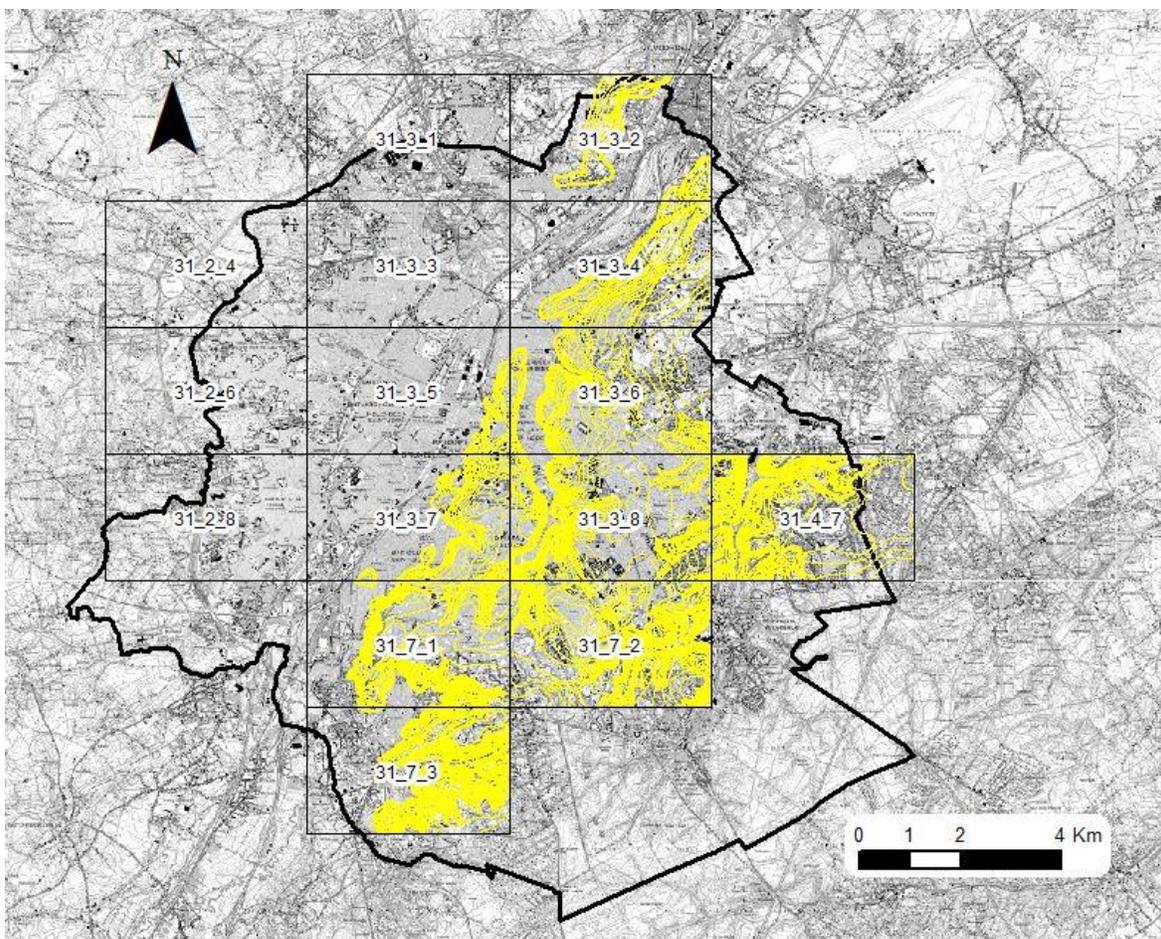


Figure 16: Carte administrative de la RBC avec la limite territoriale de la RBC en trait noir plein sans fond cartographique pour permettre de mieux visualiser les isopaques vectorisés du Bruxellien (en jaune).

4.4.6. Le Lédien et le Wemmélien

Le Lédien et le Wemmélien sont deux formations distinctes, à savoir respectivement celle de Lede et la partie inférieure de la Formation de Maldegem (i.e. Membre de Wemmel). Toutefois, elles sont prises ensemble sur les cartes géotechniques. Cela s'explique par leurs caractéristiques géotechniques similaires. Leurs isopaques se situent des deux côtés de la vallée de la Senne (figure 17), et leur épaisseur varie de 20 mètres au Sud-Est à 22 mètres au Nord-Ouest. Ces valeurs se situent dans les épaisseurs connues actuellement.

Le Lédien et le Wemmélien se situent au-dessus du Bruxellien dans les collines au Sud-Est et au-dessus du Panisélien au Nord-Ouest de la région étudiée (figure 18).

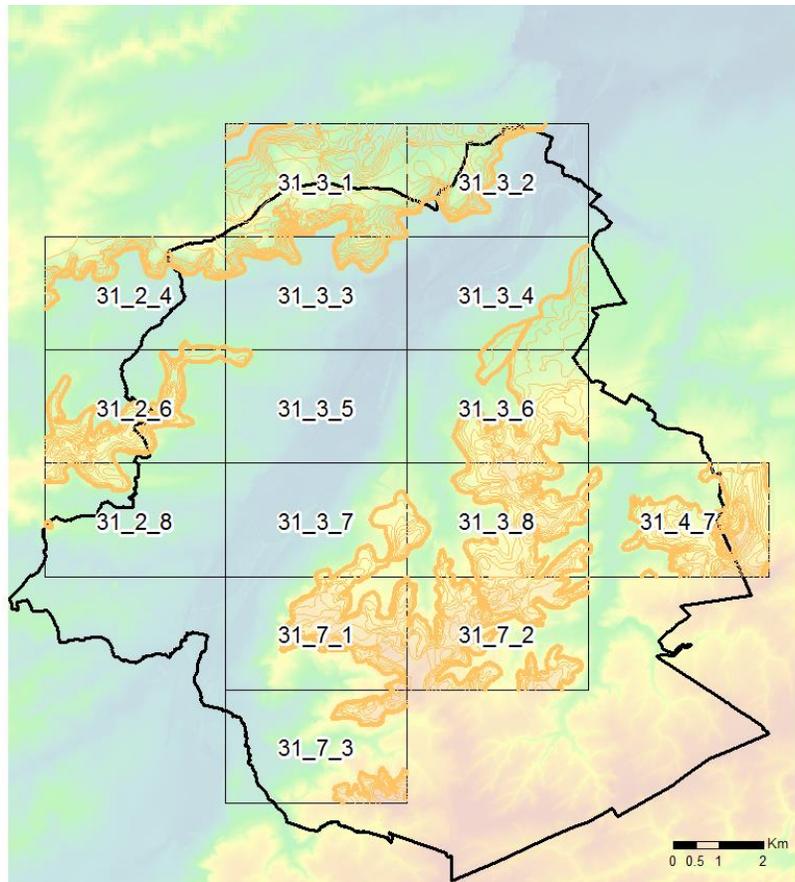


Figure 17: Carte reprenant la limite territoriale de la RBC en trait noir plein et la position des cartes géotechniques avec les isopaques vectorisés comprenant ensemble le Ledien (équivalent à la Formation de Lede) et le Wemmélien (équivalent de la Formation de Maldegem). Le fond cartographique est celui du modèle numérique de terrain combinant les données SRTM de la NASA et celles du Lidar acquis par l'IBGE.

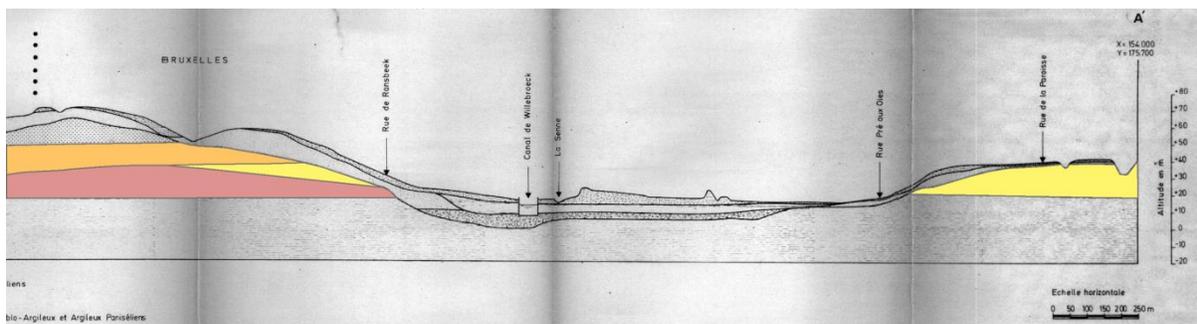


Figure 18: Coupe du profil AA' provenant des cartes géotechniques. Le Ledien et le Wemmélien (en orange) surmontent le Panisélien (en rose saumon) au NO de la RBC et le Bruxellien intercalé entre les deux dans la partie SE des collines de la RBC.

4.4.7. L'Asschien/Assien

Equivalent de la Formation de Maldegem, l'Asschien contient ici également la Formation de Sint-Huibrechts-Hern. Au Sud-Est, la Formation de Sint-Huibrechts-Hern a été totalement érodée par le Quaternaire, ne laissant que l'Asschien au sens propre du terme. L'argile d'Asse est une masse compacte du Bartonien affleurant entre Alost et Bruxelles et encadrée par des formations sableuses (les sables de Wemmel à la base et les sables d'Asse au sommet). Ces trois séquences forment le Bartonien qui repose sur le Lédien (sables de Lede).

En observant les isopaques (figure 19), on constate que le résultat de l'érosion au cours du Quaternaire, a laissé l'Asschien sous forme de lambeaux préservés sur les hauteurs topographiques des deux côtés de la vallée de la Senne. Son épaisseur n'atteint que 10 mètres au Sud-Est, tandis qu'au Nord-Ouest, où la formation de Sint-Huibrechts-Hern est présente, elle atteint une épaisseur maximale de 18 mètres.

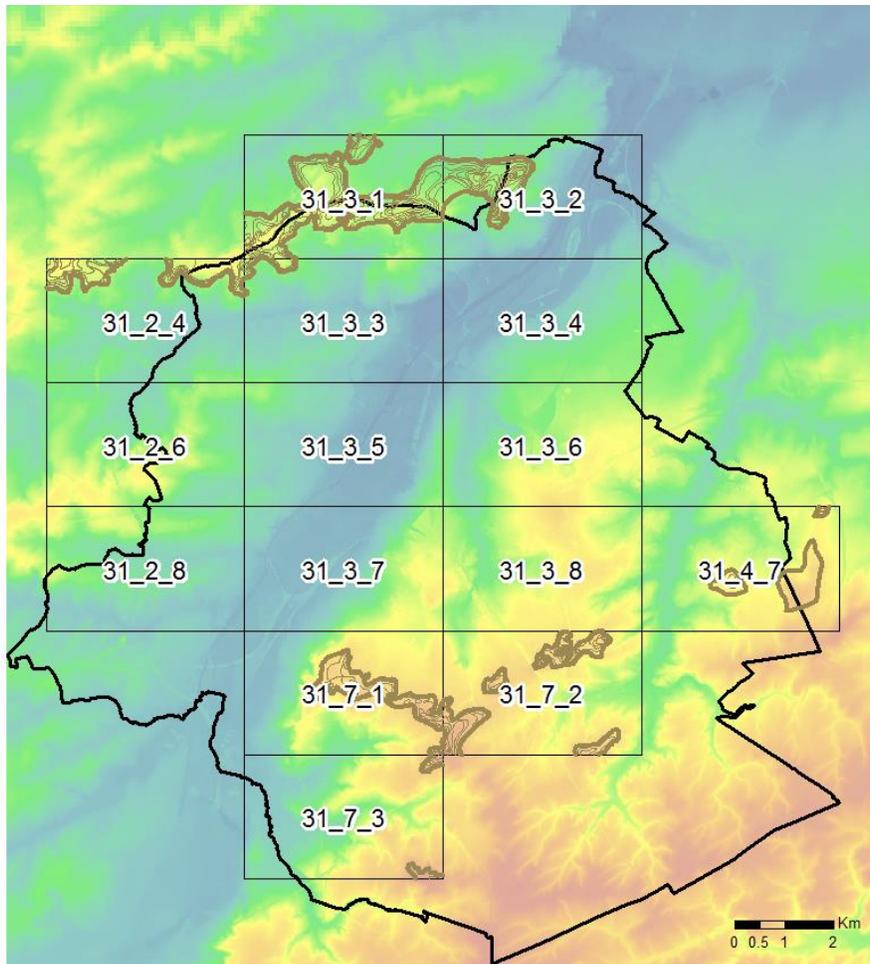


Figure 19: Carte reprenant la limite territoriale de la RBC en trait noir plein et la position des cartes géotechniques avec les isopaques vectorisés de l'Asschien en traits bruns foncés. Le fond cartographique est celui du modèle numérique de terrain combinant les données SRTM de la NASA et celles du Lidar acquis par l'IBGE.

4.4.8. Le Diestien

Le Diestien correspond ici à la Formation de Diest. Il est difficile de savoir si la Formation de Bolderberg est intégrée ou pas au Diestien. Il est représenté par des isopaques (figure 20). Comme toutes les strates du Tertiaire, elle plonge vers le Nord. Elle n'est cependant présente qu'au Nord-Ouest de la région de Bruxelles, à cause de l'érosion au cours du Quaternaire. Son épaisseur tourne généralement autour de 5 mètres, et peut atteindre jusqu'à 10 mètres.

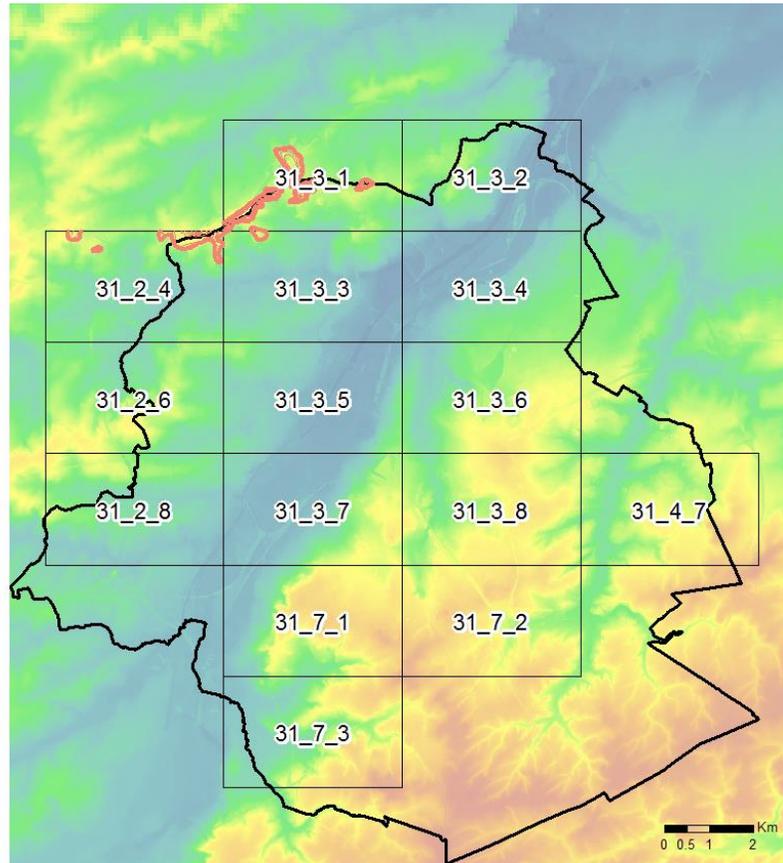


Figure 20: Carte reprenant la limite territoriale de la RBC en trait noir plein et la position des cartes géotechniques avec les isopaques vectorisés du Diestien en traits oranges foncés. Le fond cartographique est celui du modèle numérique de terrain combinant les données SRTM de la NASA et celles du Lidar acquis par l'IBGE.

4.4.9. Les sables et graviers alluviaux (du Quaternaire)

Il s'agit de la première couche du Quaternaire. Elle est exprimée sur les cartes géotechniques par des isopaques (figure 21). Ces sables et graviers alluviaux se trouvent évidemment dans la vallée de la Senne, mais aussi dans celles de Maalbeek et de la Woluwe. Son épaisseur peut avoisiner les 14 mètres et est plus importante dans la vallée de la Senne.

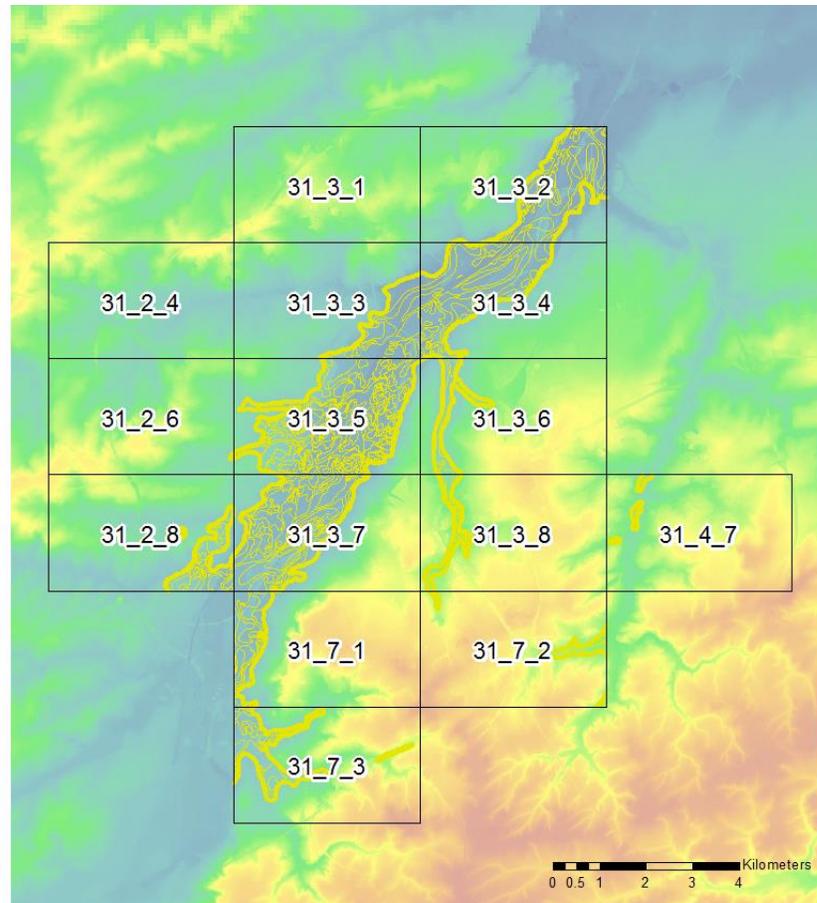


Figure 21: Carte reprenant la position des différentes cartes géotechniques en RBC avec les isopaques vectorisées des sables et graviers alluviaux du Quaternaire. Le fond cartographique est celui du modèle numérique de terrain combinant les données SRTM de la NASA et celles du Lidar acquis par l'IBGE.

4.4.10. Les limons (du Quaternaire)

Les auteurs des cartes géotechniques ont décidé de positionner les limons comme deuxième couche du Quaternaire, entre les sables et graviers alluviaux (localisées en-dessous) et les argiles alluviales (au-dessus). Ces limons, également indiqués par des isopaques (figure 22), correspondent aux couches de loess altérés. Celui-ci n'est autre que du silt déplacé en périphérie glaciaire par le vent durant le Pléistocène. Il s'est répandu sur toute la région étudiée, et recouvre la topographie aussi bien sur les plateaux que dans les vallées. Les loess altérés formeront des dépôts de limons dans les vallées.

Des périodes d'érosion suivies de périodes de dépôts ont eu lieu durant le Pléistocène, l'Holocène et l' « Anthropocène » dans les vallées. Par conséquent, les limons peuvent atteindre 28 mètres d'épaisseur au maximum. L'incision de la Senne dans sa vallée interrompt cependant la continuité de cette couche.



Figure 22: Carte reprenant la position des différentes cartes géotechniques en RBC sans fond cartographique (vu la densité d'isopaques, la lecture serait difficile) avec les isopaques vectorisées des limons déposés au Quaternaire.

4.4.11. Les argiles alluviales (du Quaternaire)

Les argiles alluviales se cantonnent à la base de la vallée de la Senne. Leurs isopaques (figure 23) ont une valeur moyenne de 6 mètres et atteignent au maximum 12 mètres.

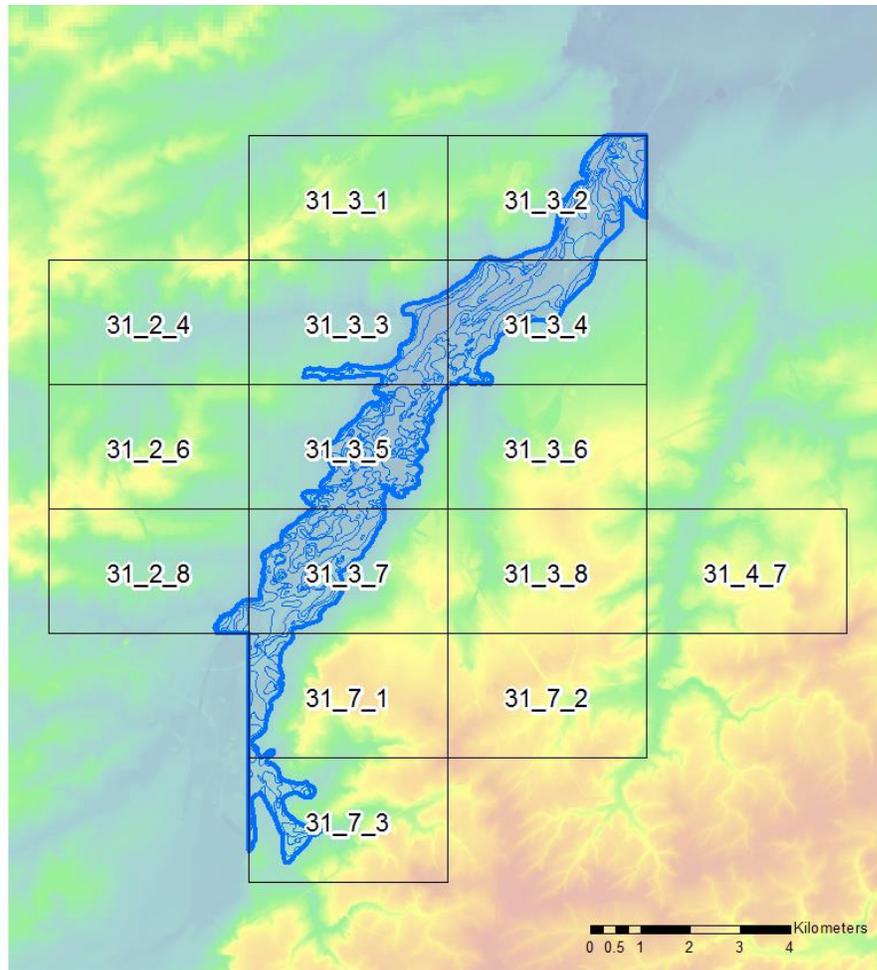


Figure 23: Carte reprenant la position des différentes cartes géotechniques en RBC avec les isopaques vectorisées des argiles alluviales déposées au Quaternaire (au cours de l'Holocène). Le fond cartographique est celui du modèle numérique de terrain combinant les données SRTM de la NASA et celles du Lidar acquis par l'IBGE.

4.4.12. Les activités humaines

A) Carrières souterraines probables

Les carrières avaient pour but l'exploitation des pierres de construction (les bancs gréseux et carbonatés, cfr § 2.1.) de la Formation de Ledde. Vu la position de la couche de Ledde vers le sommet des collines de Bruxelles, les galeries artisanales abandonnées et non étayées sont encore rencontrées lors de grands chantiers comme dernièrement sur le site du campus du Solbosch de la plaine. La zone concernée se situe essentiellement à l'Est et au SE de la RBC lorsque la couche du Leddien est relativement épaisse (figure 24).

La localisation probable des exploitations n'a été déterminée que pour les cartes 31_3_6, 31_3_8 et 31_7_2 et correspond aux zones vectorisées en brun hachuré (figure 24).

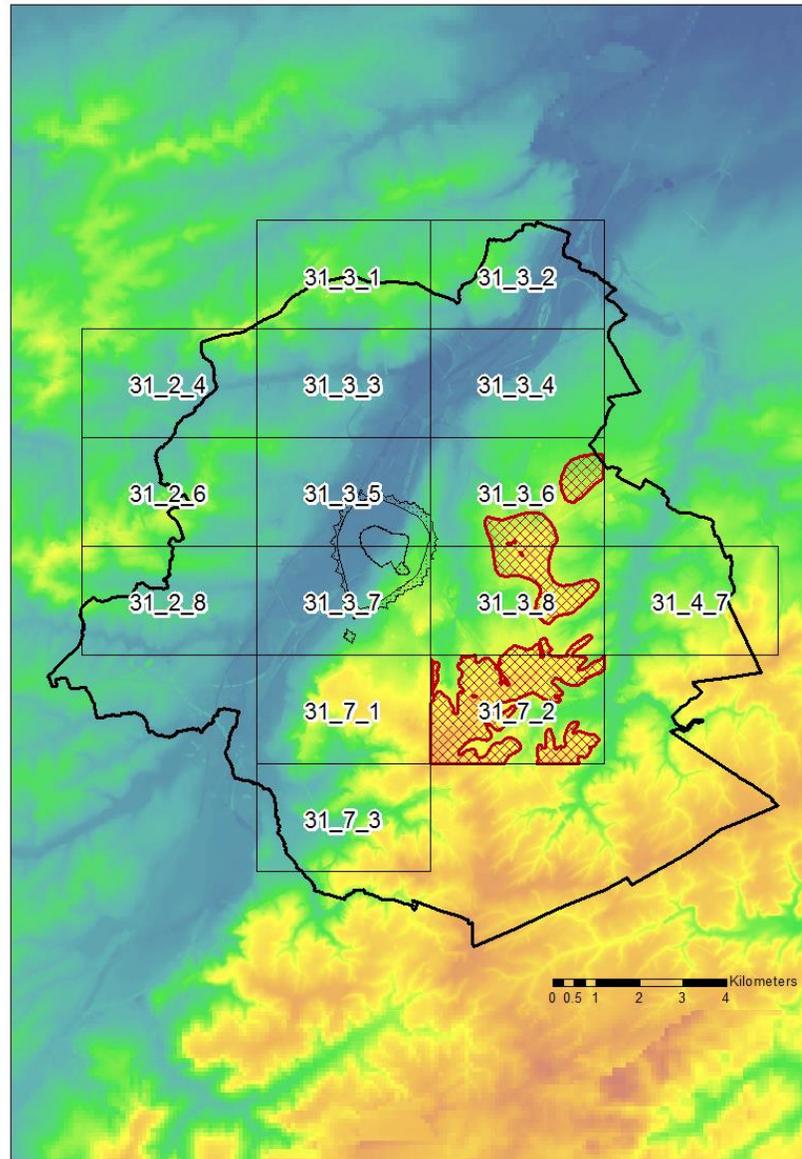


Figure 24 : Carte reprenant la limite territoriale de la RBC en trait noir plein et la position des cartes géotechniques avec les zones probables des zones exploitées pour extraire les pierres du Ledien (brun hachuré) et la présence confirmée d'anciennes carrières souterraines en rouge. On retrouve également vectorisé en noir les anciennes fortifications médiévales de la ville de Bruxelles. Le fond cartographique est celui du modèle numérique de terrain combinant les données SRTM de la NASA et celles du Lidar acquis par l'IBGE.

B) Anciennes fortifications

On retrouve sur les cartes géotechniques (figures 25 et 26) le tracé probable des fortifications médiévales de la première enceinte de la ville ainsi que le tracé d'un second rempart avec la présence vraisemblable de constructions souterraines. Ce second tracé correspond au pentagone

actuel de Bruxelles. Bien qu'ils aient disparus aujourd'hui, ils ont clairement impacté les formations sous-jacentes de quelques mètres sous la surface (figure 23).

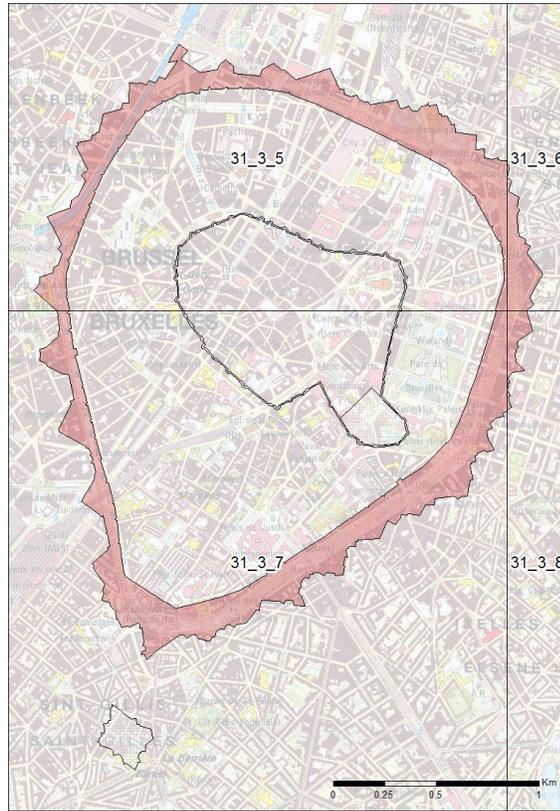


Figure 25 : Carte reprenant les tracés vectorisés des fortifications médiévales de la ville de Bruxelles positionnés à cheval sur les 4 cartes centrales de la ville de Bruxelles. Le fond cartographique est celui des cartes topographiques en couleurs à l'échelle 1/10 000 produit par l'IGN.

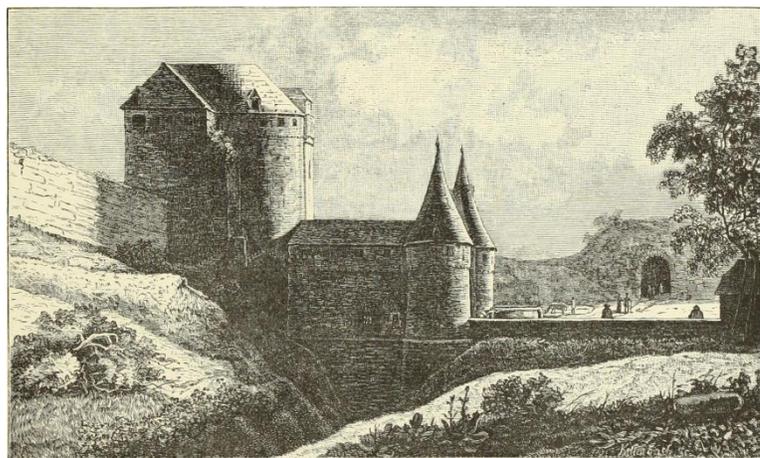


Figure 26 : Ancienne carte postale de la ville de Bruxelles montrant les fortifications/remparts médiévaux et le fossé de défense avec la porte de Leuven. Elle montre l'impact de ces constructions sur les couches superficielles (remaniement et remblais).

C) Les tracés des anciens cours d'eau et plus spécifiquement celui de la Senne (figure 27) et de la partie canalisée de la Senne à travers une partie de la RBC est répertorié sur certaines cartes géotechniques. On peut y reconnaître les tracés de la Grande et de la Petite Senne. On y voit aussi de nombreux bras de la Senne qui vont progressivement disparaître sous le développement urbanistique de la ville, le voûtement des canaux permettant le passage souterrain de l'eau et le déplacement, au début du 20e siècle, de la zone portuaire de Bruxelles vers le site du bassin Becco et des entrepôts de Tours et Taxis.

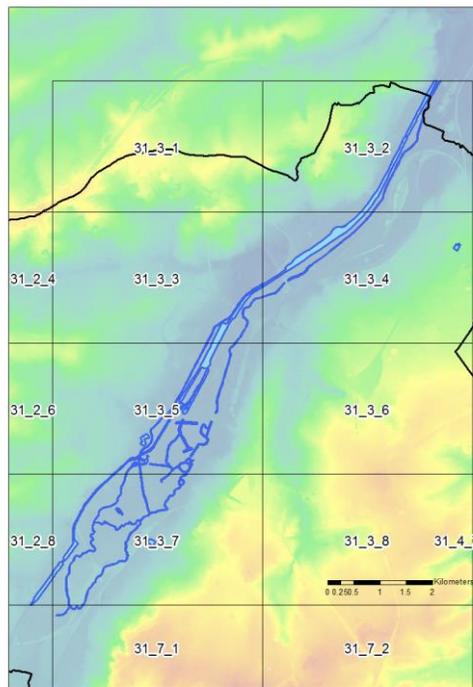


Figure 27 : Le tracé vectorisé de la Senne et du canal de la Senne passant à travers la ville de Bruxelles. La position des cartes géotechniques pour lesquelles le tracé était dessiné sont reprises. Le fond cartographique est celui du modèle numérique de terrain combinant les données SRTM de la NASA et celles du Lidar acquis par l'IBGE.

D) Les remblais

Les auteurs ont comparé la topographie contemporaine (1960-1980) à celle de 1860 pour obtenir des épaisseurs de remblais. Cependant, il n'y a aucune information quant à la présence ou pas de zones excavées sur les cartes, il est évident que des zones furent nivelées. Seuls les valeurs positives, correspondant à un comblement ou à de nouvelles couches formant un nivellement positif, sont représentées par des isopaques (figure 28). Aucune comparaison entre les remblais provenant de la technique déduite par les auteurs et celle des remblais identifiés

dans les forages n'a été réalisée. Par ailleurs, les remblais ne sont, de facto, pas disponibles sur l'ensemble du territoire de la RBC.

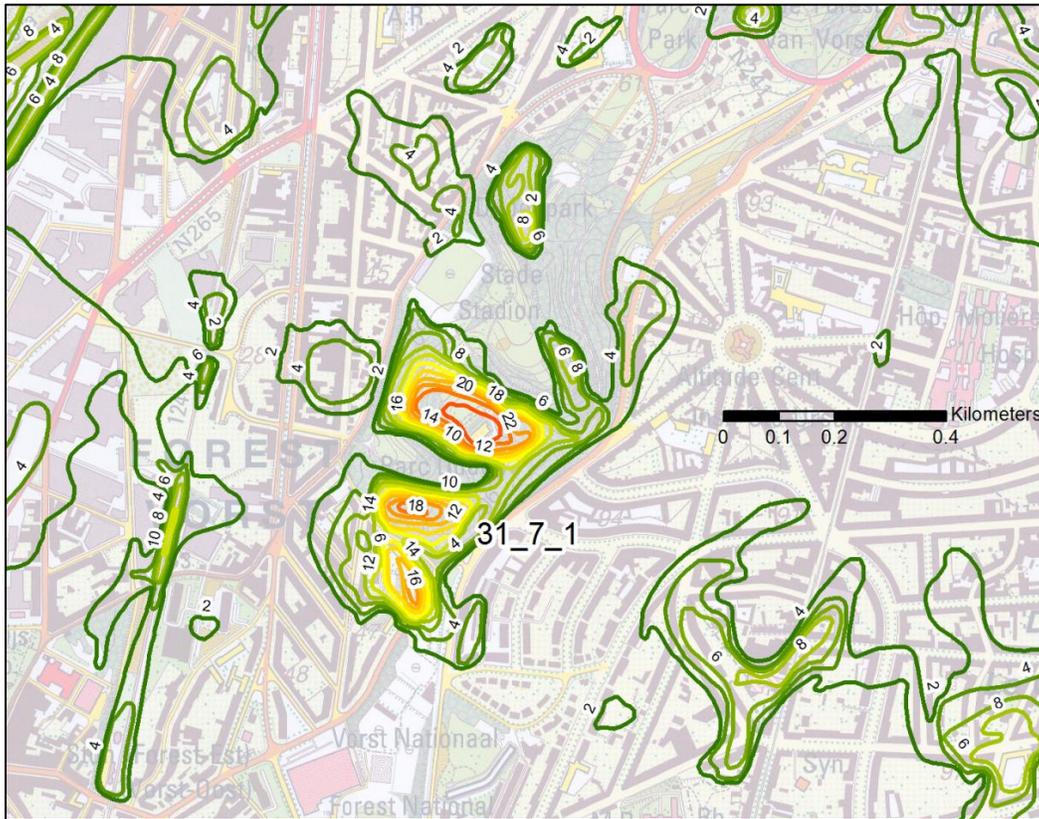


Figure 28 : Les isopaques des remblais sont vectorisés ici pour la carte géotechnique 31_7_1 et l'épaisseur chiffrée est mentionnée sur la polygone vectorielle. Les couleurs des vecteurs vont du vert foncé au rouge par incrément progressif de 2 en 2 mètres. Sur la figure, on peut observer des zones de remblais très importantes à proximité de la zone de Forêt National puisque ces données montrent des épaisseurs atteignant localement 22 mètres. Le fond cartographique est celui des cartes topographiques en couleurs à l'échelle 1/10 000 produit par l'IGN.

E) Les données ponctuelles

Les points cotés correspondent à tous les éléments ponctuels que les auteurs ont utilisés afin de modéliser l'ensemble des couches géologiques décrites précédemment via des isohypses et/ou des isopaques. Comme mentionné précédemment, cela inclut principalement des données de forages et quelques rares essais de pénétration, mais également des piézomètres et des données de surface. L'ensemble de ces données ponctuelles (figure 29) ont un numéro unique ou identifiant correspondant à la description de l'objet. Il convient de signaler ici que les fiches de description initiales n'ont pas été retrouvées au cours de ce projet. C'est un élément dommageable car il est impossible de faire le lien entre la source de la donnée et l'interprétation

que les auteurs en ont faite. Il est donc important de poursuivre la recherche de ces données pour savoir si elles sont définitivement perdues ou pas.

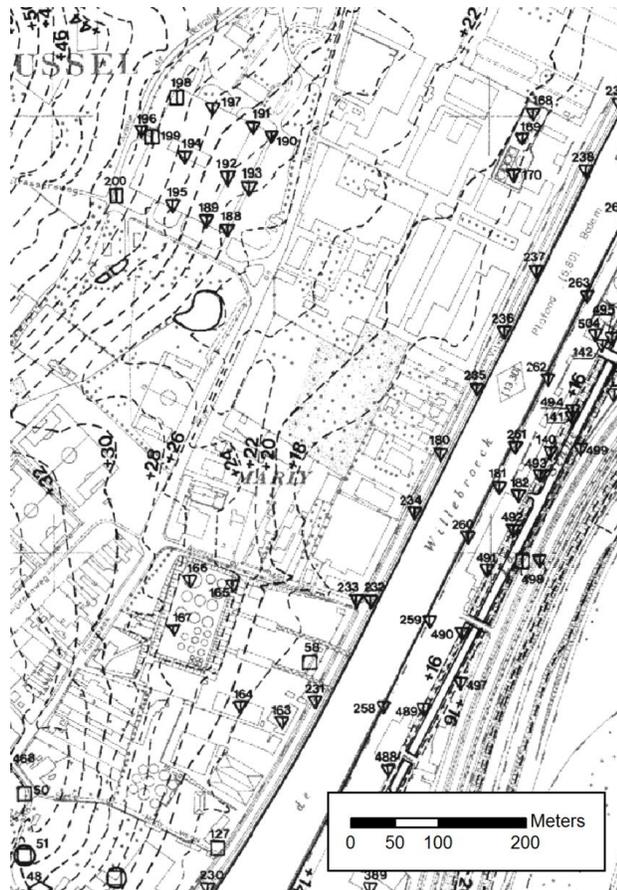


Figure 29 : Extrait de la carte géotechnique 31_3_2, planche 1 montrant sur une carte topographique à l'échelle 1/5 000 les lignes d'altitude topographique et la position des éléments ponctuels autour du canal de Willebroek.

Tous les points sont numérotés (figure 29) sur les cartes géotechniques et devraient correspondre à des archives physiques. Notons que la numérotation n'a pas été encodée dans la table digitale et que les archives n'ont pas été fournies avec les cartes. Au total, ce sont 11.309 points qui ont été vectorisés. Pour 327 d'entre eux (soit ~ 3%), les valeurs des sommets des formations sont imprimées sur les cartes et ont donc été intégrées à la table attributaire (figure 30).

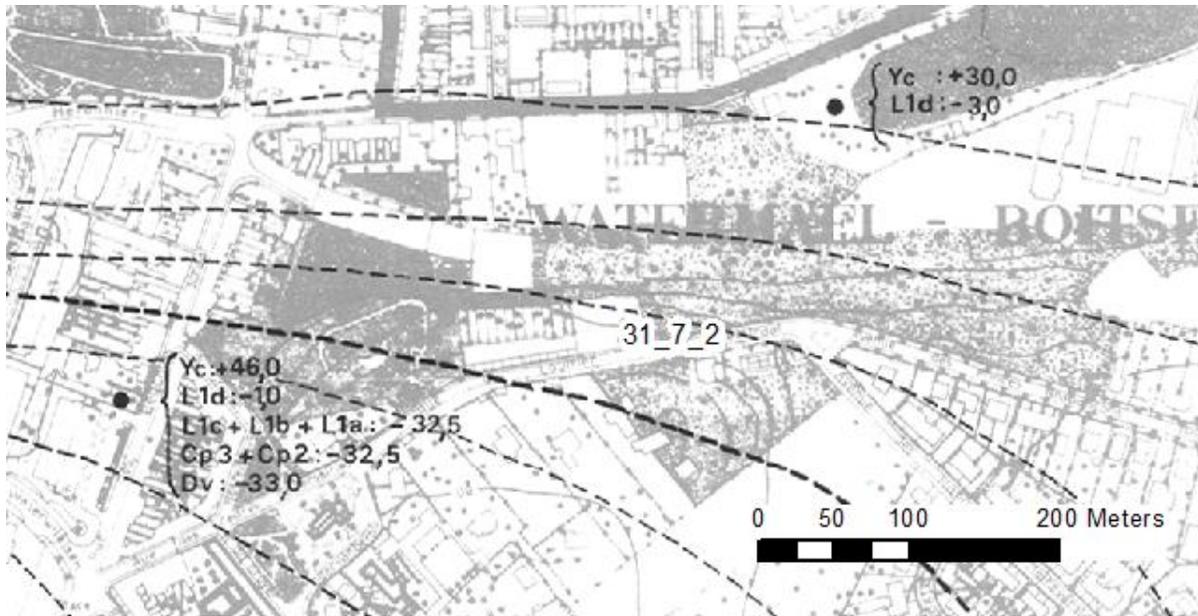


Figure 30 : Extrait de la carte géotechnique 31_7_2, planche VIII montrant des données ponctuelles correspondant à deux forages pour lesquels une interprétation géologique (nomenclature stratigraphique ancienne) est écrite.

4.5. Problèmes rencontrés

- Les cartes ont été réalisées à des années différentes entre la fin des années 1970 et le début des années 1990. Par conséquent les informations ne sont pas toujours cohérentes entre les différentes cartes.
- Plus nous progressons vers des couches stratigraphiques profondes, plus la quantité de données disponibles diminue et, par conséquent, la surface des cartes géotechniques et donc l'information pour les données sous le Tertiaire est très peu représentée. Ceci pose le problème de la quantité de données minimales nécessaires pour pouvoir tracer les couches profondes et de pouvoir exprimer l'épaisseur de celles-ci.
- Les hiatus stratigraphiques, les discordances, les processus sédimentaires particuliers, etc. compliquent la modélisation réalisée par les chercheurs.
- Il faut dissocier la chronostratigraphie ancienne employée par les auteurs de la nomenclature stratigraphique actuelle :
 - o Yprésien = Formation de Kortrijk.
 - o Panisélien = Formations de Tielt et de Gent.
 - o Un seul ensemble d'isopaques pour les membres de Wemmel et de Lede.
 - o Asschien = le Membre d'Ursel et Asse associé à la Formation de Sint-Huibrechts-Hern.
 - o Les limons sont positionnés entre les sables et graviers alluviaux (en-dessous) et les argiles alluviales (au-dessus).

- Pas de prise en compte de la présence de lambeaux sédimentaires préservés de l'érosion comprenant la Formation de Tielt et de Gent au NE de la RBC et de leur absence dans la partie Sud.
- Aucune mention de la Formation de Bolderberg, Est-elle associée ici au Diestien ou à l'Asschien ?
- Les tracés des anciennes carrières et fortifications ne sont pas bien déterminés, nous ignorons jusqu'à quelle profondeur elles influencent les couches inférieures.
- Seuls les remblais positifs sont cartographiés, il n'y a aucune information sur les excavations.
- Seuls 3% des données ponctuelles proposent des valeurs pour les sommets des couches géologiques rencontrées.
- En général, les strates sont représentées par des isopaques et non des isohypses. De plus, elles ne se rejoignent pas toujours bien entre les différentes cartes ! Il faut les relier manuellement pour rester cohérent lors de l'assemblage de toutes les cartes. Pour l'Yprésien, des isopaques sont utilisées sur deux cartes, et des isohypses sur les autres, ce qui montre des incohérences lors de la phase de production de ces cartes et de l'homogénéité du travail.
- Ces données vectorisées pouvaient être utilisées pour réaliser également un modèle en 3D en utilisant les données vectorielles. Malheureusement, l'association de certaines couches géologiques du Tertiaire entre elles qui sont aujourd'hui individualisées, l'impossibilité sur base des données disponibles à partir de ces cartes de déterminer les épaisseurs de chaque membre et/ou formation géologique actuelle, l'absence de certaines cartes contiguës, etc. correspondent à une série de facteurs rendant l'opération de la modélisation en 3D impossible.

4.6. *Projet ArcGIS*

Les shapefiles résultants sont regroupés par thématique. Ils sont finalement compilés dans un projet ArcGIS pour plus de facilité d'usage. Les cotes des isopaques ont été ajoutées le long de celles-ci, ce qui évite d'aller chercher l'information dans la table attributaire, et les shapefiles sont listés selon l'ordre stratigraphique des couches qu'ils représentent.

5. **Principes de la modélisation du système sédimentaire bruxellois**

La modélisation 3D d'un environnement sédimentaire non déformé, en position horizontale ou légèrement inclinée telle qu'en Région de Bruxelles-Capitale, produit un modèle de type « layer-cake » (Weber & Van Geuns, 1990 ; Logan *et al.*, 2001 ; Turner, 2006 ; Zhu *et al.*, 2012). Dans le cas précis de Bruxelles, ce modèle est basé sur la production de surfaces interpolées correspondant aux interfaces des couches géologiques du système sédimentaire. Grâce à ArcScene (l'application de visualisation 3D du

software ArcGIS), le modèle est construit en superposant, par ordre stratigraphique, les surfaces interpolées entre lesquelles les zones sont assimilées aux couches géologiques.

Le système sédimentaire bruxellois comprend des couches d'épaisseur continue de forme horizontale et régulière facilement modélisables en trois dimensions. Un nombre limité de données de forages est dès lors suffisant pour produire, par interpolation spatiale, une surface fidèle à la réalité et un modèle précis qui consiste simplement en l'empilement de surfaces planes et continues. Toutefois, l'architecture du système sédimentaire est compliquée par l'existence de couches présentant des variations latérales d'épaisseur dont l'origine n'est autre que l'érosion fluviale. Ainsi, les processus d'érosion et de transport de sédiments ont produit de nombreuses vallées incisées dans les couches empilées horizontalement créant par conséquent des formations spatialement discontinues (voir par exemple la Formation de Maldegem – figure 4 – qui existe uniquement sous forme de « plaques » isolées les unes des autres sur les sommets des collines).

L'architecture de l'empilement stratigraphique est davantage compliquée par la présence de la Formation de Bruxelles (ou Sables de Bruxelles) et la Formation de Diest dont le caractère sédimentaire diffère des autres formations. En effet, la surface inférieure de ces formations sont irrégulières (figure 4) et représentent des surfaces d'érosion correspondant à d'anciennes vallées marines comblées par les Sables de la Formation de Bruxelles (Houthuys, 2001) et ceux de la Formation de Diest. La surface inférieure de la formation ne peut dès lors pas être modélisée comme une simple structure de type « layer-cake » mais plutôt comme des « chenaux incisés » (Weber & van Geuns, 1990 ; Logan *et al.*, 2001).

La modélisation 3D du substratum de la Région bruxelloise doit considérer cette structure sédimentaire hétérogène. Les couches géologiques, telles que le Membre de Grandglise et le Membre de Saint-Maur, sont facilement et correctement modélisables grâce à leur forme plane et régulière. Une attention particulière doit être portée aux Formations de Diest et de Bolderberg au sommet des collines. Ces formations ont souvent une base érosive mais très peu de forages les recourent ce qui amène une certaine incertitude sur leur répartition stratigraphique ou sur l'interpolation de la base de ces formations. Par ailleurs, la base de la Formation de Hannut se trouve au contact discordant entre le Crétacé dans certaines zones et le socle Paléozoïque dans d'autres zones. A nouveau la prise en compte d'un maximum de données de forage afin de couvrir au mieux l'entièreté de la zone étudiée améliorera la précision de la cartographie digitale. Le nombre de forages disponibles diminue avec la profondeur. Le seuil nécessaire pour avoir une modélisation nécessite en standard minimal est de 1 et 4 forages / km² (Weber and van Geuns, 1990) pour les modèles respectivement de type tabulaire et le modèle jigsaw (lorsque le tabulaire est recoupé par un chenal comme dans le cas de paléovallées fluviales). Comme le montrera la table 2 et la figure reprenant la densité de forages / km², seules les parties S et SE de la RBC continuent de présenter un déficit de données géologiques.

6. Données

6.1. Données stratigraphiques

Les données stratigraphiques utilisées pour la modélisation 3D proviennent des archives du Service Géologique de Belgique (SGB) et comprennent des descriptions et interprétations de forage, de piézomètre et de coupe ou d’affleurement. Ces archives ont été constituées par les géologues belges depuis environ 130 ans et sont, à l’heure actuelle, mises à jour dès que des nouveaux forages et autres informations stratigraphiques (e.g. essais de pénétrations géophysiques ou Cone Penetration Test ou CPT) sont disponibles. Un exemple récent de fiche de forage est présenté (Figure 31). Dans le cadre du projet Brustrati3D, 9 266 données comportant 2465 forages repris dans la zone d’étude (dont 761 forages réalisés pour le Métro de Bruxelles) et les autres sources d’information lithostratigraphiques (222 affleurements, 259 puits, 157 puits artésiens et 5398 CPT) ont été pris en compte. Au total, 9 266 données verticales sont introduites dans la base de données Microsoft Access.

La modélisation du sous-sol bruxellois ne repose pas uniquement sur les données stratigraphiques archivées au SGB. Une collecte permanente de données supplémentaires est entreprise auprès de différents acteurs :

- Des descriptions de forage pour la réalisation de piézomètres ont été récoltées dans les archives papiers de l’IBGE.
- Une série de forage accomplis dans le cadre de la délivrance de permis environnementaux a été transmise par l’IBGE.

Ces données sont référencées dans le système de projection géographique Lambert belge 1972. Leur distribution spatiale (Figure 32 et 33) montre des zones où la densité d’information est faible (telles que les parcs et forêts dans la partie SE de la région) pour lesquelles d’autres sources de données comme des piézomètres et CPT seront recherchés pour encore densifier le modèle géologique en RBC. La densité moyenne de forage sur le territoire de la Région de Bruxelles est relativement importante puisque supérieure à 20 forages par km² (attention pas partout cependant, il reste de nombreux km² qui sont encore pauvres en forages c-à-d < 2 en RBC). Cette valeur moyenne excède largement les minimums standards de 1 et 4 forages par km² suggérés pour modéliser correctement une architecture stratigraphique de type « layer-cake » et chenaux incisés respectivement (Weber & van Geuns, 1990). Finalement en RBC, 70% de la surface modélisée possède plus de 4 forages/km². Il convient de mentionner que les données disponibles pour les parties situées en Flandre et en Wallonie sont d’1 forage pour 3-4 km². Cette densité est loin des standards requis mais correspond aux forages les plus profonds recoupant d’autres formations géologiques sous la couverture Quaternaire. La densité réduite de forages hors de la RBC ne

devrait pas entraîner d'erreurs dans la modélisation hydrogéologique car le maillage utilisé sera plus grand.

SERVICE GEOLOGIQUE DE BELGIQUE

88W/ (IX, c) PLANCHETTE: BRUXELLES
p. 1/1

INFORMATION ADMINISTRATIVE & TECHNIQUE

Carte n°: 88 W TP 7
 PLANCHETTE: Bruxelles
 N°: 2448 (VII) 2è version
 Type de forage: N° M 493 Sondage A ter
 Carte topographique: **31/3**
 Exécuté à: Bruxelles
 N° postal:
 Adresse location du forage: Bd . de Waterloo
 métro tronçon E7-E8/C5-C6
 I.G.E. - STIB
 Maître de l'ouvrage: SMET
 Firme de forage: SMET
 Date: mai 1979
 Topographie: par SMET
 Echantillons par: recueillis par le chef-sondeur
 Mode de creusement: Vrille
 Longueurs & diamètres:

Niveaux d'eau:
 1^{ère} fois:
 Au repos:
 En régime de pompage:
 Débit:
 Dossier Eaux n°:
 Profondeur totale: 30.00 m
 Echantillons conservés:
 Côte de l'orifice/niv. de réf.:
 X: 148757
 Y: 169321
 Code INS:

 DESCRIPTION du FORAGE

 de * à * NATURE DES TERRAINS

0.0	4.0	sable moyen calcarifère, concrétions et briquillons
4.0	14.0	sable fin jaunâtre avec nombreuses concrétions gréseuses, calcarifère, très faiblement argileux
14.0	15.0	sable fin jaune-brunâtre, argileux, calcarifère
15.0	18.0	argile sableuse beige clair, faiblement calcarifère
18.0	23.0	sable fin argileux, très faiblement calcarifère; teinte beige
23.0	28.0	argile sablo-silteuse, très faiblement calcarifère
28.0	30.0	sable fin argileux

 INTERPRETATION STRATIGRAPHIQUE

 SOMMET * BASE * UNITES STRATIGRAPHIQUES

0.0	4.0	Quaternaire (Remblais)
4.0	15.0	Bruxellien, Formation de Bruxelles
15.0	30.0	Yprésien, Formation de Kortrijk, Membre de Moen

 AUTEUR

 J. Herman 03-06-1980 & Cambier G. 2013

Figure 31. Exemple de fiche de forage constituant les archives papiers du Service Géologique de Belgique.

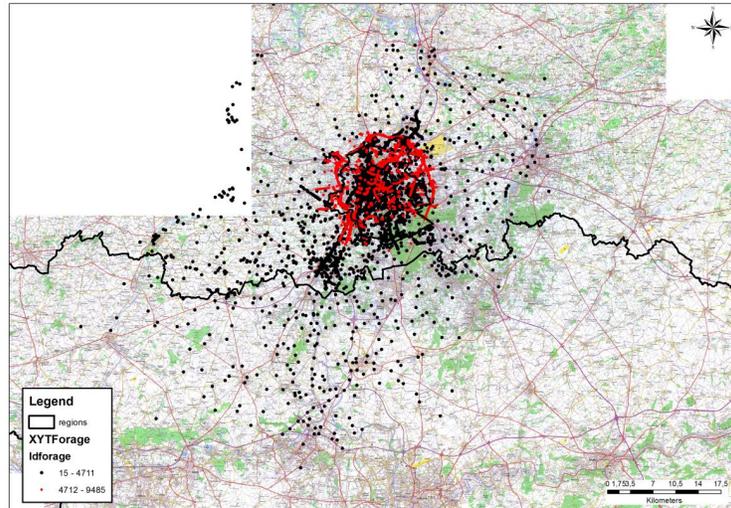


Figure 32. Carte de localisation des 9266 sites de données stratigraphiques (forages, piézomètres, affleurements, CPT, etc. représentés sous la forme de points noirs et rouges). Les limites administratives régionales (en trait noir continu épais) sont reprises sur un fond topographique à l'échelle 1/100 000 de l'IGN.

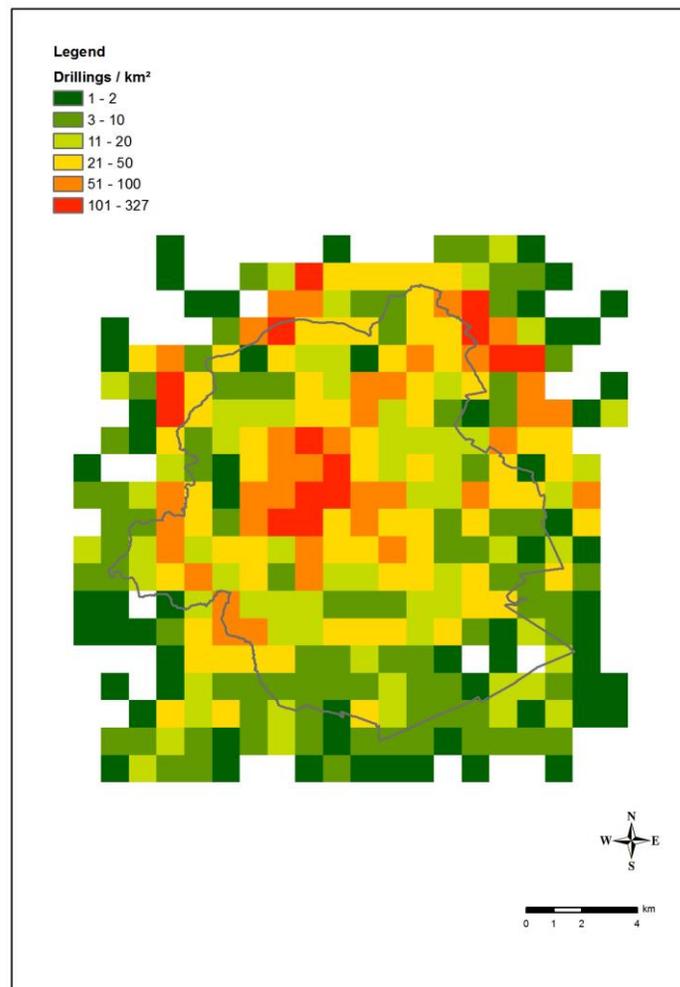


Figure 33. Carte montrant la densité de données (nombre de sites de forage par km²). Certaines zones présentent une densité de données assez faible, particulièrement dans la région non-urbanisée et boisée au Sud et SE de la RBC où peu d'investigations géologiques ont été entreprises. Le constat est le même dans les zones situées autour de la RBC hormis les zones des ouvrages autoroutiers. Les limites territoriales de la RBC sont figurées en gris foncé.

Les fiches de forages constituant les archives du Service Géologique contiennent généralement (1) des descriptions lithologiques d'échantillons de roches remontées au cours du forage (descriptions habituellement réalisées par le foreur et non par un géologue) et (2) une interprétation lithostratigraphique (habituellement réalisée par un géologue du SGB). Ces données géologiques diffèrent considérablement en termes de qualité de description et en termes de profondeur :

- La description des échantillons de roche est réalisée par la compagnie de forage au cours des opérations. Ces descriptions textuelles proviennent de différentes compagnies privées et ont été rassemblées par le SGB qui s'est ensuite chargé d'interpréter lithostratigraphiquement ces descriptions. Lorsque les échantillons de roche parvenaient également aux géologues du SGB, ces derniers se chargeaient de produire une nouvelle description plus détaillée des échantillons suivie d'une interprétation.
- Le niveau de détail de la description lithologique des échantillons varie grandement depuis une description basique (e.g. « sable ») à une explication complète détaillant les éventuels fossiles et structures sédimentaires (e.g. « sable fin jaune, quartzueux, avec concrétions gréseuses et nombreuses petites *Nummulites laevigatus*; fort calcareux »). La qualité des descriptions de forage est donc très hétérogène. De nombreux forages présentent une description insuffisante ne permettant pas une interprétation claire et certaine (un « sable » peut en effet correspondre à 5 ou 6 formations différentes) alors que certains forages possèdent une description complète et détaillée permettant une interprétation stratigraphique incontestable (le sable fin jaune décrit dans la figure 31 sera assimilé de façon certaine à la Formation de Bruxelles).

Pour améliorer la pertinence de l'interprétation géologique réalisée dans le cadre du projet Hydroland, un facteur de qualité associé à chaque fiche permet de déterminer la qualité de l'interprétation géologique selon une gamme allant de 1 à 6 (Figure 34). Dans la base de données Access (Hydroland forages_v1.mdb), ouvrir la table TQualint ou sélectionner le choix approprié directement dans la fenêtre d'encodage (Fforage). Il convient de noter que 55 forages du métro sont encodés avec la mention « La description géologique est manquante actuellement » dans la base de données car aucune description géologique n'est associée actuellement à ces forages.

Pour améliorer encore la pertinence du modèle, une nouvelle grille de qualité pour chaque couche géologique (Figure 36) est rajoutée et doit permettre de préciser pour chaque couche

géologique si la description est bonne (code 0), si un problème est identifié – code 1 (exple, on a mis 1 pour chaque CPT qui ne possède pas la friction car sans ce paramètre l’interprétation est plus compliquée) ou que la profondeur mentionnée ne doit pas être prise en compte car un doute subsiste (code 2). Remarquons que ce nouveau paramètre est une nouveauté dans la BDD et permet à terme de sélectionner plus facilement pour une couche géologique donnée les points pertinents qui serviront pour réaliser l’interpolation. Ce paramètre de qualité a été rentré pour tous les nouveaux points encodés dans le cadre du projet Brustrati3D.

- Comme mentionné plus haut, la géologie de la Région bruxelloise est caractérisée par une épaisse série Tertiaire d’origine marine où des sables, silts et argiles alternent de façon assez monotone et répétitive. Cette particularité stratigraphique, couplée à l’absence de vrais « marqueurs sédimentaires¹ » n’aide évidemment pas à l’interprétation des descriptions de forage. Il s’en suit des limites de formation difficiles à positionner. Un exemple récurrent appliqué à la Région bruxelloise concerne les Formations de Lede et de Bruxelles, toutes deux constituées de sables jaunes, et pour lesquelles la limite entre les deux est difficile à établir.
- La profondeur des forages diffère également depuis des forages peu profonds (de quelques mètres) à des forages profonds (d’une centaine de mètre). Les premiers ne recoupent que des dépôts superficiels d’âge Quaternaire alors que les seconds traversent toute la colonne lithostratigraphique depuis la surface jusqu’au socle Paléozoïque en ce compris les sédiments tertiaires et crétacés.
- Parmi les 9 266 sites de données verticales disponibles dans la zone d’étude, le nombre de forages recoupant le toit ou la base de chaque formation est mentionné dans la table 3.

	Forages dans la zone d’étude et excluant ceux ayant un code de qualité égal à 2					
	Top	Base				
Quaternaire	8323	6981	L’interpolation de la base se fait sur l’épaisseur du Quaternaire			
Diest	7	2	Pas d’interpolation possible, seuls 2 points présents			
Bolderberg	37	27				
Saint-Huibrechts-Hern	232	163				
Onderdale (Maldegem)	9	9				
Ursel et Asse (Maldegem)	368	313				
Wommel (Maldegem)	654	475				
Lede	1458	714				

¹ Une couche géologique très particulière et facilement reconnaissable qui permettrait de se positionner de manière incontestable dans la colonne lithostratigraphique.

Bruxelles	2551	552				
Vlierzel (Gent)	130	114				
Merelbeke (Gent)	206	192				
Tielt	1003	573				
Aalbeke (Kortrijk)	566	531	Changement de zone avec le Membre d'Aalbeke			
Moen (Kortrijk)	2557	535				
Saint-Maur (Kortrijk)	1254	483				
Grandglise (Hannut)	567	307				
Lincnt (Hannut)	271	209				
Crétacé	116	79				
Paléozoïque	250	/				

Table 3 : Liste du nombre de forages repris pour chaque couche au sein du projet Brustrati3D et recoupant le toit et/ou la base de la formation ou du membre.

250 (dans la zone d'étude étendue du modèle de Brustrati3D) atteignent la surface supérieure du socle paléozoïque. Comme on peut le voir, la densité de points verticaux recoupant des séries sédimentaires diminue drastiquement avec la profondeur. Par conséquent, les couches géologiques profondes seront modélisées moins précisément compte tenu du nombre de données disponibles alors que les couches géologiques supérieures, proches de la surface et recoupées par de nombreux forages, seront modélisées de façon plus détaillée (Logan *et al.*, 2001 ; Turner, 2006 ; Cambier & Devleeschouwer, 2013). De nouveaux développements avec la méthode HVSR sont en cours et devraient prochainement permettre de proposer une nouvelle approche cartographique du toit du socle Paléozoïque en RBC.

IDautomatis	Coefficient de confiance	Description de la qualité
1	1	1 - Très bonne interprétation géologique
2	2	2 - Problème identifié dans un Membre
3	3	3 - Problèmes identifiés dans plusieurs Membres
4	4	4 - Problème identifié dans une Formation
5	5	5 - Problèmes identifiés dans plusieurs Formations
6	6	6 - Doit être déterminé

Figure 34. Extrait de la base de données montrant la table TQualint avec le degré de qualité que l'on peut choisir d'associer à chaque forage pour quantifier la qualité de l'interprétation géologique réalisée.

Il convient de mentionner également que certains membres ou formations géologiques comme les Formations de Boom et Bilzen ou les Membres d'Onderdijke (F. de Maldegem) et de Waterschei (F. de Hannut) sont très peu représentés dans les forages et sont géographiquement très localisés dans des zones

situées en dehors de la RBC. Ces membres et formations n'ont pas été cartographiés vu leur absence dans la zone d'étude.

6.2. *Modèle Numérique de Terrain*

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu de l'IGN, d'une résolution de 7 m x 7 m et couvrant l'entièreté de la Région bruxelloise a été conçu à partir de l'interpolation par krigeage de 1,7 millions de relevés topographiques. La distribution spatiale de ces relevés suit exclusivement les trottoirs et chemins pédestres ce qui implique une mauvaise détermination de la topographie au milieu des blocs urbains et des surfaces vertes. L'acquisition de données LIDAR (1 m de résolution) par l'IBGE a permis de travailler avec un nouveau modèle numérique de terrain à très haute résolution permettant de remplacer avantageusement le MNT issu de l'IGN. Le modèle MNT issu du LIDAR a un buffer de 0.5 km autour des limites régionales de la RBC. L'utilisation de ce modèle a nécessité un traitement automatique et manuel pour éliminer les variations d'altitude liées à la présence de l'ensemble du bâti sur le territoire de la RBC.

Les effets de bords ont été corrigés à l'aide du MNT de l'IGN. Par ailleurs, un lissage de l'ensemble des données LIDAR a eu lieu. La précision selon l'axe vertical Z est de 5 cm (une erreur d'une dizaine de cm reste possible) et selon les axes horizontaux X et Y de 1 m.

Une correction sur l'altitude a été réalisée pour tous les ouvrages par comparaison avec la cote d'origine (cote en Z de l'orifice du forage). Les deux informations sont fournies (Z originel et Z LIDAR, Figure 7). C'est l'altitude en Z déterminée par le LIDAR qui est la cote de référence reprise pour positionner correctement et topographiquement l'ensemble des données en Z en RBC. La différence entre le Z originel et le Z LIDAR > 2 m en RBC a fait l'objet d'une analyse et d'une correction éventuelle. En effet, il est évident que certains pixels possèdent une donnée d'altitude erronée malgré la correction appliquée pour éliminer la présence de l'ensemble du bâti. Pour tous les autres ouvrages ayant une différence < 2 m, c'est la cote Z LIDAR qui a été appliquée par défaut. Cette étape permet donc d'obtenir l'altitude la plus précise permettant de reporter verticalement le sommet de chaque formation/membre stratigraphique rencontré en profondeur. Un onglet (remarque sur l'altitude, figure 35) permet également de noter tout commentaire relatif à un problème lors de la détermination de l'altitude notamment avec les données LIDAR.

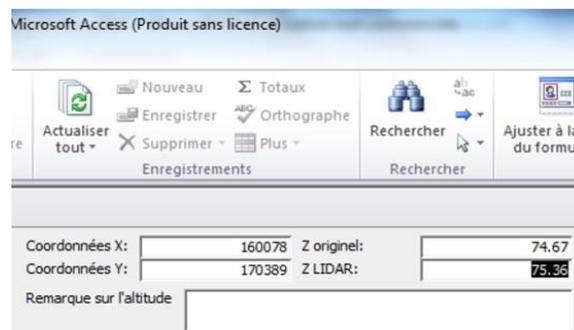


Figure 35. Extrait de la base de données montrant la fenêtre d'encodage Fforage avec les deux champs de données relatifs à l'altitude de l'orifice de l'ouvrage (Z originel et Z LIDAR).

Les données LIDAR n'étaient pas disponibles dans le cadre de cette étude en-dehors de la RBC. Le MNT utilisé pour déterminer l'altitude des ouvrages sélectionnés dans ces deux régions s'est finalement basé sur les données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), mises à disposition par la NASA, ayant un quadrillage horizontal de 3 arc secondes (approximativement 80 m) et disponibles au Service Géologique de Belgique.

La méthodologie suivie pour fusionner les deux rasters Lidar10 et SRTM80 est la suivante : aller dans Data Management Tools > Rasters > Rasterdataset > Mosaic to new raster. Il suffit d'introduire l'image du SRTM80 et ensuite entrer l'image du Lidar10 à sélectionner à partir d'une « dropdown box ». Il faut entrer le dossier de destination et le nom sous lequel nous souhaitons enregistrer la nouvelle image. En utilisant les paramètres par défaut, le programme va utiliser la surface de l'image SRTM80 et il reprendra les valeurs du Lidar10 dans la zone de coexistence des deux données et celles du SRTM80 dans la zone qui ne contient que le SRTM80. Cette nouvelle image produite est donc la combinaison des données Lidar10 et SRTM80 qui sera appelée Lidar10_SRTM80 dans la suite des travaux ci-dessous. Les données Lidar10_SRTM80 sont donc celles utilisées pour les forages en-dehors de la RBC et sont reportées dans la case « Z_LIDAR » par simplification. La différence entre le Z originel et le Z LIDAR > 5 m en-dehors de la RBC a fait l'objet d'une analyse et d'une correction éventuelle. Pour tous les autres ouvrages ayant une différence < 5m, c'est la cote Z LIDAR qui a été appliquée par défaut en dehors de la RBC. Il convient peut-être de garder à l'esprit qu'une nouvelle couverture LIDAR existe aussi en Flandre et qu'elle pourrait améliorer la valeur en Z dans la partie flamande du territoire étudié.

6.3. Données cartographiques

Plusieurs ressources cartographiques ont été utilisées à des fins variées. Elles comprennent la carte géologique de Bruxelles-Nivelles à l'échelle 1:50 000 (Buffel & Matthijs, 2002), les 15 cartes géotechniques à l'échelle 1:5 000 couvrant partiellement la Région bruxelloise et les cartes topographiques à l'échelle 1:10 000 recouvrant toute la Région Bruxelloise.

Les cartes géologiques et géotechniques sont utilisées comme support à l'interprétation stratigraphique des forages. Chaque interprétation est réalisée exclusivement et dans la mesure du possible sur la base des descriptions lithologiques des échantillons. Toutefois, lorsque ces descriptions sont incomplètes ou de mauvaise qualité, les cartes géologiques, géotechniques et les coupes géologiques sont utilisées pour aider à l'interprétation. Les cartes topographiques sont quant à elles employées pour vérifier l'exactitude de la localisation des forages et valider leurs coordonnées XY essentiellement, l'altitude faisant déjà l'objet d'une discussion séparée au chapitre 6.2.

7. Base de données stratigraphiques

L'étape suivante dans l'élaboration du modèle géologique consiste à introduire et structurer l'ensemble des données géologiques dans une base de données (BDD) informatique. L'information est stockée dans une BDD Microsoft Access dans laquelle chaque forage, piézomètre, affleurement, CPT et autre source d'information stratigraphique constitue un enregistrement ou une fiche individuelle. Pour information, une méthode similaire de gestion et de correction des données dans le cadre d'une modélisation géologique 3D a été proposée par Kaufmann & Martin (2008) et Thierry *et al.* (2009).

7.1. Tables, requêtes et formulaires Microsoft Access

La BDD stratigraphique comprend quatre tables Access :

- (1) une table **forage (TForage)** (incluant en réalité les données de forage mais aussi des piézomètres, affleurements, CPT, etc.) qui reprend les informations suivantes : l'identifiant du forage, les coordonnées géographiques XY en projection Lambert 72, la valeur en Z fournie par le document de travail et la valeur en Z calculée sur base des données LIDAR en RBC et SRTM hors RBC, la date de réalisation de l'ouvrage, le type de donnée, la carte topographique au 1:5 000 associée, le numéro d'archive du SGB, une remarque éventuelle sur un problème lié à l'altitude de l'ouvrage ou à la valeur en Z Lidar et l'interprétation lithostratigraphique avec un coefficient de qualité pour chaque couche présente dans l'ouvrage, la qualité générale de l'interprétation géologique de la donnée étudiée, un commentaire (remarque) sur la fiche relative à la description et/ou l'interprétation géologique, un problème de coordonnées ou d'altitude, etc. ; les outils de recherche dans la base de données, de déplacement dans les enregistrements et de manipulation des enregistrements, enfin deux nouveaux boutons relatifs aux hyperliens vers les fiches numérisées disponibles pour les ouvrages
- (2) une table **formation (TFormation)**, qui décrit la lithologie de chacune des couches géologiques modélisées ;
- (3) une table **âge (Tage)**, reliée à la précédente table formation, qui indique l'âge chronostratigraphique des unités ;
- (4) et enfin, une table liée à la qualité de l'interprétation géologique (**TQualint**) dont mention au chapitre 4.1.

La BDD stratigraphique contient également 3 requêtes nommées "Rcomplet", "Rdescriptif" et "Rformation". La première permet d'afficher les formations géologiques (description et chronostratigraphie), la seconde permet d'avoir, à partir d'un descriptif lithologique, la ou les formation(s) géologique(s) associée(s), et la troisième qui, à partir d'un mot-clé d'une formation, permet d'obtenir le descriptif et la lithologie pour cette formation.

L'intégration et la visualisation des données se font par l'intermédiaire d'interfaces ou de formulaires :

- Fforage : formulaire général qui va lui-même faire appel aux 3 autres formulaires qui vont suivre par des boutons dédiés ;
- Fdescriptif : formulaire affichant le descriptif d'une formation donnée ;
- Fformation_cle : formulaire donnant un descriptif pour une formation précise ;
- Fcomplet : formulaire permettant l'affichage de toutes les formations géologiques ;

La figure 36 illustre le formulaire d'encodage utilisé pour introduire manuellement chacun des forages dans la base de données Access. La partie supérieure du formulaire regroupe l'ensemble des généralités et la partie inférieure présente la liste des couches géologiques susceptibles d'être rencontrées par ordre stratigraphique.

Généralités: identifiants, coordonnées XY, date, cote du Lidar et cote originelle, remarque sur la précision de l'altitude.

Fforage

Idforage: 15 Type: Forage Coordonnées X: 160078 Z originel: 74.67
 Numéro d'archive SGB: 088E0836 code_carte: 31/4 Coordonnées Y: 170389 Z LIDAR:
 Numéro de données métr: Date: 27/06/1905 Remarque sur l'altitude

Lithostratigraphie en RBC et hors RBC pour BRUSTRATI3D Qualité de la couche géologique

<input checked="" type="checkbox"/> Présence de Quaternaire	Sommet de la formation : 75.36	Epaisseur :	1	<input type="checkbox"/> Tourbe
<input type="checkbox"/> Présence de Diest	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Bolderberri	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Boom	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Bilzen	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Sint-Hubrechts-Hern	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Maldegem (Onderdijke)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Maldegem (Buisputten)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Maldegem (Zomergem)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input checked="" type="checkbox"/> Présence de Maldegem (Onderdale)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Maldegem (Ursel et Asse)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Maldegem (Wemmel)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input checked="" type="checkbox"/> Présence de Lede	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input checked="" type="checkbox"/> Présence de Bruxelles	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Gent (Vierzele)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Gent (Pittem)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Gent (Merebeke)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Tielt	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Kortrijk (Aalbeke)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Kortrijk (Moen)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input checked="" type="checkbox"/> Présence de Kortrijk (Saint-Maur)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input checked="" type="checkbox"/> Présence de Hannut (Grandglise)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input checked="" type="checkbox"/> Présence de Hannut (Lincet)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Hannut (Waterschei)	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Heers	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input checked="" type="checkbox"/> Présence de Crétacé	Sommet de la formation :	Epaisseur :		
<input type="checkbox"/> Présence de Paléozoïque	Sommet de la formation :	Epaisseur :		

Qualité de l'interprétation géologique:

Très bonne interprétation géologique
 Problème d'interprétation lié à un Membre
 Problèmes d'interprétation lié à plusieurs Membres
 Problème d'interprétation lié à une Formation
 Problèmes d'interprétation lié à divers Formations
 Doit être déterminée

Outils de recherche

Recherche Mot-clé dans les descriptifs
 Recherche Mot-clé dans les formations
 Listing complet des formations

Déplacement dans les enregistrements

Premier enregistrement
 Enregistrement précédent
 Enregistrement suivant
 Dernier enregistrement

Manipulation sur les enregistrements

Modifier enregistrement
 Ajouter enregistrement
 Supprimer enregistrement
 Fermer formulaire

Fiche descriptive
 Graphique CPT

Remarque: limite entre Formation de Maldegem et Q? Pas de friction.

Choix à cocher permettant de définir la qualité de l'interprétation géologique obtenue dans la région étudiée.

Boutons pour les recherches, la manipulation et les déplacements dans les enregistrements ainsi que les 2 deux nouveaux boutons pour appeler les fiches ou les graphiques

Ensemble des couches géologiques susceptibles d'être rencontrées le long du forage. Ces unités sont présentées par ordre stratigraphique. L'utilisateur coche les cases correspondantes aux couches effectivement détectées.

Colonne de gauche : profondeur du sommet de l'unité.
 Colonne du milieu : épaisseur de cette unité
Colonne de droite : nouvelle colonne qualité/pertinence de la couche
 En bas, la case remarque mentionne un problème observé dans le forage étudié.

Figure 36. Formulaire Microsoft Access employé pour l'encodage manuel des données stratigraphiques.

L'encodeur a la possibilité de cocher la case en vis-à-vis de l'unité géologique détectée pour le forage et ensuite d'insérer l'altitude de la surface supérieure de cette unité (colonne de gauche, « Sommet de la formation ») ainsi que l'épaisseur de l'unité (colonne de droite, « Epaisseur »). Les unités géologiques non cochées sont considérées comme non existantes aux coordonnées XY correspondantes et se voient attribuer automatiquement une épaisseur de 0 mètre.

7.2. Contrôles des données

Le formulaire général Access, nommé « Fforage » est basé sur plusieurs milliers de lignes de code, est conçu pour prévenir certaines erreurs d'encodage. Par exemple, l'introduction de deux enregistrements avec un numéro d'archive du SGB identique est impossible (message d'erreur) ce qui permet d'éviter une double acquisition. De la même façon, l'introduction d'une superposition stratigraphique aberrante (par exemple une valeur d'altitude d'une couche tertiaire inférieure à l'altitude du socle paléozoïque) est impossible.

Finalement, après l'encodage manuel des données de forage, chacun des enregistrements est attentivement vérifié. Ce contrôle systématique et minutieux des données durant leur introduction est nécessaire à la production d'un modèle géologique précis et correct. Ce contrôle permet de minimiser les erreurs, particulièrement les erreurs d'encodage, qui s'avèrent inévitables lors de la manipulation de plusieurs milliers de données (plus de 6 000 valeurs de profondeur de couches rassemblées le long de 4495 forages ont été encodées).

Une seconde validation des données de forage a été réalisée sur la base des premiers résultats de modélisation tridimensionnelle. Ces contrôles concerneront l'altitude des forages (correspondance de la position verticale des forages sur le MNT) ainsi que les erreurs d'interprétation lithostratigraphique.

7.3. Hyperliens entre les fiches et la table Fforage

Les archives du Service Géologique de Belgique rassemblent et inventorient l'ensemble des fiches de forage. Ces fiches sont disponibles sous forme de documents papiers mais aussi sous forme de fichiers textes (fichiers informatiques d'extension « .txt »). Le Service Géologique de Belgique a intégré un script dans la BDD avec deux nouveaux boutons qui permettent de faire le lien entre les données digitales et les sources de l'information (description de forage ou image du CPT).

Pour rendre la base de données plus efficace, des hyperliens sont créés afin de lier les entités (les forages, les CPT, etc) de la base de données aux fiches descriptives et aux graphiques qui y correspondent. L'hyperlien sera appelé dans la feuille de forme Fforage à l'aide d'un bouton créé sous visual basic. Puisqu'il existe en général une fiche descriptive de format txt pour chaque forage, et un graphique de format pdf pour certains d'entre eux, deux boutons doivent être intégrés à la feuille de forme.

Notons que l'utilisation d'hyperliens est choisie ici préférentiellement à l'insertion d'Objet OLE proposée par Access. Si cette fonction est plus simple que la manipulation d'hyperliens, elle alourdit cependant considérablement la base de données. Pour que la base de données reste fluide, la fonction OLE n'a donc pas été utilisée.

Pour commencer, un attribut « Dossier » de format texte est ajouté à la table TForage. Il correspond au dossier racine dans lequel se situent les fichiers txt et/ou les fichiers pdf. Cette colonne est essentielle car, lorsque la base de données est utilisée sur des ordinateurs ou des supports différents (disque interne, disque externe, clé usb, etc), l'emplacement des fichiers change également. Grâce à l'attribut « Dossier », il est facile de changer la racine et le chemin d'accès où se trouve le dossier recherché à l'aide de requêtes.

La requête « Rchemin_dossier » permet cette opération. En effectuant un clic droit dessus, puis **design view/mode création**, les modalités de la requête apparaissent (Figure 37).

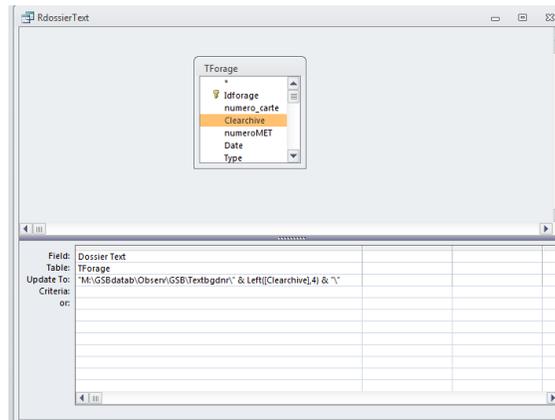


Figure 37. Extrait de la requête permettant d'identifier le chemin du « dossier » dans lequel se trouvent l'ensemble des fiches.

L'outil de requête « Update to / Mise à jour » permet de modifier toutes les entrées en même temps (sauf si un critère de sélection est précisé dans « Criteria ») par la valeur indiquée. Lors du passage des données d'un support à un autre, il faudra mettre à jour la colonne « Dossier ». Il suffit de taper le nouveau chemin d'accès dans la requête et de la lancer. Ici, la requête s'apprête à remplir la colonne « Dossier » avec comme valeur le chemin "M:\GSBdatab\Observ\GSB\Textbgdnr\" & Left([Clearchive],4) & \" (figure 36).

La partie " & Left([Clearchive],4) & " correspond aux 4 premiers caractères de gauche de la chaîne de caractère « Clearchive ». « Clearchive » est la clef de nos forages, c'est-à-dire de leur nom. Les 4 premiers caractères (3 chiffres et 1 lettre) de leur nom correspondent à leur localisation. Ils sont répartis dans des dossiers qui ont également cette localisation comme nom, c'est pourquoi elle apparaît ici. Par exemple le fichier « 088W0836 » se situe dans le dossier 088W. Le nom de dossier variant d'un forage à

l'autre, cette formulation permet d'éditer toutes les valeurs de l'attribut « Dossier » en tenant compte des différents dossiers dans lesquels les forages sont répartis.

Ensuite, des boutons sont créés dans notre feuille de forme. Par exemple, nous pouvons créer un bouton « Commande_fichierdescriptif » et l'insérer à notre feuille. Le code en visual basic ci-dessous correspond à la commande « Commande_fichierdescriptif_Click », à effectuer lorsque nous cliquons sur le bouton « Commande_fichierdescriptif ». Elle consiste à suivre l'hyperlien (Application.FollowHyperlink) défini dans la variable string (CheminCompleto). Notons qu'une fonction Backslash a préalablement été créée afin d'éviter des erreurs dues à l'absence de backslash à la fin du dossier racine. Un message d'erreur (Err_Commande_fichierdescriptif_Click) est aussi instauré dans le cas où l'hyperlien ne renverrait vers aucun fichier.

Le même code est utilisé pour créer un bouton relatif aux fichiers pdf.

```
Function AddBackslash( _  
ByVal strFolder As String) As String  
strFolder = Trim(strFolder)  
If Right(strFolder, 1) <> "\" Then strFolder = strFolder & "\"  
AddBackslash = strFolder  
End Function
```

```
Private Sub Commande_fichierdescriptif_Click()  
On Error GoTo Err_Commande_fichierdescriptif_Click  
Dim strCheminCompleto As String  
strCheminCompleto = AddBackslash(Nz(Me![Dossier], "")) & Me![Clearchive] & ".txt"  
Application.FollowHyperlink strCheminCompleto  
Exit_Commande_fichierdescriptif_Click:  
Exit Sub  
Err_Commande_fichierdescriptif_Click:  
MsgBox Err.Description  
Resume Exit_Commande_fichierdescriptif_Click  
End Sub
```

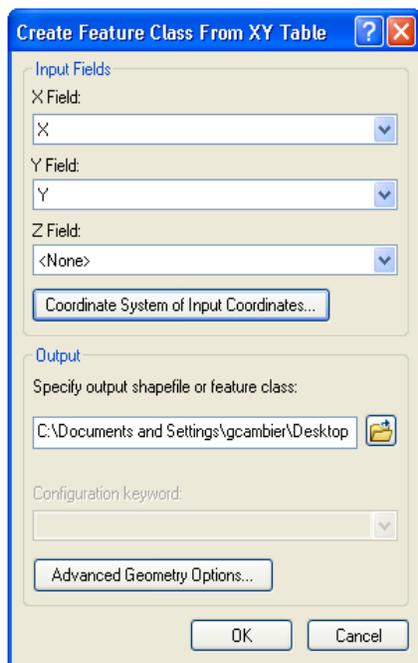
8. Géostatistiques et modélisation bidimensionnelle

8.1. Création du sommet des couches géologiques

8.1.2. Importation des données

Etape 1

Les valeurs de profondeur de chacune des couches géologiques, précédemment encodées manuellement, constituent les données primaires à partir desquelles le modèle géologique est construit. Ces données sont exportées dans le logiciel ArcGIS 10.3 selon la méthode suivante : dans ArcCatalog, naviguer jusqu'au fichier Access (.mdb) > cliquer droit sur la table forage (TForage) > Create Feature Class > From XY Table (une fenêtre s'ouvre – voir Figure 38 – pour spécifier les champs X et Y ainsi que le système de coordonnées ² et le dossier de destination du futur shapefile en cours de création) > OK. Le nouveau shapefile de données “points” est créé et peut ensuite être affiché dans ArcMap. L'ouverture de la table d'attributs du shapefile montre que l'ensemble des champs de la table Access TForage correspond bel et bien aux champs de cette table d'attributs et, par conséquent, que les données ont été correctement importées dans le SIG.



² Cliquer sur « Coordinate System of Input Coordinates » > une nouvelle fenêtre s'ouvre, continuer en appuyant sur « Select... » > naviguer dans le dossier « Geographic Coordinate Systems » > Europe > choisir le fichier nommé « Belge 1972 » d'extension .prj > Add > OK. Le système de projection d'un ensemble de couche peut à tout moment être précisé ou modifié dans ArcMap en faisant clic droit sur « Layers » > Properties > onglet « Coordinate System ».

Figure 38. Fenêtre « Create Feature Class From XY Table » pour l'importation et la projection de la base de données stratigraphiques sous ArcGIS 10.0.

Etape 2 :

À présent importées et correctement projetées, ces données discrètes vont faire l'objet de calculs géostatistiques d'interpolation spatiale afin de produire des données surfaciques. Les données de profondeur des formations, dans un premier temps, associées à des forages éparpillés sur le territoire de la Région bruxelloise, sont interpolées par la méthode dite de « Natural Neighbour »³ afin de produire des données non plus éparpillées mais continues. Il s'agit donc d'une modélisation bidimensionnelle à la suite de laquelle des données lithostratigraphiques sont disponibles pour n'importe quelle localisation XY de la zone modélisée. Les données de profondeur des unités géologiques sont interpolées indépendamment pour chaque couche géologique, générant dès lors une série de surfaces raster spatialement continues et représentant les limites entre couches.

8.1.2. Création des « layers »

Etape 3 :

À cette fin, chacune des unités géologiques à modéliser doit correspondre à un « layer » particulier. Par définition, sous ArcGIS, un « layer » est une référence à une source de données, en l'occurrence le shapefile XYTForage, qui définit quelles données et comment ces données doivent être symbolisées. Dans notre cas, ces « layers » constituent en quelques sortes des copies identiques du shapefile XYTForage se distinguant les unes des autres par les données considérées au sein de la BDD. Cette étape de création de layer est indispensable afin de n'utiliser que les données effectivement nécessaires. Par exemple, le « layer » de la Formation de Lede sera paramétré pour ne représenter et symboliser que les données de profondeur des sables de la Formation de Lede parmi l'entièreté des données constituant le shapefile XYTForage. L'interpolation spatiale ultérieure appliquée sur ce layer ne prendra en considération que les données de forage relatives à la Formation de Lede pour finalement obtenir la surface supérieure (le toit) de cette formation.

Pour créer le « layer » d'une unité géologique à modéliser : naviguer dans ArcCatalog jusqu'au shapefile XYTForage > clic droit > Create Layer > choisir le dossier de destination et nommer le layer (par exemple « Lede ») > Save.

Etape 4 :

³ L'annexe 1 fournie lors du projet Hydrobrux et portait la référence : Annexe1_Comparaison_avec_le_modeleDOV.pdf. Ce dossier technique reprend l'analyse comparative de 6 techniques d'interpolation appliquées aux données verticales du sous-sol de la RBC. L'interpolation Natural Neighbour a fait l'objet d'un consensus des différentes parties travaillant sur le projet Hydrobrux.

De retour dans ArcMap, l'importation de ce « layer » et l'ouverture de sa table d'attributs montrent bien qu'il s'agit d'une copie (ou une référence) du shapefile XYTForage qui regroupe par conséquent toutes les données relatives aussi bien qu'à la Formation de Lede qu'à toutes les autres formations géologiques. Pour que le layer « Lede » n'affiche que les données géologiques relatives à la Formation de Lede, il faut paramétrer une « Definition Query ». Pour ce faire, cliquer droit sur le layer > Properties > Onglet « Definition Query » > dans la zone de texte, introduire le texte qui suit (figure 39) :

« NOT "X" = 0 AND NOT "Lede" = 0 AND "X" > 140000 AND "X" <160000 AND "Y" >160000 AND "Y" <180000 AND "Q_de_Lede" <2 ».

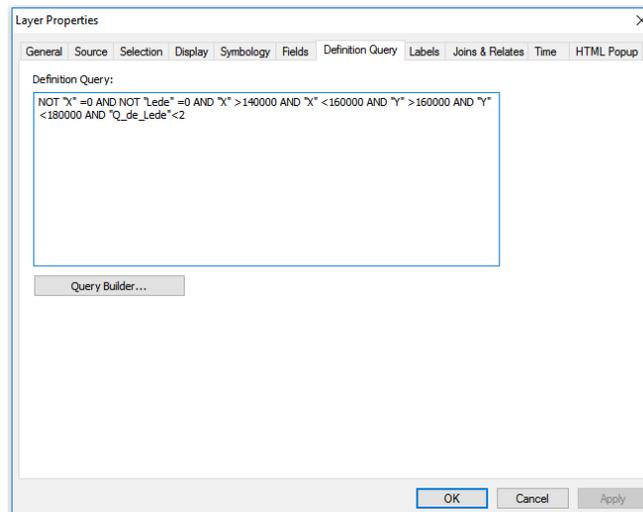


Figure 39. Fenêtre « Layer Properties », onglet « Definition Query » pour le paramétrage des requêtes d'un layer sous ArcGIS

10.3.

La première partie de la requête (NOT "X" = 0) permet d'éliminer les points qui n'ont pas lieu d'exister. Ces points sont issus d'une mauvaise manipulation dans la table initiale Access et se retrouvent parfois dans le shapefile général XYTForage. La deuxième partie de cette requête (NOT "Lede" = 0) permet de n'afficher que les données effectivement relatives à la Formation de Lede et de les prendre en compte pour l'interpolation spatiale visant à modéliser la surface supérieure de la formation. Dans le cas où cette requête n'était pas précisée, le layer « Lede » contiendrait un point signalant la présence, totalement erronée, de la Formation de Lede à une altitude de 0 m et sur une épaisseur nulle, pour chacun des forages où il n'a pas été détecté. Ceci fausserait par la suite l'interpolation spatiale.

La troisième partie concerne la délimitation géographique de la zone d'étude étendue reprise dans le cadre du projet Brustrati3D par la requête "X" > 140000 AND "X" <160000 AND "Y" >160000 AND "Y" <180000.

La quatrième partie de la requête permet de ne pas intégrer les données (quel qu'elles soient) qui ne sont pas pertinentes et portant un facteur de qualité égale à 2 pour chaque couche géologique. Ce facteur est

présent pour tous les nouveaux points et pour ceux lors des contrôles de recoupement entre les couches qui présentaient de facto un problème d'interprétation.

Cet exemple s'applique exclusivement au layer de la couche géologique de la Formation de Lede. La Definition Query doit dès lors être adaptée aux autres formations. Par exemple, le texte encodé pour le layer de la Formation de Lede sera donc le suivant : « NOT "X" = 0 AND NOT "Lede" = 0 AND "X" > 140000 AND "X" <160000 AND "Y" >160000 AND "Y" <180000 AND "Q_de_Lede" <2 ».

8.1.3. Interpolation spatiale des données de forage par Natural Neighbour

L'étape suivante dans l'élaboration du modèle consiste à créer des surfaces raster, représentant les surfaces supérieures des unités géologiques, à partir de l'interpolation spatiale des données spécifiées au sein des layer. Le choix de la méthode d'interpolation s'est basé sur différents critères qui nous ont menés à employer la méthode dite de Natural Neighbour (NN). D'un point de vue historique premièrement, la méthodologie de modélisation développée durant le projet Brussels Urban Geology et réutilisée pour le projet Hydrobrux, utilisait l'Inverse Distance Weighting (IDW) pour ses bonnes performances et ses résultats similaires au krigeage. Néanmoins, une analyse pertinente et comparative de 6 techniques d'interpolation reprenant l'IDW, le krigeage, le Natural Neighbour, Local polynomial, Tension spline et Radia Basis Function (choix réalisé lors du projet Hydrobrux) a permis de déterminer que la technique Natural Neighbour offrait des avantages d'utilisation (rapidité nécessitant un court temps d'exécution, de reproductibilité et de pertinence des résultats obtenus) et donnait des résultats meilleurs comparés à l'IDW. La technique d'interpolation par NN fût utilisée dans le cadre des projets Hydrobrux et Hydroland et maintenue dans le cadre du projet Hydroland. Sachant que le modèle géologique serait en permanence mis à jour (avec par exemple les nouvelles données de forage), le temps réduit d'exécution et la facilité d'utilisation de la technique, même avec un très grand nombre de points en entrée ont été des critères importants afin de générer fréquemment et efficacement les surfaces géostatistiques. Par ailleurs, la NN est préférée au krigeage pour l'économie de temps (à l'inverse du krigeage, pas d'analyse exploratoire et modélisation de variogramme requis au sein d'un autre logiciel comme Surfer) et pour les résultats similaires que la méthode produit (pas de « bull's eye effect » et surfaces douces).

Etape 5 :

Pour l'interpolation des données, aller dans ArcMap, ouvrir ArcToolbox et naviguer dans « Spatial Analyst Tools » > Interpolation > choisir l'interpolation souhaitée comme NN > une fenêtre s'ouvre (figure 40) pour paramétrer l'interpolation. Les 4 champs à compléter sont :

- « Input point features » pour indiquer l'emplacement des données à interpoler (dans cet exemple, choisir le layer « Lede » qui ne contient que les données des forages ayant atteint et/ou traversé la Formation de Lede).
- « Z value field » pour indiquer le champ de la table d'attributs contenant les points à interpoler (en l'occurrence le champ « som_lede » reprenant les données de profondeurs de la surface supérieure de la Formation de Lede).
- « Output raster » pour préciser le nom (en l'occurrence « lede ») et le dossier de destination du fichier raster en cours de création.
- le « Output cell size » ou taille des pixels (ou encore résolution) du raster dont la valeur à mentionner est 10 pour déterminer la définition des pixels utilisés.

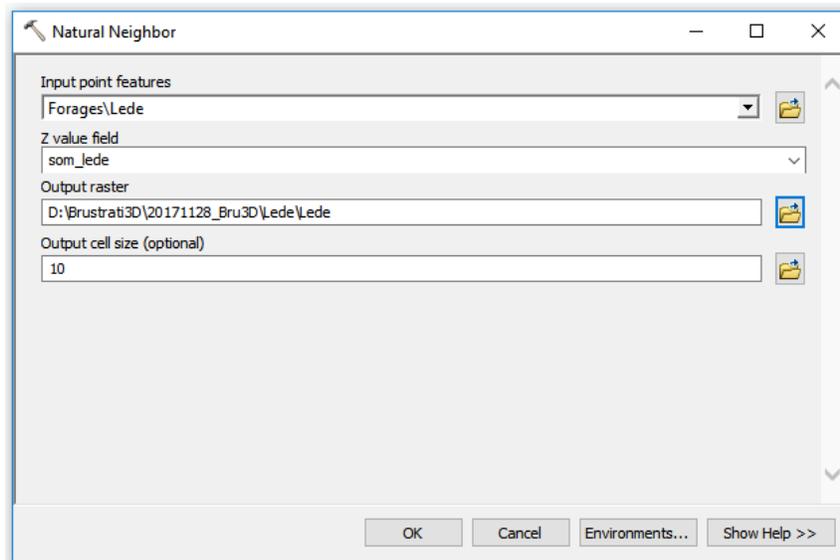


Figure 40. Fenêtre « Natural Neighbour » pour l'interpolation spatiale utilisée dans le cadre du projet Brustrati3D des données de forage relatives (dans cet exemple) à la Formation de Lede sous ArcGIS 10.3.

La figure 40 est sensiblement différente selon la méthode utilisée mais il n'en demeure pas moins qu'il faut mentionner de façon similaire les champs d'input, d'output et de valeur en Z. La méthode d'interpolation spatiale sélectionnée est répétée pour l'ensemble des couches géologiques à modéliser que l'on importe ensuite dans ArcMap. La figure 41 représente le raster de la Formation de Lede obtenu avec la technique d'interpolation « Natural Neighbour ». Il s'agit de la surface supérieure du membre, faiblement inclinée vers le nord, dont la profondeur évolue entre une altitude de 115 m au sud (rouge vif) à -26 m au nord (verte). Les 1485 forages ayant atteint la Formation de Lede et ayant été effectivement employés par l'interpolation sont représentés.

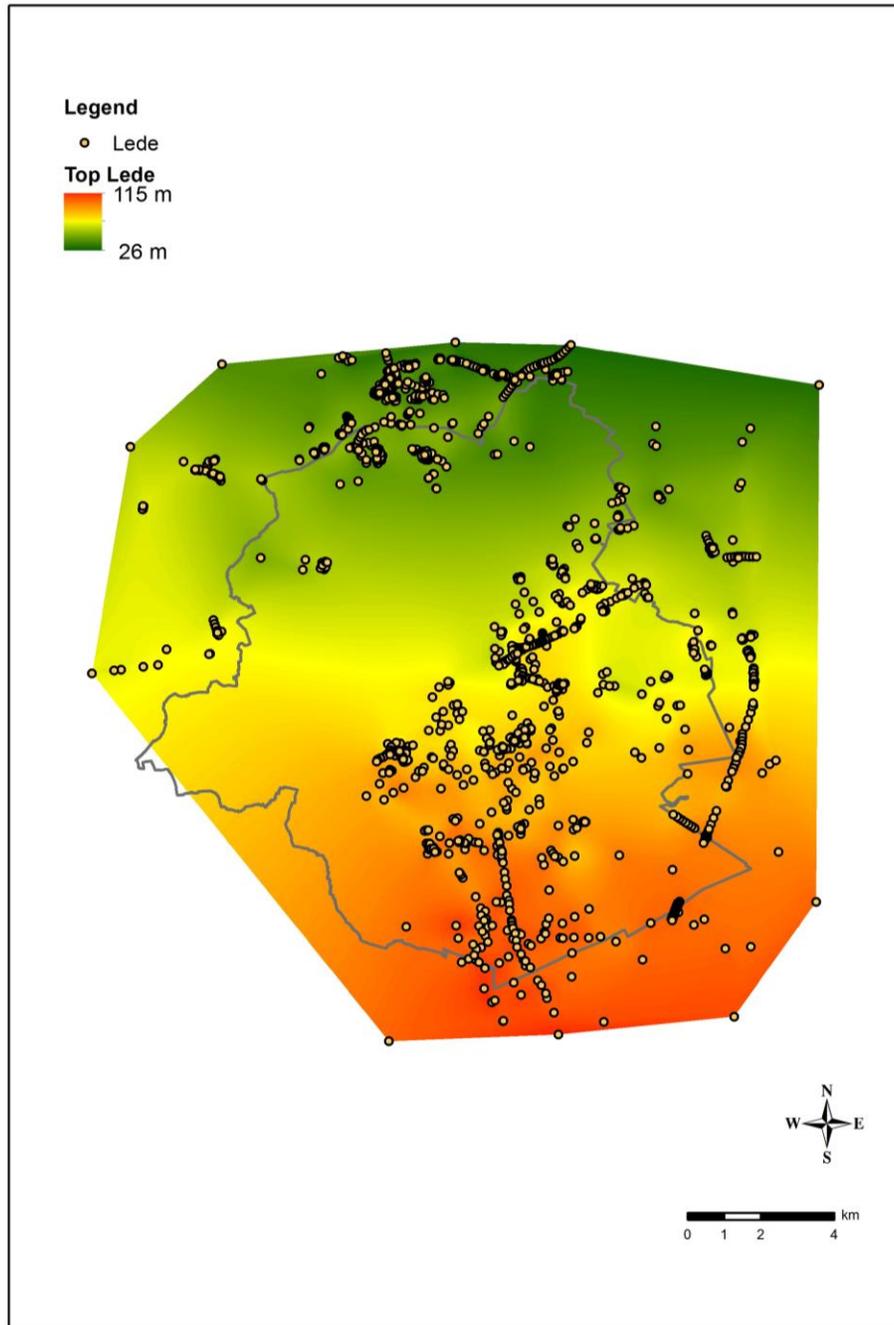


Figure 41. Surface supérieure (raster) de la Formation de Lede obtenue par interpolation spatiale (Natural Neighbour) à partir des données de forage.

Toutefois, l'extension spatiale en 2D de cette couche géologique est fautive puisque la formation apparaît sur toute la Région alors que la couche géologique des sables de la Formation de Lede n'est pas présente partout et ce plus spécifiquement dans les vallées en RBC. Une correction de cette surface est dès lors nécessaire pour éliminer les zones où la présence de cette formation géologique n'est pas reconnue. Il

s'agit évidemment d'une seule couche géologique qui est illustrée ici mais le processus décrit précédemment est à extrapoler à l'ensemble des couches présentes dans le modèle étudié.

8.2. Création de la base des couches géologiques

8.2.1. Réalisation des surfaces basales des différentes couches géologiques

L'idée de générer la surface basale de certaines couches géologiques est importante du point de vue géologique car la base d'une couche ou d'une unité représente une surface temporelle formée par des processus géologiques reliés directement au dépôt de cette unité. La surface sommitale est le résultat de plusieurs processus géologiques ultérieurs au dépôt qui peuvent modifier la morphologie de cette surface et qui ne sont pas liés au dépôt de la couche (Gunnink et al., 2013). Par processus géologique, il faut entendre des processus tels que l'érosion mécanique, physique ou chimique de la roche, l'impact de la diagenèse, la formation de sols (reconnus comme paléosols) qui vont altérer, modifier ou transformer la roche et donc modifier la morphologie de la surface de dépôt.

Il est donc intéressant de réaliser les surfaces basales de toutes les couches géologiques. Les surfaces basales sont relativement simples à modéliser lorsqu'elles sont présentes en profondeur dans un modèle tabulaire non recoupé par les vallées alluviales du Quaternaire.

Cela permet de proposer dans le modèle stratigraphique et géologique 3D, le volume et l'allure réelle (ou en tout cas interpolée sur base des données disponibles au moment du rapport) des bases et des sommets de l'ensemble des couches géologiques.

Le principe est identique à celui suivi précédemment pour la surface supérieure des couches, néanmoins la méthodologie suivie est expliquée en détail ci-après pour la base de la Formation de Lede.

Cette complexité géologique nécessite de calculer la surface basale de la Formation de Lede en suivant une procédure expliquée ci-dessous.

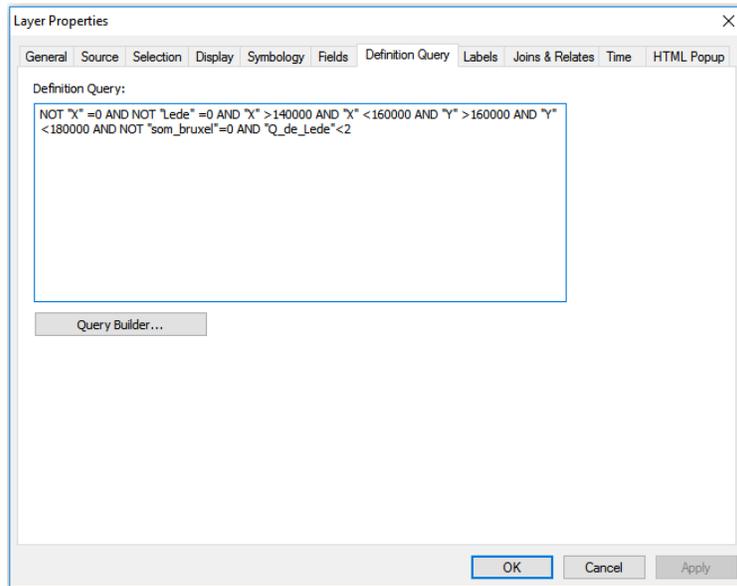


Figure 42. Fenêtre « Layer Properties », onglet « Definition Query » pour le paramétrage des requêtes d'un layer sous ArcGIS 10.3.

Il convient de mentionner successivement dans le champ les formules suivantes permettant de définir cette requête reprise dans la figure 42 :

d'une part, Not "X"=0 qui est la formule utilisée pour les requêtes des surfaces sommitales,

d'autre part, NOT "Lede"=0 AND NOT "som_bruzel"=0 qui indique que la Formation de Lede est présent et que le forage traverse la base de la Formation de Lede pour toucher une couche géologique plus profonde comme celle de la Formation de Bruxelles. Le « Q_de_Lede <2 » est à nouveau pris pour exclure les données qui ne seraient pas fiables pour la couche de Lede. L'altitude (Z value) du sommet de la Formation de Bruxelles aura toujours une valeur si le forage traverse entièrement la Formation de Lede même si la Formation de Bruxelles n'est pas présente. C'est le cas dans la partie ouest de la carte où la Formation de Lede se superpose à la Formation de Gent ce qui implique que l'épaisseur de la Formation de Bruxelles sera égale à zéro mais l'altitude sera celle du sommet de la Formation de Gent. C'est la logique d'attribution des valeurs en Z de la banque de données.

Le reste de la requête sert à définir l'extension spatiale en X et Y de la zone d'étude du projet. Le système est sensiblement plus simple que précédemment car on effectue le travail du haut vers le bas de la série pour chaque couche (donc chaque membre individuellement aussi) ce qui laisse entrevoir moins de possibilités de recoupe à chaque étape.

La réalisation de l'interpolation de la surface basale correspond donc bien à la base de la Formation de Lede à partir des forages sélectionnés faisant suite aux multiples requêtes de la figure 51. La méthodologie suivie pour obtenir l'interpolation est identique à celle décrite dans le chapitre 8.1.3. La

seule différence qu'il convient de noter c'est qu'on doit utiliser les cotes absolues du sommet de la couche géologique sous-jacente à la Formation de Lede soit celles de la Formation de Bruxelles qui sont disponibles dans la banque de données. Par conséquent, le champs « sommet de la formation » renseigne systématiquement la cote du sommet de la couche géologique sous-jacente. On obtient donc un raster (interpolation) représentant la base de la Formation de Lede.

Il convient de noter à ce stade que la base de la Formation de Diest n'est pas réalisée car nous ne possédons que deux forages recoupant la base de cette formation qui est d'ailleurs reconnue essentiellement en-dehors de la zone d'étude du projet Brustrati3D.

Dans ce travail, le Quaternaire est la seule couche géologique pour laquelle la surface basale est calculée sur base de l'épaisseur du Quaternaire fournie à partir de l'ensemble des données géologiques qui recourent l'entièreté du Quaternaire (Figure 43).

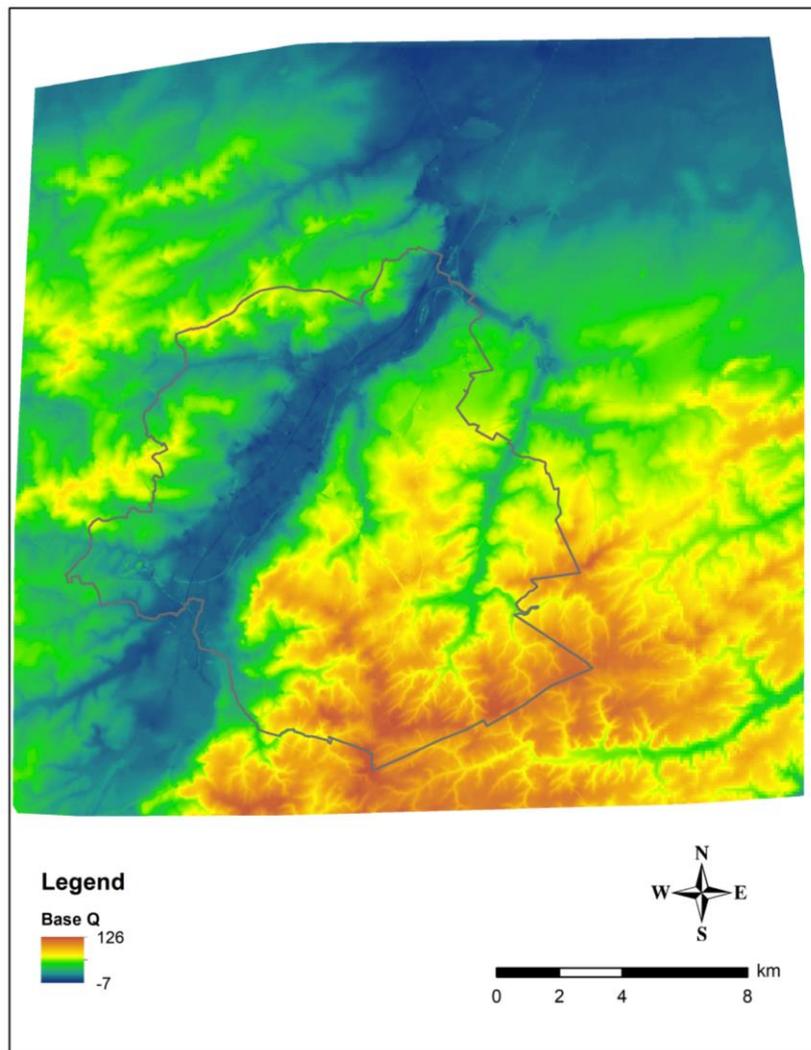


Figure 43 : Modèle de la base du Quaternaire calculée à partir en soustrayant de l'altitude l'épaisseur du Quaternaire fournie par l'ensemble des points recoupant la couche du Quaternaire.

Le modèle assume par défaut que la couche du Quaternaire ne possède pas de surface basale plate mais bien érosive et variant latéralement rapidement. Le calcul de cette surface basale du Quaternaire permet d'éviter deux erreurs systématiques d'une part dans les vallées fluviales et d'autre part sur les sommets des collines. Ces erreurs systématiques sont liées à tous les endroits où les forages ne permettent pas de contrôle précis.

Dans le cas des vallées fluviales et en l'absence de forages recoupant le cœur de la vallée fluviale, le risque est d'avoir la base du Quaternaire au niveau de la valeur en altitude de la topographie locale. En calculant la base de la couche du Quaternaire par l'épaisseur, on va créer une surface basale du Quaternaire qui mimera en profondeur la morphologie de la surface topographique de la plaine alluviale. Ceci permet d'éviter que la base de la couche du Quaternaire ne se situe au-niveau de la topographie actuelle et ne crée une erreur. Si des forages permettent de recouper le Quaternaire dans cette partie alluviale alors évidemment, il n'y aura pas d'erreur puisqu'il existe un point de contrôle.

Dans le deuxième cas sur le sommet des collines pour lesquelles on ne possède pas de forage recoupant la séquence du Quaternaire, le calcul de la position de la base du Quaternaire donnerait une surestimation de l'épaisseur attendue du Quaternaire localement. Pour éviter ce deuxième problème, le calcul de la surface basale du Quaternaire via l'épaisseur de celle-ci permettra de fournir une valeur plus réaliste.

8.3. Corrections réalisées sur le toit des couches géologiques

8.3.1. Correction liée à l'influence de la base du Quaternaire sur l'extension spatiale du sommet de la couche géologique

De manière générale, l'interpolation spatiale des données de forage sous le logiciel ArcGIS génère des surfaces, au format raster, recouvrant l'entièreté de la zone modélisée (cfr § 8.1.). Les unités géologiques spatialement discontinues (telles que celles produites par l'érosion fluviale) sont donc représentées incorrectement en 2 dimensions selon une signification géologique aberrante. Par exemple, la surface supérieure de la Formation de Lede apparaît au-dessus du Quaternaire, donc au-dessus de la topographie, dans les vallées où ces sédiments ont été normalement érodés et transportés. Une partie importante de la construction du modèle 3D consiste donc à corriger l'extension spatiale de chaque couche géologique sur la base de leur recoupement avec la topographie (réalisé précédemment pour les projets Hydrobrux et Hydroland) et actuellement avec la base du Quaternaire (projet Brustrati3D). Cette correction de base est réalisée de manière indépendante pour chaque formation et de la manière suivante : dans ArcMap, ouvrir ArcToolbox et naviguer dans « Spatial Analyst Tools » > Map Algebra > Raster Calculator > une fenêtre s'ouvre (Figure 44) > naviguer parmi les rasters produits précédemment pour choisir les couches

appropriées et générer un calcul de soustraction du modèle de la base du Quaternaire (« Base Q ») par le raster reprenant le sommet de la Formation de Lede⁴ (« Top layers\Top Lede »). Spécifier également le nom (en l'occurrence « BQ-Top_Lede ») et la localisation du nouveau raster en cours de création dans le champ réservé.

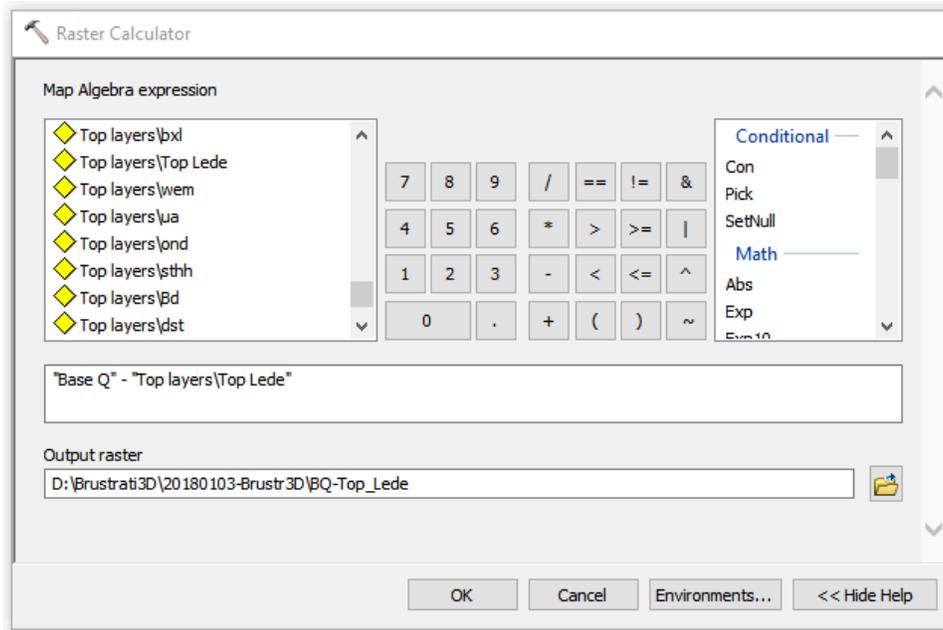


Figure 44. Fenêtre « Raster Calculator » pour effectuer la correction topographique appliquée à la Formation de Lede. Le choix sera donc basé sur le type d'interpolation choisie et sur le nom de la couche géologique associée.

Le nouveau raster produit est par conséquent composé de pixels dont la valeur est le résultat de l'altitude de la base du Quaternaire dont est soustraite l'altitude du sommet de la Formation de Lede (Figure 45). Les valeurs négatives de ces pixels reflètent des zones où la base du Quaternaire est plus basse en altitude que le sommet de la Formation de Lede. Il s'agit généralement de zones de vallées où la Formation de Lede est érodée et où il n'existe donc plus. Les valeurs positives de ces pixels reflètent des régions où la base du Quaternaire est effectivement plus haut en altitude que le sommet de la Formation de Lede qui, pour ces régions, existe bel et bien. Cette technique évite de créer des artefacts dans les zones de vallées en sous-estimant ou surestimant l'épaisseur de la couverture Quaternaire. Cette nouvelle procédure qui n'utilise plus la topographie comme dans les projets précédents mais bien la base du Quaternaire va permettre d'avoir une meilleure extension spatiale des couches géologiques. Le calcul de la base du Quaternaire dépendra donc du nombre de données recoupant le Quaternaire sur l'ensemble de la zone étudiée. La modélisation 3D et les interpolations qui en découlent seront améliorées à chaque fois que de nouvelles données du sous-sol viendront augmenter la densité de points disponibles. Cette densité est

⁴ La correction actuelle de l'extension spatiale des formations expliquée dans le présent rapport est obtenue en recoupant les unités géologiques avec, en RBC, les données LIDAR disponibles et avec les données SRTM en dehors de la RBC en utilisant le fichier combiné LIDAR10-SRTM80.

largement satisfaisante en RBC bien que plusieurs zones présentent des densités de données très faibles tout comme hors de la RBC ce qui induit *de facto* des artefacts dans la recoupe des surfaces interpolées.

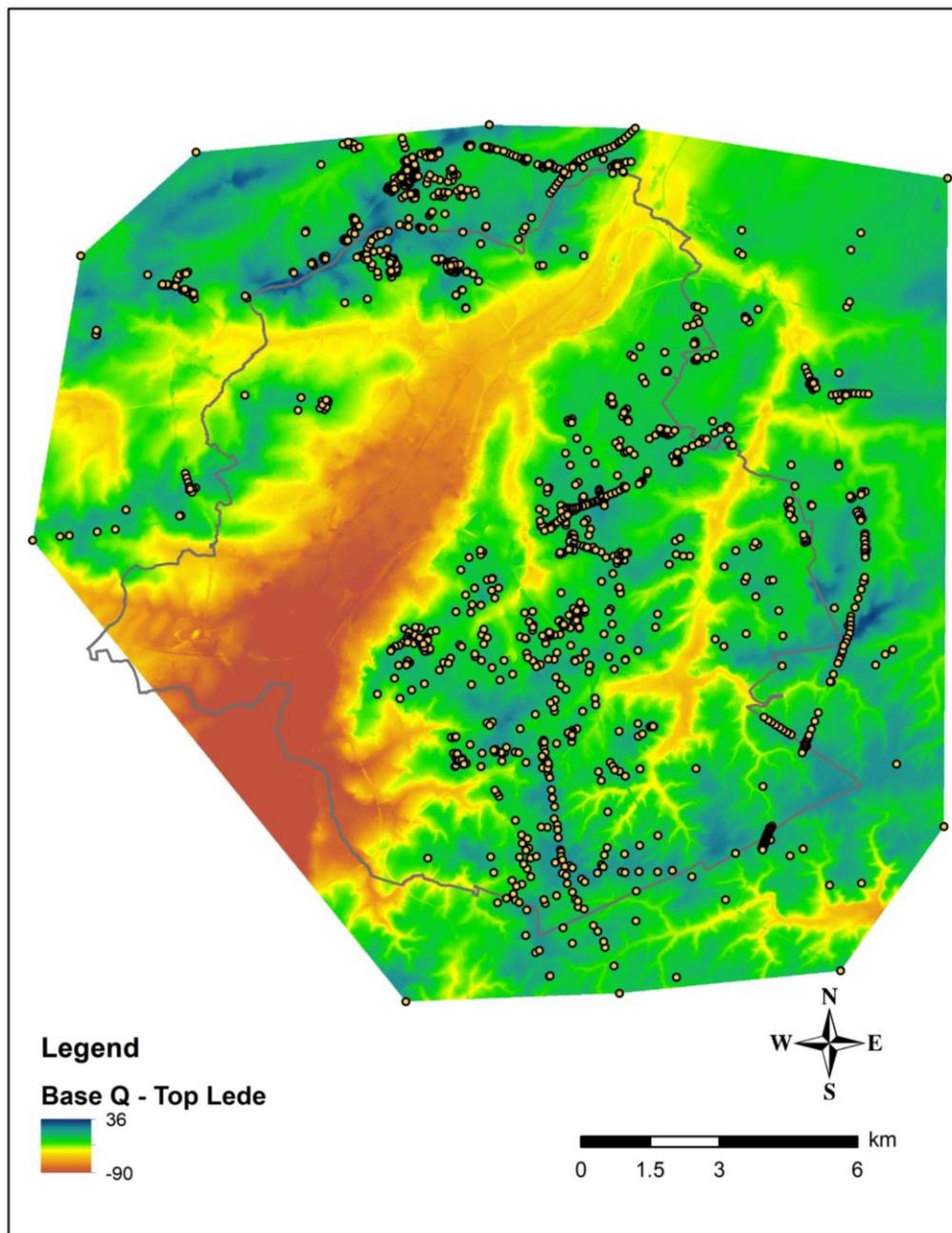


Figure 45 : Raster produit par le calcul suivant : altitude de la Base du Quaternaire – altitude du sommet de la Formation de Lede. Les valeurs négatives indiquent des zones où l'altitude de la surface interpolée correspondant au sommet de la Formation de Lede se trouve au-dessus de la base du Quaternaire typiquement dans les vallées ce qui implique que la surface interpolée n'existe pas et les valeurs positives où la surface interpolée se situe bien au-dessous de la base du Quaternaire donc typiquement dans les collines.

L'étape suivante consiste à extraire la zone où la Formation de Lede est bien présente de manière à former un masque. Une fois produit, ce masque sera appliqué à la surface raster nommée « Top Lede », produite initialement par Natural Neighbour, pour obtenir la surface supérieure de la couche géologique corrigée spatialement. Afin de créer ce masque, naviguer à nouveau dans ArcToolbox jusqu'à ouvrir le Raster Calculator. Indiquer la formule telle que « Base Q – Top Lede > 0 » ainsi que le nom et la destination du futur raster. Ce calcul produit un nouveau raster reprenant exclusivement les données positives du raster précédent (Figure 46). Ce raster ne contient plus que des cellules de deux valeurs différentes, soit 0 lorsque la Formation de Lede n'existe pas, soit 1 lorsqu'elle existe puisque présente sous la base du Quaternaire. La délimitation entre la zone 0 et la zone 1 correspond donc à une ligne le long de laquelle l'altitude de la base du Quaternaire égale en permanence l'altitude du sommet de la Formation de Lede.

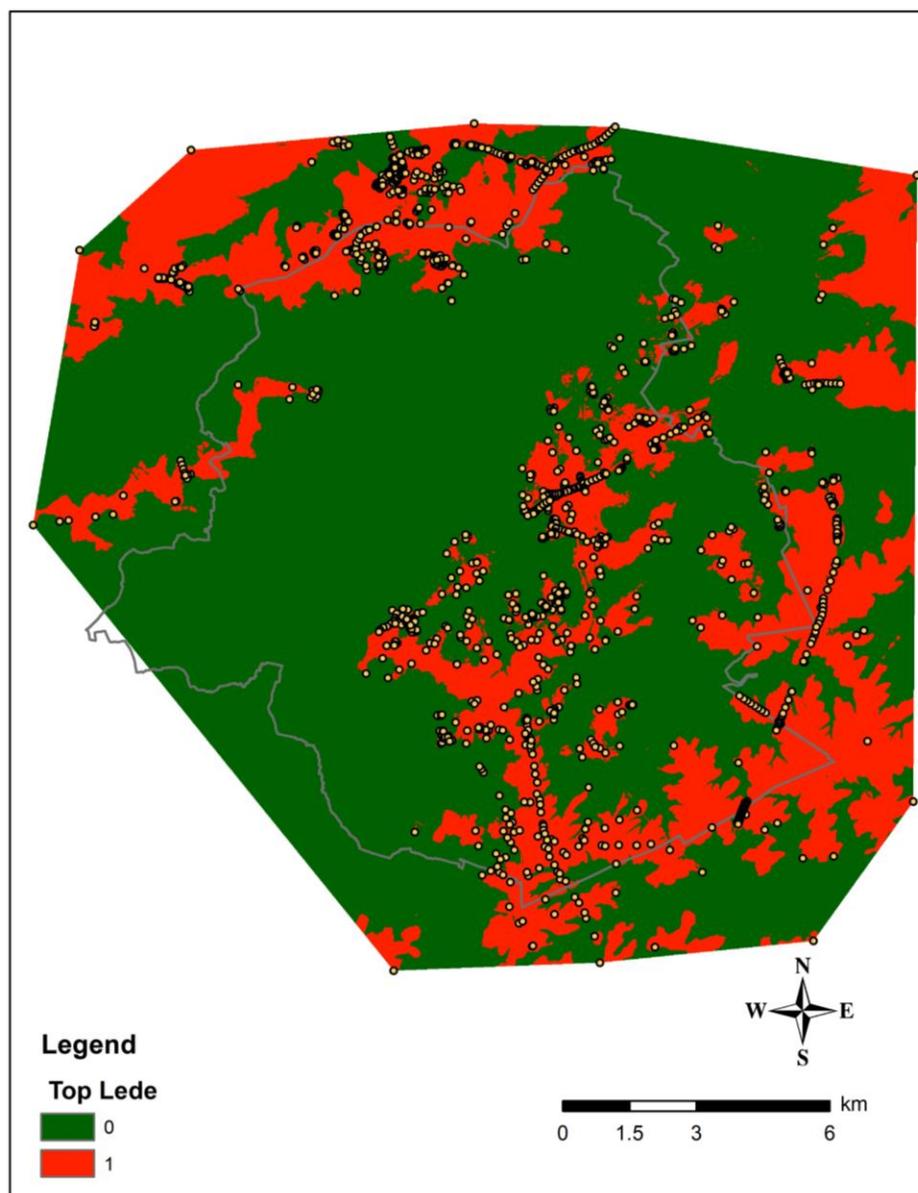


Figure 46. Le raster produit par le calcul suivant : (altitude de la base du Quaternaire – altitude du sommet de la surface interpolée correspondant au sommet de la Formation de Lede) > 0. Les pixels de valeur 0 indiquent les régions où la Formation de Lede se trouve au-dessus de la base du Quaternaire, les pixels de valeur 1 où le sommet de la Formation de Lede est en-dessous.

La zone de valeur 1 va constituer le masque à appliquer au raster de la formation analysée. Afin de créer ce masque, il faut (1) convertir le raster en un shapefile polygone (Figure 47), (2) faire une requête (dans Properties du shapefile, aller dans Definition query et mentionner « Gridcode > 0 ») permettant de sélectionner l'ensemble des polygones ayant une valeur égale à 1 et créer un layer à partir de cette sélection (Figure 46).

En détails :

- (1) ArcMap > ArcToolbox > Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon > une fenêtre s'ouvre (Figure 47) : introduire le raster à convertir en polygone ainsi que le nom et la destination du shapefile en cours de création. Nous l'avons nommé ici « masque_lede » (Figure 48).

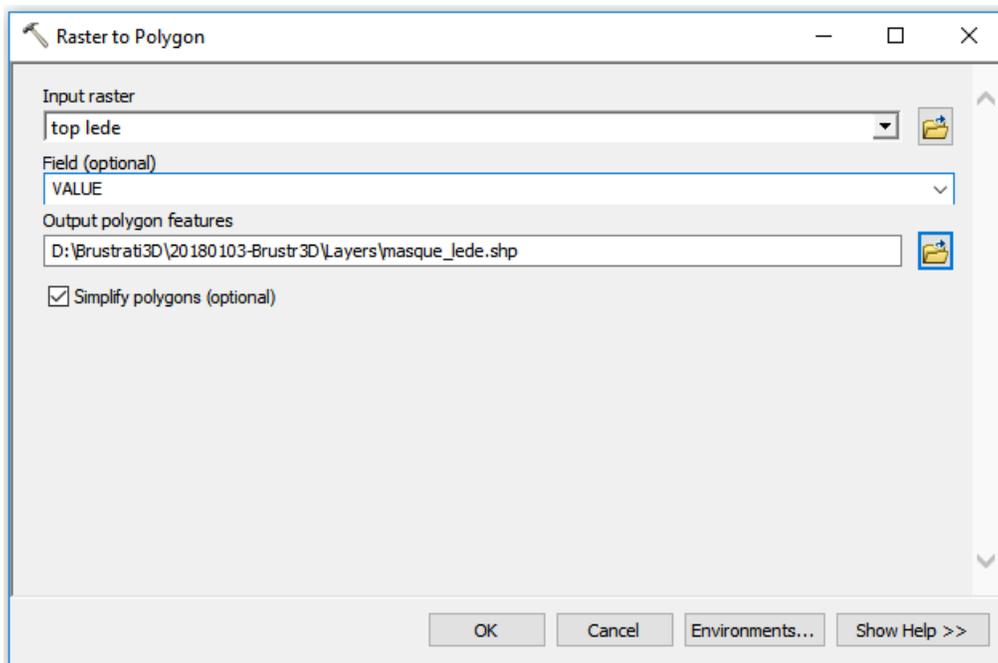


Figure 47. Fenêtre « Raster to Polygon » utilisée pour convertir un raster en shapefile avec polygones.

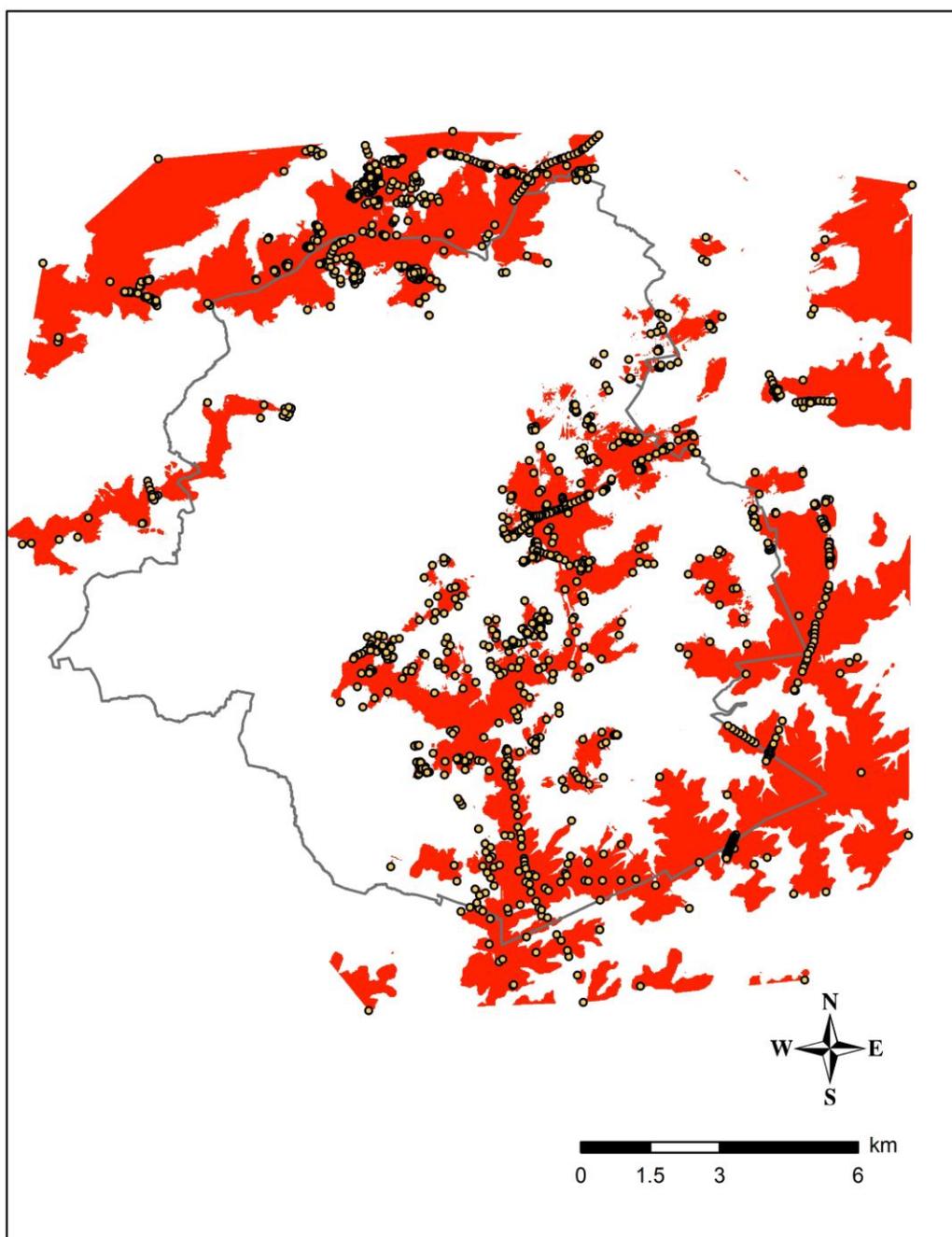


Figure 48. Représentation du shapefile de type polygone montrant les zones géographiques où la Formation de Lede est effectivement présente et confirmée par des données (forages ou autres). Ce polygone sera ensuite appliqué en tant que masque sur le raster de la Formation de Lede afin d'en corriger l'extension spatiale 2D.

Afin d'appliquer le masque au raster représentant la surface supérieure de la Formation de Lede, naviguer à nouveau dans ArcMap vers ArcToolbox, sélectionner Spatial Analyst Tools puis Extraction puis « Extract by mask », choisir pour « Input raster or feature mask data » le shapefile polygone nommé « masque_Lede », pour « Input raster » le raster de départ de la Formation de Lede et enfin le nom du

raster de sortie avec la destination du nouveau raster dans « Output raster » comme mentionné ci-dessous « Lede_OK » (Figure 49).

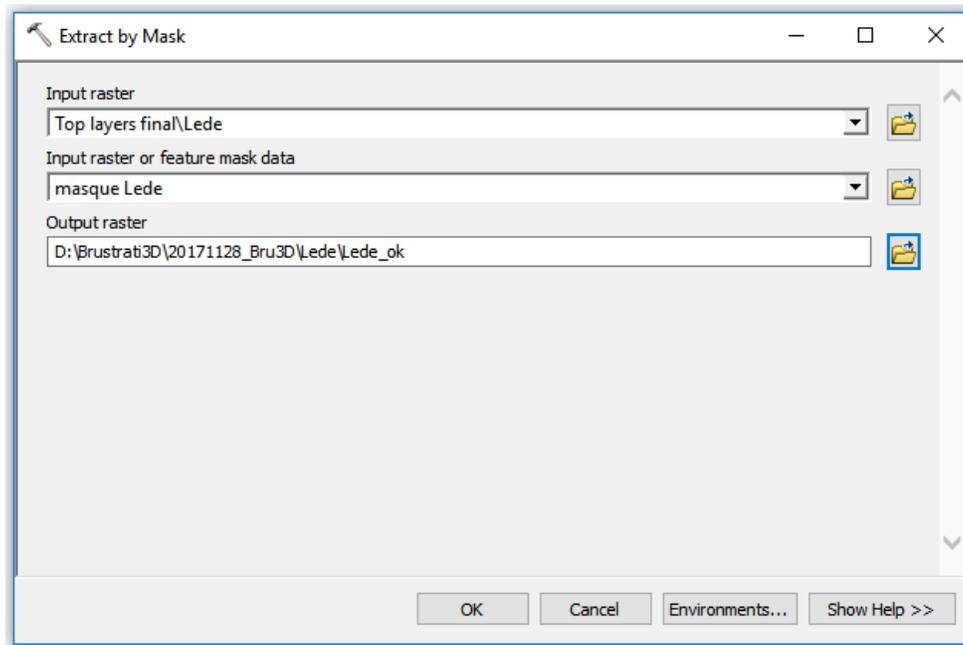


Figure 49. Fenêtre dans « Extract by Mask » utilisée pour appliquer le shapefile polygone (masque Grandglise) en tant que masque sur le raster du Membre de Grandglise.

Le résultat est visible en figure 50. Il s'agit du raster représentant la surface supérieure de la Formation de Lede dont l'extension, initialement fautive puisqu'elle recouvrait tout le territoire de la zone d'étude, a été corrigée en appliquant un masque issu du recoupement du sommet de la Formation de Lede par rapport à la base du Quaternaire.

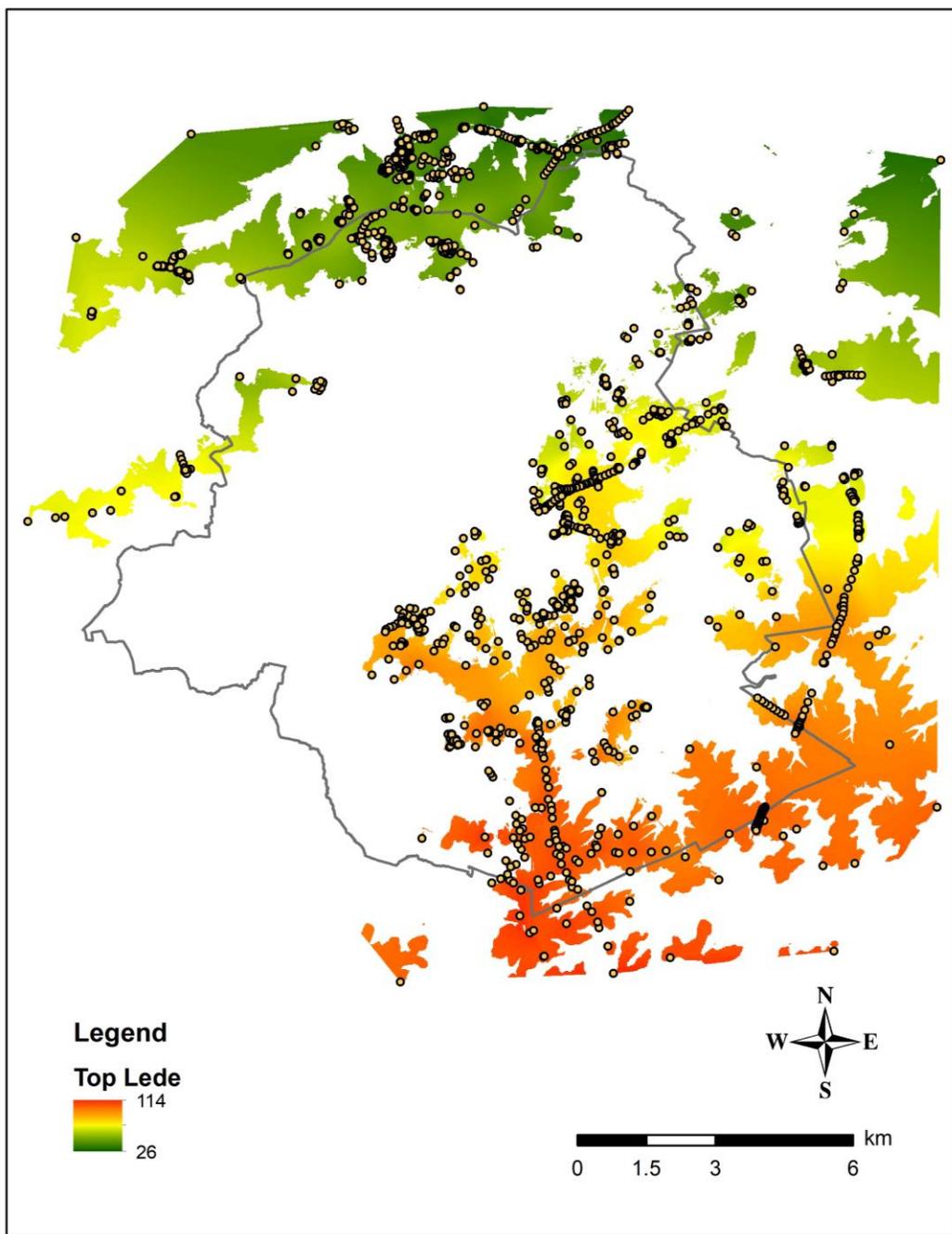


Figure 50. Raster de la surface supérieure de la Formation de Lede après correction montrant l’extension spatiale en 2D.

8.3.2. Correction liée à la présence du sommet de la couche dans les vallées (la pente joignant le sommet à la base)

Pour poursuivre l’amélioration du sommet des couches géologiques, il est nécessaire d’utiliser le raster correspondant à la base de chaque couche géologique (excepté celle du Quaternaire) obtenue dans le paragraphe 8.2. Ce raster image n’est pas le raster final de la base de chaque couche géologique car il faut

remplacer les valeurs calculées pour la base de la couche géologique, en l'occurrence dans l'exemple la base de la Formation de Lede, par celles obtenues pour la base du Quaternaire (étape de création d'un masque selon la même procédure expliquée dans les paragraphes précédents mais appliquée ici sur le nouveau raster, cfr pages 83-87). Cette étape doit être réalisée pour chaque couche géologique en créant un nouveau raster qui aura l'extension de la base de la couche géologique avec les valeurs de celles de la base du Quaternaire. On combine alors ce « nouveau raster » avec celui correspondant au sommet de la Formation de Lede en utilisant les valeurs du sommet de la Formation de Lede si le sommet de la Formation de Lede est présente et en utilisant les valeurs de ce « nouveau raster » si le sommet de la Formation de Lede n'est pas présent.

8.3.3. Correction liée à l'extension d'une couche par estimation à partir du dernier point connu de cette couche

L'étape suivante concerne une nouvelle correction relative à l'extension spatiale de la couche de Lede (mais valable pour chacune des couches géologiques présentes dans le modèle).

Premièrement, il est nécessaire de dessiner un polygone manuellement pour déterminer la zone où la formation étudiée n'est plus présente dans l'interprétation des forages. La technique est cependant difficile à reproduire d'un chercheur à l'autre. Néanmoins, en l'absence d'autres données, il est proposé de tracer la limite du polygone à la moitié de la distance séparant le dernier forage contenant la couche géologique étudiée et le premier ne la contenant plus. Cette technique utilisée dans les projets Hydrobrux et Hydroland est modifiée dans ce projet pour calculer de manière plus automatique la valeur de présence d'une couche.

L'extension de la Formation de Lede se fait avec une requête qui est détaillée ci-dessous mais dont le but est d'identifier dans une zone donnée la présence de Lede ou les zones contenant des forages recoupant une couche présente au-dessus de Lede et en-dessous de Lede mais ne comportant pas Lede. La Formation de Lede est supposée présente mais elle n'est pas reconnue par les forages existants. Cette deuxième partie doit donc être sélectionnée pour être exclue de l'extension spatiale.

La requête est définie selon la formule de la figure 51 que l'on détaille ci-dessous :

- NOT « X » = 0 -> il faut sélectionner la zone d'étude en excluant les points qui auraient des coordonnées nulles et donc situées en dehors de la zone d'étude
- AND « X » > 140000 AND « X » < 160000 AND « Y » > 160000 AND « Y » < 180000 -> et sélectionner tous les points qui se situe dans la zone d'étude du projet en fournissant les coordonnées géographiques des coins en X et Y

- AND (NOT « LEDE = 0 » OR -> et il ne faut pas sélectionner les forages pour lesquelles la couche de Lede n'est pas présente ou
- (NOT « som_bruxel » = 0 AND NOT (« Wemmel » = 0 AND « Ursel_et_A » = 0 AND « Onderdale » =0 AND « Sint_Huib » = 0 AND « Bolderberg » = 0 AND « Diest » = 0))) ne pas prendre les forages qui ne recoupent pas une couche située en-dessous de la Formation de Lede (représentée par une valeur différente de 0 pour le sommet de la +Formation de Bruxelles) et ne pas prendre les forages qui ne recouperaient pas une des couches géologiques présentes au-dessus de la Formation de Lede,
- AND « Q_de_Lede » < 2 et on ne prend pas en compte les données qui ont un facteur de qualité égal à 2 c'est à dire ceux pour lesquels plusieurs problèmes dans l'identification de la couche de la Formation de Lede.

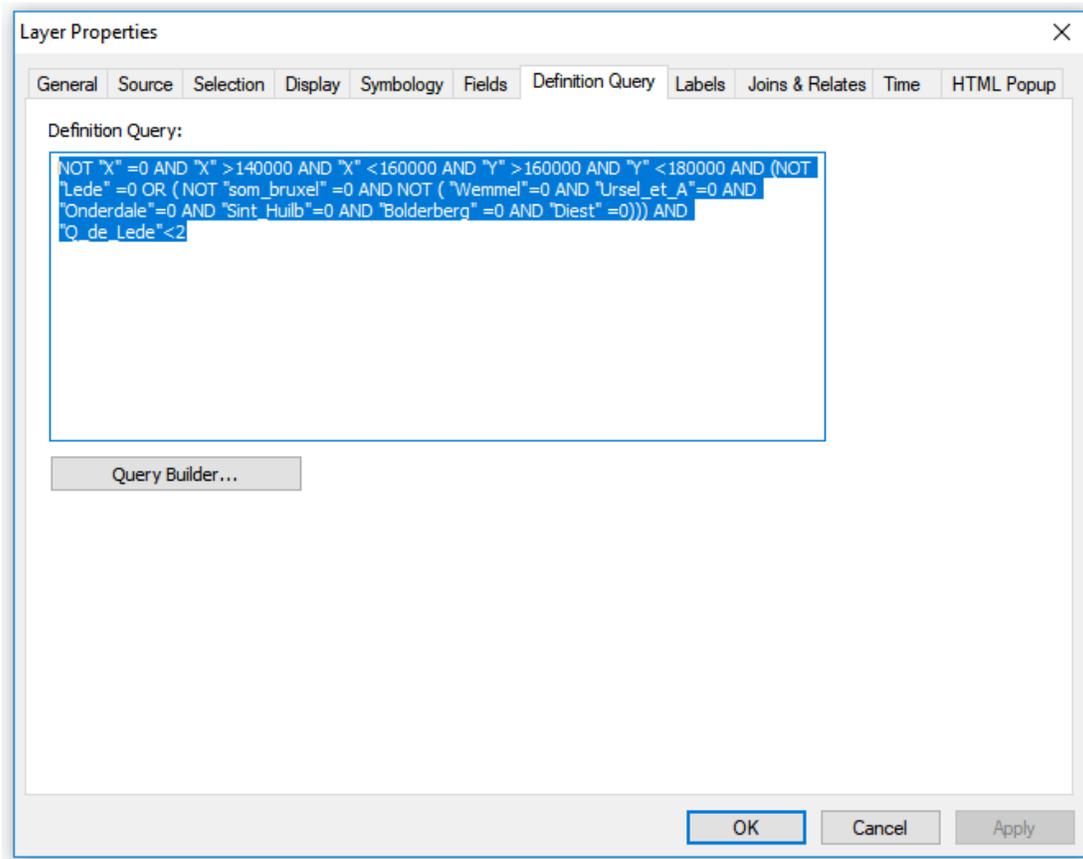
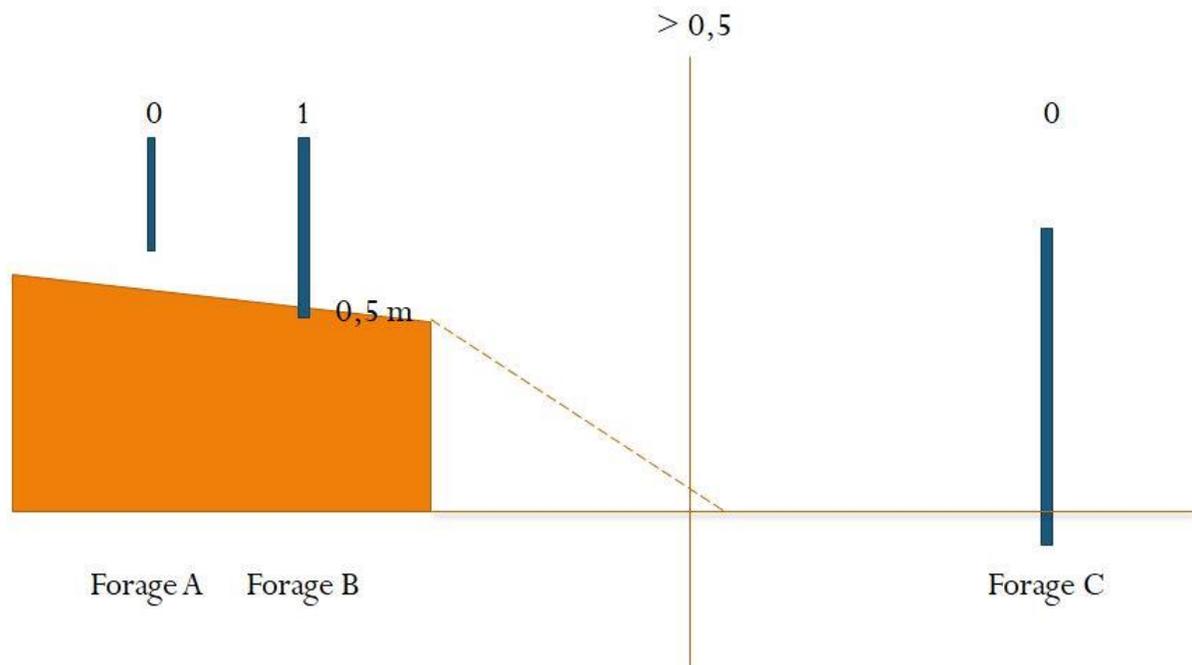


Figure 51. Extrait d'une requête pour déterminer l'extension spatiale de la Formation de Lede par le biais de la formule reprise dans la définition de la requête.

L'étape précédente permet de sélectionner les points nécessaires et pertinents de la Formation de Lede qui seront utilisés pour créer un masque de la zone à conserver (idem au niveau de la technique pour créer un

masque) en appliquant une nouvelle formule qui est la « Présence (0 ou 1) + 0,2*Épaisseur > 0,5 ». Ce système permet de se rapprocher de la limite d'extension de la fin d'une couche.

La valeur de 0,5 est située à la mi-distance entre la donnée (forage) pour lequel on connaît en partie ou totalement l'épaisseur de la Formation de Lede et le point (forage) ne contenant plus la Formation de Lede. Si l'épaisseur est faible parce qu'aucun forage ne recoupe la Formation de Lede complètement. Prenons l'exemple 1 (Figure 52) où un forage rentre de 0,5 m dans la Formation de Lede, l'équation donne une valeur de 1,1 ce qui amènera à avoir la fin de la couche à proximité immédiate de la moitié de la distance entre les deux points. Dans l'exemple 2 (Figure 53), un forage recoupe l'entièreté de la Formation de Lede pour une épaisseur de 6 m, le résultat de l'équation est de 2,2 ce qui signifie que la fin de la couche représentant la Formation de Lede sera coupée à une distance plus proche du forage où la couche n'est plus reconnue. Cette méthode de correction est automatique et évite l'aspect plus arbitraire d'une découpe manuelle à la médiane entre les deux forages telle qu'appliquée précédemment dans le cadre des projets de Hydrobrux et Hydroland. Cette technique permet donc d'affiner d'une meilleure façon la présence cartographique d'une couche géologique.



$$\text{Présence (0 ou 1) + 0.2 (Épaisseur) > 0,5}$$

donc si E = 0,5 m alors la valeur est de 1,1

On place la limite de la fin de la couche à environ 6/11 de la distance séparant le forage B et le forage C

Figure 52. Exemple de cas où le forage B touche la Formation de Lede sur 0,5 m d'épaisseur. Le forage C ne mentionne plus la Formation de Lede. L'équation empirique est donc utilisée pour calculer automatiquement la fin de la couche à environ 6/11 de la distance séparant le forage B du forage C.

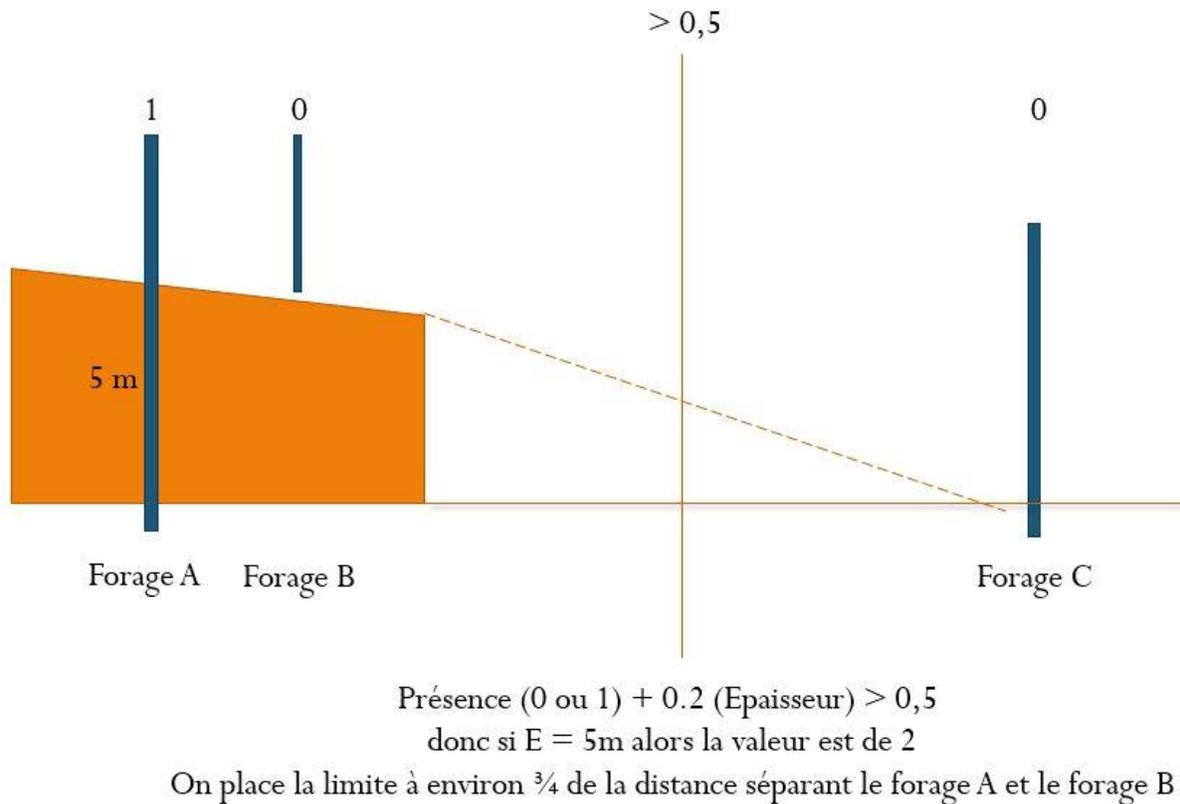


Figure 53. Exemple de cas où le forage A recoupe la Formation de Lede sur 5 m d'épaisseur. Le forage C ne mentionne plus la Formation de Lede. L'équation empirique est donc utilisée pour calculer automatiquement la fin de la couche à environ trois-quarts de la distance séparant le forage A du forage C.

Par ailleurs, il convient de garder à l'esprit que la reconnaissance ou l'identification d'une couche spécifique n'est pas possible ou difficile pour des épaisseurs inférieures à 50 cm. C'est le cas pour les essais de pénétrations mais également dans les forages destructifs qui ne fournissent des échantillons que tous les mètres. Un découpage plus automatique, sans passer par le choix arbitraire de couper à la médiane, permet d'avoir une meilleure estimation de l'extension de cette couche entre une zone sans la couche et les derniers points de forages montrant la présence de cette couche.

Les tests ont montré que le facteur de correction choisi à 0,2 est arbitraire mais il convient au mieux puisqu'il permet de couper à une certaine distance qui dépendra de l'épaisseur de la couche observée. Dans l'exemple 1, la distance sera à 6/11 donc quasi juste après la médiane. Dans le 2^e exemple, la valeur sera à $\frac{3}{4}$ de la distance entre les deux. Si on prend une épaisseur de couche de 20 m, la limite de la couche sera à 9/10 de la distance entre les deux points. La fin de la couche se situe donc sur une droite entre un

point confirmant la présence d'une couche et le point suivant où la couche n'est plus présente. Les calculs produits par cette équation sont introduits dans une nouvelle colonne de la table attributaire du shapefile XYTForage pour chaque couche géologique (Figure 54). On voit la colonne avec le résultat de l'équation pour les points sélectionnés sur base de la requête précédente sur la couche géologique (ici en l'occurrence pour la Formation de Lede). Pour chaque couche géologique, on retrouvera la valeur de l'équation mais pour une sélection de points qui dépendra de la requête et donc satisfaisant à la requête pour la couche envisagée. Les points sont donc différents d'une couche géologique à l'autre. L'ensemble de ces points permettra d'obtenir un polygone où la Formation de Lede n'est pas présente et ce polygone sera à éliminer de l'interpolation (ou raster) généré pour la Formation de Lede.

The screenshot shows a table window with the following columns: Q_de_Pal, Q_de_Heers, ext_dst, ext_bd, ext_sthh, ext_ond, ext_u_a, ext_wern, ext_id, ext_bxl, ext_vl, ext_mer, ext_tlt, ext_ka, ext_km, ext_kstm, ext_hgr, ext_hlin, ext_cre. The 'ext_id' column contains numerical values for each row, with an orange arrow pointing to it. The table is titled 'Lede extend' and shows 6669 selected rows.

Figure 54. Extrait de la table attributaire du shapefile XYTForage comportant la colonne relative à l'extension de la Formation de Lede dont les chiffres représentent la valeur de l'équation calculée pour chaque point sélectionné lors de la requête précédente.

Il faut donc procéder comme précédemment pour créer un masque (cfr § 8.3.1.) de la zone à conserver et utiliser ce dernier pour modifier l'extension spatiale de la couche interpolée. On crée un raster avec une valeur 0 pour la zone à garder et une valeur 1 si on se trouve en-dehors de la zone (càd dans la zone où la Formation de Lede n'est pas identifiée ni suspectée comme étant présente). Cette correction permet donc de limiter logiquement l'extension spatiale de la Formation de Lede à la partie confirmée par les forages et à la zone où la Formation de Lede est supposée présente mais non confirmée par des données géologiques. Cette approche est nécessaire pour corriger les limites d'extension de chaque couche géologique identifiée dans la modélisation.

8.3.4. Correction manuelle pour les couches érosives

Deuxièmement, une correction manuelle est réalisée uniquement pour les couches présentant une forte érosion à la base (chenaux) comme celles de la Formation de Diest et la Formation de Bruxelles. Cette correction est liée aux pentes des vallées où les formations de Bruxelles et Diest se situent à des altitudes inférieures à des séries stratigraphiques qui sont recoupées stratigraphiquement. La méthodologie suivie est identique à celle utilisée pour générer les masques relatifs à la base du Quaternaire (cfr § 8.3.1) mais :

- Pour la Formation de Bruxelles, la différence d'altitude est reprise ici entre le sommet de la Formation de Bruxelles et les sommets des Membres de Vlierzele, Merelbeke, la Formation de Tielt, et les Membres d'Aalbeke et de Moen.
- Pour la Formation de Diest, une procédure identique est réalisée pour calculer la différence d'altitude entre le sommet de la Formation de Diest et les sommets de la Formation de Sint-Huibrechts-Hern, tous les membres de la Formation de Maldegem et la Formation de Ledegem.

8.3.5. Correction manuelle pour les recouvrements entre des couches géologiques liées à des mauvaises interprétations géologiques

Enfin, des rasters montrant la différence d'altitude entre le sommet de la couche géologique considérée et la(es) sommet(s) de(s) couche(s) géologiques sous-jacentes les plus proches sont réalisés. En effet, l'identification de recouvrements entre des formations et/ou membres qui ne sont pas censés se croiser stratigraphiquement implique nécessairement des problèmes résiduels dans l'interprétation des forages. Ces zones résiduelles sont mineures mais ont été éliminées en suivant une procédure identique à celle relative à la création d'un masque.

Cette étape est l'aboutissement d'un gros travail en amont identique où la présence de recouvrements entre une couche géologique et celles situées stratigraphiquement en-dessous résultait de descriptions erronées et donc de mauvaises interprétations dans les forages. Cette étape indispensable sur l'ensemble du territoire a nécessité la révision de l'interprétation géologique proposée pour certains forages et dans certains cas, le coefficient de qualité est modifié en 2 pour chaque couche géologique pour lesquelles un doute persiste dans la banque de données. Par ce biais, aucun forage ou donnée n'a été supprimé, les données sont présentes dans la banque de données mais le coefficient de qualité placé à 2 évite de sélectionner ces points pour réaliser les interpolations et les corrections qui en découlent.

L'extension spatiale obtenue à l'issue de toutes les corrections décrites précédemment montre évidemment la présence de polygones de différentes tailles appartenant à la couche géologique considérée et qui sont clairement déconnectés de zones plus continues. Aucune suppression automatique de ces polygones résiduels n'a été réalisée car il nous semble impossible de déterminer si ces derniers représentent des artefacts à l'issue des différentes étapes de calculs de l'extension spatiale et de

corrections effectuées sur la couche géologique ou s'ils représentent de petites variations paléotopographiques au sein de couches fortement tabulaires ou encore de lambeaux résiduels montrant l'extension maximale de la couche étudiée. Il n'existe aucun critère objectif pour procéder à la suppression de ces derniers d'autant que ces polygones résiduels correspondent souvent à des zones pour lesquelles nous n'avons pas de forages permettant de le vérifier.

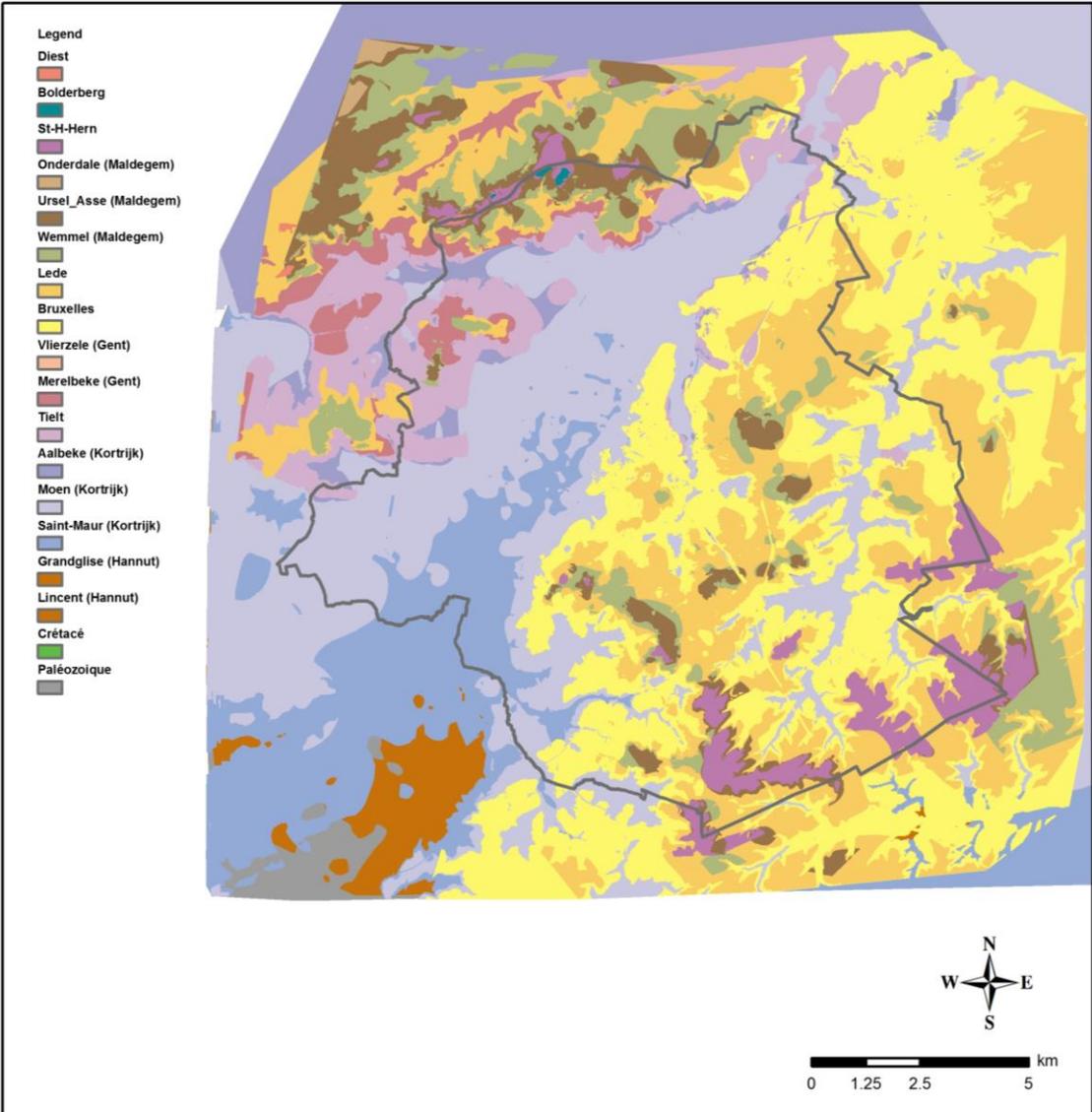
8.4. Corrections réalisées sur la base des couches géologiques

Pour déterminer la base de chaque couche, on fait le postulat que l'extension spatiale du sommet de la couche correspond à l'extension spatiale de la base de la couche. Il convient donc de réaliser un masque de l'extension spatiale du sommet de la couche et qui sera appliquée à l'interpolation ou sur le raster généré pour représenter la base de la Formation de Lede (cfr § 8.2.1., expliquant le calcul de la base de Lede simplement et sans autres modifications ultérieures).

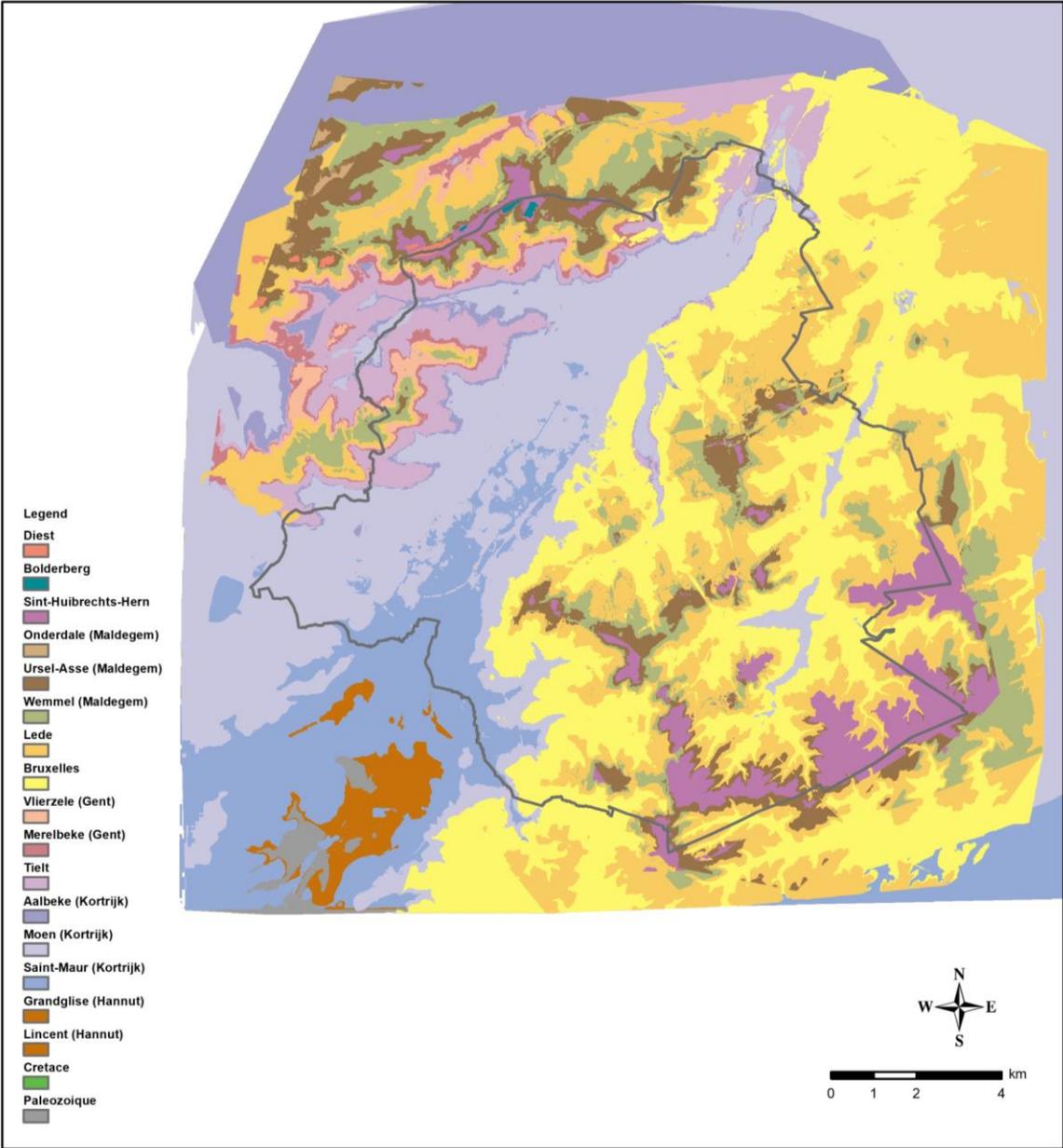
8.5. Modèle synthétique rassemblant les interpolations réalisées pour les sommets des couches géologiques en 2D.

Ce modèle est la synthèse et la superposition en 2D de l'ensemble des couches géologiques reprises dans le modèle stratigraphique de la Région de Bruxelles-Capitale. Ce modèle (Figure 55) est réalisé avec les rasters produits pour le sommet de chaque couche géologique présentes dans la Région de Bruxelles-Capitale. On a en quelque sorte une carte géologique brute et non corrigée basée sur les rasters. La même superposition peut être obtenue avec les rasters de la base de chaque couche géologique (excepté celles, dans le cas présent, de la Formation de Diest et du Paléozoïque). Le modèle est donc sensiblement identique si on doit reprendre uniquement la base de chaque couche géologique. Les limites rectilignes de certaines couches sont abruptes parce qu'elles sont liées à l'interpolation par Natural Neighbour. Les points sélectionnés en-dehors de la Région de Bruxelles-Capitale permettent d'avoir une interpolation cohérente et présente sur l'ensemble du territoire de la RBC.

A



B



C

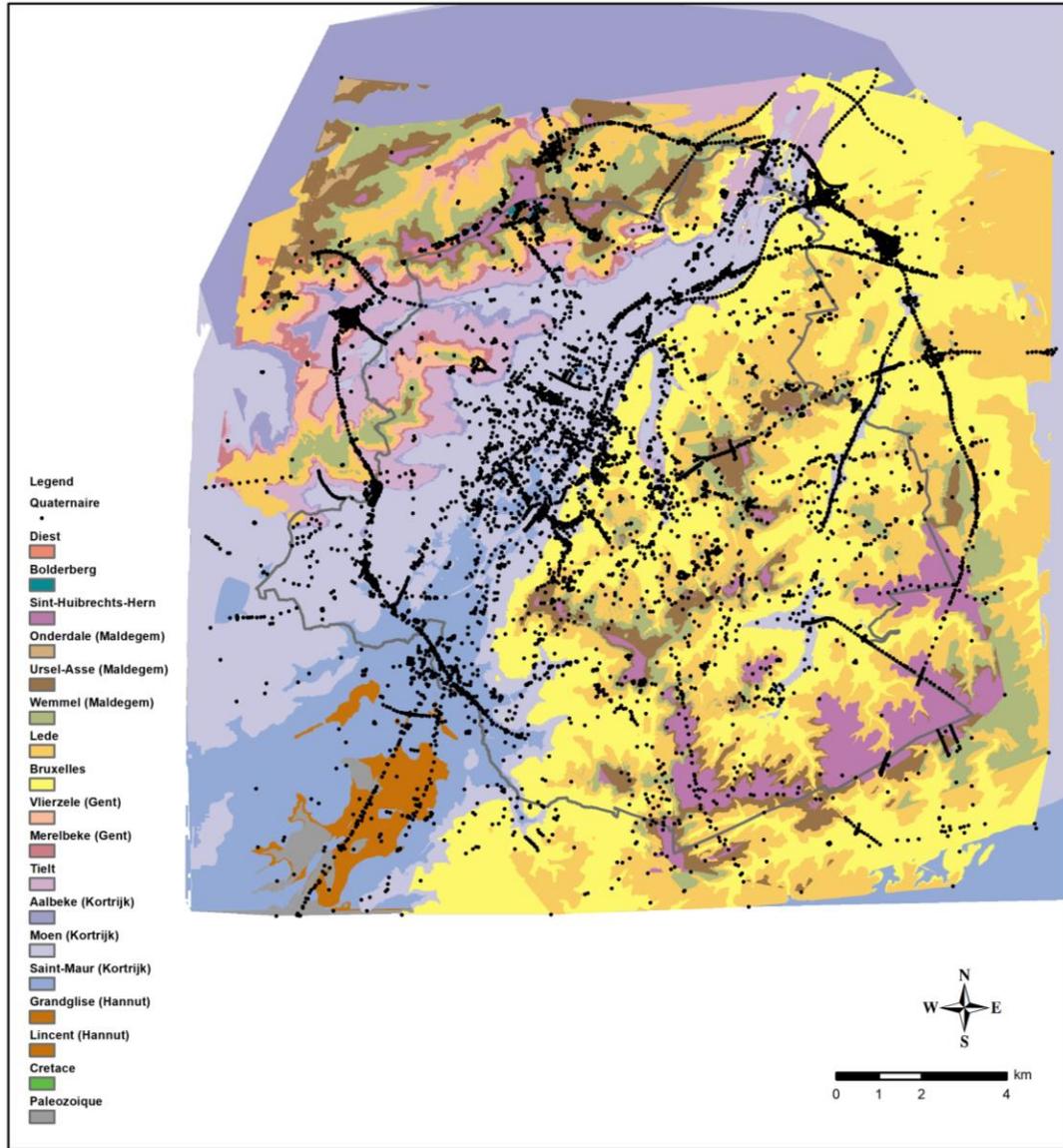


Figure 55. A. Superposition des surfaces interpolées après correction de leur extension spatiale au sein de la zone d'intérêt pour le projet Brustrati3D en soustrayant la topographie. B. idem mais en soustrayant la base du Quaternaire. C. idem que B mais avec les points utilisés pour réaliser le modèle. La légende et le code couleur repris correspondent aux couleurs utilisées sur les nouvelles cartes géologiques comme celle de la Région de Bruxelles pour la carte géologique n°31 (Buffel & Matthijs, 2002).

On notera la forte différence d'extension de la Formation de Bruxelles dans les vallées alluviales du Maelbeek et de la Woluwe par exemple. Dans le nouveau modèle (Figure 55-B) qui prend en compte la base du Quaternaire, on affine bien mieux l'extension de la Formation de Bruxelles qui est bien plus présente tout comme l'extension du Membre de Moen qui affleure relativement peu et de façon discontinue. La superposition avec les points d'observations confirme la présence du Membre de Moen dans la vallée de la Woluwe (Figure 55-C) et l'extension est intimement liée aux points d'observations.

9. Construction du modèle géologique 3D

Les données stratigraphiques et les couches géologiques interpolées (surfaces raster en 2D avec extension spatiale corrigée) sont importées à partir d'ArcScene (bouton Add data du menu principal). ArcScene constitue l'application de visualisation tridimensionnelle du logiciel ArcGIS nous permettant de construire et d'afficher le modèle géologique 3D.

9.1. Représentation 3D des forages

Les données stratigraphiques (forages, piézomètres, coupes et CPT) sont représentées en trois dimensions par des bâtonnets ou « sticks » subdivisés verticalement en différentes sections de couleurs différentes. Chacune de ces sections correspond à une unité géologique particulière : sa couleur identifie la couche lithostratigraphique (par exemple l'orange pour la Formation de Lede) et sa hauteur représente l'épaisseur de la couche. Cette méthode de visualisation tridimensionnelle présente l'avantage de considérer et de représenter toutes les sources de données stratigraphiques par des colonnes lithostratigraphiques simples et facilement compréhensibles.

Afin de représenter les forages en 3D, la propriété « Extrusion » de chacune des couches importées est utilisée. Ce processus d'extrusion permet l'étirement vertical d'une forme 2D pour créer un objet 3D, en l'occurrence l'étirement vertical d'une géométrie de base de type point (les forages). L'extrusion est une méthode simple et rapide au cours de laquelle les forages, en termes d'entités ponctuelles, sont extrudés verticalement pour créer une symbologie tridimensionnelle de ligne (ArcGIS Resource Center, 2013b).

L'exemple qui suit vise à représenter par extrusion la section des forages appartenant uniquement à la Formation de Lede. Cliquer droit sur la couche shapefile nommée « lede » > propriétés > onglet « Extrusion » > cocher la case « Extrude features in layer » > dans la zone de texte (Figure 56), il convient d'indiquer la valeur d'extrusion suivante, en l'occurrence l'épaisseur du Membre de Grandglise pour le forage considéré : « - [epa_lede] ». Remarquez le signe négatif « - » et l'expression « epa_lede » pour diriger l'extrusion vers le bas, à partir d'un point à la surface supérieure du membre, d'une valeur équivalente à l'épaisseur de ce même membre. Le processus d'extrusion permet de cette manière d'étirer un point à la surface du membre pour former une ligne droite allant du sommet du membre à sa base et reflétant par conséquent son épaisseur pour les coordonnées XY du forage correspondant.

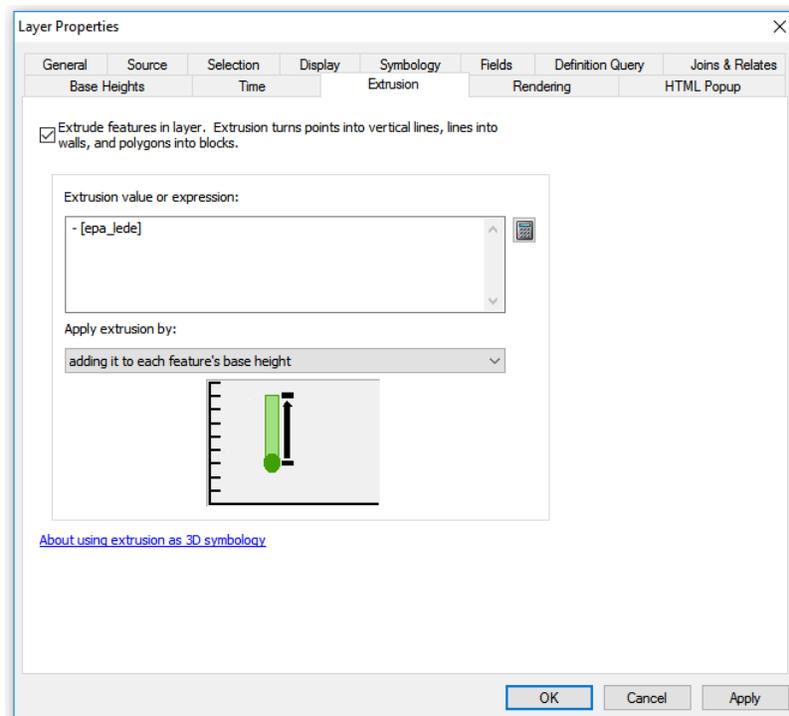


Figure 56. Fenêtre « Layer Properties », fonction « Extrusion » employée pour la représentation 3D des données de forage.

Toutefois, la couche shapefile « lede » n'est pas encore localisée dans la 3^{ème} dimension (selon l'axe des Z). Il faut donc préciser la position en profondeur de cette couche afin que les points à extruder verticalement et vers le bas soient positionnés, en l'occurrence, au sommet de la formation de Lede. Pour ce faire, toujours concernant la Formation de Lede, il convient de : cliquer droit sur la couche shapefile nommée « lede » > propriétés > onglet « Base Heights » > Elevation from surfaces et cocher Floating on a custom surface > dans la zone de texte, il convient d'introduire « le chemin amenant au layer produit pour la couche de lede » (Figure 57). Les données que nous avons choisi d'exploiter au sein de la table d'attributs sont maintenant localisées verticalement et sont référencées à la profondeur du sommet de la Formation de Lede. La technique qui utilisait le sommet de la couche [som_lede] donne exactement le même résultat mais n'a pas été utilisé ici dans les propriétés de chaque couche obtenue.

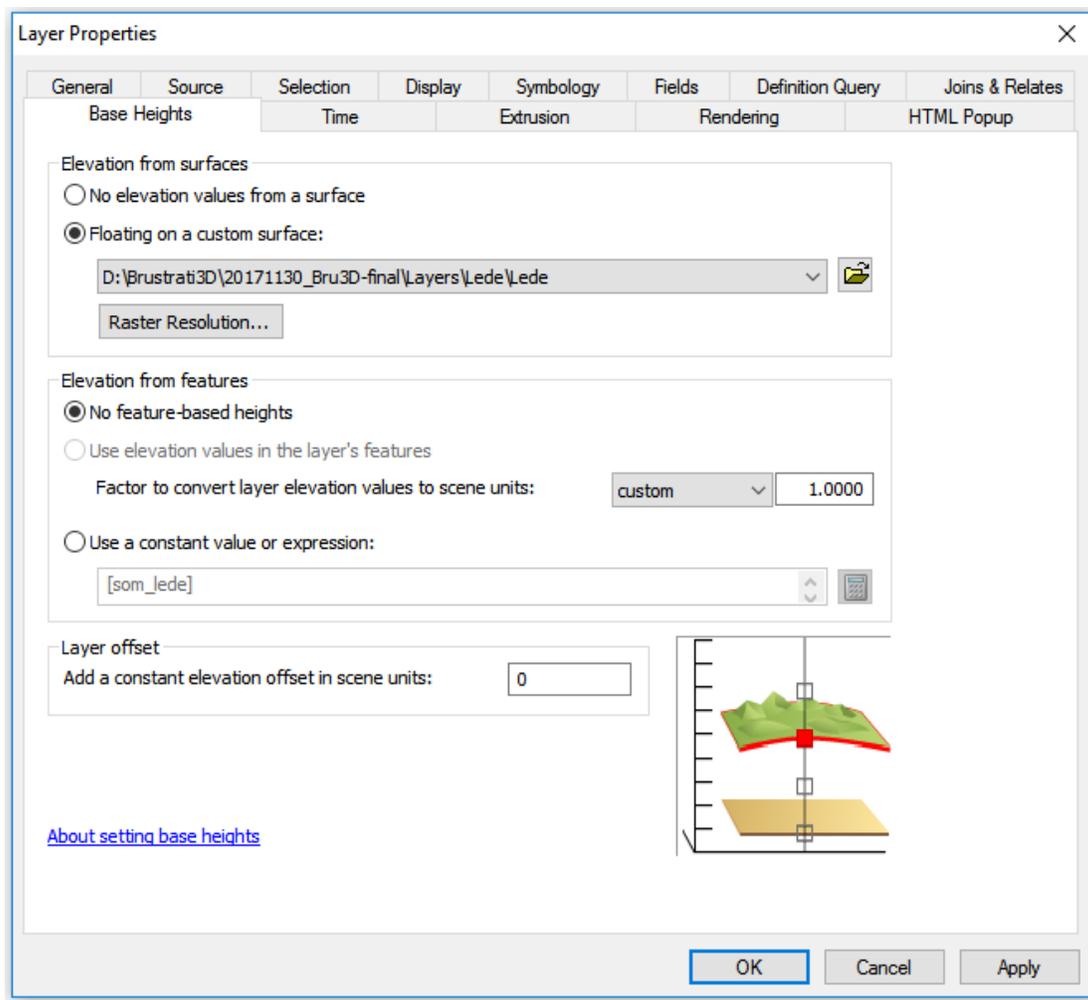


Figure 57. Fenêtre « Layer Properties », onglet « Base Heights » utilisée pour définir l'altitude de référence des données de forage à symboliser.

Cette méthodologie de représentation tridimensionnelle est ensuite répétée pour chacune des sections lithostratigraphiques des forages qui, par conséquent, sont construites segment par segment. Pour la Formation de Bruxelles qui suit celle de Lede, il s'agira de repartir d'un nouveau shapefile des forages, c'est-à-dire le layer « Bruxelles », identique en tout point à celui utilisé pour l'extrusion de la Formation de Lede, et de lui indiquer quelles données de sa table d'attributs doivent être exploitées pour représenter le segment de la Formation de Bruxelles uniquement. Il faudra préciser la position Z de la couche (le sommet de la Formation de Bruxelles) ainsi que la valeur d'extrusion, afin d'étirer le point situé au sommet de la Formation de Bruxelles verticalement et vers le bas, jusqu'à la base de la formation, d'une valeur égale à l'épaisseur de cette formation. La représentation 3D des forages est reprise en figure 58.

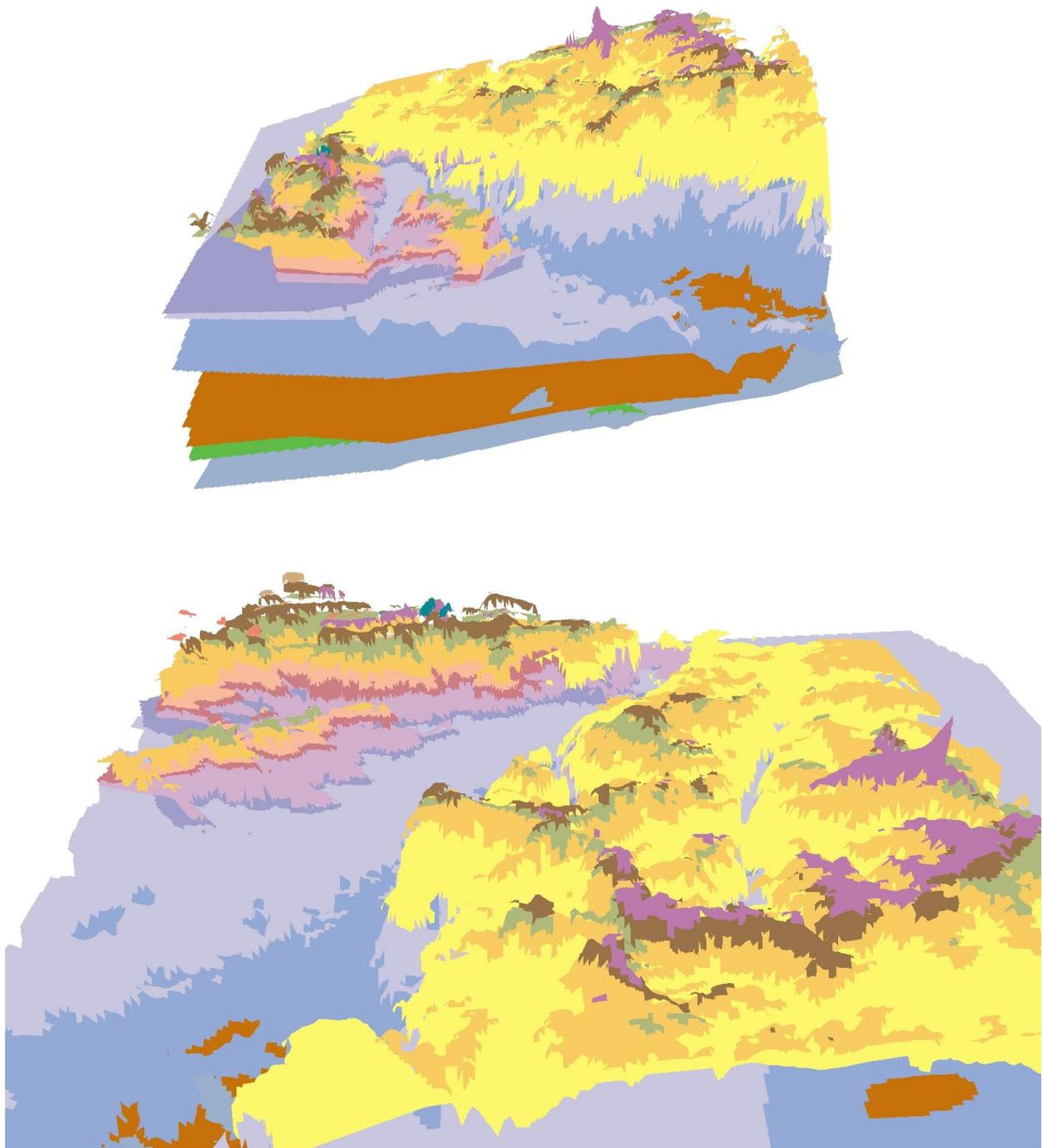


Figure. 58. Représentations 3D des forages et du LIDAR en RBC. Image du haut, vue sur la vallée de la Senne sans le remplissage Quaternaire. Image du bas, vue depuis le Sud sur les collines de Bruxelles et sur la vallée de la Senne. Exagération verticale x10.

9.2. Représentation 3D de l'ensemble des couches géologiques dans la zone d'étude

Les surfaces raster produites par interpolation des données de forage sous ArcMap sont ensuite importées une à une sous ArcScene. L'unique étape indispensable après cette importation est de positionner chaque surface raster selon l'axe Z, autrement dit de définir son référentiel d'altitude. Pour ce faire, dans ArcScene, cliquer droit sur le raster à référencer verticalement, en l'occurrence Lede > onglet « Base Heights » > cocher « Floating on a custom surface » et naviguer jusqu'à l'emplacement des données d'altitude relatives à la Formation de Lede, en l'occurrence et pour l'exemple, le raster « Lede » (figure 59). Cette étape doit être répétée pour l'ensemble des couches géologiques.

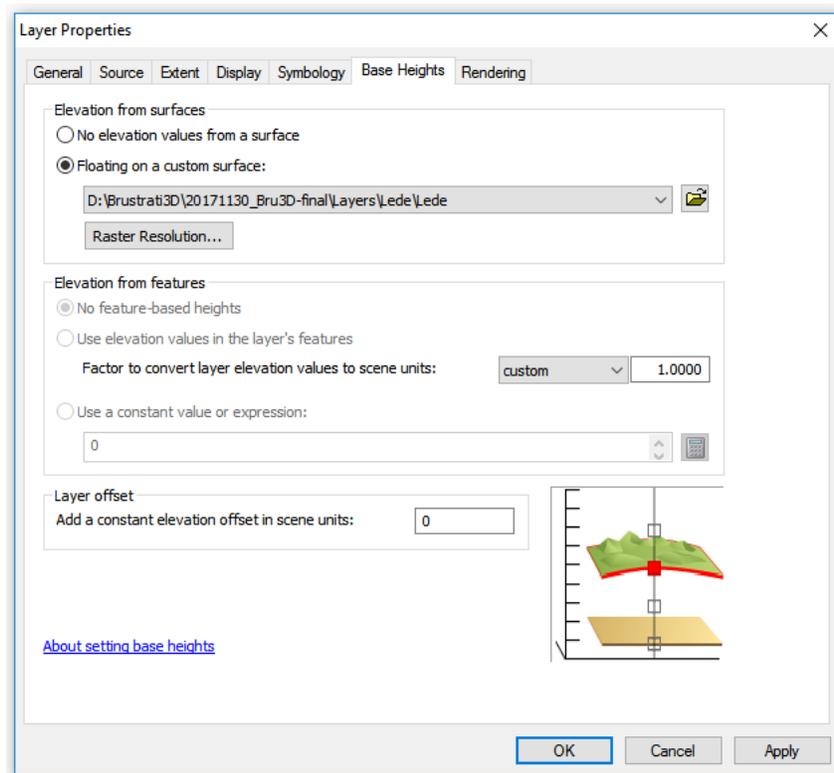


Figure 59. Fenêtre « Layer Properties » du raster représentant la surface supérieure du Membre de Grandglise.

Le modèle géologique de la zone d'étude du projet Brustrati3D est constitué par la superposition des surfaces raster qui illustre l'empilement stratigraphique de chacune des couches géologiques du système sédimentaire de la région (Figure 60). La surface supérieure de cet empilement stratigraphique n'est autre que le Modèle Numérique de Terrain (correspondant généralement à la surface supérieure du Quaternaire, ou sinon à celle du Tertiaire si la couverture quaternaire est absente) et la surface inférieure du modèle géologique correspond au sommet du socle paléozoïque. L'accent du projet a été mis sur l'ensemble des formations rencontrées en RBC qui, par l'encodage de milliers de nouveaux points a permis d'améliorer et de proposer de nouvelles interpolations/shapefiles pour l'ensemble des couches géologiques définies au préalable.

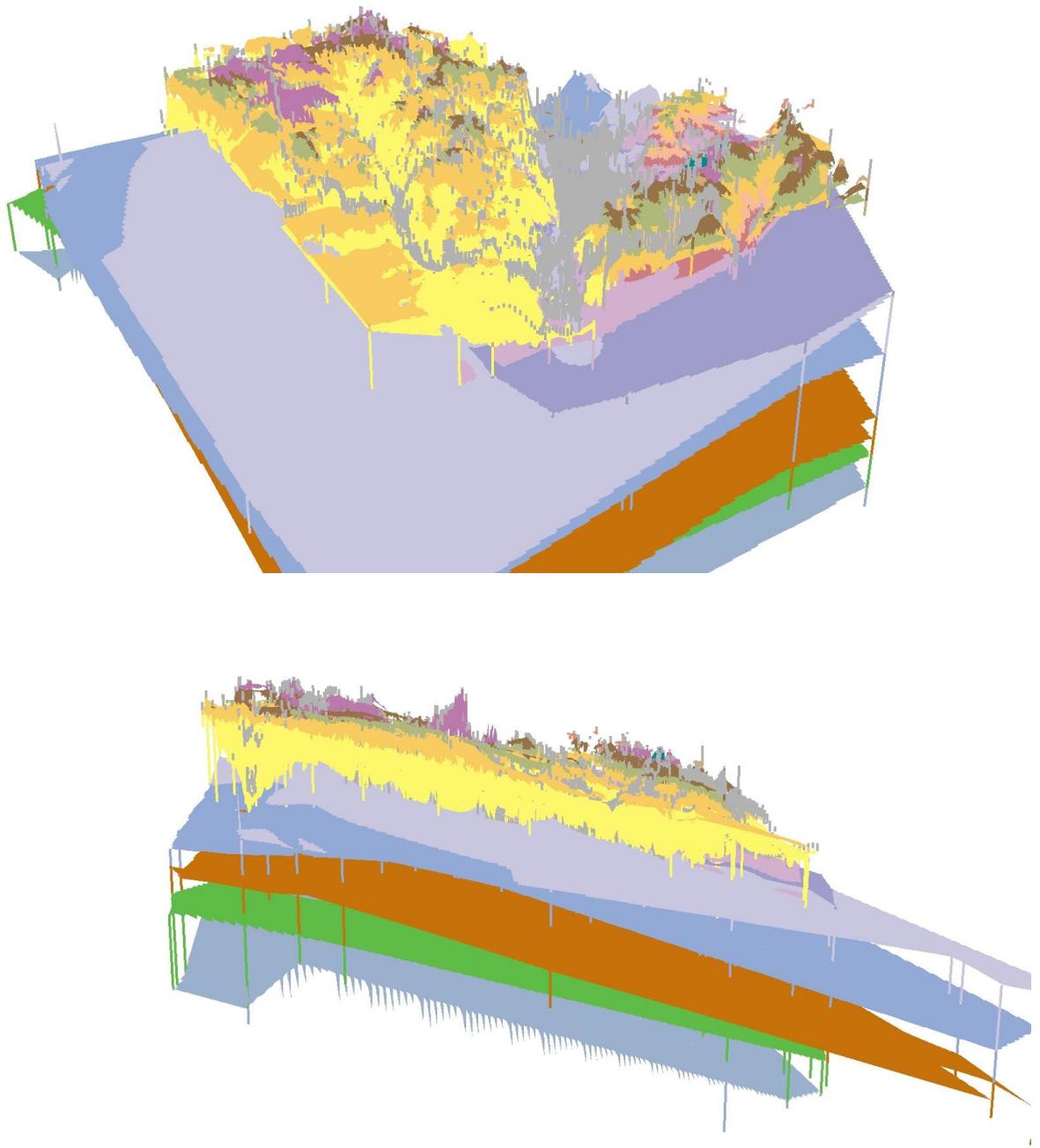


Figure 60. Résultat de la modélisation géologique 3D du sous-sol en RBC et hors RBC au sein de la zone d'étude étendue. Les données de forage sont symbolisées par des bâtonnets représentant des colonnes lithostratigraphiques. Les surfaces supérieures des formations obtenues par interpolation sont superposées en trois dimensions afin de représenter l'empilement stratigraphique caractérisant le substratum de Bruxelles. Les couleurs des unités lithostratigraphiques sont conformes au code couleur utilisé pour la carte géologique Bruxelles-Nivelles (Buffel & Matthijs, 2002). Image du haut, vue aérienne depuis le Nord des vallées fluviales de la Woluwe et de la Senne qui recourent la séquence des collines. Image du bas, vue depuis l'Est sur les collines de Bruxelles. On notera le pendage vers le NE des couches géologiques.

9.3. Corrections apportées au modèle développé

Des corrections ont été apportées aux résultats du modèle géologique pour la plupart des couches géologiques grâce aux milliers de nouveaux points encodés. Les erreurs de modélisation peuvent être résolues en identifiant et en réévaluant les données de forage problématiques dont l'interpolation a conduit à ces erreurs. **Deux problèmes principaux illustrés par la figure 56** peuvent être cités : (1) l'aspect irrégulier de certaines formations censées être de forme tabulaire et régulière et (2) le recoupement illogique de certaines couches géologiques.

L'aspect irrégulier de certaines surfaces censées être planes et régulières (exceptées la base ondulante de la Formation de Diest, de la Formation de Bruxelles et les couches érodées et spatialement discontinues telles que les Formations de Lede et de Maldegem) résulte de l'interpolation de données de forage inexacts. Ces données proviennent probablement de forages dont la description lithologique des échantillons est trop peu détaillée ou incomplète pour permettre une délimitation exacte de certaines des couches géologiques. Ce travail déjà entamé précédemment a été revu également dans le cadre du projet Brustrati3D suite à l'ajout de milliers de nouveaux points qui permettent de préciser correctement l'extension géographique et la profondeur des formations géologiques. Néanmoins, toute la stampe stratigraphique est ajoutée pour chaque forage ce qui permet d'améliorer chacune des surfaces interpolées. L'ajout de nouveaux points met en lumière des irrégularités de certaines couches non connues. L'exemple est celui du Membre d'Aalbeke dans la région de Grand-Bigard qui présentent une zone où elle disparaît. De même la Formation de Tielt est présente dans les collines de Haeren-Evere mais disparaît au droit de la recoupe avec celle de la Woluwe. Pour identifier les forages problématiques, la différence d'altitude entre la surface interpolée d'une couche et celles situées stratigraphiquement en-dessous et au-dessus tenant compte des épaisseurs est déterminée. Certaines formations ou membres sont peu épais, impliquant la nécessité de reprendre également d'autres formations/membres plus basses et plus hautes stratigraphiquement. Ces différences permettent d'obtenir un shapefile montrant les zones où les formations/membres se recoupent ou non selon les altitudes obtenues par interpolation. Ces recoupements illogiques sont donc vérifiés minutieusement. Il est donc possible d'identifier les sondages à l'origine d'anomalies dans les interpolations et de les réinterpréter géologiquement et stratigraphiquement. Des corrections sont apportées et modifiées dans la base de données après cette étape. Par ailleurs, cette approche permet de déterminer les zones géographiques où certaines formations ne peuvent être présentes (confirmé par les cartes géologiques disponibles à l'heure actuelle sur l'ensemble de la zone étudiée) et de découper le shapefile en conséquence.

10. Conclusions et perspectives

Ce rapport final pour le projet Brustrati3D explique la méthodologie utilisée pour la réalisation de la modélisation géologique des couches géologiques rencontrées au droit de la zone d'étude du projet délimitée par :

- la RBC et une extension hors RBC qui implique de rechercher une série de forages profonds pour réaliser les interpolations précises en RBC jusqu'aux limites territoriales.

Cette méthode est fondée sur une base de données Microsoft Access rassemblant différents types de données stratigraphiques et sur un Système d'Information Géographique (ArcGIS) permettant la construction de modèle géologique 3D dans n'importe quel environnement sédimentaire homoclinal.

La méthode appliquée dans notre cas au système sédimentaire bruxellois produit des résultats intéressants mais atteint certaines limites comme dans les vallées où l'absence de forages ne permet pas de définir les tracés les plus justes. La configuration du système tabulaire du Tertiaire subsiste mais se réduit en épaisseur vers le sud.

Au demeurant, les milliers de points ajoutés permettent souvent d'affiner les formations superficielles et celles reprises dans les collines de la RBC. Néanmoins, la cartographie des couches profondes reste un challenge, ceci est d'autant plus vrai pour celles du Crétacé et du Paléozoïque pour lesquelles le manque de données rends l'interpolation très frustré ou très plate. Le toit du socle Paléozoïque est marqué par une véritable paléotopographie comme le laisse à penser certaines publications, comme le suggère la présence de sols altérés dont l'épaisseur et la nature varient latéralement y compris sur de courtes distances (i.e. quelques centaines de mètres tout au plus), comme le suggère la présence de lambeaux de Crétacé piégés dans de profondes dépressions au sein du socle Paléozoïque.

Le travail d'encodage a progressé par l'ajout de données issues des travaux de la géotechnique. Néanmoins, il subsiste encore des informations géologiques dispersées au sein des données de la banque sol de l'IBGE, chez les nombreuses sociétés actives en RBC à travers de gros chantiers d'infrastructures urbaines ou des compagnies plus actives aujourd'hui en géothermie.

La méthode que nous décrivons dans ce présent rapport présente l'avantage de considérer différents types de source de données stratigraphiques - les principales étant les forages, les piézomètres, les affleurements ou coupes et les essais de pénétration - et de considérer et visualiser toutes ces informations selon une manière similaire aux logs lithostratigraphiques. À l'heure actuelle, 9 266 ouvrages verticaux de différentes natures ont été considérés. L'interpolation spatiale de ces données de profondeur de couche par la méthode Natural Neighbour a généré tant les surfaces supérieures (sommet de couche) que les bases des couches géologiques, en format raster, de chacune des unités géologiques indépendamment les

unes des autres. Par ailleurs, les différentes phases de corrections apportent une plus grande contrainte sur les extensions des couches géologiques étudiées et présentes en RBC. La correction qui apporte les changements les plus importants concerne la soustraction du sommet d'une couche par la base du Quaternaire. Les avantages de l'utilisation d'ArcScene sont, d'une part, de clairement visualiser chaque source de données stratigraphiques en tant que logs (i.e. les « sticks » formés par les segments colorés) facilement compréhensibles et, d'autre part, de représenter de manière pertinente l'information des couches géologiques une à une ou réunies. Néanmoins, ArcGIS limite le modèle à une superposition de surfaces interpolées qui n'est pas très esthétique et qui ne permet pas de calculer des volumes pour les couches souhaitées. Il conviendra donc de passer ou de rechercher un autre logiciel de visualisation 3D pour représenter le modèle développé sous forme de blocs en 3D.

Finalement, l'extension spatiale de certaines couches devra être révisée, particulièrement pour les formations profondes comme le Crétacé présent sous forme de poches dans des paléovallées anciennes formant une paléotopographie du socle calédonien. Cette formation et l'interpolation qui en découle pose problème puisqu'elle recoupe à certains endroits le bedrock d'âge Paléozoïque. Cet exemple très précis n'est pas résolu à l'heure actuelle à cause d'un jeu de données trop réduit spatialement. Il n'existe en effet pas assez de forages permettant d'obtenir une analyse pointue de cette problématique connue d'alignements de crêtes du socle Paléozoïque séparées par des vallées où le Crétacé est présent et relativement plus épais. Le problème est connu au droit du Massif du Brabant. Cette approche a fait l'objet d'une étude préliminaire par le SGB et du personnel y afférent sous la supervision de X. Devleeschouwer pour tester dans une région d'une vingtaine de km², la mesure du bruit sismique à l'aide de séismomètres via des mesures prises à haute résolution spatiale (> 20 mesures par km²). L'analyse et le traitement des séismogrammes et la conversion de la fréquence sismique selon une verticale par le biais d'une loi de déplacement des ondes sismiques permet de définir une épaisseur entre le socle dur réfléchissant les ondes et la surface. Plusieurs lois sont définies et calibrées sur base de forages pour lesquelles la profondeur du toit du Paléozoïque est connue. Ces lois de calibration permettent alors dans des zones sans contrôle (donc sans forage touchant le socle) de déterminer l'épaisseur de terrain au droit du site et donc d'en déduire la profondeur du socle. L'incertitude sur la position du toit du socle dans l'étude réalisée en 2017 semble montrer qu'elle est < 4 mètres pour des profondeurs de 100 m. Cette technique prometteuse et bien moins coûteuse que la réalisation de forages aussi profonds permettrait de réaliser une cartographie du toit du Paléozoïque à haute résolution ce qui amènerait une source de données considérables pour les développements géothermiques en RBC dans la couche altérée et fracturée du socle. Par ailleurs, elle permettrait de vérifier plusieurs hypothèses géologiques relatives à la paléotopographie du toit. Elle pourrait également aider à la cartographie des formations du socle en affinant la limite cartographique entre deux formations simplement grâce à la paléotopographie qui se marque par des changements notables de lithologie.

11. Samenvatting

De geologie van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest bestaat uit een Caledonische Cambrische sokkel, het Brabant Massief. De sokkel helt zwak naar het noorden en heeft enkel kliffen (tot 35m) en dalen met een ZO-NW oriëntatie. Tussen deze kliffen werden ter hoogte van Brussel krijtlagen afgezet. Deze paleotopografie van de paleozoïsche sokkel beïnvloedt ook bovenliggende Tertiaire formaties, tot de basis van het vroeg Eoceen.

De Tertiaire afzettingen vormen een opeenvolging van mariene sedimenten, bestaande uit zand, silt en klei, met een dikte van ongeveer 50 tot 150 meter. De Quartaire afzetting tenslotte bedekken het hele gebied. Ze variëren sterk in dikte, van enkele tientallen cm op de heuvels tot meer dan 30m in de Zennevallei.

Topografisch wordt de regio gekenmerkt door de ZW-NO georiënteerde Zennevallei. Het gebied ten noordwesten van de vallei is relatief vlak met een zwakke helling naar het noorden. Het gebied ten zuidoosten is hoger, met heuvels tot 140 m en diep ingesneden rivieren.

Met een oppervlakte van 161.38 km² en een bevolkingsdichtheid van 7000 inwoners per km² (2012) vormt het Brussels Hoofdstedelijk Gewest het grootste stedelijke gebied van België. De groeiende bevolking (meer dan 1,1 miljoen inwoners) en de toenemende verstedelijking van het gebied vereisen een rationele en doordachte controle van de ondergrond van de stad en bijgevolg een betere kennis van de geologie in deze omgeving.

De Belgische Geologische Dienst (BGD) heeft een nieuw geografisch informatie systeem (GIS) project gedaan en genaamd Brustrati3D. Het doel van dit project is om een gedetailleerd geologisch 3D-model van Brussel op te stellen.

Het project bestaat uit het opstellen van een GIS applicatie die alle informatie over de ondergrond van Brussel omvat. De geologische gegevens worden opgeslagen in een Microsoft Access database en wordt beheerd in een open dynamisch geografisch informatie systeem.

De geologische data voor het 3D-model werden uit de archieven van de BGD gehaald. Ze bestaan uit boringen, filterputten, CPT en ontsluitingen. Op dit moment werden ongeveer 9 266 punten toegevoegd aan de database. Om grensproblemen in het geologisch model te voorkomen werd het onderzochte gebied bovendien vergroot dan de Brussels Hoofdstedelijk Gewest.

Bij het ingeven van de boringen in de database werd steeds de top van de formaties ingevuld. Deze waarden worden geëxporteerd naar ArcGIS en vervolgens wordt de top van elke formatie gemodelleerd via interpolatie met de Natural Neighbour techniek. Bij deze techniek wordt voor elke formatie een laag gegenereerd die begrensd wordt door de uiterste punten waar deze formatie voorkomt. Aangezien deze

geologische lagen door insnijding van de formatie van Brussel en de formatie van Diest en door fluviaale erosie tijdens het Quartair echter discontinu zijn, moeten er enkele correcties uitgevoerd worden. Voor de Quartaire erosie wordt het deel waar de topografie lager is dan deze laag te verwijderen. De correcties voor de insnijding van de formatie van Brussel en de formatie van Diest worden analoog uitgevoerd. Verder zullen de geïnterpoleerde lagen het voorkomengebied van de formaties soms overschrijden door de grillige vorm van deze laatste. Na controle van de boringen ter hoogte van deze overschrijding wordt een deel van de laag handmatig verwijderd. Tenslotte zijn er nog enkele zones waar de lagen elkaar snijden en er geen informatie van boringen beschikbaar is. Aangezien de afzettingen van de oudere formaties meer continuïteit vertonen dan meer recente formaties, wordt bij twee snijdende formaties steeds een deel van de jongste formatie verwijderd.

Deze geïnterpoleerde lagen worden vervolgens geëxporteerd naar ArcScene, waar ze in 3 dimensies worden voorgesteld. In dit 3D-model worden de boringen voorgesteld in de diepte door een staaf met verschillend gekleurde segmenten, waarbij de kleur overeenkomt met de lithostratigrafische laag en de lengte van het segment met de dikte van deze laag. Elk segment van de staafjes start ter hoogte van de overeenkomstige, geïnterpoleerde laag.

12. Références bibliographiques

ArcGIS Resource Center, 2013a. ArcGIS Desktop 10, « Fonctionnement de l’outil IDW ». Consulté le 20 mars 2013.

<http://help.arcgis.com/fr/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/009z00000075000000>

ArcGIS Resource Center, 2013b. ArcGIS Desktop 10, « A propos de l’utilisation de l’extrusion comme symbologie 3D ».

Consulté le 20 mars 2013. <http://help.arcgis.com/fr/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/00q80000009t000000/>

Banks, M. (2012): Parliament’s chamber closed for safety checks (3rd September 2012). – www.theparliament.com. Retrieved 6th November 2012.

Buffel, P. & Matthijs, J. (Geological Service Company bvba) (2002): Brussel-Nijvel, Geologische kaart van België, kaartblad 31-39, 1:50 000. – Belgische Geologische Dienst en Afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie, Brussel (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap)

Buffel, P. & Matthijs, J. (Geological Service Company bvba) (2009): Brussel-Nijvel, Toelichtingen bij de geologische kaart van België, Kaartblad 31-39, 1:50 000. – Belgische Geologische Dienst en Departement LNE, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen, Brussel (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap).

Camerman, C. (1955): Le sous-sol de Bruxelles et ses anciennes carrières souterraines. – Annales des Travaux Publics et de la Reconstruction, 2: 5–28, Bruxelles (Commission directrice des Annales des Travaux Publics de Belgique).

Cambier, G. & Devleeschouwer, X. (2013). A GIS-based methodology for creating 3D geological models in sedimentary environment: application to the subcrop of Brussels. Z. Dt. Ges. Geowiss. (German J. Geosci.), 164 (4), 557–567.

Deckers, J. and Matthijs, J. (2016): Middle Paleocene uplift of the Brabant Massif from central Belgium up to the southeast coast of England. Geological Magazine, doi: <https://doi.org/10.1017/S001675681600073X>

Devleeschouwer, X. & Pouriel, F. (2006): Brussels Urban Geology (BUG): a 2D and 3D model of the underground by means of GIS. – In: Culshaw, M.G., Reeves, H.J., Jefferson, I. & Spink, T.W. (eds.): IAEG2006 Engineering geology for tomorrow's cities, Nottingham, UK, 6th-10th September 2006, Geological Society Engineering Geology Special Publication 22, paper no 420, London (Geol. Soc. London).

Devleeschouwer, X., Pouriel, F. & Declercq, P.-Y. (2006): Vertical displacements (uplift) revealed by the PSInSAR technique in the centre of Brussels, Belgium. – In: Culshaw, M.G., Reeves, H.J., Jefferson, I. & Spink, T.W. (eds.): IAEG2006 Engineering geology for tomorrow's cities, Nottingham, UK, 6th-10th September 2006, Geological Society Engineering Geology Special Publication 22, paper no 416, London (Geol. Soc. London).

European Community (2006): Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioration. – Official Journal 12 December L 372/19, European Community, Brussels.

Gunnink, J.L., Maljers, D., van Gessel, S.F., Menkovic, A., Hummelman, H.J. (2013): Digital Geological Model (GDM): a 3D raster model of the subsurface of the Netherlands. Netherlands Journal of Geoscience, 92/1, 33-46.

Houthuys, R. (1990): Vergelijkende studie van de afzettingsstructuur van getijdenezanden uit het Eoceen en van de huidige Vlaamse Banken. – Aardk. Meded., 5: 1–137, Leuven (Leuven University Press).

Houthuys, R. (2011): A sedimentary model of the Brussels Sands, Eocene, Belgium. – Geol. Belg., 14/1-2: 55–74, Brussels (Geologica Belgica).

Site web de l'IBGE, accédé le 27/05/2014

http://www.belgium.be/fr/environnement/biodiversite_et_nature/conservation_de_la_nature/par_region/region_bruelles_capitale/

Kaufmann, O. & Martin, T. (2008): 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. – Comput. Geosci., 34: 278–290, Amsterdam (Elsevier).

Logan, C., Russell, H.A.J. & Sharpe, D.R. (2001): Regional three-dimensional stratigraphic modelling of the Oak Ridges Moraine area, southern Ontario. – Curr. Res. Geol. Surv. Can., 2001-D1: 12 p., Ottawa (Geol. Surv. Can.).

Piessens, K., De Vos W., Herbosch, A. Debacker, T. & Verniers, J. (2004): Lithostratigraphy and geological structure of the Cambrian rocks at Halle-Lembeek (Senne Valley, Belgium). *Geological Survey of Belgium, Professional Paper*, 300: 1-166.

Matthijs, J., Debacker, T., Piessens, K. & Sintubin, M. (2005): Anomalous topography of the Lower Palaeozoic basement in the Brussels Region, Belgium. – Geol. Belg., 8/4: 69–77, Brussels (Geologica Belgica).

Pharaoh, T.C., England, R. & Lee, M.K. (1995): The concealed Caledonide basement of eastern England and the southern North Sea – a review. – Stud. Geophys. Geod., 39: 330–346, Berlin (Springer).

Schroyen, K. (Geological Service Company bvba) (2003): Brussel-Nijvel, Toelichting bij de Quartairgeologische Kaart, Kaartblad 31-39, 1:50 000. – Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen, Brussel (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap).

Sintubin, M. & Everaerts, M. (2002): A compressional wedge model for the Lower Palaeozoic Anglo-Brabant Belt (Belgium) based on potential field data. *In*: Winchester, J., Verniers, J. & Pharaoh, T. (eds) *Palaeozoic Amalgamation of Central Europe*. Geological Society, London, Special Publications, 201: 327-343.

Thierry, P., Prunier-Leparmentier, A.-M., Lembezat, C., Vanoudheusden, E. & Vernoux, J.-F. (2009): 3D geological modelling at urban scale and mapping of ground movement susceptibility from gypsum dissolution: the Paris example (France). – *Eng. Geol.*, 105: 51–64, Amsterdam (Elsevier).

Turner, A.K. (2006): Challenges and trends for geological modelling and visualisation. – *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 65: 109–127, Berlin (Springer).

Verniers, J., Herbosch, A., Vanguestaine, M., Geukens, F., Delcambre, B., Pingot, J.L., Belanger, I., Hennebert, M., Debacker, T., Sintubin, M. & De Vos, W. (2001): Cambrian–Ordovician–Silurian lithostratigraphical units (Belgium). – *Geol. Belg.*, 4/1-2: 5–38, Brussels (Geologica Belgica).

Weber, K.J. & van Geuns, L.C. (1990): Framework for constructing clastic reservoir simulation models. – *J. Petrol. Tech.*, 42: 1248–1253, 1296–1297, Dallas (Soc. Petroleum Engineers).

Zhu, L., Zhang, C., Li, M., Pan, X. & Sun, J. (2012): Building 3D solid models of sedimentary stratigraphic systems from borehole data: An automatic method and case studies. – *Eng. Geol.*, 127: 1–13, Amsterdam (Elsevier).