

**Détermination de la conductivité thermique des formations géologiques  
du sous-sol de la Région de Bruxelles-Capitale  
à des fins de pré-dimensionnement de sondes géothermiques**

**Projet FEDER-RBC Brugeo**

Pierre GERARD, Mathilde VINCENT, Valériane GIGOT, Bertrand FRANCOIS

Université Libre de Bruxelles (ULB), Service BATir

piergera@ulb.ac.be

05/03/2020



La Région et l'Europe investissent dans votre avenir ! • Het Gewest en Europa investeren in uw toekomst!



## Table des matières

1. Introduction.....	3
2. Géologie et hydrogéologie de la région de Bruxelles-Capitale .....	4
3. Données.....	8
3.1. Test de réponse thermique .....	8
3.2. Test de réponse thermique amélioré.....	9
3.3. Conductivités thermiques de référence en fonction de la lithologie.....	9
4. Méthodologie .....	11
4.1. Détermination du profil géologique et du niveau piézométrique au droit de chaque TRT et E-TRT	11
4.2. Détermination des conductivités thermiques de chaque unité stratigraphique.....	12
4.2.1. Détermination des conductivités thermiques des unités stratigraphiques du Quaternaire et du Tertiaire .....	13
4.2.2. Détermination des conductivités thermiques des unités stratigraphiques du Secondaire et du Primaire .....	15
5. Résultats.....	16
5.1. Conductivités thermiques des unités stratigraphiques du Quaternaire et Tertiaire .....	16
5.1.1. Conductivités thermiques sur base de la lithologie .....	16
5.1.2. Conductivités thermiques sur base des unités stratigraphiques .....	18
5.1.3. Conductivités thermiques des unités stratigraphiques de Grandglise et Lincet.....	20
5.1.4. Conclusions.....	22
5.2. Conductivités thermiques des unités stratigraphiques du Secondaire et du Primaire.....	22
6. Discussions .....	24
6.1. Aptitude du modèle à ne pas présenter d’erreur systématique dans certaines gammes de conductivité thermique.....	24
6.2. Homogénéité de la conductivité thermique des unités stratigraphiques à l’échelle de la région de Bruxelles-Capitale .....	25
6.3. Impact de l’erreur relative sur la conductivité thermique moyenne du sous-sol sur le dimensionnement de sondes géothermiques .....	26
7. Conclusions.....	29

## 1. Introduction

La détermination du potentiel du sous-sol de la région de Bruxelles-Capitale pour l'installation de sondes géothermiques requiert idéalement la connaissance de la conductivité thermique des différentes formations géologiques rencontrées jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 200 à 300 m. L'objectif de ce document est donc de mettre en place une méthodologie permettant de déterminer la conductivité thermique de chacune des formations géologiques rencontrées à Bruxelles et d'analyser ensuite les résultats obtenus.

La conductivité thermique des sols et roches est entre autres fortement influencée par la teneur en eau. Au sein d'une même formation géologique, il est donc en outre nécessaire de distinguer la conductivité thermique saturée (sous la nappe) de la conductivité thermique non-saturée. Nous ferons ici l'hypothèse qu'à l'échelle de la région de Bruxelles-Capitale, la teneur en eau dans la zone non-saturée est homogène et constante au sein d'une même formation géologique.

La méthodologie repose principalement sur l'interprétation d'essais in-situ de caractérisation de la conductivité thermique du sous-sol, à savoir des tests de réponse thermique standard et améliorés. Leur analyse sur base d'un modèle géologique 3D et d'un modèle hydrogéologique de la région de Bruxelles-Capitale conduit à la détermination de la conductivité thermique de chaque formation géologique, en distinguant conductivité thermique saturée (sous la nappe) et non-saturée (au-dessus de la nappe). Des essais de laboratoire (thermal conductivity scanner) sur des échantillons compactés à partir de cuttings collectés lors de forages réalisées en région de Bruxelles-Capitale, ainsi que des gammes attendues de conductivité thermique par lithologie disponibles dans la littérature sont également utilisées pour valider ou affiner les résultats obtenus.

## 2. Géologie et hydrogéologie de la région de Bruxelles-Capitale

A Bruxelles, après les dépôts fortement hétérogènes du Quaternaire composés principalement de remblais et d'alluvions, le sous-sol est composé sur une épaisseur de 50 à 150 m d'une alternance de couches de sable, d'argile ou de silt/limon présentant une structure quasi horizontale et datées du Néogène/Paléogène (appelé Tertiaire par simplicité dans le reste du document). Ces couches géologiques reposent sur un socle rocheux daté du Paléozoïque (appelé Primaire par simplicité dans le reste du document) et composé de schistes, de grès et de quartzites. Ces couches du Primaire (et plus précisément du Système Cambrien) sont fortement plissées et faillées et leur lithologie est fortement hétérogène. Au Nord-Est de Bruxelles, une couche de craie datée du Mésozoïque (appelé Secondaire par simplicité dans le reste du document) d'une épaisseur de maximum 30 m s'intercale entre ces dépôts du Tertiaire et du Primaire. Ce dépôt de craie s'est déposé durant la période du Crétacé.

Ces différentes couches géologiques sont regroupées en formations géologiques et en membres selon les recommandations stratigraphiques internationales<sup>1</sup> et belges<sup>2</sup> en vigueur. Sur base de ces recommandations, Bruxelles-Environnement a défini un ensemble d'unités stratigraphiques rencontrées à Bruxelles, généralement similaires aux formations géologiques et qui sont répertoriées au Tableau 1. Pour chaque unité stratigraphique, la notation en vigueur à Bruxelles et la lithologie détaillée sont fournies. Une lithologie simplifiée (sable/silt/argile/quaternaire indifférencié) est également donnée et sera utilisée dans la suite du document. Le choix a été fait de classer les argiles sableuses et les sables argileux comme silt dans cette lithologie simplifiée. L'épaisseur maximale que peut atteindre chacune de ces unités stratigraphiques à Bruxelles est également renseignée dans ce Tableau. Cette information est issue du modèle géologique 3D de Bruxelles, appelé BruStrati3D<sup>3</sup>.

Les unités hydrogéologiques (aquifère/aquiclude/aquitard) rencontrées en région de Bruxelles-Capitale sont également mentionnées au Tableau 2, en parallèle aux unités stratigraphiques qu'elles englobent.

Les unités stratigraphiques mentionnées au Tableau 1 et au Tableau 2 ne sont pas toutes présentes sur l'entièreté du sous-sol de la région de Bruxelles-Capitale, comme illustré sur la coupe géologique de la Figure 1. Sur base du modèle BruStrati3D, leurs extensions ont également été cartographiées et sont fournies à la Figure 2. Certaines unités stratigraphiques sont très peu présentes et dans ce cas généralement peu épaisses. Elles ont donc une faible probabilité d'être rencontrées lors de l'installation de systèmes géothermiques.

---

<sup>1</sup> <http://stratigraphy.org/>

<sup>2</sup> <https://ncs.naturalsciences.be/home>

<sup>3</sup> <https://environnement.brussels/thematiques/geologie-et-hydrogeologie/geologie>

Ere	Unité stratigraphique	Notation	Lithologie détaillée	Lithologie simplifiée	Epaisseur max (m)
Quaternaire	Quaternaire	US/RBC_11, US/RBC_12, US/RBC_13, US/RBC_14	Remblais. Dépôt de loess, limons d'origine éolienne, fin, sableux, homogène sur les plateaux et stratifiés sur les versants, chargé de matières argileuses, calcaireux / Diluvium caillouteux des plateaux. Dépôt successif de tourbes et d'argiles. Origine fluviale. Limité aux vallées alluviales. Dépôt de sables grossiers, graviers et limons. Présences de couches fines d'argiles, de silex. Mouvements du sol dûs aux gels et dégelés successifs. Limité aux vallées alluviales.	Quaternaire	
	Diest	US/RBC_21	Sable vert brun à rouille, mi-fin à grossier, très glauconieux, avec concrétions limoneuses. Parfois, présence de stratifications entrecroisées abondantes et des terriers tubulaires d'animaux fouisseurs.	Sable	2.5
Tertiaire	Bolderberg	US/RBC_22	Sable fin, jaune pâle, micacé ("sable chamois"), A la base, présence d'un gravier de petits silex.	Sable	7.5
	Sint-Huibrechts-Hern	US/RBC_23	Sable fin, jaune, micacé, passant graduellement de haut en bas à une argile ou un silt jaune blanc à gris rose ("l'argile saumon"), légèrement sableux et glauconieux, suivi d'une argile grise à grise verte, sableuse et plus glauconieuse. A la base, présence d'un gravier de quartz, de silex tantôt plats noirs, tantôt de plus grandes tailles et ovales. Parfois, présence de galets de grès vert cambrien.	Silt	7.5
	Onderdale	US/RBC_25	Sable fin moyen, gris foncé, silteux, glauconieux et micacé.	Sable	2.5
	Ursel et Asse	US/RBC_31	Argile gris bleuâtre, homogène, passant graduellement à une argile glauconieuse. A la base, principalement sable grossier très glauconieux ("Bande noire").	Argile	10
	Wemmel	US/RBC_41	Sable fin, gris, très glauconieux. La teneur en argile augmente vers le sommet. Ce membre est caractérisé par la présence de Nummulites wemmelensis et d'une couche de base bien développée, riche en nummulites remaniés et roulés, ainsi qu'en fragments de grès calcaire fossilifère.	Sable	10
	Lede	US/RBC_42	Sable gris, fin, carbonaté et légèrement glauconieux. Le sable est caractérisé par quelques bancs de calcaire sableux et par la présence de Nummulites variolarius, quand le sable n'est pas altéré. Vers la base, présence de niveaux plus grossiers et tout à la base, d'un gravier bien marqué avec des éléments remaniés.	Sable	22.5
	Bruxelles	US/RBC_43	Sables quartzeux, fins à grossiers, hétérogènes et très faiblement glauconieux, caractérisés par la présence de bancs durs (bancs de calcaire sableux "faciès de Gobertange - bancs de grès carbonaté, parfois silicifié) et/ou par des nodules de grès de formes très capricieuses. Quand le sédiment est calcaire, la présence de Nummulites laevigatus est typique.	Sable	45
	Vlierzele	US/RBC_44	Sable gris vert, très fin, glauconieux, plus argileux vers la base.	Sable	7.5
	Merelbeke	US/RBC_51	Argile gris vert avec des zones sableuses vertes. Parfois, présence de pyrite.	Argile	10
	Tielt	US/RBC_61	Dépôt hétérogène de sable fin, glauconieux et micacé, alternant avec des couches d'argile. Localement, présence de fragments de grès.	Silt	17.5
	Aalbeke	US/RBC_71	Argile grise à gris brun, très finement silteuse.	Argile	10
	Moen	US/RBC_72	Dépôt hétérogène de sable silteux à argileux, faiblement glauconieux, avec quelques couches d'argile. Présence de nummulites.	Silt	47.5
	Saint-Maur	US/RBC_73	Argile très finement silteuse avec quelques minces intercalations d'argile grossièrement silteuse ou de silt très fin argileux.	Argile	52.5
	Grandglise	US/RBC_81	Sable fin, glauconieux, avec intercalations argileuses minces.	Sable	15
	Lincent	US/RBC_82	Argile gris vert, légèrement sableuse, localement cimentée par de l'opale. A la base, quelques galets de silex vert foncé.	Argile	27.5
	Secondaire	Crétacé	US/RBC_91	Craies blanches à grise avec silex noirs, appartenant probablement à la formation de Gulpen.	
Primaire	Cambrien	US/RBC_92	Dominance de bancs de grès feldspathique, schiste et quartzites d'âge supposé cambrien inférieur (ou éventuellement précambrien : l'absence de fossile rend leur datation difficile). Ces roches peuvent s'altérer sous la forme d'argile compacte.		

Tableau 1 – Unités stratigraphiques rencontrées en Région de Bruxelles-Capitale<sup>4</sup>

<sup>4</sup> <https://environnement.brussels/thematiques/geologie-et-hydrogeologie/geologie>

Ere	Unité lithologique	Notation	Unité hydrogéologique
Quaternaire	Quaternaire	UH/RBC_1a UH/RBC_1b	Système aquifère du Quaternaire
Tertiaire	Diest	UH/RBC_2	Système aquifère sableux perché
	Bolderberg		
	Sint-Huibrechts-Hern		
	Onderdale	UH/RBC_3	Aquiclude des argiles
	Ursel et Asse		
	Wemmel	UH/RBC_4	Système aquifère des sables de Wemmel, Lede et Vlierzele
	Lede		
	Bruxelles		
	Vlierzele	UH/RBC_5	Aquiclude des argiles de Gent
	Merebeke		
	Tielt	UH/RBC_6	Aquitard des sables et argiles de Tielt
	Aalbeke	UH/RBC_7a UH/RBC_7b	Aquitard des sables et argiles de Kortrijk
	Moen		
Saint-Maur	UH/RBC_8a	Système aquifère des sables du Landénien	
Grandglise			
Lincet	UH/RBC_8b	Aquiclude des argiles du Landénien	
Secondaire	Crétacé	UH/RBC_9a	Système aquifère des craies du Crétacé et du socle paléozoïque
Primaire	Cambrien	UH/RBC_9b	

Tableau 2 – Unités hydrogéologiques rencontrées en Région de Bruxelles-Capitale et unités stratigraphiques qui les composent<sup>5</sup>

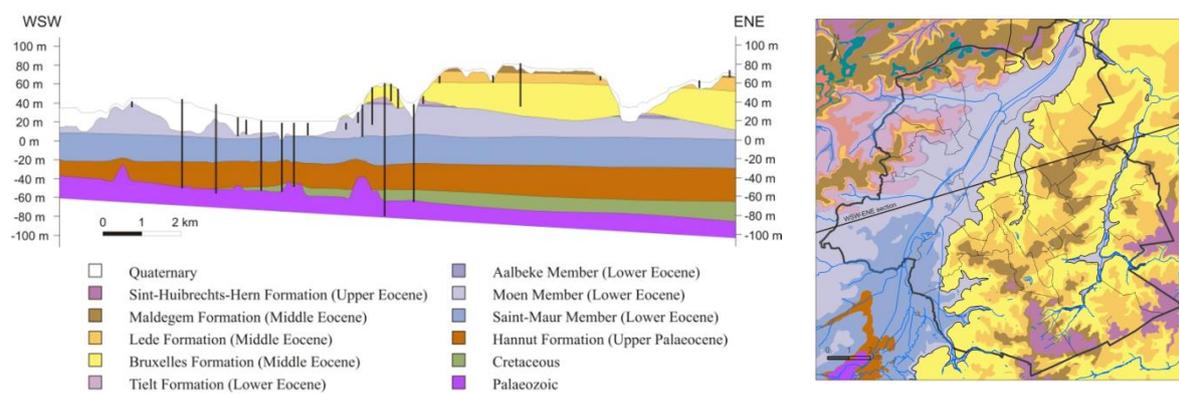


Figure 1 – Coupe géologique Ouest-Sud-Ouest – Est-Nord-Est de la région de Bruxelles-Capitale et position de la coupe sur la carte géologique<sup>6</sup>

<sup>5</sup> <https://environnement.brussels/thematiques/geologie-et-hydrogeologie/eaux-souterraines/hydrogeologie/unites-hydrogeologiques-de-la>

<sup>6</sup> Buffel P., Matthijs J. (2002) Carte géologique Bruxelles-Nivelles 31-39, 1:50.000

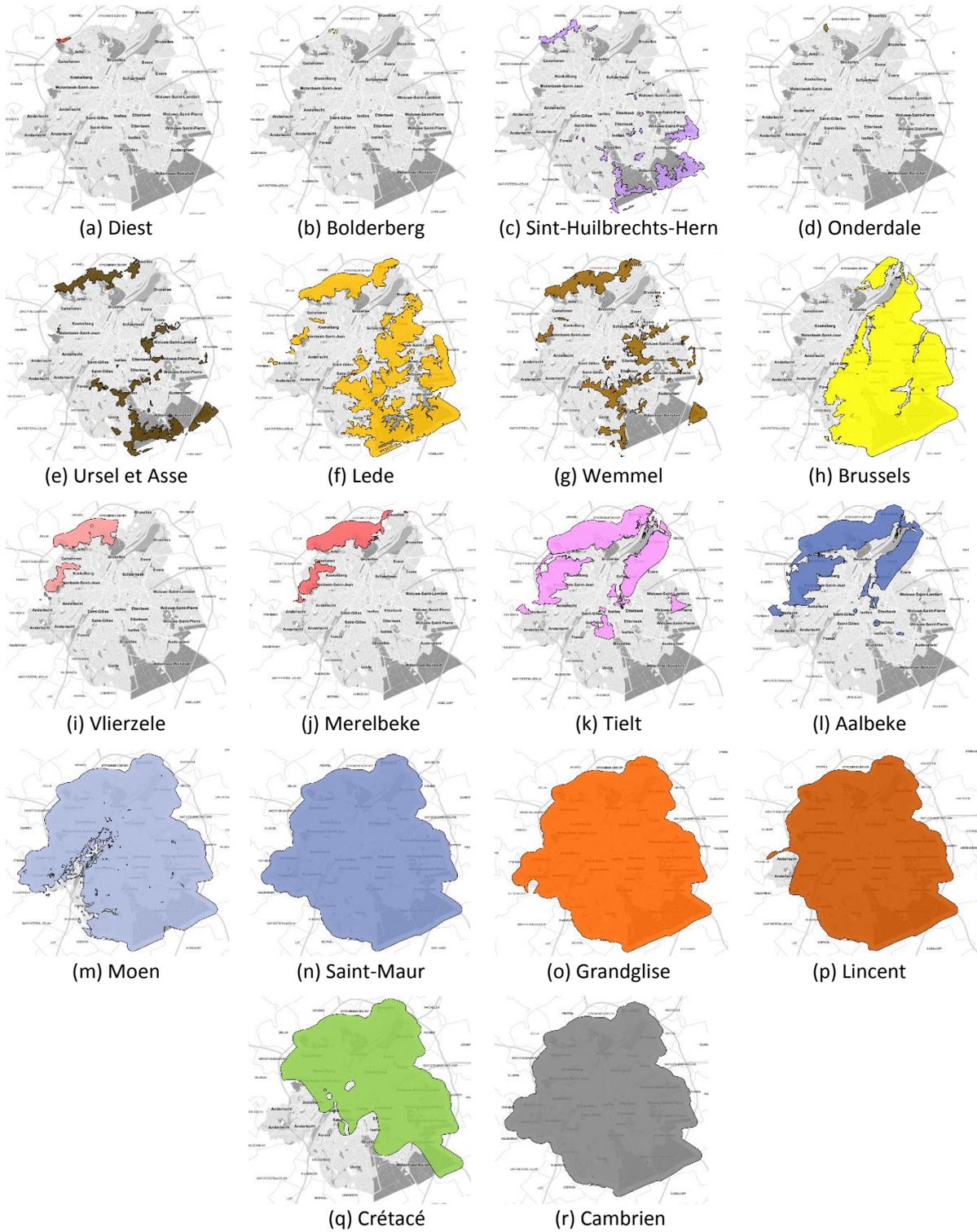


Figure 2 – Extension des différentes unités stratigraphiques rencontrées en Région de Bruxelles-Capitale<sup>7</sup>

<sup>7</sup> <https://environnement.brussels/thematiques/geologie-et-hydrogeologie/geologie>

### 3. Données

Afin de déterminer la conductivité thermique des unités stratigraphiques rencontrées en région de Bruxelles-Capitale, des résultats issus de 2 types de tests in-situ caractérisant les propriétés thermiques du sous-sol seront utilisés, à savoir le test de réponse thermique (TRT) et le test de réponse thermique amélioré (ETRT). Il sera également fait appel à des valeurs de référence disponibles dans la littérature.

#### 3.1. Test de réponse thermique

Le test de réponse thermique (TRT) permet de déterminer au sein d'une sonde géothermique test la conductivité thermique moyenne et la température initiale moyenne du sous-sol le long du forage, ainsi que la résistance thermique de la sonde<sup>8</sup>. Les résultats de 26 TRT effectués en région de Bruxelles-Capitale ou à proximité dans des géologies similaires ont pu être recueillis. Parmi ces tests, 21 ont été effectués dans la Région de Bruxelles-Capitale. Les 5 autres tests proviennent des alentours de Bruxelles:

- 4 en région flamande (à une distance de maximum 10 km des limites de la région bruxelloise)
- 1 en région wallonne (à une distance de maximum 15 km des limites de la région bruxelloise)

Les 25 TRT sont localisés à la Figure 3. Les profondeurs et conductivités thermiques moyennes obtenues durant ces essais sont fournies au *Tableau 3*.

# TRT	Profondeur sonde (m)	Conductivité thermique moyenne (W/mK)
1	72	1.72
2	100	2.24
3	86	1.58
4	126	1.84
5	54	1.62
6	104	1.72
7	105	1.68
8	74	2.33
9	70	1.95
10	110	1.57
11	60	2.26
12	100	2.41
13	250	2.59
14	110	2.06
15	85	2.05
16	100	2.20
17	100	2.40
18	45	2.50
19	52	1.90
20	74	2.17
21	74.5	2.10
22	120	1.90
23	137	2.39
24	95	1.89
25	70	1.79
26	200	2.56

*Tableau 3 – Profondeur de la sonde géothermique test et conductivité thermique moyenne des 26 TRT à disposition*

<sup>8</sup> Gehlin S. (2002) Thermal response test: method development and evaluation. Doctoral Thesis. Lulea University of Technology, Sweden, 191 pp.

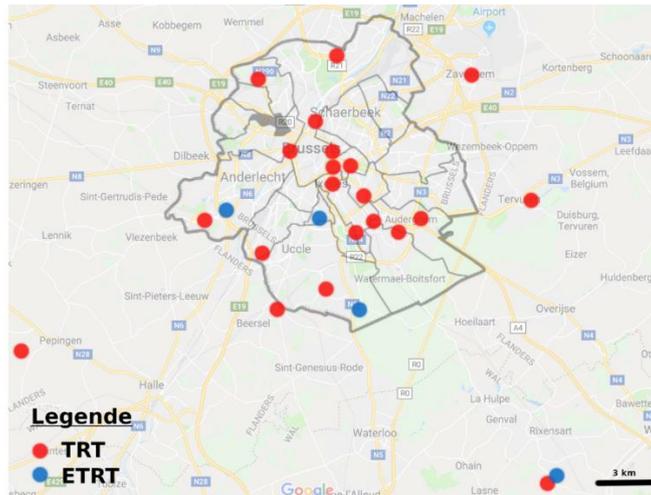


Figure 3 – Emplacement des TRT et E-TRT

### 3.2. Test de réponse thermique amélioré

Le test de réponse thermique amélioré (ETRT) permet de déterminer l'évolution de la conductivité thermique le long d'un forage grâce à la mesure du profil de température dans le sous-sol<sup>9</sup>. Il fournit donc une information plus précise que le TRT, car il est possible d'observer la variation de conductivité thermique en fonction de la lithologie ou de la teneur en eau du sol. De tels essais sont cependant complexes et donc généralement mis en œuvre uniquement dans le cadre de recherche scientifique. Les résultats de 5 ETRT, localisés à la Figure 3, ont pu être récupérés:

- 3 en région de Bruxelles-Capitale ;
- 2 en région wallonne (à une distance de maximum 15 km des limites de la région bruxelloise).

Pour chaque ETRT, la conductivité thermique a été analysée au regard du profil géologique déterminé sur base du log de forage. Les gammes de conductivité thermique observées pour les différentes unités stratigraphiques sont fournies au Tableau 4, ainsi que le nombre de ETRT qui traversent chaque unité stratigraphique.

### 3.3. Conductivités thermiques de référence en fonction de la lithologie

En fonction de la lithologie et de l'état de saturation, il est possible d'estimer la conductivité thermique sur base de valeurs recommandées dans la littérature. Ainsi, la norme suisse<sup>10</sup> propose des intervalles et une valeur recommandée pour différentes lithologies, dont entre autres le sable et l'argile (saturé et non-saturé). Les valeurs recommandées sont fournies au Tableau 5.

D'autre part, le projet de recherche Smartgeotherm<sup>11</sup> a cherché à déterminer la conductivité thermique des unités stratigraphiques rencontrées en Flandre en vue de la cartographie du potentiel géothermique du sous-sol. Les unités stratigraphiques rencontrées en Flandre et à Bruxelles étant en partie similaires, ces valeurs peuvent être considérées comme une première indication des conductivités thermiques du sous-sol bruxellois. La méthodologie adoptée dans le cadre du projet Smartgeotherm consistait à définir tout d'abord par analyse inverse sur une série de résultats de TRT collectés en Flandre une conductivité thermique à chaque lithologie simplifiée (sable - silt - argile), sans faire de distinction entre zone saturée et non-saturée; puis d'attribuer dans un second temps à chaque

<sup>9</sup> Heidinger P. et al. (2004). EGRT - Enhanced Geothermal Response Tests, in: Die neue Rolle der Geothermie, Tagungsband GTV, 5. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, Landau

<sup>10</sup> SIA 384/6:2010. Sondes géothermiques, 76 p.

<sup>11</sup> Van Lysebetten G., Huybrechts N., François L. (2013) Geschikheidskaarten Geothermie – Thermische Geleidbaarheid Ondergrond Vlaanderen, Smart Geotherm, 45p.

unité stratigraphique une valeur de conductivité thermique en fonction de la lithologie simplifiée. Les valeurs recommandées sont fournies au Tableau 5.

Ere	Unité stratigraphique	Notation	Lithologie simplifiée	Etat de saturation	# ETRT	$\lambda$ (W/mK)
Quaternaire	Quaternaire	US/RBC_11, US/RBC_12, US/RBC_13, US/RBC_14	Quaternaire	Non-saturé	5	1.4 -2.2
				Saturé		
Tertiaire	Diest	US/RBC_21	Sable	Non-saturé	0	-
				Saturé	0	-
	Bolderberg	US/RBC_22	Sable	Non-saturé	0	-
				Saturé	0	-
	Sint-Huibrechts-Hern	US/RBC_23	Silt	Non-saturé	0	-
				Saturé	0	-
	Onderdale	US/RBC_25	Sable	Non-saturé	0	-
				Saturé	0	-
	Ursel et Asse	US/RBC_31	Argile	Non-saturé	0	-
				Saturé	0	-
	Wemmel, Lede et Bruxelles	US/RBC_41 US/RBC_42 US/RBC_43	Sable	Non-saturé	5	0.9 – 1.9
				Saturé	5	1.8 – 2.9
	Vlierzele	US/RBC_44	Sable	Non-saturé	0	-
				Saturé	0	-
	Merelbeke	US/RBC_51	Argile	Non-saturé	0	-
				Saturé	0	-
	Tielt	US/RBC_61	silt	Non-saturé	1	1.4 – 2.2
				Saturé		
Aalbeke	US/RBC_71	Argile	Saturé	0	-	
Moen	US/RBC_72	Silt	Saturé	5	1.6 – 2.4	
Saint-Maur	US/RBC_73	Argile	Saturé	4	1.4 – 2.2	
Grandglise	US/RBC_81	Sable	Saturé	5	1.9 – 2.6	
Lincet	US/RBC_82	Argile	Saturé	4	1.4 – 2.3	
Secondaire	Crétacé	US/RBC_91		Saturé	0	-
Primaire	Cambrien	US/RBC_92		Saturé	2	2.0 – 6.0

Tableau 4 – Conductivités thermiques mesurées en région de Bruxelles-Capitale pour différentes unités stratigraphiques via des tests de réponse thermique améliorés

Lithologie	Etat de saturation	Conductivité thermique (W/mK)			
		Norme suisse		Smartgeotherm	
		Intervalle	Valeur recommandée	Valeur minimum	Valeur moyenne
Sable	Sec	0.3 – 0.8	0.5	1.9	2.3
	Saturé	1.5 – 4.0	2.3		
Silt	Sec	-	-	1.6	1.9
	Saturé	-	-		
Argile	Sec	0.4 – 1.0	0.6	1.2	1.5
	Saturé	0.9 – 2.3	1.4		

Tableau 5 – Conductivités thermiques de référence en fonction de la lithologie

## 4. Méthodologie

### 4.1. Détermination du profil géologique et du niveau piézométrique au droit de chaque TRT et E-TRT

Vu les logs de forage au droit de chaque TRT absents ou pas suffisamment détaillés, le profil géologique au droit de chaque TRT et ETRT a été déterminé à l'aide de modèles géologiques. Pour les essais réalisés en région de Bruxelles-Capitale, le modèle BruStrati3D<sup>12</sup> a été utilisé. Pour les essais réalisés en région flamande, le modèle géologique de la DOV a été utilisé. Pour les essais réalisés en région wallonne, le profil géologique a été déterminé à l'aide des logs de forage, car il n'y a pas de modèle géologique disponible pour cette région.

Il est également nécessaire de déterminer les épaisseurs saturées et non-saturées de chaque unité stratigraphique au droit de chaque TRT et ETRT. Au vu de leurs lithologies et du fait que l'aquifère des sables du Landénien (UH/RBC\_8a) est captif, il a été tout d'abord considéré que les unités stratigraphiques de Saint-Maur, Grandglise et Lincent sont entièrement saturées. Les unités stratigraphiques de Aalbeke et Moen ont également été supposées totalement saturées. Au vu de la Figure 4 présentant des cartes de pourcentage de hauteurs saturées pour ces deux unités, ces hypothèses semblent raisonnables.

D'autre part, vu l'absence d'information permettant de connaître le niveau piézométrique dans ces unités stratigraphiques, il a été supposé que les roches du Secondaire et du Primaire présentent chacune une teneur en eau homogène et constante à l'échelle de la région de Bruxelles-Capitale. Les épaisseurs saturées et non-saturées des autres unités stratigraphiques rencontrées au droit de chaque TRT et ETRT ont été déterminées de la manière suivante:

- Pour les TRT et ETRT situés en région de Bruxelles-Capitale, les niveaux piézométriques ont été déterminés à l'aide du modèle hydrogéologique BPSM<sup>13</sup> développé par Bruxelles-Environnement. Ce modèle fournit entre autres des cartes piézométriques de référence dans le système phréatique de la région bruxelloise (unités hydrogéologiques UH/RBC01 à UH/RBC7 - voir Tableau 2)
- Pour les TRT et ETRT situés en région flamande, il n'existe pas de modèle hydrogéologique. Le niveau piézométrique a été estimé pour chaque essai sur base du relevé piézométrique le plus proche du lieu du TRT et disponible sur le portail de la DOV. Les relevés piézométriques ainsi utilisés sont situés à des distances de maximum 2.5 km du TRT considéré.
- Pour les TRT et ETRT situés en région wallonne, le niveau d'eau mesuré lors du forage a été utilisé.

---

<sup>12</sup> <https://environnement.brussels/thematiques/geologie-et-hydrogeologie/geologie>

<sup>13</sup> <https://environnement.brussels/thematiques/geologie-et-hydrogeologie/eaux-souterraines/modelisation/brussels-phreatic-system-model>

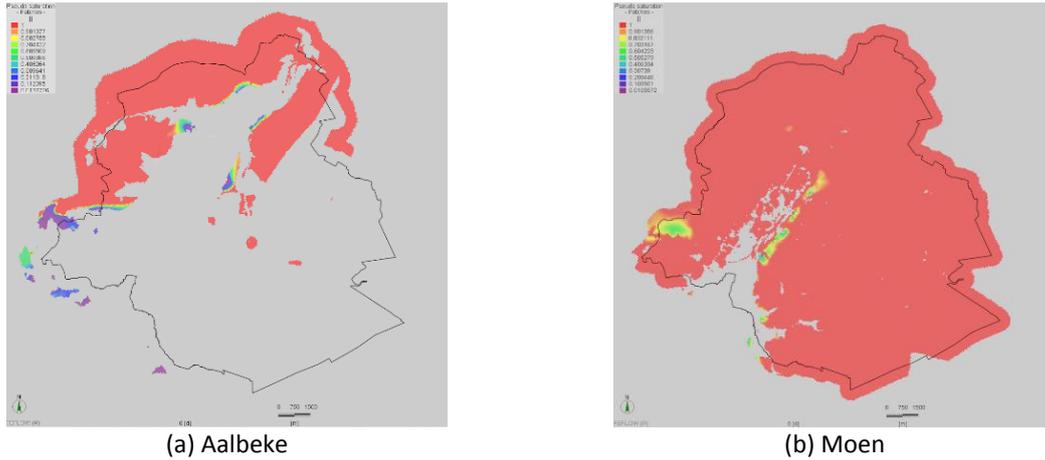


Figure 4 – Pourcentage de hauteur saturée pour les unités stratigraphiques de Aalbeke et Moen (sur base de Brustrati3D et BPSM)

## 4.2. Détermination des conductivités thermiques de chaque unité stratigraphique

Le TRT fournit la conductivité thermique moyenne du sous-sol  $\lambda_{TRT}$  le long d'une sonde géothermique test de longueur H. En supposant que:

- le flux de chaleur fourni par la sonde au sous-sol lors d'un TRT est uniquement radial (ce qui implique une structure horizontale des unités stratigraphiques dans le rayon d'influence des TRT);
- la conductivité thermique d'une unité stratigraphique est homogène à l'échelle de la région bruxelloise;

alors la conductivité thermique moyenne  $\lambda_{TRT}$  peut s'écrire comme la somme des conductivités thermiques  $\lambda_i$  des n unités stratigraphiques rencontrées pondérées par leurs épaisseurs respectives  $h_i$ :

$$\lambda_{TRT} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (1)$$

L'objectif est dès lors de déterminer par analyse inverse la conductivité thermique de chaque unité stratigraphique  $\lambda_i$  de manière à ce que les résultats des TRT présentés au *Tableau 3* vérifient l'équation (1). En cas de problème surdimensionné (nombre d'inconnues  $\lambda_i$  inférieur au nombre de données  $\lambda_{TRT}$ ), l'équation 1 ne peut généralement être vérifiée pour chaque TRT. Le problème est alors résolu via la méthode des moindres carrés, qui consiste à minimiser la somme pour l'ensemble des m TRT des carrés des différences entre la conductivité thermique moyenne mesurée lors du TRT  $\lambda_{TRT}$  et la conductivité thermique  $\lambda_{calc}$  obtenue par l'équation (1):

$$\min \sum_{j=1}^m (\lambda_{TRT,j} - \lambda_{calc,j})^2 \quad (2)$$

La méthodologie proposée s'applique cependant difficilement aux couches du Secondaire et surtout du Primaire qui sont fortement hétérogènes, qui présentent des structures non horizontales complexes et qui ne répondent donc pas aux hypothèses de la méthode présentées précédemment. Il est donc suggéré de résoudre le problème en deux phases:

- 1<sup>ère</sup> Phase : Détermination de la conductivité thermique des unités stratigraphiques du Quaternaire et du Tertiaire en excluant les TRT qui traversent les couches du Primaire et du Secondaire, ce qui laisse un nombre total de 18 TRT pour résoudre le problème inverse.
- 2<sup>ème</sup> Phase : Détermination de la conductivité thermique du Crétacé (Secondaire) et du Cambrien (Primaire) sur base des 8 TRT traversant les couches du Primaire et du Secondaire et

en y imposant les conductivités thermiques des unités stratigraphiques du Quaternaire et du Tertiaire sur base des résultats de la première phase.

#### 4.2.1. Détermination des conductivités thermiques des unités stratigraphiques du Quaternaire et du Tertiaire

Il s'agit à présent de déterminer la conductivité thermique des unités stratigraphiques du Quaternaire et du Tertiaire, en distinguant conductivité thermique saturée et non-saturée, sauf pour les unités stratigraphiques de Aalbeke, Moen, Saint-Maur, Grandglise, Lincen pour les raisons mentionnées précédemment. Le Tableau 6 liste ainsi les inconnues du problème, ainsi que le nombre de TRT qui les interceptent. Il y est également fait mention du pourcentage moyen de longueur des TRT %LT traversant chaque unité stratigraphique, défini par:

$$\%LT_i = \frac{\sum_{j=1}^m h_{ij}}{\sum_{j=1}^m H_j} \quad (3)$$

où  $h_{ij}$  est l'épaisseur de l'unité stratigraphique  $i$  le long du TRT  $j$ ,  $H_j$  est la longueur du TRT  $j$  et  $m$  est le nombre de TRT disponibles.

Ere	Unité stratigraphique	Notation	Lithologie simplifiée	Etat de saturation	# TRT	%LT (%)
Quaternaire	Quaternaire	US/RBC_11, US/RBC_12, US/RBC_13, US/RBC_14	Quaternaire	Non-saturé	17	8.3
				Saturé	2	0.2
Tertiaire	Diest	US/RBC_21	Sable	Non-saturé	0	-
				Saturé	0	-
	Bolderberg	US/RBC_22	Sable	Non-saturé	0	-
				Saturé	0	-
	Sint-Huibrechts-Hern	US/RBC_23	Silt	Non-saturé	0	-
				Saturé	0	-
	Onderdale	US/RBC_25	Sable	Non-saturé	0	-
				Saturé	0	-
	Ursel et Asse	US/RBC_31	Argile	Non-saturé	2	0.7
				Saturé	0	-
	Wemmel, Lede et Bruxelles	US/RBC_41 US/RBC_42 US/RBC_43	Sable	Non-saturé	13	13.1
				Saturé	11	10.8
	Vlierzele	US/RBC_44	Sable	Non-saturé	0	-
				Saturé	1	0.4
	Merelbeke	US/RBC_51	Argile	Non-saturé	0	-
				Saturé	1	0.5
	Tielt	US/RBC_61	Silt	Non-saturé	1	0.03
				Saturé	3	1.6
	Aalbeke	US/RBC_71	Argile	Saturé	3	0.5
	Moen	US/RBC_72	Silt	Saturé	17	29.3
Saint-Maur	US/RBC_73	Argile	Saturé	17	23.3	
Grandglise	US/RBC_81	Sable	Saturé	10	5.3	
Lincen	US/RBC_82	Argile	Saturé	9	5.9	

Tableau 6 – Unités stratigraphiques du Quaternaire et du Tertiaire pour lesquelles une conductivité thermique doit être déterminée, avec nombre de TRT les traversant et pourcentage moyen de longueur des 18 TRT traversant ces unités stratigraphiques

La détermination des conductivités thermiques des unités stratigraphiques du Quaternaire et du Tertiaire revient donc à résoudre un système de 18 équations (ou TRT) et 25 inconnues. Le système

est donc sous-déterminé et insoluble. D'autre part, plusieurs de ces inconnues/unités stratigraphiques ne sont traversées par aucun TRT. Il a donc été proposé de résoudre le problème par étapes.

### Première étape sur base de la lithologie

La première étape est de déterminer par analyse inverse les conductivités thermiques de chaque lithologie rencontrée dans le Tertiaire et le Quaternaire. Cela permet de diminuer le nombre d'inconnues et d'attribuer ensuite une valeur de conductivité thermique aux unités stratigraphiques non-traversées par les TRT. Pour ce faire, une lithologie simplifiée (sable, silt, argile ou quaternaire) est attribuée à chaque unité stratigraphique (voir Tableau 1). Il y a cependant lieu de distinguer pour chaque lithologie la conductivité saturée de la conductivité non saturée. Le nombre d'inconnues du problème est dès lors de 8, reprises au Tableau 7 avec le pourcentage moyen de longueur des TRT traversant chaque lithologie %LT, ainsi que le pourcentage moyen d'épaisseur saturée pour chaque lithologie %LS, défini comme la somme sur les m TRT des épaisseurs saturées  $h_{sat,ij}$  d'une lithologie i sur la somme sur les m TRT des épaisseurs  $h_{ij}$  de cette lithologie i :

$$\%LS_i = \frac{\sum_{j=1}^m h_{sat,ij}}{\sum_{j=1}^m h_{ij}} \quad (4)$$

Lithologie simplifiée	Etat de saturation	# TRT	%LT (%)	%LS (%)
Quaternaire	Non-saturé	17	8.3	1.9
	Saturé	2	0.2	
Sable	Non-saturé	13	13.1	55.6
	Saturé	17	16.5	
Silt	Non-saturé	1	0.03	99.9
	Saturé	17	30.9	
Argile	Non-saturé	2	0.7	97.7
	Saturé	17	30.3	

Tableau 7 – Lithologies pour lesquelles une conductivité thermique doit être déterminée, avec nombre de TRT les traversant, pourcentage moyen de longueur des TRT traversant ces lithologies (%LT) et pourcentage moyen d'épaisseur saturée de ces lithologies (%LS)

### Seconde étape sur base des unités stratigraphiques

La seconde étape consiste à déterminer par analyse inverse pour chaque unité stratigraphique du Tertiaire la conductivité thermique saturée et non-saturée, sauf pour les unités stratigraphiques de Aalbeke, Moen, Saint-Maur, Grandglise et Lincet qui peuvent être considérées comme totalement saturées. Le nombre d'inconnues s'élève à 25 (voir Tableau 6). Afin de réduire le nombre d'inconnues et de rendre le système soluble, certaines hypothèses sont considérées :

- Certaines unités stratigraphiques sont très peu présentes à Bruxelles et ne sont traversées par aucun des TRT à disposition. Il s'agit des unités stratigraphiques de Diest, Bolderberg, Sint-Huibrechts-Hern, Onderdale (saturées et non-saturées), Ursel et Asse (saturée), Vlierzele et Merelbeke (non-saturées). Pour ces unités stratigraphiques, des conductivités thermiques basées sur la lithologie et issues de l'étape 1 seront utilisées.
- D'autres unités stratigraphiques sont traversées par peu de TRT et sur des pourcentages moyens de longueur %LT<sub>i</sub> faibles. La valeur de conductivité thermique obtenue pour ces unités stratigraphiques par analyse inverse est donc sujette à de plus fortes erreurs. Il a été choisi que pour les unités stratigraphiques présentant un pourcentage moyen de longueur traversée %LT<sub>i</sub> inférieur à 5%, la conductivité thermique sera attribuée sur base de la lithologie à partir des résultats obtenus à l'étape 1. Il s'agit des unités stratigraphiques de Quaternaire (saturé),

Ursel et Asse (non-saturée), Vlierzele (saturée), Meerebeke (saturée), Tielt (saturée et non-saturée), Aalbeke.

- Les unités stratigraphiques de Wemmel, Lede et Bruxelles présentent des lithologies très similaires (sable) et forment à elles 3 l'unité hydrogéologique des sables du Bruxellien. Il est donc raisonnable d'attribuer une valeur de conductivité thermique similaire pour ces 3 unités stratigraphiques, en prenant néanmoins soin de distinguer les conductivités thermiques saturées et non-saturées.

Il est important de noter à ce stade que l'épaisseur maximale des unités stratigraphiques qui ne sont traversées par aucun ou peu de TRT est généralement faible. Les éventuelles erreurs issues du fait que les conductivités thermiques de ces unités stratigraphiques soient issues d'un calcul basé sur la lithologie (et non d'un calcul basé directement sur les unités stratigraphiques) n'influencera donc généralement que peu la conductivité thermique moyenne d'une sonde géothermique.

Les inconnues du problème sont donc réduites à 7, à savoir les conductivités thermiques des unités stratigraphiques suivantes:

- Quaternaire non-saturé
- le groupe Wemmel, Lede et Bruxelles non-saturé
- le groupe Wemmel, Lede et Bruxelles saturé
- Moen saturé
- St-Maur saturé
- Grandglise saturé
- Lincent saturé

En guise d'analyse de sensibilité et de validation des résultats, trois autres calculs seront menés et comparés en ajoutant comme inconnues les unités stratigraphiques de Tielt (non-saturé et saturé), Aalbeke (saturé) et/ou en imposant la conductivité thermique du Quaternaire (non-saturé et saturé) sur base des résultats de la première étape.

D'autre part, à chaque étape, les résultats obtenus seront comparés aux valeurs de référence fournies à la section 3.3.

#### 4.2.2. Détermination des conductivités thermiques des unités stratigraphiques du Secondaire et du Primaire

Sur base des 8 TRT traversant le Secondaire et le Primaire, la conductivité thermique du Secondaire et du Primaire présents à Bruxelles est déterminée, en prenant soin d'imposer pour ce calcul les conductivités thermiques des unités stratigraphiques du Tertiaire et du Quaternaire sur base des résultats de la première phase. Pour ce calcul, le Secondaire et le Primaire seront considérés comme totalement saturés, et une seule valeur de conductivité thermique sera attribuée à chaque unité stratigraphique.

Il est néanmoins important de noter que vu la forte hétérogénéité, tant lithologique qu'hydrogéologique, du Primaire, les valeurs de conductivité thermique obtenues via cette procédure sont sujettes à des erreurs. La faible connaissance actuelle sur la structure géologique et l'hydrogéologie de ces roches du Primaire ne nous permet cependant pas à ce stade de fournir des informations plus précises.

## 5. Résultats

### 5.1. Conductivités thermiques des unités stratigraphiques du Quaternaire et Tertiaire

#### 5.1.1. Conductivités thermiques sur base de la lithologie

##### Première approche

Les valeurs des conductivités thermiques des 8 lithologies identifiées au Tableau 7 et obtenues par analyse inverse sur base de 18 TRT sont fournies au Tableau 8. Quelques incohérences peuvent être relevées dans ces valeurs:

- La conductivité thermique du Quaternaire saturé converge vers zéro, ce qui n'est pas physique.
- La conductivité thermique du silt non-saturé n'est pas réaliste car excessivement élevée.
- La conductivité thermique de l'argile non-saturée est supérieure à celle de l'argile saturée.

Ces incohérences sont probablement liées au faible poids qu'ont ces 3 couches dans le système d'équations, car leur pourcentage moyen de longueur traversée est très faible (< 1%).

Lithologie simplifiée	Etat de saturation	# TRT	%LT (%)	%LS (%)	$\lambda$ (W/mK)
Quaternaire	Non-saturé	17	8.3	1.9	1.61
	Saturé	2	0.2		0
Sable	Non-saturé	13	13.1	55.6	1.77
	Saturé	17	16.5		2.71
Silt	Non-saturé	1	0.03	99.9	55.45
	Saturé	17	30.9		1.80
Argile	Non-saturé	2	0.7	97.8	2.21
	Saturé	17	30.3		1.86

Tableau 8 – Conductivités thermiques obtenues sur base de la lithologie – 1<sup>ère</sup> approche (cellules grisées = conductivités thermiques incohérentes)

##### Deuxième approche

Les incohérences obtenues avec la première approche sont dues au fait que ces 3 lithologies ont un faible poids dans le système d'équations en raison du:

- faible pourcentage moyen de longueur traversée %LT du Quaternaire saturé, du silt non-saturé et de l'argile non-saturée (Tableau 8) ;
- pourcentage moyen de longueur saturée %LS du silt et de l'argile proche de 100% et le pourcentage moyen de longueur sature %LS du Quaternaire proche de 0% (Tableau 8) ;
- faible nombre de TRT qui croisent ces 3 unités lithologiques (Tableau 8).

Il est donc suggéré de retirer ces trois inconnues du problème et de ne donc pas considérer les 5 TRT qui interceptent ces 3 unités lithologiques. Il y a donc lieu de déterminer la valeur de la conductivité thermique de 5 lithologies (Quaternaire non-saturé, sable non-saturé, sable saturé, silt saturé, argile saturée) par analyse inverse sur base des 13 TRT interceptant uniquement ces lithologies. Les conductivités thermiques obtenues sont présentées dans le Tableau 9. Les valeurs sont acceptables, car les conductivités thermiques croissent de l'argile au sable saturé.

Lithologie simplifiée	Etat de saturation	# TRT	%LT (%)	%LS (%)	$\lambda$ (W/mK)
Quaternaire	Non-saturé	12	7.1	0	1.64
Sable	Non-saturé	11	14.7	55.72	1.84
	Saturé	13	18.5		2.62
Silt	Saturé	12	27.9	100	2.21
Argile	Saturé	12	31.8	100	1.47

Tableau 9 – Conductivités thermiques obtenues sur base de la lithologie – 2<sup>ème</sup> tentative

Les conductivités thermiques obtenues sont à présent comparées aux valeurs recommandées par la littérature et décrites à la section 3.3. Le Tableau 10 synthétise cette comparaison et suscite les commentaires suivants :

- La conductivité thermique de l'argile saturée est proche des valeurs proposées tant par la norme suisse que le projet Smartgeotherm.
- La conductivité thermique du silt saturé est supérieure à celle proposée par le projet Smartgeotherm, mais il y a lieu ici de rappeler que le projet Smartgeotherm ne fait pas de distinction entre conductivités saturée et sèche. Il est donc normal que la conductivité thermique proposée par Smartgeotherm sous-estime celle du silt saturé.
- Les conductivités thermiques du sable saturé et non-saturé ont tendance à être supérieures aux valeurs recommandées par la norme suisse, en particulier pour le sable sec. Néanmoins, la conductivité thermique obtenue pour le sable non-saturé est proche de la valeur minimum proposé dans le cadre du projet de recherche Smartgeotherm. Vu qu'aucune distinction n'est faite dans ce projet entre conductivités saturées et non-saturées, il y a lieu de considérer que la valeur minimum correspond à celle du sable sec.
- Il n'y a pas de valeur de référence pouvant servir de base de comparaison pour le Quaternaire. La conductivité thermique obtenue pour le Quaternaire semble cependant réaliste, tout en rappelant la forte hétérogénéité géologique de cette unité stratigraphique.

Les valeurs obtenues au Tableau 10 semblent donc réalistes et sont adoptées pour la suite des développements.

Lithologie	Etat de saturation	Conductivité thermique (W/mK)				
		Résultat	Norme suisse		Smartgeotherm	
			Intervalle	Valeur recommandée	Valeur minimum	Valeur moyenne
Quaternaire	Sec	1.64	-	-	-	-
	Saturé	-	-	-	-	-
Sable	Sec	1.84	0.3 – 0.8	0.5	1.9	2.3
	Saturé	2.62	1.5 – 4.0	2.3		
Silt	Sec	-	-	-	1.6	1.9
	Saturé	2.21	-	-		
Argile	Sec	-	0.4 – 1.0	0.6	1.2	1.5
	Saturé	1.47	0.9 – 2.3	1.4		

Tableau 10 – Comparaison entre conductivités thermiques obtenues selon la lithologie et valeurs de référence

### Proposition finale

Afin de déterminer la conductivité thermique des 3 lithologies manquantes, quelques hypothèses supplémentaires sont faites, sur base des valeurs de référence présentées à la section 3.3 :

- La conductivité de l'argile non-saturée est prise égale à la valeur minimale proposée par le projet Smartgeotherm pour l'argile.

- La conductivité du silt non-saturé est prise égale à la valeur minimale proposée par le projet Smartgeotherm pour le silt.
- La conductivité du Quaternaire saturé est prise égale à 2.20 W/mK, par analogie avec le silt qui présente des conductivités thermiques relativement similaires.

Sur base de ces hypothèses, et en arrondissant de manière conservative à la décimale inférieure les conductivités thermiques déterminées précédemment, le Tableau 11 synthétise les conductivités thermiques par lithologie.

Lithologie simplifiée	Etat de saturation	$\lambda$ (W/mK)
Quaternaire	Non-saturé	1.60
	Saturé	2.20
Sable	Non-saturé	1.80
	Saturé	2.60
Silt	Non-saturé	1.60
	Saturé	2.20
Argile	Non-saturé	1.20
	Saturé	1.40

Tableau 11 – Conductivités thermiques obtenues sur base de la lithologie – Proposition finale

#### 5.1.2. Conductivités thermiques sur base des unités stratigraphiques

Afin d'attribuer une valeur de conductivité thermique à chaque unité stratigraphique rencontrée à Bruxelles, le problème inverse est maintenant résolu en imposant aux unités stratigraphiques pas ou peu traversées par les TRT les valeurs obtenues dans le Tableau 11. Comme décrit à la section 4.2.1, quatre calculs sont réalisés et comparés :

- **Cas N°1** : La conductivité thermique est imposée sur base de la lithologie simplifiée et des valeurs du Tableau 11 à toutes les unités stratigraphiques qui ne sont traversées par aucun TRT ou présentant un pourcentage moyen de longueur traversée %LT inférieur à 5% (7 inconnues pour 18 TRT).
- **Cas N°2** : La conductivité thermique est imposée sur base de la lithologie simplifiée et des valeurs du Tableau 11 à toutes les unités stratigraphiques qui sont traversées par moins de 3 TRT (9 inconnues pour 18 TRT).
- **Cas N°3** : La conductivité thermique est imposée sur base de la lithologie simplifiée et des valeurs du Tableau 11 à toutes les unités stratigraphiques qui ne sont traversées par aucun TRT ou présentant un pourcentage moyen de longueur traversée %LT inférieur à 5%, ainsi que le Quaternaire (6 inconnues pour 18 TRT).
- **Cas N°4** : La conductivité thermique est imposée sur base de la lithologie simplifiée et des valeurs du Tableau 11 à toutes les unités stratigraphiques qui sont traversées par moins de 3 TRT, ainsi que le Quaternaire (8 inconnues pour 18 TRT).

Les résultats de ces 4 calculs sont présentés au Tableau 12. Les commentaires suivants peuvent être fournis sur les résultats :

- Les conductivités thermiques des unités stratigraphiques de Wemmel, Lede et Bruxelles, tant non-saturée que saturée, de Moen saturée et de Saint-Maur saturée ne varient que très faiblement en fonction des cas envisagés. D'autre part, les conductivités thermiques obtenues pour ces unités stratigraphiques semblent réalistes. Ces valeurs seront donc adoptées dans la suite du document.
- La conductivité thermique du Quaternaire (non-saturé) varie relativement peu en fonction des cas envisagés. D'autre part, la conductivité thermique obtenue pour cette unité stratigraphique semble réaliste. Une valeur de 1.90 W/mK est donc adoptée pour le Quaternaire non-saturé.

- La conductivité thermique de l'unité stratigraphique de Tielt (saturée) est plus fortement influencée par les autres inconnues du problème. La conductivité thermique obtenue aux cas N°2 et 4 étant relativement élevée pour un silt saturé, il a été convenu de continuer ce travail avec la valeur issue du calcul basé sur la lithologie simplifiée (Tableau 11), à savoir 2.20 W/mK.
- La conductivité thermique de la unité stratigraphique de Aalbeke (saturée) est plus fortement influencée par les autres inconnues du problème. La conductivité thermique obtenue aux cas N°2 et 4 étant d'une part relativement différente, et d'autre part assez éloignée de la valeur issue du calcul basé sur la lithologie simplifiée pour une argile saturée (Tableau 11), il a été convenu de continuer ce travail avec la valeur issue du calcul basé sur la lithologie simplifiée (Tableau 11), à savoir 1.40 W/mK.
- La conductivité thermique de l'unité stratigraphique de Grandglise (saturée) ne semble pas être fortement influencée par les inconnues du problème. Cependant, la valeur obtenue n'est pas réaliste, car beaucoup trop élevée pour un sable saturé, et ce malgré le nombre important de TRT qui traversent cette unité stratigraphique. Des investigations complémentaires sont nécessaires pour déterminer la conductivité thermique de l'unité stratigraphique de Grandglise.
- La conductivité thermique de l'unité stratigraphique de Lincet (saturée) ne semble pas être fortement influencée par les inconnues du problème. Cependant, la valeur obtenue n'est pas réaliste, car trop faible pour une argile saturée, et ce malgré le nombre important de TRT qui traversent cette unité stratigraphique. Des investigations complémentaires sont nécessaires pour déterminer la conductivité thermique de l'unité stratigraphique de Lincet.

Ere	Unité stratigraphique	Etat de saturation	# TRT	%LT (%)	$\lambda$ (W/mK)			
					Cas N°1	Cas N°2	Cas N°3	Cas N°4
Quaternaire	Quaternaire	Non-saturé	17	8.3	1.89	1.93	1.60	1.60
		Saturé	2	0.2	2.20	2.20	2.20	2.20
Tertiaire	Diest	Non-saturé	0	-	1.80	1.80	1.80	1.80
		Saturé	0	-	2.60	2.60	2.60	2.60
	Bolderberg	Non-saturé	0	-	1.80	1.80	1.80	1.80
		Saturé	0	-	2.60	2.60	2.60	2.60
	Sint-Huibrechts-Hern	Non-saturé	0	-	1.60	1.60	1.60	1.60
		Saturé	0	-	2.20	2.20	2.20	2.20
	Onderdale	Non-saturé	0	-	1.80	1.80	1.80	1.80
		Saturé	0	-	2.60	2.60	2.60	2.60
	Ursel et Asse	Non-saturé	2	0.7	1.20	1.20	1.20	1.20
		Saturé	0	-	1.40	1.40	1.40	1.40
	Wemmel, Lede et Bruxelles	Non-saturé	13	13.1	1.69	1.72	1.63	1.65
		Saturé	11	10.8	2.60	2.61	2.63	2.65
	Vlierzele	Non-saturé	0	-	1.80	1.80	1.80	1.80
		Saturé	1	0.4	2.60	2.60	2.60	2.60
	Merelbeke	Non-saturé	0	-	1.20	1.20	1.20	1.20
		Saturé	1	0.5	1.40	1.40	1.40	1.40
	Tielt	Non-saturé	1	0.03	1.60	1.60	1.60	1.60
		Saturé	3	1.6	2.20	2.45	2.20	2.86
	Aalbeke	Saturé	3	0.5	1.40	2.50	1.40	0.79
	Moen	Saturé	17	29.3	2.12	2.05	2.15	2.09
Saint-Maur	Saturé	17	23.3	1.45	1.43	1.54	1.53	
Grandglise	Saturé	10	5.3	4.19	4.38	4.06	4.19	
Lincet	Saturé	9	5.9	1.01	0.97	1.12	1.13	

Tableau 12 – Comparaison des conductivités thermiques obtenues par analyse inverse pour chaque unité stratigraphique (couleur grise = inconnues du problème ; autres valeurs fixées)

Les conductivités thermiques présentées au Tableau 13 sont donc adoptées pour la suite du document, sauf pour les unités stratigraphiques de Grandglise et Lincet qui restent à déterminer. Pour les autres unités stratigraphiques, les valeurs sont proches de celles obtenues sur base de la lithologie simplifiée (Tableau 11). D'autre part, les conductivités thermiques obtenues sont toutes dans l'intervalle observé lors des tests de réponse thermique amélioré (ETRT – voir Tableau 4).

Ere	Unité stratigraphique	Etat de saturation	# TRT	%LT (%)	$\lambda$ (W/mK)	
					Résultat	ETRT
Quaternaire	Quaternaire	Non-saturé	17	8.3	1.90	1.4 - 2.2
		Saturé	2	0.2	2.20	
Tertiaire	Diest	Non-saturé	0	-	1.80	
		Saturé	0	-	2.60	
	Bolderberg	Non-saturé	0	-	1.80	
		Saturé	0	-	2.60	
	Sint-Huibrechts-Hern	Non-saturé	0	-	1.60	
		Saturé	0	-	2.20	
	Onderdale	Non-saturé	0	-	1.80	
		Saturé	0	-	2.60	
	Ursel et Asse	Non-saturé	2	0.7	1.20	
		Saturé	0	-	1.40	
	Wemmel, Lede et Bruxelles	Non-saturé	13	13.1	1.65	0.9 – 1.9
		Saturé	11	10.8	2.60	1.8 – 2.9
	Vlierzele	Non-saturé	0	-	1.80	
		Saturé	1	0.4	2.60	
	Merelbeke	Non-saturé	0	-	1.20	
		Saturé	1	0.5	1.40	
	Tielt	Non-saturé	1	0.03	1.60	1.4 – 2.2
		Saturé	3	1.6	2.20	
	Aalbeke	Saturé	3	0.5	1.40	
	Moen	Saturé	17	29.3	2.10	1.6 – 2.4
Saint-Maur	Saturé	17	23.3	1.45	1.4 – 2.2	
Grandglise	Saturé	10	5.3	?	1.9 – 2.6	
Lincet	Saturé	9	5.9	?	1.4 – 2.3	

Tableau 13 – Synthèse des conductivités thermiques obtenues pour chaque unité stratigraphique sur base de l'analyse inverse (les cellules grisées correspondent aux valeurs qui n'ont pas donné satisfaction)

### 5.1.3. Conductivités thermiques des unités stratigraphiques de Grandglise et Lincet

La méthodologie basée sur l'analyse inverse des résultats de TRT ne s'étant pas avérée concluante pour la détermination des conductivités thermiques des unités stratigraphiques de Grandglise et de Lincet, il est à présent envisager de mesurer directement en laboratoire la conductivité thermique des unités stratigraphiques de Grandglise et Lincet sur des échantillons collectés dans un forage de reconnaissance.

Le dispositif utilisé est le Thermal Conductivity Scanner (TCS), dont le principe consiste à déterminer la conductivité thermique d'un échantillon en mesurant sans contact à l'aide de capteurs infrarouges l'élévation de température en surface d'un échantillon chauffé de manière continue par une source mobile et concentrée sur la surface de l'échantillon<sup>14</sup>. Cette technologie, initialement conçue pour des matériaux rigides comme les roches et le béton, a montré récemment ses possibilités sur des échantillons de sols reconstitués par compactage<sup>15</sup>.

<sup>14</sup> Popov Y. et al. (1983), Non-contact evaluation of thermal conductivity of rocks with the aid of a mobile heat source. *Izv Phys. Solid Earth*. 19(7), 563-567.

<sup>15</sup> Gerard P. et al. (2019) Assessment of thermal conductivity scanner for the determination of soils thermal conductivities for geothermal applications. *European Geothermal Congress*.

Les échantillons de sols, de diamètre 50 mm et de hauteur 15 mm, ont été reconstitués sur base des cuttings collectés tous les mètres lors d'un forage réalisé à Anderlecht et interceptant sur 8 mètres la formation de Grandglise et sur 10,5 m la formation de Lincet. Au vu de la masse de sol collecté, du nombre d'échantillons de sols compactés nécessaires pour déterminer avec précision une conductivité thermique et de la description lithologique du forage d'Anderlecht, il a été suggéré de :

- diviser l'unité stratigraphique de Grandglise en deux groupes aux lithologies homogènes ;
- diviser l'unité stratigraphique de Lincet en trois groupes aux lithologies homogènes.

Les échantillons de sols sont reconstitués par compactage dynamique à la densité supposée du terrain en place. La densité du terrain en place a été extraite des notices explicatives des cartes géotechniques de Bruxelles.

D'autre part, l'impossibilité de compacter et de manipuler des échantillons saturés ne nous permettant pas la détermination directe de la conductivité thermique saturée de ces deux unités stratigraphiques, il a été suggéré de déterminer la conductivité thermique à différents teneurs en eau (inférieures à la teneur en eau saturée), et d'ensuite prédire la conductivité thermique saturée sur base d'un modèle semi-empirique existant, calibré sur nos données expérimentales et capable de prédire la conductivité thermique sur un large intervalle de teneurs en eau. Une telle méthodologie avait été préalablement testée avec succès sur un sol limoneux/silteux. Le modèle utilisé est celui proposé par Nikoosokhan et al.<sup>16</sup>, qui prédit la conductivité thermique  $\lambda$  sur base du jeu d'équations suivants :

$$\lambda = \lambda_{sec} + \lambda_e(\lambda_{sat} - \lambda_{sec}) \quad (5)$$

$$\lambda_{sat} = ax_s + b\gamma_d \quad (6)$$

$$\lambda_{sec} = cx_s + d\gamma_d \quad (7)$$

$$\lambda_e = \frac{\kappa S_r}{1 + (\kappa - 1)S_r} \quad (8)$$

$$\kappa = ex_s + f \quad (9)$$

où  $\lambda_{sec}$  et  $\lambda_{sat}$  sont respectivement la conductivité thermique sèche et saturée,  $x_s$  est la teneur en quartz,  $\gamma_d$  est la densité sèche,  $S_r$  est le degré de saturation et a, b, c, d, e et f sont des paramètres proposés par Nikoosokhan et al. sur base de la calibration de leur modèle sur un grand jeu de données expérimentales obtenues sur des sols de lithologies différentes.

A l'exception de la teneur en quartz  $x_s$ , les paramètres de ce modèle sont connus a priori :

- la densité sèche  $\gamma_d$  est déterminée à partir de la densité à laquelle l'échantillon de sol est compacté ;
- le degré de saturation  $S_r$  est déterminé à partir de la teneur en eau à laquelle l'échantillon de sol est compacté ;
- les paramètres a, b, c, d, e et f sont proposés par Nikoosokhan et al., comme expliqué ci-dessus.

La teneur en quartz  $x_s$  a été déduite pour chaque groupe en ajustant par la méthode des moindres carrés le modèle de Nikoosokhan et al. aux valeurs expérimentales. Par la suite, la conductivité thermique saturée a été prédite sur base du modèle pour chaque groupe d'échantillons. Les résultats sont présentés au Tableau 14, et comparés aux valeurs observées sur les tests de réponse thermique améliorés (ETRT). Les conductivités thermiques obtenues sont réalistes et coïncident avec l'intervalle de valeurs observées via les ETRT. De plus, l'unité stratigraphique de Grandglise, plus sableuse que

<sup>16</sup> Nikoosokhan S., Nowamooz H., Chazallon C. (2015) Effect of dry density, soil texture and time-spatial variable water content on the soil thermal conductivity. *Geomechanics and Geoengineering*. 11(2), 149-158.

Lincient, présente une conductivité thermique supérieure, ce qui est logique. Ces résultats sont donc adoptés pour la suite de l'étude.

Unité stratigraphique	Groupe	$\lambda$ (W/mK)		
		TCS par groupe	TCS par unité stratigraphique	ETRT
Grandglise	1	2.06	2.05	1.9 – 2.6
	2	2.04		
Lincient	3	1.99	1.90	1.4 – 2.3
	4	1.82		
	5	1.92		

Tableau 14 – Conductivités thermiques déterminées en laboratoire par le thermal conductivity scanner (TCS)

#### 5.1.4. Conclusions

Les conductivités thermiques présentées au Tableau 15 synthétise les valeurs déterminées pour chaque unité stratigraphique du Quaternaire et du Tertiaire présente à Bruxelles.

Ere	Unité stratigraphique	Etat de saturation	# TRT	%LT (%)	$\lambda$ (W/mK)
Quaternaire	Quaternaire	Non-saturé	17	8.3	1.90
		Saturé	2	0.2	2.20
Tertiaire	Diest	Non-saturé	0	-	1.80
		Saturé	0	-	2.60
	Bolderberg	Non-saturé	0	-	1.80
		Saturé	0	-	2.60
	Sint-Huibrechts-Hern	Non-saturé	0	-	1.60
		Saturé	0	-	2.20
	Onderdale	Non-saturé	0	-	1.80
		Saturé	0	-	2.60
	Ursel et Asse	Non-saturé	2	0.7	1.20
		Saturé	0	-	1.40
	Wemmel, Lede et Bruxelles	Non-saturé	13	13.1	1.65
		Saturé	11	10.8	2.60
	Vlierzele	Non-saturé	0	-	1.80
		Saturé	1	0.4	2.60
	Merelbeke	Non-saturé	0	-	1.20
		Saturé	1	0.5	1.40
	Tielt	Non-saturé	1	0.03	1.60
		Saturé	3	1.6	2.20
	Aalbeke	Saturé	3	0.5	1.40
	Moen	Saturé	17	29.3	2.10
Saint-Maur	Saturé	17	23.3	1.45	
Grandglise	Saturé	10	5.3	2.05	
Lincient	Saturé	9	5.9	1.90	

Tableau 15 – Conductivités thermiques par unité stratigraphique du Quaternaire et du Tertiaire

#### 5.2. Conductivités thermiques des unités stratigraphiques du Secondaire et du Primaire

Il s'agit à présent de déterminer les conductivités thermiques des unités stratigraphiques du Secondaire et du Primaire rencontrées en région de Bruxelles-Capitale. A cette fin, les 8 TRT traversant ces unités stratigraphiques sont considérés et une analyse inverse est réalisée en imposant pour les unités stratigraphiques du Quaternaire et du Tertiaire les conductivités thermiques sur base des valeurs du Tableau 15. Pour rappel, seule une conductivité thermique saturée est déterminée pour les unités stratigraphiques du Secondaire (Crétacé) et du Primaire (Cambrien).

Il est nécessaire de rappeler à ce stade les limites de cette méthodologie pour les unités stratigraphiques du Primaire, car la grande hétérogénéité tant lithologique qu'hydrogéologique de ces unités stratigraphiques ainsi que leur structure fortement plissée et faillée ne permettent pas de répondre aux hypothèses initiales de l'approche.

Les valeurs obtenues sont présentées au Tableau 16. Une conductivité thermique élevée est observée pour le Cambrien, ce qui est attendu car cette unité stratigraphique est constituée de roches massives et dès lors très conductrices. Cette unité stratigraphique étant très hétérogène d'un point de vue lithologique, des valeurs locales de 4 à 5 W/mK sont néanmoins possibles lorsque des horizons très conducteurs (quartzite) sont traversés. D'autre part, les conductivités thermiques obtenues sont bien dans l'intervalle de valeurs observées lors des essais ETRT.

Ere	Unité stratigraphique	Etat de saturation	# TRT	%LT (%)	λ (W/mK)	
					Résultat	ETRT
Quaternaire	Quaternaire	Non-saturé	8	3.5	1.90	1.4 - 2.2
		Saturé	5	0.2	2.20	
Tertiaire	Diest	Non-saturé	0	-	1.80	
		Saturé	0	-	2.60	
	Bolderberg	Non-saturé	0	-	1.80	
		Saturé	0	-	2.60	
	Sint-Huibrechts-Hern	Non-saturé	0	-	1.60	
		Saturé	0	-	2.20	
	Onderdale	Non-saturé	0	-	1.80	
		Saturé	0	-	2.60	
	Ursel et Asse	Non-saturé	0	-	1.20	
		Saturé	0	-	1.40	
	Wemmel, Lede et Bruxelles	Non-saturé	1	0.03	1.65	0.9 – 1.9
		Saturé	1	0.1	2.60	1.8 – 2.9
	Vlierzele	Non-saturé	0	-	1.80	
		Saturé	0	-	2.60	
	Merelbeke	Non-saturé	0	-	1.20	
		Saturé	0	-	1.40	
	Tielt	Non-saturé	0	-	1.60	1.4 – 2.2
		Saturé	0	-	2.20	
	Aalbeke	Saturé	1	0.1	1.40	
	Moen	Saturé	6	2.7	2.10	1.6 – 2.4
Saint-Maur	Saturé	8	7.7	1.45	1.4 – 2.2	
Grandglise	Saturé	8	2.6	2.05	1.9 – 2.6	
Lincant	Saturé	7	3.5	1.90	1.4 – 2.3	
Secondaire	Crétacé	Saturé	3	1.3	2.20	
Primaire	Cambrien	Saturé	7	18.5	2.95	2.0 – 6.0

Tableau 16 – Conductivités thermiques par unité stratigraphique (cellules grisées = inconnues du problème ; autres valeurs fixées)

## 6. Discussions

Au travers de l'analyse de l'erreur relative associée à la détermination de la conductivité thermique du sous-sol sur base des conductivités thermiques des unités stratigraphiques (Tableau 16) par rapport à la mesure expérimentale de terrain (TRT), il s'agit à présent de vérifier que la méthodologie utilisée pour déterminer la conductivité thermique du sous-sol en région de Bruxelles-Capitale :

- ne conduise pas à une surestimation ou une sous-estimation systématique de la conductivité thermique moyenne du sous-sol dans certaines gammes de conductivité thermique (biais associé à la méthode);
- ne conduise pas à une surestimation ou une sous-estimation systématique de la conductivité thermique moyenne du sous-sol dans certaines zones de la région de Bruxelles-Capitale (biais associé à la méthode), ce qui revient à vérifier l'hypothèse d'homogénéité en termes de conductivité thermique des unités stratigraphiques à l'échelle de la région de Bruxelles-Capitale;
- ne conduise pas à des dimensionnements fortement différents en termes de longueur de sondes géothermiques.

Ces analyses complémentaires seront menées sur les 18 TRT ne traversant que des couches du Quaternaire et/ou du Tertiaire. Le Tableau 17 présente une comparaison entre les conductivités thermiques mesurées sur le terrain via TRT à celles calculées sur base des conductivités thermiques de chaque unité stratigraphique (Tableau 16).

# TRT	Profondeur sonde (m)	$\lambda$ (W/mK)	
		TRT	Calculé
1	72	1.72	2.01
4	126	1.84	1.89
5	54	1.62	1.72
6	104	1.72	1.86
7	105	1.68	1.85
8	74	2.33	1.80
9	70	1.95	1.76
10	110	1.57	1.81
11	60	2.26	1.98
12	100	2.41	1.86
15	85	2.05	1.95
16	100	2.20	1.93
18	45	2.50	2.32
20	74	2.17	2.05
21	74.5	2.10	2.31
22	120	1.90	1.77
24	95	1.89	1.84
25	70	1.79	1.85

Tableau 17 – Comparaison entre la conductivité thermique du sous-sol mesurée sur le terrain pour les 18 TRT limités au Quaternaire et au Tertiaire et la conductivité thermique calculée sur base des conductivités thermiques de chaque unité stratigraphique

### 6.1. Aptitude du modèle à ne pas présenter d'erreur systématique dans certaines gammes de conductivité thermique

La Figure 5 illustre la comparaison entre les conductivités thermiques mesurées lors des 18 essais TRT et les conductivités thermiques calculées sur base de l'équation (1) et des conductivités thermiques de chaque unité stratigraphique (Tableau 17). La comparaison montre un léger biais induit par la méthode : la méthodologie a tendance à légèrement surestimer les terrains présentant une faible conductivité thermique ( $< 1.9$  W/mK) et à légèrement sous-estimer les terrains présentant une

conductivité thermique élevée ( $> 1.9 \text{ W/mK}$ ). L'impact de ces différences en termes de conductivité sur le dimensionnement de sondes géothermiques sera quantifié à la section 6.3.

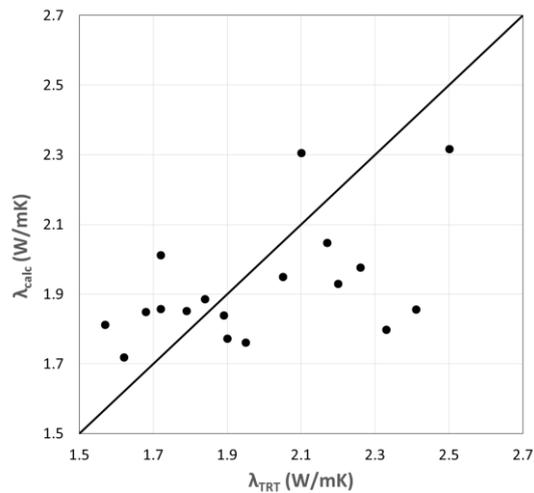


Figure 5 – Conductivité thermique mesurée en TRT vs. Conductivité thermique du sous-sol calculée par moyenne pondérée sur base des conductivités thermiques de chaque unité stratigraphique

Sur base des résultats du Tableau 17, l'erreur relative moyenne  $\delta\lambda_{rel,moy}$  et maximale  $\delta\lambda_{rel,max}$  sur la conductivité thermique induite par l'utilisation de la méthodologie a été calculée. Elle est présentée au Tableau 18, en distinguant les résultats en fonction de la conductivité élevée ( $> 1.9 \text{ W/mK}$ ) ou faible du terrain ( $< 1.9 \text{ W/mK}$ ).

	$\delta\lambda_{rel,moy}$ (%)	$\delta\lambda_{rel,max}$ (%)
$\lambda_{TRT} < 1.9 \text{ W/mK}$	7.5	16.9
$\lambda_{TRT} > 1.9 \text{ W/mK}$	-9.7	-22.8

Tableau 18 – Erreur relative moyenne et maxime commise sur la conductivité thermique du sous-sol en utilisant la conductivité thermique de chaque unité stratigraphique

## 6.2. Homogénéité de la conductivité thermique des unités stratigraphiques à l'échelle de la région de Bruxelles-Capitale

Sur base du Tableau 17, l'erreur relative a été calculée pour chaque TRT et cartographiée à la Figure 6. Cette Figure montre qu'il n'y a pas de biais spatial liée à la méthode employée. Il ne semble en effet ne pas y avoir de zones à Bruxelles où la conductivité thermique est systématiquement sous-estimée ou surestimée. L'hypothèse adoptée de conductivité thermique homogène au sein d'une même unité stratigraphique à l'échelle de la région de Bruxelles-Capitale semble donc pertinente.

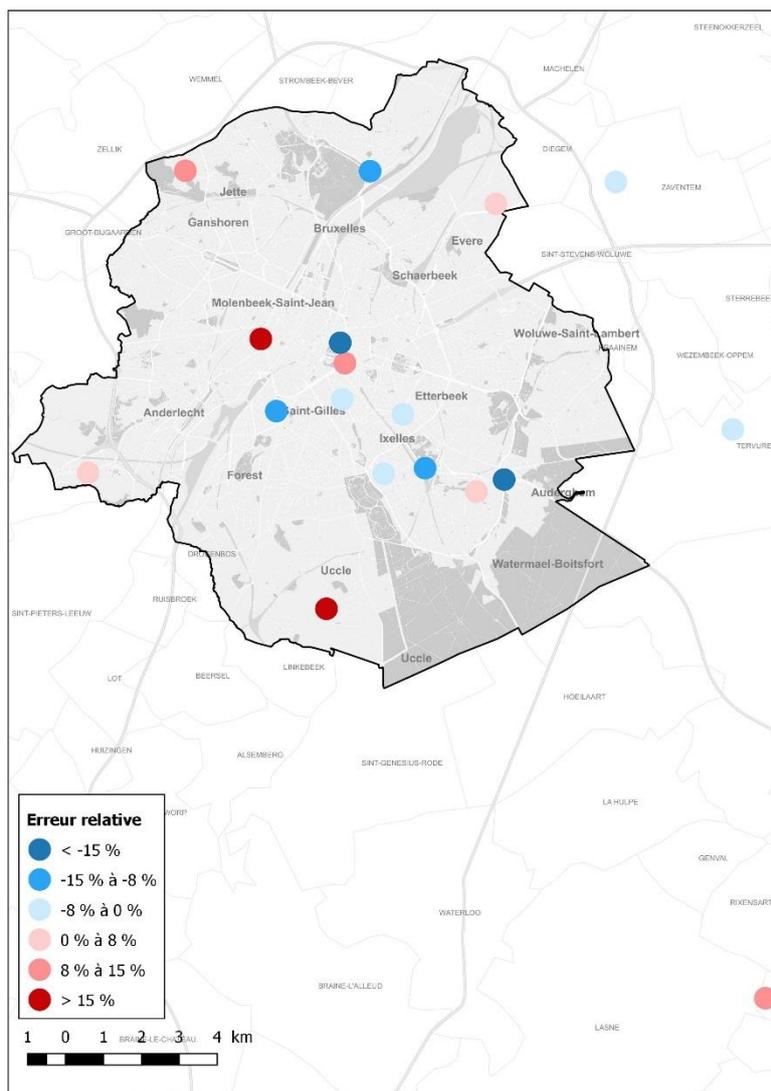


Figure 6 – Erreur relative entre conductivité thermique mesurée en TRT et conductivité thermique du sous-sol calculée par moyenne pondérée sur base des conductivités thermiques de chaque unité stratigraphique (valeur négative = sous-estimation de la conductivité thermique mesurée par TRT ; valeur positive = surestimation de la conductivité thermique mesurée par TRT)

### 6.3. Impact de l'erreur relative sur la conductivité thermique moyenne du sous-sol sur le dimensionnement de sondes géothermiques

L'objectif est à présent d'analyser et de quantifier comment l'erreur éventuellement commise sur l'estimation de la conductivité thermique du sous-sol par l'utilisation de la méthodologie développée dans ce document conduit à des erreurs en termes de dimensionnement de sondes géothermiques, à savoir la longueur de sonde géothermique nécessaire pour le chauffage et/ou le refroidissement d'un bâtiment. A cette fin, il sera fait référence à la norme hollandaise pour le dimensionnement des sondes géothermiques<sup>17</sup>, car il s'agit de la méthode de dimensionnement associée à la cartographie du potentiel géothermique proposée dans le cadre du projet de recherche Brugeo. Dans cette norme, la longueur de sonde nécessaire  $L_{sonde}$  est tout d'abord calculée sur base de la puissance à fournir par le sol et la puissance de pic sur base de paramètres comme le coefficient de performance de la pompe à chaleur, le nombre d'heures d'utilisation de la pompe à chaleur par an et le ratio entre les besoins de chauffage et de refroidissement du bâtiment. Ensuite, une série de facteurs correctifs sont appliqués

<sup>17</sup> ISSO73 (2005) Ontwerp en uitvoering van de verticale bodemwarmtewisselaars. Kennis Instituut, 149 p.

à la longueur de sonde obtenue afin de prendre en compte des paramètres divers comme la lithologie du sous-sol, le matériau de remplissage, la température minimum autorisée pour le fluide caloporteur, le type de sondes ou la configuration des sondes en cas de champs de sondes. Ces différents facteurs correctifs viennent multiplier la longueur de sonde initialement obtenue pour obtenir la longueur de sonde finale  $L_{sonde, final}$ . La conductivité thermique du sous-sol impacte deux de ces facteurs correctifs, à savoir celui relatif à la lithologie du sous-sol  $C_{sol}$  et celui relatif au matériau de remplissage  $C_{mat}$  (car le contraste de conductivité thermique entre le matériau de remplissage et le sous-sol affecte les transferts thermiques autour des sondes). Il est à noter que le coefficient correcteur relatif à la lithologie du sous-sol  $C_{sol}$  dépend également du ratio entre les besoins en froid et en chaud du bâtiment, ainsi que du nombre d'heures d'utilisation de la pompe à chaleur par an.

Soit deux bâtiments identiques et donc aux besoins similaires de chauffage et/ou de refroidissement, mais présentant des conductivités thermiques moyennes du sous-sol différentes. La longueur de sonde finale  $L_{sonde, final}$  sera obtenue par :

$$L_{sonde, final} = L_{sonde} C_{sol} C_{mat} \quad (10)$$

où  $L_{sonde}$  ne dépend que des besoins énergétiques du bâtiment et ne varie donc pas en fonction de la conductivité thermique du sous-sol.

L'erreur relative commise sur la longueur de sonde géothermique  $\delta L_{rel, sonde, final}$  à partir d'une erreur dans la détermination de la conductivité thermique du sous-sol se calcule donc par :

$$\delta L_{rel, sonde, final} = \frac{(C_{sol} C_{mat})_{\lambda_{TRT}} - (C_{sol} C_{mat})_{\lambda_{calc}}}{(C_{sol} C_{mat})_{\lambda_{TRT}}} \quad (11)$$

avec  $(C_{sol} C_{mat})_{\lambda_{TRT}}$  et  $(C_{sol} C_{mat})_{\lambda_{calc}}$  le produit des facteurs correctifs relatifs à la lithologie et au matériau de remplissage obtenus respectivement à partir de la conductivité thermique moyenne du sous-sol obtenue sur base du TRT ou calculée sur base des conductivités thermiques de chaque unité stratigraphique.

Les valeurs de ces facteurs correctifs dépendant selon la norme hollandaise de paramètres comme le ratio entre les besoins en chaud et en froid du bâtiment (% de régénération), la durée d'utilisation de la pompe à chaleur et le matériau de remplissage de la sonde géothermique, l'erreur relative sur la longueur de sonde  $\delta L_{rel, sonde, final}$  sera calculée pour trois scénarios d'extraction de chaleur du sous-sol définis au Tableau 19 et correspondant à :

- une situation critique où l'extraction de chaleur du sous-sol est maximale ;
- une situation favorable où l'extraction de chaleur du sous-sol est minimale ;
- une situation où l'extraction de chaleur du sous-sol sera proche celle d'une maison unifamiliale.

Les deux premiers scénarios permettent de déterminer l'intervalle possible d'erreur relative sur la longueur de sonde.

		0% régénération		100 % régénération	
		1500 h/an	3000 h/an	1500 h/an	3000 h/an
Matériau de remplissage	Bentonite ( $\lambda = 0.7 \text{ W/mK}$ )		Scénario critique		
	Bentonite ( $\lambda = 1.2 \text{ W/mK}$ )	Scénario maison unifamiliale			
	Sable ( $\lambda = 2.2 \text{ W/mK}$ )			Scénario favorable	

Tableau 19 – Définition des scénarios pour le calcul de l'erreur relative sur longueur finale de sonde géothermique

Les résultats sont présentés pour trois conductivités thermiques de référence ( $\lambda = 1.6 - 2.0$  et  $2.4$  W/mK) et sont fournis à la Figure 7. Ils doivent être analysés au regard des erreurs relatives moyennes et maximales données au Tableau 18.

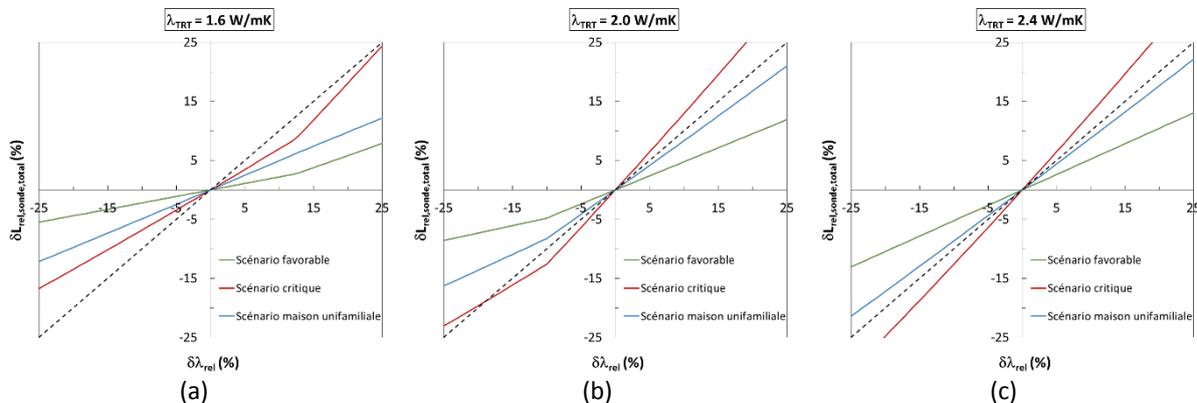


Figure 7 – Erreur relative sur la longueur de sonde en fonction de l’erreur relative sur la conductivité thermique pour différents scénarios d’extraction de chaleur du sous-sol et différentes conductivités thermiques du sous-sol ((a)  $\lambda=1.6$  W/mK - (b)  $\lambda=2.0$  W/mK - (c)  $\lambda=2.4$  W/mK)

Les conclusions suivantes peuvent être dressées :

- L’erreur relative sur la longueur de sonde augmente avec l’erreur relative sur la conductivité thermique du sous-sol, ce qui est attendu.
- L’erreur relative sur la longueur de sonde est la plus élevée lorsque l’extraction de chaleur du sous-sol est maximale, c’est-à-dire pas de régénération, 3000 h/an d’utilisation par an de la pompe à chaleur et matériau de remplissage peu conducteur.
- L’erreur relative sur la longueur de sonde augmente avec la conductivité thermique du sous-sol, même si l’erreur relative ne semble pas fortement augmenter entre  $\lambda=2.0$  et  $\lambda=2.4$  W/mK.
- Si ce n’est dans le scénario le plus critique, l’erreur relative sur la longueur de sonde est généralement inférieure à l’erreur relative sur la conductivité thermique.
- En considérant les erreurs relatives moyennes sur la conductivité thermique mentionnée au Tableau 18, l’erreur relative commise sur la longueur de sonde dans le scénario « maison unifamiliale » est de 3.7% si  $\lambda=1.6$  W/mK, de 8% si  $\lambda=2.0$  W/mK et de 8.4% si  $\lambda=2.4$  W/mK. De telles erreurs moyennes sur la longueur sonde sont acceptables au vu des hypothèses considérées dans la méthodologie.

## 7. Conclusions

Ce document propose une méthodologie pour déterminer la conductivité thermique des unités stratigraphiques rencontrées en région de Bruxelles-Capitale sur base principalement des résultats de tests de réponse thermique (TRT) réalisés à Bruxelles. Ces conductivités thermiques sont appelées à être utilisées dans la cartographie du potentiel géothermique à Bruxelles en vue de l'installation de sondes géothermiques (systèmes fermés). Au sein d'une même unité stratigraphique, la méthodologie employée distingue la conductivité thermique saturée (sous la nappe) de la conductivité thermique non-saturée (au-dessus de la nappe), en faisant l'hypothèse qu'au sein d'une même unité stratigraphique, la teneur en eau au-dessus de la nappe est constante et homogène à l'échelle de la région de Bruxelles-Capitale.

Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 16. Une analyse détaillée de ces résultats a permis de montrer qu'il n'existait pas de biais spatial lié à la méthodologie, en d'autres termes que l'hypothèse de conductivité thermique homogène à l'échelle de la région bruxelloise était raisonnable. La méthodologie semble cependant légèrement surestimer la conductivité thermique des sols peu conducteurs ( $\lambda < 1.9$  W/mK) et sous-estimer celle des sols plus conducteurs ( $\lambda > 1.9$  W/mK), avec des erreurs relatives moyennes sur la conductivité thermique inférieures à 10%.

Finalement, l'impact de l'erreur sur la conductivité thermique sur le dimensionnement de sondes géothermiques est analysé, et en particulier sur la longueur de sonde nécessaire pour alimenter en chaud et/ou froid un bâtiment donné. L'erreur relative sur la longueur de sonde est d'autant plus élevée que le sous-sol est conducteur, que le matériau de remplissage des forages géothermiques est peu conducteur, et que l'extraction de chaleur du sous-sol est maximale (uniquement chauffage et nombre d'heures annuel d'utilisation de la pompe à chaleur élevé). Dans le cas typique d'une maison unifamiliale, en considérant les erreurs moyennes sur la détermination de la conductivité thermique, l'erreur relative moyenne sur la longueur de sonde reste cependant inférieure à 10%.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de recherche Brugeo, financé par la Région de Bruxelles-Capitale et l'Union Européenne dans le cadre de la programmation FEDER 2014-2020. Les auteurs souhaitent remercier Bruxelles-Environnement, l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, la Vrije Universiteit Brussel et le Centre Scientifique et Technique de la Construction, partenaires de ce projet de recherche, pour leurs remarques constructives qui ont permis d'améliorer la qualité de ce travail. En particulier, les auteurs souhaitent remercier l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique pour la mise à disposition de l'équipement Thermal Conductivity Scanner et des cuttings collectés lors d'un forage à Anderlecht.