

Avril 2021

Etude d'incidences

Projet de construction du « **Métro Nord** »

Lot 2 : Ligne Liedts-Bordet

LIVRE II – Tunnel

Demandeur



Mandaté par



Auteur de l'étude



en collaboration avec



Table des matières

PARTIE 1 : DESCRIPTION DU PROJET.....	1
1. DESCRIPTION DU PROJET POUR SA PARTIE SOUTERRAINE	3
1.1. Le tracé	3
1.2. Le tunnel.....	6
1.3. Chiffres clefs du tunnel	11
1.4. Les ouvrages connexes	12
1.4.1. Puits P0	12
1.4.2. Rampe d'accès au dépôt	13
1.4.3. Connection au puits P5 gare du nord.....	14
2. DESCRIPTIONS DES SOLUTIONS TECHNIQUES DE CONCEPTION DU TUNNEL ET DES OUVRAGES CONNEXES.....	16
2.1. Principe d'exécution du tunnel.....	16
2.2. Choix du tunnelier	19
2.3. Principe d'exécution du puits P0 et de la rampe d'accès	22
2.4. Etanchéité des ouvrages	22
2.4.1. Etanchéité du tunnel.....	22
2.4.2. Etanchéité des stations	23
3. DESCRIPTION DES CONTRAINTES LIÉES AU MODE CONSTRUCTIF ET AU MODE D'EXPLOITATION DU PROJET	24
3.1. Contraintes liées au creusement au tunnelier	24
3.2. Contraintes liées à l'exploitation.....	26
3.2.1. Tracé en plan.....	26
3.2.2. Profil en long	26
4. DESCRIPTION DU CHANTIER	27
4.1. Quantitatif des matériaux.....	27
4.2. Phase de réalisation.....	27
4.3. Installations temporaires et implantation du chantier	28
4.3.1. Installations de chantier – Site du dépôt de Haren.....	29
4.3.2. Installations de chantier – Puits P5.....	33
4.4. Gestion des déblais et transports des matériaux	34
4.4.1. Chiffres clés	34
4.4.2. Concernant spécifiquement les déblais du tunnel.....	35
4.4.3. Transport des déblais.....	37
4.4.4. Destination possible des déblais hors valorisation	42
5. CALENDRIER DE RÉALISATION	43
6. ANALYSE DES INCIDENCES DU PROJET AU REGARD DE LA SITUATION DE RÉFÉRENCE ET RECOMMANDATIONS.....	45
6.1. Mobilité.....	45
6.1.1. Modélisation comparative BMN - MUSTI.....	45
6.1.2. Conclusion de l'analyse comparative.....	52
6.1.3. Evaluation du report modal dû à la mise en œuvre du Métro Nord	55
6.1.4. Incidences du transport des déblais (du tunnel) suivants les 2 hypothèses de chargement retenues	59
6.2. Urbanisme, aménagement du territoire et patrimoine	69
6.2.1. Impact sur les parcelles	69
6.2.2. Impact sur le patrimoine	87
6.2.3. Incidences du transport des déblais (du tunnel) suivants les 2 hypothèses retenues	95
6.3. Domaines social et économique.....	96
6.3.1. Coûts d'investissement.....	96
6.3.2. Mise en perspective des coûts d'investissement.....	98
6.3.3. Planning travaux	100
6.3.4. Incidences du transport des déblais (du tunnel) suivants les 2 hypothèses retenues	100

6.3.5. Impact sur le foncier.....	103
6.3.6. Conclusions.....	103
6.4. Sol, sous-sol et eaux souterraines.....	104
6.4.1. Aire géographique.....	104
6.4.2. Cadre réglementaire et références.....	104
6.4.3. Description de la situation existante.....	105
6.4.4. Analyse des incidences du projet en situation de référence.....	111
6.4.5. Mesures mises en œuvre par le demandeur en vue d'éviter, supprimer ou réduire les incidences négatives sur le sol et les eaux.....	153
6.4.6. Recommandations sur le projet, les alternatives et les variantes.....	154
6.4.7. Tableau de synthèse des recommandations.....	159
6.4.8. Conclusion en matière de sols et eaux.....	161
6.5. Faune et flore.....	163
6.6. Qualité de l'air.....	163
6.7. Energie.....	163
6.7.1. Récupération de l'énergie de freinage.....	165
6.7.2. Potentiel géothermique.....	167
6.7.3. Recommandations sur le projet.....	178
6.8. Environnement sonore et vibratoire.....	178
6.8.1. Aire géographique.....	178
6.8.2. Cadre réglementaire et références.....	178
6.8.3. Description de la situation existante.....	178
6.8.4. Analyse des incidences du projet en situation de référence.....	186
6.8.5. Mesures mises en œuvre par le demandeur en vue d'éviter, supprimer ou réduire les incidences négatives sur le bruits et les vibrations.....	202
6.8.6. Recommandations sur le projet, les alternatives et les variantes en phase d'exploitation.....	202
6.8.7. Analyse des incidences sonores et vibratoires du chantier.....	203
6.8.8. Conclusions en matière de bruit et de vibrations.....	228
6.9. Être humain.....	229
6.9.1. Cadre réglementaire et références.....	229
6.9.2. Cadre réglementaire et références prévus en demande de permis.....	230
6.9.3. Sécurité objective.....	230
6.9.4. Recommandations sur le projet.....	256
6.9.5. Tableaux de synthèse des recommandations sur le projet monotube.....	260
6.9.6. Conclusion.....	263
6.10. Microclimat.....	266
6.11. Déchets.....	266
7. TABLEAUX DE SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS SUR LE PROJET.....	267
7.1. Mobilité.....	267
7.2. Urbanisme, aménagement du territoire et patrimoine.....	268
7.3. Domaines social et économique.....	268
7.4. Sol, sous-sol et eaux souterraines.....	268
7.5. Faune et flore.....	271
7.6. Qualité de l'air.....	271
7.7. Energie.....	271
7.8. Environnement sonore et vibratoire.....	271
7.9. Être humain.....	272
7.10. Microclimat.....	275
7.11. Déchets.....	275
PARTIE 2 : DESCRIPTION DE L'ALTERNATIVE DE CONCEPTION (BITUBE).....	277
1. INTRODUCTION.....	279
2. PRÉSENTATION DE L'ALTERNATIVE BITUBE.....	280
2.1. Le tracé.....	280
2.1.1. Tronçon Gare du Nord – Liedts.....	281
2.1.2. Tronçon Colignon – Verboekhoven.....	283

2.1.3. Tronçon Verboekhoven - Riga.....	283
2.1.4. Tronçon Riga - Tilleul.....	283
2.1.5. Tronçon Tilleul - Paix.....	284
2.1.6. Tronçon Paix - Bordet.....	285
2.1.7. Tronçon Bordet – Puits P0.....	286
2.2. Les tunnels.....	287
2.2.1. Profil en long.....	287
2.2.2. Coupe type du tunnel.....	289
2.3. Chiffres clefs du Bi-tube.....	291
2.4. Les ouvrages connexes.....	292
2.4.1. Modification du puits P0 et de la rampe d'accès.....	292
2.4.2. Connexion au puits P5.....	293
2.5. Ouvrages d'interconnexion des voies (ouvrages de bifurcation).....	296
2.5.1. Principe de fonctionnement.....	296
2.5.2. Les ouvrages d'interconnexions prévus sur la ligne N/B.....	299
2.1. Cross-passage.....	302
3. DESCRIPTION DES CONTRAINTES LIÉES AU MODE CONSTRUCTIF ET AU MODE D'EXPLOITATION DE L'ALTERNATIVE.....	304
3.1. Contraintes liées au creusement de deux tunnels.....	304
4. DESCRIPTIONS DES SOLUTIONS TECHNIQUES DE CONCEPTION DU TUNNEL BI-TUBE.....	305
4.1. Principe d'exécution des tunnels.....	305
4.2. Principe d'exécution des ouvrages de bifurcation.....	305
4.3. Principe d'exécution de l'ouvrage de jonction P5 - Liedts.....	306
4.4. Principe d'exécution des rameaux de connexion.....	306
5. DESCRIPTION DU CHANTIER.....	307
5.1. Quantitatif des matériaux.....	307
5.2. Phase de réalisation.....	307
5.2.1. Creusement des cross passage.....	310
5.3. Installations temporaires et implantation du chantier.....	311
5.3.1. Puits P0 et rampe.....	311
5.3.2. Tunnels.....	311
5.3.3. Ouvrages de bifurcation et ouvrage de jonction entre le puits P5 et la station Liedts.....	311
5.4. Gestion des déchets.....	311
5.5. Calendrier de réalisation.....	311
6. ANALYSE DES INCIDENCES DE L'ALTERNATIVE BITUBE EN SITUATION DE RÉFÉRENCE (PAR RAPPORT À LA SITUATION MONOTUBE) ET RECOMMANDATIONS.....	315
6.1. Mobilité.....	315
6.2. Urbanisme, aménagement du territoire et patrimoine.....	315
6.2.1. Conformité du tracé avec le cadre réglementaire.....	315
6.2.2. Impact sur les parcelles.....	315
6.2.3. Impact sur le patrimoine.....	316
6.3. Domaines social et économique.....	316
6.3.1. Coûts d'investissement.....	316
6.3.2. Planning travaux.....	320
6.3.3. Impact sur le foncier.....	320
6.4. Sol, sous-sol et eaux souterraines.....	321
6.4.1. Eaux souterraines.....	321
6.4.2. Tassements.....	331
6.4.3. Ouvrages de bifurcation.....	343
6.4.4. Recommandations.....	343
6.5. Faune et flore.....	345
6.6. Qualité de l'air.....	345
6.7. Energie.....	345
6.8. Environnement sonore et vibratoire.....	345
6.8.1. Analyse des incidences de l'alternative bitube.....	345

6.8.2. Recommandations	346
6.9. Être humain	347
6.9.1. Sécurité objective	347
6.10. Microclimat	360
6.11. Déchets	360
7. TABLEAU DE SYNTHÈSES DES RECOMMANDATIONS POUR LE BITUDE	361
7.1.1. Mobilité	361
7.1.2. Urbanisme, aménagement du territoire et patrimoine	361
7.1.3. Domaines social et économique	361
7.1.4. Sol, sous-sol et eaux souterraines	361
7.1.5. Faune et flore	361
7.1.6. Qualité de l'air	361
7.1.7. Energie	361
7.1.8. Environnement sonore et vibratoire	362
7.1.9. Être Humain	362
8. SYNTHÈSE DE LA COMPARAISON MONOTUBE – BITUBE	363
8.1. Profil en long	363
8.2. Quantité de déblais	364
8.2.1. Tunnels	364
8.2.2. Stations	364
8.2.3. Voies	365
8.3. Conclusions	366
PARTIE 3 : NOTE DE FAISABILITÉ TECHNIQUE D'UN OUVRAGE DE PROLONGEMENT AU-DELÀ DE BORDET	369
1.1. Schéma d'exploitation de la demande de PU et contraintes	371
1.2. Schéma d'exploitation dans le cas d'un prolongement et contraintes	373
1.2.1. Option Bordet	374
1.2.2. Option Décathlon/Citydev (amorce longue)	376
1.2.3. Option Planeur (amorce courte)	377
1.2.4. Option Décathlon (amorce courte)	379
1.3. Conclusion sur la faisabilité technique d'un ouvrage de prolongement vers le nord-est	382
1.3.1. Contexte de l'analyse	382
1.3.2. Synthèse de l'avis du CE	385
1.3.3. Conclusion quant à la faisabilité technique d'un ouvrage de prolongement	387
1.4. Recommandations quant à la faisabilité technique d'un ouvrage de prolongement	388
PARTIE 4 : ANALYSE DES INCIDENCES DE LA VARIANTE DE GESTION DES EAUX D'INFILTRATION	389
1.1. Description de la variante	391
1.1.1. Principe général	391
1.1.2. Identification des exutoires et points de relevage	392
1.1.3. Exutoire 1 : Liedts/Gare du Nord vers la Senne	393
1.1.4. Exutoire 2 : Tilleul vers le Kerkebeek	394
1.2. Analyse de la variante - Sol, sous-sol et eaux souterraines	396
1.2.1. Débits aux exutoires	396
1.2.2. Principe des stations de pompage / relevage	397
1.2.3. Traitement des eaux de drainage	405
1.2.4. Impact sur le réseau d'égouttage et la station d'épuration	412
1.2.5. Impact sur le réseau d'eau de surface	412
1.3. Analyse de la variante – Energie	416
1.4. Analyse de la variante – social et économique	417
1.5. Conclusion et recommandations sur la variante de gestion des eaux	418

Partie 1 : Description du projet

1. Description du projet pour sa partie souterraine

1.1. Le tracé

Le tracé de la nouvelle ligne de métro est constitué d'un tunnel, creusé au tunnelier, mesurant 4,5 km de long. Son emprise s'étend de la Gare du Nord, au niveau de la rue d'Aerschot, jusqu'au niveau du site de maintenance, situé au dépôt de Haren. Il dessert, sur les communes de Schaerbeek, Evere, Bruxelles dans l'ordre suivant les stations Liedts, Colignon, Verboekhoven, Riga, Tilleul, Paix et Bordet, dépôt de Haren, comme illustré sur la figure ci-dessous. La carte est également reprise dans l'atlas cartographique.

Voir Atlas cartographique, carte 1.1. Métro – Localisation dans la structure existante

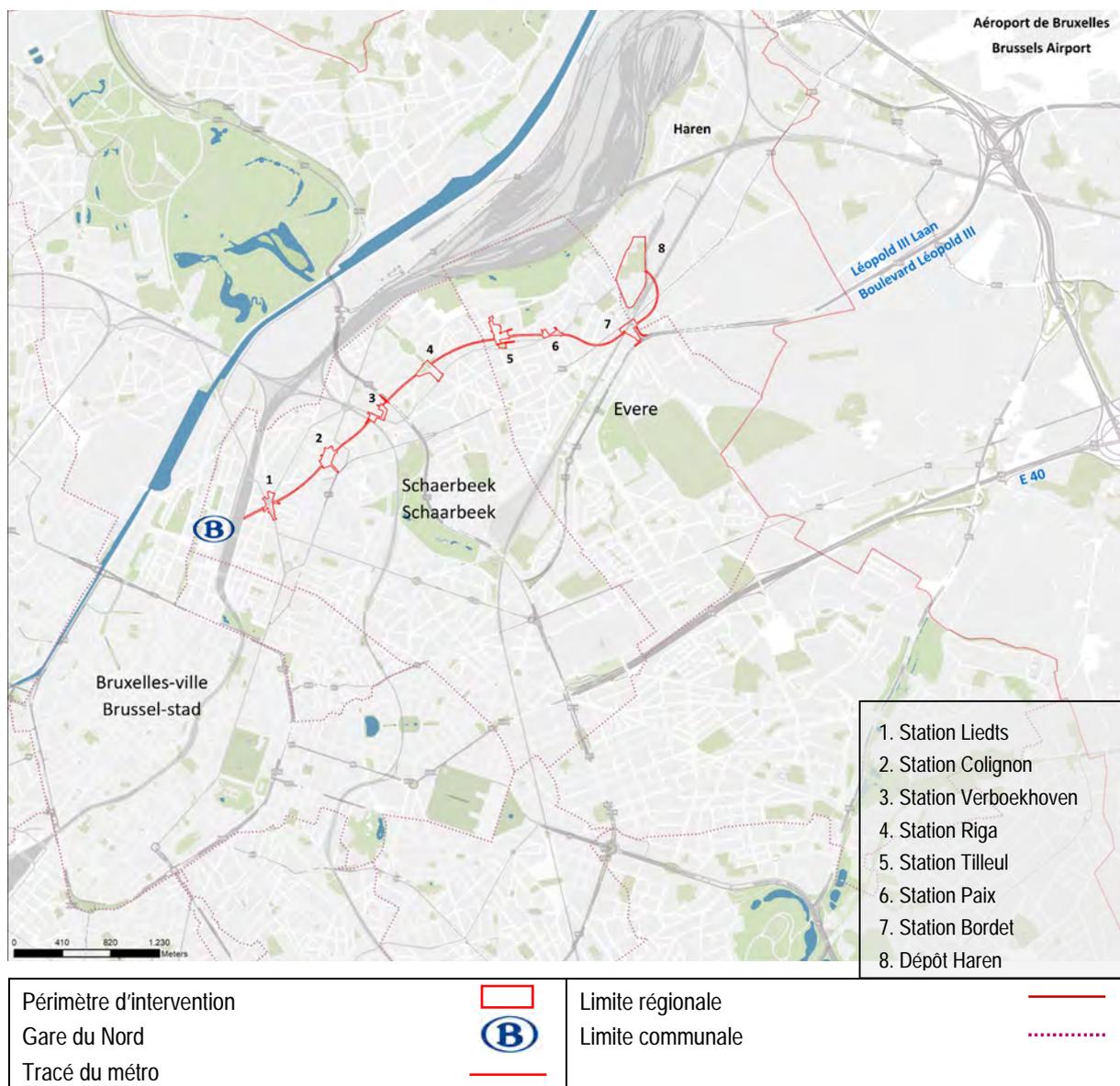


Figure 1 : Tracé du métro et localisation des futures stations (ARIES sur fond BruGIS, 2019)

La description du contexte souterrain est reprise dans le Livre I (partie 2 – Chapitre 3).

La figure ci-dessous synthétise le contexte géologique du tracé le long du tracé du tunnel.

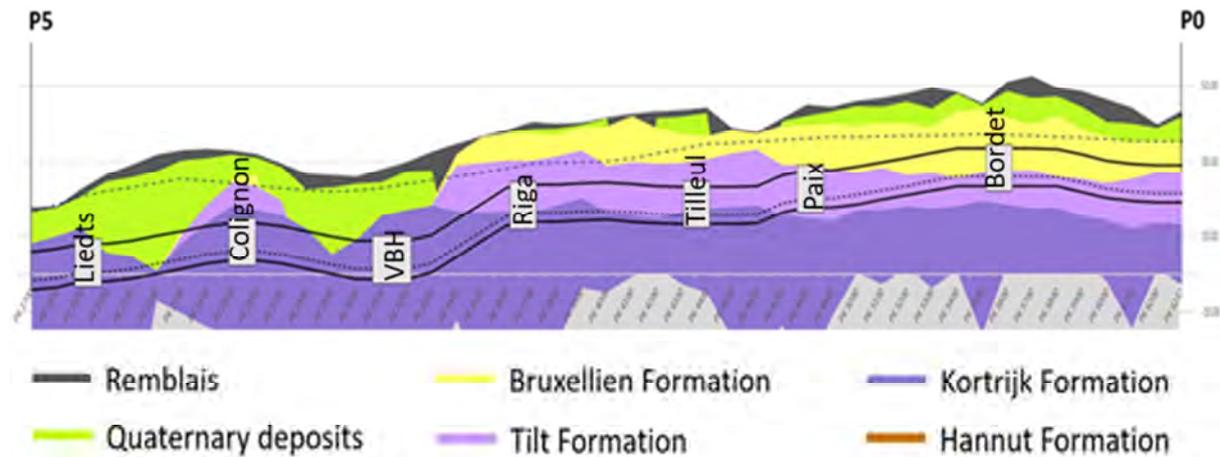


Figure 2 : Synthèse géologique le long du tracé (BMN, 2020)

Le sous-sol de la zone concernée par le projet, est composé de haut en bas, des terrains suivants :

	Description	Localisation	épaisseurs
Remblais divers	Lithologie hétérogène	Observés sur l'ensemble du tracé	Variable (0 à 12-14m)
Dépôts du Quaternaire			
Dépôt nivo-éoliens du Weichselein	Limons gris jaunâtres dont le comportement mécanique est fortement liés à la présence d'eau.	Observés sur les plateaux et sur les pentes	L'épaisseur des limons est plus importante sur le versant occidental (jusqu'à 16m) tandis que sur les plateaux, sa présence est plus sporadique (0 à 6 m)
Alluvions fluviales	Argiles, limons, sables et graviers alluviaux	Observées dans les vallées de la Senne (gare du Nord, et station Liedts) et de Maelbeek (station Verboeckhoven)	Epaisseur variable pouvant atteindre 10 m dans la vallée de la Senne et 15 m dans la vallée de Maelbeek

	Description	Localisation	épaisseurs
Dépôts du Tertiaire			
Formation de Lede	Sable calcaire fin gris glauconifère, parfois induré avec la présence de quelques grès calcaireux.	Peu ou pas observé sur l'ensemble du tracé mais pourrait être localement présente entre la station Bordet et le dépôt Haren	Inférieure à 3 m
Formation de Bruxelles	Les sables Bruxelliens sont composés du sommet à la base d'un niveau de grès calcaireux perforé avec de nombreuses coquilles, de sables fins très calcaireux, de sables assez fins peu calcaireux, de sables quartzeux assez grossiers, et de sables grossiers siliceux blancs ou rougeâtres.	Présente sur grande partie du tracé, hormis dans les vallées de la Senne (stations gare du Nord, Liedts) et de Maelbeek (station Verboeckhoven)	L'épaisseur est variable le long du tracé de quelques m au niveau de la station Colignon, son épaisseur augmenter progressivement en rive droite de la Senne pour atteindre quasiment 25 m entre la station Bordet et le dépôt Haren
Formation de Tielt	Dépôts hétérogènes de sables très fins, verdâtres (glauconifères), argileux présentant localement des lentilles d'argile et des bancs continus ou lenticulaires de fossiles agglomérés	La formation apparaît au nord-ouest du tracé entre les stations Verboeckhoven et Riga	D'épaisseur moyenne de 20 m elle se réduit progressivement à partir de la station Riga en direction du Sud-Ouest
Formation de Kortrijk	La formation de Kortrijk est caractérisée par une alternance d'argiles sableuses et de sables argileux.	La formation est recoupée par l'ensemble du tracé.	De l'ordre de 60 m
<i>Membre d'Aalbeke</i>	Argile foncée homogène et compacte	Difficilement observable et identifiable au vu de sa faible épaisseur et son érosion potentielle.	Quand elle est observée elle présente une épaisseur moyenne de l'ordre 4 m
<i>Membre de Moen</i>	Dépôt très hétérogène de silts et sables avec des zones argileuses.	Observé sur l'ensemble du tracé	Epaisseur variable, de l'ordre de 5 m dans les vallées (stations Liedts et Verboeckhoven) et de l'ordre de 20 à 3 m sur les pentes et plateaux.

	Description	Localisation	épaisseurs
<i>Membre de Saint-Maur</i>	Argile à silts fin, avec de fines intercalations silteuses Les reconnaissances ont permis d'identifier la présence de deux couches argileuses continues, interrompues par une couche de sable argileux. Sur la rive droite de la Senne (à partir de la station Riga), seule la couche argileuse supérieure ainsi que la couche intermédiaire de sable argileux est investiguée	Observé sur l'ensemble du tracé	D'une épaisseur totale de 30 m, les reconnaissances de sols ont permis de distinguer : Une couche d'argile supérieur d'une épaisseur de l'ordre de 5 m. Une couche de sable argileux de l'ordre 5 à 8 m d'épaisseur. Une couche d'argile dont l'épaisseur totale n'a pas été investiguée mais qui pourrait atteindre 15 à 20 m.

Tableau 1 : Synthèse des formations géologiques rencontrées le long du tracé du tunnel

D'un point de vue hydrogéologique, le tracé du projet se situe principalement au sein de deux formations géologiques :

- dans le Membre de Moen (aquitard) entre la Gare du Nord et la station de Verboekhoven.
- dans les Formations de Tielt (aquifère/aquitard) et de Bruxelles (aquifère), sur les hauteurs du versant Est de la Senne.

L'écoulement des nappes souterraines est globalement orienté vers le Nord-Nord-Ouest. Sur base du rapport de modélisation hydrogéologique d'Artesia (2020), il apparaît que les impacts sur la piézométrie (rabattement), au niveau des stations, soient un peu plus importants au sein des formations de Tielt, après la troisième station de Verboekhoven jusqu'à Bordet. En ce qui concerne les débits drainés par tronçon de tunnel (en l/h.km) celui-ci est le plus élevé au droit des stations Gare du Nord / Liedts (avec des valeurs allant jusqu'à 380 l/h.km) pour décroître progressivement à mesure qu'on se dirige vers le nord-est (jusqu'à 250 l/h.km au niveau des stations Tilleul / Paix / Bordet). Le débit moyen global est de l'ordre de 280 l/h/km pour l'ensemble du tracé.

1.2. Le tunnel

La figure ci-dessous illustre une coupe à travers le tunnel. Celui-ci relie les différentes stations sous la forme d'un monotube contenant les deux voies de métro.

Les caractéristiques du tunnel sont les suivantes :

- Diamètre extérieur du tunnel : 9,7 m.
- Diamètre intérieur du tunnel : 8,9 m.

- Diamètre fonctionnel du tunnel : 8,7 m.
- Revêtement en béton armé (voussoirs) de 40 cm d'épaisseur.
- Injection de mortier dans le vide annulaire (espace entre l'extérieur des voussoirs et le terrain naturel).
- Mise en place de joints entre les voussoirs pour assurer l'étanchéité du tunnel.
- Mise en place d'un drain dans la partie basse du tunnel pour récupérer les eaux d'infiltrations.
- Deux passerelles, une de chaque côté des voies, sont prévues au niveau du plancher des rames de métro pour l'évacuation des passagers en cas d'incident dans le tunnel.
- Deux boosters au plafond

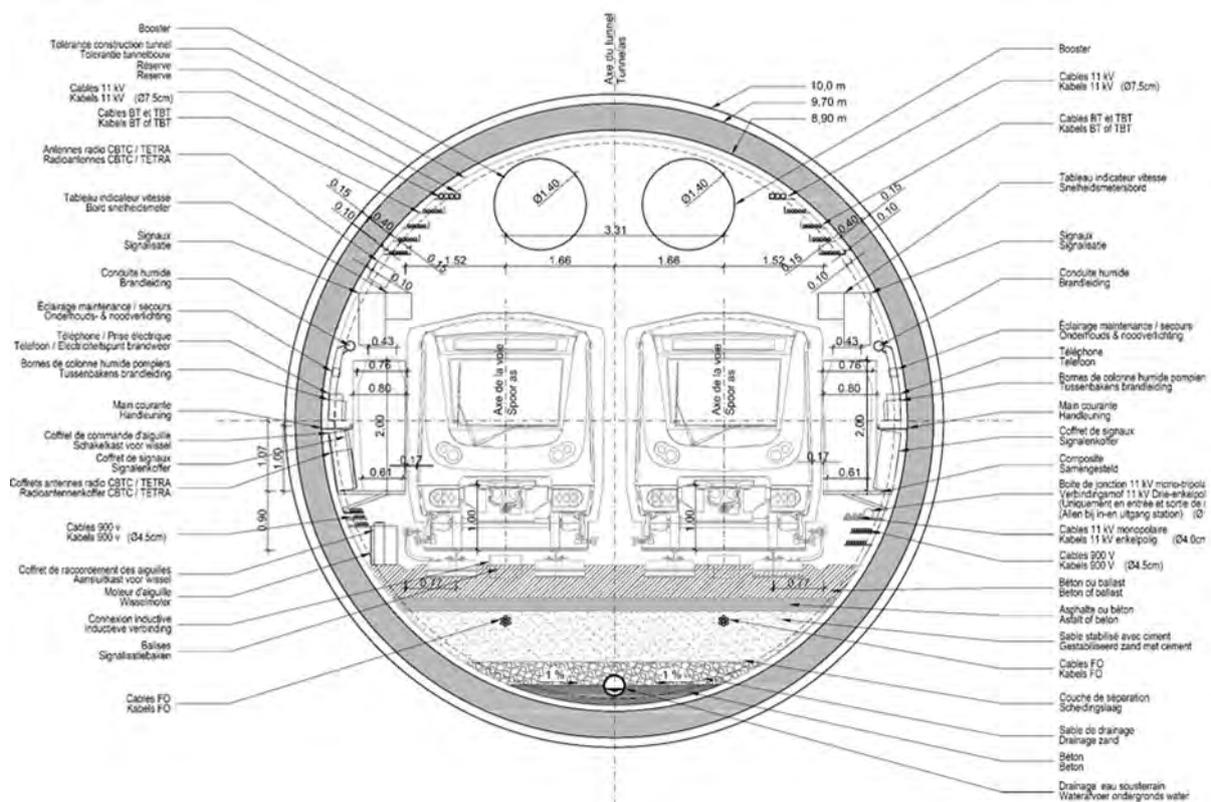


Figure 3 : Coupe transversale du tunnel monotube (BMN, 2018)

La figure est également reprise dans l'atlas cartographique.

Voir Atlas cartographique, carte 2.1. Tunnel, Coupes transversales

La coupe du profil en long du tunnel est reprise dans l'atlas cartographique.

Voir Atlas cartographique, carte 2.2. Tunnel, Profil en long

Le tunnel est un ouvrage réalisé au tunnelier à une profondeur de creusement de 23 m en moyenne (point bas du forage) sous le niveau du terrain naturel. La construction du tunnel

s'effectue depuis le puits P0 situé au droit du futur dépôt de Haren jusqu'au puits P5, situé près de la gare du Nord, dans lequel le tunnelier sera démonté.

Le profil en long du tunnel a été défini sur base des hypothèses de construction, de maintenance, d'exploitation et de sécurité. La demande de PU relate les avantages suivants :

- « *Construction : simplification au niveau de la conduite du tunnelier (changement de direction verticale réduits).* »
- *Maintenance : réduction du nombre de points bas et donc du nombre de stations de pompage.*
- *Exploitation : confort des voyageurs lié au nombre de changements de direction verticale limités.*
- *Stabilité et limitation des tassements : le profil en long prend en compte les résultats des différents calculs réalisés en phase d'étude (sur base des essais de sol réalisés). »*

Le tunnel est divisé en plusieurs tronçons qui correspondent aux liaisons entre chaque station. Les caractéristiques de chaque tronçon sont les suivantes :

- P0 – Bordet :
 - Hauteur de couverture ¹minimum : 9,1 m.
 - Hauteur de couverture maximum : 24 m.
 - Longueur du tronçon : 620,1 m.
 - Pente maximum : 1,6%
 - Rayon de courbure minimum : 250 m.
 - Le tracé passe sous les voies d'essais de la STIB, la ligne 26 d'Infrabel, le bassin d'orage de l'OTAN et la zone commerciale d'Evere.
 - Sous le niveau de la nappe.
 - Dans les formations du Bruxellien et de Tielt.
- Bordet – Paix :
 - Hauteur de couverture minimum : 12,4 m.
 - Hauteur de couverture maximum : 19,6 m.
 - Longueur du tronçon : 636,72 m.
 - Pente maximum : 1,2%
 - Rayon de courbure minimum : 250 m.
 - Le tracé passe sous la ligne 26 d'Infrabel et une zone résidentielle.
 - Sous le niveau de la nappe.
 - Dans les formations du Bruxellien et de Tielt.

¹ La hauteur de couverture correspond à la hauteur de terrain situé au-dessus du toit du tunnel

- Paix – Tilleul :
 - Hauteur de couverture minimum : 12,7 m.
 - Hauteur de couverture maximum : 18,2 m.
 - Longueur du tronçon : 315,33 m.
 - Pente maximum : 3,2%
 - Rayon de courbure minimum : 1000 m.
 - Le tracé passe sous l'académie de musique d'Evere et l'ancienne ferme 't Hoeveke (bâtiment classé).
 - Sous le niveau de la nappe.
 - Dans les formations de Tielt et de Kortrijk.
- Tilleul – Riga :
 - Hauteur de couverture minimum : 15,4 m.
 - Hauteur de couverture maximum : 22 m.
 - Longueur du tronçon : 603,5 m.
 - Pente maximum : 0,5%.
 - Rayon de courbure minimum : 1000 m.
 - Le tracé passe sous l'institut Champagnat à Schaerbeek.
 - Sous le niveau de la nappe.
 - Dans les formations de Kortrijk.
- Riga – Verboekhoven :
 - Hauteur de couverture minimum : 15,8 m.
 - Hauteur de couverture maximum : 24 m.
 - Longueur du tronçon : 429,6 m.
 - Pente maximum : 4,2%
 - Rayon de courbure minimum : 1920 m.
 - Le tracé passe sous la station-service de la rue Eugène Demolder, plusieurs bâtiments résidentiels jugés très sensibles et la ligne de tram 7.
 - Sous le niveau de la nappe.
 - Dans les formations de Kortrijk.
- Verboekhoven – Colignon :
 - Hauteur de couverture minimum : 14,9 m.
 - Hauteur de couverture maximum : 18,5 m.
 - Longueur du tronçon : 466,4 m.
 - Pente maximum : 1,4%
 - Rayon de courbure minimum : 3000 m.

- Le tracé passe sous la ligne 161 d'Infrabel, 2 grands collecteurs au niveau de l'avenue Voltaire et la rue Metsys et la ligne de tram 92.
- Sous le niveau de la nappe.
- Dans les formations de Kortrijk.
- Colignon – Liedts :
 - Hauteur de couverture minimum : 19,1 m.
 - Hauteur de couverture maximum : 22,4 m.
 - Longueur du tronçon : 507,8 m.
 - Pente maximum : 1,3%
 - Rayon de courbure minimum : 1145 m.
 - Le tracé passe sous la Maison Communale de Schaerbeek.
 - Sous le niveau de la nappe.
 - Dans les formations de Kortrijk.
- Liedts – P5 :
 - Hauteur de couverture minimum : 12,1 m.
 - Hauteur de couverture maximum : 14,4 m.
 - Longueur du tronçon : 193,66 m.
 - Pente maximum : 3%
 - Tracé rectiligne.
 - Le tracé passe sous plusieurs bâtiments considérés comme très sensible.
 - Sous le niveau de la nappe.
 - Dans les formations de Kortrijk.

La figure ci-après synthétise les niveaux du terrain naturel, de la nappe et du tunnel au droit des stations.

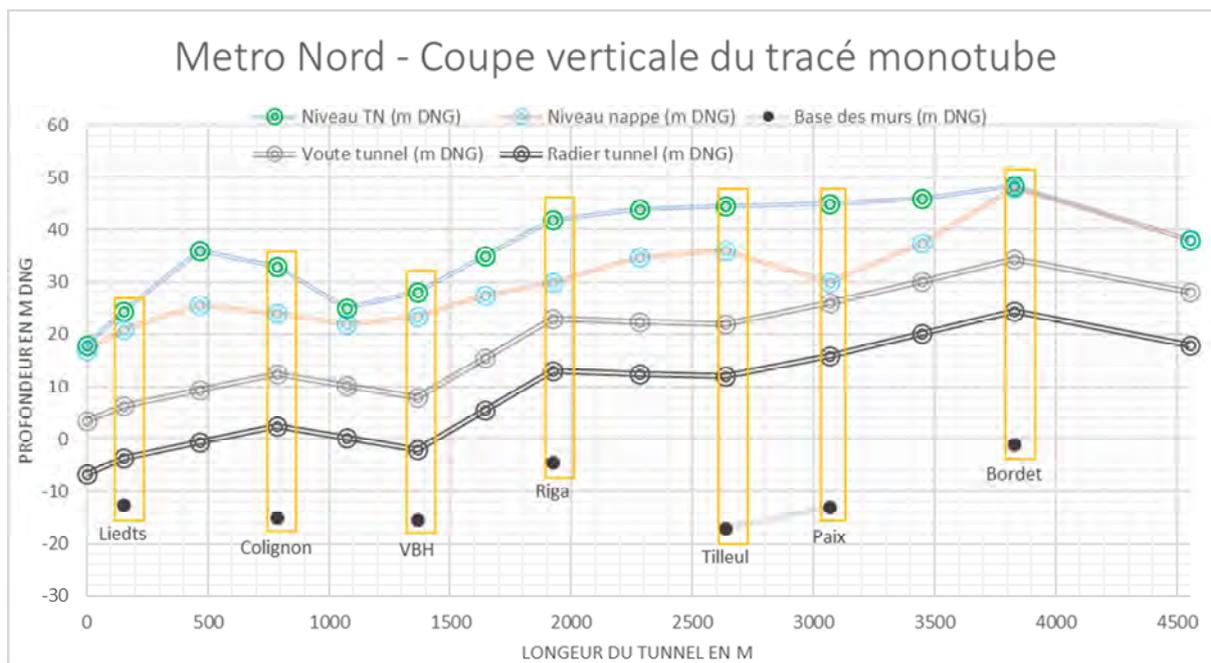


Figure 4: Coupe schématique de la profondeur du tunnel au droit des stations (BMN2020)

1.3. Chiffres clefs du tunnel

Longueur totale du tunnel (stations incluses)	4544 m
Longueur totale du tunnel (hors stations)	3773 m
Diamètre fonctionnel utile	8.70 m
Diamètre intérieur	8,90 m
Diamètre extérieur (de forage)	9.70 m
Diamètre du tunnelier	10 m
Vitesse moyenne de creusement	260 m par mois
Vitesse d'avancement du tunnelier	10m/j
Profondeur moyenne de creusement	Environ 23 m
Profondeur maximum de creusement	Environ 30 m
Volume excavé (matériaux en place)	296 339 m ³
Volume déblai à évacuer (foisonnement 1.3)	385 241 m ³
Volume extrait par mètre linéaire	79 m ³
Durée du creusement	26 mois

Tableau 2 : chiffres clefs du tunnel (BMN, 2020)

1.4. Les ouvrages connexes

1.4.1. Puits P0

Le puits P0 est situé dans l'emprise du futur dépôt métro de Haren, sur le site du dépôt de tram/bus existant de la STIB (voir figure ci-dessous).

Ce puits correspond au puits d'assemblage et de départ du tunnelier. Le tunnelier est tout d'abord assemblé entièrement chez son fabricant. Tous ces éléments (roue de coupe, bouclier, trains suiveurs et autres composants) sont ensuite démontés et amenés en pièces détachées jusqu'au puits P0. Les éléments du tunnelier sont alors descendus et assemblés dans ce puits et la rampe de d'accès. Pour faire fonctionner le tunnelier, il faut au minimum avoir assemblé la roue de coupe, le bouclier, le système de pose des voussoirs et les trois premiers wagons du train suiveur. Le reste des wagons sera ajouté au fur et à mesure de sa progression. Pour permettre au tunnelier de démarrer, une cloche de démarrage est installée (voir figure ci-dessous). Cette cloche est collée à la paroi moulée du puits P0. Cette cloche permet également d'assurer l'étanchéité entre la paroi moulée et le tunnelier lors du début du creusement.

Un bâti de poussée (structure métallique ancrée au radier du puit) est prévu pour permettre au tunnelier de traverser les parois moulées. Un remblai de préchargement est également prévu en surface au-dessus des premiers mètres du tunnel, pour lesquels la hauteur de couverture n'est pas suffisante pour permettre l'avancement du bouclier et du train suiveur.



Figure 5: Illustration d'une cloche de démarrage d'un tunnelier (Le Grand Paris Express, 2019)

Après le démarrage du tunnelier, la trémie du puits est fermée. Toute la logistique du tunnelier est effectuée via la rampe d'accès.

Les caractéristiques du puits sont les suivantes (plans complets dans l'atlas cartographique):

- Réalisé en parois moulées.
- Excavation à ciel ouvert.
- Profondeur : 18,3 m.
- Puits rectangulaire de 22,4 m de long et 16m de large.

- Mise en place d'une armature en fibre de verre au niveau de la paroi qui sera traversée par le tunnelier.

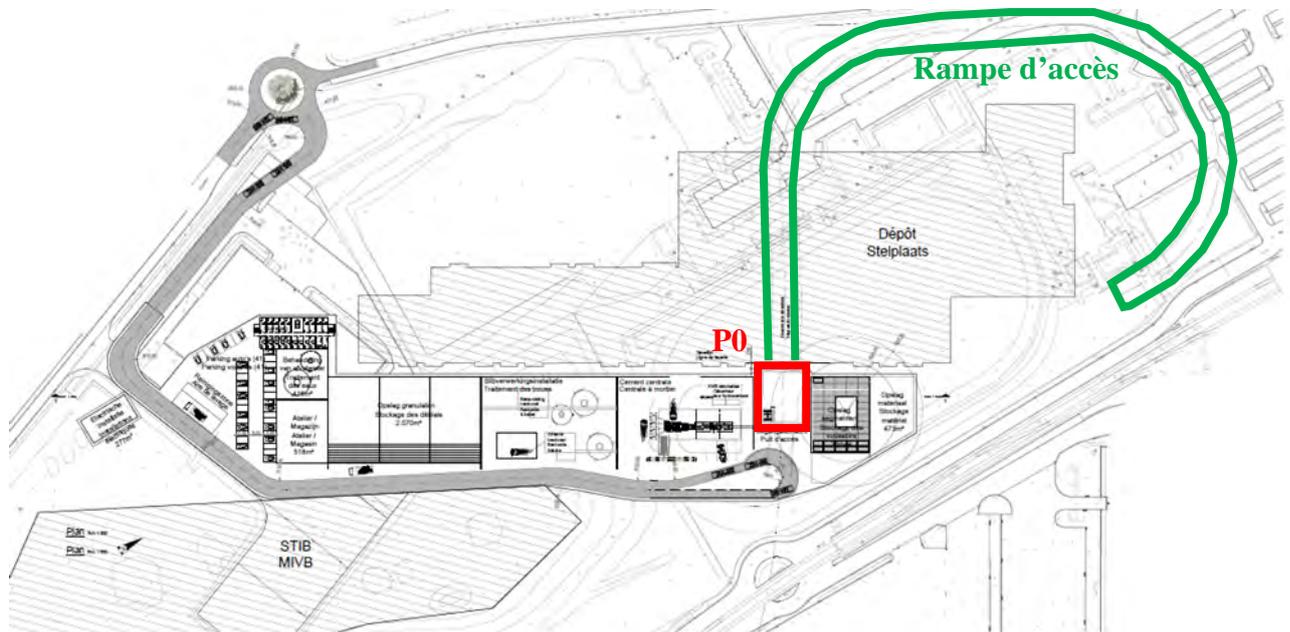


Figure 6 : Localisation du puits P0 à Haren sur le site de la STIB et schéma de la rampe d'accès (BMN, 2020)

1.4.2. Rampe d'accès au dépôt

La rampe d'accès est également située dans l'emprise du futur dépôt de Haren, sur le site du dépôt de tram/bus existant de la STIB et est reliée au puits P0 (voir figure ci-dessus). Cette rampe est construite sous le futur dépôt de Haren.

Cette rampe a plusieurs fonctions :

- En phase chantier du tunnel : elle est utilisée pour assemblage et le désassemblage du tunnelier.
- Pendant le creusement du tunnelier : la zone d'accès logistique se fait via 2 trémies situées au-dessus de la rampe d'accès (voir modèle 3D ci-dessous). Ces trémies ont été ajoutées par rapport aux plans de permis du permis d'urbanisme afin de pouvoir dissocier les chantiers du tunnel et du dépôt.
- En phase d'exploitation : la rampe d'accès correspond au point de démarrage de la ligne de métro et permet de rejoindre le dépôt.

Les caractéristiques de la rampe sont les suivantes :

- Réalisé en parois moulées.
- Excavation à ciel ouvert.
- Tracé avec une courbe d'un rayon moyen de 58 m.
- Inclinaison : 5%
- Connecte la zone de remise (niveau + 37,5m DNG) au radier puits P0.

- 2 trémies sont prévues dans la toiture de la rampe pour l'accès logistique pendant le chantier (voir figure ci-dessous).

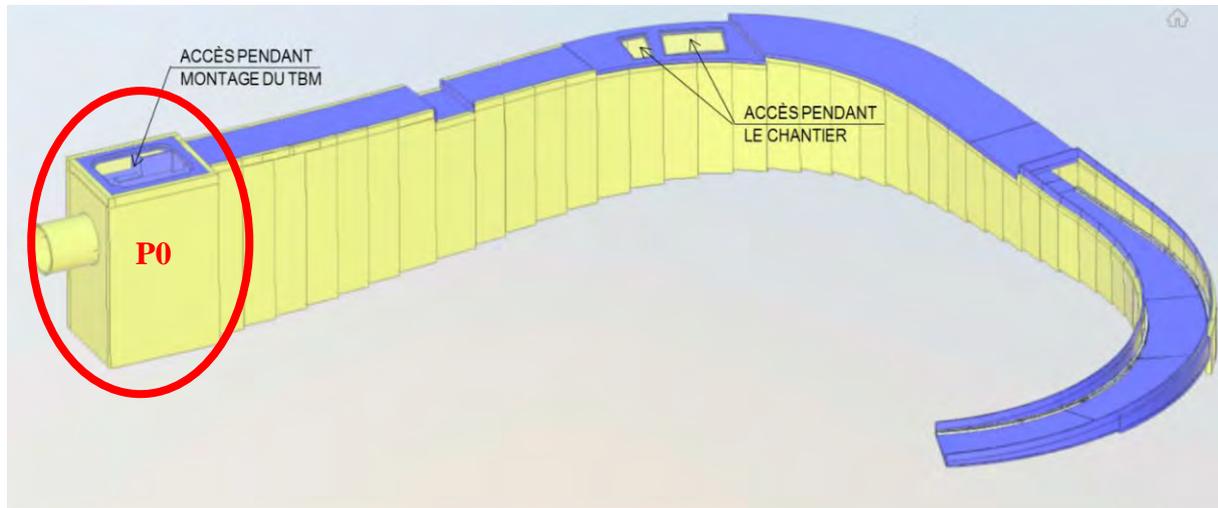


Figure 7 : Modèle 3D du P0 et de la rampe d'accès (BMN, 2020)

1.4.3. Connection au puits P5 gare du nord

Le puits P5 est situé dans la rue d'Aerschot à Schaerbeek, à proximité de la Gare du Nord (voir figure ci-dessous).

Ce puits a une double fonction :

- La réalisation de la construction de la liaison sous la gare du Nord (réalisée antérieurement à la construction du tunnel du métro).
- La réception du tunnelier et son démontage.

Une fois le chantier terminé, ce puits sera fermé en surface. Seule une sortie pour un accès technique en cas d'incident dans le tunnel sera conservée.

Les caractéristiques du puits sont les suivantes :

- Réalisé en parois moulées.
- Excavation à ciel ouvert.
- Profondeur : 22,72 m.
- Puits de 14 m de long et 5 m de large.

Le puits P5 a fait l'objet d'une demande de permis séparé (lot 1) et octroyé le 25 mai 2020.

L'impact au niveau du permis objet de cette étude sera donc limité à l'ouverture temporaire de la voirie pour extraire la tête de tunnelier.

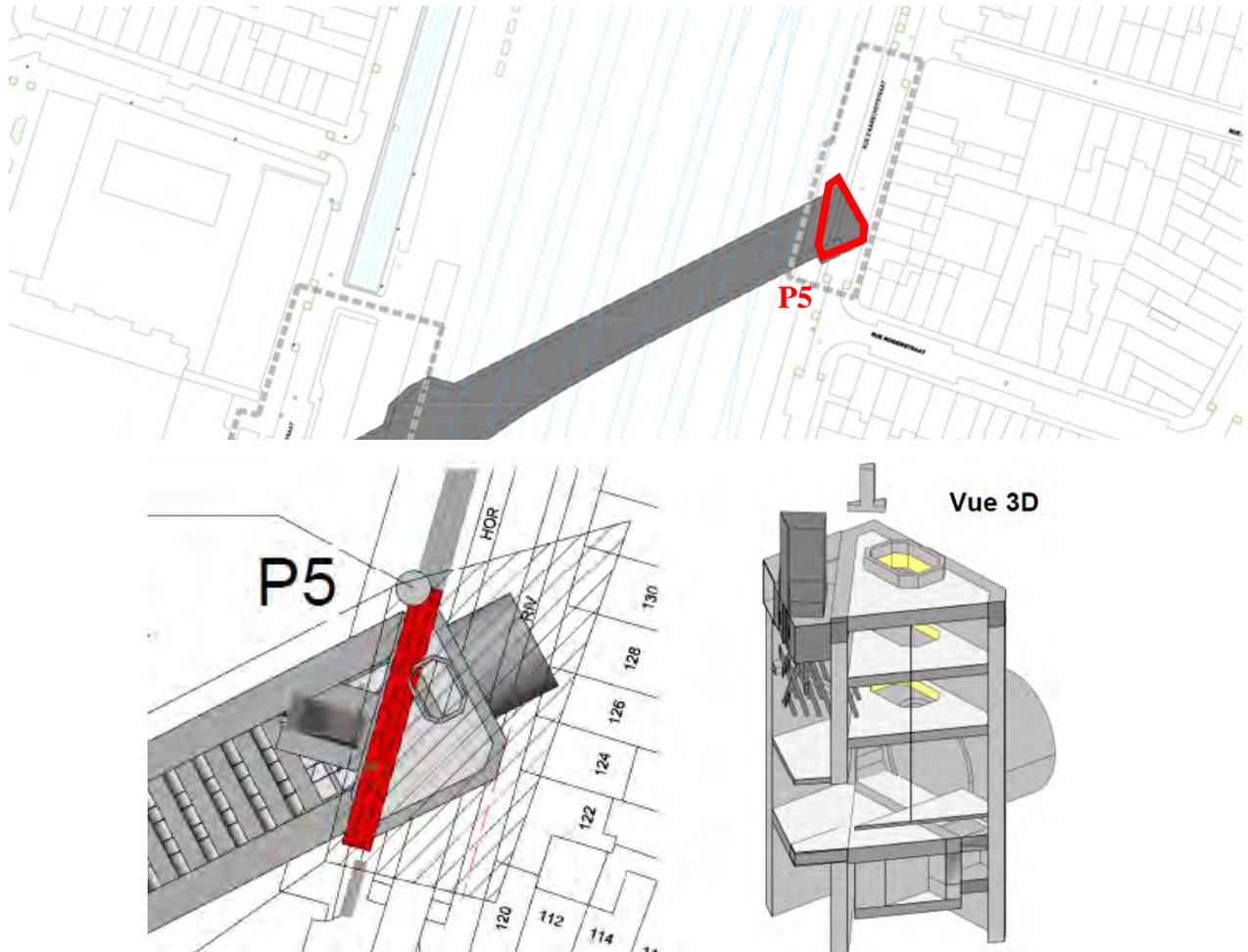


Figure 8 : Localisation du puits P5 et coupe technique (BMN – Stratec El gare du nord)

2. Descriptions des solutions techniques de conception du tunnel et des ouvrages connexes

2.1. Principe d'exécution du tunnel

Il existe 3 techniques d'exécution de tunnel :

- En tranchée ouverte (le tunnel est creusé depuis la surface, souvent désignée par le terme « Cut & Cover »).
- Le creusement souterrain à l'aide de moyens traditionnels (explosif, abattage mécanisé...).
- Le creusement souterrain au tunnelier.

Au vue du contexte géologique/hydrogéologique du projet, de la profondeur du tunnel mais également de la localisation (zone urbaine dense), la technique de creusement au tunnelier est préconisée.

Le creusement au tunnelier présente effectivement plusieurs avantages :

- il permet de mieux contrôler et de réduire considérablement le niveau de tassements et de vibrations en surface.
- contrairement aux excavations en tranchées ouvertes, il permet de réduire, voire supprimer, les perturbations en surface.
- il permet également d'augmenter la sécurité des travailleurs pendant le creusement.

Un tunnelier est une machine qui permet de creuser des tunnels dans le sol et dans la roche. Cette petite usine souterraine permet d'effectuer plusieurs opérations simultanées : le creusement, le support des terrains traversés et la mise en place des parois en béton qui constituent le tunnel.

Le tunnelier peut être divisé en trois grandes parties (voir figure ci-dessous) :

- La tête du tunnelier qui comprend :
 - la roue de coupe (1), qui creuse le sol par rotation.
 - le bouclier (3), cylindre métallique qui permet de maintenir les terrains traversés, le temps de poser les parois en béton, et de protéger le moteur et les équipements mécaniques du tunnelier.
 - le moteur, qui permet de faire tourner la roue de coupe mais également d'avancer le tunnelier.
- Le train suiveur, qui reprend tous les éléments logistiques nécessaires au bon fonctionnement du tunnelier, situés à l'arrière de la tête du tunnelier ;
- Le train de marinage (9, 11), qui comprend le chargement et le transport des déblais (désignés par le terme de « marins ») depuis la roue de coupe (via la vis d'extraction, 11) jusqu'au déchargement en surface).

Le tunnelier, un "train-usine"

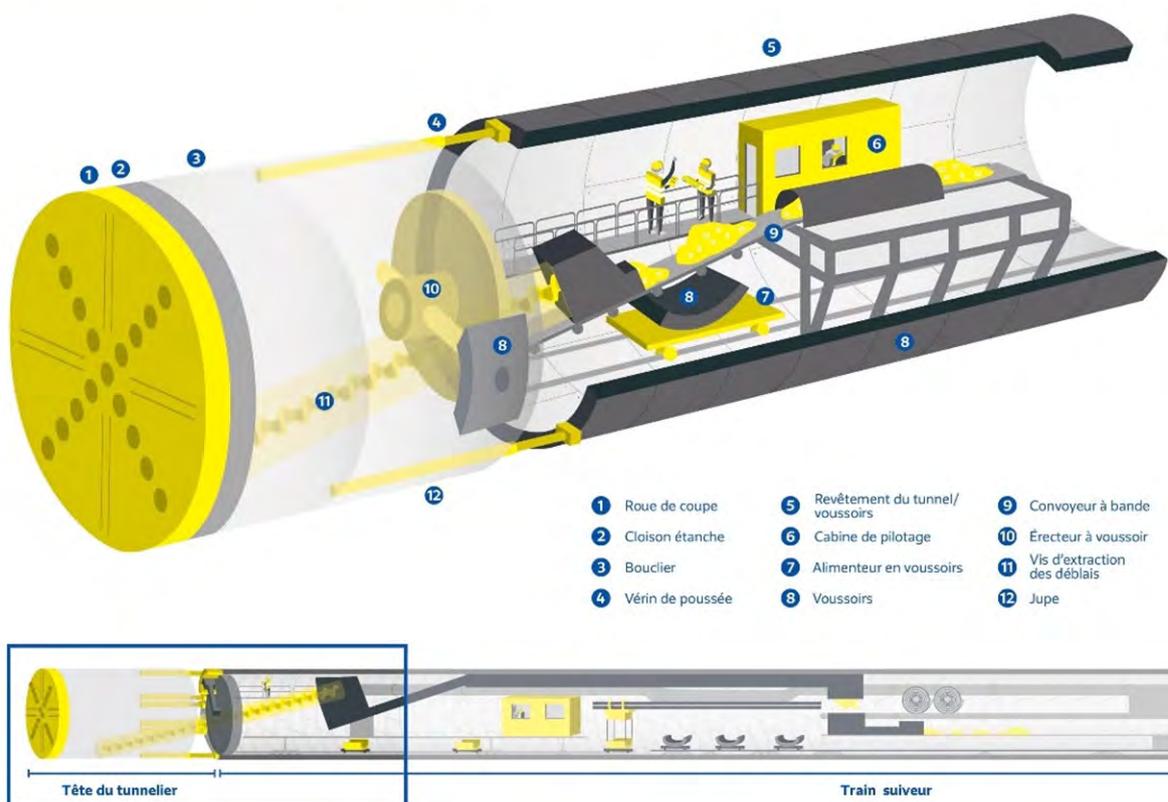


Figure 9 : Tunnelier, schéma de principe (Grand Paris Express, 2019)

Le travail s'effectue en 2 phases : le creusement du sol via la roue de coupe et la mise en place des parois en béton du tunnel.

Les parois en béton du tunnel sont constituées d'éléments courbés préfabriqués en béton, appelés voussoirs (8), qui sont assemblés en anneau. Un anneau est composé de sept voussoirs de 40 cm d'épaisseur.

Au fur et à mesure du creusement, le tunnelier va poser les voussoirs et à chaque anneau posé, le tunnelier va prendre appui sur les voussoirs de l'anneau et avancer grâce à des vérins de poussée (4).

Les terres excavées par la roue de coupe sont évacuées à l'arrière du tunnelier à l'aide de la vis d'extraction (11).

Le tunnelier est tout d'abord assemblé entièrement chez son fabricant. Tous ces éléments (roue de coupe, bouclier, trains suiveurs et autres composants) sont ensuite démontés et amenés en pièces détachées jusqu'au puits PO via des transports exceptionnels en camion. Les éléments du tunnelier sont alors descendus dans le puits PO et assemblés dans le puits et la rampe de d'accès.



Figure 10 : exemple de voussoirs

Le fonctionnement du tunnelier repose également sur l'apport d'un nombre important de consommables autre que les voussoirs ou l'évacuation des déblais :

Les apports de matière (flux) qui peut varier en fonction du type de tunnelier :

- Bentonite
- Eau
- Air comprimé
- Air de ventilation
- Mortier (destiné à combler les vides entre les voussoirs et le terrain)
- L'apport d'électricité
- L'apport de données via des câbles
- Evacuation des eau de refroidissement et d'exhaure (eaux usées dues à l'ensemble des activités du tunnelier)

L'ensemble de ces éléments est visible sur la coupe transversale du tunnelier ci-dessous.

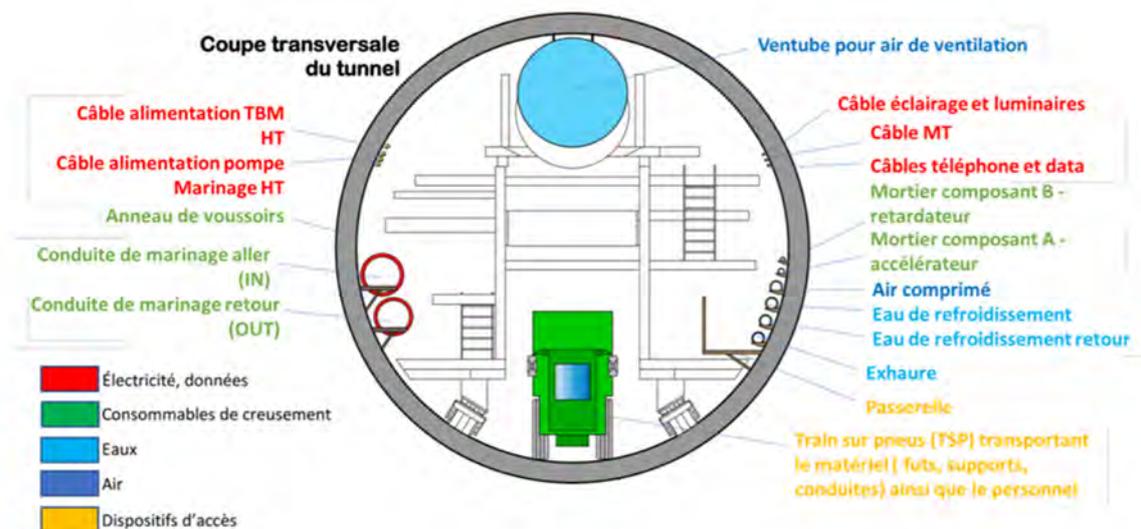


Figure 11: Schéma classique d'une coupe transversale de l'arrière d'un tunnelier (Mines Paristech, 2018)

Dans le cas du tunnel du Métro Nord, le tunnelier entrera sous terre au niveau du puits 0, dénommé P0. Ce puits de démarrage sera construit au niveau du futur dépôt Haren et restera ouvert durant toute la phase de creusement. Ses dimensions intérieures de 15 m x 50 m permettront notamment d'assembler le tunnelier au fond du puits.

La carte illustrant le plan masse ainsi que les coupes du puits 0 est reprise dans l'atlas cartographique.

Voir Atlas cartographique, carte 2.3. Puits de démarrage P0, Plans et coupes

L'approvisionnement de voussoirs ainsi que l'évacuation des déblais se font via le P0 et la rampe d'accès.

Le tunnelier traversera le sous-sol bruxellois 24h/24, 7 jours/7 à une vitesse moyenne d'avancement de 10 mètres par jour.

Lorsque le creusement du tunnel est terminé, la tête du tunnelier sera démontée dans le P5, puits de chantier construit à proximité de la Gare du Nord, et ces éléments seront évacués au niveau de la rue d'Aerschot. Le train suiveur fera quant à lui marche arrière et sortira de terre par la rampe d'accès (dépôt de Haren).

2.2. Choix du tunnelier

Il existe plusieurs type de tunneliers :

- Tunnelier à front pressurisé.
- Tunnelier à front ouvert.

Le choix du type de tunnelier se fait principalement en fonction de la nature du terrain à traverser et de la présence, ou non, d'eau. Dans le cas présent l'intégralité du tronçon est situé sous le niveau de nappe (avec une charge hydraulique par rapport à la base du tunnel qui oscille entre une quinzaine et plus de 25 m).

Pour les tunnels effectués en zones urbaines, qui traversent des nappes d'eau importantes, le tunnelier avec bouclier à front pressurisé est le meilleur choix. En effet, la tête du tunnelier est soumise à un champ de pression dû à la fois à la profondeur à laquelle le tunnelier se trouve (en rouge dans la figure ci-dessous) et à la contrainte hydrostatique (Influence de l'eau contenue dans les terrains) (en gris foncé dans la figure ci-dessous).

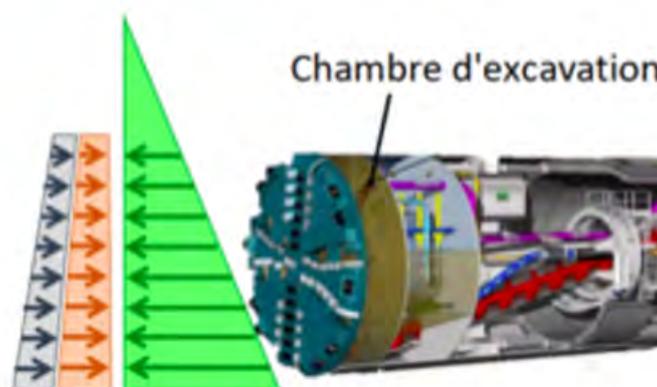


Figure 12: Profil de pression du ter, 2018)

Le tunnelier doit donc opposer un profil de pression équivalent (en vert sur la figure ci-dessus) pour éviter que le terrain ne s'éboule et génère un tassement. Le risque en cas de mauvaise gestion du confinement est de provoquer un tassement différentiel en surface (une différence de tassement entre deux extrémités d'un bâtiments) qui risque de déstabiliser la structure, ou dans un cas extrême former un fontis (effondrement local du sol).

Ce phénomène est particulièrement dangereux dans les zones urbaines, qui comprennent de nombreuses structures parfois très sensibles (voies ferrées, bâtiments classés, etc.).

Les tunneliers à front pressurisé permettent de faire face à cette situation. L'avant de ces types de tunnelier se trouve une chambre d'excavation (voir figure ci-dessus) dans laquelle entrent les déblais par la roue de coupe, où règne un profil de pression de confinement contrôlé permettant de compenser les contraintes du terrain.

Il existe 3 types de tunnelier à front pressurisé :

- La machine à confinement par « pression de terre » : celle-ci est parfaite pour un sol limoneux et qui contient une large proportion de substrats fins .

La roue de coupe est en contact direct avec le sol. Les déblais rentrent dans la chambre d'excavation (ou chambre d'abattage) où ils sont maintenus afin de créer la pression de confinement. Ces déblais sont ensuite évacués à l'aide d'une vis d'extraction (vis d'Archimède), dont la vitesse de rotation sert à réguler le débit d'évacuation, et donc la pression en tête de tunnelier. Une fois sortie, cette boue est directement transportée à l'aide d'un convoyeur jusqu'au chantier en surface.

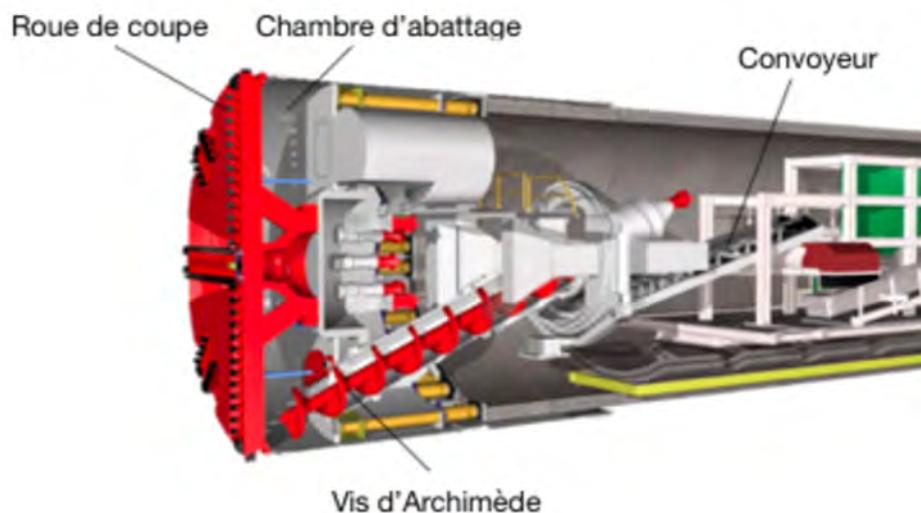


Figure 13: Tunnelier à pression de terres (Mines Paristech, 2018)

- La machine à confinement par « pression de boue » : elle est idéale pour toutes les matières granuleuses libres qui contiennent de l'eau.

De la boue bentonitique est envoyée depuis une station de fabrication vers la chambre d'excavation (chambre d'abattage). Cette boue permet de réguler la pression de confinement. De la boue est également injectée dans le sol afin de créer un cake (mélange de sol et de boue) que l'on va creuser.

Les déblais obtenus sont ainsi un mélange boueux qui est transporté dans des conduites de marinage jusqu'à la station de traitement des boues présente sur la chantier en surface. Celle-ci sert à filtrer la boue pour extraire la partie plus fine, réutilisable, pour limiter la quantité de déblais, de la partie à éliminer du site.

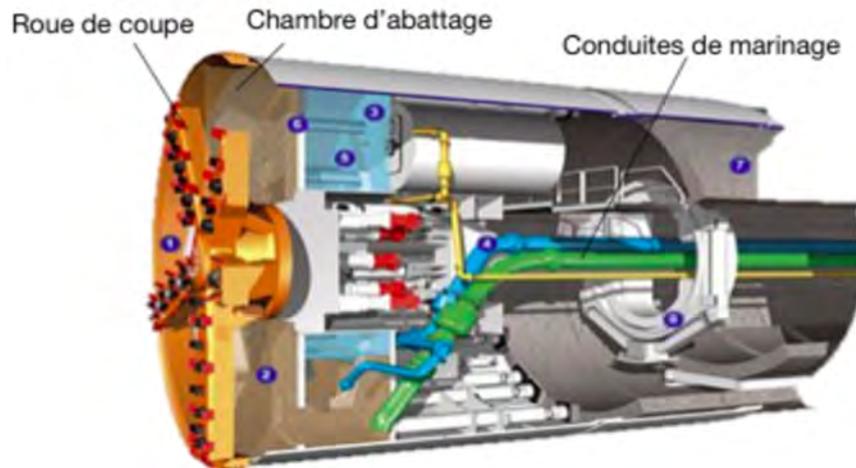


Figure 14: Tunnelier à pression de boue (Mines Paristech, 2018)

- La machine à confinement par « pression d'air » : uniquement pour les terrains très peu perméables, très peu utilisé.

La technologie entourant les tunneliers a beaucoup avancé depuis 15 ans et permet maintenant la construction de tunnels plus larges, plus profonds et plus longs qu'auparavant, et ce dans des conditions géologiques de plus en plus difficiles.

Dans le cas du présent projet, les tunneliers à pression de terre et pression de boue sont préconisés. L'entrepreneur en charge de la construction du tunnel devra justifier le choix du tunnelier et garantir que la technique choisie permet de limiter les entrées d'eau dans le tunnel et les tassements excessifs lors du creusement du tunnelier (voir plus loin- tassements).

Les avantages et inconvénients de ces 2 tunneliers sont les suivants :

- Pression de boue :
 - + : Profil de pression bien maîtrisé
 - : Dans les terrains trop perméables, solubles, hétérogènes (vides, karsts, blocs) ou assez cohésifs : risque de fuite de la boue bentonitique dans le terrain qui entraîne une perte du confinement
- Pression de terre :
 - : Profil de pression moins bien contrôlé
 - + : La viscosité élevée ou la plasticité des sols éliminent les risques de pertes de confinement.

2.3. Principe d'exécution du puits P0 et de la rampe d'accès

Les techniques d'exécution utilisées pour la réalisation du puits P0 et de la rampe d'accès sont :

- La réalisation de parois moulées.
- L'excavation à ciel ouvert.

Ces techniques sont décrites dans le livre I (Partie 2 - Chapitre 4.4).

2.4. Etanchéité des ouvrages

2.4.1. Etanchéité du tunnel

L'étanchéité des sections du tunnel est assurée par son revêtement via :

- Les voussoirs en béton.
- Les joints mis en place entre les voussoirs.
- Les injections réalisées dans le vide annulaire (entre les voussoirs et le terrain naturel).

L'ouvrage est estimé suffisamment étanche si le débit d'infiltration des eaux à l'intérieur du tunnel est inférieur à 300l/h par km de tunnel. Cette valeur correspond à un des critères de performance qui devra être pris en compte lors de l'étude de design du revêtement du tunnel (garantie de performance que l'entrepreneur devra atteindre).

La réduction du débit alors que l'on se trouve sous le niveau de nappe est assurée par le choix de voussoirs suffisamment imperméables, par la mise en place de joints étanches entre les voussoirs et par la réalisation d'injections dans l'espace annulaire entre l'extrados des voussoirs et les terrains encaissants.

L'étude Artesia a déterminé à l'aide du modèle hydrogéologique, la perméabilité équivalente des parois du tunnel nécessaire pour ne pas dépasser un débit de fuite de 300l/h (On parle dans le cas présent de perméabilité équivalente car il s'agit de la perméabilité globale pondérée prenant en compte la perméabilité intrinsèque des voussoirs, la perméabilité au niveau des joints et la perméabilité de la zone injectée).

La Perméabilité équivalente maximum des parois du tunnel a ainsi été estimée à $7,5 \times 10^{-11}$ m/s. Cette perméabilité équivalente est surtout utile pour analyser l'impact du tunnel dans les simulations du modèle hydrogéologique, elle ne correspond pas à la perméabilité du béton des voussoirs. Il est en effet extrêmement difficile de mesurer la perméabilité équivalente d'un revêtement mis en place.

La plus grande partie des infiltrations d'eau provient de défauts dans les joints ou, dans une moindre mesure, de fissures dans le béton.

2.4.2. Etanchéité des stations

Des dispositifs d'étanchéité sont prévus entre les sections du tunnel et les parois des ouvrages (stations, puits P0 et puits P5).

Ces dispositifs sont constitués par :

- La mise en place des massifs de réception lors de la construction des stations.
- L'ancrage des voussoirs dans au minimum 1/3 de l'épaisseur de la paroi de la station ou du puits.
- La mise en place d'injection entre la partie extérieure des voussoirs et la paroi.

L'étanchéité des parois moulés des stations est décrite dans les livres stations.

3. Description des contraintes liées au mode constructif et au mode d'exploitation du projet

3.1. Contraintes liées au creusement au tunnelier

Le creusement au tunnelier induit certaines contraintes qui impactent le tracé du tunnel.

De manière standard, il est recommandé d'avoir :

- Une hauteur de couverture de terre au-dessus du tunnel supérieure à la valeur du diamètre du tunnel.
- Un rayon de courbure supérieur à 15 fois la valeur du diamètre du tunnel.
- Une pente maximale de 10%.
- Une pente minimale de 0,5% pour garantir l'évacuation des eaux.

Ces recommandations peuvent varier en fonction de la nature du sol, de la situation en surface (présence de bâtiments sensibles ou classés) mais également des limitations du tunnelier choisi pour réaliser les travaux.

Dans le cas du présent projet, le tracé du tunnel se situe dans un milieu urbain dense. La zone d'influence géotechnique (qui représente le volume de terrain au sein duquel il y a interaction entre le tunnel et le terrain) correspond à 30 m de part et d'autre de l'axe du tunnel. À l'intérieur de cette zone, plusieurs bâtiments jugés sensibles et très sensibles ont été identifiés ((rapport BMN « Tunnel : méthodologie de classification des ouvrages sensibles » Ref BMN-TUN-CIV-RP-004_P01.2), mais également des sections du réseau d'assainissement en fonte grise de Vivaqua, les grands collecteurs de Vivaqua et certaines lignes du réseau Infrabel.

Cela nécessite d'avoir une bonne maîtrise des tassements en surface, via la gestion de la pression de confinement du tunnelier mais également de la hauteur de couverture au-dessus du tunnel (plus le tunnel est profond, moins il y a d'impact en surface).

La profondeur du tunnel (et ces stations) a donc été déterminée en se basant sur :

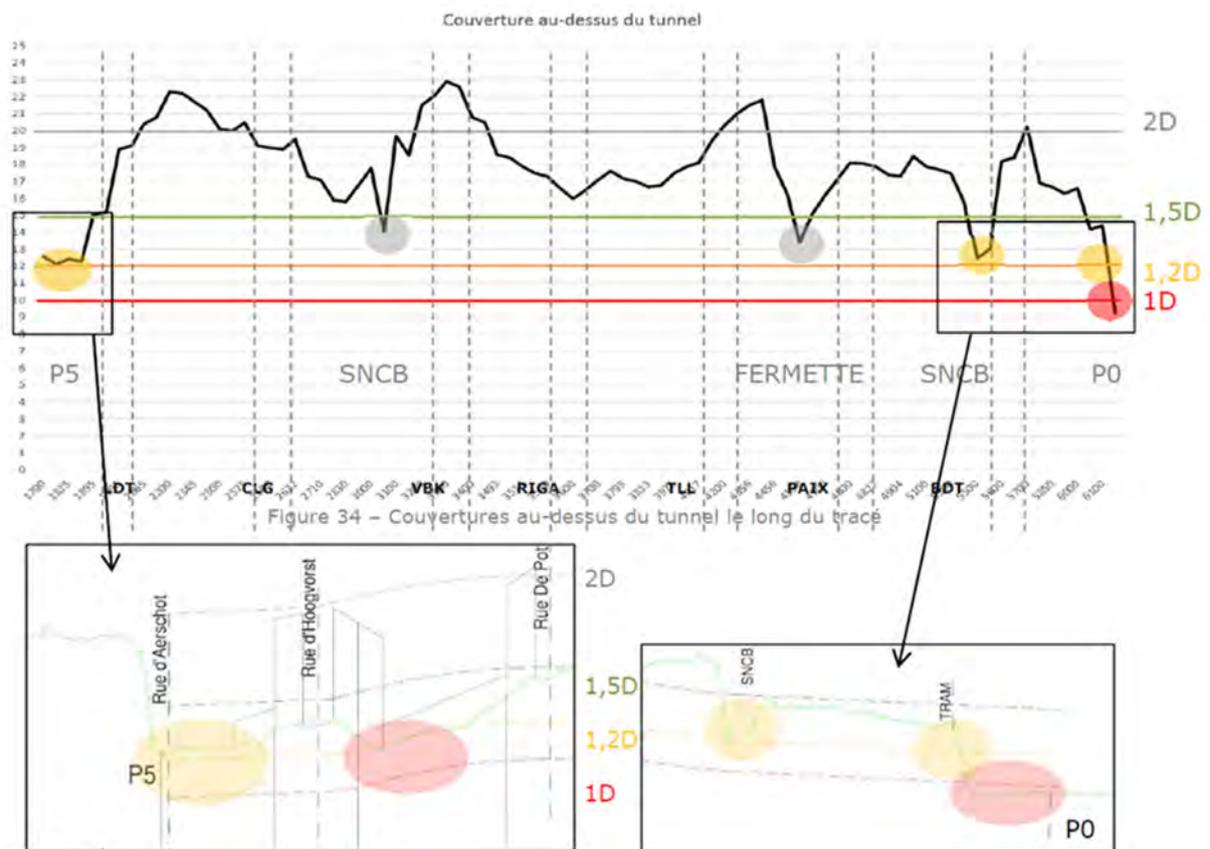
- La prise en compte de la topographie et de la géologie des terrains traversés ;
- la minimisation des tassements en surface ;
- la réduction du nombre de points bas pour minimiser le nombre de points de relevage des eaux ;
- la limitation des pentes du tunnel.

L'optimisation de la profondeur du tracé du tunnel est synthétisée ci-dessous.

- Tronçon Puits P5 – Liedts : limité par la faible hauteur de couverture au droit du puits P5 ;
- Tronçon Liedts – Colignon : limité par la présence de la Maison Communale (bâtiment sensible) ;
- Tronçon Colignon – Verboekhoven : limitée par le franchissement de la ligne SNCB 161 et la présence du Maelbeek (point bas topographique) ;

- Tronçon Verboekhoven – Riga - Tilleul : limité par la pente du tunnel (4% de VBH vers Riga), ainsi que de la hauteur de couverture minimale au nord de la station Tilleul, sous la ferme classée.
- Tronçon Tilleul – Paix – Bordet : limité par la hauteur de couverture minimale sous la ligne SNCB L26 au droit de la station Bordet.
- Tronçon Bordet – P0 : limitée par le deuxième franchissement de la ligne SNCB L26, ainsi que la hauteur de couverture minimale au droit du P0.

L'épaisseur de couverture au droit du tracé est représentée à la figure ci-dessous.



3.2. Contraintes liées à l'exploitation

3.2.1. Tracé en plan

Paramètre	Abréviation	Valeur maximale	Unité
Vitesse d'exploitation	V expl	72km/h	Km/h
Accélération centrifuge non compensée	a	1	m/s ²
Dévers appliqué	h	150	mm
Insuffisance max de dévers	l	150	mm
Excès de dévers max	E	70	mm
Variation max de dévers en fonction du temps	dh/dt	50	mm/s
Variation max d'insuffisance en fonction du temps	dl/dt	60	mm/s
Variation max brusque d'insuffisance de dévers	Äl	50	mm
Gauche max	dh/dl	3	mm/m
Rayon minimal en voie principale dans zone tunnelier (à l'axe du tunnel)	Ra min	250m	m
Rayon minimal en zone de dépôt à l'axe de la voie	Ra min	50m	m
Voie en gare (100m)		En alignement droit	
Zone d'appareil de voie		En alignement droit	
Longueur zone d'alignement droit de chaque côté de la gare	Lmin	20m	m
Longueur minimale d'un alignement droit en courbe et contre courbe si R < 100m	Lmin	7	m
Longueur minimum d'alignement entre fin de courbe et pointe d'aiguille d'un appareil de voie		0m sauf si courbe et contre courbe et R<100m	m
Longueur minimum entre le point d'arrêt à quai et la pointe d'un appareil de voie		20m	m

Tableau 3: Contraintes du tracé en plan (BMN 2020)

3.2.2. Profil en long

Paramètre	Valeur maximale / critère	Unité
Pente maximale en alignement droit	6	%
Pente minimale en inter-station (hydraulique)	3	mm/m
Accélération verticale	0.3	m/s ²
Pente maximale en gare	0	%
Zone en palier de part et d'autre de la gare	20	m
Pente maximale en voie de dépôt	6	%
Inscription des appareils de voie	En plan	

Tableau 4: Contraintes du profil en long (BMN, 2020)

4. Description du chantier

4.1. Quantitatif des matériaux

La synthèse des quantités de déblais et matériaux nécessaires à la réalisation du tunnel (hors stations) est reprise dans les tableaux ci-dessous :

Volume excavé (matériaux en place)	m³	296.339
Volume déblai à évacuer (foisonnement 1.3)²	m³	385.241
Voussoirs (1,8 m de long, 7 + 1 clé de voute par anneau)	pièce	14.679

Tableau 5 : Quantitatif des matériaux du tunnel (BMN, 2020)

La synthèse des quantités de déblais, remblais, déchets et matériaux nécessaires à la réalisation du puits P0 et de la rampe d'accès est reprise dans les tableaux ci-dessous :

Volume excavé (matériaux en place)	m³	65.321
Volume déblai à évacuer (foisonnement 1.3)	m³	84.917
Déchets Génie Civil	m³	1.900
Remblai	m³	5.130
Béton	m³	24.220
Armatures acier	T	2.820
Armatures fibre de verre	T	20
Maçonnerie	m³	1.180
Remblai pour le préchargement du tunnel	m³	2.630

Tableau 6 : Quantitatif matériaux du puits P0 et de la rampe d'accès (BMN, 2020)

L'évacuation et l'amenée de ces matériaux, liés au puits P0 et au tunnel proprement dit, se feront via le futur dépôt métro de Haren.

4.2. Phase de réalisation

Les différentes phases de construction sont reprises ci-dessous :

- Phase préalable : installation du chantier.
- Phase 1 : réalisation des parois moulées, excavation du puits et de la rampe d'accès, mise en place des radiers, des dalles intermédiaires et des dalles de toiture.
- Phase 2 : montage du tunnelier dans la rampe d'accès via le puits P0 et mise en place du remblai de préchargement.
- Phase 3 : Démarrage du tunnelier.

² Le coefficient de foisonnement est déterminé en fonction de la nature des terrains. Dans le cas des sols argileux et argilo-sableux, le coefficient de foisonnement peut varier entre 1.2 et 1.3.

- Après 200 m de creusement, fermeture du toit du puits P0 et évacuation du remblai de préchargement.
- Phase 4 :
 - Creusement du tunnel, du P0 vers le P5, en traversant chaque station.
 - Avant chaque entrée en station : mise en place des structures nécessaires au ripage du tunnelier dans la station.
 - Lors de l'entrée en station : réalisation de l'étanchéité entre les voussoirs et la paroi de la station.
 - Avant chaque sortie du tunnelier d'une station : mise en place de la cloche de sortie du tunnelier (comme pour le puits P0, cette cloche permet d'assurer l'étanchéité de l'ouvrage pendant le démarrage du creusement de la paroi et la montée de la pression de confinement).
 - À la sortie du tunnelier : réalisation de l'étanchéité entre les voussoirs et la paroi de la station.
 - Mise en place d'une voûte parapluie (description dans le livre I Partie 2 chapitre 4.4) sous les maisons de la rue d'Aerschot au droit du puits P5 (jonction entre le permis du lot 1 et cette demande de permis)
- Phase 5 : Arrivée du tunnelier dans le puits P5 et démontage du tunnelier.
- Phase 6 : fermeture des trémies de la rampe d'accès.

Le démontage du tunnelier est divisé en sous-tâches :

- Mise sous eau du puits P5 (permet de ne pas mettre en place de cloche de sortie).
- Entrée de la tête du tunnelier dans le puits P5.
- Réalisation de l'étanchéité entre le tunnelier et la paroi du puits P5.
- Démontage de la roue de coupe et évacuation de celle-ci via le puits P5.
- Démontage du reste du tunnelier et évacuation via le tunnel vers la rampe d'accès (Puits P0).
- Bétonnage du bouclier (le bouclier est laissé sur place, il constitue le dernier anneau du tunnel).
- Mise en place de l'étanchéité définitive.
- Ouverture du puits P5 vers la gare du Nord et fermeture en surface.

4.3. Installations temporaires et implantation du chantier

Les installations de chantier vont évoluer pendant la durée de la réalisation des travaux. 5 phases d'installation de chantier ont été identifiées et correspondent aux 5 premières phases de réalisation décrites dans le chapitre précédent (phase 1 à 5).

L'emprise du chantier pour la construction du puits P0, de la rampe d'accès et du tunnel est située sur le site du dépôt de Haren de la STIB (chantier lot 3 sur la figure ci-dessous). Cette zone chantier est en interface avec la construction du nouveau dépôt (lot 2). Les 2 zones chantiers doivent être clairement délimitées afin de diminuer les interférences entre les 2.

Cependant, la préparation de la zone de chantier sera mutualisée avec celle du chantier du Dépôt. Le puits P0 sera construit au démarrage du chantier GC du Dépôt, permettant de préparer la zone à l'arrivée du tunnelier.

Une zone d'écotage de bus sera maintenue sur le site par la STIB (en vert sur la figure ci-dessous) jusqu'à la réalisation du nouveau dépôt de Marly où l'infrastructure sera réintégrée (prévue en 2024).

Le plan d'installation de chantier a été modifié par rapport aux plans de permis d'urbanisme afin de dissocier les chantiers du tunnel et du dépôt. L'interaction entre les installations de chantier du tunnel et du dépôt est traitée dans le livre dépôt.



Figure 16 : Localisation des zones chantiers sur le site du dépôt de Haren (BMN, 2020)

Une emprise chantier sera également nécessaire au droit du puits P5 pendant le démontage et l'évacuation de la roue d'abattage du tunnelier.

4.3.1. Installations de chantier – Site du dépôt de Haren

Les installations de chantier prévus sont les suivantes:

- Une base vie comprenant réfectoires, vestiaires, sanitaires et bureaux (point 1 sur les figures ci-dessous).
- Des magasins de matériels (point 2).
- Un poste haute tension (point 3).
- Une machine pour parois moulées (point 4).
- Une centrale à bentonite (point 5).
- Une zone de stockage temporaire des matériaux (point 6).
- Une zone de stockage des voussoirs (point 7).

- Une zone de stockage des déblais (point 8).
- Une centrale à béton (point 9).
- Une zone de traitement des boues du tunnelier (point 10).
- Une aire de lavage (point 11).
- Une grue à tour (point 12).
- Une grue mobile (point 12').
- Une zone de traitement des eaux (point 13).
- Une centrale à mortier, destinée à l'étanchéité entre les voussoirs et les parois des stations (point 14).
- Une zone pour le traitement des eaux polluées (point 18).
- Un parking (point 20).
- Le remblai de préchargement (point 21).
- Un convoyeur à bande pour les déblais (point 22).

Les déblais issus du creusement du tunnel doivent être évacués à l'avancement du tunnelier, vers le puits P0, de préférence en journée. Le dimensionnement de la zone de stockage est prévue pour stocker au minimum 3 jours de creusement en cas de problèmes d'évacuation.

Dans le cas où le tunnelier serait un tunnelier à pression de boue, les déblais sont évacués par marinage hydraulique. Une centrale de traitement des boues permettant de séparer les marins de la boue bentonitique est prévue (point 10).

Les voussoirs seront préfabriqués et stockés en usine. Ils seront acheminés et livrés sur le site par camion de manière régulière. La zone de stockage est prévue est suffisante pour mettre en place un stock de voussoirs correspondant à 5 jours d'avancement à la cadence maximale.

L'accès au chantier se fait depuis la rue Houtweg. Pour faciliter l'entrée et sortie au chantier et réduire au maximum les gênes à la circulation, il est prévu de créer un rond-point au niveau du croisement avec la rue du Biplan. Ce rond-point sera également utilisé pour la zone chantier du dépôt et nécessitera une coordination des transports, notamment les convois exceptionnels prévus pour l'amenée des pièces du tunnelier et, à la fin de chantier, pour l'évacuation des plus grandes pièces du tunnelier.

Des palissades anti-bruit sont prévues autour de l'entièreté de l'emprise du chantier.

La zone de chargement/déchargement des camions est prévue au droit des zones de stockage.

L'ensemble des plans d'installation de chantier est repris dans l'atlas cartographique pour plus de lisibilité.

Le plan des installations de chantier en phase 1 est repris à la figure ci-dessous

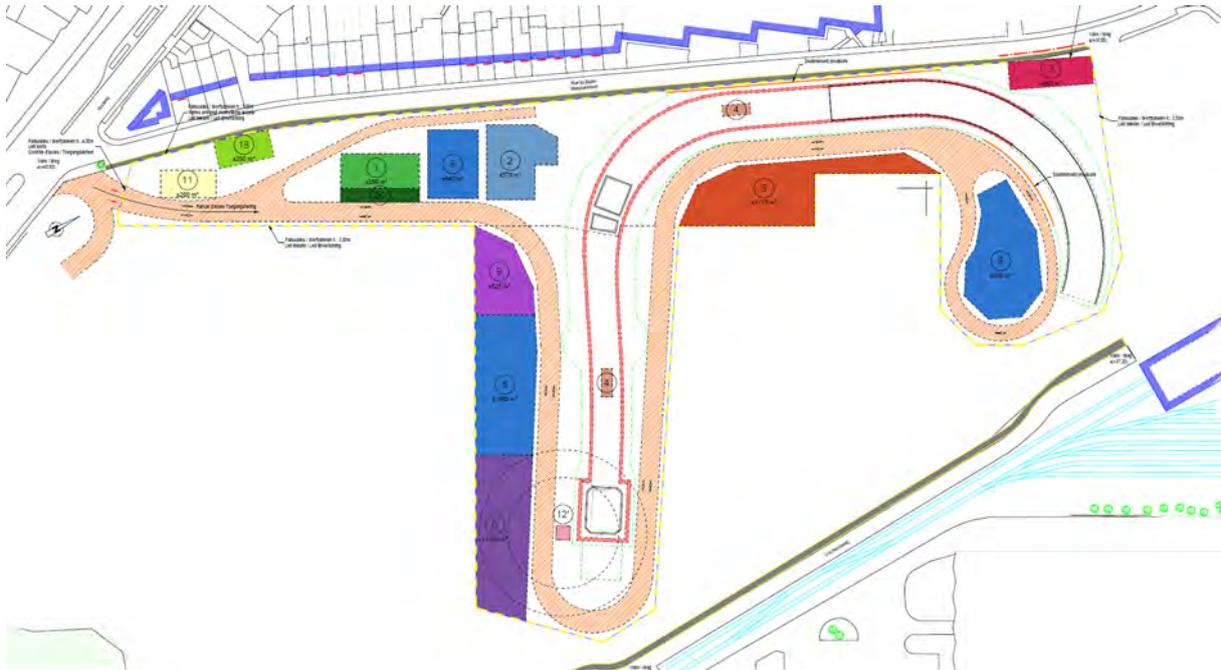


Figure 17 - Installations de chantier – Phase 1 (BMN 2020) –

Le plan des installations de chantier en phase 2 est repris à la figure ci-dessous

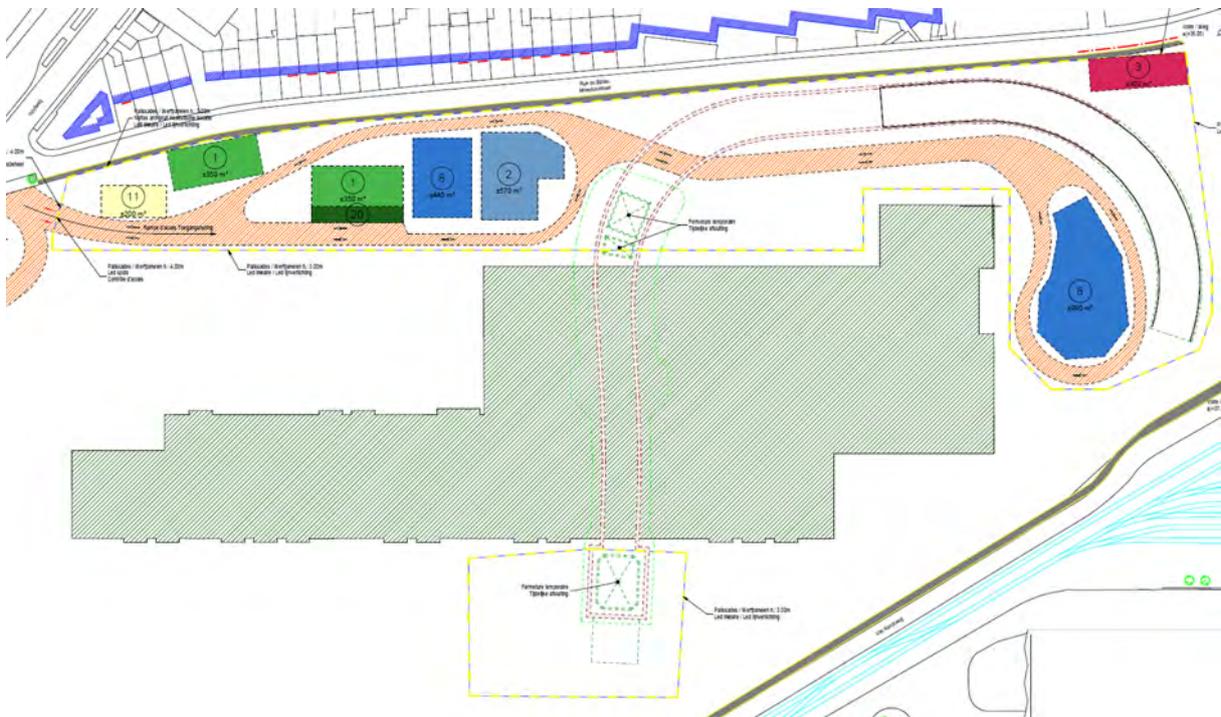


Figure 18 - Installations de chantier – Phase 2 (BMN 2020)

Le plan des installations de chantier en phase 3 est repris à la figure ci-dessous

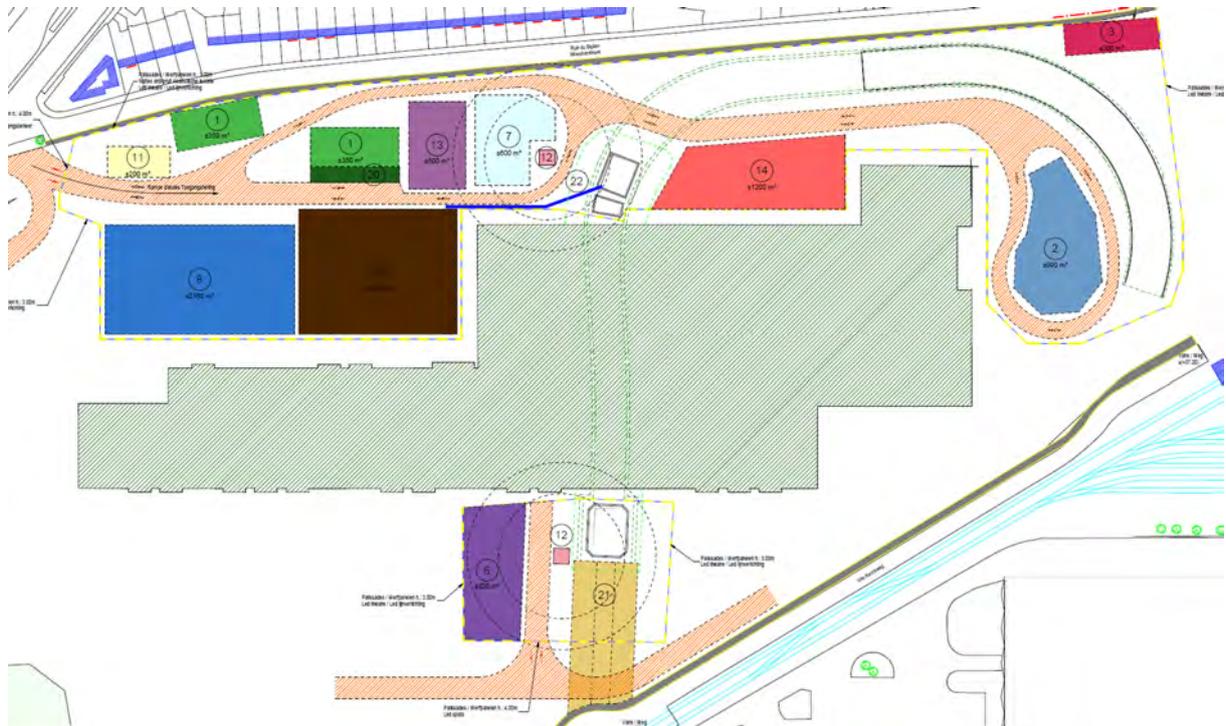


Figure 19 - Installations de chantier – Phase 3 (BMN 2020)

Le plan des installations de chantier en phase 4 est repris à la figure ci-dessous

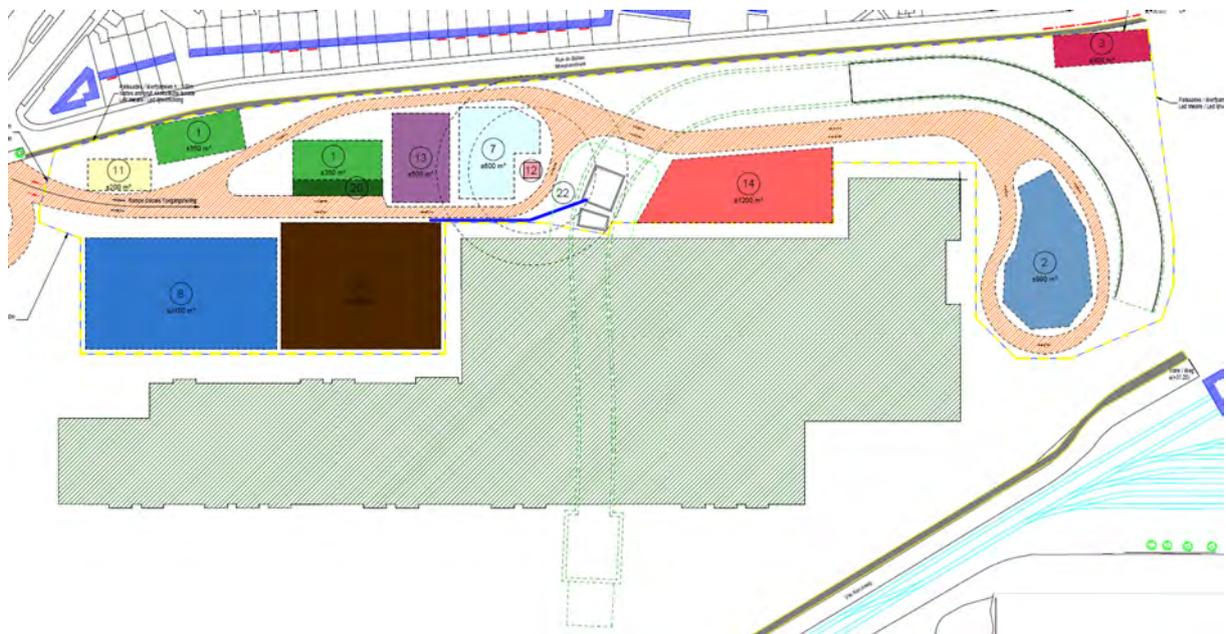


Figure 20 - Installations de chantier – Phase 4 (BMN 2020)

Le plan des installations de chantier en phase 5 est repris à la figure ci-dessous

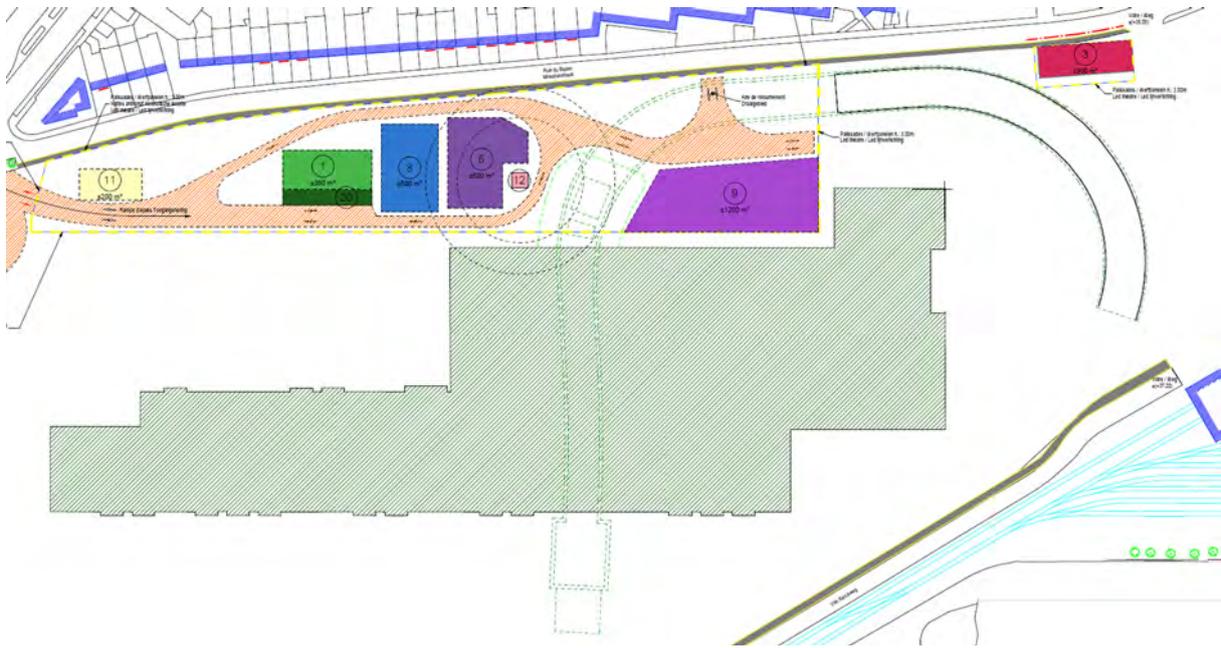


Figure 21 - Installations de chantier – Phase 5 (BMN 2020)

4.3.2. Installations de chantier – Puits P5

L'emprise de chantier au droit du puits P5 est destinée exclusivement :

- Aux travaux préalables à l'arrivée du tunnelier.
- A réalisation de la voûte parapluie.
- Au démontage et évacuation des éléments de la tête d'abattage du tunnelier.
- Au bétonnage du bouclier.
- A la réalisation de l'ouverture vers la Gare du Nord.
- A la mise en place de la dalle de toiture.

Les phases de construction du puits P5 ne sont pas incluses dans le présent rapport (voir rapport EIE Stratec).

Les installations de chantier prévues sont les suivantes:

- Une base vie.
- Une grue.
- Une zone de stockage pour les pièces du tunnelier.

Cette emprise chantier est située dans la rue d'Aerschot, entre les rues de Rogier et d'Hoogvorst. Cette section sera fermée à la circulation et entièrement dédiée à l'emprise du chantier. Le sens de circulation pendant la phase travaux est représenté à la figure ci-dessous (flèche rouge). Des palissades anti-bruit sont prévues autour de l'entièreté de l'emprise du chantier.



Figure 22 - Localisation de l'emprise chantier du Puits P5, trait vert (Tractebel sur fond BMN, 2020)

4.4. Gestion des déblais et transports des matériaux

4.4.1. Chiffres clés

4.4.1.1. Déblais (out)

Hors foisonnement (indicatif)

- Les déblais du tunnel: 300.000 m³
- Les déblais du puits P0 et de la rampe d'accès : 85.0000 m³
- Le déblais des 7 stations correspond à +/- 790.000m³ - 20.000m³ à réutiliser directement comme remblais = 770.000m³
 - Bordet : 127.000m³
 - Paix : 100.000m³
 - Tilleul : 100.000m³
 - Riga : 110.000m³
 - Verboekhoven : 145.000m³
 - Colignon : 100.000m³
 - Liedts : 108.000m³
- Le déblais du dépôt : +/- 317.000m³ - 3.000m³ pour réutilisation sur place

Le cubage estimé uniquement pour la **partie tunnel et puits** représente donc +/- 385.000m³ (hors foisonnement). A titre de comparaison cela représente 1,3 fois la butte du lion de Waterloo. Cela représente l'équivalent de 30.000 camions.

Le cubage total du projet est estimé +/- **1.450.000m³** (hors foisonnement) ce qui représente à titre d'exemple, 5 fois la butte du Lion de Waterloo. En considérant le foisonnement lors du chargement, cela correspond approximativement à **90.000 camions**.

La gestion des déchets du chantier des stations est traitée dans le Livre III : Généralités stations.

4.4.1.2. Apport de bétons pour le gros œuvre (in)

Indicatif, uniquement les bétons (pour plus de détails et autres matériaux voir Livre carbone) :

- Sur le tunnel et les puits : +/- 135.000m³
- Pour la station Bordet : 50.500m³
- Pour la station Paix : 44.500m³
- Pour la station Tilleul : 37.000m³
- Pour la station Riga : 48.000m³
- Pour la station Verboekhoven : 54.500m³
- Pour la station Colignon : 47.000m³
- Pour la station Liedts : 48.000m³

Au niveau du cumul in/out on estime le total gros œuvre à 150.000 équivalent camions.

4.4.2. Concernant spécifiquement les déblais du tunnel

La valorisation des déblais dépend largement de la qualité des matériaux extraits en fonction de la géologie traversée et par le mode d'excavation.

Le tunnel est excavé par tunnelier. Le processus d'excavation prévoit l'évacuation des terres via le tunnel vers le puits P0.

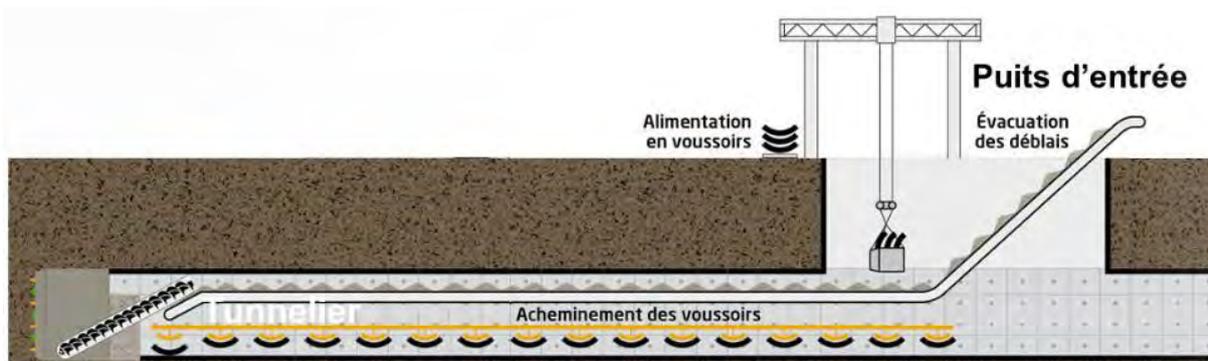


Figure 23 : Schéma du fonctionnement de l'évacuation des déblais du tunnelier (BMN, 2016)

Le volume de terre est excavé à un rythme régulier et constant estimé à +/- 600m³ (foisonné) jour, soit l'équivalent de 24 camions par jour.

La zone de stockage temporaire des déblais sur la zone du futur dépôt permet de réaliser un tri des matériaux dans le cas où une valorisation serait possible. Au vu du faible espace disponible (le dépôt va se construire en même temps que le tunnelier creuse) il faudra sans doute opérer ce tri en aval près des zones de chargement ou de valorisation.

En cas d'utilisation d'un tunnelier à pression de boue, les déblais sont évacués par marinage hydraulique, ce qui implique de séparer les terres excavées de la boue bentonitique dans une unité de traitement. La bentonite est nettoyée et réinjectée vers le tunnel tandis que les déblais, traités, pourraient être plus ou moins directement réutilisés.

Le calcul du volume de terre prend en compte le volume du tunnel mais également le coefficient moyen de foisonnement du terrain, fixé à ~1,3 sur base des coefficients standards (voir tableau ci-dessous).

COEF. EXCAVATION SELON TYPE DE TERRAIN		
Type de terrain	Coef. d'expansion initiale	Coef. expansion résiduelle
Terre végétale	1.1	0.01 - 0.05
Sable	1.15 - 1.20	0.01 - 0.03
Argile	1.20 - 1.25	0.03 - 0.05
Marne	1.25 - 1.30	0.05 - 0.08
Sable argileuse	1.2	0.1
Argile compacte	1.5	0.3
Terre dure	1.55	0.3
Roche crassée	1.60 - 1.65	0.4
Terre marneuse	1.7	0.4

Tableau 7 : Coefficient de foisonnement en fonction par type de sol (BMN, 2016)

Le volume total des déblais provenant du tunnel est estimé à 385.000 m³ (foisonné)

Ce volume peut être divisé en plusieurs catégories en fonction de la granulométrie, du type de sol et l'origine du sol.

Étant donné que le tunnel est foré à une profondeur de 20 à 30 mètres, les terres excavées sont considérées, en première approche, comme n'étant pas polluées (voir chapitre sol).

L'estimation de la proportions de type de sols excavés est reprise à la figure ci-dessous.

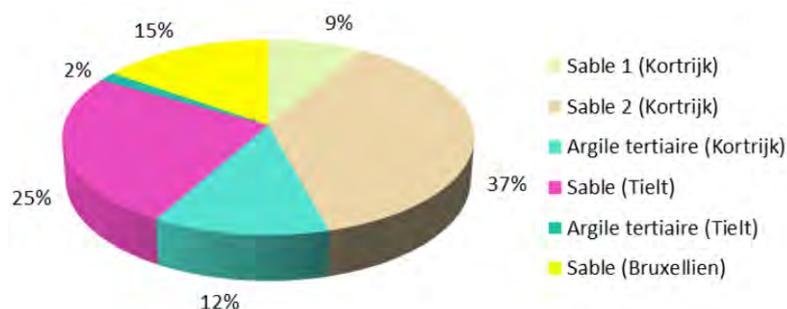


Figure 24 : Répartition des types de sols excavés (BMN, 2016)

Selon l'étude BMN de l'avant-projet Tranche 3 et Tranche 4 du 18/05/2016, il a été estimé que 77% des terres du tunnelier sont valorisables.

4.4.3. Transport des déblais

Les modes de transport possibles pour l'acheminement vers un dépôt final des déblais sont les suivants :

- Routier (très impactant au niveau des nuisances environnementales et de l'usure du réseau).
- Ferroviaire (pour toutes les terres issues du dépôt et donc aussi du tunnelier cela reste très intéressant car la voie ferrée passe à côté du dépôt. Cela étant cette option nécessite un aménagement du talus pour prévoir la zone de chargement. Cela est également contraignant vis-à-vis de l'exploitation de la ligne en journée.
- Fluvial (très intéressant au niveau capacitaire, bilan CO2, valorisation sur site de chargement et coûts à la tonne. Mais cela nécessite tout de même un parcours en camion jusqu'au port de Bruxelles).

Au niveau régional, un des objectifs de Good Move est un transfert modal au profit du rail et de la voie d'eau du transport des marchandises.

Une étude de comparaison de ces modes de transport a été réalisé par BMN en 2016 (Rapport sur la gestion et valorisation des déblais, ref : BMN-GEN-PM-RP-008). Il reprend un tableau comparatif des avantages et inconvénients de chaque mode de transport. Dans ce tableau, le volume transporté par bateau (par voyage) est de maximum 4500T* jusqu'au Vergotedok, et de maximum 1350T vers le sud (source : Port de Bruxelles) . :

	routier	ferroviaire	fluvial
Volume transporté par voyage	30T	600 – 1250T ⁹	4500T*
Coûts (C/tonne)	- 5 - 10	- 7,68 - 8,76	+ 2,2 - 2,7
Planning	+ planning prévu	+ planning prévu mais à concorder avec les contraintes du domaine	+ planning prévu mais à concorder avec les contraintes du domaine
Nuisances	-	-	+
Bruit	-	-	+
Vibrations	-	-	+
Impacts espace public (zones stockage en surface en milieu habité)	-	-	+
Qualité de l'air	-	-	+
Pollution atmosphérique	-	-	+
Logistique chantier	+ espace suffisant	+/- espace de stockage intermédiaire à prévoir près d'un chemin de fer	+/- espace de stockage intermédiaire à prévoir près du canal
Contexte urbain	- impact direct sur le contexte urbain	+ infrastructure existante donc peu d'impacts complémentaires en comparaison+ à la situation existante	+ contexte non résidentiel donc peu de conflits

Tableau 8 : Tableau de comparaison des modes de transport (BMN, 2016)

4.4.3.1. Evacuation des déblais du tunnel

Une zone de marinage est prévue sur le site du dépôt de Haren pendant le chantier du tunnel. Cette zone servira au stockage des déblais à la sortie de la centrale de traitement. Ces déblais doivent être évacués au fur et à mesure de l'avancement du tunnelier.

En cas d'imprévus, une zone de stockage est réservée sur le chantier sur laquelle il est possible de stocker les matériaux excavés pendant 3 jours en utilisant les vitesses d'avancement maximales (soit 75 m de tunnel excavé). La surface nécessaire est de l'ordre de 2400 m². Il faudra de toute façon réaliser des andains sur plusieurs jours afin de pouvoir effectuer les prélèvements et attendre les résultats des analyses.

Dans l'hypothèse où une fraction des sols sableux pourrait être valorisée directement pour le projet du métro, un tri des matériaux de déblais sera réalisé directement sur le site d'installation de chantier, au droit de la zone de stockage.

Dans le cas où le type de TBM choisi serait un tunnelier à pression de boue, les terres excavées sortiraient mélangées avec de la bentonite. Il serait alors nécessaire de prévoir une centrale de séparation de la bentonite sur le chantier pour traiter le matériel excavé. La bentonite sera nettoyée et réinjectée pour utilisation vers le tunnel tandis que les déblais, traités, pourraient être plus ou moins directement valorisés.

Le volume de déblais du tunnel représente 385.000 m³ de déblais terreux (foisonnés). Ceci représente environ 582.000 tonnes. Si la totalité des déblais est évacué du site vers un site ferroviaire ou fluvial, le tableau BMN ci-dessous représente le nombre d'aller-retour par mode de transport :

	camion (30T)	train (600 - 1250T)	péniche (4500T)
N° de voyages (AR)	19.400	970 - 466	130
N° de AR / j.o. *	70	3,5 - 2	0,5
N° de AR / heure **	9	0,5 - 0,25	0,06

* 20 jours ouvrables pendant 14 mois = 280 jours ouvrables

** 8 heures dans une journée ouvrable

Tableau 9 : Evaluation du nombre d'aller-retour pour l'évacuation des déblais du puits P0 et de la rampe d'accès

Au vu des quantités très importantes de déblais, le transport par camion vers l'extérieur de Bruxelles n'a pas été retenu.

Deux scénarios d'évacuation ont été étudiés pour les déblais du tunnel :

A. Évacuation vers un site ferroviaire :

Notons cette option a été choisie pour l'évacuation des terres du tunnel Schuman-Josaphat vers le site Josaphat. Ensuite les terres ont été évacuées (en partie...) vers l'extérieur de Bruxelles par camions.

Le dépôt de Haren se situé à proximité directe de la ligne 26 SCNB. Une connexion au réseau ferroviaire existe déjà sur le site de la Stib, cependant certaines contraintes existent pour l'exploitation de cette ligne :

- o La longueur de la voie de connexion, de 100m, est insuffisant pour le chargement du volumes de déblais. Des contacts avec la STIB / Infrabel sont nécessaire afin de vérifier la faisabilité d'une prolongation de la voie ;
- o La voie de connexion se localise à 200m de l'aire de marinage prévu sur le chantier du tunnel à Haren. Les déblais devront être transportés sur cette distance à travers le site de la STIB. Ceci pourrait se faire via un convoyeur à bande. Cette connexion L26 pourrait servir autant pour l'évacuation des déblais que pour l'amenée des matériaux de construction.



Figure 25: Schéma de principe de l'évacuation des déblais vers la L26 (Aries sur Google Earth consulté en février 2021)

B. Évacuation vers le canal :

Au niveau d'un chantier récent de grande ampleur notons que cette option a été choisie pour la construction de DocksBruxsel

Au vu des volumes à transporter il s'agit d'une option particulièrement intéressante dans le cas d'une évacuation des terres vers les Pays-Bas, mais aussi vers la Flandre et la Wallonie (voir socio-eco et bilan carbone).

L'avant-port de Bruxelles situé à l'extrémité de la rampe du Lion est envisagé pour ce transbordement, notamment au niveau du terminal à conteneur du Port de Bruxelles.

Pour ce scénario, un préacheminement entre le site de Haren et le canal est nécessaire. Plusieurs scénarii ont été envisagés dans l'étude d'avant-projet de BMN :

- Préacheminement par convoyeur à bande en surface ;
- Préacheminement par camion ;
- Préacheminement par convoyeur à bande en souterrain ;
- Préacheminement par train vers le port ;

Cette dernière option n'a pas été développée par BMN. Pourtant nous estimons que la voie ferrée existante permet le passage de l'avenue de Vilvoorde vers le quai du terminal conteneurs du port de Bruxelles. C'est pourquoi cette option sera développée dans le chapitre mobilité.

Les détails de ces différents modes sont décrits dans le chapitre mobilité du présent livre.

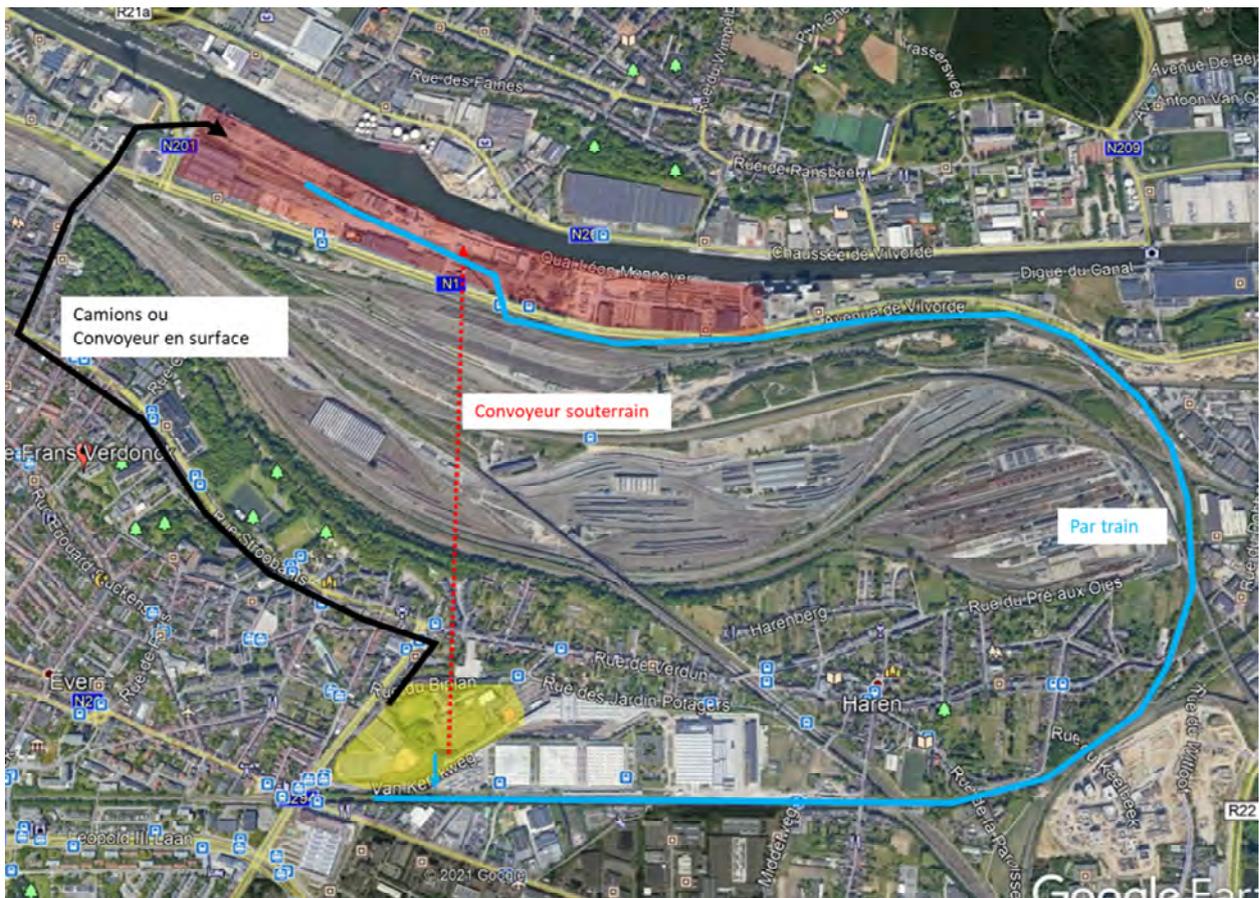


Figure 26: Schéma de principe de l'évacuation des déblais via le port de Bruxelles (Aries sur Google Earth consulté en février 2021)

Le tableau suivant montre les avantages et désavantages des trois solutions retenues par BMN. D'après les pré-études menées par BMN, il semble que le convoyeur à bande en surface est à privilégier au niveau des émissions, de la logistique que des coûts. Par contre cette étude ne tient pas compte des incidences en termes de bruit, poussières, impact visuel de longue durée, etc....

	Transport par camion	Transport par convoyeur	
		surface	microtunnel
Nuisances	-	-	+
Logistique	-	+	+
Écologie	-	+	0
Coûts	+	+	-

Tableau 10 : Comparaison des solutions de préacheminement vers le canal (BMN, 2016)

4.4.3.2. Evacuation des déblais du puits P0 et de la rampe d'accès

Dans la même logique que l'évacuation des déblais du tunnel, le volume de déblais provenant du puits P0 et de la rampe d'accès représente 84.930 m³ de déblais terreux. Ceci représente environ 127.395 tonnes. Si la totalité des déblais est évacué du site vers un site ferroviaire ou fluvial, le nombre d'aller-retour par mode de transport est repris dans le tableau ci-dessous:

	Camion (30T)	Train (600 T)	Péniche (4500 T)
N° de voyage (AR)	4247	212	28
N° de AR/ j.o.	15	1	1
N° de AR / h	2	1	1

Tableau 11 : Evaluation du nombre d'aller-retour pour l'évacuation des déblais du puits P0 et de la rampe d'accès

4.4.4. Destination possible des déblais hors valorisation

Après analyses les terres seront soit valorisées sur place ou sur un autre site, soit envoyées comme matériaux de remblais dont la destination est inconnue à ce stade de développement du projet.

Cette question des débouchés sera posée aux entreprises lors de la phase d'adjudication, cela rentre en effet dans l'approche « développement durable ». Le demandeur nous informe qu'il sera demandé aux entreprises des solutions créatives à ce sujet. C'est donc effectivement l'entrepreneur qui décidera de la destination en fonction de l'état de marché au moment de la soumission de l'offre.

Pour l'instant il n'y a aucune demande pour un aussi gros volume en Belgique. Même s'il existe plusieurs pistes en Région Wallonne. Mais il est impossible de se prononcer sur ces opportunités à moyen termes.

5. Calendrier de réalisation

Le planning général de réalisation des travaux est déterminé par la réalisation du tunnel. En effet, afin de garantir la traversée des gares souterraines dans des conditions satisfaisantes de sécurité (notamment en termes d'étanchéité), il est indispensable que le volume principal des gares soit excavé et que les structures provisoires souterraines soient réalisées (notamment nécessaires à la poussée et la mise en confinement du tunnelier, mais également à l'étanchéité).

Le planning actuel de réalisation du tunnel prévoit un début de creusement (PO) en 2025 pour une durée d'environ 2 ans. La traversée de chaque station par ripage du tunnelier est estimée à un mois et demi par station.

Le démarrage général du chantier est actuellement prévu en 2022. Préalablement au démarrage du chantier, un certain nombre de travaux doivent être réalisés pour s'assurer de la bonne efficacité du chantier, tels que la déviation des impétrants, de certaines lignes de tram et la démolition/désamiantage de certains bâtiments.

Le calendrier global de réalisation du projet est présenté dans le Livre I et est repris à la figure ci-dessous. Le calendrier de réalisation des stations est présenté de manière détaillée dans les Livres Stations.

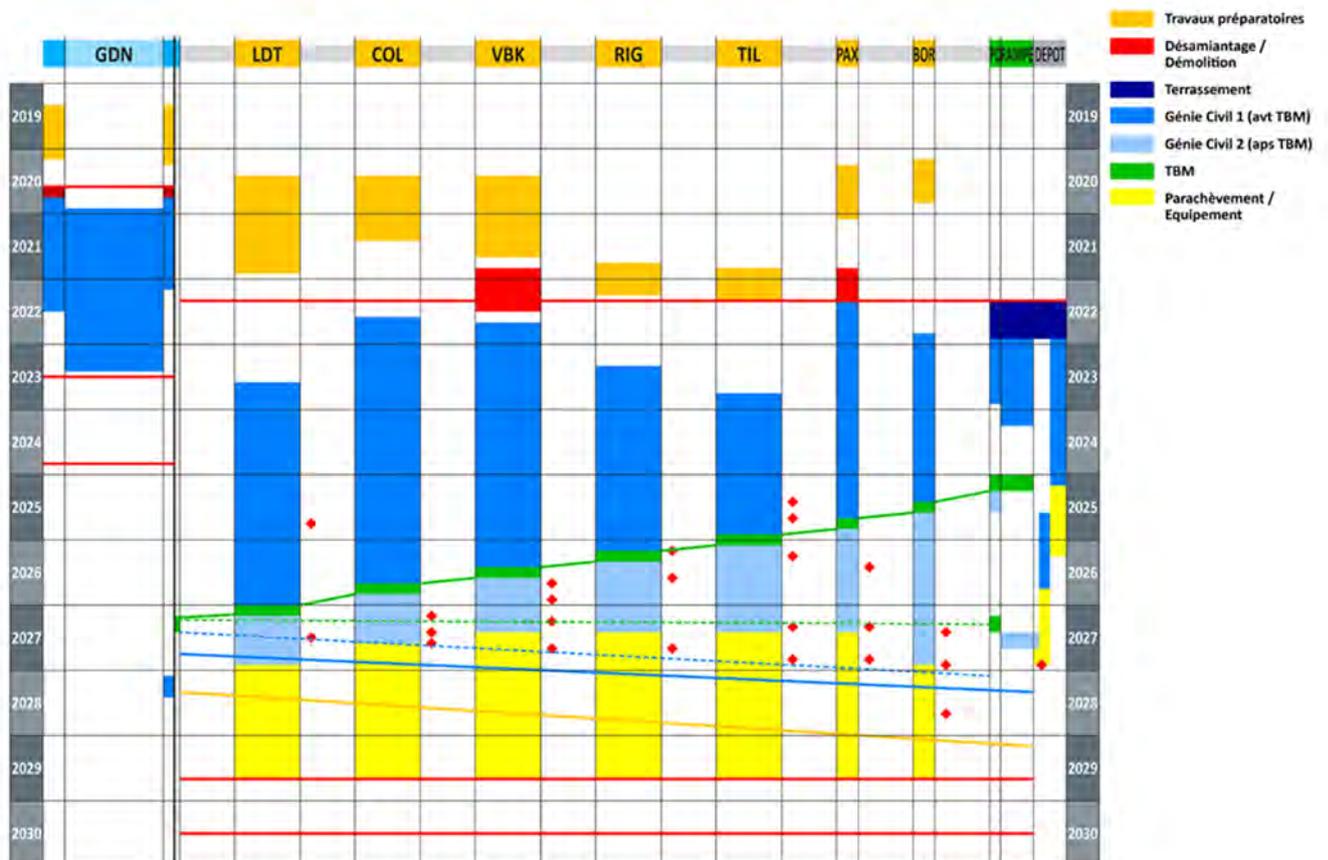


Figure 27: Calendrier global de réalisation du projet (BMN, 2019)

La durée approximative de chaque phase de construction du tunnel est reprise ci-dessous et représenté en vert ci-dessus. Ces durées sont données à titre indicatif et sont susceptibles d'évoluer en cours de projet.

- Phase préalable : installation du chantier : ~2 mois.
- Phase 1 : réalisation du puits P0 et de la rampe d'accès : ~8 mois et demi.
- Phase 2 : montage du tunnelier : ~3 mois.
- Phase 3 : creusement des 200 premiers mètres : ~1 mois.
- Phase 4 : creusement du tunnel (hors ripage du tunnelier dans les stations, c'est à dire le déplacement manuel du tunnelier et entretien de la tête du tunnelier dans les boites préalablement construites, opération nécessitant 1.5 mois par station)
 - Tronçon P0 - Bordet : ~2 mois et demi.
 - Tronçon Bordet – Paix : ~2 mois.
 - Tronçon Paix - Tilleul : ~1 mois et demi.
 - Tronçon Tilleul - Riga : ~2 mois et demi.
 - Tronçon Riga – Verboekhoven : ~2 mois.
 - Tronçon Verboekhoven – Colignon : ~2 mois.
 - Tronçon Colignon – Liedts : ~2 mois.
 - Tronçon Liedts - P5 : ~1mois.
- Phase 5 :
 - Arrivée du tunnelier dans le puits P5 et démontage du tunnelier : ~3mois et demi .
 - Génie Civil du P5 : ~3 mois et demi.
 - Mise en place du béton de rechargement : ~8 mois.
- Phase 6 : fermeture des trémies de la rampe d'accès : ~3 semaines.

Lorsque le génie civil du tunnel est terminé, les travaux de mise en place des équipements, la pose des voies et la réalisation des travaux de finitions des quais commencent et vont durer approximativement 2 ans avant le lancement de la phase test du métro.

6. Analyse des incidences du projet au regard de la situation de référence et recommandations

6.1. Mobilité

6.1.1. Modélisation comparative BMN - MUSTI

Comme indiqué dans le Livre Introduction point 1.5.1.2, le bureau BMN (bureau métro nord) a développé un modèle multimodal de prévision du trafic voyageur sur la ligne M3. Ce modèle dénommé « BMN » repose en grande partie sur IRIS II et sur un horizon 2020-2040. Les hypothèses, les forces et les faiblesses de ce modèle sont expliquées dans le livre Introduction.

L'objectif du présent point est de comparer ce modèle avec le modèle Musti qui est construit sur d'autres hypothèses et qui intègre le métro nord dans sa modélisation. Les paramètres et hypothèses de modélisation sont décrits dans le Livre Introduction.

Les graphiques suivants présentent le nombre de montées et descentes par station et par sens sur les stations de la ligne M3 entre 6h et 10h du matin.

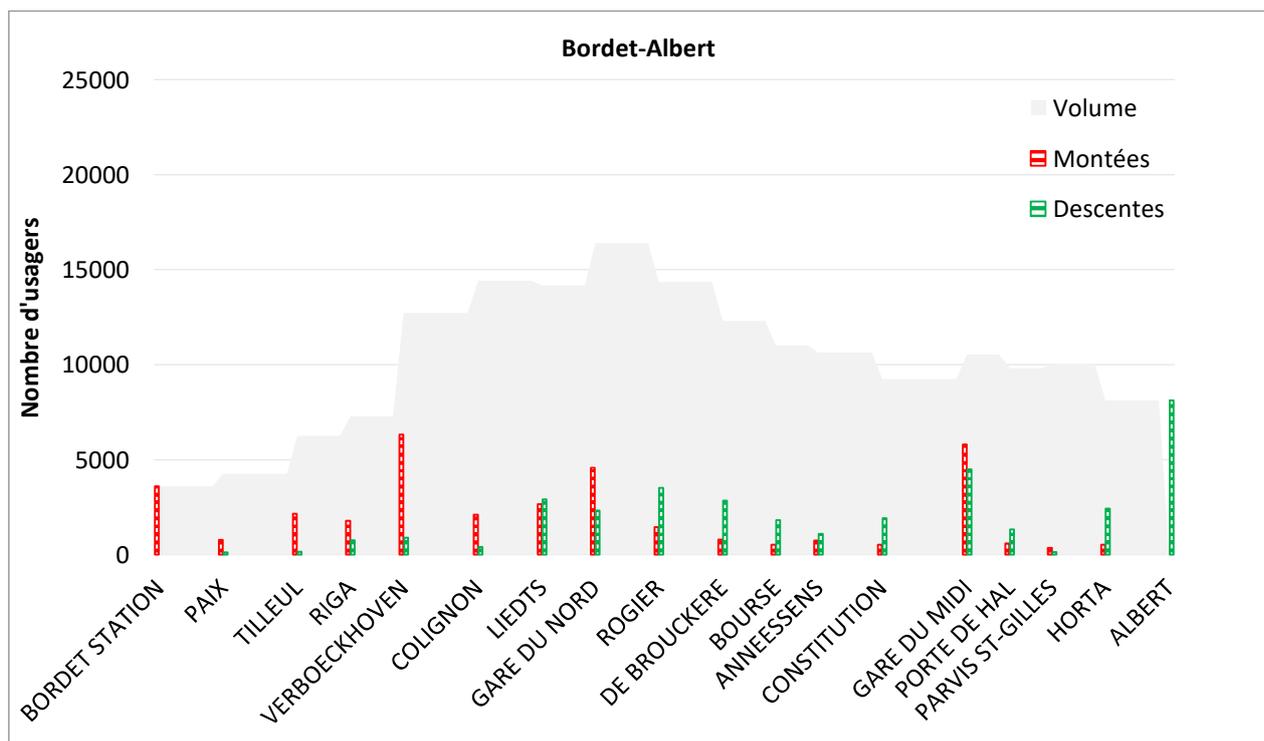


Figure 28: Serpent de charge 6h-10h de fréquentation de la ligne M3 dans le sens Bordet-Albert (Données Musti, Bruxelles Mobilité, 2020)

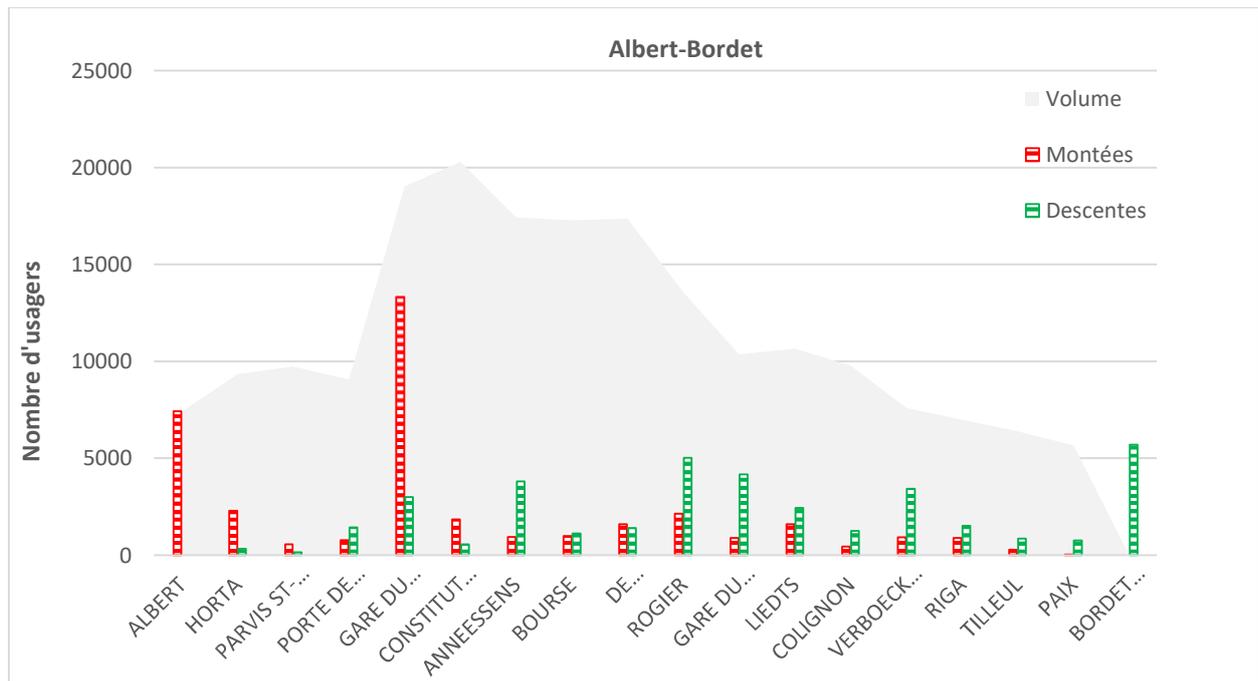


Figure 29: Serpent de charge 6h-10h de fréquentation de la ligne M3 dans le sens Albert-Bordet (Données Musti, Bruxelles Mobilité, 2020)

Pour pouvoir comparer ces résultats aux résultats des simulations BMN fournis pour la tranche horaire 7h-9h du matin, un coefficient multiplicateur de 0.7 a été appliqué sur les données Musti. Ce coefficient de 0.7 se base sur les comptages sur la ligne 55 effectués par Bruxelles Mobilité. Ces comptages ont été effectués sur certains interstations fin 2017.

Etant données les variations importantes de fréquentation que peut subir une station selon l'heure et le sens de circulation, l'application de ce coefficient peut avoir un impact sur la hiérarchisation des stations.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

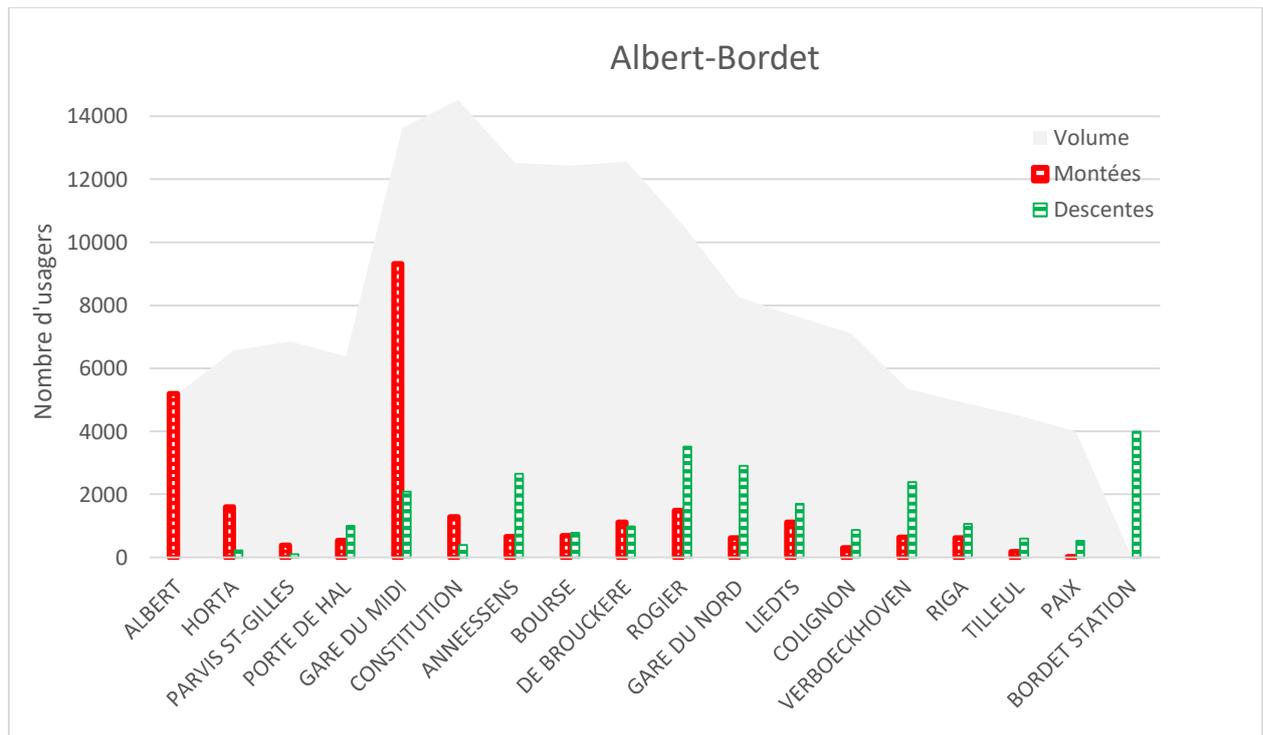


Figure 30 : Serpent de charge 7h-9h de fréquentation de la ligne M3 dans le sens Bordet-Albert (Données Musti, Bruxelles Mobilité, Traitement Tractebel 2020)

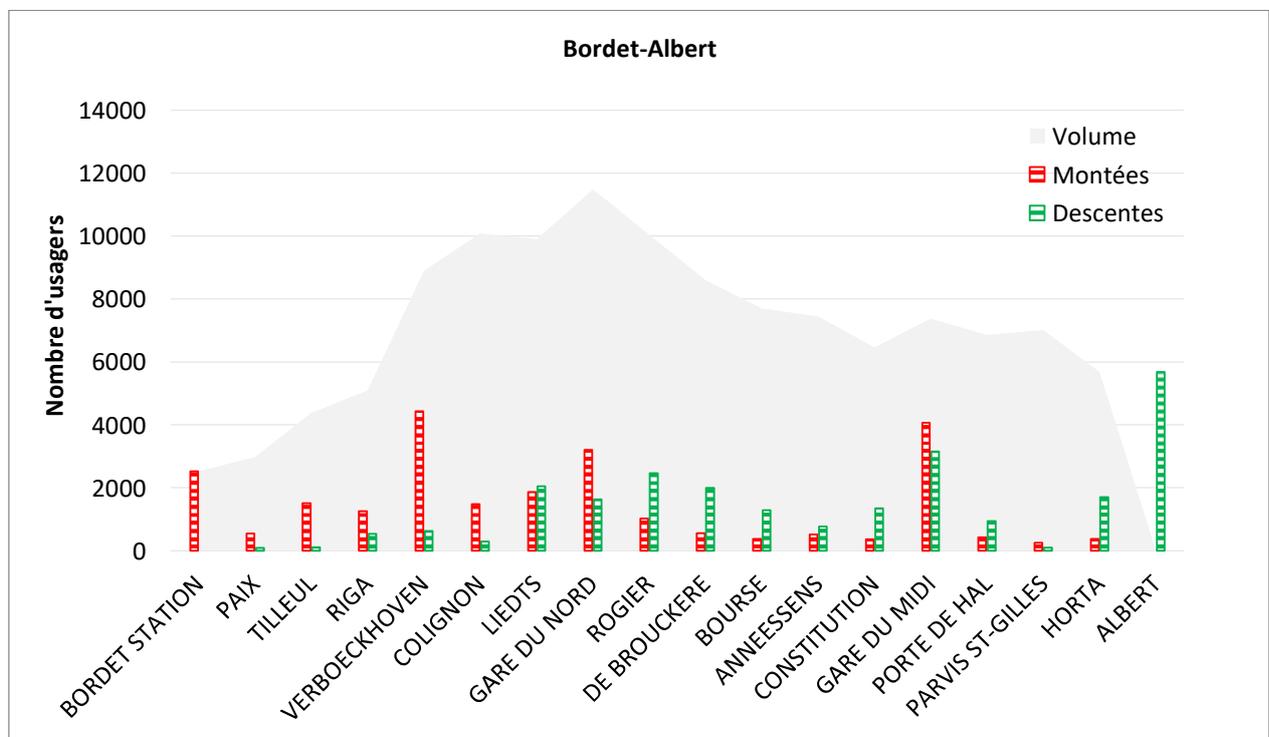


Figure 31 : Serpent de charge 7h-9h de fréquentation de la ligne M3 dans le sens Albert-Bordet (Données Musti, Bruxelles Mobilité, Traitement Tractebel 2020)

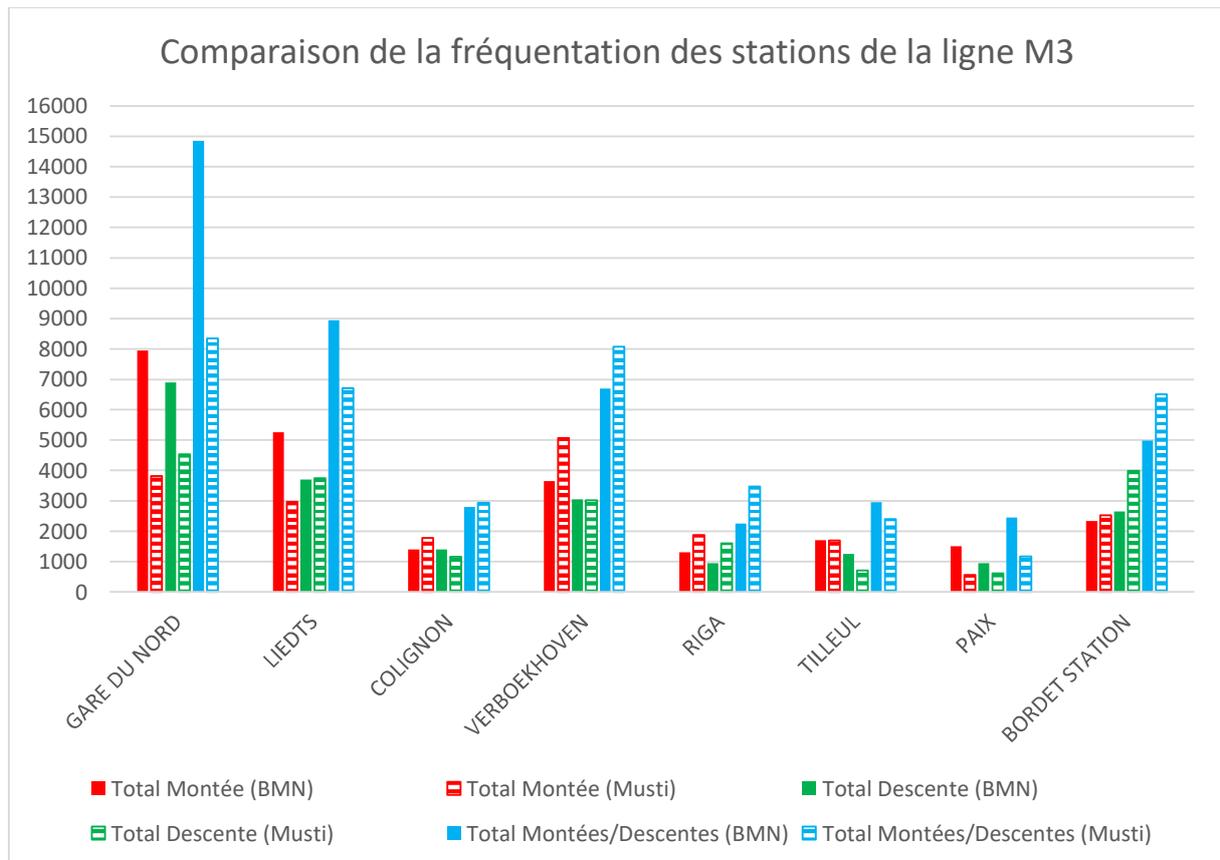


Figure 32 : Comparaison des fréquentations des stations de la ligne M3 sur l'heure de pointe 7h-9h selon les données Musti ou BMN (Tractebel 2020)

Bien que l'on observe des différences entre les deux sources de données, dues notamment aux hypothèses de modélisation qui sont expliquées dans le livre Introduction, la fréquentation des stations reste comparable. La station GARE DU NORD est de loin la plus fréquentée. Les stations BORDET, LIEDTS et VERBOEKHOVEN sont des stations plus fréquentées également que les autres. Les stations RIGA, TILLEUL, PAIX et COLIGNON sont quant à elles des stations dites « basse fréquentation ».

Dans le modèle Musti réalisé pour ce projet, et validé par Bruxelles mobilité, la station VERBOEKHOVEN prend en compte la métroisation de la ligne 7 et donc des correspondances accrues entre les deux lignes, ce qui explique la fréquentation particulièrement haute de cette station. Ceci est observable dans la carte des chemins empruntés par les usagers de la ligne, située en fin de chapitre. À noter que le modèle Musti ne prévoit pas de halte RER à Verboekhoven.

Ce qui signifie concrètement que les flux attendus à cette station sont les mêmes entre modèle BMN et Musti mais la différence se trouve dans la localisation majeure des flux en lien avec l'actuel tram7 pour le modèle Musti. C'est donc un accès Lambermont qui est privilégié dans le modèle Musti.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

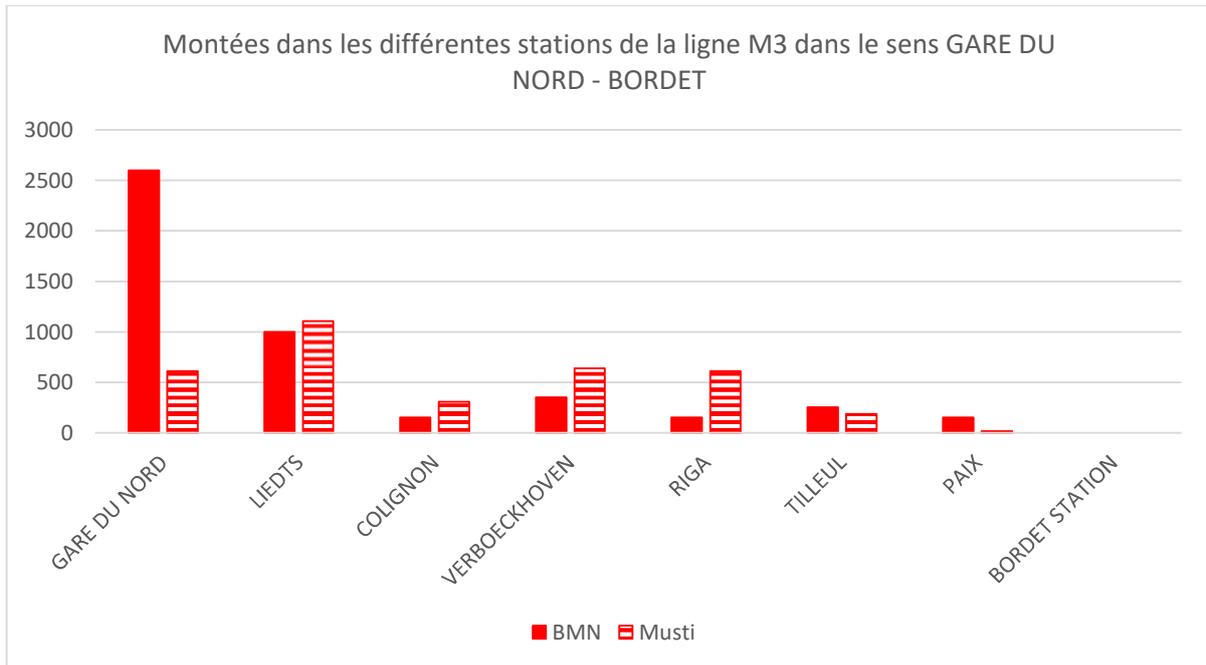


Figure 33 : Comparaison des montées en heure de pointe (7-9h) observées par BMN et MUSTI dans le sens Gare du Nord - Bordet (Tractebel 2020)

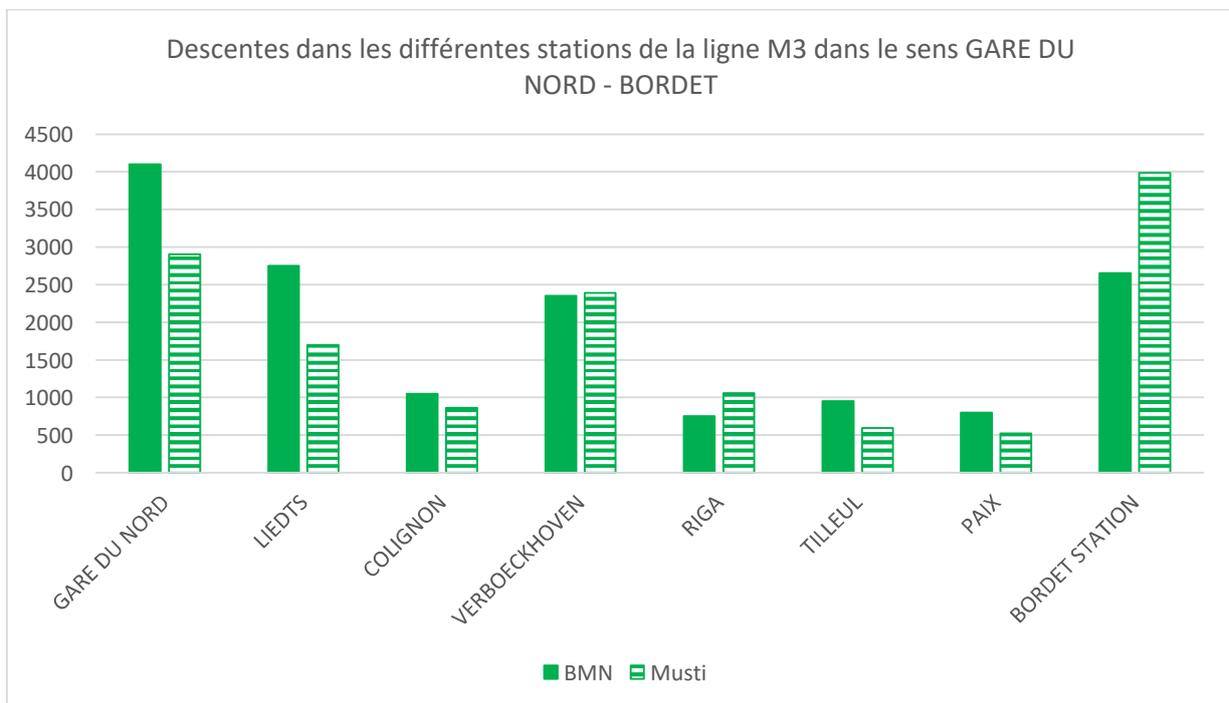


Figure 34 : Comparaison des descentes en heure de pointe (7-9h) observées par BMN et MUSTI dans le sens Gare du Nord - Bordet (Tractebel2020)

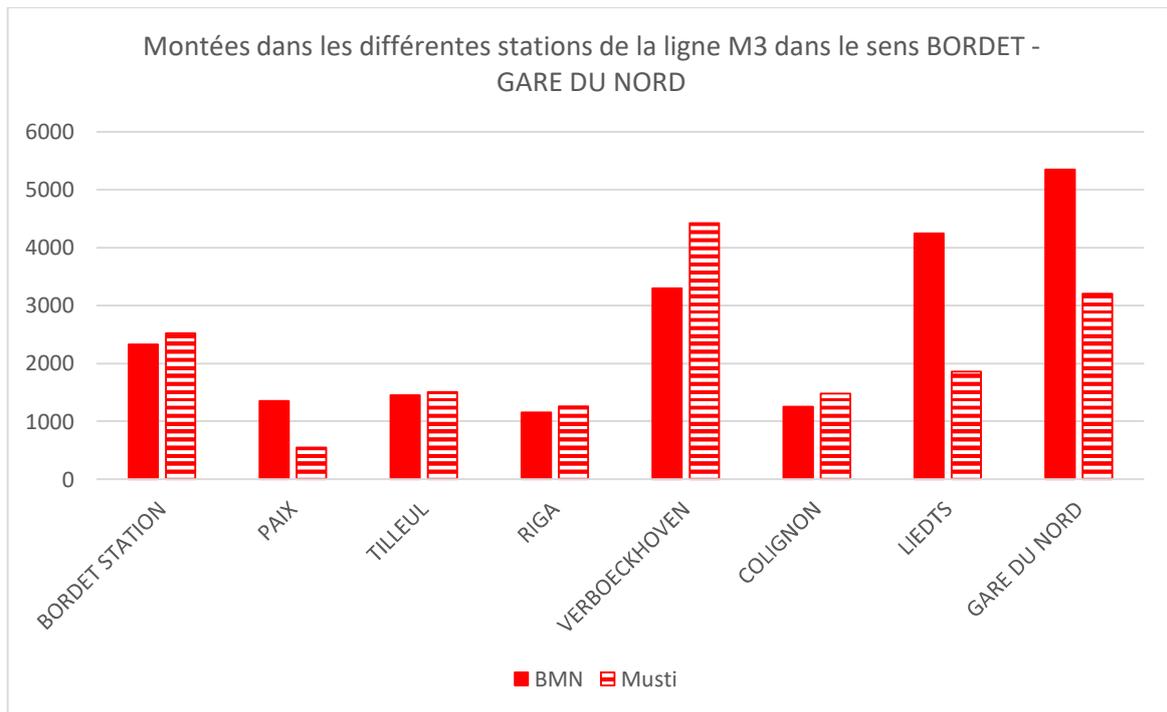


Figure 35 : Comparaison des montées en heure de pointe (7-9h) observées par BMN et MUSTI dans le sens Bordet – Gare du Nord (Tractebel2020)

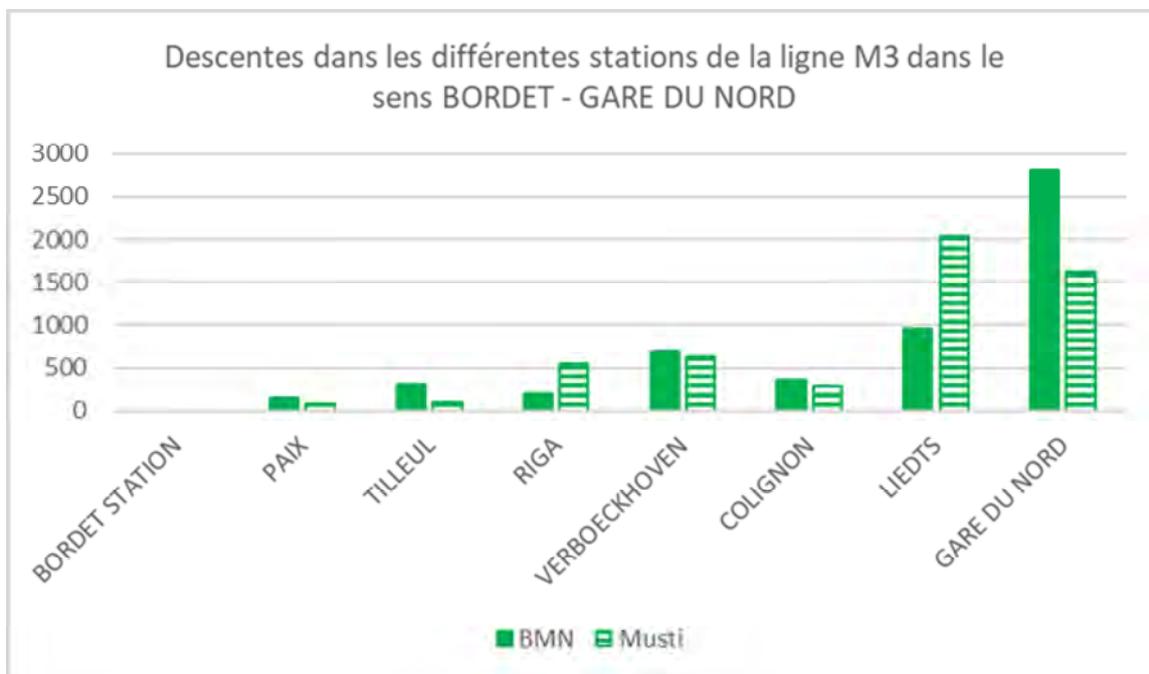


Figure 36 Comparaison des descentes en heure de pointe (7-9h) observées par BMN et MUSTI dans le sens Bordet – Gare du Nord (Tractebel2020)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

Quand on compare les fréquentations BMN et Musti, quel que soit le sens de circulation, on observe que les plus grosses différences se situent dans les montées et descentes à la Gare du Nord et à Liedts. La part accrue de l'utilisation de modes actifs poussée pour le modèle Musti explique en partie ces différences.

On observe cependant une fréquentation légèrement supérieure dans les stations Colignon, Verboekhoven, Riga et Bordet avec le modèle Musti par rapport à BMN.

Notamment pour la station Bordet où les descentes sont plus importantes en HPM, ce qui est crédible au vu d'une hypothèse d'utilisation du métro par les travailleurs bruxellois vers la zone Bordet/Otan et de tout le secteur tertiaire et industriel entourant la station.

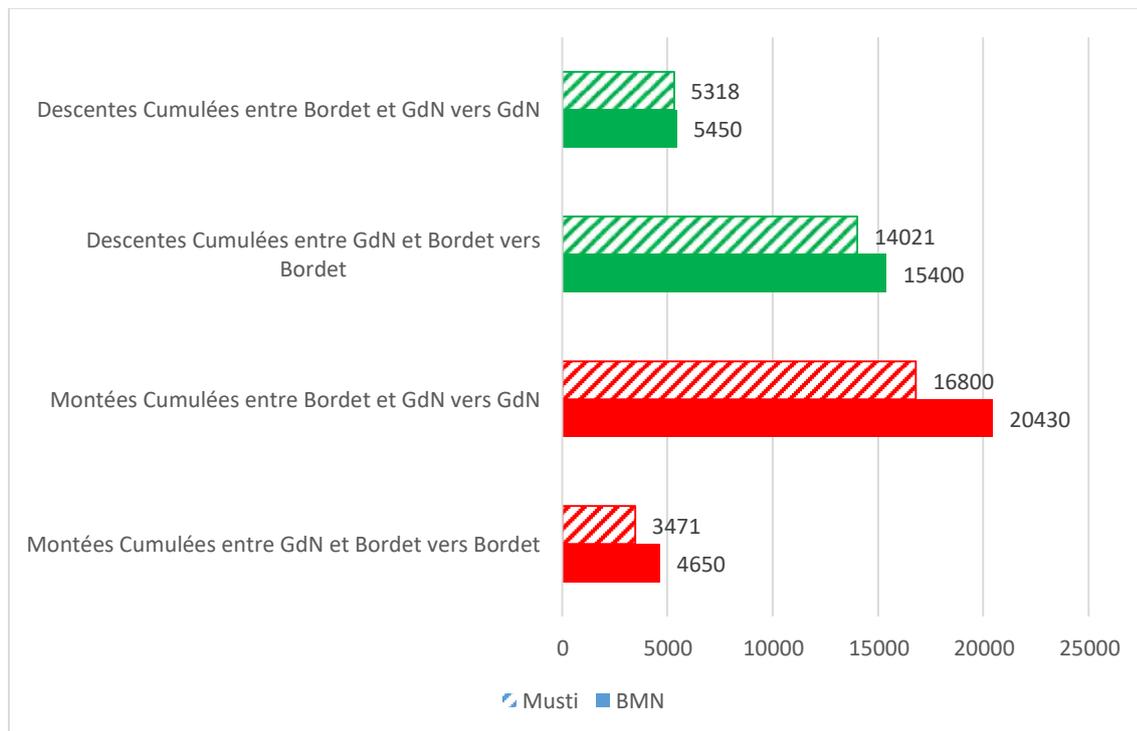


Figure 37 Comparaison des chiffres totaux en heure de pointe (7-9h) observées par BMN et MUSTI (Tractebel 2020)

Charge estimée du métro sur le tronçon Nord-Bordet entre 7h et 9h par sens selon Musti

	Montées	Descentes	Volume		Arrets	Montées	Descentes	Volume
GARE DU NORD	611	2904	8257		BORDET STATION	2522	0	2522
LIEDTS	1107	1699	7665		PAIX	545	90	2977
COLIGNON	305	864	7106		TILLEUL	1511	108	4380
VERBOECKHOVEN	638	2391	5353		RIGA	1257	538	5099
RIGA	612	1058	4907		VERBOECKHOVEN	4424	625	8898
TILLEUL	184	597	4494		COLIGNON	1475	289	10084
PAIX	14	524	3984		LIEDTS	1862	2041	9905
BORDET STATION	0	3984	0		GARE DU NORD	3204	1627	11482

Figure 38: Hypothèse des montées descentes sur le tronçon Nord Bordet entre 7h et 9h (Tractebel 2021)

6.1.2. Conclusion de l'analyse comparative

On observe une fréquentation accrue et cumulée dans le modèle BMN en comparaison avec le modèle Musti. Cette différence se situe entre 2% et 25% de manière cumulée sur le tronçon étudié est et donc relativement faible au vu des hypothèses différentes des deux méthodes de calcul.

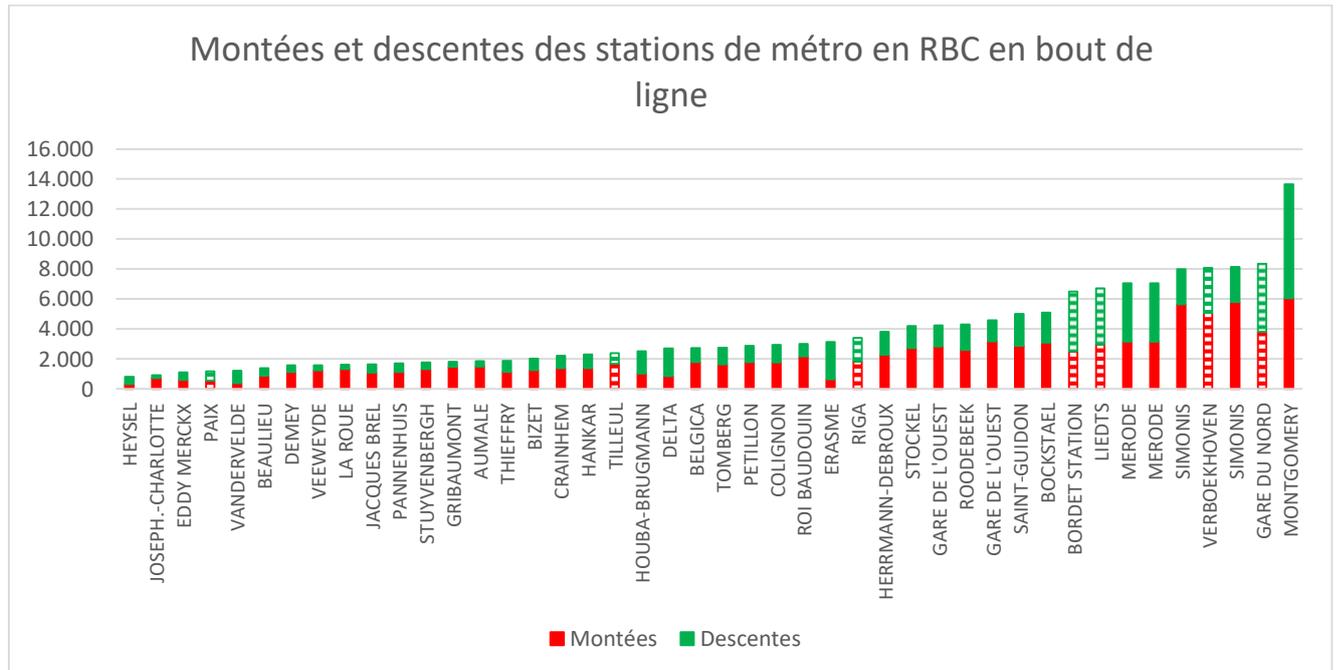


Figure 39 : Montées et descentes des stations de métro en RBC entre 7h et 9h (source de données STIB 2019 et Musti 2020, traitement Tractebel 2020)

Le graphe ci-dessus permet de comparer les montées descentes des futures stations définies par la modélisation Musti de Bruxelles Mobilité à des stations existantes sur le réseau. A part les stations Paix et Tilleul, sur lesquelles des montées et descentes particulièrement faibles sont attendues, on observe que les fréquentations des futures stations se situent dans la moyenne positive du réseau bruxellois.

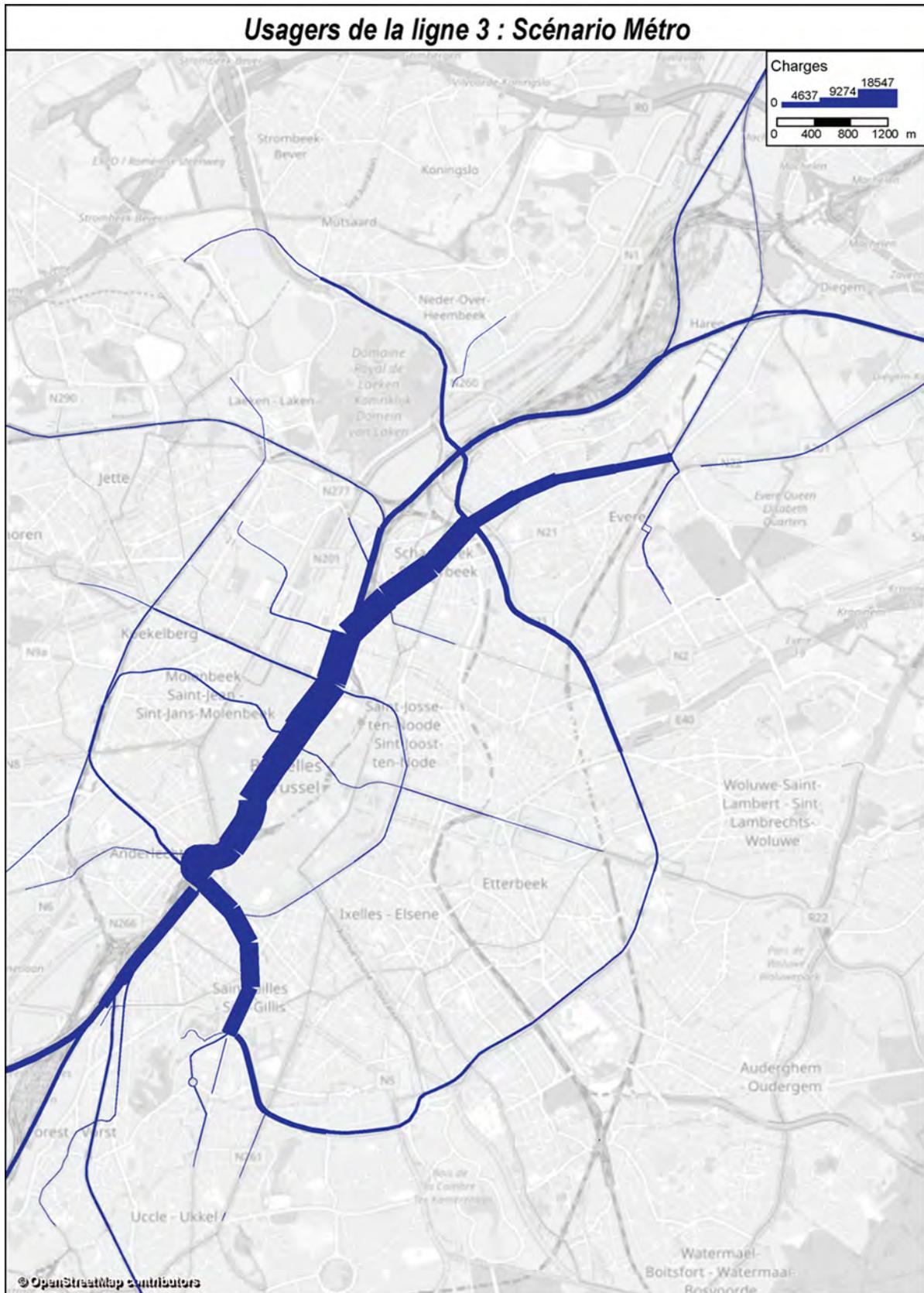


Figure 40: Chemins empruntés par les usagers de la ligne M3, sortie du Modèle MUSTI, Bruxelles Mobilité, 2020

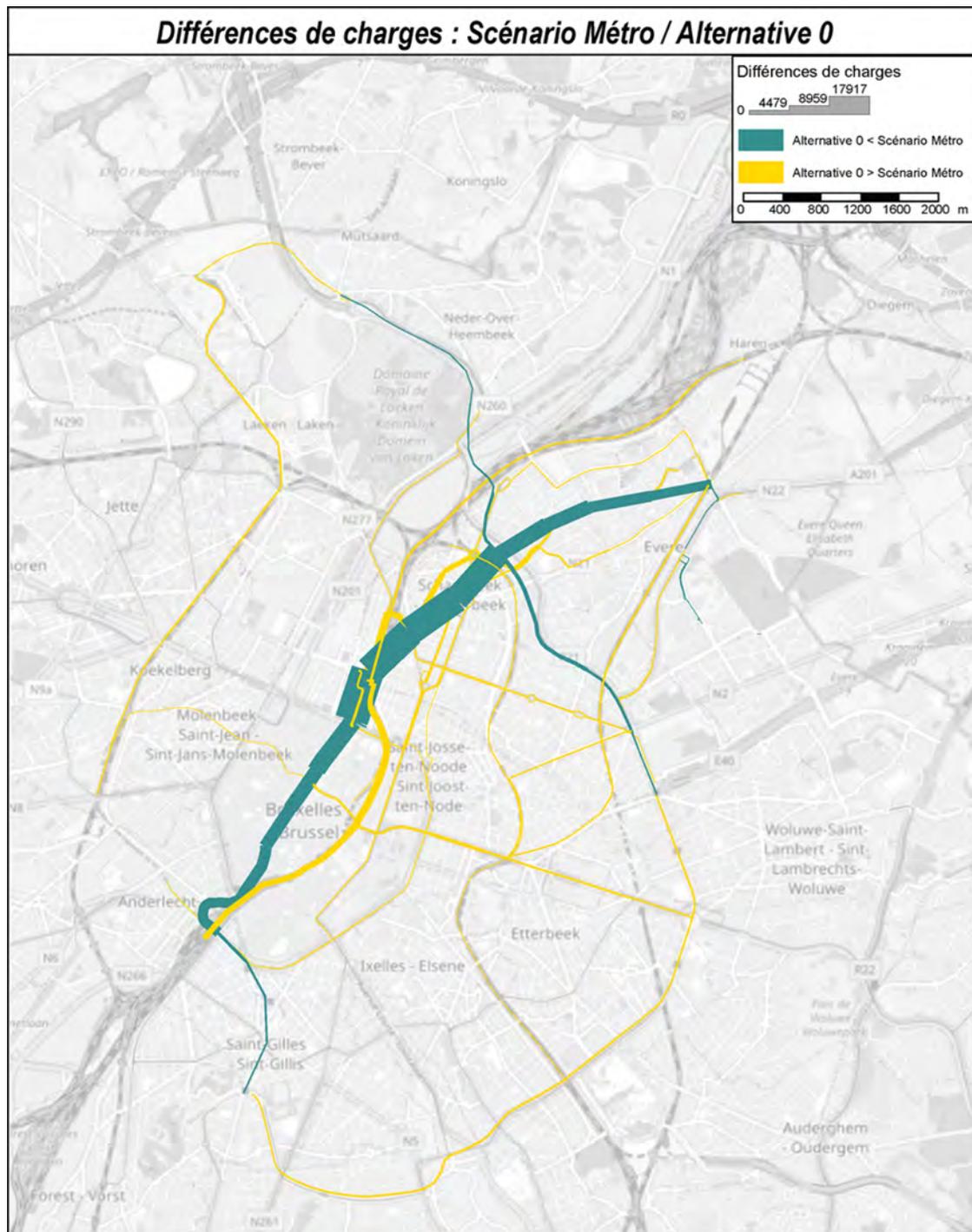


Figure 41: différences de charges entre chaque situation et l'alternative 0, sortie du Modèle MUSTI, Bruxelles Mobilité, 2020

Selon la figure ci-dessus, nous observons que la ligne 7 va également observer une augmentation de fréquentation, suite à la mise en service du M3. Par contre, on observe, et cela est un effet très positif, que le réseau aujourd'hui saturé de la ligne 1 entre Montgomery et la Gare Centrale sera soulagé. Nous observons également une forte diminution de l'utilisation de la Jonction ferroviaire Nord-Midi.

6.1.3. Evaluation du report modal dû à la mise en œuvre du Métro Nord

6.1.3.1. Contexte

Il existe une certaine corrélation entre l'amélioration de l'offre de transport en commun, dans le cas présent l'extension du métro Nord, et la diminution de la part modale des voitures particulières. D'ailleurs, le présent projet s'inscrit dans le plan Good Move qui vise une réduction de l'utilisation de la voiture individuelle dans la Région de Bruxelles-Capitale.

Cependant, il est important d'approcher la question de manière holistique. La diminution de la part de la voiture individuelle dans la Région n'est pas une conséquence mais bien un objectif vers lequel tendre en utilisant nécessairement différents outils (amélioration de l'offre en transport en commun, politique de stationnement, tarification de la circulation automobile, mesures fiscales, amélioration des aménagements de surface, intégration des services, promotion et communication, etc.).

Déjà, le plan Iris 2 comportait un volet consacré aux transports en commun dans lequel il était préconisé de rendre les transports plus attractifs en développant l'offre et en améliorant la qualité de service, afin d'atteindre un objectif de réduction de 20% de la part modale de la voiture en RBC. La prolongation du prémétro et sa métroisation dans le quadrant nord-est était en ce sens alors qualifiée de « priorité des pouvoirs publics bruxellois ».

Lors de l'étude d'opportunité socio-économique et stratégique du projet, BMN a estimé l'influence directe du prolongement du métro sur le report modal des voitures individuels vers d'autres modes en utilisant un modèle multimodal de transport dans la zone RER (zone d'environ 25 km autour de la Région Bruxelles-Capitale).

A. Influence directe du métro

L'étude BMN(3) qui a mené à la préconisation de la mise en œuvre du tracé dense du métro pour la desserte du corridor entre Albert et Bordet suit cette prédiction. Elle prévoyait à l'époque un transfert modal des automobilistes vers les transports en commun de 14% (entre 2010 et 2020, pour un métro terminé d'ici là). Les modèles de simulation et les scénarii constatés étaient alors basés sur des hypothèses sociodémographiques sur la croissance de la population et des emplois et sur les projets de développement urbain. Ces hypothèses s'appuyaient entre autres sur les comptages trafic et les temps de parcours et la répartition modale contrôlée par l'enquête Beldam 2010.

³ BMN (2012): « Tranche 1 : Etude de l'opportunité socio-économique et stratégique », *Rapport de Synthèse : Etude de l'extension du réseau de transports en commun de haute performance vers le nord à Bruxelles*

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

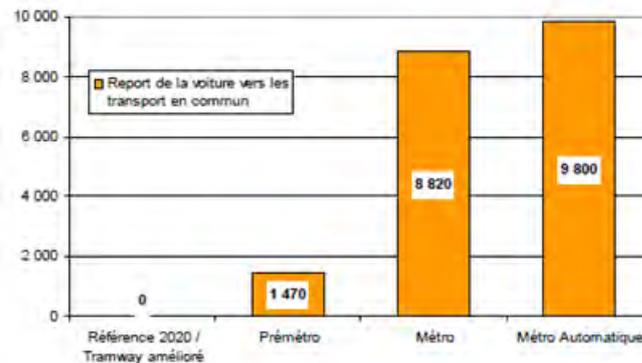


Figure 42 Nombre de voyageurs qui se reportent de la voiture vers les transports en commun selon le mode de transport (BMN, 2012)

Ainsi toujours selon cette étude, le choix de l'installation d'un métro devrait entraîner un report d'usager quotidien de la voiture vers un usage quotidien des transports en commun de l'ordre de 9 000 passagers. Le choix d'un métro automatique entrainerait lui un report de près de 10 000 voyageurs.

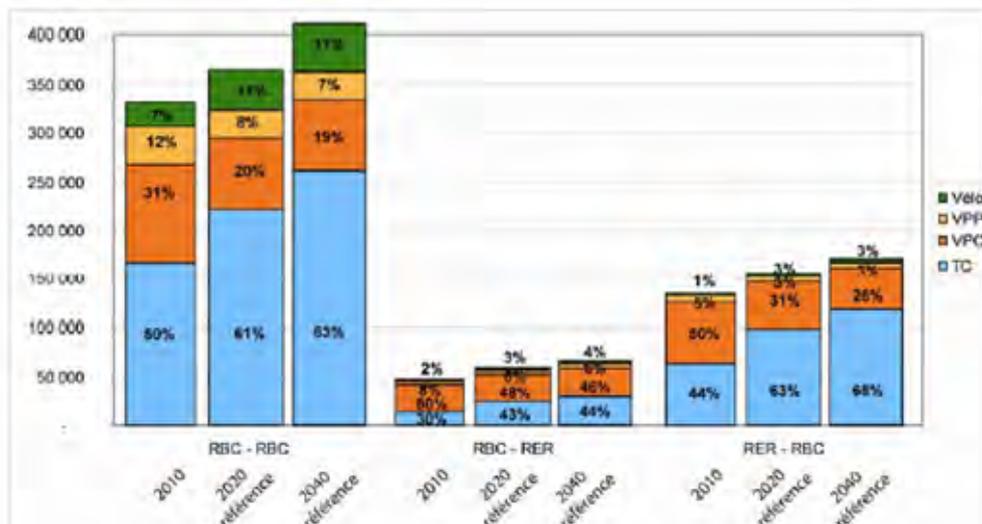


Figure 43 Prédiction de répartition modale (BMN, 2012)

Le transfert modal important des usagers de la voiture particulière vers les transports en commun était estimé à 11 points juste après la mise en place du système de transport, puis de 3 points dans les 20 ans qui suivaient son installations. Il est donc possible de considérer que le projet sur 20 ans entraine le transfert modal directe de 14%, évoqué plus tôt.

Toutefois ces prédictions sont à prendre avec précaution. Les simulations faites par BMN avaient pour postulat la mise en place d'un péage urbain. Ce péage urbain était alors en grande partie responsable de l'augmentation de la demande de transport en commun et seul responsable du transfert modal de la voiture vers le métro souhaité (*l'instauration du péage est la mesure ayant l'impact le plus important entrainant un report de la voiture va amener,*

chaque jour, 260 000 déplacements supplémentaires en transport en commun à l'intérieur de la région et plus de 500 000 à l'échelle de la zone RER)⁴.

Horizon	Scénario	veh.km [km]	veh.h [h]	Recettes [€]
2010	Situation actuelle	701 630	33 666	-
2020	Référence	606 200	24 008	420 900
2020	Test 1 (sans péage)	720 200	36 962	-

Figure 44 Simulation avec ou sans péage

Comme le montre le tableau ci-dessous, une simulation sans péage ne voyait pas une diminution du nombre de véhicules routiers. Ainsi l'influence de la création du métro sur le report modal tel que présenté précédemment est contestable, l'étude précisant que dans une simulation sans péage urbain *il ne serait pas possible d'atteindre l'objectif du plan Iris II de réduction de la circulation de 20% par rapport à 1999*⁵.

B. Influence totale et indirecte du métro par le vélo

Le report modal de la voiture vers le vélo est également important. Mais ce report n'est pas tout à fait indépendant de l'amélioration de l'offre de transport en commun.

Toujours dans l'étude BMN il est considéré dans la simulation que le vélo connaîtra un rythme de croissance modéré (atteignant 12% en 2020). Cette croissance se fait en dépit de la part modale de la voiture pour un tiers et des transports en commun pour deux tiers, soit une baisse de fréquentation de 5% des TC. Cette baisse de fréquentation des transports en commun est en partie due au fait de la fluidification du trafic routier engendrée par un réseau de transport plus efficace, qui rend la voirie propice à l'usage du vélo qui attire donc de nouveaux cyclistes. Par ailleurs la baisse de fréquentation rend le métro moins encombré, donc plus confortable et donc susceptible d'attirer de nouveaux usagers anciens automobilistes incités à abandonner l'automobile. C'est ainsi que paradoxalement, cette baisse de fréquentation est compensée par un report modal de la voiture vers les transports en commun, qui est favorisé par un report modal des transports en commun vers le cyclisme, qui est lui-même favorisé par la mise en place d'un réseau de transport en commun plus efficace.

Ces transferts modaux liés à l'amélioration de l'offre de transport en commun engendrent selon la simulation de BMN une diminution de 16% du trafic routier en Région Bruxelles Capitale (veh.km).

6.1.3.2. Mise en perspective de la pertinence de l'analyse des transferts modaux

Si un péage automobile n'est pas inclus dans les prévisions de transferts modaux, l'étude BMN conclut que le métro n'aura pour impact qu'une faible diminution du nombre de déplacements en voiture.

Cependant, la diminution de la part modale de la voiture individuelle n'est pas le seul objectif ou indicateurs à considérer. Il faut prendre également en compte l'impact de cette nouvelle

⁴ BMN (2012)

⁵ BMN (2012)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

ligne de métro sur des paramètres tels que les gains en temps, les effets de réseaux, la valorisation du foncier, l'amélioration de l'accessibilité aux emplois, aux services,...

En essayant d'isoler les effets d'une mesure particulière, le métro nord dans le cas présent, on en arrive en général à conclure qu'ils sont faibles et qu'il faut des « mesures d'accompagnement »... ce qui revient à dire qu'il faut une stratégie de mobilité d'ensemble.

Aujourd'hui, cette stratégie est définie via Good Move, et la ligne de métro Nord-Bordet en fait partie.

D'après Good Move, la répartition modale est aujourd'hui de 33% pour les automobilistes seuls et de 67% pour les autres modes (dont 9% de covoitureurs). Cette répartition est censée évoluer après l'application du plan vers une répartition de 24% d'automobilistes individuels pour 76 % d'autres modes, soit une diminution de 9% d'automobilistes quotidiens.

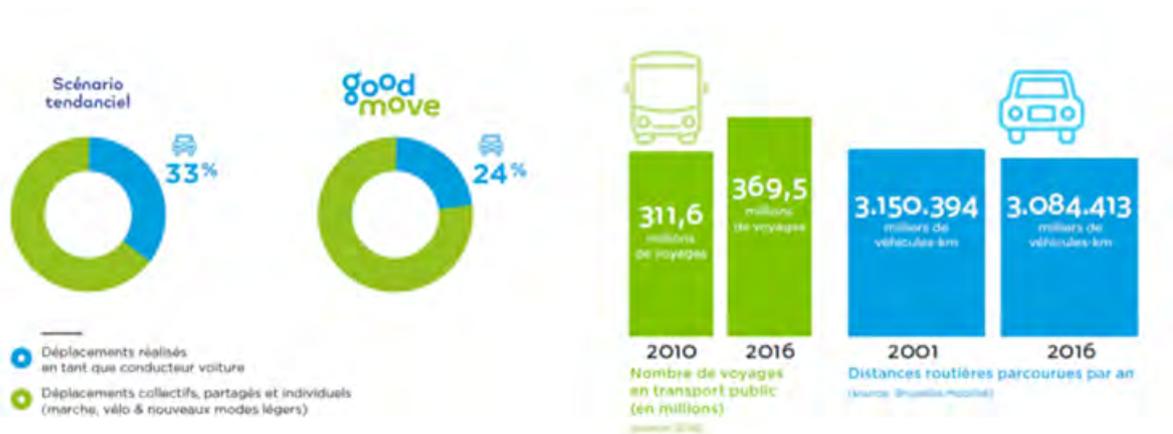


Figure 45 : Scénario tendanciel prévu par Good Move et Le poids de la mobilité dans la situation actuelle (Good Move, 2019)

La mise à disposition d'une nouvelle infrastructure de masse et robuste, permettant d'offrir des capacités élevées à un haut niveau de service pour le client, est une condition nécessaire pour pouvoir mettre en œuvre avec succès des mesures volontaristes de modération du trafic automobile et de report modal à Bruxelles, dans le contexte de croissance démographique et de densification urbaine que l'on connaît.

Autrement dit, le report modal restera faible si l'on se contente de construire le métro sans vouloir restreindre parallèlement le trafic automobile. Inversement, opter pour une politique volontariste de restriction de la circulation automobile sans proposer de nouvelles alternatives d'infrastructures de transport en commun de qualité et de capacité suffisante ne satisfera pas les usagers.

6.1.4. Incidences du transport des déblais (du tunnel) suivants les 2 hypothèses de chargement retenues

6.1.4.1. Chargement au port de Bruxelles

Le volume de terres à évacuer du tunnel mais aussi des 7 stations et du dépôt, soit une estimation de 1.500.000m³, soit 90.000 camions ce qui représente approximativement 5 fois l'équivalent de la butte du Lion de Waterloo.

Le déblai pour le tunnel et le dépôt équivaut à 41.500 camions. Quotidiennement le chantier du tunnel produira approximativement 700m³ jour ce qui équivaut à 30 camions/jour. Il faut ajouter l'équivalent de 7 camions pour les voussoirs et 6 camions pour le mortier de bourrage. Ce qui porte le total à théoriquement 43 camions par jour lorsque le tunnelier est en fonctionnement.

À cela se rajoute les camions issus des chantiers des 7 stations et du dépôt, soit une estimation de 15 à 20 camions/station qui devront également décharger les terres au port de Bruxelles.

L'itinéraire initialement prévu par BMN était le suivant : Dépôt → Houtweg → Stroobants → rampe du Lion → port de Bruxelles

L'itinéraire prévu initialement pour le chargement vers le port de Bruxelles n'est pas possible ou nécessiterait une percolation dans les quartiers résidentiels. En effet, la rampe du Lion ou pont Albert situé au-dessus du chemin de fer n'est plus, vu les conditions de stabilité et détérioration de l'ouvrage, autorisé pour le passage de véhicules lourds. Vu son état, le pont avait été interdit aux poids lourds de plus de 3,5 tonnes en 2013.



Figure 46 : Vue sur l'entrée du pont depuis Schaerbeek vers le port (Googlestreetview, juillet 2020)

En l'absence de ce franchissement du chemin de fer, l'accès le plus direct vers le port réside dans le boulevard du Lambert en empruntant Houtweg, l'av. Bordet, l'axe Léopold III, le boulevard du Lambert et ensuite l'avenue de Vilvorde.

Cet itinéraire sera long de ±7 kilomètres et nécessitera hors période de pointe un temps de trajet estimé (via googlemaps) à 16 minutes. En période de pointe, le trafic important et les embouteillages récurrents sur l'av Bordet, Léopold III et la Moyenne Ceinture augmenteront considérablement le temps de trajet théorique.

La charge de camion estimée à 9 camions/h/sens en moyenne ne sera pas de nature à modifier significativement la circulation sur ces axes d'importance régionale mais contribuera toutefois à un accroissement des encombrements, notamment au droit des carrefours proche de la base de chantier (carrefour Houtweg/Haecht/Bordet et Bordet/Léopold III).

Il est important de noter que cet itinéraire vers le port de Bruxelles conditionne aussi le charroi en provenance de 6 des 7 stations dont le transport semble inévitable par camions.

On peut regrouper le chantier métro en 4 zones distinctes au niveau de l'acheminement :

- Zone 1 (Houtweg, Stroobants, rampe du Lion) : **Bordet, dépôt, tunnel, Paix**
- Zone 2 (Stroobants, rampe du Lion) : **Tilleul**
- Zone 3 (Lambermont, Van Preat, L. Monnoyer) : **Riga, Verboekhoven, Colignon**
- Zone 4 (Av de la Reine, quai des usines) : **Liedts**

En dehors de l'alternative Léopold/Lambermont pour les zones 1-2 un autre itinéraire pourrait passer par la chaussée de Haecht vers le zoning Buda et ensuite l'avenue de Vilvoorde jusqu'au port mais il s'agit d'un détour de minimum 7km pour le site du dépôt et de 9-12km en provenance de Tilleul et Paix dont une percolation dans les quartiers d'Evere.

Si l'option retenue est le charroi via les camions vers le port, il faut alors impérativement activer le chantier de rénovation de la rampe du Lion. Au moment d'écrire ces lignes, des contacts sont pris entre le demandeur et Infrabel sur ce point mais aucun permis n'est déposé.



Figure 47 : Scénario de liaison entre le port et le chantier du tunnel et des stations – voir atlas cartographique en annexe (ARIES, 2021)

6.1.4.2. Chargement sur la Ligne 26

Un chargement des terres sur des convois de la L26 est possible techniquement moyennant des adaptations d'infrastructures le long du site du dépôt et de sa voie d'essais. Une fois chargé le convoi peut, soit se diriger vers le port de Bruxelles, soit vers un site de traitement ou d'enfouissement en dehors de Bruxelles.

Le chargement vers la ligne 26 devrait se faire en parallèle des voies de train existantes, entre la voie d'essai de la STIB (surélevée) et les 2 voies actuelles de la L26. Il faut alors adapter le talus de la voie d'essai qui se situe plus haut que les voies Infrabel. Un scénario serait la mise en place d'un mur de soutènement le long de la voie d'essais permettant de creuser le talus existant pour insérer une voie ferrée pour les trains chantier (solution identique que pour les travaux RER).



Figure 48: Exemple de mise en place de soutènement à Rixensart pour permettre la pose des voies RER (Rail-be.net)

Pour accéder à cette zone de chargement sur la L26, depuis la zone du chantier tunnel, sans sortir de la zone interne de la STIB, il faut traverser le passage Van Kerkweg.

Si un chargement devait se faire depuis le PO il faudrait alors envisager l'installation d'une bande transporteuse dans le site de la STIB. Cette bande transporteuse passerait alors au-dessus de Van Kerkweg et au-dessus de la voie d'essai du métro (ne devrait logiquement pas être en fonction avant l'exploitation). Ce convoyeur disposerait d'une longueur de +/- 200m.

Cette option serait privilégiée **pour les terres du tunnel** mais aussi pour les terres excavées lors de la construction **des stations proches du site du dépôt** (Bordet, PAIX et éventuellement Tilleul) qu'il faudra amener par camion sur le site du dépôt.

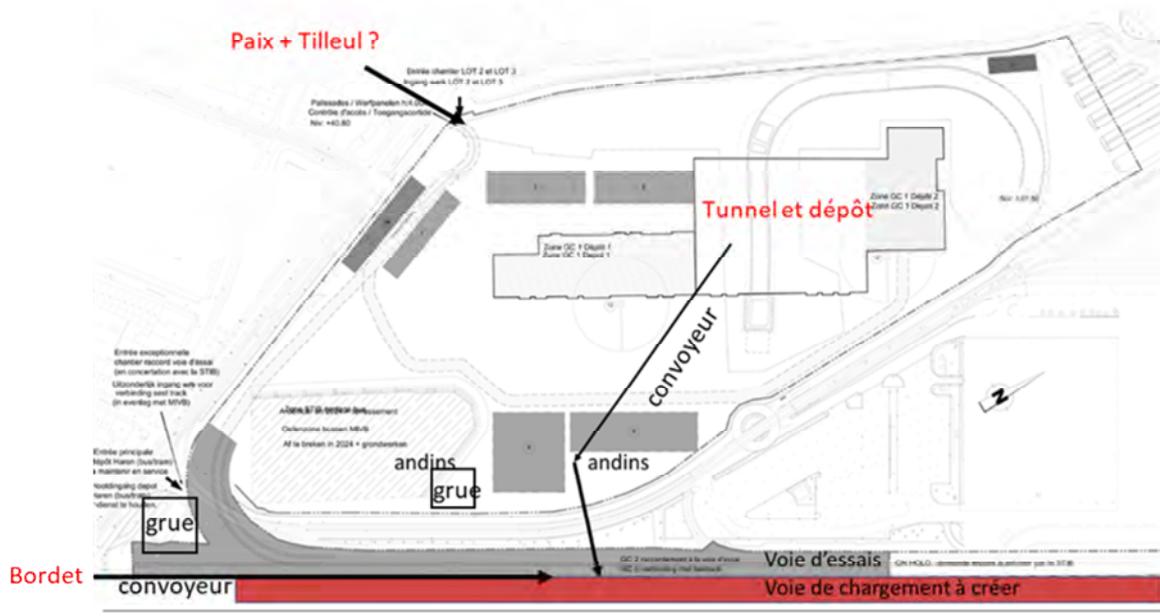


Figure 49 : Hypothèse de transbordement des terres vers la voie ferrée, entre le site du dépôt de Haren et une possible voie de chargement le long de la L26 (ARIES sur plan de chantier BMN, 2021)

Le train n'est pas compétitif pour les terres des 4 autres stations. En effet, au vu de leur insertion urbaine et de l'éloignement des zones potentielles de chargement par voie ferrée (Josaphat ou Schaerbeek formation), il faudrait de toute façon opérer le transfert par camion. Et donc un trajet direct vers le port de Bruxelles est plus approprié pour ces stations.

Au niveau de l'accès au port de Bruxelles, Madame De Norre – Attachée au développement du Port de Bruxelles, confirme en 2021 qu'un accès existe actuellement entre le 'grill' de Schaerbeek formation et les quais de l'avant-port de Bruxelles (menant au terminal conteneurs) permettant de relier la L26 directement au port. Cependant, suite à l'Arrêté Royal du 30/12/2004, cette voie devrait être démantelée. Le Port de Bruxelles souhaite cependant maintenir cette voie d'accès ferroviaire vers l'avant-port de Bruxelles.

Le Port et la Région ont entamé une procédure judiciaire visant à éviter son démantèlement, procédure qui est toujours en cours. Il est également confirmé dans cet échange entre le CE et le Port de Bruxelles que la solution d'accès au port par voie ferrée est préférable à la solution charroi routier.



Figure 50: Itinéraire de l'évacuation des déblais via la L26 vers le port de Bruxelles (ARIES sur Google Earth consulté en février 2021)

6.1.4.3. Calendrier et addition des charrois

A. Zones 1-2

La phase 2022-2024 correspond au chantier de démolition des bâtiments existants et des principaux terrassements en vue de l'installation du **P0 et de la rampe d'accès** ce qui devrait mobiliser +/-30 camions par jours durant 2 ans.

Le tunnelier prendra place dans le puits de démarrage P0 sur le site du dépôt de Haren en 2025 pour une durée de creusement estimée à 26 mois qui doit le mener au puits P5 de la rue d'Aerschot. Le tunnelier sera amené en pièces détachées par convoi exceptionnel et sera monté sur le site de Haren. Entre les différents ripages, le tunnelier pourra fonctionner 7j/7 24h/24 permettant une avancée de 10m/j. Le fonctionnement du tunnelier mobilisera 40-45 camions (par jour de fonctionnement) pendant 2 ans depuis et vers le site de Haren.

Ensuite entre 2025 et 2029, aménagement du bâtiment du **dépôt** qui devrait mobiliser 30 camions par jour.

Et pour finir 2029-2030 aménagements extérieurs du site du dépôt qui devrait mobiliser 10 camions par jour.

Ce chantier se cumule également avec celui de la **station Bordet**, dont les grandes phases sont attendues entre 2023 et 2027. En termes de trafic, l'impact du charroi de ces 3 chantiers

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

(dépôt + tunnel + station) cumulés sur les deux carrefours de l'avenue Bordet restera non significatif. Non significatif sur une journée de chantier par rapport au trafic actuellement très important sur cet axe et si et seulement si les matériaux partent et viennent depuis le nord et le Port de Bruxelles (C'est-à-dire via Stroobants).

S'ajoute à cela le chantier de la station **Paix** dont le début du chantier en septembre 2022. Le chantier devrait durer environ 7 ans (cette période inclut le creusement du tunnel et de la station, la mise en place des équipements et le parachèvement des locaux de la station). Le charroi de chantier, lié principalement aux déblais et à l'acheminement de matériaux de construction, est estimé à environ 15 à 20 camions par jour ouvrable, et ce durant minimum 60 mois. Durant les pics de production de déblais, ce chiffre pourrait augmenter à 30 à 40 camions par jour ouvrable, ce qui correspond à une moyenne de 5 véhicules par heure. Les itinéraires de charroi emprunteront suivant les phases la rue Stuckens et/ou la rue de Paris. L'évacuation des déblais est prévue (selon la demande de permis) via la rue Dekoster, vers Houtweg pour ensuite se diriger vers la rampe du Lion

Dans le cas où cette option d'itinéraire n'est pas envisageable, notamment à cause de la rampe du Lion qui ne serait pas rénovée, les carrefours Bordet/Houtweg/Haecht et Bordet/Léopold III deviendraient un point de passage obligé depuis et vers le dépôt et le puits d'accès au tunnel.

Entre 2022 et 2030, ce ne sont pas moins de 80.000 camions qui sont attendus pour livrer le dépôt et le tunnelier. Si on ajoute au minimum les excavations de la station Bordet, ce chiffre monte à 87.500 camions, sans compter les apports en matériaux de la station. S'ensuit la construction de la station Paix qui demande quasi la même proportion.

On peut également ajouter la zone 2 (Tilleul) dont le planning annoncé de réalisation de la station prévoit le début du chantier fin 2023 et pour une durée de 6 ans. Le charroi de chantier, lié principalement aux déblais et à l'acheminement de matériaux de construction, est estimé à environ 15 à 20 camions par jour ouvrable. Durant les pics de production de déblais, ce chiffre pourrait augmenter à 30 à 40 camions par jour ouvrable, ce qui correspond à une moyenne de 5 véhicules par heure. L'itinéraire envisagé par le demandeur pour ce charroi est d'emprunter la rue Verdonck vers le nord pour rejoindre la rue Stroobants

On peut donc estimer que **l'équivalent de 100.000 camions** vont se retrouver soit vers la rampe de Lion soit vers Léopold III soit vers la chaussée de Haecht. Au niveau de la quantité sur la durée cela est préjudiciable pour les infrastructures routières mais surtout pour les riverains des zones 1-2.

Il est donc indispensable de réduire au maximum le charroi routier pour réduire drastiquement ce chiffre de 100.000 camions.

Pour limiter le charroi routier vers le port de Bruxelles et donc limiter le passage dans le quartier Stroobants à la seule station Tilleul, la solution identifiée par le CE est l'utilisation de la L26 via la création d'une voie de chargement entre la voie d'essai du métro et les voies Infrabel existantes. La majorité des évacuations se feraient alors le long du dépôt STIB (sans convoi pour tunnel, dépôt et station Bordet) il en va de même pour l'alimentation en matériaux préfabriqués.

La station Paix aurait alors son charroi limité à Dekoster-Fonson (on évite Stroobants). Les incidences attendues sont en rapport avec le bruit et les vibrations du charroi qui passera dans la rue mais il n'y a pas d'incidence sur son insertion dans le trafic.

Cela nécessite des travaux préalable via le soutènement de la voie d'essai et jonction à la L26 mais ces travaux restent anecdotiques par rapport au projet de métro dans son ensemble sachant qu'on parle ici de reprendre en soutènement ou de déplacer légèrement une voie d'essai du métro dont le périmètre est inclus dans la demande de PU et dont l'utilisation effective est pour l'instant et jusqu'en 2026 très ponctuelle.

Indépendamment du trafic sur la L26, les wagons pourraient être chargés via une bande transporteuse qui traverserait le site du dépôt (au-dessus de Van kerckweg). Dans le même temps, la mise en place d'une grue à tour le long de Van Kerckweg permettrait de décharger les wagons pour alimenter la base travaux du tunnelier et du dépôt notamment avec les nombreux éléments préfabriqués.

On prend ici l'hypothèse que la majorité des déblais et des éléments préfabriqués sont mobilisés via l'avant-port de Bruxelles mais l'hypothèse de l'utilisation de la voie ferrée permet également d'autres dessertes en Belgique et en Europe. Par ailleurs, cette voie temporaire pourrait être utilisée par la suite éventuellement par Infrabel pour une zone buffer ou une mise à 4 voies de la L26...

B. Zone 3

Le planning actuel de réalisation de la station **Riga** prévoit le début du chantier mi-2023. Le chantier devrait durer environ 6 ans. Le charroi de chantier, lié principalement aux déblais et à l'acheminement de matériaux de construction, est estimé à environ 15 à 20 camions par jour ouvrable, et ce durant 49 mois. Durant les pics de production, ce chiffre pourrait augmenter à 30 à 40 camions par jour ouvrable (entre 2023- fin 2026), ce qui correspond à une moyenne de 5 véhicules par heure.

Le planning actuel de réalisation de la station **Verboekhoven** prévoit le début du chantier mi-2022. Le chantier devrait durer environ 7 ans. Le charroi de chantier, lié principalement aux déblais et à l'acheminement de matériaux de construction, est estimé à environ 20 à 30 camions par jour ouvrable et ce durant environ 58 mois. Durant les pics de production, ce chiffre pourrait augmenter à 50 à 60 camions par jour ouvrable (2022-2027), ce qui correspond à une moyenne de 8 véhicules par heure. Il ne faut pas négliger également l'accumulation du charroi en provenance du chantier Colignon dont le cumul n'a pas été concrètement estimé par le demandeur mais dont l'estimation est réalisée ci-après par le CE.

Le chantier **Colignon** devrait durer environ 7 ans. Le charroi de chantier, lié principalement aux déblais et à l'acheminement de matériaux de construction, est estimé à environ 15 à 20 camions par jour ouvrable et ce durant 61 mois. Durant les pics de production (2023- fin 2026), ce chiffre pourrait augmenter à 30 à 40 camions par jour ouvrable, ce qui correspond à une moyenne de 5 véhicules par heure.

Pour la zone 3, le charroi routier est inévitable que ce soit pour un préacheminement vers le port ou vers la voie ferrée. On peut estimer que 30.000 camions sont attendus durant la totalité du chantier.

Le cumul se fera sentir sur le Boulevard Lambermont (au niveau du croisement Demolder) jusqu'au pont Van Praet. Il faut compter des pics de +/- 15 camions par heure empruntant cet itinéraire (différents pics sur minimum 4 ans). Au vu de la charge de trafic sur le Lambermont ce chiffre est non significatif sur la mobilité globale de cet axe. Par contre il est inévitable que cela entraîne des nuisances pour les riverains situés sur l'itinéraire qui devront subir les convois durant plusieurs années.

C. Zone 4

Pour la station Liedts, le planning actuel de réalisation de cette station prévoit le début du chantier mi 2023. Le chantier devrait durer environ 6 ans. Le charroi de chantier, lié principalement aux déblais et à l'acheminement de matériaux de construction, est estimé à environ 20 à 30 camions par jour ouvrable et ce durant 53 mois. Au vu de sa localisation, les évacuation et l'alimentation en matériaux ne peut se faire que par charroi routier. Durant les pics de production (2023-2027), ce chiffre pourrait augmenter à 50 à 60 camions par jour ouvrable, ce qui correspond à une moyenne de 8 véhicules par heure en période de pointe de chantier. Le charroi routier est inévitable et est estimé à 8.000 camions. L'itinéraire envisagé par le demandeur pour ce charroi est une évacuation vers le nord, via la rue des Palais, pour rejoindre ensuite le port de Bruxelles. Au vu de la charge de trafic sur cet axe ce chiffre est non significatif sur la mobilité globale. Par contre il est inévitable que cela entraîne des nuisances pour les riverains situés sur l'itinéraire qui devront subir les convois durant plusieurs années.

6.1.4.4. Conclusion

Le transport par camion vers l'extérieur de Bruxelles n'a pas été retenu. Au vu de la quantité de déblais les incidences sont négatives.

Le transport par voie ferrée est intéressant **si**, au moment du chantier du métro, une zone de remblais proche de la voie ferrée (Bruxelles, Flandre, Wallonie ou Europe) est disponible. Il s'agit en effet d'éviter de multiplier les transbordements et de déplacer le problème du charroi routier issu de la construction du métro bruxellois en dehors de Bruxelles.

Le transport par camion vers une zone de chargement - déchargement le long des voies ferrées est cependant inévitable pour la construction de minimum 5 stations qui ne sont pas liées à la voie ferrée.

Le chargement de trains de chantier est possible via des aménagements le long de la voie d'essais du dépôt. Cette solution est intéressante pour le chantier du tunnel et du dépôt car elle limite le transport par camion dans Bruxelles.

Par ailleurs, il est impératif que le demandeur puisse s'assurer au moment de la désignation de l'entreprise que la filière de contrôle et de gestion de ces terres est agréementée et opérationnelle pour gérer de telles quantités à proximité directe de la zone de déchargement des trains. L'objectif étant bien évidemment d'éviter un nouveau transfert des déblais sur des longues distances et par camion jusqu'à un centre d'enfouissement ou de valorisation. Cette recommandation est valable aussi pour l'autre filière d'évacuation :

Le transport par voie fluviale est celui qui ouvre le plus le champ des possibles. En effet le réseau fluvial est particulièrement développé (tant pour les eaux intérieures qu'européennes) et offre d'autres possibilités de desserte que le transport ferré. Le port de Bruxelles a déjà, par le passé pratiqué l'évacuation de grande quantité de déblais. Le transport via des péniches reste le moyen actuellement le plus favorable pour évacuer des grandes quantités de terres. À ce stade il est trop tôt pour se prononcer sur la filière d'utilisation de ces terres.

Pour les terres qui sont issues du creusement du tunnel, de la rampe et du dépôt ainsi que celles qui viendraient des stations Paix et Bordet, deux solutions sont possibles :

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

- Soit un transbordement **sur des trains** travaux de la L26. Solution particulièrement intéressante pour éviter le charroi de 30.000 camions à travers la ville pour atteindre le port de Bruxelles (volume juste pour tunnel et dépôt). Ce qui implique de :
 - Modifier le support de la voie d'essai du métro (pour l'instant sur talus) en plaçant des murs de soutènement
 - Créer une voie de chargement pour les trains le long de la L26
 - Modifier la zone de stockage des terres et placer un convoyeur à bande sur la zone de chantier au dépôt de Haren vers cette zone de chargement ;
- Soit via l'utilisation **du charroi routier** vers le port de Bruxelles suivant un itinéraire qui aujourd'hui, au vu du passage impossible de la rampe du Lion, ferait un détour de 7km dans la ville via des artères très fréquentées pour atteindre le port de Bruxelles. Le CE recommande d'éviter autant que possible cette solution pour les travaux sur le dépôt, le tunnelier et à Bordet. Une autre solution est l'itinéraire empruntant la chaussée de Haecht vers le zoning Buda et ensuite l'avenue de Vilvoorde vers l'avant-port mais cet itinéraire est aussi plus long de 7km.

En conclusion, au niveau individuel, l'étude de mobilité chantier a démontré que le charroi vers et depuis les chantiers des stations ne vont pas générer un blocage car les flux attendus pourront s'intégrer dans la circulation (flux négligeables par rapport à la charge des différents axes empruntés). Le charroi sur chaque station engendre bien évidemment des potentielles nuisances qui ont été relevées par le CE dans chaque livre station – partie chantier.

C'est bien dans sa globalité et sa durée que le chantier pose question quant au charroi routier. Si les zones 3 et 4 semblent inévitablement liées au transport par route suivant un itinéraire le plus direct vers le Port de Bruxelles, des options hybrides doivent être envisagées pour les zones 1-2 afin d'éviter la rampe du Lion dont la rénovation est aujourd'hui impossible à valider via un dossier de permis qui consoliderait cette option. Mais même avec la rénovation de la rampe du Lion (annoncée au mieux en 2023) il est indispensable de trouver une solution alternative pour limiter le charroi de la zone Bordet-dépôt (dont base travaux tunnel) à son strict minimum compte tenu de la possibilité (selon le CE) de créer une voie de chargement le long du site de la STIB.

Pour le CE la solution est donc hybride entre le chemin de fer et la voie fluviale. Le chantier peut dès-lors être divisé en 4 zones :

Zone 1 : Bordet, dépôt, tunnel, Paix = utilisation préférentielle L26 au niveau d'un quai de chargement le long du dépôt STIB

Zone 2 : Tilleul = Stroobants – Rampe du Lion (si rénovée à temps). Si la rampe n'est pas rénovée alors le CE recommande que la zone 2 fusionne avec la zone 1.

Zone 3 : Riga, Verboekhoven, Colignon = Lambermont, Van-Praet et destination avant-port de Bruxelles

Zone 4 : Liedts = Avenue de la Reine et quais des usines, destination avant-port de Bruxelles.

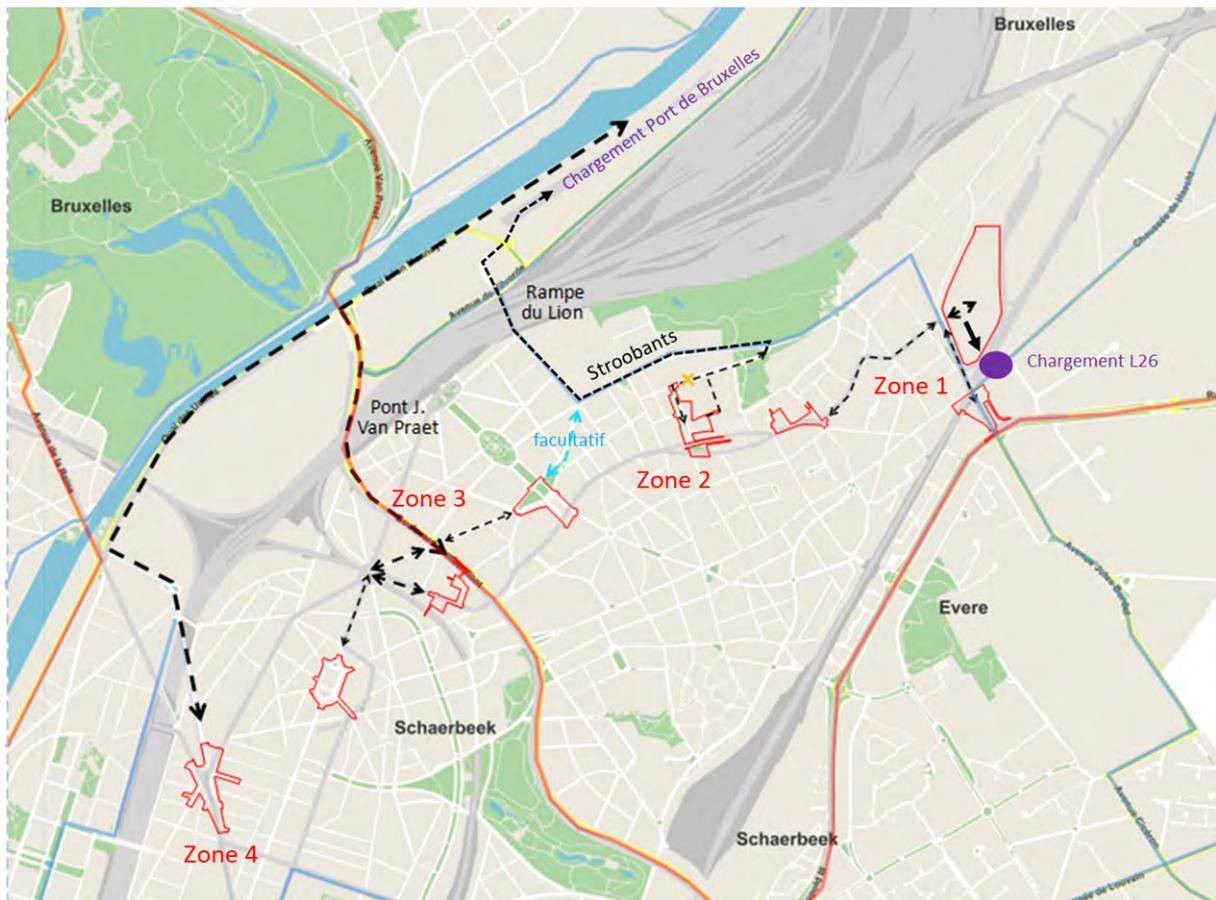


Figure 51: Schéma préférentiel du CE pour les zones d'accès et les transbordements (ARIES, 2021)

Si le choix de liaisonner le site du dépôt de Haren à l'avant-port de Bruxelles (préférentiel du CE) est pour l'instant encore possible. Mais une décision rapide et politique doit être prise pour maintenir cette voie sur l'avenue de Vilvoorde puisque l'Arrêté Royal du 30/12/2004 demande son démantèlement ce qui implique que les trains ne disposeraient plus d'accès au port de Bruxelles.

Le Port et la Région ont entamé une procédure judiciaire visant à éviter son démantèlement, procédure qui est toujours en cours. Cette voie d'accès ferroviaire est toujours opérationnelle **mais pour consolider cette option et permettre aux entreprises de remettre offre en ce sens il faut des décisions et actions rapides pour correspondre aux plannings des chantiers (comme pour la rénovation de la rampe du lion).**

Au niveau de sa globalité le chantier sera géré par le demandeur et les administrations en « hypercoordination ». Cela sort du cadre de cette EI car ce groupe d'hypercoordination va seulement se mettre en place mais les balises posées dans cette EI permettront au demandeur et aux administrations de prendre les décisions en connaissance de cause. Quoi qu'il en soit, le demandeur doit clarifier les critères d'impact au stade des amendements et comment ils seront évalués. Ensuite que le choix retenu soit développé et présenté dans le permis chantier.

6.2. Urbanisme, aménagement du territoire et patrimoine

6.2.1. Impact sur les parcelles

Les tableaux suivants identifient les parcelles affectées par la construction du tunnel de métro. La numérotation correspond aux figures qui précèdent chacun des tableaux.

Signalons que les parcelles identifiées avec un cercle gris sont affectées par la construction des stations. Ces impacts sont détaillés dans la partie de l'étude relative aux stations.

Voir Livre Stations

6.2.1.1. Tunnel Gare du Nord – Liedts

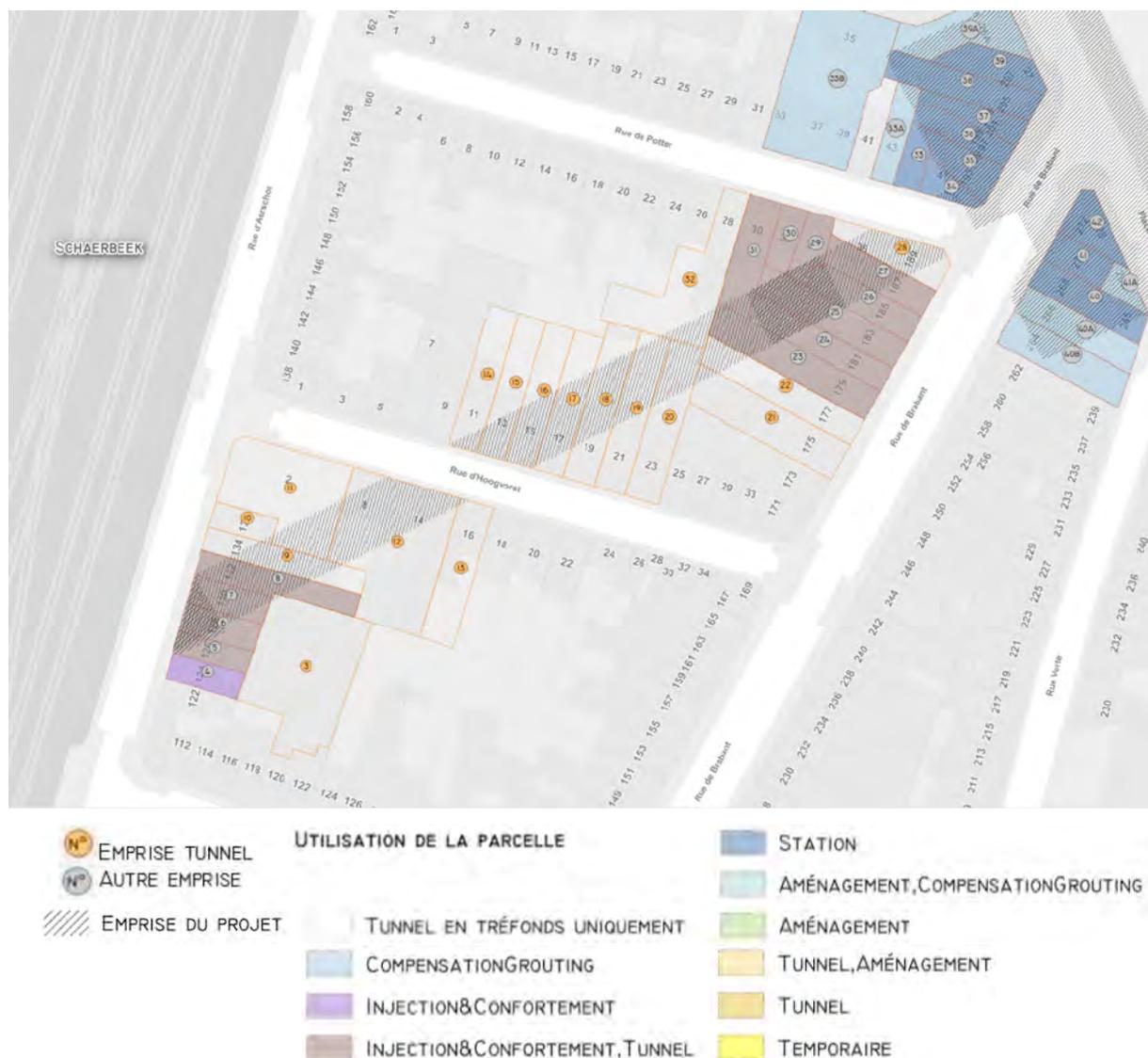


Figure 52 : Illustration des parcelles impactées par la construction du tunnel (BMN, 2020)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

N° emprise	Référence cadastrale			Parcelle	
	Division	Section	N° parcelle	Superficie parcelle	Emprise tunnel sous parcelle
4	21909	E	0020/00A002	82,53 m ²	(Sup. injection : 0,56 m ²)
5	21909	E	0020/00Z000	73,7 m ²	10,41 m ² (Sup. injection : 18,27 m ²)
6	21909	E	0020/00G006	93,06 m ²	46,37 m ² (Sup. injection : 45,51 m ²)
7	21909	E	0020/00A006	96,44 m ²	84,33 m ² (Sup. injection : 17,8 m ²)
8	21909	E	0019/00K007	165,31 m ²	91,93 m ² (Sup. injection : 0,01 m ²)
9	21909	E	0019/00X007	167,58 m ²	87,94 m ²
10	21909	E	0019/00E007	70,73 m ²	2,28 m ²
11	21909	E	0019/00P006	418,9 m ²	90,16 m ²
12	21909	E	0019/00T007	583,41 m ²	250,9 m ²
13	21909	E	0028/00X012	208,88 m ²	1,42 m ²
14	21909	E	0019/00W007	182,14 m ²	17,53 m ²
15	21909	E	0019/00M005	172,45 m ²	49,49 m ²
16	21909	E	0029/00N005	180,74 m ²	86,16 m ²
18	21909	E	0029/00G009	219,39 m ²	109,37 m ²
19	21909	E	0029/00E005	215,3 m ²	105,07 m ²
20	21909	E	0029/00R005	234,91 m ²	79,31 m ²
21	21909	E	0029/00V008	276,34 m ²	9,75 m ²
22	21909	E	0029/00Z007	210,51 m ²	40,47 m ²
23	21909	E	0029/00F005	244,9 m ²	82,08 m ² (Sup. injection : 5,4 m ²)
24	21909	E	0029/00N008	167,48 m ²	57,87 m ² (Sup. injection : 53,11 m ²)
25	21909	E	0029/00H009	200,11 m ²	88,24 m ² (Sup. injection : 88,18 m ²)
26	21909	E	0029/00G007	138,69 m ²	64,84 m ² (Sup. injection : 30,36 m ²)
27	21909	E	0029/00E009	140,64 m ²	83,87 m ² (Sup. injection : 0,02 m ²)
28	21909	E	0029/00L009	146,07 m ²	96,94 m ²
29	21909	E	0029/00P007	82,28 m ²	22,98 m ² (Sup. injection : 21,54 m ²)
30	21909	E	0029/00B005	69,9 m ²	0,34 m ² (Sup. injection : 0,35 m ²)
31	21909	E	0029/00T008	163,93 m ²	20,78 m ² (Sup. injection : 4,17 m ²)

Tableau 12 : Impact sur les parcelles affectées par le tunnel Gare du Nord – Liedts (BMN, 2020)

Au total, 26 parcelles sont affectées par le passage du tunnel (emprise à grande profondeur) dans le tronçon Gare du Nord – Liedts, dont 12 sont également affectées par la réalisation d'injections. Une parcelle est affectée par la réalisation d'injections, mais pas par le passage du tunnel.

6.2.1.2. Tunnel Liedts – Colignon

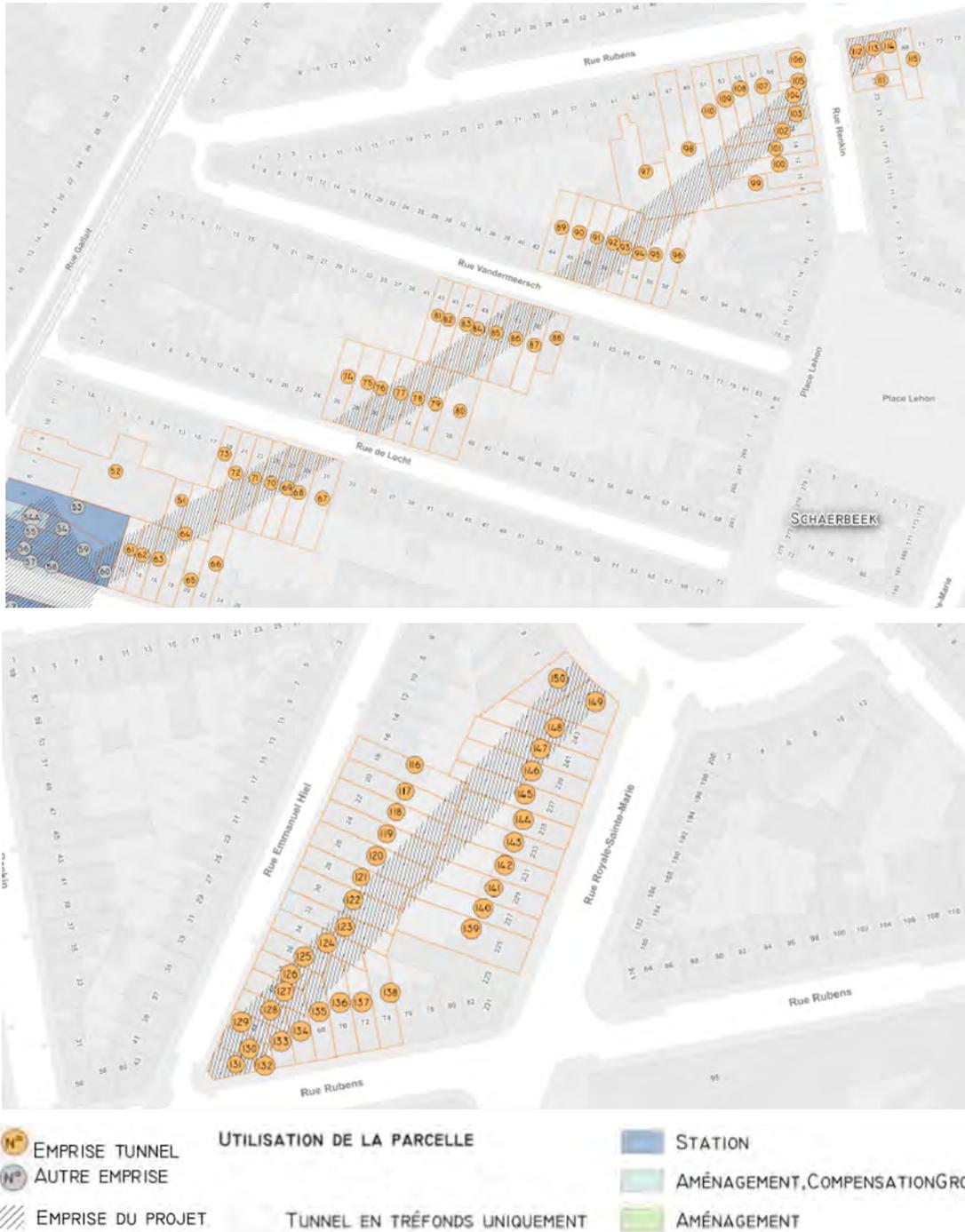


Figure 53 : Illustration des parcelles impactées par la construction du tunnel (BMN, 2020)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

N° emprise	Référence cadastrale			Parcelle	
	Division	Section	N° parcelle	Superficie parcelle	Emprise tunnel sous parcelle
51	21910	E	0182/00C010	108,93 m ²	43,32 m ²
52	21910	E	0182/00L009	795,44 m ²	6,13 m ²
61	21910	E	0182/00K004	149,1 m ²	99,35 m ²
62	21910	E	0182/00H009	143,11 m ²	87,58 m ²
63	21910	E	0182/00B010	151,2 m ²	62,81 m ²
64	21910	E	0182/00Z009	335,63 m ²	174,14 m ²
65	21910	E	0183/00R002	134,22 m ²	0,77 m ²
66	21910	E	0183/00K012	206,64 m ²	5,36 m ²
67	21910	E	0183/00B010	257,39 m ²	16,74 m ²
68	21910	E	0183/00T013	180,25 m ²	51,34 m ²
69	21910	E	0183/00K011	174,18 m ²	82,06 m ²
70	21910	E	0183/00M004	189,75 m ²	104,59 m ²
71	21910	E	0183/00Y008	184,75 m ²	100,91 m ²
72	21910	E	0183/00M012	176,33 m ²	87,42 m ²
73	21910	E	0182/00T008	123,48 m ²	4,48 m ²
74	21910	E	0183/00S010	196,58 m ²	5,58 m ²
75	21910	E	0183/00Y013	205,81 m ²	55,99 m ²
76	21910	E	0183/00D009	162,03 m ²	86,89 m ²
77	21910	E	0183/00E004	169,26 m ²	110,7 m ²
78	21910	E	0183/00D004	176,72 m ²	107,5 m ²
79	21910	E	0183/00G008	188,13 m ²	67,58 m ²
80	21910	E	0183/00A011	292,83 m ²	16,43 m ²
81	21910	E	0185/00P003	148,1 m ²	1,02 m ²
82	21910	E	0185/00P005	152,57 m ²	24,27 m ²
83	21910	E	0185/00M004	152,24 m ²	56,58 m ²
84	21910	E	0185/00R003	162,49 m ²	95,32 m ²
85	21910	E	0185/00L005	145,13 m ²	94,79 m ²
86	21910	E	0185/00S005	242,82 m ²	133,52 m ²
87	21910	E	0185/00G004	182 m ²	44,76 m ²
88	21910	E	0185/00C005	137,1 m ²	4,43 m ²
89	21910	E	0186/00F003	185,47 m ²	0,43 m ²
90	21910	E	0186/00R003	178,18 m ²	31,31 m ²
91	21910	E	0186/00B004	174,49 m ²	79,13 m ²
92	21910	E	0186/00Z003	172,8 m ²	115,91 m ²
93	21910	E	0188/00G003	155,26 m ²	102,81 m ²
94	21910	E	0188/00T002	146,02 m ²	62,88 m ²
95	21910	E	0188/00L003	168,58 m ²	39,66 m ²
96	21910	E	0188/00V002	187,02 m ²	12,57 m ²
97	21910	E	0187/00Z002	442,91 m ²	82,4 m ²
98	21910	E	0190/00W007	499,43 m ²	179,74 m ²
99	21910	E	0190/00G008	266,97 m ²	56,27 m ²
100	21910	E	0190/00M005	158,41 m ²	32,06 m ²
101	21910	E	0190/00M006	171,36 m ²	87,83 m ²
102	21910	E	0190/00P007	136,75 m ²	105,85 m ²
103	21910	E	0190/00G006	63,68 m ²	63,24 m ²
104	21910	E	0190/00E007	83,26 m ²	68,32 m ²
105	21910	E	0190/00K007	27,64 m ²	13,74 m ²

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

106	21910	E	0190/00B008	89,06 m ²	1,43 m ²
107	21910	E	0190/00Y007	133,68 m ²	25,54 m ²
108	21910	E	0190/00N006	125,87 m ²	6,85 m ²
109	21910	E	0190/00C008	175,59 m ²	20,37 m ²
110	21910	E	0189/00D003	228,59 m ²	37,25 m ²
111	21910	E	0203/00K003	93,33 m ²	0,53 m ²
112	21910	E	0203/00L003	76,27 m ²	68,95 m ²
113	21910	E	0203/00X005	69,08 m ²	43,89 m ²
114	21910	E	0203/00N003	71,88 m ²	26,49 m ²
115	21910	E	0203/00X003	136,04 m ²	7,94 m ²
116	21910	E	0195/00W005	180,63 m ²	17,36 m ²
117	21910	E	0195/00C005	166,23 m ²	26,98 m ²
118	21910	E	0195/00Z004	182,15 m ²	41,59 m ²
119	21910	E	0195/00Y004	181,74 m ²	53,98 m ²
120	21910	E	0195/00G006	201,88 m ²	71,09 m ²
121	21910	E	0195/00S003	161,04 m ²	62,14 m ²
122	21910	E	0195/00B003	189,61 m ²	84 m ²
123	21910	E	0195/00Y005	159,06 m ²	70,2 m ²
124	21910	E	0195/00A006	133,52 m ²	66,58 m ²
125	21910	E	0195/00D006	95,29 m ²	42,89 m ²
126	21910	E	0195/00E006	74,35 m ²	36,16 m ²
127	21910	E	0195/00F006	89,51 m ²	59,83 m ²
128	21910	E	0195/00P006	75,44 m ²	57,79 m ²
129	21910	E	0195/00P004	51,36 m ²	45,31 m ²
130	21910	E	0195/00T005	56,97 m ²	56,85 m ²
131	21910	E	0195/00T004	65,62 m ²	64,27 m ²
132	21910	E	0195/00M006	21,16 m ²	6,88 m ²
133	21910	E	0195/00R006	52,24 m ²	16,84 m ²
134	21910	E	0195/00S004	69,31 m ²	15,02 m ²
135	21910	E	0195/00V002	109,41 m ²	36,18 m ²
136	21910	E	0195/00A003	136,93 m ²	32,38 m ²
137	21910	E	0195/00C002	115,9 m ²	4,43 m ²
138	21910	E	0195/00D002	142,59 m ²	2,46 m ²
139	21910	E	0194/00A010	310,59 m ²	7,3 m ²
140	21910	E	0194/00P010	175,51 m ²	13,7 m ²
141	21910	E	0194/00F008	184,54 m ²	16,86 m ²
142	21910	E	0194/00E008	188,35 m ²	31,82 m ²
143	21910	E	0194/00D008	181,14 m ²	44,89 m ²
144	21910	E	0194/00L008	175,67 m ²	57,38 m ²
145	21910	E	0194/00F009	205,84 m ²	79,09 m ²
146	21910	E	0194/00R010	204,81 m ²	79,68 m ²
147	21910	E	0194/00B008	197,24 m ²	78,11 m ²
148	21910	E	0172/00T003	198,5 m ²	86,47 m ²
149	21910	E	0172/00V003	139,58 m ²	87,34 m ²
150	21910	E	0172/00Y002	153,5 m ²	71,08 m ²

Tableau 13 : Impact sur les parcelles affectées par le tunnel Liedts–Colignon (BMN, 2020)

Au total, 92 parcelles sont affectées par le passage du tunnel (emprise à grande profondeur) dans le tronçon Liedts – Colignon.

6.2.1.3. Tunnel Colignon – Verboekhoven

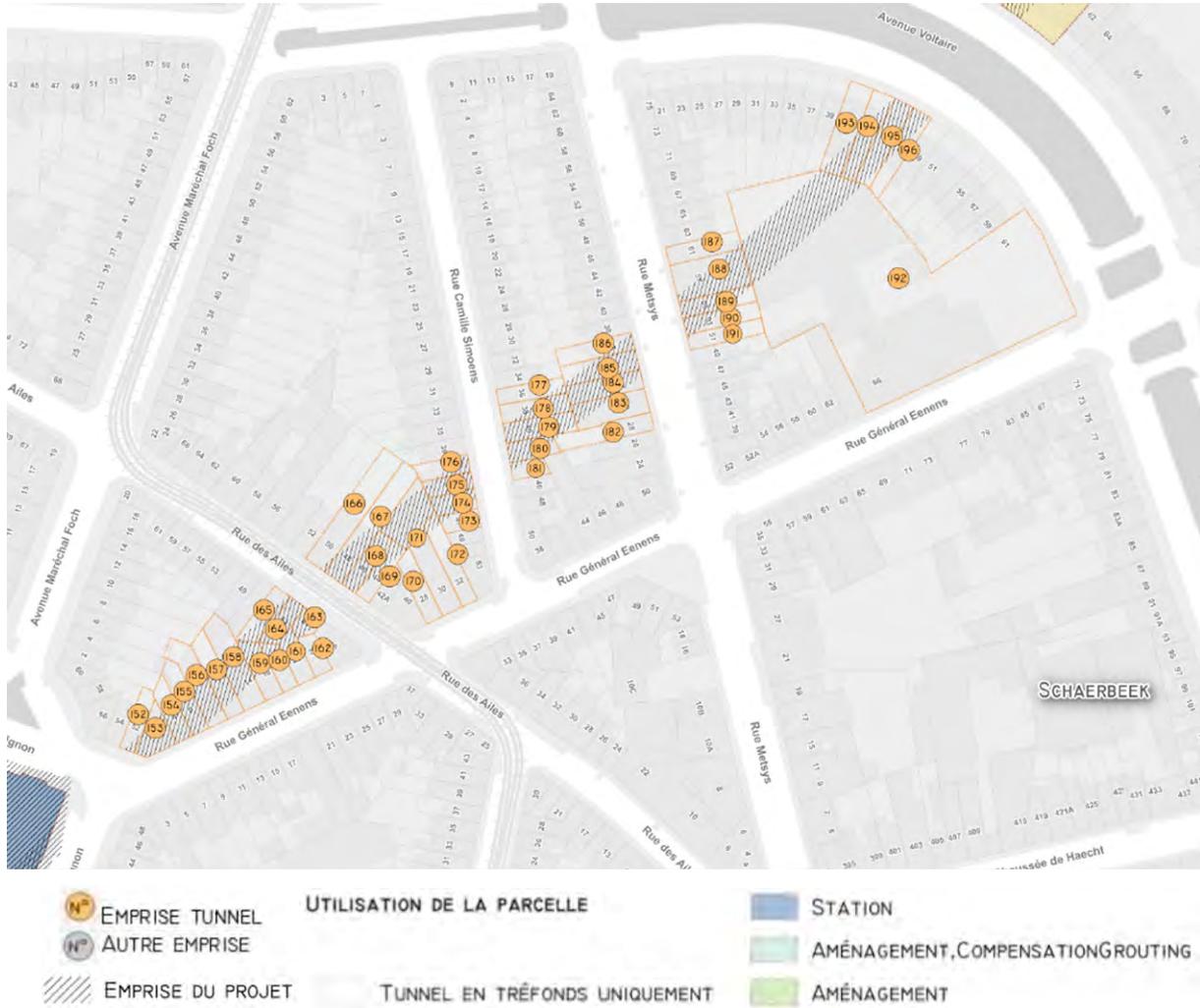


Figure 54 : Illustration des parcelles impactées par la construction du tunnel (BMN, 2020)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

N° emprise	Référence cadastrale			Parcelle	
	Division	Section	N° parcelle	Superficie parcelle	Emprise tunnel sous parcelle
152	21910	E	0152/00N005	91,81 m ²	10,83 m ²
153	21910	E	0152/00T007	109,29 m ²	91,57 m ²
154	21910	E	0152/00L005	99,32 m ²	59,61 m ²
155	21910	E	0152/00F004	123,84 m ²	67,82 m ²
156	21910	E	0152/00V008	176,87 m ²	76,99 m ²
157	21910	E	0152/00K005	146,39 m ²	69,19 m ²
158	21910	E	0152/00Z007	206,27 m ²	89,08 m ²
159	21910	E	0152/00R008	108,72 m ²	59,84 m ²
160	21910	E	0152/00F008	77,94 m ²	27,28 m ²
161	21910	E	0152/00W000	88,7 m ²	23,21 m ²
162	21910	E	0152/00X000	69,69 m ²	0,88 m ²
163	21910	E	0152/00Z000	51,01 m ²	44,04 m ²
164	21910	E	0152/00K007	81,96 m ²	81,96 m ²
165	21910	E	0152/00B007	108,82 m ²	51,48 m ²
166	21910	E	0136/00T002	289,77 m ²	5,56 m ²
167	21910	E	0136/00N003	252,81 m ²	107,75 m ²
168	21910	E	0136/00P003	99,12 m ²	98,54 m ²
169	21910	E	0136/00Z000	97,2 m ²	43,34 m ²
170	21910	E	0136/00H003	117,01 m ²	0,25 m ²
172	21910	E	0136/00M003	144,07 m ²	17,97 m ²
173	21910	E	0134/00X002	64,38 m ²	5,82 m ²
174	21910	E	0134/00H002	78,85 m ²	67,13 m ²
175	21910	E	0134/00G002	74,98 m ²	72,12 m ²
176	21910	E	0134/00T002	85,82 m ²	30,86 m ²
177	21910	E	0128/00P006	99,37 m ²	9,1 m ²
178	21910	E	0128/00N006	118,87 m ²	70,27 m ²
179	21910	E	0134/00K002	128,8 m ²	122,63 m ²
180	21910	E	0134/00L002	87,47 m ²	67,05 m ²
181	21910	E	0134/00M002	57,74 m ²	7,35 m ²
182	21910	E	0128/00Y006	152,62 m ²	3,4 m ²
183	21910	E	0128/00B007	172,23 m ²	42,47 m ²
184	21910	E	0128/00V002	131,92 m ²	115,01 m ²
185	21910	E	0128/00G007	143,79 m ²	111,77 m ²
186	21910	E	0128/00T002	123,83 m ²	28,06 m ²
187	21902	E	0128/00H006	124,64 m ²	3,39 m ²
188	21902	E	0129/00S000	256,79 m ²	165,75 m ²
189	21902	E	0129/00R000	117,39 m ²	92 m ²
190	21902	E	0129/00V000	117,16 m ²	39,99 m ²
191	21902	E	0129/00K000	107,96 m ²	1,79 m ²
192	21902	A	0403/00E000	4.199,64 m ²	463,15 m ²
193	21902	E	0128/00M006	200,51 m ²	44,83 m ²
194	21902	A	0404/00Y002	154,69 m ²	106,58 m ²
195	21902	A	0404/00F002	154,2 m ²	146,31 m ²
196	21902	A	0404/00G002	145,56 m ²	60,24 m ²

Tableau 14 : Impact sur les parcelles affectées par le tunnel Colignon – VBH (BMN, 2020)

Au total, 44 parcelles sont affectées par le passage du tunnel Colignon – Verboekhoven.

6.2.1.4. Tunnel Verboekhoven – Riga



Figure 55 : Illustration des parcelles impactées par la construction du tunnel (BMN, 2020)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

N° emprise	Référence cadastrale			Parcelle	
	Division	Section	N° parcelle	Superficie parcelle	Emprise tunnel sous parcelle
229	21902	A	0423/00G011	616,79 m ²	180,61 m ²
230	21902	A	0423/00C009	262,67 m ²	262,65 m ²
231	21902	A	0423/00D003	302,16 m ²	115,96 m ²
232	21902	A	0423/00C010	840,11 m ²	7,93 m ²
233	21902	A	0423/00H011	1.011,59 m ²	451,02 m ²
234	21902	A	0423/00Y008	622,39 m ²	213,64 m ²
235	21902	A	0423/00X008	110,75 m ²	85,21 m ²
236	21902	A	0433/00L000	208,61 m ²	3,8 m ²
238	21902	A	0433/00T000	303,32 m ²	93,5 m ²
239	21902	A	0433/00W000	270,29 m ²	78,17 m ²
240	21902	A	0433/00V000	381,89 m ²	92,81 m ²
241	21902	A	0433/00R000	350,02 m ²	87,99 m ²
242	21902	A	0434/00S000	343,05 m ²	93,18 m ²
243	21902	A	0434/00V000	240,91 m ²	87,36 m ²
244	21902	A	0434/00T000	146,75 m ²	69,03 m ²
245	21902	A	0434/00N000	101,42 m ²	89,85 m ²
246	21902	A	0434/00W000	114,87 m ²	2,32 m ²
247	21902	A	0444/00W000	169,57 m ²	121,05 m ²
248	21902	A	0444/00P000	126,06 m ²	65,74 m ²
249	21902	A	0444/00S000	201,39 m ²	60,35 m ²
250	21902	A	0444/00Y000	289,91 m ²	85,26 m ²
251	21902	A	0444/00T000	181,29 m ²	19,57 m ²
252	21902	A	0444/00X000	160,49 m ²	8,33 m ²
253	21902	A	0443/00T002	500,21 m ²	0,26 m ²
254	21015	A	0468/00P000	198,87 m ²	10,91 m ²

Tableau 15 : Impact sur les parcelles affectées par le tunnel Verboekhoven – Riga (BMN, 2020)

Au total, 25 parcelles sont affectées par le passage du tunnel (emprise à grande profondeur) dans le tronçon Verboekhoven – Riga.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

N° emprise	Référence cadastrale			Parcelle	
	Division	Section	N° parcelle	Superficie parcelle	Emprise tunnel sous parcelle
256	21015	A	0456/00B000	2.054,81 m ²	365,11 m ²
257	21015	A	0455/00P000	153,84 m ²	8,29 m ²
258	21015	A	0455/00M000	132,16 m ²	64,93 m ²
259	21015	A	0181/02K003	293,53 m ²	99,94 m ²
260	21015	A	0178/00M002	202,61 m ²	73,7 m ²
261	21015	A	0178/00N000	207,73 m ²	72,57 m ²
262	21015	A	0178/00W000	196,35 m ²	69,92 m ²
263	21015	A	0178/00S000	196,53 m ²	72,01 m ²
264	21015	A	0178/00T000	169,92 m ²	64,96 m ²
265	21015	A	0178/00V000	192,09 m ²	71,71 m ²
266	21015	A	0178/00G002	192,76 m ²	93,17 m ²
267	21015	A	0178/00F002	120,81 m ²	85,79 m ²
268	21015	A	0179/00Y000	35,33 m ²	17,35 m ²
269	21015	A	0179/00R000	84,25 m ²	40,3 m ²
270	21015	A	0179/00T000	69 m ²	69 m ²
271	21015	A	0179/00Z000	141,34 m ²	32,19 m ²
272	21015	A	0186/00X004	114,95 m ²	13,12 m ²
273	21015	A	0186/00C007	98,57 m ²	94,18 m ²
274	21015	A	0186/00Z006	82,22 m ²	45,6 m ²
275	21015	A	0186/00A007	86,16 m ²	41,89 m ²
276	21015	A	0186/00D007	174,25 m ²	80,23 m ²
277	21015	A	0186/00W005	79,41 m ²	34,3 m ²
278	21015	A	0186/00V005	82,36 m ²	31,62 m ²
279	21015	A	0186/00T007	76,6 m ²	25,95 m ²
280	21015	A	0186/00B006	86,18 m ²	25,73 m ²
281	21015	A	0186/00V007	248,56 m ²	136,3 m ²
282	21015	A	0193/00E003	344,51 m ²	96,5 m ²
283	21015	A	0188/00L002	160,27 m ²	43,21 m ²
284	21015	A	0188/00G002	164,25 m ²	52,2 m ²
285	21015	A	0188/00N002	156,4 m ²	56,61 m ²
286	21015	A	0188/00W000	94,33 m ²	0,05 m ²
287	21015	A	0188/00R002	88,4 m ²	3,43 m ²
288	21015	A	0188/00M002	146,51 m ²	17,92 m ²
289	21015	A	0188/00S000	116,95 m ²	114,21 m ²
290	21015	A	0188/00P002	117,87 m ²	104,81 m ²
291	21015	A	0188/00F002	214,39 m ²	62,6 m ²
292	21015	A	0193/00K003	2.169,24 m ²	304,53 m ²
293	21015	A	0193/00V002	157,88 m ²	29,64 m ²
294	21015	A	0193/00L003	170,75 m ²	83,16 m ²
295	21015	A	0195/00D003	163,94 m ²	44,27 m ²
296	21015	A	0195/00C003	165,46 m ²	76,54 m ²
297	21015	A	0195/00H003	551,4 m ²	91,35 m ²
298	21015	A	0195/00L005	775,71 m ²	2,7 m ²
299	21015	A	0195/00G005	614,42 m ²	192,95 m ²
300	21015	A	0195/00N004	750,44 m ²	175,98 m ²
301	21015	A	0195/00D005	2.129,97 m ²	292,64 m ²
302	21015	A	0196/00M002	112,65 m ²	77,88 m ²

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

303	21015	A	0196/00L002	111,33 m ²	111,32 m ²
304	21015	A	0196/00K002	110,06 m ²	74,35 m ²
305	21015	A	0196/00M009	155,81 m ²	19,8 m ²
306	21015	A	0196/00Z003	166,81 m ²	152,91 m ²
307	21015	A	0196/00N009	154,55 m ²	148,55 m ²
308	21015	A	0196/00P010	162,73 m ²	33,32 m ²
309	21015	A	0203/00C002	1.337,37 m ²	271,74 m ²
310	21015	A	0203/00E002	174,43 m ²	147,53 m ²
311	21006	A	0476/00Z004	412,7 m ²	31,02 m ²
312	21006	A	0474/00G000	264,61 m ²	221,16 m ²
313	21006	A	0474/00V000	225,4 m ²	186,16 m ²
314	21006	A	0473/00R000	123,56 m ²	0,14 m ²
315	21006	A	0471/00T000	1.212,27 m ²	87,85 m ²
316	21006	A	0467/00P000	712,24 m ²	97,19 m ²
318	21006	A	0467/00V000	255,67 m ²	46,45 m ²
319	21006	A	0466/02Y000	291,92 m ²	58,17 m ²
320	21006	A	0466/02P000	241,24 m ²	50,71 m ²
321	21006	A	0466/02V000	271,65 m ²	58,51 m ²
322	21006	A	0466/02W000	327,08 m ²	70,16 m ²
324	21006	A	0474/00T000	705 m ²	173,6 m ²

Tableau 16 : Impact sur les parcelles affectées par le tunnel Riga – Tilleul (BMN, 2020)

Au total, 67 parcelles sont affectées par le passage du tunnel (emprise à grande profondeur) dans le tronçon Riga – Tilleul.

6.2.1.6. Tunnel Tilleul – Paix

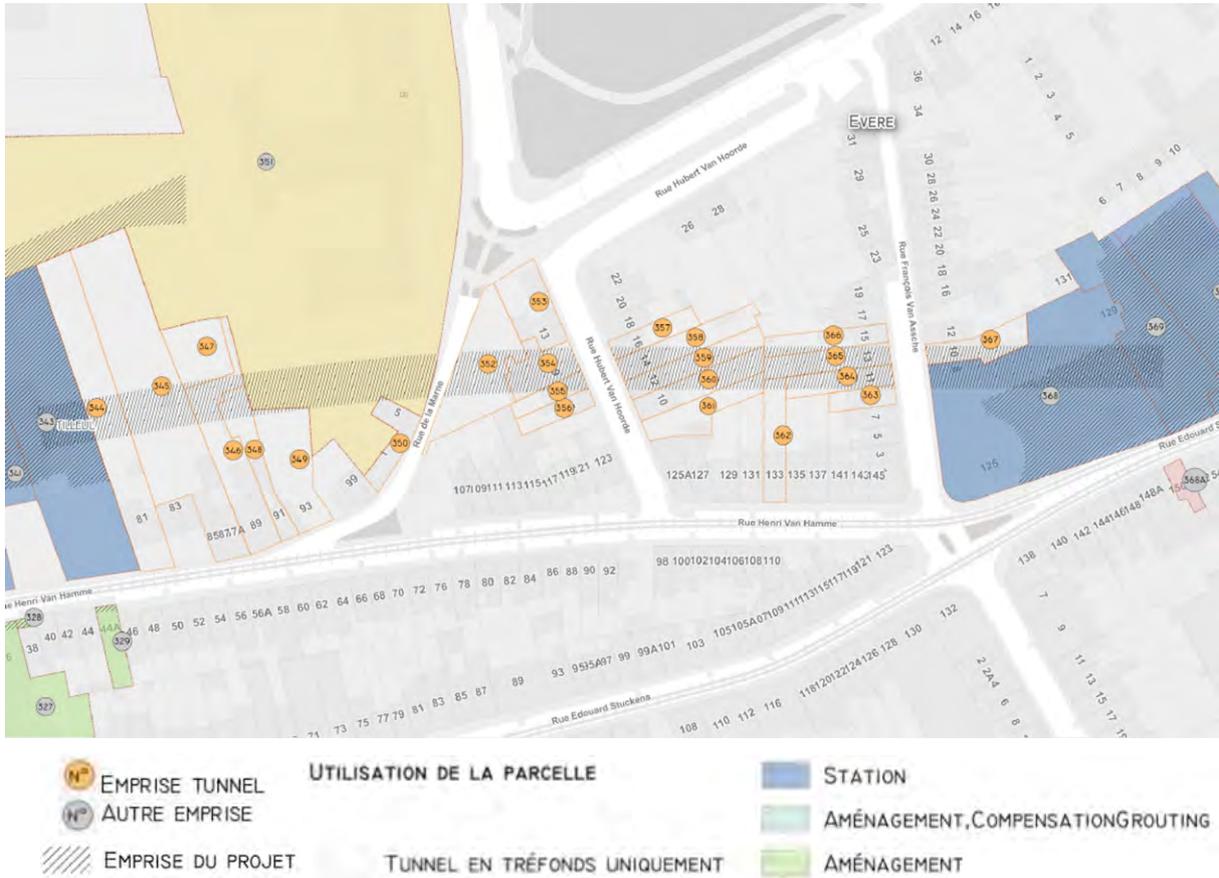


Figure 57 : Illustration des parcelles impactées par la construction du tunnel (BMN, 2020)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

N° emprise	Référence cadastrale			Parcelle	
	Division	Section	N° parcelle	Superficie parcelle	Emprise tunnel sous parcelle
344	21006	A	0461/00D002	910,07 m ²	120,03 m ²
345	21006	A	0461/00F002	1.535,68 m ²	221,27 m ²
346	21006	A	0460/00N002	497,7 m ²	120,15 m ²
348	21006	A	0460/00L002	232,36 m ²	63,3 m ²
349	21006	A	0460/00F002	436,42 m ²	15,78 m ²
350	21006	A	0457/00E002	169,27 m ²	2,44 m ²
352	21006	A	0136/03E000	558,83 m ²	202,57 m ²
353	21006	A	0136/00E000	280,83 m ²	1,4 m ²
354	21006	A	0137/00K000	210,51 m ²	183,88 m ²
355	21006	A	0139/00H002	106,21 m ²	40,79 m ²
356	21006	A	0139/00M002	112,19 m ²	0,78 m ²
357	21006	A	0152/00F003	141,78 m ²	17,35 m ²
358	21006	A	0152/00T003	264,38 m ²	112,06 m ²
359	21006	A	0152/00A004	229,51 m ²	170,42 m ²
360	21006	A	0152/00Y003	252,31 m ²	151,8 m ²
361	21006	A	0152/00M003	242,97 m ²	30,89 m ²
362	21006	A	0152/00B000	217,34 m ²	19,31 m ²
363	21006	A	0156/00C002	101,74 m ²	5,23 m ²
364	21006	A	0156/00A002	176,84 m ²	148,88 m ²
365	21006	A	0156/00D002	217,92 m ²	212,85 m ²
366	21006	A	0155/00K000	188,09 m ²	40,36 m ²
367	21006	A	0162/00K003	200,07 m ²	102,32 m ²

Tableau 17 : Impact sur les parcelles affectées par le tunnel Tilleul – Paix (BMN, 2020)

Au total, 22 parcelles sont affectées par le passage du tunnel (emprise à grande profondeur) dans le tronçon Tilleul – Paix.

6.2.1.7. Tunnel Paix – Bordet



Figure 58 : Illustration des parcelles impactées par la construction du tunnel (BMN, 2020)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

N° emprise	Référence cadastrale			Parcelle	
	Division	Section	N° parcelle	Superficie parcelle	Emprise tunnel sous parcelle
390	21006	A	0359/00T000	149,5 m ²	27,27 m ²
391	21006	A	0359/00V000	195,6 m ²	54,48 m ²
393	21006	A	0318/00H005	1.155,69 m ²	20,63 m ²
394	21006	A	0319/00L002	76,81 m ²	0,62 m ²
395	21006	A	0319/00M002	235,52 m ²	119,64 m ²
396	21006	A	0319/00P002	186,59 m ²	150,16 m ²
397	21006	A	0318/00V004	110,18 m ²	49,14 m ²
398	21006	A	0318/00B005	196,51 m ²	102,54 m ²
399	21006	A	0318/00Z004	128,78 m ²	57,61 m ²
400	21006	A	0328/00S002	721,47 m ²	120,52 m ²
401	21006	A	0328/00X000	82,43 m ²	31,41 m ²
402	21006	A	0328/00X002	345,52 m ²	168,62 m ²
403	21006	A	0328/00N002	1.564,83 m ²	81,69 m ²
404	21006	A	0328/00Z000	233,8 m ²	126,2 m ²
405	21006	A	0328/00Y002	753 m ²	112,23 m ²
406	21006	A	0328/00B002	246,44 m ²	124,67 m ²
408	21006	A	0337/00S000	76,41 m ²	66,7 m ²
410	21006	A	0337/00W000	162,21 m ²	24,08 m ²
411	21006	A	0337/00X000	159,11 m ²	3,95 m ²
412	21006	A	0338/00K004	286,93 m ²	0,53 m ²
413	21006	A	0338/00C004	269,59 m ²	14,6 m ²
414	21006	A	0338/00P004	428,29 m ²	47,83 m ²
415	21006	A	0338/00B004	57,23 m ²	40,55 m ²
416	21006	A	0338/00X002	74,1 m ²	58,22 m ²
417	21006	A	0336/00S005	253,22 m ²	196,66 m ²
418	21006	A	0336/00D003	92,62 m ²	45,7 m ²
419	21006	A	0336/00E003	88,99 m ²	29,48 m ²
420	21006	A	0336/00D005	76,71 m ²	14,91 m ²
421	21006	A	0336/00N003	278,32 m ²	10,08 m ²
422	21006	A	0336/00C005	1.141,94 m ²	304,63 m ²
423	21006	A	0336/00R005	710,5 m ²	115,35 m ²
424	21006	A	0336/00P005	535,96 m ²	88,8 m ²
425	21006	A	0336/00L004	134,53 m ²	41,25 m ²
426	21006	A	0336/00K004	139,5 m ²	139,49 m ²
427	21006	A	0336/00C004	151,81 m ²	112,15 m ²
428	21006	A	0335/00W003	113,97 m ²	48,85 m ²
429	21006	A	0335/00W002	97,74 m ²	19,04 m ²
430	21006	A	0335/00H003	112,53 m ²	71,64 m ²
431	21006	A	0335/00D003	77,11 m ²	67,06 m ²
432	21006	A	0335/00F002	90,96 m ²	74,94 m ²
433	21006	A	0335/00M002	111,21 m ²	46,23 m ²
434	21006	A	0335/00R000	114,3 m ²	16,49 m ²
435	21006	A	0335/00E002	111,73 m ²	0,2 m ²
436	21372	B	0308/00Y004	232,04 m ²	0,99 m ²
437	21372	B	0308/00L005	375,24 m ²	19,1 m ²
438	21372	B	0308/00G005	378,26 m ²	83,85 m ²
439	21372	B	0308/00P004	478,16 m ²	162,67 m ²

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

440	21372	B	0308/00K004	209,93 m ²	90,19 m ²
441	21372	B	0308/00X004	209,48 m ²	88,45 m ²
442	21372	B	0308/00L004	155,7 m ²	69,59 m ²
444	21372	B	0308/00S005	237,41 m ²	79,09 m ²
445	21372	B	0310/00N003	969,34 m ²	376,94 m ²
446	21372	B	0309/00E000	284,2 m ²	166,8 m ²
448	21372	B	0310/00X003	428,79 m ²	49,08 m ²
449	21372	B	0310/00G003	224,07 m ²	14,03 m ²
450	21372	B	0310/00H003	434,04 m ²	27,01 m ²
451	21372	B	0310/00Z003	221,29 m ²	10,21 m ²
452	21372	B	0310/00Y002	237,62 m ²	10,76 m ²
453	21372	B	0310/00X002	217,13 m ²	10 m ²
454	21372	B	0310/00Z002	228,51 m ²	11,12 m ²
455	21372	B	0310/00A003	238,49 m ²	12,52 m ²
456	21372	B	0311/00D000	1.051,52 m ²	247,82 m ²
457	21372	B	0314/00F002	446,53 m ²	77,39 m ²
458	21372	B	0314/00B003	1.822,33 m ²	393,65 m ²
459	21372	B	0314/00Y002	402,34 m ²	90,87 m ²
460	21372	B	0314/00L002	272,59 m ²	51,89 m ²
461	21372	B	0314/00M002	424,63 m ²	50,6 m ²

Tableau 18 : Impact sur les parcelles affectées par le tunnel Paix – Bordet (BMN, 2020)

Au total, 67 parcelles sont affectées par le passage du tunnel (emprise à grande profondeur) dans le tronçon Paix – Bordet.

6.2.1.8. Tunnel Bordet – dépôt

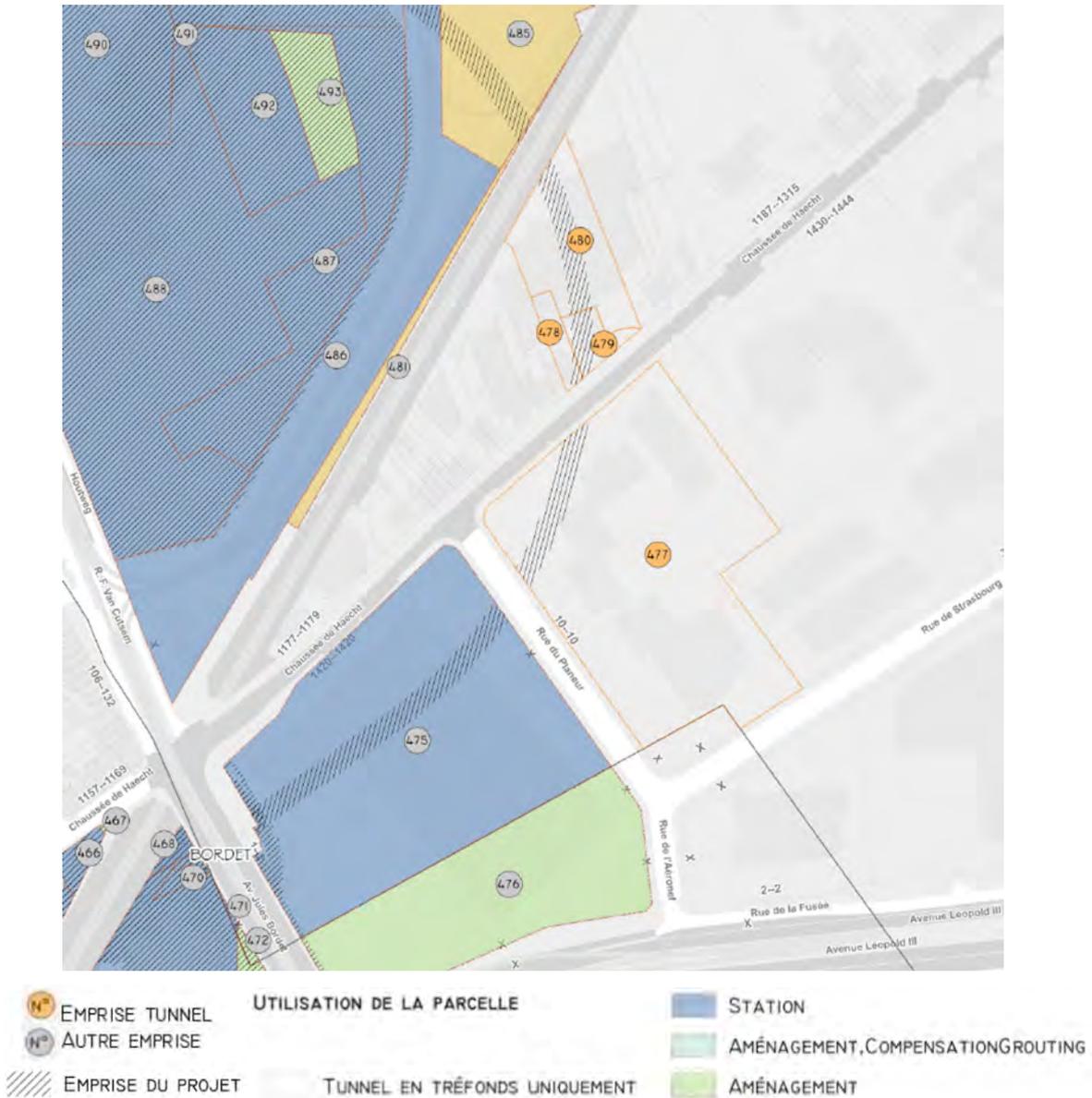


Figure 59 : Illustration des parcelles impactées par la construction du tunnel (BMN, 2020)

N° emprise	Référence cadastrale			Parcelle	
	Division	Section	N° parcelle	Superficie parcelle	Emprise tunnel sous parcelle
477	21821	C	0080/00V003	20.013,29 m ²	1.039,13 m ²
478	21821	B	0059/00Y002	597,59 m ²	73,16 m ²
479	21821	B	0063/00M000	743,34 m ²	374,46 m ²
480	21821	B	0063/00P000	3.827,68 m ²	961,86 m ²

Tableau 19 : Impact sur les parcelles affectées par le tunnel Bordet – dépôt (BMN, 2020)

Au total, 4 parcelles sont affectées par le passage du tunnel (emprise à grande profondeur) dans le tronçon Bordet – dépôt.

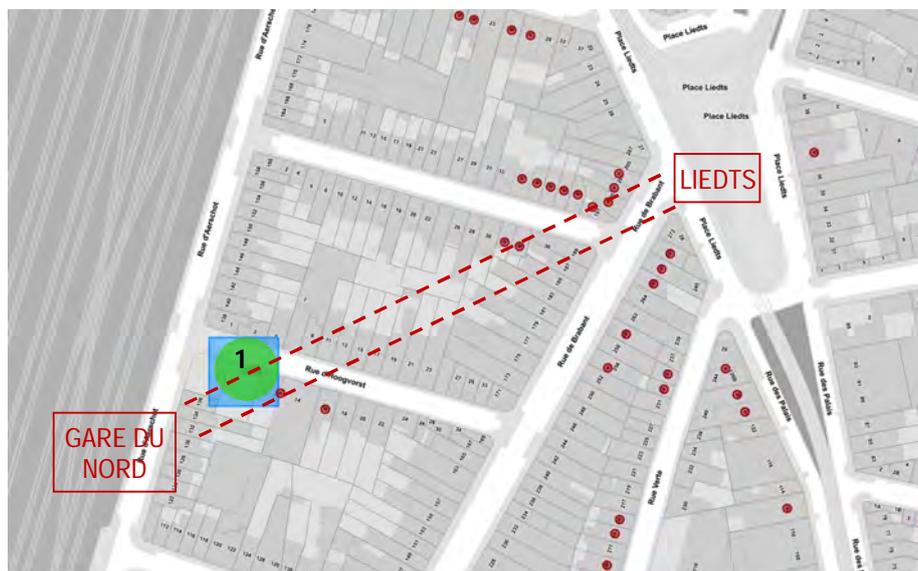
6.2.2. Impact sur le patrimoine

6.2.2.1. Éléments ayant un intérêt patrimonial sur le tracé du tunnel

Nous identifions par la suite les éléments ayant un intérêt patrimonial (architectural, naturel ou archéologique) qui se situent sur le tracé du tunnel. Rappelons que les éléments patrimoniaux affectant directement l'emprise des stations ont été déjà analysés.

Voir Livre Stations

A. Tunnel Gare du Nord – Liedts



<u>Statut légal</u>		<u>Patrimoine naturel</u>		<u>Inventaire Irismonument</u>	
	Site (liste de sauvegarde)		Arbre remarquable (liste de sauvegarde)		Bien repris à l'inventaire
					 Emprise du tunnel

Figure 60 : Localisation des éléments de patrimoine (BruGIS, 2020)

L'emprise en sous-sol du tunnel Gare du Nord – Liedts affecte un arbre remarquable [1] (un platane à feuille d'érable), considéré un site inscrit sur la liste de sauvegarde selon l'arrêté du 13-07-2016.

Le tunnel parcourt également l'emprise en sous-sol de certaines constructions reprises à l'Inventaire du Patrimoine architectural (« Irismonument »).

Signalons que le dessus du tunnel se situe à une profondeur de 12,19 m à la hauteur de la station Liedts.

B. Tunnel Liedts – Colignon



Statut légal	Patrimoine naturel	Inventaire Irismonument
Monument classé	Arbre remarquable (inventaire scientifique)	Bien repris à l'inventaire
Site (liste de sauvegarde)	Arbre remarquable (liste de sauvegarde)	Patrimoine archéologique
Zone de protection	Arbre remarquable abattu	Zone d'extension du site
		Emprise du tunnel

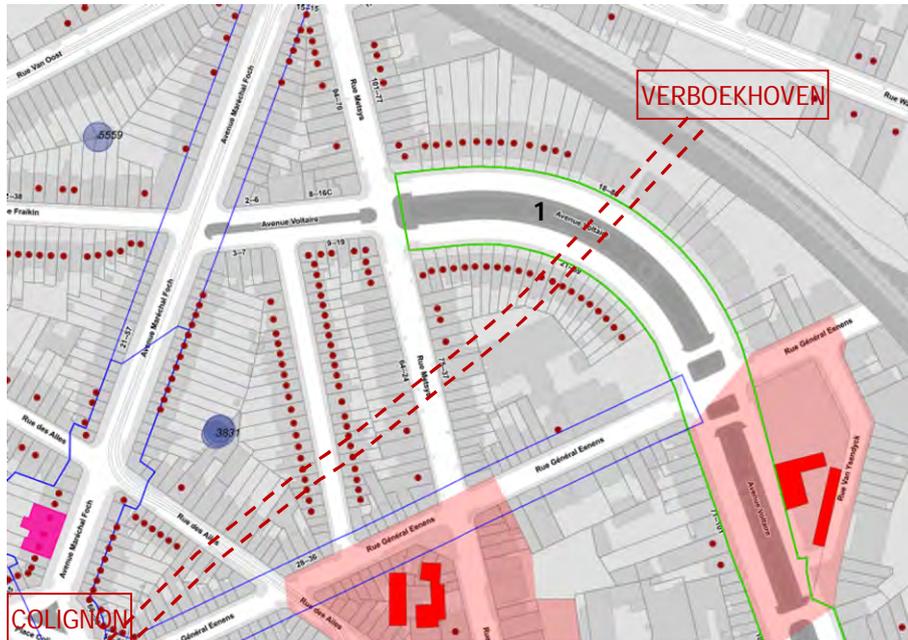
Figure 61 : Localisation des éléments de patrimoine (BruGIS, 2020)

L'emprise du tunnel Liedts – Colignon parcourt en sous-sol la zone de protection de l'église Saint-Servais **[1]**, un monument classé selon l'arrêté du 08-03-2003, ainsi qu'un arbre remarquable **[2]** (un platane à feuille d'érable), considéré un site inscrit sur la liste de sauvegarde selon l'arrêté du 21-12-2005.

Le tunnel parcourt également l'emprise en sous-sol de certaines constructions reprises à l'Inventaire du Patrimoine architectural (« Irismonument »).

Signalons que le dessus du tunnel se situe à une profondeur variant entre 16,11 et 17,11 m entre les stations Liedts et Colignon.

C. Tunnel Colignon – Verboekhoven



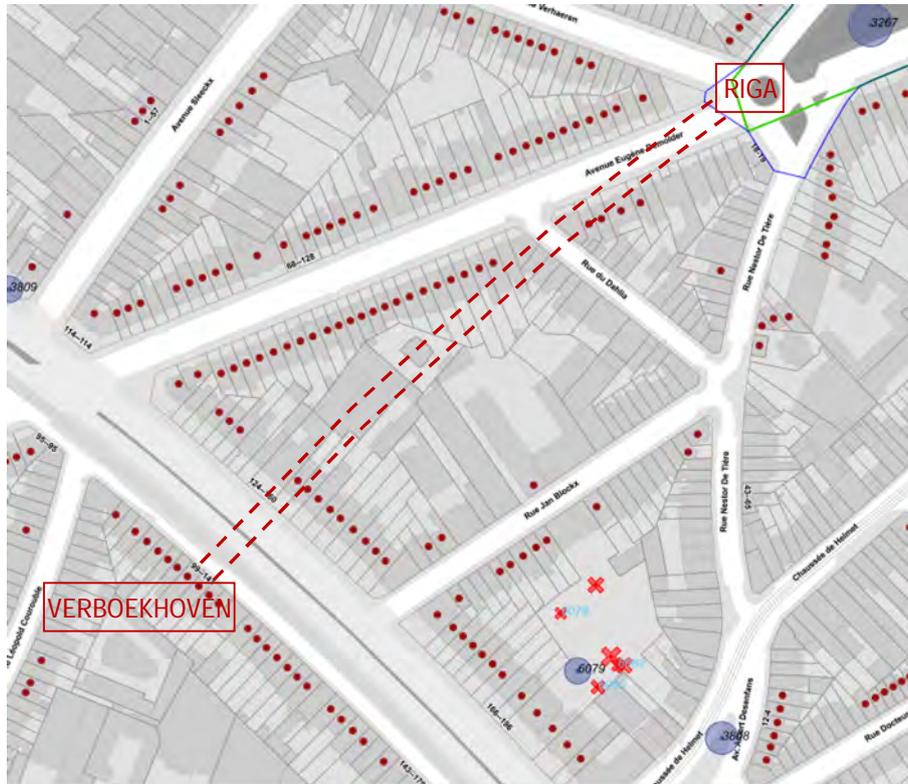
<u>Statut légal</u>		<u>Patrimoine naturel</u>		<u>Inventaire Irismonument</u>	
	Monument classé		Arbre remarquable (inventaire scientifique)		Bien repris à l'inventaire
	Site (inventaire légal)				
	Zone de protection				
		<u>Patrimoine archéologique</u>			
			Site localisé avec plan		Emprise du tunnel
			Zone d'extension du site		

Figure 62 : Localisation des éléments de patrimoine (BruGIS, 2020)

L'emprise du tunnel Colignon – Verboekhoven traverse en sous-sol l'avenue Voltaire [1], reprise à l'inventaire légal des sites. Le tunnel parcourt également l'emprise en sous-sol de nombreuses constructions reprises à l'Inventaire du Patrimoine architectural (« Irismonument »).

Signalons que le dessus du tunnel se situe à une profondeur variant entre 14,81 et 14,75 m entre les stations Colignon et Verboekhoven.

D. Tunnel Verboekhoven – Riga



<u>Statut légal</u>		<u>Patrimoine naturel</u>		<u>Inventaire Irismonument</u>	
	Site (inventaire légal)		Arbre remarquable (inventaire scientifique)		Bien repris à l'inventaire
	Zone de protection		Arbre remarquable abattu		Emprise du tunnel

Figure 63 : Localisation des éléments de patrimoine (BruGIS, 2020)

À l'exception de plusieurs constructions reprises à l'Inventaire du Patrimoine architectural (« Irismonument »), l'emprise en sous-sol du tunnel Verboekhoven – Riga n'affecte aucun élément ayant un intérêt patrimonial.

Signalons que le dessus du tunnel se situe à une profondeur variant entre 14,48 et 12,98 m entre les stations Verboekhoven et Riga.

E. Tunnel Riga – Tilleul

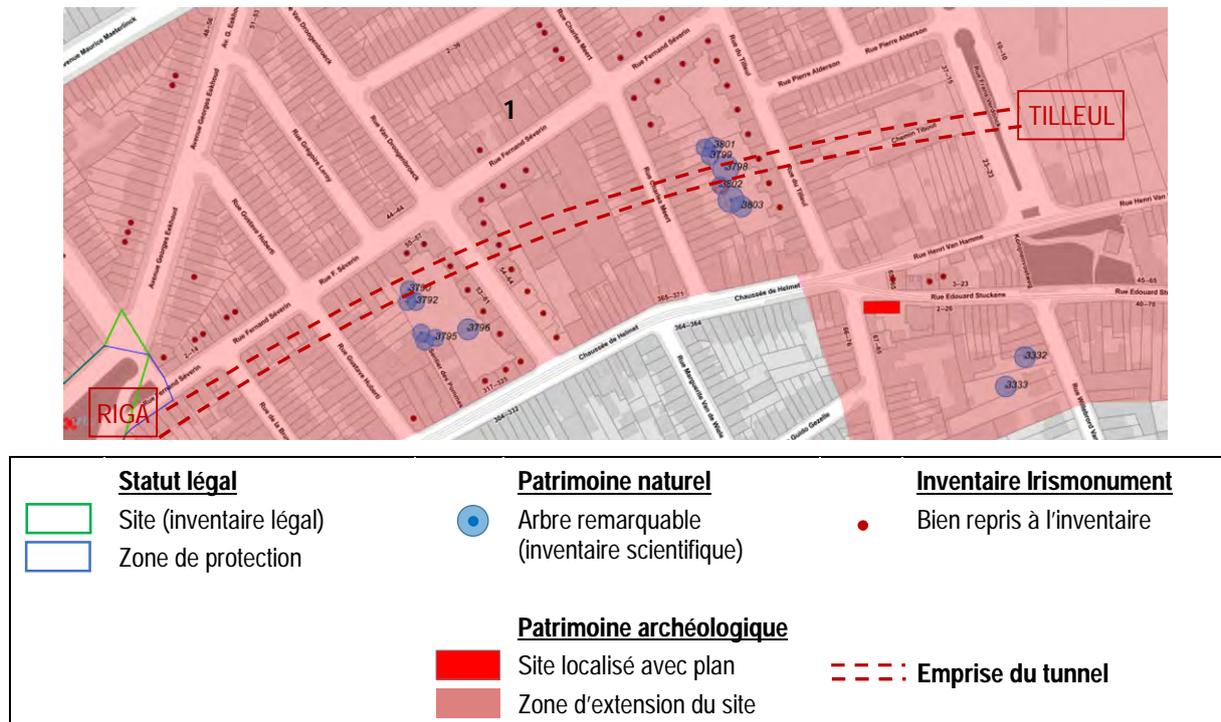


Figure 64 : Localisation des éléments de patrimoine (BruGIS, 2020)

En ce qui concerne le patrimoine architectural, le tunnel Riga – Tilleul n’affecte aucun élément ayant une valeur légale de protection en tant que monument ou site. Signalons cependant que le tunnel parcourt l’emprise en sous-sol de certaines constructions reprises à l’Inventaire du Patrimoine architectural (« Irismonument »).

En termes de patrimoine naturel, l’emprise du tunnel affecte certains arbres remarquables, situés à l’intérieur des îlots.

Concernant le patrimoine archéologique, le tunnel parcourt en sous-sol la zone d’extension du centre ancien d’Evere [1], datant du XII^e siècle.

Signalons que le dessus du tunnel se situe à une profondeur variant entre 13,97 et 17,19 m entre les stations Riga et Tilleul.

F. Tunnel Tilleul – Paix



<u>Statut légal</u>		<u>Patrimoine naturel</u>		<u>Inventaire Irismonument</u>	
	Monument classé		Arbre remarquable (inventaire scientifique)		Bien repris à l'inventaire
	Site (inventaire légal)				
	Zone de protection				
		<u>Patrimoine archéologique</u>			
			Site localisé avec plan		Emprise du tunnel
			Zone d'extension du site		

Figure 65 : Localisation des éléments de patrimoine (BruGIS, 2020)

Le tracé du tunnel Tilleul – Paix affecte la zone de protection de la ferme dite 't Hoeveke **[1]**, un monument classé selon l'arrêté du 16-04-1997. Signalons que cette ferme est considérée un site archéologique partiellement conservé, datant du XVI^e siècle.

Également d'un point de vue archéologique, le tunnel parcourt en sous-sol la zone d'extension du centre ancien d'Evere **[2]**, datant du XII^e siècle.

Signalons que le dessus du tunnel se situe à une profondeur variant entre 12,04 et 14,98 m entre les stations Tilleul et Paix.

G. Tunnel Paix – Bordet



<u>Patrimoine archéologique</u>	<u>Patrimoine naturel</u>	<u>Inventaire Irismonument</u>
Site localisé avec plan	Arbre remarquable (inventaire scientifique)	Bien repris à l'inventaire
Zone d'extension du site	Arbre remarquable abattu	Emprise du tunnel

Figure 66 : Localisation des éléments de patrimoine (BruGIS, 2020)

Le tracé du tunnel Paix – Bordet n'affecte aucun élément de patrimoine architectural ou naturel. Cependant, en ce qui concerne le patrimoine archéologique, la partie ouest du tracé de ce tronçon du tunnel affecte deux sites archéologiques :

- [1] « Den Koeckhoeck », une habitation datant du XVII^e siècle, démolie au début du XX^e siècle ;
- [2] « Het Blijtje », une ferme et auberge datant du XVII^e siècle, détruite par un incendie en 1975.

Cette partie du tunnel traverse également la zone d'extension du centre ancien d'Evere [3], datant du XII^e siècle.

Signalons que le dessus du tunnel se situe à une profondeur variant entre 14,39 et 12,75 m entre les stations Paix et Bordet.

H. Tunnel Bordet – dépôt

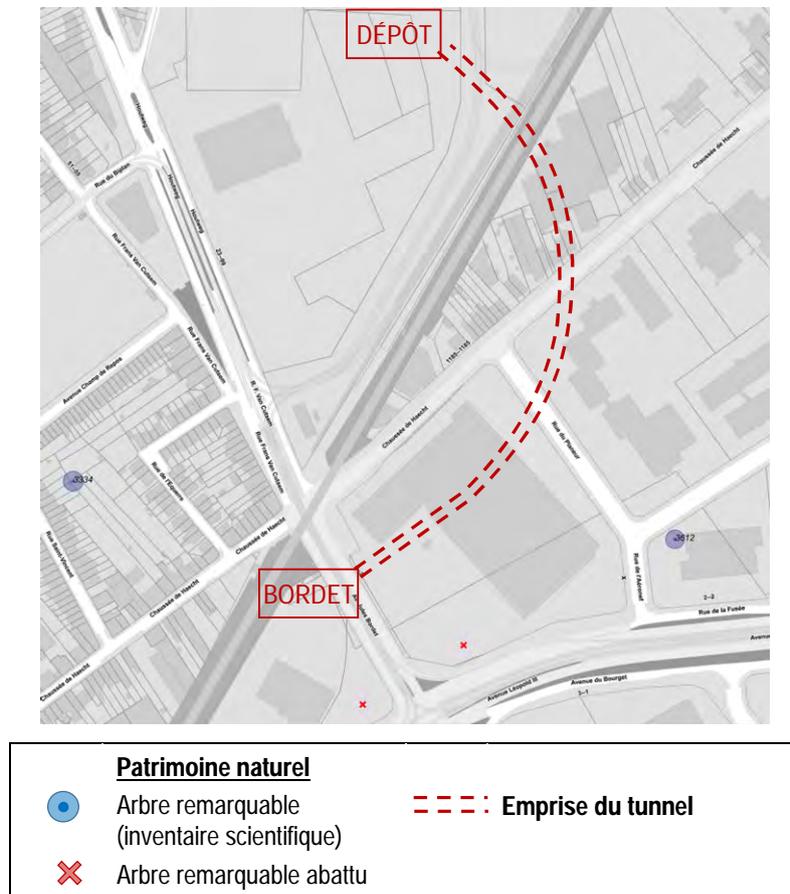


Figure 67 : Localisation des éléments de patrimoine (BruGIS, 2020)

Le tunnel Bordet – dépôt n'affecte aucun élément de patrimoine architectural, naturel ou archéologique. Signalons que le dessus du tunnel se situe à une profondeur de 17,15 m à la hauteur de la station Bordet.

6.2.2.2. Impact sur le patrimoine

La profondeur à laquelle le tunnel de métro se trouve et les mesures de sécurité structurelle prises en compte au cours des travaux d'avancement du tunnelier réduisent voire éliminent l'éventuel impact produit sur les éléments de patrimoine architectural et naturel identifiés précédemment.

Voir chapitre Chantier et fonctionnement tunnelier

Cependant, des vestiges archéologiques sont susceptibles d'être retrouvés lors des travaux de construction du tunnel, notamment en ce qui concerne les abords des sites archéologiques de « 't Hoeveke », « Den Koeckhoeck » et « Het Blijtje », ainsi que dans la zone d'extension du centre ancien d'Evere, qui affecte les tunnels Riga – Tilleul, Tilleul – Paix et Paix – Bordet.

Tel qu'indiqué sur le site web de « patrimoine.brussels », « une obligation légale impose que [ces éventuelles découvertes] soient déclarées dans les trois jours à la Direction du Patrimoine culturel qui pourra, le cas échéant, organiser d'urgence une opération archéologique ».

Voir chapitre Sol et sous-sol

6.2.3. Incidences du transport des déblais (du tunnel) suivants les 2 hypothèses retenues

6.2.3.1. Vers le port de Bruxelles

Au niveau de l'urbanisme, le transport des déblais du tunnel vers le port de Bruxelles entraîne des incidences négatives via le préacheminement entre le site de Haren et le canal par camion ou par convoyeur à bande en surface.

Du point de vue de l'urbanisme, ces deux solutions entraînent de nombreuses incidences en termes d'impact visuel pour les riverains de la voirie Houtweg, la rue Laurent Vandenhoven, la rue Stroobants, la rue Chaumontel et l'avenue Zénobe Gramme. Il s'agit d'un parcours de plus de 2 km entre le site de Haren et la rampe du Lion, qui surmonte les voies ferrées. En plus de l'impact visuel produit, les façades des constructions longeant ce parcours risquent d'être affectées lors du transport des déblais.

En outre, ces solutions entraînent une certaine isolation des îlots situés entre le parcours précité et les voies ferrées. Dans ce territoire se localisent plusieurs éléments ayant une valeur patrimoniale, comme le site du Moeraske, l'église Saint-Vincent ou l'ancien Domaine Walckiers. Cette isolation est plus importante si un convoyeur à bande en surface est installé le long du parcours de manière permanente.

6.2.3.2. Vers la L26

Il s'agit d'une option intéressante pour limiter les incidences en matière d'urbanisme.

Le transport des déblais du tunnel vers la ligne 26 de la SNCB présente peu d'impacts du point de vue de l'urbanisme, étant donné que le préacheminement entre l'aire de marinage prévu sur le chantier du tunnel et la voie de connexion avec la ligne ferroviaire se réalise à travers le site de la STIB. Aucun impact visuel significatif n'est à signaler.

6.2.3.3. Recommandations

- Prévoir des mesures de suivi de chantier avant, durant et après les travaux de construction du métro au droit de la ferme 't Hoeveke, afin d'évaluer le tassement produit.
- Si le transport des déblais du tunnel est réalisé par un convoi de camions vers le port de Bruxelles, faire un état des lieux des façades en vis-à-vis du parcours du préacheminement.

6.3. Domaines social et économique

6.3.1. Coûts d'investissement

Le chapitre ci-dessous vise à présenter les coûts d'investissement directs et indirects pour la version monotube. Ce chapitre se base sur l'analyse de BMN pour la variante bitube⁶. D'un point de vue méthodologique, l'estimation présentée dans ce chapitre porte sur les coûts d'investissement directs et indirects en niveau de prix 2015. Pour le monotube, sont actuellement budgétisés les travaux préparatoires, 20 lots et le marché d'aménagement de surface aux abords des stations :

Lot	Marché
Travaux préparatoires	Concessionnaires, démolition Medical Center, démolitions avant travaux des stations/dépôt et travaux tram
Lot 1	Travaux Jonction Gare du Nord et puits P5/P6
Lot 2	Travaux du dépôt à Haren
Lot 3	Travaux génie civil des stations, tunnel, puits P0 et rampe
Lot 4	Parachèvements et techniques spéciales
Lot 5	Mécanisation des accès aux stations et au puits P0
Lot 6	Travaux des voies
Lot 7	Marché 11kV et 900V
Lot 8	Aspects de télécommunication
Lot 9	Systèmes stations
Lot 10	SCADA Energie
Lot 11	Billettique
Lot 12	Contrôle d'accès
Lot 13	VMS
Lot 14	Call Manager
Lot 15	Signalisation
Lot 16	SCADA Equipements stations
Lot 17	Façade de quai
Lot 18	Publicité
Lot 19	Portillons Sésame
Lot 20	Spider
Autre marché	Aménagement de surface aux abords des stations

Tableau 20 Lots budgétisé pour la version monotube (ARIES sur base des données BMN, 2020)

⁶ BMN & Beliris. (2020). *Note de synthèse Variante Bitube : Étude de l'extension du réseau de transports en commun de haute performance vers le nord à Bruxelles*, consulté en août 2020.

Les coûts d'investissement sont estimés pour la version monotube à un total de 936 M€. Le tableau ci-dessous reprend le détail de l'estimation des coûts d'investissement pour les 20 lots, travaux préparatoires et aménagement de surface aux abords des stations :

MONOTUBE T6a et T6b - 02/2020 NIV PU 2015	
COÛTS DIRECTS ET INDIRECTS	€ 935.763.824
Travaux préparatoires	18.319.593 €
Concessionnaires	11.836.498 €
Démolition Medical Center	466.615 €
Dépôt	1.374.000 €
Lots	904.339.651 €
Lot 1 GDN/P5/P6	41.259.839 €
Lot 3 TSP0	535.046.008 €
Lot 2 Dépôt	76.290.977 €
Lot 4 Parach et TS	131.630.519 €
Lot 4 Parachèvements	65.743.840 €
Lot 4 Techniques spéciales	65.886.679 €
Lot 5 Mécanisation des accès	32.669.000 €
Lot 6 Voies	21.352.129 €
Lot 7 Marché 11kV et 900V	12.179.380 €
Lot 8 Télécom	5.657.800 €
Lot 9 Systèmes stations	2.786.000 €
Lot 10 SCADA Energie	800.000 €
Lot 11 Billetique	4.243.000 €
Lot 12 Contrôle d'accès	400.000 €
Lot 13 VMS	2.410.000 €
Lot 14 Call Manager	Compris lot 9
Lot 15 SIG	20.500.000 €
Lot 16 SCADA Equipements stations	735.000 €
Lot 17 Façades de quai	16.380.000 €
Lot 18 Publicité	- €
Lot 19 Portillons Sésame	Compris lot 11
Lot 20 SPIDER	- €
Marché Aménagement de surface	13.104.580 €

Figure 68 : Coûts d'investissement pour les travaux préparatoires, 20 lots et aménagement de surface pour la version monotube (ARIES sur base des données BMN, 2020)

Ce coût reprend notamment les coûts de génie civil des stations, du tunnel, du puits P0 (lots 3), le marché d'aménagement de surface aux abords des stations, la signalisation, les travaux du dépôt à Haren ou encore les travaux préparatoires (concessionnaires, démolitions avant travaux des stations/dépôt). Pour plus de détail voir la présentation des lots budgétisés ci-dessus.

6.3.2. Mise en perspective des coûts d'investissement

Afin de mettre en perspective les coûts d'investissement présentés ci-dessus, une évaluation grossière des recettes générées sur l'année à la suite de la mise en service de la ligne a été effectuée dans le point ci-dessous. Afin d'estimer ces recettes, les hypothèses suivantes ont été considérées :

Sur la base des données issues du modèle MUSTI et de BMN (voir PARTIE 1 : 6.1. Mobilité), le nombre de montées a été estimés entre 20.000 et 25.000 montées pour les stations de la ligne de métros Nord en heure de pointe du matin (7h-9h). L'hypothèse a été prise que ce nombre de montées correspondant au nombre de trajet payants sur la ligne.

Afin d'évaluer le nombre de montées global au cours d'un jour ouvrable moyen, l'enquête Beldam (Enquête BELDAM-2012) a été consultée. Suivant cette enquête, l'heure de pointe du matin (7h-9h) correspond à 22% des flux sur la journée. Par conséquent, le chiffre de 20.000 à 25.000 montées doit donc être multiplié par un facteur de 4,5 afin d'obtenir la fréquentation sur l'ensemble d'un jour ouvrable. Le reste des périodes d'un jour ouvrable concentrent donc 78% des flux. Suivant ces hypothèses, le nombre de montées s'élève donc à 91.000 – 114.000 montées pour un jour ouvrable moyen.

Afin d'évaluer le nombre de montées global au cours de l'année en partant des montées d'un jour ouvrable moyen. Nous avons estimé :

- 220 jours ouvrables au cours de l'année. Ceux-ci présentent la fréquentation estimée ci-dessus pour un jour ouvrable moyen ;
- 145 jours non ouvrables (fériés, week-end, périodes de vacances scolaires). Ceux-ci présentent une fréquentation journalière équivalente à 60% de la fréquentation journalière d'un jour ouvrable moyen.

Sur la base de ces hypothèses, **le nombre de montées annuel a été estimé entre la fourchette de 28.000.000 à 35.000.000 montées annuelles.**

Enfin, afin d'évaluer les recettes générées par ces 28 à 35 millions de montées annuelles, un prix moyen de voyage de 2,1 euros a été estimé sur la base du prix moyen d'un ticket de métro. Il s'agit donc d'une estimation maximaliste ne tenant pas compte des tarifs préférentiels qui s'appliquent à certains utilisateurs (personnes âgées, moins de 12 ans, etc.) mais également des utilisateurs réguliers de la ligne qui opteront plutôt pour un abonnement annuel avec un prix par voyage moins élevé.

Suivant les hypothèses grossières présentées ci-dessus, la mise en service de la ligne générera en première approche, **une recette annuelle se situant dans la fourchette de 59 à 73 millions d'euros.**

En conclusion, nous pouvons mettre en évidence, que **la mise en service de la ligne permettrait donc d'amortir les coûts d'investissement du monotube (936 M€) après une durée d'exploitation estimée à environ 12 et 15 ans**

Enfin, le tableau ci-dessous reprend une synthèse des hypothèses considérées :

Nombre de montées pour un jour ouvrable moyen	
Nombre de montées en heure de pointe (7h-9h) pour un jour ouvrable moyen	20.000 – 25.000
Part des montées en heures de pointe du matin (7h-9h)	22%
Part des montées en hors heures de pointe du matin	78%
Nombre de montées pour un jour ouvrable moyen	91.000 – 114.000
Nombre de montées pour un jour non ouvrable moyen	
Part des montées pour un jour non ouvrable comparativement à un jour ouvrable moyen	60% des montées d'un jour ouvrable
Nombre de montées pour un jour non ouvrable moyen	55.000 – 68.500
Nombre de montées sur l'année	
Nombre de jours ouvrables	220
Nombre de jours non ouvrables	145
Nombre de montées sur une année	28.000.000 – 35.000.000
Recettes sur l'année	
Prix moyen d'un ticket de métro (en euros)	2,1
Recettes générées sur une année	59.000.000 – 73.000.000

Tableau 21: Synthèse des hypothèses considérées afin d'estimer les recettes annuelles générées par l'exploitation de la ligne de Métro (ARIES, 2020)

6.3.3. Planning travaux

Pour l'ensemble de l'ouvrage métro, en se basant sur la date de départ des travaux de juillet 2022, la version monotube de l'ouvrage métro sera mise à disposition de la STIB pour juillet 2030. Les travaux s'allongeront donc sur une période de 8 ans.

6.3.4. Incidences du transport des déblais (du tunnel) suivants les 2 hypothèses retenues

6.3.4.1. Vers le port de Bruxelles

Comme spécifié dans le chapitre mobilité (*Voir PARTIE 1 : 6.1. Mobilité*), le transport des déblais vers le port de Bruxelles comprend :

- Un trajet de ± 7 kilomètres en camions qui nécessitera hors période de pointe un temps de trajet estimé (via googlemaps) à 16 minutes.
- Un trajet en bateau vers une destination finale non définie.

6.3.4.2. Vers la L26

Comme spécifié dans le chapitre mobilité (*Voir PARTIE 1 : 6.1. Mobilité*), le transport des déblais suivant la ligne de train L26 comprend :

- Le transport des déblais via une bande transporteuse temporaire entre la zone chantier et la zone de chargement des trains.
- Le transport des déblais via train sur la ligne 26 vers une destination finale non définie

6.3.4.3. Comparaison des deux hypothèses retenues

Au niveau des coûts, le tableau ci-dessous reprend les coûts par tonne pour le transport de terres d'excavation estimés par BMN pour les trois modes de transport en fonction de la distance (transport routier, ferroviaire et fluvial) :

	Transport routier	Transport ferroviaire	Transport fluvial
Destination à 25 km	5 €/tonne	7,68 €/tonne	1,37 à 2,2 €/tonne
Destination à 50 km	7,5 €/tonne	8,21 €/tonne	1,60 à 2,45 €/tonne
Destination à 75 km	10 €/tonne	8,76 €/tonne	2,39 à 2,70 €/tonne

Tableau 22 : Estimation du coût par tonne pour le transport de terres d'excavation en fonction de la distance parcourue pour les modes de transport routier, ferroviaire et fluvial (BMN, 2016)

En partant des prix présentés dans le tableau ci-dessus, il est possible d'effectuer une comparaison des deux hypothèses retenues en termes de coûts de transport des terres d'excavations. Le tableau ci-dessous reprend cette comparaison par tonne de déblais évacuée :

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

	Hypothèse Port de Bruxelles			Hypothèse Ligne L26
	Transport routier d'approche au Port ⁷	Transport fluvial	Prix/tonne	Prix/tonne
Destination à 25 km	5 €/tonne	1,37 à 2,2 €/tonne	6,37 à 7,2 €/tonne	7,68 €/tonne
Destination à 50 km		1,60 à 2,45 €/tonne	6,6 à 7,45 €/tonne	8,21 €/tonne
Destination à 75 km		2,39 à 2,70 €/tonne	7,39 à 7,7 €/tonne	8,76 €/tonne

Tableau 23 : Comparaison du prix/tonne de transport des terres d'excavations pour les deux hypothèses retenues (ARIES sur base des données BMN, 2020)

Il ressort donc de cette analyse que l'option Port de Bruxelles est l'option pour laquelle le transport des déblais sera la moins onéreuse des deux et ceci même en considérant :

- Un transport routier d'approche au port de 25 km au lieu des 7 km requis pour rejoindre le port depuis le projet ;
- Sans tenir compte des coûts de construction et d'exploitation de la bande transporteuse temporaire requise dans le scénario d'utilisation de la ligne L26.

Il est possible d'approcher le coût total de transport des terres d'excavations pour les deux hypothèses. En effet, comme précisé dans la partie 4.4 présentée ci-dessus :

- Le volume de déblais du tunnel représente environ 582.000 tonnes.
- Le volume de déblais provenant du puits P0 et de la rampe d'accès représente environ 127.395 tonnes.

Ceci pour un total **d'environ 709.000 tonnes** de déblais évacué. Sur cette base, le tableau ci-dessous reprend une estimation des coûts totaux d'évacuation des déblais pour les deux hypothèses étudiées :

	Hypothèse Port de Bruxelles			Hypothèse Ligne L26		
	Prix par tonne	Volume de déblais (en tonne)	Prix total	Prix par tonne	Volume de déblais (en tonne)	Prix total
Coût transport déblais total	6,37 à 7,7 €/tonne	709.000	4.500.000 à 5.450.000 €	7,68 à 8,76€/tonne	709.000	5.450.000 à 6.210.000 €

Tableau 24 : Coûts totaux de transport des terres d'excavations pour les deux hypothèses retenues (ARIES sur base des données BMN, 2020)

⁷ Transport d'approche : Hypothèse de moins de 25 km de circulation routière en camions.

Néanmoins, outre cet aspect financier, les deux hypothèses peuvent également être comparées en termes d'impacts environnementaux négatifs (congestions, nuisances sonores, santé, émissions de polluants) via les coûts marginaux externes générés par chaque mode.

Figure 1. Coûts externes marginaux du transport de marchandises en Flandre selon le véhicule utilisé (€/100 tonnes-km)

Source : MIRA (2010)

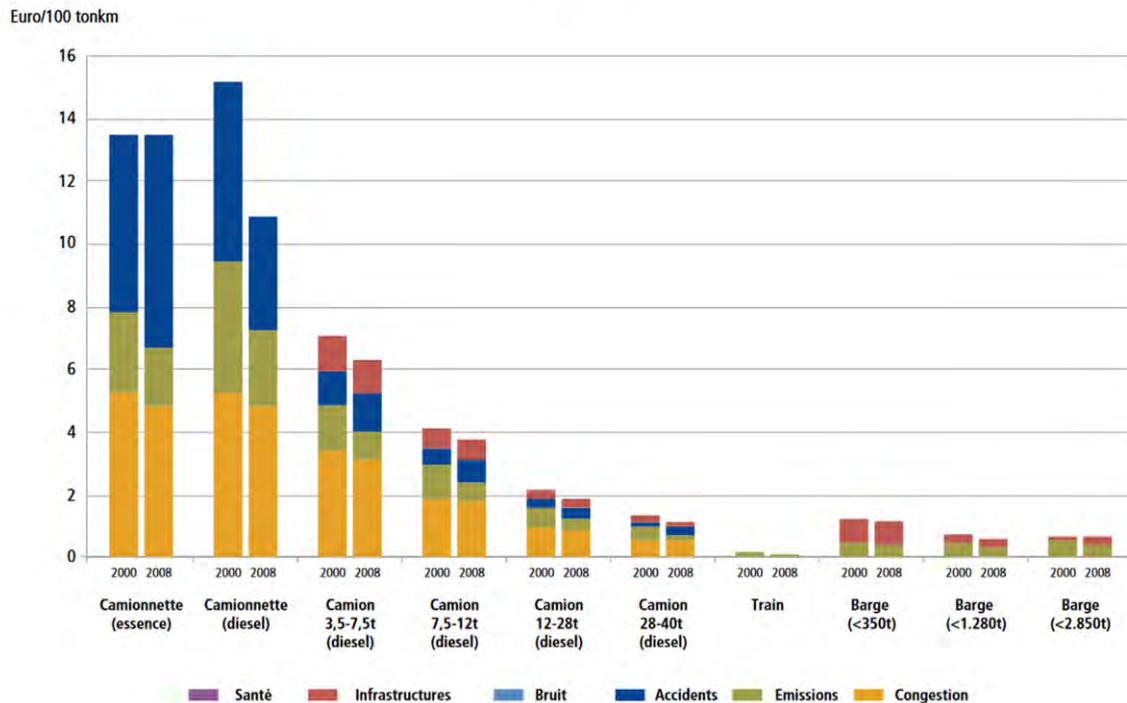


Tableau 25 : Coûts externes marginaux du transport de marchandises en Flandre selon le véhicule utilisé (€/100 tonnes-km) (Bruxelles Mobilité⁸, 2015)

Il ressort de cette figure, que le train est le mode présentant le moins d'impacts environnementaux négatifs. Par conséquent, bien que l'hypothèse du Port de Bruxelles (transport par voie routière et fluviale) soit la moins onéreuse des deux. Elle sera à l'inverse, **celle qui aura l'impact environnemental le plus négatif** et ceci particulièrement en lien avec l'utilisation du transport routier dans le cadre de cette alternative.

En conclusion, concernant les hypothèses de transport des déblais :

- L'alternative du Port de Bruxelles présentera comme avantage d'être la moins chère des deux hypothèses mais aura à l'inverse, un impact environnemental plus important que l'hypothèse de l'utilisation de la ligne L26 ;

⁸ Bruxelles Mobilité (2015), *Le transport de marchandises et la logistique à Bruxelles : état des lieux et perspectives*, Les cahiers de l'Observatoire de la mobilité de la Région de Bruxelles-Capitale.

- L'alternative de la Ligne 26 présentera un coût plus élevé mais sera moins impactante d'un point de vue environnemental et ceci particulièrement en relation avec les faibles nuisances générées par le train.

6.3.5. Impact sur le foncier

Le passage du tunnel aura un impact sur le foncier au droit du tunnel et résultera potentiellement en une perte de valeur foncière pour les parcelles situées au droit de celui-ci. Le passage du tunnel sous les parcelles privées nécessitera, en effet, l'expropriation des tréfonds de celles-ci. Néanmoins, il est important de mettre en évidence, que l'impact de ces expropriations n'est que peu significatif à l'échelle du projet. En effet, le tunnel sera localisé à grande profondeur et aura donc peu d'impact en surface (voir analyse des incidences des autres thématiques).

On peut également noter, que le 19 novembre 2020 le droit de passage du monotube a été confirmé par le Gouvernement (expropriation des tréfonds). Ceci marque le début de la procédure officielle de calcul des indemnités pour les expropriations. Ces indemnités sont estimées sur la base de plusieurs critères dont le plus important est la profondeur du tunnel sous la parcelle privée.

6.3.6. Conclusions

Les incidences du projet version monotube au niveau socio-économique sont les suivantes :

- **Un coût d'investissement total de 936 M€.** L'amortissement des coûts d'investissement du monotube (936 M€) nécessitera une durée d'exploitation de la ligne estimée à environ 12 - 15 ans.
- **Des travaux qui s'étaleront sur une période de 8 ans de 2022 à 2030.**
- **Des coûts économiques et environnementaux en lien avec le transport de déblais.** Concernant les deux hypothèses de transport des déblais retenues :
- L'alternative du Port de Bruxelles sera la moins onéreuse mais aura un impact environnemental plus important. Le prix total de transport des terres d'excavations sera situé entre 4.500.000 à 5.450.000 €.
- L'alternative de la Ligne 26 sera plus onéreuse mais sera moins impactante d'un point de vue environnemental. Le prix total de transport des terres d'excavations sera situé entre 5.450.000 à 6.210.000 €.
- **L'expropriation des tréfonds des parcelles.** L'impact de ces expropriations n'est que peu significatif à l'échelle de l'ensemble du projet.

6.4. Sol, sous-sol et eaux souterraines

6.4.1. Aire géographique

Pour le sol et les eaux souterraines, l'aire géographique correspond au terrain du projet lui-même, ainsi que les différentes infrastructures en surface et en sous-sol jouxtant le site.

6.4.2. Cadre réglementaire et références

6.4.2.1. Sol

- L'Ordonnance du 5 mars 2009 relative à la gestion et à l'assainissement des sols pollués (M.B. 10/03/2009) modifiée par l'Ordonnance du 23 juin 2017 (M.B. 13/07/2017) ;
- L'AGRBC du 29 mars 2018 déterminant les normes d'assainissement et les normes d'intervention (M.B. 02/05/2018) ;
- L'AGRBC du 29 mars 2018 fixant le contenu type des reconnaissances de l'état du sol et des études détaillées (M.B. 02/05/2018) ;
- L'AGRBC du 29 mars 2018 fixant le contenu type des projets d'assainissement, des projets de gestion du risque, et des traitements de durée limitée (M.B. 02/05/2018) ;
- L'AGRBC du 16 février 2017 relatif à l'attestation du sol (M.B. 20/03/2017) ;
- L'AGRBC du 16 juillet 2015 modifiant l'AGRBC du 17 décembre 2009 fixant la liste des activités à risque (M.B. 10/08/2015) ;
- L'AGRBC du 15 décembre 2011 fixant les conditions d'agrément des experts en pollution du sol et d'enregistrement des entrepreneurs en assainissement du sol (M.B. 30/01/2012) et sa modification du 07 juillet 2016 (M.B. 07/07/2016) ;
- L'Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 2 juillet 2001 fixant les conditions d'exploitation pour le nettoyage à sec au moyen de solvants (mis à jour au 04-05-2018).

6.4.2.2. Eaux

- Directive 2008/105/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 établissant des normes de qualité environnementale dans le domaine de l'eau :
 - L'Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 24 mars 2011 établissant des normes de qualité environnementale, des normes de qualité de base et des normes chimiques pour les eaux de surface contre la pollution causée par certaines substances dangereuses et autres polluants (M.B. 08/04/2011) ;
- Directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (M.B. 22/12/2000), transposée par l'Ordonnance du 20 octobre 2006 établissant un cadre pour la politique de l'eau ;
 - L'ordonnance du 20 octobre 2006 établissant un cadre pour la politique de l'eau (M.B. 03/11/2006) (modifiée par l'Ordonnance du 28 octobre 2010) ;

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

- L'ordonnance du 29 mars 1996 instituant une taxe sur le déversement des eaux usées (M.B. 01/04/1996) et son arrêté d'exécution du 7 novembre 1996 modifié par l'arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 23 décembre 1999 (M.B. 07/01/2000) et abrogé partiellement par l'Ordonnance du 20 octobre 2006 (article 15 à 21 en vigueur) ;
 - Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 3 décembre 2015 établissant un outil de suivi et de reporting en vue de la détermination du coût-vérité de l'eau en Région de Bruxelles-Capitale et abrogeant l'arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 22 janvier 2009 établissant un plan comptable uniformisé du secteur de l'eau en Région de Bruxelles-Capitale.
- Directive 2007/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation.
 - Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 24 septembre 2010 relatif à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (M.B. 05/10/2010) (modifié par l'Arrêté du 28 mars 2013).
 - L'Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 23 mars 1994 relatif au traitement des eaux urbaines résiduaires (M.B. 05/05/1994) (modifié par l'Arrêté du 27/10/1998) ;
 - L'Arrêté royal du 19 décembre 1997 modifiant l'arrêté royal du 7 juillet 1994 fixant les normes de base en matière de prévention contre l'incendie et l'explosion, auxquelles les bâtiments nouveaux doivent satisfaire (M.B. 30/12/1997) ;
 - L'Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 21 novembre 2006 arrêtant les Titres Ier à VIII du Règlement régional d'urbanisme (RRU) applicable à tout le territoire de la Région de Bruxelles-Capitale (M.B. 19/12/2006).
 - Les textes et codes de bonne pratique en matière de respect de la qualité des eaux de surface à respecter dans le cadre du traitement des eaux de drainage sont identifiés au chapitre 8 de la partie 2 du présent livre (Analyse de la variante - Sol, sous-sol et eaux souterraines).

6.4.3. Description de la situation existante

6.4.3.1. Localisation des infrastructures souterraines

Au droit du tracé du tunnel :

- Présence du collecteur du Maelbeek.
- Présence d'un bassin d'orage, au niveau de la rue des planeurs.
- Présence d'anciens puits de pompage souvent constitués de fûts métalliques et dont la localisation est parfois inconnue.
- Présence éventuelle de sondes géothermiques dont la localisation peut être également inconnues.

A. Ouvrages de captage existants en périphérie

Un recensement des ouvrages de captage situés à l'intérieur du périmètre d'influence du tracé a été effectué sur base de la base de données de Bruxelles-Environnement (<https://geodata.environnement.brussels/client/view/>). La carte présentée ci-après représente la localisation des ouvrages de captages actifs et historiques déclarés (autorisations permanentes et temporaires) et en périphérie du dispositif.

L'impact du tracé en exploitation a été évalué en procédant au recensement des captages présents à l'intérieur du périmètre limité par la courbe d'isobattelement de 0,1 m. Le périmètre pris en considération est celui de la modélisation V1 qui tend à maximaliser les effets de rabattement et l'influence périphérique du dispositif.

36 captages ont été recensés à l'intérieur de ce périmètre d'isobattelement de 0,1 m.

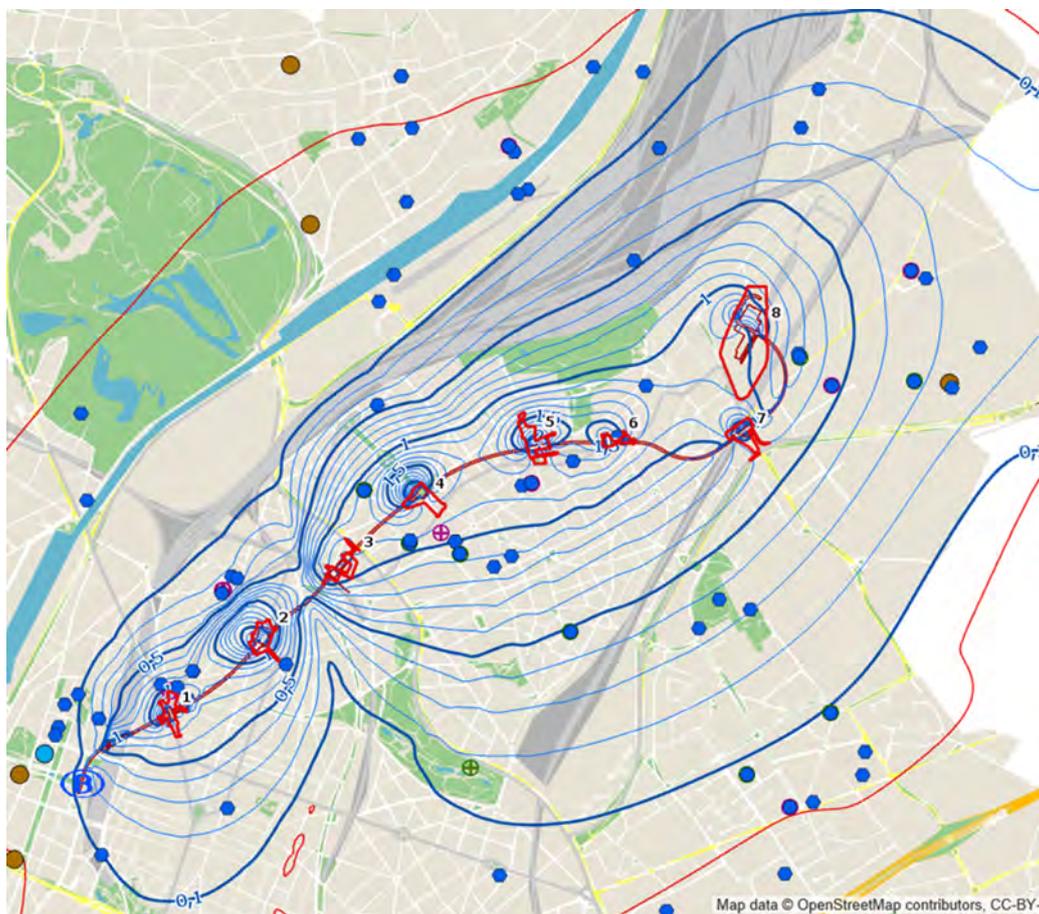


Figure 69: Localisation des ouvrages de captage mis en perspective avec la zone d'influence du rabattement en exploitation (Tractebel 2020)

Le tableau présenté ci-après identifie ces ouvrages de captage localisés à proximité de chacune des stations au sein du périmètre d'isobattelement 0,1 m, ainsi que notamment la distance à la boîte principale, les débits autorisés, l'usage du captage et le réservoir aquifère sollicité.

On notera qu'aucun ouvrage de distribution d'eau publique ni même de zone de protection de captage ne sont identifiés dans le périmètre d'influence. Il s'agit essentiellement de captages domestiques, de blanchisseries, de car-wash ou de captages d'usage tertiaire.

Partie 1. Description du projet
 6. Analyse des incidences du projet et recommandations

Station	Distance (m)	Rabattement (m)	OBJEC TID	Id_ouvrage	Nom	Debit_autorise (m³/j)	Debit_autorise (m³/an)	Adresse	Code postal	Profondeur (m)	Usage de l'eau	Aquifère capté
Liedts	120	0,95	251	112	capt_5268	20	5000	Rue Gallat	1030	67	salon-lavoir/blanchisserie	UH/RBC_08a Aquifère des sables du Landénien
Liedts	130	0,85	219	466	capt_5710	8	2880	Rue de la Reine	1030	17	salon-lavoir/blanchisserie	UH/RBC_04 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele
Liedts	220	0,80	281	1626	capt_5482	40	12000	rue gallat	1030		indéterminé	Non renseigné
Liedts	220	0,80	173	2034	capt_5801	20	720	Rue Gallat	1030		bains publics	
Liedts	370	0,25	119	71	no name			rue gaucheret	1030		exhaure / travaux GC publics ou privés	UH/RBC_01. Système aquifère du quaternaire
Liedts	560	0,25	250	152	capt_5345	8	2500	Chaussée de Haecht	1030	92	salon-lavoir/blanchisserie	UH/RBC_08a Aquifère des sables du Landénien
Liedts	840	0,10	40	1768	capt_5721	480		Place Saint-Lazare	1120		exhaure / travaux GC publics ou privés	Multi-aquifère
Collignon	140	0,65	257	1660	capt_5335	6	1800	Chaussée de Haecht	1030	13	indéterminé	Non renseigné
Collignon	310	0,26	145	78	capt_5209	16	5500	Rue du Pavillon	1030	80	salon-lavoir/blanchisserie	UH/RBC_08a Aquifère des sables du Landénien
Collignon	310	0,26	340	78	capt_5209	16	5500	Rue du Pavillon	1030	80	salon-lavoir/blanchisserie	UH/RBC_08a Aquifère des sables du Landénien
Collignon	350	0,27	461	1673	capt_5336	10	25000	Rue François-Joseph Navez	1030	82	indéterminé	Non renseigné
Collignon	360	0,24	230	160	capt_5376	20	5300	François-Joseph Navezstraat	1030	15	salon-lavoir/blanchisserie	UH/RBC_01. Système aquifère du quaternaire
Riga	240	1,08	231	292	Lavoir Carsen	8	2500	Chaussée de Helmet	1030	88	salon-lavoir/blanchisserie	UH/RBC_08a Aquifère des sables du Landénien
Riga	260	1,07	50	314	Lavoir Helmet	55	20000	Rue Nestor de Tière	1030	96	salon-lavoir/blanchisserie	UH/RBC_08a Aquifère des sables du Landénien
Riga	280	1,13	362	316	Lavoir Slecckx	8	2500	Avenue Slecckx	1030	35	salon-lavoir/blanchisserie	UH/RBC_07b Aquifère des sables et argiles de Moen
Riga	310	1,00	31	320	Initial Textiles nv_1	360	90000	Rue Docteur Elie Lambotte	1030	96	salon-lavoir/blanchisserie	UH/RBC_08a Aquifère des sables du Landénien
Riga	310	1,00	351	320	Initial Textiles nv_1	320	80000	Rue Docteur Elie Lambotte	1030	96	salon-lavoir/blanchisserie	UH/RBC_08a Aquifère des sables du Landénien
Riga	520	0,41	212	1716	capt_1076	50		Avenue Georges Rodenbach	1030	18	indéterminé	Non renseigné
Riga	550	0,85	348	228	capt_5277	18	5500	Chaussée de Haecht	1030	96	indéterminé	UH/RBC_08a Aquifère des sables du Landénien
Riga	590	0,79	457	258	capt_754	70		Henri Jacobsstraat	1030	35	indéterminé	UH/RBC_07. Système aquifère des sables et argiles de Kortrijk
Riga	1090	0,48	413	300	Lavoir Tilleul	8	2500	Rue du Tilleul	1140	35	salon-lavoir/blanchisserie	UH/RBC_04 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele
Tilleul	180	1,15	247	10	308_Hades-Elis	10	3000	Rue du Tilleul	1140	198	indéterminé	UH/RBC_09. Système aquifère des craies du Crétacé et du socle paléozoïque
Tilleul	190	1,28	66	1718	capt_1276			rue edouard stuckens	1140		indéterminé	Non renseigné
Tilleul	210	1,15	45	1691	P2_Hades-Elis	175		rue du tilleul	1140	217	indéterminé	UH/RBC_09. Système aquifère des craies du Crétacé et du socle paléozoïque
Tilleul	590	0,79	457	258	capt_754	70		Henri Jacobsstraat	1030	35	indéterminé	UH/RBC_07. Système aquifère des sables et argiles de Kortrijk
Tilleul	670	0,85	348	228	capt_5277	18	5500	Chaussée de Haecht	1030	96	indéterminé	UH/RBC_08a Aquifère des sables du Landénien
Tilleul	990	0,48	413	300	Lavoir Tilleul	8	2500	Rue du Tilleul	1140	35	salon-lavoir/blanchisserie	UH/RBC_04 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele
Paix	20	1,55	372	94	capt_5240	15	5000	Place de la Paix	1140	13	indéterminé	UH/RBC_04 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele
Paix	200	1,28	66	1718	capt_1276			rue edouard stuckens	1140		indéterminé	Non renseigné
Paix	310	1,10	468	1888	capt_5734	10		Goede Herderstraat	1140		exhaure / travaux GC publics ou privés	UH/RBC_06 Aquifère des sables et argiles de Tiel
Paix	1000	0,37	54	1950	capt_5754	54	6000	Avenue des Anciens Combattants	1140	30	usage tertiaire: arrosage (terrain de sport,...)	UH/RBC_04 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele
Paix	1070	0,34	109	58	capt_3938	104	38000	Avenue des Anciens Combattants	1140	48	piscine (publique ou privée)	UH/RBC_04 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele
Paix	1120	0,30	328	183	capt_5452	80	10000	Eenboomstraat	1140	42	usage tertiaire: arrosage (terrain de sport,...)	UH/RBC_04 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele
Bordet	470	0,72	224	1776	Car Wash Kennedy_2	2	400	Chaussée de Haecht	1130	110	car-wash	UH/RBC_08a Aquifère des sables du Landénien
Bordet	480	0,73	106	287	Car Wash Kennedy_1	2	500	Chaussée de Haecht	1000	30	car-wash	UH/RBC_04 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele
Bordet	490	0,54	81	20	527_B11	11	3000	Rue de Strasbourg	1140	26	indéterminé	UH/RBC_04 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele
Bordet	570	1,10	468	1888	capt_5734	10		Goede Herderstraat	1140		exhaure / travaux GC publics ou privés	UH/RBC_06 Aquifère des sables et argiles de Tiel
Bordet	910	0,32	15	467	puits_OTAN_1	450	15000	Rue de la Fusée	1130	60	usage tertiaire: arrosage, exhaure / travaux GC publics ou privés	UH/RBC_04 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele
Bordet	1080	0,25	249	186	capt_5482	22	5000	Raketstraat	1000	40	usage industriel non alimentaire	UH/RBC_04 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele
Bordet	1300	0,25	464	468	puits_OTAN_2	450	15000	Rue de la Fusée	1130	60	usage tert.: arrosage, exhaure / travaux GC publics ou privés	UH/RBC_04 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele

Tableau 26: Liste des ouvrages de captage présents dans la zone d'influence (modélisation V1) et évaluation du rabattement attendu en exploitation

B. Système d'exploitation géothermique

On peut distinguer deux types de système d'exploitation géothermique de basse énergie :

- Les **systèmes ouverts (ATES : Aquifer Thermal Energy Storage – géothermie sur nappe aquifère)**, ceux-ci extraient ou injectent des calories, après passage (ou non) de l'eau dans une pompe à chaleur ; ceux-ci requièrent une extraction et réinjection d'eau de nappe et pourraient, le cas échéant, être affectés par un rabattement significatif de la nappe;
- Les **systèmes fermés (BTES : Borehole Thermal Energy Storage – géothermie sur sondes)**, ceux-ci extraient ou injectent des calories dans les terrains encaissants, via une boucle fermée, disposée à l'intérieur des puits et au sein de laquelle circule un fluide caloporteur ; ces systèmes fonctionnent par diffusion de chaleur et ne requièrent pas d'échange d'eau avec la nappe.

La figure reprise ci-après présente la localisation des systèmes géothermiques recensés à proximité du tronçon en date du 07/2020 mis en perspective avec la zone d'influence de celui-ci en exploitation (courbes d'isorabattement calculées par modélisation V1). La figure distingue les systèmes ouverts (ATES) en bleu et les systèmes fermés (BTES) en brun.

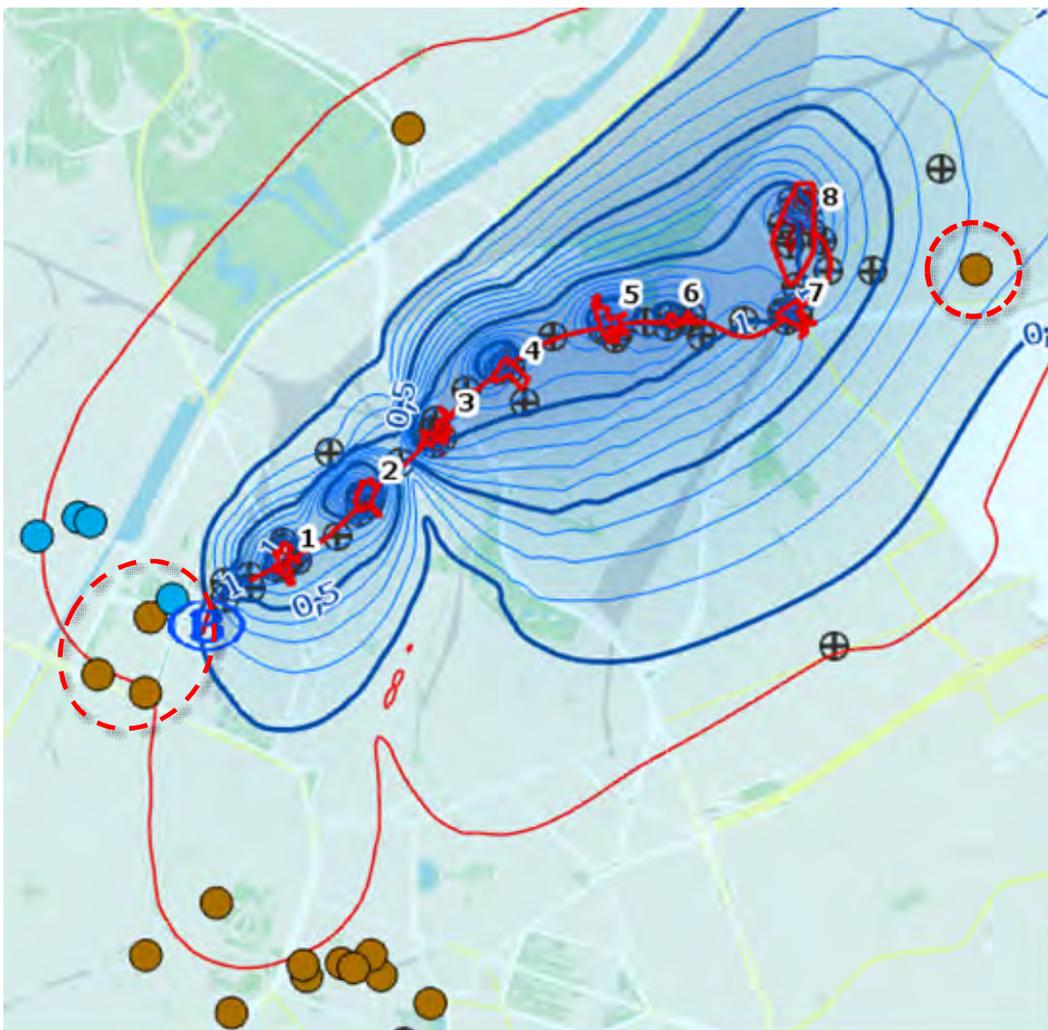


Figure 70 : Localisation des systèmes géothermiques et zone d'influence du drainage en exploitation (modélisation V1, Artesia 2020 sur fond Tractebel)

Un système de type fermé (BTES) est recensé à l'est de la station Bordet à environ 1100 m de celle-ci.

Trois systèmes de type fermé (BTES) sont identifiés à l'ouest de la gare du nord à des distances de 460 m à 900 m de celle-ci. Il s'agit notamment de Pole Star à 460 m et Quatuor Brussels à 750 m de la gare du nord.

Un seul système ouvert (ATES) a été recensé à l'ouest de la gare du nord. Il s'agit du système WTC (Projet ZIN) situés à 310 m de la gare du nord.

L'ensemble des autres systèmes recensés à plus grande distance ne sont pas susceptibles d'être impactés par le présent projet.

C. Bassin d'orage rue du Planeur

Un bassin d'orage situé au droit de la rue du Planeur (voir figure ci-dessous) se trouve au droit du tracé du tunnel.

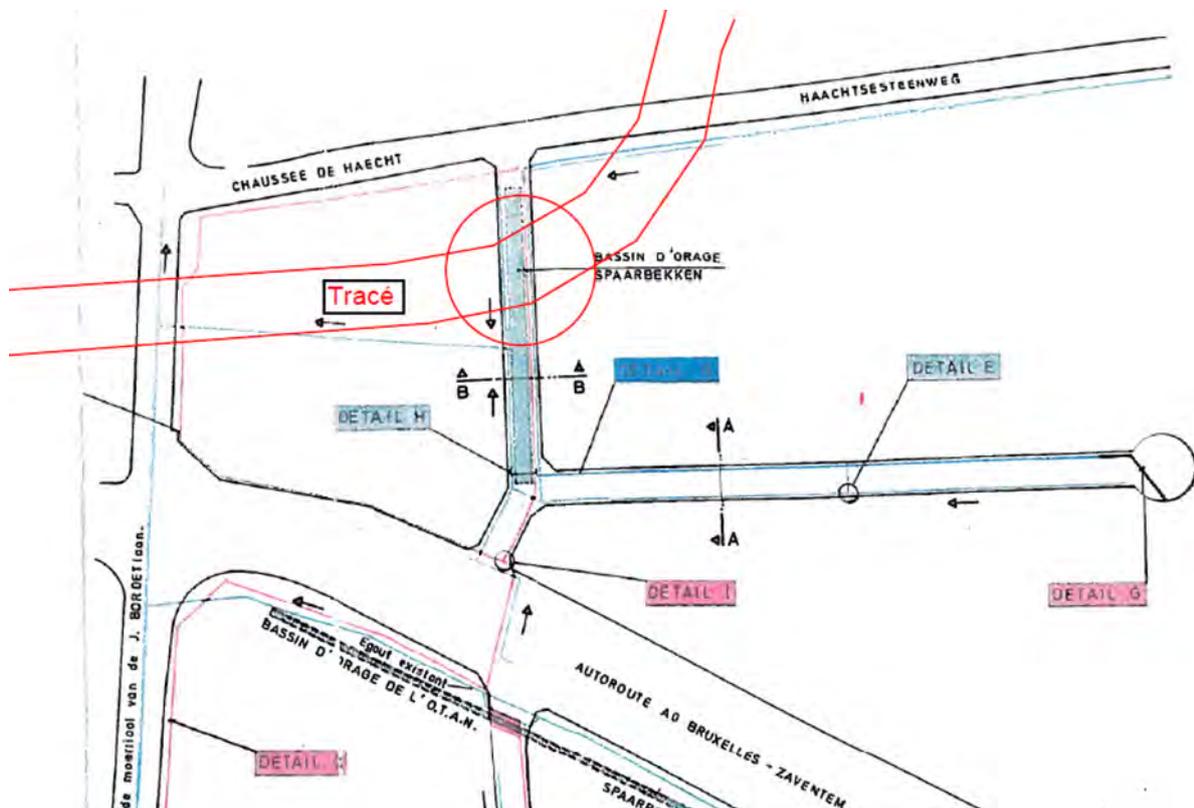


Figure 71 : Localisation du bassin d'orage rue du Planeur (BMN, 2020)

La couverture de sol au-dessus du tunnel au droit de la rue du Planeur est de 16,3 m. Le bassin d'orage est quant à lui situé à 5,70 m de profondeur, La hauteur de sol entre le toit du tunnel et la base du bassin d'orage est de 10,6 m, ce qui correspond à une fois le diamètre du tunnel :

6.4.3.2. Description des couches géologiques traversées par le tunnel

La figure ci-dessous synthétise les niveaux du terrain naturel, de la nappe et du tunnel au droit du tracé du métro.

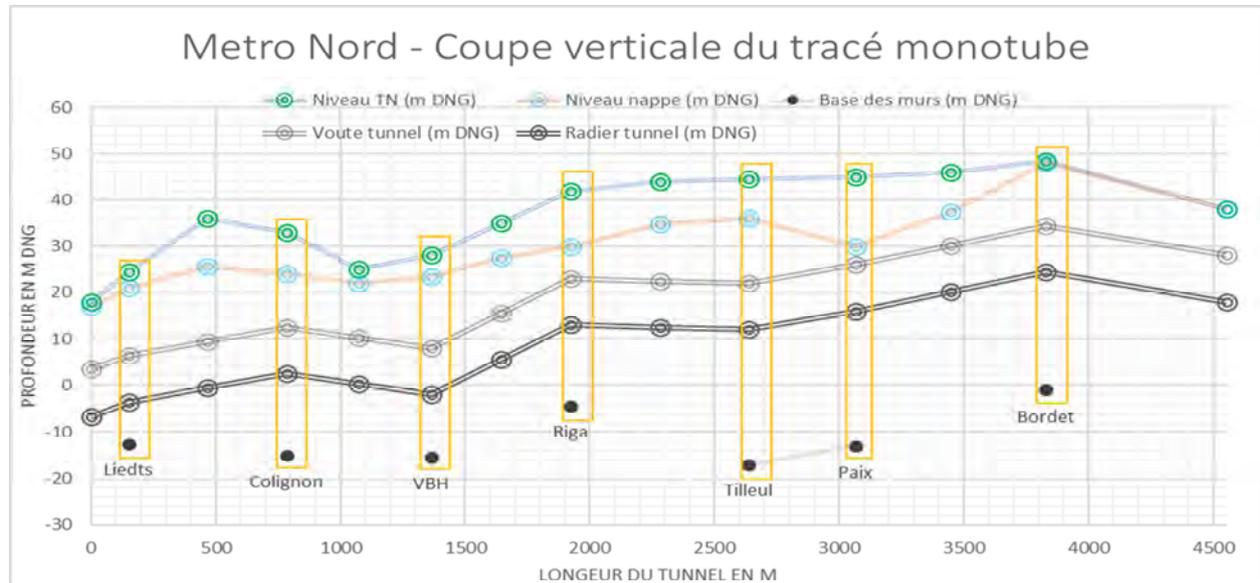


Figure 72: Coupe schématique de la profondeur du tunnel au droit des stations (BMN2020)

Le tunnel est entièrement situé sous le niveau de l'eau souterraine.

Le contexte géologique du tracé le long du tracé du tunnel est illustré à la figure suivante.

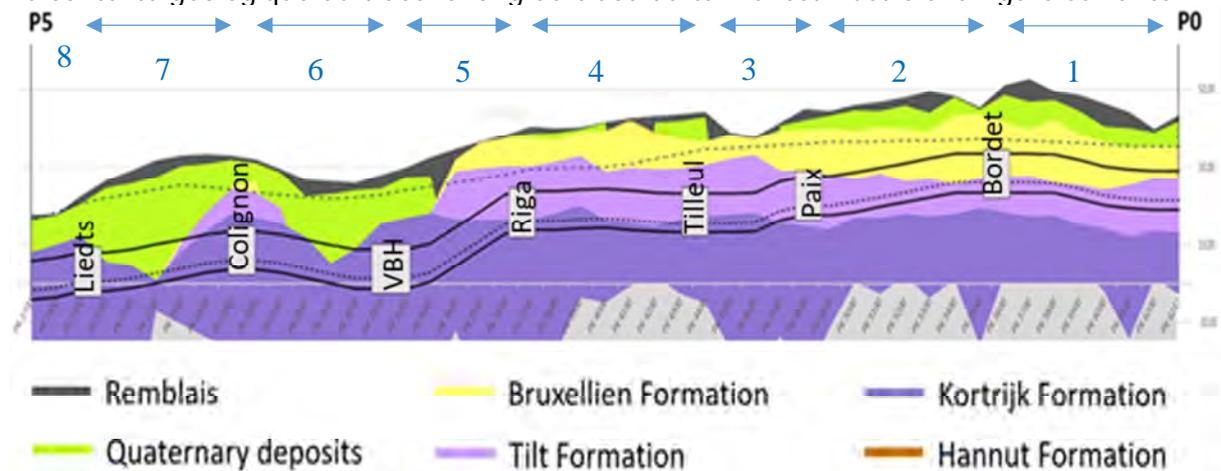


Figure 73 : Synthèse géologique le long du tracé (BMN, 2020)

Au vu de ce contexte, il apparaît que le tunnel traversera les formations suivantes :

- Dépôt du Quaternaires : argiles alluviales, limons, sable et graviers alluviaux.
- Formation de Tiel : dépôts hétérogènes de sables très fins, argileux présentant localement des lentilles d'argile.
- Formation de Bruxelles : sables très fins à grossiers et grès calcaireux.
- Formation de Kortrijk : alternance d'argiles sableuses et de sables argileux (Membres de Aalbeek et de Moen).

La formation de Bruxelles et les dépôts du quaternaire sont des formations relativement perméables. Les autres formations (Tiel et Kortrijk) sont considérées comme étant semi-perméables.

6.4.3.3. Inventaire des incidences potentielles du projet

Les incidences potentielles du projet en matière de sol sont les suivantes :

- La gestion des déblais dans le cadre de la construction d'un tunnel situé à plus de 9m sous une zone urbanisée abritant localement des activités potentiellement polluantes et des pollutions majoritairement superficielles
- Les procédures sol à réaliser pour la mise en œuvre du projet conformément à l'Ordonnance sol ;

Les incidences potentielles du projet en matière d'eaux sont les suivantes :

- Modification de l'écoulement de la nappe phréatique (effet barrage/drainant des ouvrages).

Les incidences potentielles du projet en matière d'impact en surface :

- Risque de tassements au droit du tracé et en périphérie du tunnel ;
- Remplacement des conduites d'eau situées dans la zone d'influence du tunnel (estimé à 30 m de part et d'autre du tunnel) : Toutes les canalisations d'eau en fonte grise doivent être modifiées par des canalisations en acier ou en PEHD (modification à réaliser avant la construction du tunnel car elles sont considérées comme trop fragile). Les autres ouvrages hydrauliques ne nécessitent pas de modification.

6.4.4. Analyse des incidences du projet en situation de référence

6.4.4.1. Incidences sur les eaux souterraines

A. Méthodologie, conditions de modélisation et limitations

Potentiellement, le projet est susceptible d'impacter les eaux souterraines de deux façons :

- Par la présence du revêtement béton du tunnel mais également des boîtes de la station, et particulièrement des parois moulées. Ces éléments peuvent modifier l'écoulement naturels de la nappe et, dans le pire des cas, créer un effet barrage qui pourrait engendrer des remontées de nappe du côté amont.
- Par le rabattement du niveau de la nappe via le réseau de drainage du tunnel et des stations.

L'étude d'incidence sur les eaux souterraines se base sur les résultats de la modélisation hydrogéologique du Métro Nord réalisé par Artesia (Rapport R/19/031 – 15/01/2020) et vise à examiner ces effets potentiels.

L'étude initiale Artesia (Rapport R/19/031) avait plusieurs objectifs :

- Evaluer les incidences du projet sur le niveau piézométrique (suite au drainage permanent des stations et du tunnel et l'effet barrage des ouvrages).
- Evaluer les débits drainés dans les stations mais également par le tunnel.
- Evaluer les tassements induits pas le rabattement de la nappe.

On notera que la mise en place des stations et du tunnel est susceptible de créer potentiellement à sa périphérie des **effets antagonistes qui se superposent** : d'une part

un **rabattement extérieur à l'enceinte** du au drainage à l'intérieur de celle-ci et d'autre part un **effet barrage avec remontée de nappe du côté amont**. Le modèle permet d'évaluer l'effet net résultant de ces deux phénomènes.

Dans cette étude, un modèle hydrogéologique 3D a été réalisé afin de simuler l'effet sur la nappe en conditions d'exploitation (situation équilibrée après chantier).

Deux scénarios ont été simulés par Artesia sur base d'hypothèses de travail différentes :

- Un **scénario V1** – scénario initial et scénario de référence visant à maximaliser l'effet de rabattement et les débits à extraire – pour se faire les valeurs les plus élevées de la perméabilité des parois et de leur horizon d'ancrage (formation de Saint Maur) ont été prises en considération ;
- Un **scénario V2** – scénario visant à maximaliser l'effet de barrage et de remontée susceptible d'apparaître sur la face amont (au sud) du dispositif – pour se faire les valeurs les plus basses de la perméabilité des parois et de leur horizon d'ancrage ont été prises en considération.

La modélisation englobe l'entièreté du projet et se base notamment sur les hypothèses suivantes, pour ce qui concerne le **scénario V1** (scénario de référence) :

- Perméabilité K_h de la formation de Saint-Maur (horizon d'ancrage de la paroi moulée) à 1.10^{-7} m/s (avec une anisotropie de 10 et une valeur de K_v : 1.10^{-8} m/s) ; dans le cas présent ceci impactera uniquement les stations, en effet il n'y a pas de paroi moulée ancrée dans un aquitard au droit direct du tunnel, la progression du tunnelier se faisant sous nappe.
- Perméabilité des parois moulées K_{paroi} à 1.10^{-8} m/s (idem, les parois sont présentes uniquement au niveau des stations uniquement). Il s'agit notamment d'une pratique usuelle recommandée par le CSTC qui a pour but de prendre en compte d'hypothétiques défauts dans la paroi en vue de modéliser les scénarios les plus critiques pour ce qui concerne le débit de pompage et les rabattements périphériques à celle-ci.
- Perméabilité des parois du tunnel, K_{tunnel} à $7,5.10^{-11}$ m/s (résultat d'une étude de sensibilité réalisée par Artesia, qui permet d'obtenir un débit de fuite inférieur à 300 l/h par km de tunnel) ; il s'agit d'une perméabilité équivalente qui prend en compte l'ensemble du dispositif d'étanchéité du tunnel (voussoirs, joints étanches entre voussoirs et injections dans l'espace annulaire).
- Calibration en régime d'équilibre

Comme signalé ci-dessus, ces hypothèses, prises en compte pour le **scénario V1** impliquent certaines limitations au niveau de l'utilisation du modèle et de son interprétation et notamment en ce qui concerne:

- La perméabilité de la formation de Saint-Maur (K_h : 1.10^{-7} m/s) dans laquelle viennent s'ancrer les parois moulées au niveau des stations et la perméabilité des parois moulées (K : 1.10^{-8} m/s), elles-mêmes. Ces valeurs considérées sont :
 - Conservatives vis-à-vis du calcul du rabattement mais également des débits (plus la perméabilité est élevée, plus l'impact du drainage est élevée). Cela permet de simuler le scénario qui maximalise l'estimation du débit à récupérer dans l'enceinte et les rabattements périphériques.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

- Optimistes vis-à-vis de l'impact des effets barrage des ouvrages sur l'écoulement de la nappe. La paroi étant considérée dans la gamme la plus haute de perméabilité, l'évaluation d'un éventuel effet barrage est de facto minimisée.
- La calibration en régime permanent :
 - La zone modélisée se situe dans un contexte urbain extrêmement complexe qui ne permet pas facilement de calibrer le modèle en régime transitoire.
 - Les simulations réalisées dans le modèle ne permettent d'obtenir que les résultats pour une situation à l'équilibre, cela signifie qu'il n'est pas possible de connaître l'évolution des rabattements et des débits dans le temps mais uniquement de connaître l'état final (après stabilisation des niveaux en régime d'exploitation).

Afin d'étudier l'effet de barrage potentiel et l'intensité des remontées de nappe côté amont dans les conditions les plus critiques, un **scénario V2**, mis en œuvre dans le cadre d'un modèle complémentaire a pris en compte les hypothèses de travail suivantes, différant des précédentes:

- La perméabilité de la formation de Saint-Maur a été abaissée de 3 ordres de grandeur, soit $K_h : 1.10^{-10}$ m/s et $K_v : 1.10^{-11}$ m/s. Ce choix repose sur une série d'essais de perméabilité réalisés par Sweco, sur la formation de Saint Maur (et notamment les horizons supérieurs d'ancrage, FmKo01). Comme l'illustre la figure ci-après, la perméabilité verticale, K_v , de ces terrains varie, pour toute sa gamme, de 1.10^{-11} m/s à 3.10^{-7} m/s (moyenne géométrique : 5.10^{-9} m/s). La valeur la plus faible et donc la plus critique de la distribution a été prise en compte, soit $K_v : 1.10^{-11}$ m/s. Tenant compte, comme usuellement d'un facteur d'anisotropie K_h/K_v de 10, une valeur de $K_h : 1.10^{-10}$ m/s a aussi été prise en compte, un tel choix place cette simulation du côté le plus sécuritaire pour l'examen de l'effet barrage

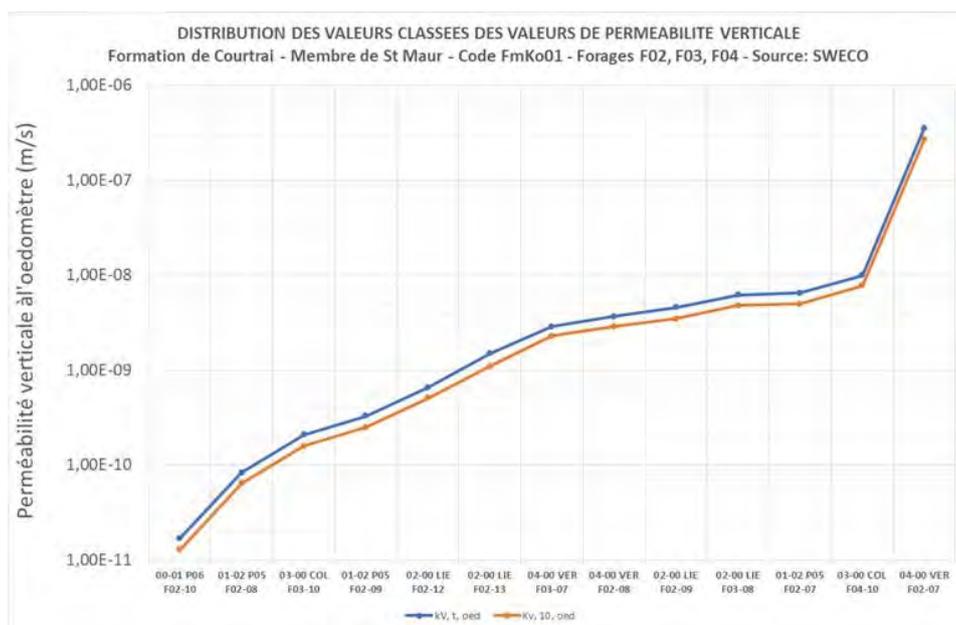


Figure 74 : Distribution des valeurs classées de perméabilité du haut de la formation de Saint-Maur (FmKo01, données BMN 2020)

- La perméabilité des parois pour la réalisation des stations a aussi été abaissée de 3 ordres de grandeur, soit $K : 1.10^{-11}$ m/s sans anisotropie ; il s'agit de valeurs de perméabilités très basses mais néanmoins réalistes si les parois ne comportent pas de défaut lors de leur exécution (jonctions, retraits, ...) ; on notera que le choix de valeurs plus basses n'aurait pas de sensibilité sur les résultats de la modélisation
- La perméabilité des parois du tunnel n'a pas été modifiée et est restée à $7,5.10^{-11}$ m/s sans anisotropie

B. Résultats de la modélisation V1 – maximalisation des débits et de l'effet de rabattement

Comme introduit ci-dessus, les enseignements décrits dans cette section prennent en compte des hypothèses qui **maximalisent les débits de transfert à travers les parois ainsi que les débits de contournement** sous celles-ci. De facto, les **effets périphériques et extérieurs sont aussi les plus élevés en terme de rabattement**. Ce cas de figure est susceptible de représenter la situation la plus sécuritaire pour ces aspects.

Les résultats de l'étude Artesia sont les suivants pour ce qui concerne les débits drainés par section de tunnel et par station:

- Les débits drainés par les section du tunnel sont repris dans le tableau ci-dessous :

	Longueur [km]	m³/h	m³/j	m³/an	l/h/km
Tunnel Gare du Nord - Liedts	0.194	0.074	1.8	650	382
Tunnel Liedts - Colignon	0.508	0.175	4.2	1 530	345
Tunnel Colignon - Verboekhoven	0.466	0.140	3.4	1 230	300
Tunnel Verboekhoven - Riga	0.430	0.130	3.1	1 140	303
Tunnel Riga - Tilleul	0.604	0.170	4.1	1 490	282
Tunnel Tilleul - Paix	0.315	0.080	1.9	700	254
Tunnel Paix - Bordet	0.637	0.160	3.8	1 400	251
Tunnel Bordet - Dépôt	0.620	0.160	3.8	1 400	258
TOTAL	3.773	1.089	26	9 500	289

Tableau 27 : Synthèse des débits drainés par les sections du tunnel (Artesia, 2020)

- Les débits drainés par les stations sont repris dans le tableau ci-dessous :

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

	m ³ /h	m ³ /j	m ³ /an
Liaison Gare du Nord	3.1	70	27 200
LIEDTS	4.4	110	38 500
COLIGNON	4.9	120	42 900
VERBOEKHOVEN	6.6	160	57 800
RIGA	3.3	80	28 900
TILLEUL	3.8	90	33 300
PAIX	3.6	90	31 500
BORDET	3.1	70	27 200
DÉPÔT D'HAREN	4.1	100	35 600
TOTAL	36.9	890	320 000

Tableau 28 : Synthèse des débits drainés par les stations V1 (Artesia, 2020)

Ces données sont illustrées dans les figures suivantes :

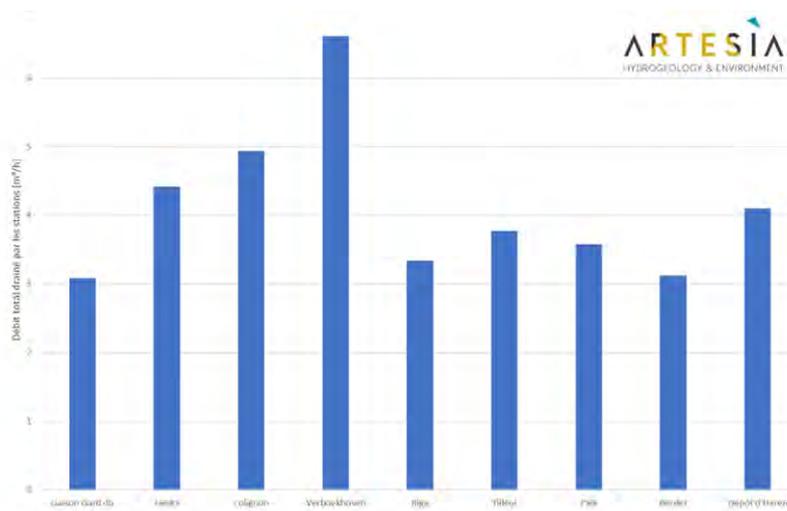


Figure 75: Distribution des débits totaux drainés au niveau des stations (Artesia, 2020)

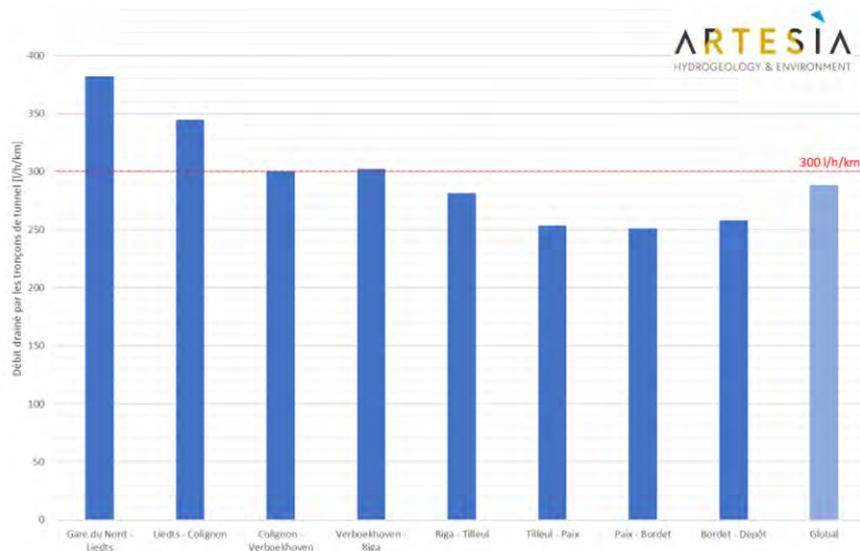


Figure 76: Distribution des débits spécifiques (l/h.km) par tronçon de tunnel (Artesia, 2020)

- Selon cette modélisation en régime d'équilibre, Le débit total drainé par l'ouvrage l'ensemble du dispositif (tunnels + stations) serait de l'ordre $38 \text{ m}^3/\text{h}$; la partie dominante, soit 97% (@ $37 \text{ m}^3/\text{h}$) est serait due aux stations ;, quant au rabattement dû à l'ensemble des tunnels, il correspond à seulement 3% (@ $1 \text{ m}^3/\text{h}$) du débit total drainé.
- L'impact du drainage permanent du tunnel est et des stations sur la piézométrie est illustré à la figure ci-dessous. Cette figure reprend l'estimation des rabattements en mètre pour l'ensemble du projet en situation définitive (en exploitation). Par rabattement on entend ici la différence entre le niveau statique initial et le niveau atteint en drainage, à l'équilibre, après construction du dispositif.

A titre indicatif, le débit total à traiter par jour correspond par comparaison au volume d'eau de la piscine Neptunium à Schaerbeek.



Figure 77 : Impact du drainage permanent du tunnel et des stations sur le niveau piézométrique – carte des rabattements (V1) (Artesia, 2020)

La modélisation a mis en évidence que les rabattements maximum (à l'extérieur des murs emboués) sont contigus aux bordures des stations (sur la face extérieure de ces murs).

Le tableau et la figure ci-après présentent les rabattements maximum modélisés sur le bord aval (nord) et sur le bord amont des stations (sud), et notamment les altimétries du terrain naturel, le niveau statique, les niveaux rabattus à l'intérieur et en périphérie des boîtes et la base des murs emboués (niveau d'ancrage).

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

	TN (m DNG)	Niveau statique (m DNG)	Objectif niveau rabattu intrastation (m DNG)	Rabattement intrastation (m)	Base des murs (m DNG)	Rabattement face aval (Nord) (m)	Rabattement face amont (Sud) (m)	Niveau rabattu face aval (m DNG)	Niveau rabattu face amont (m DNG)	Réserve non saturée (m)
	BMN	BMN	BMN	BMN	BMN	ARTESIA/INIT	ARTESIA/INIT	BMN/ARTESIA/INIT	BMN/ARTESIA/INIT	
Laison gre Nrd						1,30	0,60			
Liedts	24,50	21,13	-0,75	21,88	-12,50	1,80	1,40	19,33	19,73	4,77
Colignon	33,00	24,03	0,40	23,63	-15,00	2,00	1,30	22,03	22,73	10,27
Verboekhoven	28,00	23,50	-3,45	26,95	-15,50	1,80	1,40	21,70	22,10	5,90
Riga	42,00	29,94	10,40	19,54	-4,40	3,00	1,20	26,94	28,74	13,26
Tilleul	44,50	35,95	13,50	22,45	-17,00	2,50	1,10	33,45	34,85	9,65
Paix	45,00	29,94	15,00	14,94	-13,00	2,10	1,50	27,84	28,44	16,56
Bordet	48,50	48,00	20,70	27,30	-1,00	2,10	0,50	45,90	47,50	1,00
Dépôt Haren						1,50	1,50			

Tableau 29 : Synthèse des niveaux avant et après rabattement (V1) (sur base Artesia et BMN, 2020)

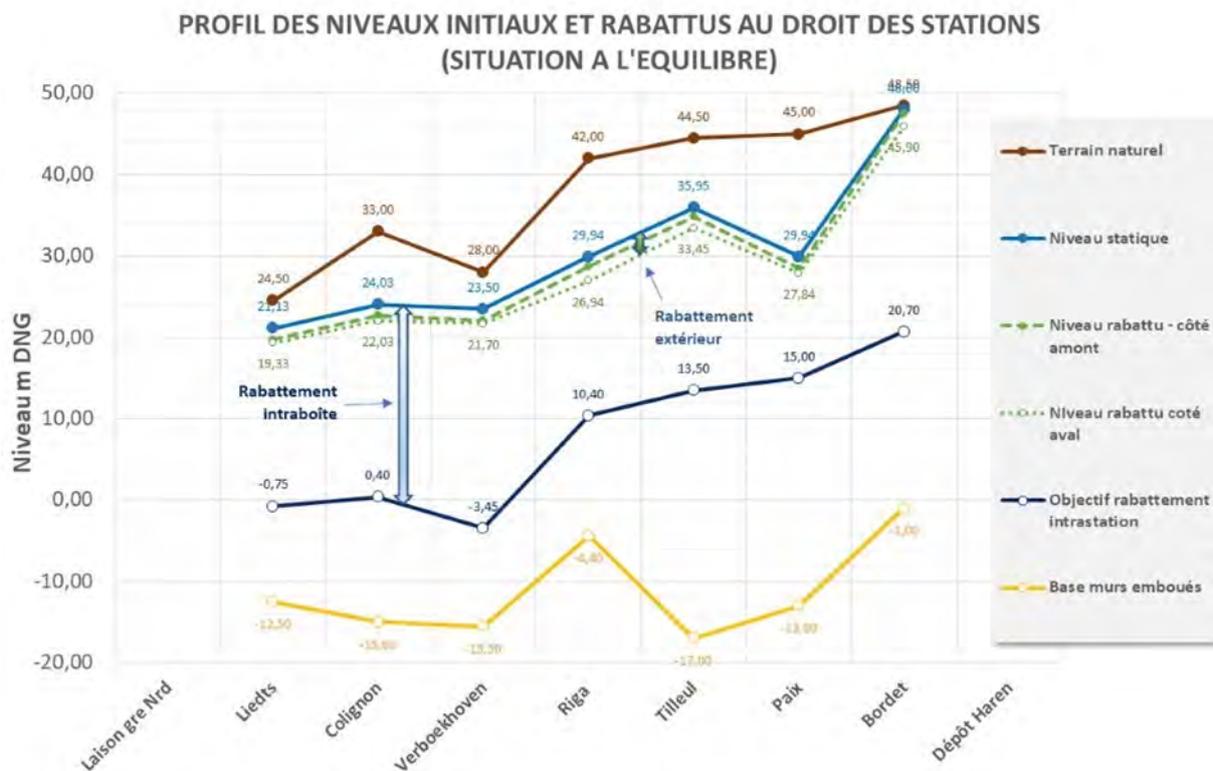


Figure 78: Profil des niveaux de nappe avant et après rabattement au droit des stations (V1) (sur base Artesia et BMN 2020)

On remarque, sur base de la carte isorabattement ci-avant, une dissymétrie dans la géométrie des cônes de rabattement. L'impact en termes de rabattement est plus élevé du côté nord (aval) avec, de plus, un gradient (pente de la nappe) plus élevé ; alors que du côté sud (amont)

l'impact est moins marqué et le gradient est plus plat. Mis à part pour le dépôt de Haren, le différentiel entre les niveaux amont et aval oscille entre 0,4 et 1,8 m. Cet effet est la conséquence de l'effet conjugué de la présence d'un axe drainant majeur au Nord du tracé (Vallée de la Senne à l'aval des ouvrages) et d'un effet barrage au Sud vers l'amont des ouvrages.

Le rabattement à l'intérieur des boîtes pour la mise hors eau des travaux oscille entre 15 m (Paix) et 27 m (Bordet) en situation d'équilibre. Les rabattements induits à l'extérieur des boîtes sont susceptibles quant à eux d'osciller entre 1,3 m (liaison gare du nord) et 3 m (Riga) pour la face nord des stations (aval) et entre 0,6 m (liaison gare du nord) et 1,5 m (Paix) pour la face sud (amont).

La simulation permet de mettre en évidence, comme le montre la figure ci-après et pour les hypothèses considérées (scénario V1) que l'effet conjugué rabattement / barrage ne donnerait lieu à aucune remontée de nappe notamment du côté amont des stations, en d'autres termes, les niveaux en périphérie des stations seraient toujours inférieurs aux niveaux statiques initiaux et le projet ne serait pas susceptible d'induire un risque de submersion complémentaire par rapport à la situation initiale pour ces hypothèses du scénario V1 (la situation sera évaluée en modélisation V2 ci-dessous en conditions de maximalisation de l'effet barrage).

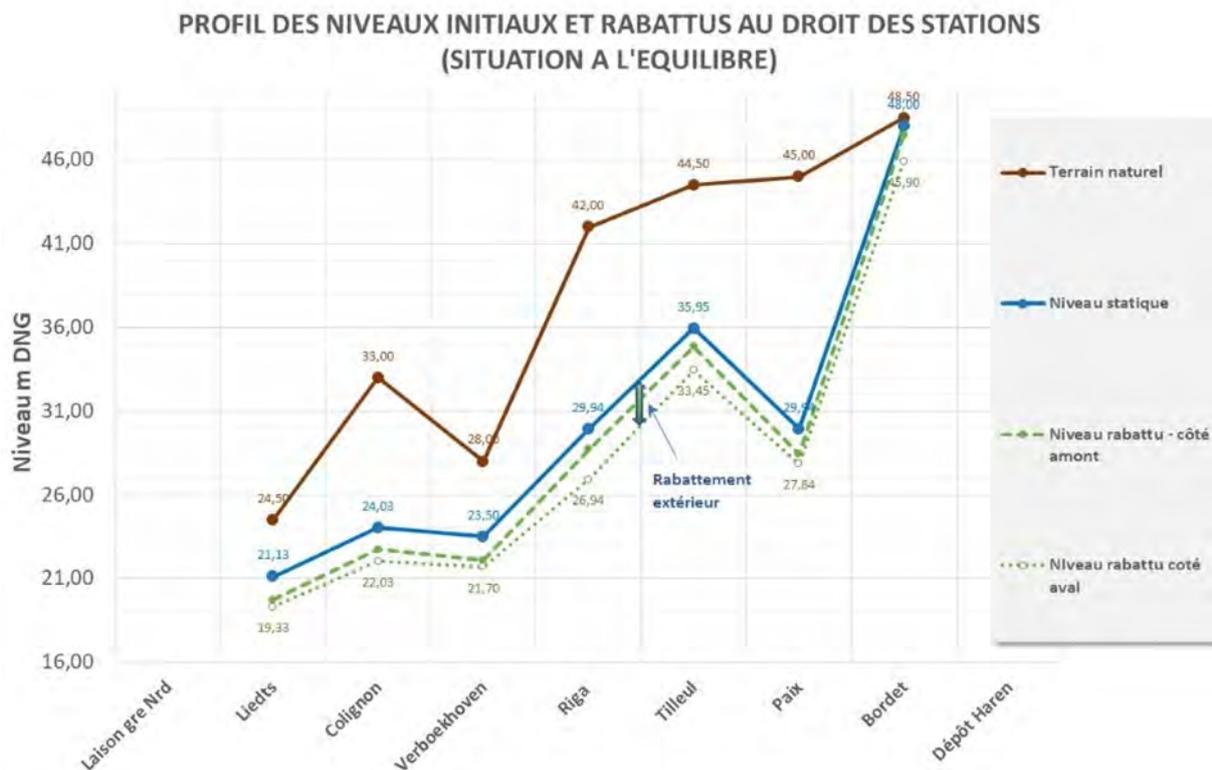


Figure 79: Profil des niveaux de nappe avant et après rabattement au droit des stations – zoom partie supérieure (V1) (sur base Artesia et BMN 2020)

On observe cependant que la réserve non saturée (hauteur hors nappe entre le toit de la nappe et le niveau du sol) apparaît peu importante essentiellement au niveau de la station Bordet. Considérant un niveau statique à la cote 48 m et un rabattement de 0,5 m du côté amont, la nappe est susceptible de se stabiliser à la cote 47,5 m soit à peine 1 m sous le niveau du sol estimé à 48,5 m (en rappelant que cette réserve n'est déjà que de 0,5 m en régime

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

statique initial, selon les données disponibles). On notera cependant une différence des niveaux enregistrés initialement dans cette zone selon les sources consultées. Ce point devra faire l'objet d'une attention particulière lors de l'étude de projet pour éviter toute submersion dans cette zone. Pour ce qui concerne les autres stations la réserve non saturée, contiguë au flanc nord des stations (côté amont), varie après projet entre 4,8 m pour la station Liedts à 16,6 m pour la station Paix selon ce scénario V1 (sans maximisation de l'effet barrage).

En ce qui concerne, les tronçons de tunnel situés entre les stations l'effet de rabattement y est beaucoup moins marqué vu l'absence de parois moulées ancrées dans l'aquitard sous-jacent :

- D'une part, une partie du débit transitant s'écoulant vers le nord-ouest peut passer plus facilement sous le tunnel ;
- D'autre part, la perméabilité des parois du tunnel considérée pour le calcul est de $7,5 \cdot 10^{-11}$ m/s alors que la perméabilité des parois moulées au droit des stations a été posée à $1 \cdot 10^{-8}$ m/s (recommandation CSTC) pour évaluer les rabattements dans un contexte plus conservatif ; de facto, le débit de fuite susceptible d'être récupéré par les tunnels est nettement inférieur à celui des stations ($1 \text{ m}^3/\text{h}$ par rapport à $37 \text{ m}^3/\text{h}$, voir ci-dessus) et les cônes de dépression sont beaucoup moins marqués au droit des tronçons de tunnel que par rapport aux stations elles-mêmes susceptibles de capter des débits plus importants

En ce qui concerne, les effets de barrage du côté amont (sud) la modélisation a montré que les tronçons de tunnel ne sont pas susceptibles, pour les hypothèses considérées, de donner lieu une remontée de nappe par rapport à la situation initiale même si l'effet de rabattement est moindre qu'au niveau des stations elles-mêmes. Cette conclusion est valable selon les conditions de modélisation V1 qui n'avaient pas pour but de maximaliser l'effet de barrage. Les situations extrêmes sont examinées dans la section qui traite de la modélisation en conditions V2 ci-dessous.

La figure suivante illustre la situation pour les tronçons Colignon – Verboekhoven – Riga. Ainsi à titre d'exemple le rabattement en situation médiane entre Colignon et Verboekhoven est de l'ordre de 0,5 m (en raison du collecteur du Maelbeek) et en situation médiane entre Verboekhoven et Riga est de l'ordre de 1,1 m. Un rabattement net se fait donc encore sentir vers l'amont.

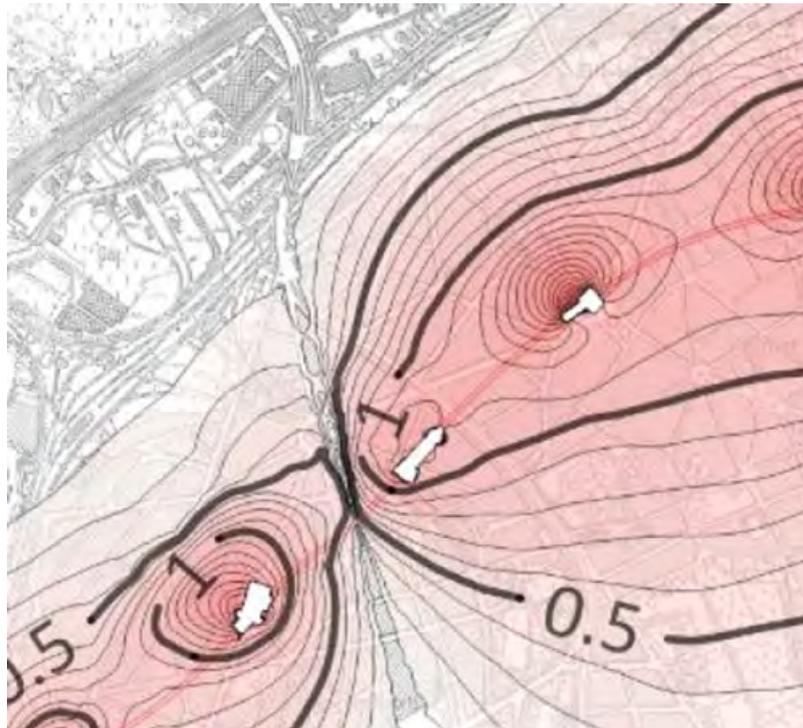


Figure 80: Courbes isorabattement pour le tronçon Colignon – Verboekhoven – Riga (V1) (Artesia, 2020)

En ce qui concerne l'extension des zones de rabattement on peut considérer les distances approximatives suivantes pour ce qui concerne leur extension maximale transversalement au tronçon :

Vers l'amont (sud-est) :

- La courbe isorabattement de 1 m est située à environ 400 m du tronçon
- La courbe isorabattement de 0,5 m est située à environ 1000 m du tronçon
- La courbe isorabattement de 0,1 m est située à environ 2000 m du tronçon

Vers l'aval (nord-ouest) :

- La courbe isorabattement de 1 m est située à environ 300 m du tronçon
- La courbe isorabattement de 0,5 m est située à environ 800 m du tronçon
- La courbe isorabattement de 0,1 m est située à environ 1200 m du tronçon

Ces résultats ne sont pas applicables à la phase chantier des stations puisqu'ils ne prennent pas en compte le phasage de réalisation.

Résultats de la modélisation V2 – maximalisation de l'effet barrage Comme introduit ci-dessus, les enseignements décrits dans cette section prennent en compte des hypothèses qui minimisent les débits de transfert à travers les parois ainsi que les débits de contournement sous celles-ci. De facto, les effets périphériques et extérieurs sont aussi les plus élevés en termes de barrage pour ce qui concerne la partie amont du dispositif. Ce cas de figure est susceptible de représenter la situation la plus sécuritaire pour l'examen des effets de barrage.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

Les résultats de l'étude Artesia complémentaire (Artesia Rev = V2) sont repris ci-après pour ce qui concerne les débits drainés par section de tunnel et par station. Ces résultats sont mis en perspective avec les résultats de la modélisation de référence V1 (Artesia Ini).

		ARTESIA INI	ARTESIA REV	ARTESIA INI	ARTESIA REV	ARTESIA INI	ARTESIA REV	ARTESIA INI	ARTESIA REV
	L	Qt	Qt	Qt	Qt	Qt	Qt		Qsp
	Longueur	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /j	m ³ /j	m ³ /an	m ³ /an		l/h.km
Tunnel gare du N-Liedts	0,194	0,074	0,079	1,8	1,9	650	690	382	408
Tunnel Liedts-Colignon	0,508	0,175	0,178	4,2	4,3	1530	1560	345	351
Tunnel Colignon-Verboekhoven	0,466	0,14	0,15	3,4	3,6	1230	1310	300	322
Tunnel Verboekhoven-Riga	0,43	0,13	0,14	3,1	3,4	1140	1230	303	326
Tunnel Riga-Tilleul	0,604	0,17	0,19	4,1	4,6	1490	1660	282	315
Tunnel Tilleul-Paix	0,315	0,08	0,09	1,9	2,2	700	790	254	285
Tunnel Paix-Bordet	0,637	0,16	0,17	3,8	4,1	1400	1490	251	267
Tunnel Bordet Dépôt	0,62	0,16	0,17	3,8	4,3	1400	1580	258	290
TOTAL	3,773	1,089	1,177	26	28,2	9500	10300	289	312

Tableau 30: Synthèse des débits drainés par les sections du tunnel (V1 ini et V2 rev) (d'après Artesia, 2020)

	ARTESIA INI	ARTESIA REV	ARTESIA INI	ARTESIA REV	ARTESIA INI	ARTESIA REV	ARTESIA INI	ARTESIA INI	ARTESIA REV	ARTESIA REV
	Qt	Qt	Qt	Qt	Qt	Qt	Qtatéral	Qbasal	Qtatéral	Qbasal
	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /j	m ³ /j	m ³ /an	m ³ /an	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h
Laison gre Nrd	3,1	0,003	70	0,07	27200	26	2,5	0,6	0,003	0,000
Liedts	4,4	0,005	110	0,12	38500	43	4,2	0,2	0,005	0,000
Colignon	4,9	0,006	120	0,14	42900	51	4,7	0,2	0,006	0,000
Verboekhoven	6,6	0,007	160	0,17	57800	63	6,4	0,2	0,006	0,001
Riga	3,3	0,004	80	0,1	28900	36	2,6	0,8	0,004	0,001
Tilleul	3,8	0,004	90	0,1	33300	38	3,1	0,6	0,004	0,000
Paix	3,6	0,005	90	0,11	31500	41	2,7	0,9	0,004	0,001
Bordet	3,1	0,003	70	0,08	27200	29	2,4	0,7	0,003	0,000
Dépôt Haren	4,1	0,005	100	0,11	35600	41	2,8	1,3	0,004	0,001
TOTAL	36,9	0,042	890	1,01	320000	368	31,4	5,5	0,038	0,004

Tableau 31: Synthèse des débits drainés par les stations (V1 ini et V2 rev) (d'après Artesia, 2020)

La figure reprise ci-après présente une comparaison des débits de drainage totaux estimés selon les deux scénarios.

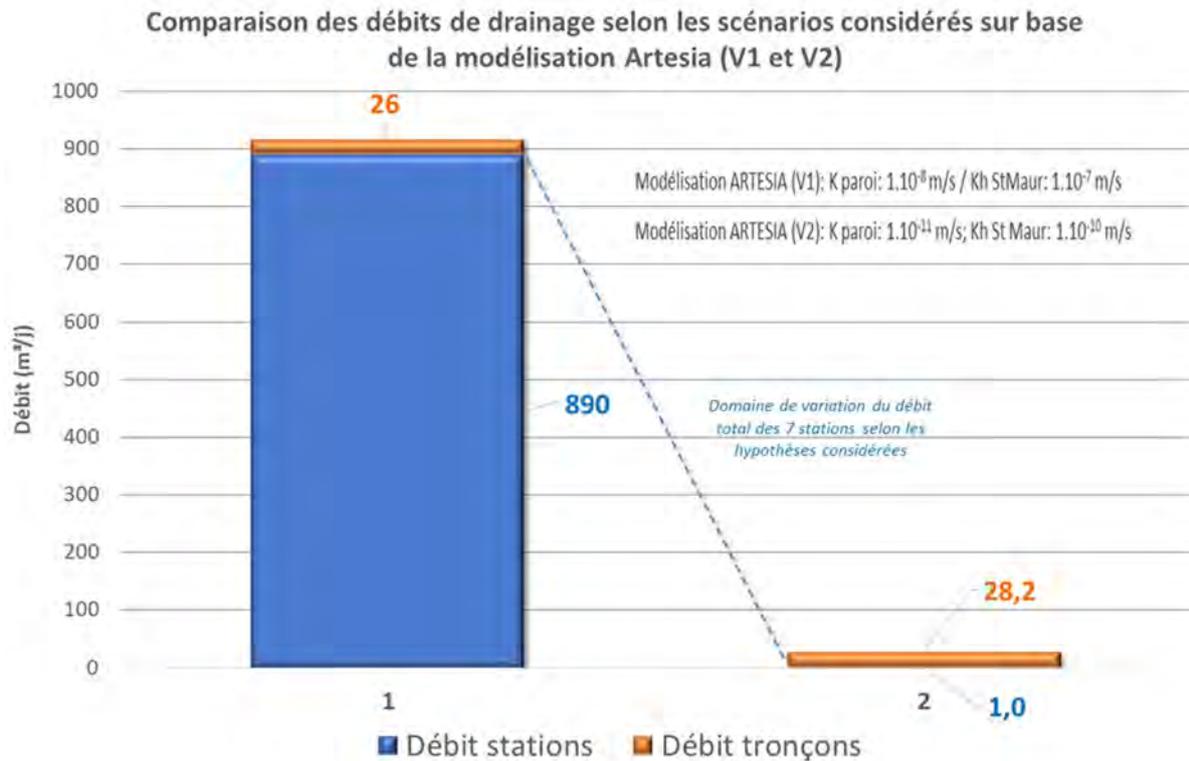


Figure 81: Comparaison des débits totaux de drainage en scénario V1 et V2 (d'après Artesia, 2020)

Il apparaît, comme attendu, qu'en prenant en compte des hypothèses de perméabilité diminuée tant au niveau des parois que de l'horizon de St Maur, que le débit total drainé au niveau du dispositif diminuerait drastiquement de $916 \text{ m}^3/\text{j}$ à $29,2 \text{ m}^3/\text{j}$. On observe que l'impact se fait sentir uniquement pour les stations dont le débit total drainé passerait de $890 \text{ m}^3/\text{j}$ en V1 à $1 \text{ m}^3/\text{j}$ en V2 alors que le débit des tunnels resterait quasiment inchangé (il passe de $26 \text{ m}^3/\text{j}$ en V1 à $28,2 \text{ m}^3/\text{j}$ en V2).

En V2, au niveau des stations, la majeure partie du faible débit entre toujours par les parois latérales ($0,91 \text{ m}^3/\text{j}$) alors que l'apport de fond est quasiment marginal ($0,1 \text{ m}^3/\text{j}$). On observe par ailleurs une inversion des tendances, puisqu'en scénario V2, ce sont donc les tronçons de tunnel qui contribuent de manière dominante au drainage du dispositif ($28,2 \text{ m}^3/\text{j} > 1 \text{ m}^3/\text{j}$), ceci vu l'étanchéité élevée considérée pour les stations.

La réalité en opération est donc susceptible de s'équilibrer quelque part entre les deux scénarios. Le dispositif de reprise des eaux doit être dimensionné selon les conditions maximalistes du scénario V1 ($Q_{\text{total}} : 916 \text{ m}^3/\text{j}$) mais le débit réellement extrait est susceptible d'être observé dans la gamme intermédiaire (entre 1000 et $30 \text{ m}^3/\text{j}$). Le débit d'équilibre sera fonction de la perméabilité équivalente des parois et d'éventuels défauts d'étanchéité lors de son exécution mais aussi de la variation de la perméabilité de l'horizon de St Maur.

En ce qui concerne l'impact sur la piézométrie en conditions d'étanchéité maximale (V2) il est illustré à la figure ci-dessous. Cette figure reprend l'estimation des rabattements (en rouge) ou remontées (en vert) pour l'ensemble du projet en situation définitive (en exploitation).

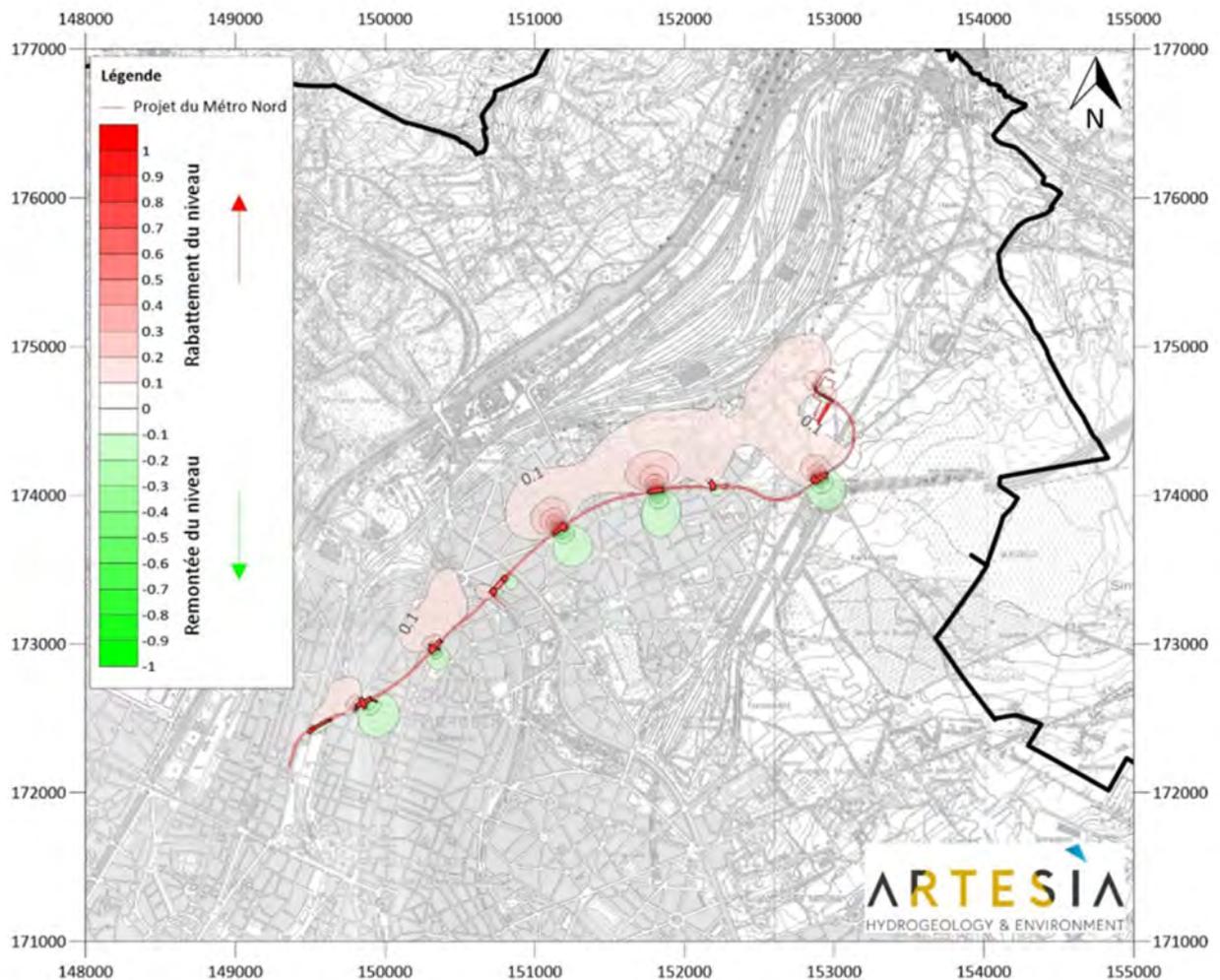


Figure 82: Impact du drainage permanent du tunnel et des stations sur le niveau piézométrique – carte des rabattements (V2) – (Artesia, 2020)

Cette carte du scénario V2 est à comparer à la carte du scénario V1 de la Figure 37. Les effets sont les plus élevés en situation contiguë aux stations. Les effets entre station apparaissent quant à eux marginaux. On note une descente des niveaux piézométriques dus au rabattement du côté aval (au nord) alors qu'un effet de remontée du à l'effet barrage est observé du côté amont (au sud).

Le tableau et la figure ci-après présentent pour les scénarios V1 et V2, les rabattements maximum modélisés sur le bord aval (nord) et sur le bord amont des stations (sud), ainsi que les altimétries du terrain naturel, le niveau statique, les niveaux rabattus à l'intérieur des murs emboués, ainsi que les niveaux d'ancrage.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

Stations	Données de base					Scénario V1					Scénario V2				
	TN (m DNG)	Niveau statique (m DNG)	Objectif niveau rabattu intra station (m DNG)	Rabattement intra station (m)	Base des murs (m DNG)	Rabattement face aval (Nord) (m)	Rabattement face amont (Sud) (m)	Niveau rabattu face aval (m DNG)	Niveau rabattu face amont (m DNG)	Réserve non saturée (m)	Rabattement face aval (Nord) (m)	Rabattement face amont (Sud) (m) = remontée	Niveau rabattu face aval (m DNG)	Niveau rabattu face amont (m DNG)	Réserve non saturée (m)
	BMN	BMN	BMN	BMN	BMN	ARTESIA INIT	ARTESIA INIT	BMN/ARTESIA INIT	BMN/ARTESIA INIT		ARTESIA COMP	ARTESIA COMP	BMN/ARTESIA COMP	BMN/ARTESIA COMP	
Liaison gre Nrd						1,30	0,60				0,30	-0,20			
Liedts	24,50	21,13	-0,75	21,88	-12,50	1,80	1,40	19,33	19,73	4,77	0,60	-0,50	20,53	21,63	2,87
Colignon	33,00	24,03	0,40	23,63	-15,00	2,00	1,30	22,03	22,73	10,27	0,50	-0,70	23,53	24,73	8,27
Verboekhoven	28,00	23,50	-3,45	26,95	-15,50	1,80	1,40	21,70	22,10	5,90	0,20	-0,30	23,30	23,80	4,20
Riga	42,00	29,94	10,40	19,54	-4,40	3,00	1,20	26,94	28,74	13,26	1,10	-0,70	28,84	30,64	11,36
Tilleul	44,50	35,95	13,50	22,45	-17,00	2,50	1,10	33,45	34,85	9,65	1,00	-0,70	34,95	36,65	7,85
Paix	45,00	29,94	15,00	14,94	-13,00	2,10	1,50	27,84	28,44	16,56	0,30	-0,30	29,64	30,24	14,76
Bordet	48,50	48,00	20,70	27,30	-1,00	2,10	0,50	45,90	47,50	1,00	0,80	-0,70	47,20	48,70	-0,20
Dépôt Haren						1,50	1,50				0,50	-0,20			

Figure 83: Synthèse des niveaux après et avant rabattement en scénarios V1 et V2 (sur base Artesia et BMN, 2020)

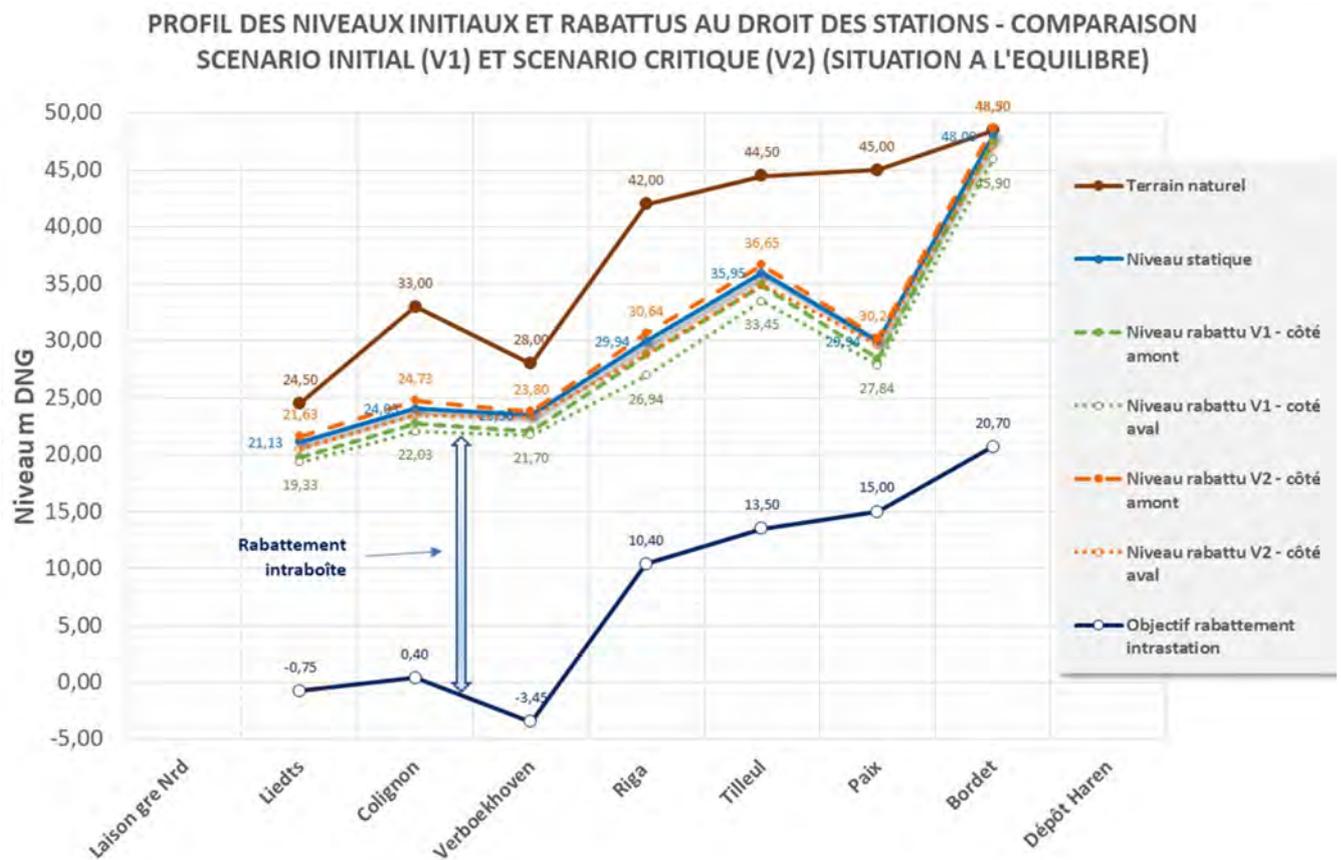


Figure 84: Profil des niveaux de nappe avant et après rabattement au droit des stations – comparaison V1 et V2 – (sur base Artesia et BMN, 2020)

La figure suivante reprend un zoom de la précédente uniquement sur les niveaux de nappe.

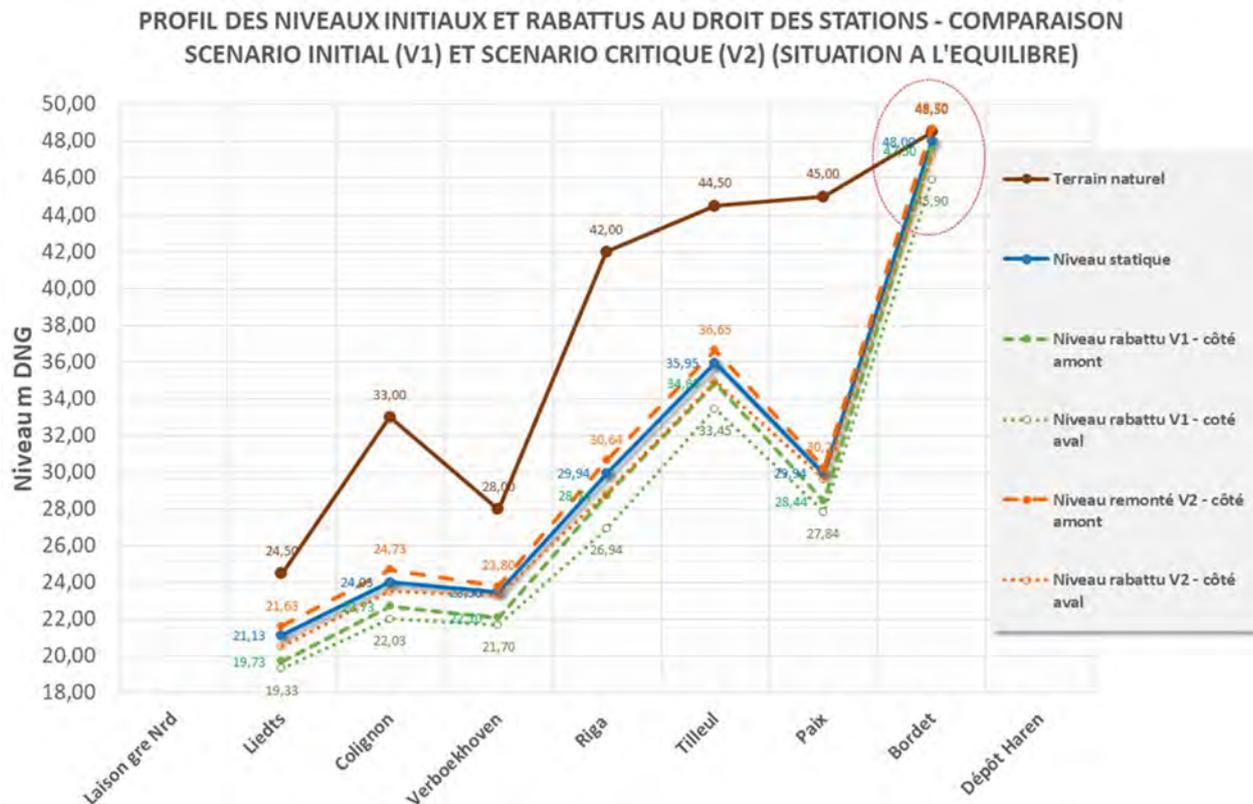


Figure 85: Profil des niveaux de nappe avant et après rabattement au droit des stations – comparaison V1 et V2 – zoom - (sur base Artesia et BMN, 2020)

Contrairement au scénario V1 qui ne donnait lieu à aucune remontée par rapport au niveau statique initial, la mise en œuvre du scénario V2 permettant de maximaliser l'effet barrage met en évidence l'existence d'un rabattement du côté aval (nord) et cette fois **d'une remontée de nappe du côté amont (sud)**. Les ordres de grandeur de cette remontée restent cependant **très modérés**, ils varient de 0,3 m (Paix, Verboekhoven) à 0,7 m (Colignon, Riga, Tilleul, Bordet).

L'effet de barrage / remontée n'apparaît qu'au niveau des stations, il a tendance à se dissiper latéralement vu que les tronçons de tunnel n'ont pas tendance à créer de barrage significatif (passage libre de la nappe sous les tunnels). On notera aussi que dans ce cas de figure (V2) l'effet de rabattement du côté aval (nord) serait de moindre importance qu'en scénario V1 vu que les débits de drainage sont drastiquement réduits. Le rabattement dans ce cas varierait entre 0,3 m (Paix) et 1,1 m (Riga).

On notera aussi que dans ce cas de figure V2, l'extension des effets à distance du dispositif sont de moins grandes ampleurs que dans le scénario V1. A titre indicatif, pour la station Tilleul qui montre les influences les plus distantes :

- Pour ce qui concerne la descente en situation aval (nord), un rabattement de 0,1 m était observé jusqu' à 1000 m vers le nord en V1 alors qu'en V2 cette distance d'influence est réduite à environ 500 m
- Pour ce qui concerne la remontée en situation amont (sud), une remontée de 0,1 m est observée en V2 jusqu'à une distance limitée à environ 300 m

Pour les autres stations les distances d'influence sont encore réduites.

Le graphique qui suit présente une comparaison de la réserve non saturée entre les deux modélisations V1 et V2 sur le flanc amont du dispositif après mise en œuvre des drainages (par réserve non saturée on entend la distance entre le niveau du sol et le niveau de la nappe après mise en place du dispositif).

Evaluation de la réserve de terrains non saturés dans les deux scénarios modélisés par Artesia (V1 - modélisation initiale / V2 - modélisation critique)

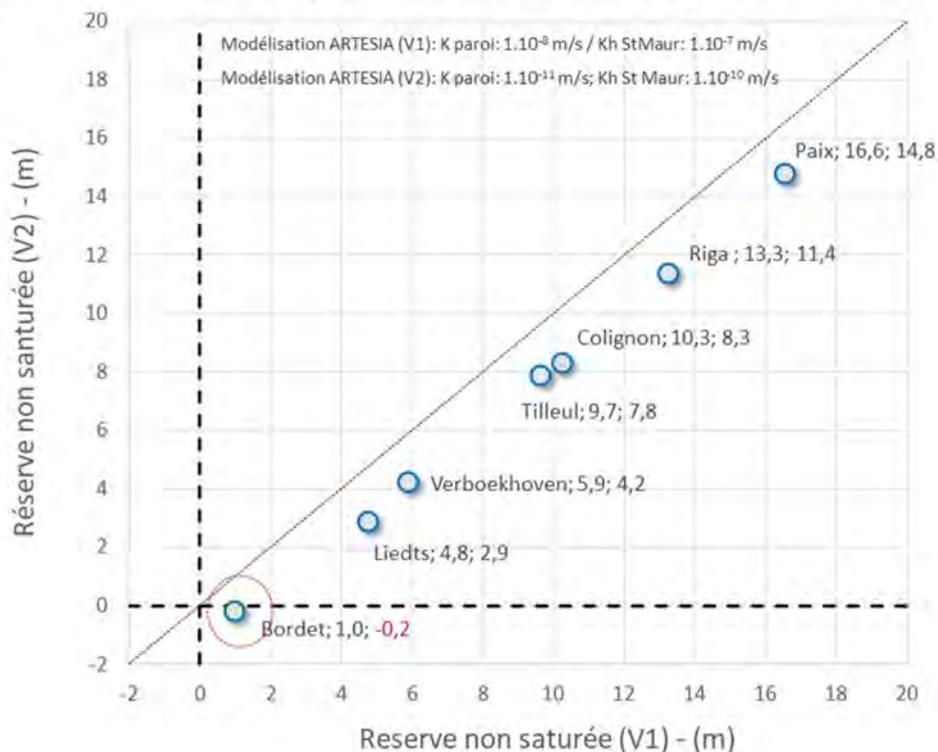


Figure 86: Comparaison des réserves non saturées entre les scénarios V1 et V2 (d'après Artesia, 2020)

Comme signalé dans la section précédente, en situation initiale, la réserve non saturée sur le flanc amont varie de 4,8 m (Liedts) à 16,6 m (Bordet) sauf à Bordet où, selon le niveau statique pris en compte par BMN dans sa modélisation du drainage permanent, elle ne serait que de 0,5 m avec un niveau d'eau potentiellement très proche du sol. Après mise en place du dispositif, en scénario V1 du fait de la descente à l'amont, la réserve saturée passerait à 1 m alors qu'en scénario V2 elle serait de -0,2 m ; ce qui signifie un effet barrage qui pourrait

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

donner lieu à une remontée d'eau au-dessus du niveau du sol dans les environs immédiats de la station Bordet côté amont. On rappellera que selon les sources différentes fournies par le demandeur, les niveaux statiques relatés à Bordet diffèrent significativement. On ne peut donc exclure une remontée non acceptable dans cette zone et la nécessité de gérer celle-ci. Il est donc recommandé :

- De documenter de manière plus détaillée les différents niveaux de nappe présents à proximité de Bordet et notamment en vérifiant les niveaux équipés auxquels il est fait référence pour vérifier cette situation ;
- Si nécessaire de procéder à l'implantation d'au minimum un doublon de piézomètres dans la zone directement amont à la future station Bordet, l'un serait équipé dans la partie supérieure des sables Bruxellien (en première approche vers les cotes 42 à 45 m DNG au-dessus d'un petit aquitard limoneux), l'autre serait équipé plus bas (en première approche vers les cotes 30 à 35 m DNG en dessous de celui-ci) ;
- De procéder à un monitoring de l'évolution piézométrique ;
- Si l'occurrence d'une réserve non saturée insuffisante se confirme d'étudier la mise en place d'un passage de nappe au droit de la station pour annuler l'occurrence d'un effet barrage important.

En fonction des niveaux observés au regard des niveaux équipés, différentes options de passage de nappe, peuvent être étudiées, pour autant que leur nécessité soit confirmée sur base des observations complémentaires :

- soit un passage de nappe à travers la station en créant un chemin préférentiel via des drains passifs mis en place au niveau des stations (ex : de type siphon) connectant l'amont et l'aval hydrogéologiques, permettant d'activer de manière passive un écoulement gravitaire dès lors que le niveau piézométrique amont viendrait à remonter anormalement (techniques assez invasives cependant),
- soit un passage de nappe avec des drains périphériques extérieur, passage sous les tunnels et zones de répartition côté aval, dans cette option un chemin préférentiel se ferait à l'extérieur de la station par augmentation de la perméabilité dans la zone encaissant directement la station.

Ces aspects doivent être examinés lors des études d'exécution. Ce type de dispositif a pour but de diminuer l'effet barrage et de rééquilibrer les niveaux de nappe amont plus bas que ceux engendrés par les murs de confinement.

L'étude et le cas échéant la mise en œuvre de tels dispositifs est justifiée pour la station Bordet pour laquelle la réserve non saturée peut se trouver potentiellement trop faible. Concernant les autres stations, bien que sur base des données existantes la réserve non saturée apparaît suffisante y compris dans une optique la plus sécuritaire (modélisation avec les hypothèses V2), la mise en œuvre de dispositifs de passage de nappe n'est pas exclue à ce stade. En effet, actuellement il n'existe pas de seuil maximum admissible pour les remontées de nappe. Cette décision est évaluée au cas par cas par Bruxelles Environnement, notamment en fonction de l'ensemble des projets autres que Métro-Nord et/ou projets à venir, sortant du cadre de la présente étude.

Par ailleurs, des passages de nappe sont déjà mis en œuvre pour le métro bruxellois existant, et ce de manière préventive, assortie d'un réseau de piézomètres de monitoring permettant de vérifier que cet effet barrage est bien maîtrisé.

En vertu du principe de précaution et en l'absence d'étude complémentaire qui permettrait de mieux évaluer le risque de remontée de nappe, des dispositifs de passage de nappe, combinés à un monitoring piézométrique devront être prévus lors de l'étude d'exécution. La maintenance de ces dispositifs devra également pouvoir être assurée pour prévenir tout risque de colmatage des drains.

C. Impact sur les ouvrages de captage existants en périphérie

36 captages ont été recensés à l'intérieur du périmètre d'isorabatement de 0,1 m.

Pour chacun de ces captages est reprise la valeur de rabattement attendue en exploitation à l'équilibre calculée par la modélisation V1 qui maximalise le rabattement et les effets périphériques.

On notera qu'un seul captage a été identifié directement contigu à une des stations, il s'agit du captage_5240 (Object_Id 372 – Id_ouvrage 94) situé à environ 20 m de la boîte principale de la station Paix (Place de la Paix).

Il s'agit d'un petit ouvrage de 13 m de profondeur autorisé pour un débit de 15 m³/j. Le rabattement en exploitation y serait de l'ordre de 1,55 m.

Sa forte proximité à la station est de nature à induire un impact négatif du dispositif :

- soit sur sa productivité vu qu'il s'agit d'un ouvrage de faible profondeur (13 m) et d'un débit extrait faible ;
- soit sur sa qualité ou son intégrité,

La situation pourrait nécessiter un abandon de celui-ci. Ce point est à prendre en compte dans les études d'exécution (concertation avec le propriétaire et abandon / comblement du forage dans les règles de l'art).

La localisation du captage est reprise aux figures suivantes :

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

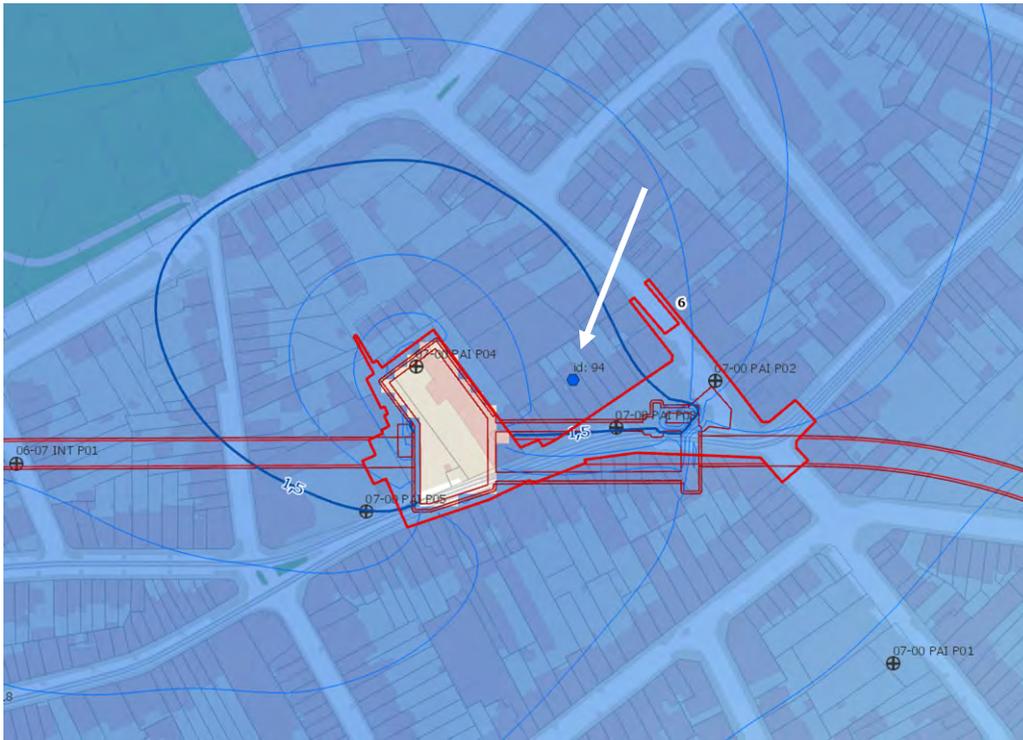


Figure 87 : Localisation du captage potentiellement impacté contigu à la station Paix (fond de plan UrbiS, Tractebel 2020)



Figure 88 : Localisation du captage potentiellement impacté contigu à la station Paix (fond orthophotoplan)

En ce qui concerne les autres ouvrages de captage, ils s'échelonnent à des distances entre 120 m et 1300 m de distance des boîtes principales. On recense, en complément du captage Paix (contigu à la station) mentionné ci-avant :

- 6 captages pour l'interdistance 0 – 200 m par rapport aux stations
- 11 captages pour l'interdistance 200 – 400 m par rapport aux stations
- 8 captages pour l'interdistance 400 - 600 m par rapport aux stations
- 5 captages pour l'interdistance 600 – 1000 m par rapport aux stations
- 5 captages pour l'interdistance 1000 – 1300 m par rapport aux stations

La figure présentée ci-après illustre pour chaque station le rabattement attendu en fonction de la distance à la boîte principale (évalué sur base de la modélisation V1).

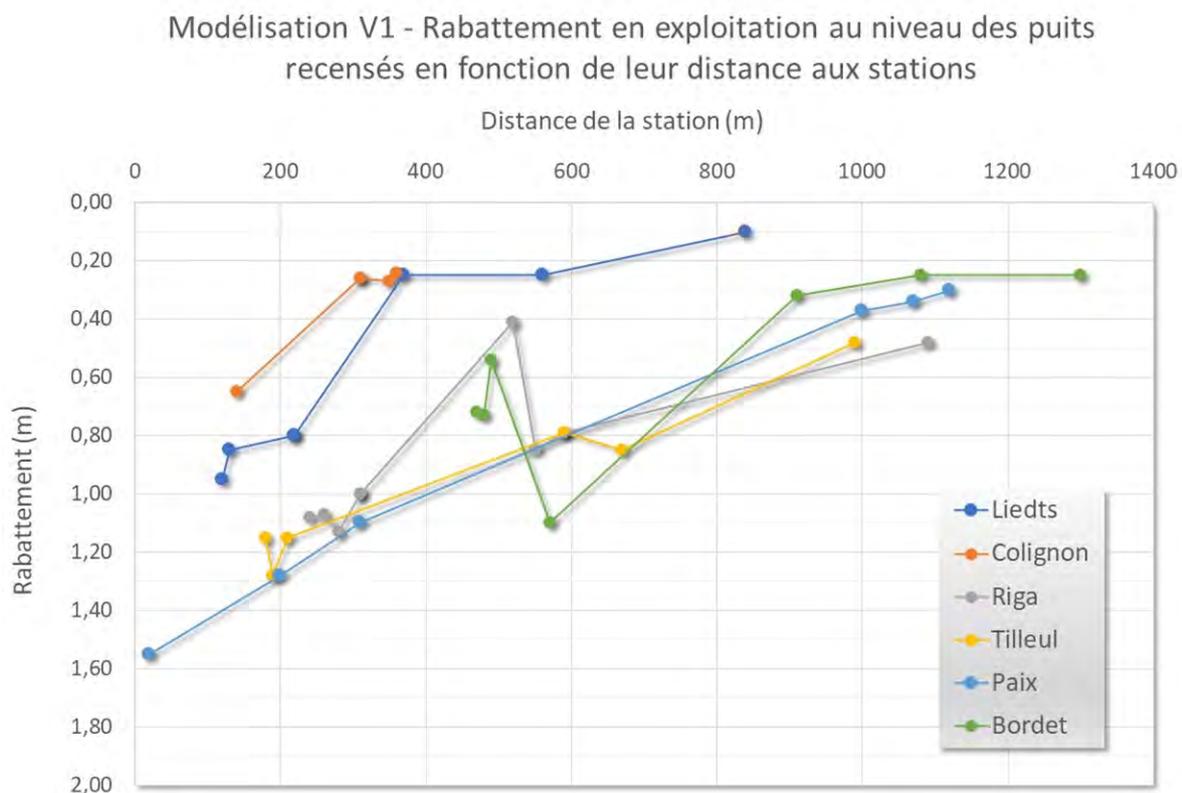


Figure 89 : Rabattement en fonction de la distance au niveaux des puits recensés en périphérie des stations (données Artesia 2020)

Le rabattement le plus élevé à attendre concerne le captage_1276 localisé à proximité de la station Paix (à 200 m) et de la station Tilleul (à 190 m), avec un rabattement estimé 1,28 m ; la nature du captage et les débits autorisés ne sont pas déclarés.

Les influences les plus élevées sur les captages environnants se marquent pour les stations Paix, Tilleul et Riga pour lesquels les rabattement varieraient entre 1,28 m et 0,25 m en fonction de la distance. Les rabattements dus aux stations Liedts et Colignon sont susceptibles de varier entre 0,95 et 0,10 m pour les captages environnants.

On notera que la gamme de rabattement induite est en général d'un ordre de grandeur relativement comparable à la gamme de fluctuation saisonnière des aquifères ici considérés (différence hautes eaux / basses eaux).

En résumé mis à part le captage contigu à la station Paix (captage_5240) qui devra probablement être abandonné en raison de sa proximité à celle-ci, les niveaux de rabattement estimés sur les autres captages recensés dans la zone d'influence ne sont, en première approche, pas de nature à affecter leur productivité, à menacer leur exploitation et à induire la mise en œuvre de mesures correctives.

D. Impact sur les ouvrages d'exploitation géothermique existants en périphérie

5 systèmes géothermiques ont été recensés à l'intérieur du périmètre d'isorabattement de 0,1 m. Un système de type fermé (BTES) est recensé à l'est de la station Bordet à environ 1100 m de celle-ci. Ce système appartient à l'OTAN et son exploitation n'est pas affectée par le tronçon. Pour information le rabattement attendu à cet endroit serait inférieur à 0,3 m sur base de la modélisation V1.

Trois systèmes de type fermé (BTES) sont identifiés à l'ouest de la gare du nord à des distances de 460 m à 900 m de celle-ci. Il s'agit notamment de Pole Star à 460 m et Quatuor Brussels à 750 m de la gare du nord. L'exploitation de ces systèmes ne sera pas affectée par le tronçon. Pour information les rabattements attendus sur base de la modélisation V1 sont inférieurs à 0,1 m et les systèmes fonctionnent par diffusion thermique.

Un seul système ouvert (ATES) a été recensé à l'ouest de la gare du nord. Il s'agit du système WTC (Projet ZIN) situés à 310 m de la gare du nord. Le rabattement attendu du fait du drainage du tronçon sera inférieur à 0,1 m selon la modélisation V1. Le système bien que fonctionnant en système ouvert ne sera pas impacté par la mise en œuvre du projet Metro Nord.

L'ensemble des autres systèmes recensés à plus grande distance ne sont pas susceptibles d'être impactés par le présent projet.

E. Impact du drainage pendant le chantier – construction du tunnel

Le creusement au tunnelier n'a pas (ou très peu) d'impact sur le niveau de la nappe puisqu'aucun rabattement n'est nécessaire lors du creusement, le cas échéant le travail au tunnelier se fait sous le niveau de nappe. On n'attendra donc au droit des tronçons de tunnel aucun effet plus marqué que ce qui a été mis en évidence par modélisation en régime d'équilibre.

6.4.4.2. Incidences sur le sol – risque de pollution

A. Généralités

Le tunnel est creusé à une profondeur comprise moyenne de 23m. Cette grande profondeur d'excavation minimise grandement les risques de présence de terres polluées.

La présence de remblais pollué en métaux lourds et en HAP peut notamment être totalement écartée. Le tracé ne traverse d'ailleurs pas de lithologie de type remblais. Les pollutions du sol en métaux lourds et HAP ne sont dès lors pas présentée dans le cadre du présent rapport.

La présence de pollutions du sol en huiles minérales et BTEX peut également être raisonnablement écartées lorsque le tunnel est localisé à plus de 15m de profondeur au droit de formations semi-perméables (formation de Tielt et de Kortijk). Au droit des formations

perméables (formation de Bruxelles et dépôt quaternaires) et pour les sections moins profondes, le risque de pollution ne peut être écarté.

La présence de pollution du sol en solvants chlorés est finalement possible au droit de l'ensemble du tracé. Les solvants chlorés sont en effet caractérisés par une forte densité et ont, de ce fait, tendance à migrer verticalement dans les sols. Par ailleurs, la migration de ces pollutions peut être très hétérogène en fonction de la perméabilité des sols ce qui peut engendrer l'apparition de "poches" de polluants à des distances plus ou moins grandes des sources de pollutions et à des profondeurs importantes. Une attention particulière est portée sur l'identification des sources potentielles de pollution et des pollutions en solvants chlorés au droit de l'ensemble du tracé ainsi qu'aux alentours de celui-ci (30m de l'axe du tunnel).

Sur l'ensemble des plans ci-après, les terrains qui abritent ou qui ont abrité des activités polluantes en solvants chlorés sont identifiées à l'aide d'une flèche rouge.

Il est important de noter que cette analyse se base sur le sol et pas sur la gestion des polluants dans les eaux souterraines (voir analyse sur la variante « gestion des eaux »)

B. Analyse

B.1. Tronçon 1 : P0 - Bordet

Le tracé de ce tronçon superposé à la carte de l'état du sol est présenté à la figure suivante :

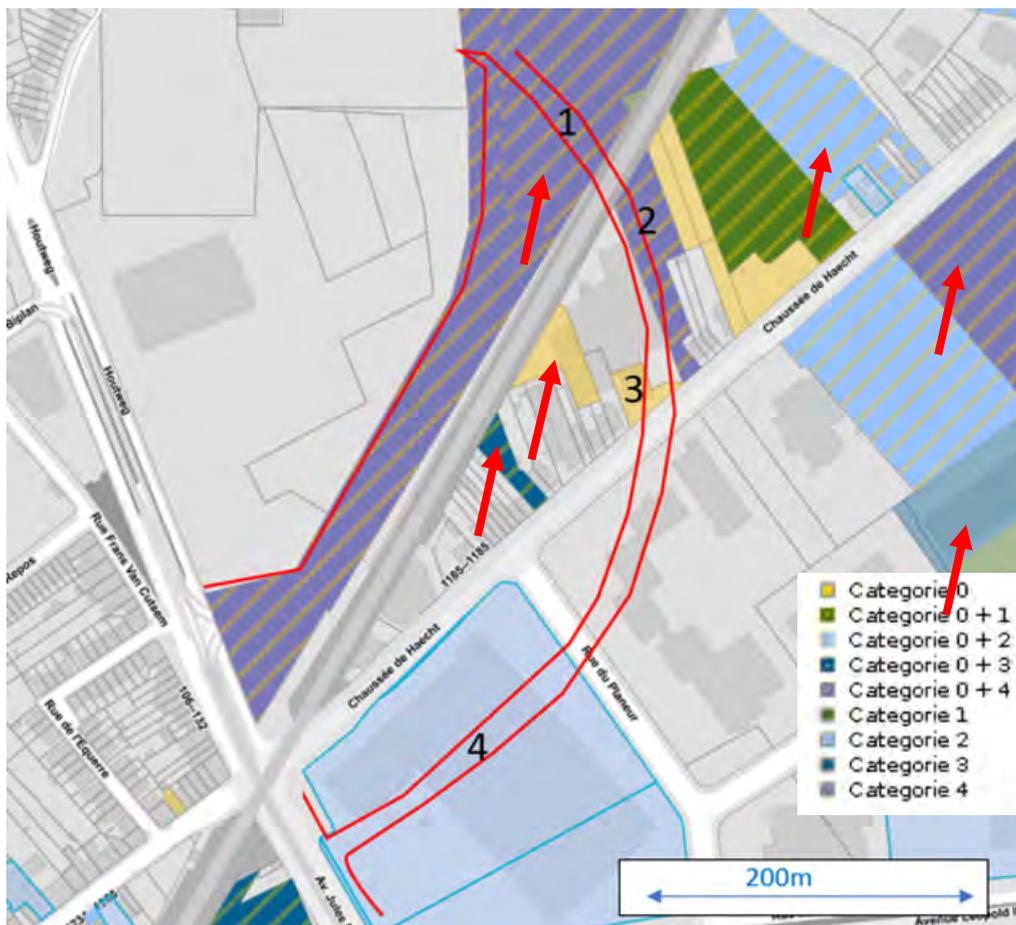


Figure 90: Tronçon 1 : P0-Bordet superposé à la carte de l'état du sol (ARIESoil sur carte de l'état du sol, consultée en septembre 2020)

La route de cette partie du tunnel est située à une profondeur comprise entre 9 et 24 m sous le niveau de la surface, dans les formations de Bruxelles et de Tielt.

Conformément à l'analyse préliminaire présentée ci-avant, les déblais au droit du tronçon 1 sont susceptibles d'être pollués par des huiles minérales, des BTEX et des solvants chlorés.

Les parcelles qui sont impactées par de telles pollution et/ou qui sont susceptibles d'être impactées par ces polluants sont identifiées ci-après :

- La parcelle n°1 (parcelle 91A2) abrite plusieurs pollutions du sol en huiles minérales C10-C40 qui s'étendent verticalement jusqu'à maximum 8,5m-ns.
- La parcelle n°2 (parcelle 65X3) abrite une pollution du sol en huiles minérales C10-C40 ainsi qu'en solvants chlorés. Ces pollutions ne sont à ce jour pas encore délimitées verticalement.
- La parcelle n°3 (parcelle 63M) abrite ou a, par le passé abrité, des installations potentiellement polluantes en huiles minérales et en BTEX (atelier d'entretien de véhicules à moteurs, dépôt de liquide inflammables). Cette parcelle n'a cependant jamais fait l'objet d'étude de sol à ce jour.
- La parcelle n°4 (parcelle 80W5) a fait l'objet d'une étude de sol et aucune pollution n'y a été détectée.

Notons également la présence de plusieurs parcelles abritant des sources potentielles de pollution en solvants chlorés aux alentours du tronçon 1. La majorité de ces terrains ont récemment fait l'objet d'investigations. Les éventuelles pollutions sont dès lors connues. Notons toutefois la présence, sur la parcelle 59W2 (localisée par la flèche rouge sur la figure ci-avant) d'activité potentiellement polluante en solvants chlorés (passées ou présente) qui n'ont jamais été investiguées à ce jour.

À ce titre, le site de la SABCA (100m à l'est) a fait l'objet d'investigations et d'une révélation de pollutions à grande profondeur (jusqu'à 20m-ns): pollution du sol et de l'eau souterraine en solvants chlorés, pollution du sol en huiles minérales. Il semble que cette pollution se dirige directement vers le nord du site et pas vers le tunnel.

B.2. Tronçon 2 : Bordet - Paix

Le tracé de ce tronçon superposé à la carte de l'état du sol est présenté à la figure suivante :



Figure 91 : Tronçon 2 : Bordet-Paix superposé à la carte de l'état du sol (ARIESoil sur carte de l'état du sol, consultée en septembre 2020)

La route de cette partie du tunnel est située à une profondeur comprise entre 12,4 et 19,6 m sous le niveau de la surface, dans les formations de Bruxelles et de Tielt.

Conformément à l'analyse préliminaire présentée ci-avant, les déblais au droit du tronçon 2 sont susceptibles d'être pollués par des huiles minérales, des BTEX et des solvants chlorés.

Les parcelles qui sont impactées par de telles pollution et/ou qui sont susceptibles d'être impactées par ces polluants sont identifiées ci-après :

- Au début du tronçon, le tunnel passe sous deux parcelles (n°5 et 6 sur la figure ci-dessus, parcelles 316N et 314M2) qui ont fait l'objet d'études de sol et qui sont, suite à ces études, reprises en catégorie 2⁹ à l'inventaire de l'état du sol soit des parcelles non polluées. Une de ces parcelles est également reprise en catégorie 0 (parcelle potentiellement polluée). La dernière reconnaissance de l'état du sol date cependant de 2017. La présence d'une nouvelle pollution à plus de 10m au droit de ce terrain n'est donc raisonnablement pas possible.
- Le tronçon traverse ensuite une parcelle (n°7 sur la figure ci-dessus, parcelle 314B3) qui abrite ou a, par le passé abrité, des installations potentiellement polluantes en huiles minérales et en BTEX (dépôt de liquide inflammables) ainsi qu'en solvants chlorés. Cette parcelle n'a cependant jamais fait l'objet d'étude de sol à ce jour.
- Le tronçon traverse ensuite une parcelle (n°8 sur la figure ci-dessus, parcelle 311D) qui est reprise en catégorie 2 suite à une reconnaissance de l'état du sol réalisée en 2012 (absence de pollution en 2012). Cette parcelle est également reprise en catégorie 0 suite à l'exploitation, depuis 2012, d'un atelier d'entretien et de réparation. Considérant les normes actuelles de protection de tels ateliers, aucune pollution n'est attendue à plus de 10m sous le niveau du sol au droit de ce terrain.
- Avant de traverser la rue Plaine d'Aviation, le tunnel traverse une parcelle (n°9 sur la figure ci-dessus, parcelle 338P) reprise en catégorie 0 à l'inventaire d'état du sol (potentiellement polluée) et qui n'a, à ce jour, jamais été investiguée. L'activité à risque renseignée est un dépôt de liquide inflammable, très certainement des hydrocarbures. La date de mise en

⁹ Parcelles respectant les normes d'intervention (non polluée) mais pas les normes d'assainissement

exploitation de ce dépôt n'est pas connue sur base des informations de la carte de l'état du sol. Une éventuelle pollution par des hydrocarbure ne pourrait pas se disperser dans le sol sous le niveau de l'eau souterraine qui est attendue entre 6 et 8m-n.s. Il est dès lors peu probable que les terres excavées dans le cadre de la construction du tunnel soit polluée.

- Finalement, le tronçon traversera une parcelle (n°10 sur la figure ci-dessus) qui a fait l'objet d'une reconnaissance de l'état du sol en 2015 et qui est, suite à cette étude, reprise en catégorie 4. La reconnaissance de l'état du sol a, en effet, mis au jour la présence d'une pollution du sol en solvants chlorés (perchloroéthylène) en surface (échantillon 5-25 cm-s) et pour un des 3 forages réalisé lors de cette étude. Le facteur de dépassement de la norme est de 1,6 x NI. Bien qu'aucune étude détaillée ne soit disponible à ce stade, il s'agirait vraisemblablement que d'une pollution de faible ampleur (faible dépassement de norme détecté dans l'horizon superficiel).

Notons finalement la présence, sur la parcelle 334C5, située à +/-60m au nord du tracé (cf. flèche rouge sur la figure ci-avant), d'une pollution du sol, notamment par des solvants chlorés. Une étude détaillée a été réalisée pour cette parcelle mais le résumé non technique de cette étude n'est pas disponible). Toutefois considérant que les parcelles voisines de cette parcelle ne sont pas reprises à l'inventaire de l'état du sol, il est déduit que les pollutions affectant cette parcelle sont délimitées n'ont pas impacté les parcelles voisines et sont dès lors délimitée avant d'atteindre le tracé du tunnel.

B.3. Tronçon 3 : Paix – Tilleul

Le tracé de ce tronçon superposé à la carte de l'état du sol est présenté à la figure suivante :

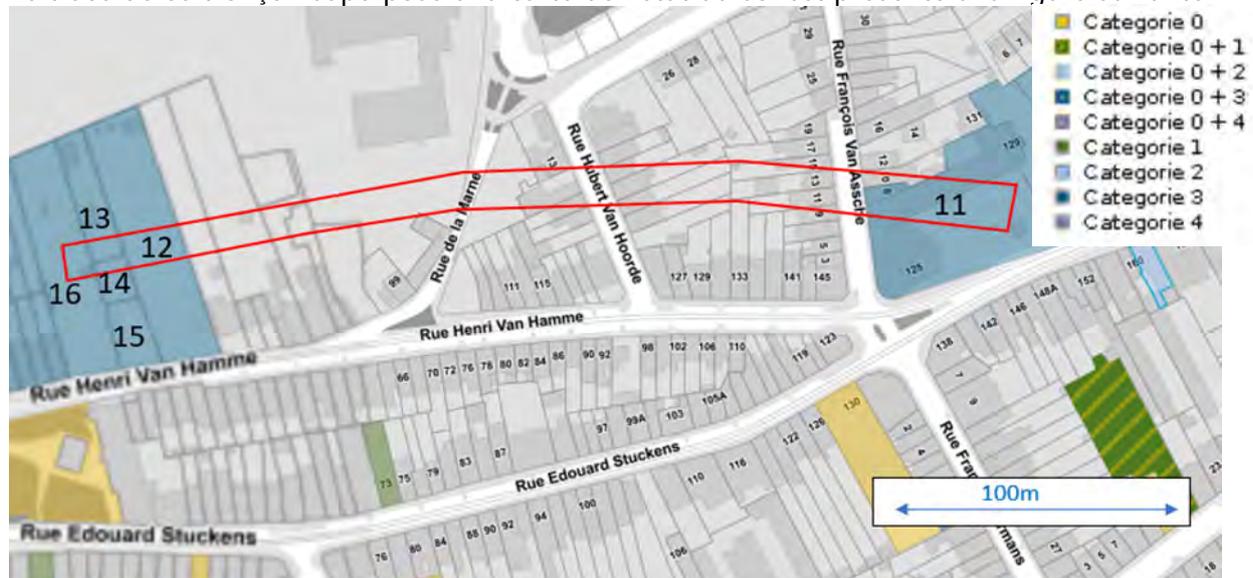


Figure 92: Tronçon 3- Paix-Tilleul superposé à la carte de l'état du sol (ARIESoil sur carte de l'état du sol, consultée en septembre 2020)

La voute de cette partie du tunnel est située à une profondeur comprise entre 12,7 et 18,2 m sous le niveau de la surface, dans les formations de Tielt et de Kortrijk.

Conformément à l'analyse préliminaire présentée ci-avant, les déblais au droit du tronçon 3 sont susceptibles d'être pollués des solvants chlorés ainsi que par des huiles minérales, des BTEX (vu la profondeur inférieure à 15m par endroits).

Les parcelles qui sont impactées par de telles pollution et/ou qui sont susceptibles d'être impactées par ces polluants sont identifiées ci-après :

- Parcelle 11 (parcelle 163M) : Cette parcelle est impactée par une pollution de l'eau souterraine mais pas du sol. Aucun déblai pollué n'est ainsi attendu au droit de cette parcelle dans le cadre de la construction du tunnel.
- Les parcelles n°12, 13, 14, 15 et 16 : Ces parcelles ont fait l'objet d'une étude sur base volontaire en vue de la réalisation de la station Tilleul. Aucune pollution du sol en huiles minérales, BTEX et solvants chlorés n'a été détecté sur ces parcelles.

B.4. Tronçon 4 : Tilleul - Riga

Le tracé de ce tronçon superposé à la carte de l'état du sol est présenté à la figure suivante :



Figure 93 : Tronçon 4 Tilleul – Riga superposé à la carte de l'état du sol (ARIESoil sur carte de l'état du sol, consultée en septembre 2020)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

La voute de cette partie du tunnel est située à une profondeur comprise entre 15,4 et 22 m sous le niveau de la surface, dans les formations de Tielt et de Kortrijk (formations semi-perméables).

Conformément à l'analyse préliminaire présentée ci-avant, les déblais au droit du tronçon 4 sont susceptibles d'être pollués par des solvants chlorés uniquement. En conséquence :

- Plusieurs terrains en catégorie 0 qui sont traversés par le tunnel ne sont pas identifiés ci-après car ils n'ont jamais abrité d'activités potentiellement polluantes en solvants chlorés.
- Les pollutions en huiles minérales, BTEX ne sont pas présentées ci-après. Les résumés non techniques disponibles sur la carte de l'état du sol ont toutefois tous été consultés.

Les pollutions et sources potentielles de pollution en solvants chlorés situées au droit du tronçon 4 sont identifiées ci-après :

- Parcelle n°16 : Cette parcelle a fait l'objet d'une étude sur base volontaire en vue de la réalisation de la station Tilleul. Aucune pollution n'a été détectée dans le sol.
- La parcelle n°17 a, par le passé, abrité des installations potentiellement polluantes en solvants chlorés (dégraissage de textile). Cette parcelle n'a jamais fait l'objet d'étude de sol.

Notons également la présence d'une parcelle, situé à un peu moins de 100m au nord du tracé (voir flèche rouge sur la figure ci-dessus) qui abrite ou qui a par le passé abrité une ou des installations potentiellement polluantes en solvants chlorés.

B.5. Tronçon 5 : Riga - Verboekhoven

Le tracé de ce tronçon superposé à la carte de l'état du sol est présenté à la figure suivante :

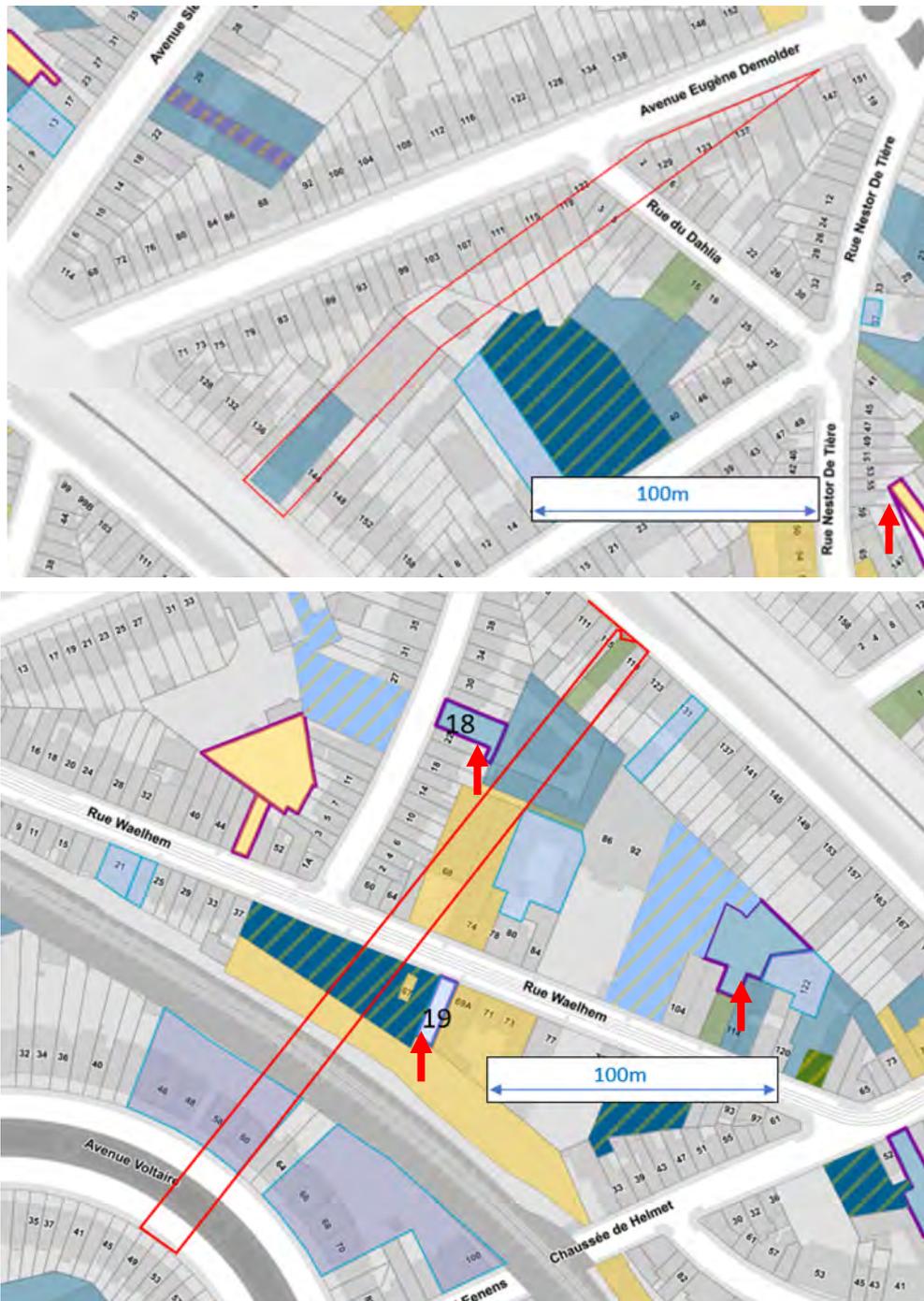


Figure 94: Tronçon 5 Riga - Verboekhoven superposé à la carte de l'état du sol (ARIESoil sur carte de l'état du sol, consultée en septembre 2020)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

La route de cette partie du tunnel est située à une profondeur comprise entre 15,8 et 24 m sous le niveau de la surface, dans la formation de Kortrijk (majoritairement) et de Tielt pour une petite partie de ce tronçon.

Conformément à l'analyse préliminaire présentée ci-avant, les déblais au droit du tronçon 5 sont susceptibles d'être pollués par des solvants chlorés uniquement. Les pollutions et sources potentielles de pollution en solvants chlorés situées au droit du tronçon 5 sont identifiées ci-après :

- La parcelle n°18 a, par le passé, abrité des installations potentiellement polluantes en solvants chlorés (dégraissage de métaux). Ces anciennes installations ont été étudiées et aucune pollution du sol en solvants chlorés n'a été détectée.
- La parcelle n°19 a, par le passé, abrité des installations potentiellement polluantes en solvants chlorés (imprimerie, production de vernis, laques, peintures). Ces anciennes installations ont été étudiées et aucune pollution du sol en solvants chlorés n'a été détectée (catégorie 2). Tronçon 6 : Verboekhoven – Colignon

Le tracé de ce tronçon superposé à la carte de l'état du sol est présenté à la figure suivante :

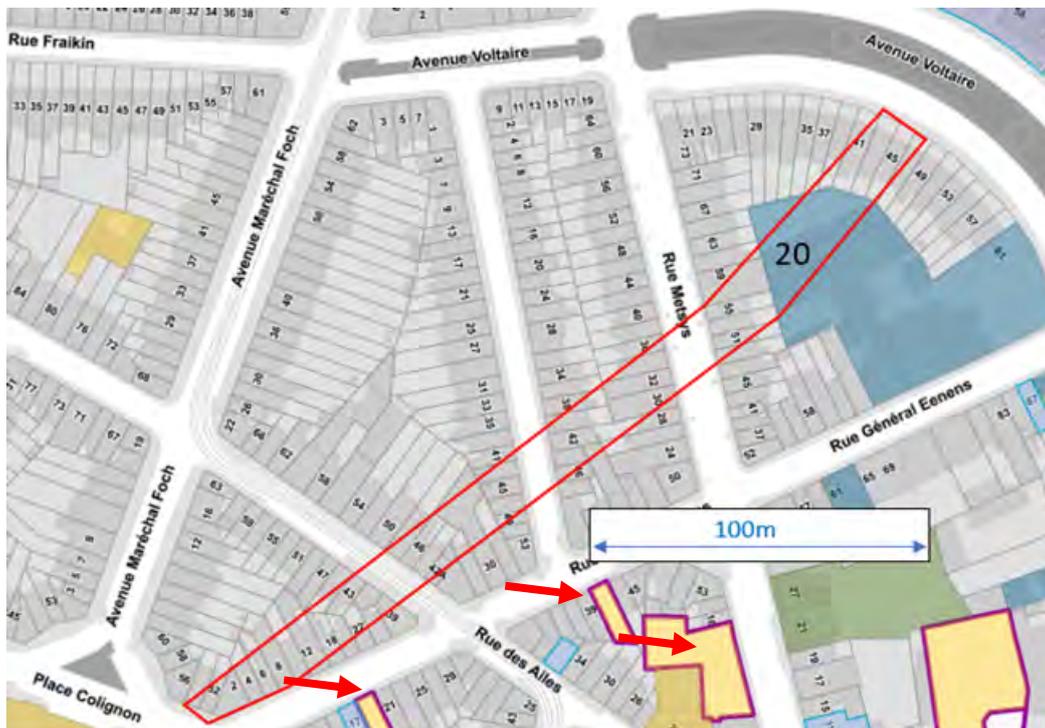


Figure 95: Tronçon 6 Verboekhoven- Colignon superposé à la carte de l'état du sol (ARIESoil sur carte de l'état du sol, consultée en septembre 2020)

La route de cette partie du tunnel est située à une profondeur comprise entre 14,9 et 18,5 m sous le niveau de la surface, dans la formation de Kortrijk et dans les dépôts du quaternaires.

La parcelle n°20 (parcelle 403E) n'abrite aucune pollution du sol en huiles minérales, BTEX ou en solvants chlorés.

Notons la présence de plusieurs sources potentielles de solvants à +/-50m au sud du tracé (cf. flèche rouge sur la figure ci-dessus). Plusieurs de ces sources n'ont, à ce jour, pas encore été investiguées.

B.6. Tronçon 7 : Colignon - Liedts

Le tracé de ce tronçon superposé à la carte de l'état du sol est présenté à la figure suivante :

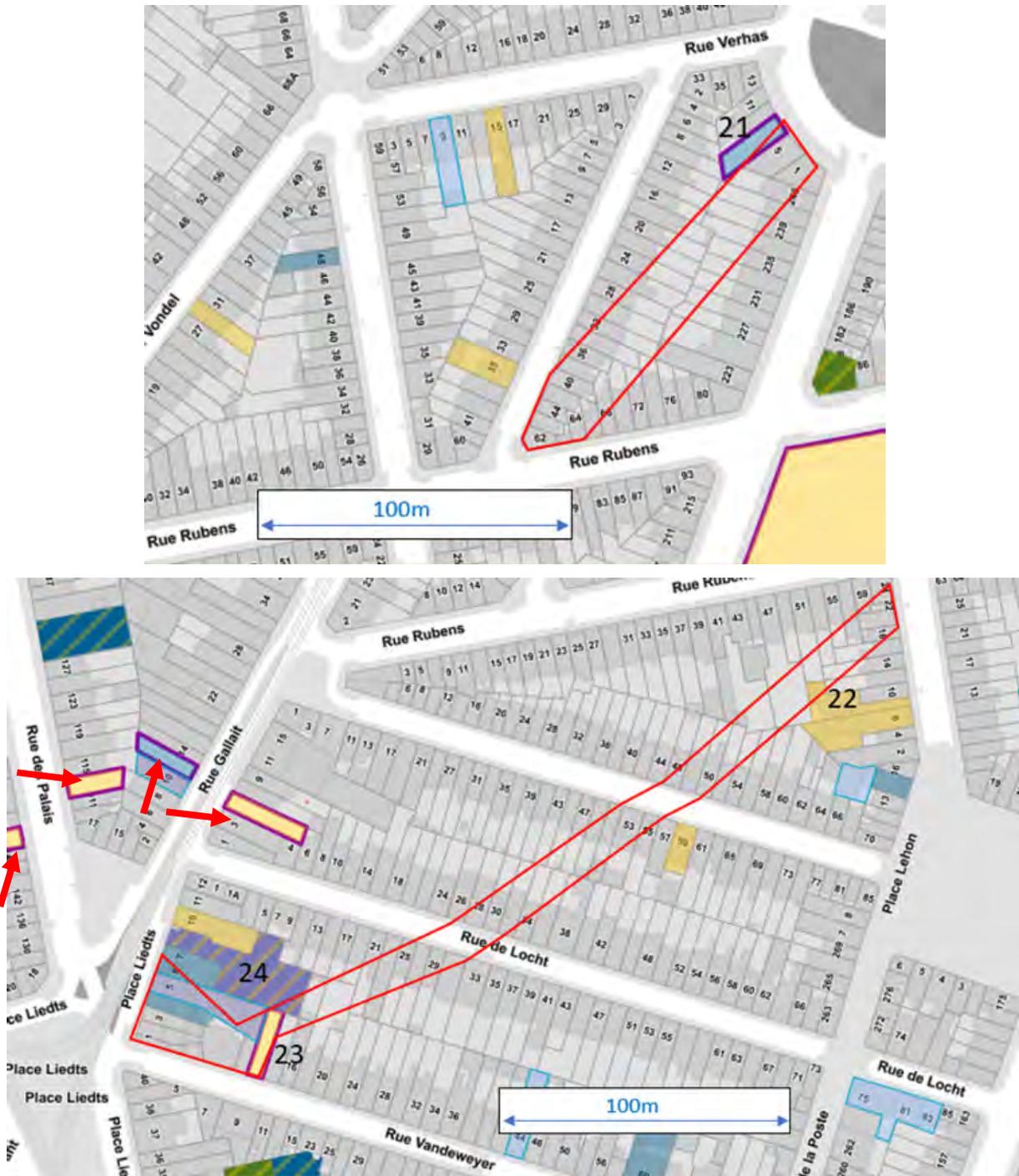


Figure 96: Tronçon 7 Colignon - Liedts superposé à la carte de l'état du sol (ARIESoil sur carte de l'état du sol, consultée en septembre 2020)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

La voute de cette partie du tunnel est située à une profondeur comprise entre 19,1 et 22,4 m sous le niveau de la surface, dans la formation de Kortrijk et dans les dépôts du quaternaires.

Vu la grande profondeur (près de 20m de profondeur) et la lithologie du sol couvrant ce tronçon (formation de Kortrijk et du quaternaire), il est considéré que le risque de pollution est uniquement lié aux solvants chlorés. Les pollutions et sources potentielles de pollution en solvants chlorés situées au droit du tronçon 5 sont identifiées ci-après :

- La parcelle n°21 (parcelle 193V8) a, par le passé, abrité des installations potentiellement polluantes en solvants chlorés (dégraissage de textile). Cette parcelle a fait l'objet d'une reconnaissance de l'état du sol en 2007 et est suite à cette étude reprise en catégorie 3 à l'inventaire de l'état du sol (parcelle polluée sans risque). Les pollutions affectant le sol de cette parcelle ne sont pas connues (résumé non technique non disponible).
- La parcelle n°22 (parcelle 193V8) abrite ou a, par le passé, abrité des installations potentiellement polluantes en solvants chlorés (application pneumatique de revêtement et cabines de peinture) qui n'ont encore jamais été investiguées à ce jour.
- La parcelle n°23 (parcelle 182K4) abrite ou a, par le passé, abrité une installation potentiellement polluante en solvants chlorés (préparation, traitement chimique des textiles) qui n'a encore jamais été investiguée à ce jour.
- La parcelle n°24 (parcelle 182L9) abrite ou a, par le passé, abrité une installation potentiellement polluante en solvants chlorés (application pneumatique de revêtement de peinture). Les informations disponibles sur la carte de l'état du sol ne permettent pas de savoir si cette installation a été investiguée récemment.

Cette parcelle est par ailleurs reprise en catégorie 4 (parcelle polluée) mais aucun résumé non technique n'est disponible de tel sorte à ce que l'état sanitaire du sol de cette parcelle n'est pas connu.

Notons par ailleurs la présence de plusieurs sources potentielles de solvants a+-50m au nord du tracé (cf. flèche rouge sur la figure ci-dessus). Trois de ces parcelles n'ont à ce jour encore jamais été investiguées. Une de ces parcelles (en bleu sur la figure) est impactée par une pollution du sol en solvants chlorés.

B.7. Tronçon 8 : Liedts – P5

Le tracé de ce tronçon superposé à la carte de l'état du sol est présenté à la figure suivante :



Figure 97: Tronçon 7 Liedts – P5 superposé à la carte de l'état du sol (ARIESoil sur carte de l'état du sol, consultée en septembre 2020)

La route de cette partie du tunnel est située à une profondeur comprise entre 12,1 et 14,4 m sous le niveau de la surface dans les formations de Kortrijk.

Conformément à l'analyse préliminaire présentée ci-avant, les déblais au droit du tronçon 1 sont susceptibles d'être pollués par des huiles minérales, des BTEX et des solvants chlorés.

Les parcelles qui sont impactées par de telles pollution et/ou qui sont susceptibles d'être impactées par ces polluants sont identifiées ci-après :

- La parcelle n°25 a, par le passé, abrité des installations potentiellement polluantes en solvants chlorés (dégraissage de textiles, préparation et traitement chimique des textiles). Ces anciennes installations ont été étudiées et aucune pollution du sol en solvants chlorés n'a été détectée.

Notons par ailleurs la présence de plusieurs sources potentielles de solvants qui n'ont, à ce jour, pas encore été investiguées, dans un rayon de 50 m autour du tracé de cette partie du tunnel (cf. flèche rouge sur la figure ci-dessus).

6.4.4.3. Incidences sur le sol – gestion des déblais du tunnel

A. Gestion

Les déblais seront évacués au fur à et mesure de l'avancée du tunnelier depuis le puit P0 situé au droit du futur dépôt de Haren.

Au total, le volume de déblai du tunnel, de la rampe et du PO (385.000m³) est estimé à +- 500.000 m³ (foisonné) sur une durée de +-700 jours ce qui correspond à un volume évacué moyen par jours de +-710 m³/jours soit un ordre de grandeur de +/- 30 camions.

Les filières de valorisation dépendent de la qualité des terres et de la région où les terres seront évacuées. À ce stade de l'étude il est impossible de se prononcer sur ce sujet car le demandeur ne sait pas encore nous dire si les terres seront valorisées à Bruxelles ou ailleurs en Belgique (Il y a plusieurs site de grande ampleur à remblayer en RW mais quid d'ici quelques années) ou totalement envoyées vers les Pays-Bas.

Le risque de présence de pollutions au sein des déblais est assez restreint pour l'ensemble du tracé du fait de la grande profondeur des excavations (>9m). Ce risque est un peu plus important pour la première partie du tracé (entre P0 et la station Paix) considérant la lithologie de l'horizon surmontant cette partie du tunnel (sable Bruxelliens, perméables).

Pour la seconde partie du tracé (de la station Paix à P5, le tunnel est majoritairement fiché dans la formation de Tielt et de Kortrijk (sol semi-perméables). Le risque de pollution en lien avec une activité de surface est ainsi plus limité.

La superposition du tracé sur la carte de l'état du sol permet d'identifier les zones les plus à risques à proximité desquelles le risque de pollution est un peu plus important (tout en restant fortement limité). Cette étude, présentée au chapitre précédent, pourra servir de base pour l'élaboration d'une procédure de contrôle et de suivi de la qualité des déblais en cours des travaux.

Dans le cas de figure où les déblais seront évacués vers les Pays-Bas par voie fluviale. La procédure de contrôle de la qualité des déblais applicable pour ces terres sera définie par la législation des Pays-Bas. Les tests devront se faire avant chargement.

Dans le cas de figure de la valorisation de ces déblais sur Bruxelles (anecdotique). Une réutilisation d'une partie des terres excavées dans le cadre du chantier du métro ou sur d'autre chantier est également envisageable pour autant que les conditions de réutilisation définies par le code de bonne pratique relatif à l'utilisation de terres de déblai et de granulats dans ou sur le sol soient respectées. Cette utilisation sera encadrée par un rapport technique et nécessitera l'intervention d'un expert sol et l'approbation préalable de Bruxelles Environnement et donc stockage sur site en attendant le feu vert de BE.

En cas d'évacuation vers la RW il faudra réaliser un rapport de qualité des terres préalablement à l'envoi des terres. Ce qui signifie un stockage via des andins sur le site du dépôt afin de réaliser les RQT (rapport de qualité des terres).

En cas d'évacuation vers la Flandre le principe est le même avec une technisch verslag.

B. Obligations liées au respect de l'ordonnance sols

Conformément à l'article 13§4 de l'Ordonnance sol « *Une reconnaissance de l'état du sol (RES) doit être réalisée à charge du demandeur d'un permis d'urbanisme visant des actes ou travaux en contact avec le sol sur plus de 20 m² sur une parcelle inscrite à l'inventaire de l'état du sol dans la catégorie 0 ou une catégorie combinée à 0 impliquée par cette demande, et ce avant la délivrance du permis* ».

La réalisation de telles reconnaissance de l'état du sol est cependant peu pertinente dans le cadre de la création du tunnel. En effet les objectifs visés par ce fait générateur à savoir :

- Vérifier l'adéquation de la qualité du sol avec l'usage futur ;
- Détecter des déblais pollués au préalable et
- Eviter de compliquer les futures études de sol ou traitements ;

Ne sont soit pas applicables ou pas atteignables dans le cadre de la construction du tunnel.

Par ailleurs, les investigations réalisées dans une RES s'arrêtent généralement entre 5 et 15m de profondeur alors que la majorité des terres seront excavées à plus de 15m de profondeur. Notons finalement que vu la profondeur du tunnel et la lithologie des terrains sus-jacents, le risque de pollution des déblais par des activités de surface est très fortement réduit.

Ainsi, une demande motivée pour réduire l'étendue de la zone couverte par les reconnaissances de l'état du sol en excluant les zones hors-station (tunnel) sera transmise à Bruxelles-Environnement conformément à l'article 14§2 de l'Ordonnance.

La construction d'un tunnel à plus de 9m au droit de terrains pollués n'est pas susceptible de modifier les risques liés aux pollutions du sol de ce terrain. Ceci n'est pas vrai pour l'eau souterraine car le pompage liée au projet est susceptible d'impacter la migration des pollutions dans l'eau. Il est très difficile au stade projet de déterminer ce risque au vu de la profondeur du tunnel et des données indisponibles à cette profondeur. Mais des hypothèses sont réalisées dans le chapitre « variante de gestion des eaux » de ce livre.

Aucune actualisation d'études de risque relative à des pollutions du sol ne sera induite par le projet du tunnel. Ce projet n'engendrera pas de levée de restriction d'usage liée à des pollutions du sol. Par ailleurs, les excavations ne concerneront *a priori* pas de sol pollué en raison de leur grande profondeur. Ainsi, aucun projet de gestion de risque ne sera requis pour des pollutions du sol dans le cadre de la construction du tunnel.

6.4.4.4. Incidences sur les impétrants

Il n'y a pas d'impétrants à dévier au droit de l'emprise chantier du tunnel.

Sur les 30 m de part et d'autre du tracé tunnel, toutes les canalisations d'eau en fonte grise de Vivaqua doivent être modifiées par des canalisations en acier ou en PEHD. Ces modifications doivent être réalisées avant le début de la construction du tunnel.

6.4.4.5. Incidences sur les tassements

Le creusement d'un tunnel peut engendrer des désordres à son environnement bâti. Parmi ceux-ci, les plus fréquents sont des déplacements du terrain (tassements ou soulèvements) dont l'intensité va dépendre de plusieurs facteurs tels que, entre autres, la technique de creusement, la nature des terrains traversés (caractéristiques mécaniques) et le rapport entre

les dimensions du tunnel et sa profondeur. En première approximation, on peut considérer que l'ampleur des tassements est proportionnelle au volume de sol perdu lors du creusement du tunnel (c'est-à-dire la différence entre la section finale du tunnel et la section réellement creusée).

L'évaluation de l'impact du creusement d'un tunnel sur son environnement se base principalement sur

- L'évaluation de la sensibilité aux tassements du bâti au droit de la zone d'influence du tracé du tunnel.
- L'estimation des tassements attendus le long du tracé du tunnel, en fonction de la géologie et des caractéristiques mécaniques des couches traversées.

L'étude d'incidence sur les tassements se basent sur les rapports BMN suivants :

[1] « Tunnel : méthodologie de classification des ouvrages sensibles » réf. BMN-TUN-CIV-RP-004-P01.2 daté du 23/11/2015.

[2] « Note Tassements » réf. BMN-TUN-CIV-RP-013-P01.3 daté du 22/04/2016.

A. Sensibilité du bâti :

L'étude de sensibilité aux tassements du bâti se base sur les paramètres suivants :

- La nature, les caractéristiques et l'état de la structure.
- Sa fonction.
- Son environnement.

Les critères de classification de la sensibilité aux tassements du bâti sont synthétisés dans le tableau ci-après :

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

Très sensible	Moyennement sensible	Faiblement sensible
Constructions en structure maçonnerie	Constructions en structure béton homogène et revêtement maçonnerie	Terrains vagues et parkings en plein air
Bâtiments publics (école, hôpitaux...) et classés	Constructions antérieures à 1930; fondations sans béton armé	Boxes de garage
Bâti avec plus de 4 niveaux hors nouvelles constructions	Bâti de 2 à 4 niveaux	Bâti à un seul niveau
Bâti avec plus d'un niveau de sous-sol	Bâti avec un seul niveau de sous-sol	Nouvelles constructions
Constructions très larges et très longues sous le tracé tunnel	Constructions de largeur normale	Constructions très étroites
Bâti avec présence de puits	Places, boulevards (zones à forte fréquence)	Constructions en plusieurs entités
Zones de chemin de fer et tramways		Rues (zones à moindre fréquence) / Jardins publics

Tableau 32 : Critères de classification de la sensibilité du bâti (BMN, 2016)

En fonction de leur sensibilité, des valeurs de tassements maximums admissibles sont définies de la manière suivante:

Valeur limite	Tassement absolu	Tassement différentiel
Ouvrages très sensibles	20 mm	1/1000
Ouvrages moyennement sensibles	20 mm	1/750
Ouvrages faiblement sensibles	20 mm	1/500
Voies ferrées	10 mm *si la vitesse du train est inférieure à 40 km/h ²	

Tableau 33 : Tassements maximums admissibles en fonction de la sensibilité du bâti (BMN, 2016)

Le tassement différentiel correspond au gradient entre 2 points de tassements absolus (S sur la figure représentant la méthode de Pack au paragraphe suivant).

La liste des ouvrages classés très sensibles le long du tracé du tunnel est la suivante :

- Fermette 't Hoeveke (Evere).
- Maison Communale de Schaerbeek.
- L'institut Champagnat.
- Autres bâtiments :

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

PK	Adresse	Écart à l'axe du tracé	Zone de criticité	Couverture	Description
1825	Rue Brabant 173	15,3 m	2-3	12,4 m	5 étages avec beaucoup de vitrage
1834	Rue Brabant 175	1,5 m	2-3	12,3 m	5 étages avec beaucoup de vitrage
2000	Rue Vandeweyer 8	2,7 m	1-2	19,1 m	5 étages
2065	Rue Loch 23	3,7 m	2-1-2	20,4 m	6 étages
2345	Rue Rubens 75	13,6 m	2-3	21,7 m	5 étages
2593	Place de Colignon s/n	Sur l'axe	Toutes	19,1 m	Maison Communale de Schaerbeek ⁴
2830	Rue Metsys 24	15,6 m	2-3	15,8 m	5 étages
3324	Boulevard Lambermont 136	21,8 m	2-3	22,6 m	7 étages avec beaucoup de vitrage
3324	Boulevard Lambermont 138	15,3 m	2	22,6 m	7 étages avec beaucoup de vitrages
3324	Boulevard Lambermont 140	1,5 m	1-2	22,6 m	7 étages avec beaucoup de vitrage
3493	Rue Dahlia 4	5,8 m	1-2	18,6 m	5 étages avec beaucoup de vitrage et mitoyen que d'un côté
3527	Eugène Demolder 137	8,1 m	2-3	17,5 m	6 étages
3540	Eugène Demolder 139-141	11 m	2-3	17,3 m	6 étages avec beaucoup de vitrage
3577	Avenue E. Demolder 151	22,2 m	3	16,6 m	5 étages et mitoyen que d'un côté
3813	Place de Riga 39	18,4 m	2-3	16,7 m	Institut Champagnat de Schaerbeek
4017	Rue F. Severin 53	5,9 m	Toutes	18,1 m	5 étages avec beaucoup de vitrage
4558	Rue de Marne 1	6 m	2-3	13,4 m	Fermette't Hoeveke (XVI ^{ème} siècle)
4720	Rue de Stuckens 125	Sur l'axe	Toutes	17,2 m	Académie de Musique d'Evere
4827	Place de la Paix 2-3	4,9 m	1-2	17,9 m	5 étages
5850	Rue du Planeur 4	5,6 m	Toutes	16,7 m	Bâtiment très large de 7 étages

Tableau 34 : Liste des autres bâtiments classés très sensibles (BMN, 2016)

- Les voies ferrées :
 - Ligne 161.
 - Ligne 26.
- Le bassin d'orage de CityDev.

En plus de ces ouvrages classés très sensibles, d'autres bâtiments situés là où la couverture de sol au-dessus du tunnel est faible (inférieur à 1,5 fois le diamètre) ont été listés :

PK	Adresse	Écart à l'axe du tracé	Zone de criticité	Couverture	Description
1706	Rue d'Aerschot 126	2,7 m	1-2	12,7 m	3 étages
1710	Rue d'Aerschot 128	Sur l'axe	1-2	12,6 m	3 étages
1715	Rue d'Aerschot 130	Sur l'axe	1-2	12,5 m	4 étages
1719	Rue d'Aerschot 132	Sur l'axe	1-2	12,5 m	4 étages
1722	Rue d'Aerschot 134	Sur l'axe	1-2	12,5 m	3 étages
1725	Rue d'Aerschot 136	4,5 m	1-2	12,5 m	4 étages et mitoyen que d'un côté
1751	Rue d'Hoogvorst 8	Sur l'axe	1-2	13,6 m	3 étages et mitoyen que d'un côté
1752	Rue d'Hoogvorst 14	Sur l'axe	1-2	13,6 m	2 étages
1790	Rue d'Hoogvorst 17	Sur l'axe	1-2	12,7 m	4 étages
1799	Rue d'Hoogvorst 19	Sur l'axe	1-2	12,1 m	4 étages
1802	Rue d'Hoogvorst 21	1,9 m	1-2	12,2 m	3 étages
1805	Rue d'Hoogvorst 23	8,2 m	2-3	12,2 m	3 étages
1825	Rue Brabant 173	8,6 m	2-3	12,4 m	5 étages
1835	Rue Brabant 175	13,5 m	2-3	12,3 m	5 étages
1839	Rue Brabant 177	10,5 m	2-3	12,2 m	3 étages
1842	Rue Brabant 179	Sur l'axe	Toutes	12,4 m	3 étages

Tableau 35 : Liste des bâtiments classés sensibles (BMN, 2016)

Quelques arbres remarquables ont également été identifiés le long du tracé, la liste de ces arbres est prise au chapitre « Impact sur le patrimoine ».

Plus la profondeur du tunnel est importante par rapport à son diamètre, moins ses effets seront ressentis en surface. Il est donc important de repérer les zones où cette couverture est réduite en raison des impératifs du projet (topographie des lieux, pentes à respecter pour les métros...). Une faible couverture entraîne une plus grande sensibilité du bâti environnant.

B. Estimation des tassements :

Le tassement à attendre en surface le long du tracé du tunnel est estimé selon deux méthodes complémentaires :

- Une méthode analytique (méthode de Peck, voir figure ci-dessous) est utilisée de façon intensive tout au long du tracé (un calcul tous les 100 m). Cette méthode est basée sur l'hypothèse que le volume de la cuvette de tassement en surface (S) est égal au volume de contraction du tunnel (différence entre la section finale du tunnel et la section réellement creusée). La forme de la cuvette (sa profondeur et son étalement) est déterminée en fonction de la nature des terrains traversés et de la méthode de creusement du tunnel. Ce type de calcul analytique demande peu de puissance de calcul et peut facilement être implémenté dans une feuille de calcul (tableur de type Excel). C'est donc un outil efficace pour un calcul répétitif le long du tracé du tunnel.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

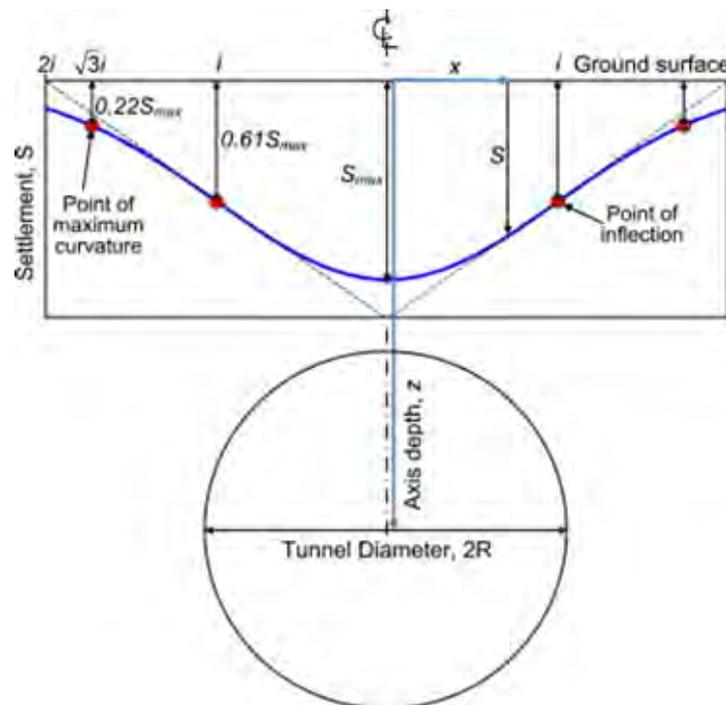


Figure 98 : Estimation du tassement, Méthode Peck – Figure théorique, pour un sol homogène (Tunnelling and Underground Space Technology, 2012)

- Une méthode de calcul numérique est également utilisée pour calibrer la première méthode. Ici, un calcul détaillé (modélisation aux éléments finis, Plaxis) prenant en compte de façon explicite la stratigraphie et les caractéristiques mécaniques des terrains traversés est mis en œuvre. Ce calcul prend également en compte de façon plus explicite le phasage de construction du tunnel ainsi ses caractéristiques mécaniques (par exemple l'épaisseur des parois du tunnel). Ce calcul est réalisé, dans un but de calibration, en quatre endroits du tracé : le puits P5 et les stations Liedts, Tilleul et Bordet. Il est à noter que le calcul ici réalisé est un calcul en deux dimensions.

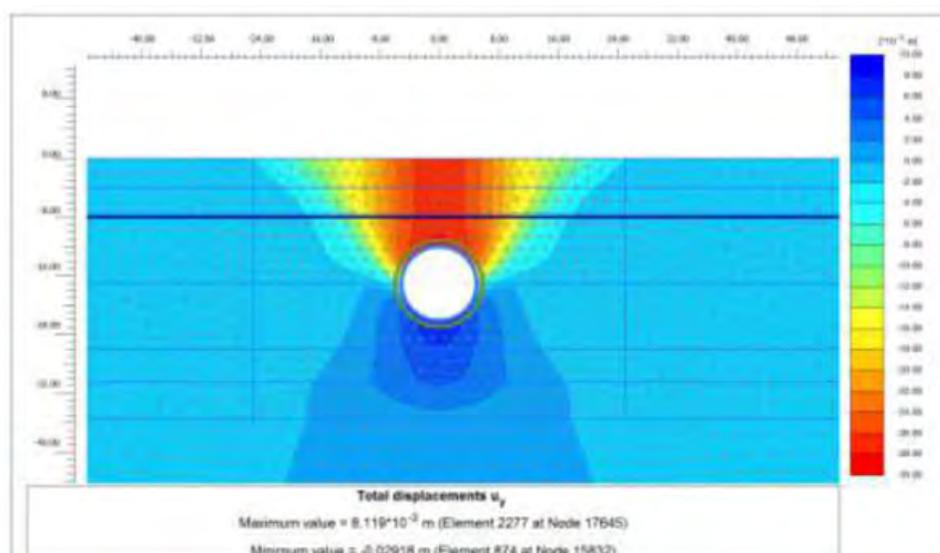


Figure 99 : Exemple d'un résultat Plaxis au droit de la station Liedts (BMN, 2016)

Les résultats des calculs de tassements, via la méthode Peck, sont représentés dans le graphique ci-dessous :

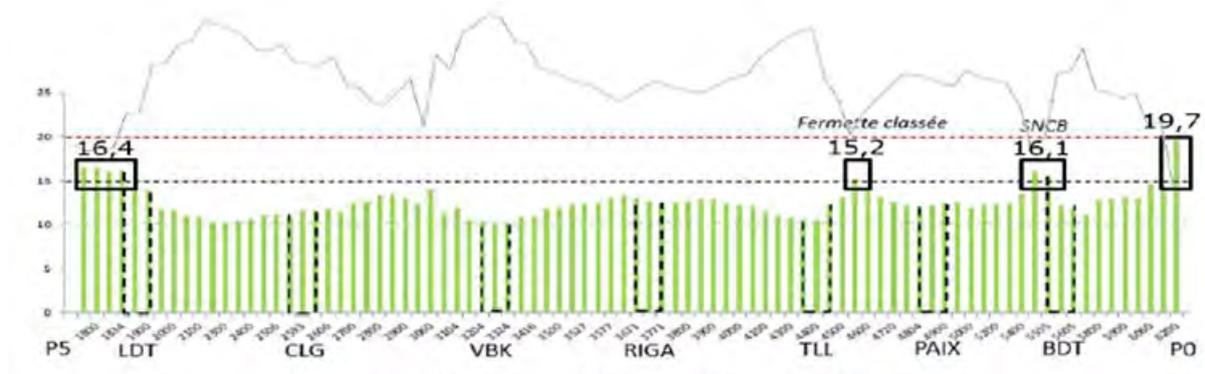


Figure 100 : Valeurs des tassements (en mm) le long du tracé du tunnel (BMN, 2016)

Les estimations des tassements maximums ont été comparées aux critères applicables au projet (20 mm de tassement absolu du bâti existant, 10 mm pour les voies ferrées). D'après les calculs effectués, le critère des 20 mm n'est jamais dépassé. Celui des 10 mm est par contre dépassé au niveau des trois passages du tunnel sous les voies ferrées, qui nécessiteront donc des mesures compensatoires décrites plus loin.

Les rayons d'influence (« largeur » de la cuvette de tassement) conditionnent la zone dans laquelle les tassements différentiels doivent être analysés, ceux-ci pouvant également être très préjudiciables au bâti existant et sont limités à des valeurs inférieures à 1/500 pour les ouvrages faiblement sensibles et à 1/1000 pour des ouvrages très sensibles (1/1000 correspond à un tassement différentiel de 1 mm entre deux points éloignés de 1 m).

Le graphique ci-dessous représente les résultats des calculs des rayons d'influence le long du tracé du tunnel :

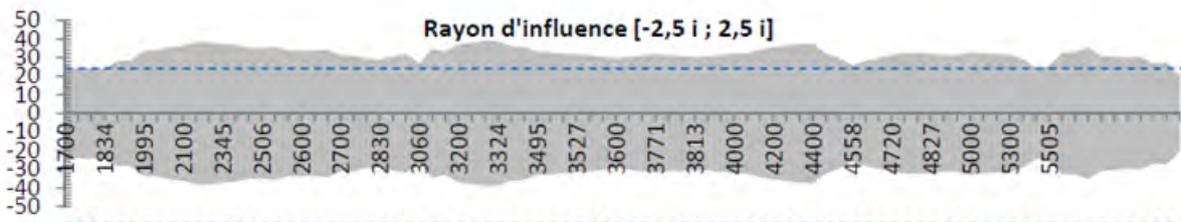


Figure 101 : Valeurs des rayons d'influence (en m) le long du tracé du tunnel (BMN, 2016)

Ces rayons sont compris entre 20 m au droit du P0, et 38 m aux abords de Verboekhoven. Le rayon moyen calculé est de 32 m.

6.4.4.6. Conformité du réseau de distribution en cas d'incendie

Voir livres stations

6.4.5. Mesures mises en œuvre par le demandeur en vue d'éviter, supprimer ou réduire les incidences négatives sur le sol et les eaux

6.4.5.1. Pollution

Le demandeur a réalisé :

- Un Standard Technisch Verslag, réalisé par Envirosoil en 2019 ;
- Un Rapport de gestion des terres, réalisé par Envirosoil en 2019.

Ces études ont permis de mieux appréhender la qualité sanitaire du sol et des eaux souterraines avant les travaux.

6.4.5.2. Eaux souterraines

Les mesures prévues par le demandeur en vue de réduire les incidences négatives sur les eaux souterraines sont :

- D'un point de vue quantitatif,
 - La mise en œuvre de parois moulées ancrées dans un horizon moins perméable (aquitard) en vue de minimiser les débits de drainage (contournement) et leurs effets périphériques induits par le rabattement ;
 - la poursuite des mesures piézométriques sur les piézomètres existants en périphérie du projet ;
 - le monitoring des débits des eaux de drainage.
- D'un point de vue qualitatif :
 - Un monitoring périodique de la qualité des eaux de drainage au droit des stations et du tunnel en vue de vérifier leur état de pollution et leur fluctuation ;
 - Dans le permis tel qu'étudié, le demandeur a initialement proposé de rejeter les eaux souterraines directement dans le réseau d'égouts afin d'acheminer les eaux directement vers une unité de traitement (couvrant toute éventualité en cas de pollution).

6.4.5.3. Tassements

Parmi les mesures prévues par le Demandeur pour la prévention des dégâts dus aux tassements et pour la remédiation de ceux qui pourraient être évités notons :

- Un état des lieux des structures existantes (dimensions, présences de locaux souterrains, natures des matériaux, présence de dégradations préexistantes...).
- Un monitoring, c'est à-dire un suivi des tassements et des déformations des terrains et bâtiments, en temps réel. Ce monitoring permet une comparaison des déformations

mesurées avec les seuils de vigilance et d'alerte définis pour les différentes structures concernées.

- Des mesures de confortement et de renforcement : dans le cas où les tassements prévisibles dépassent les critères définis, ou dans le cas où 70% des tassements (absolus ou différentiels) sont mesurés pendant le chantier (avant, pendant ou après le passage du tunnelier), différentes mesures doivent être prises pour éviter la dégradation de la structure concernée. Parmi celles-ci :
 - Confortement a priori des terrains par injections (amélioration et/ou homogénéisation des caractéristiques mécaniques des terrains).
 - Renforcement et/ou protection a priori de la structure de l'ouvrage existant (réalisation d'un écran de protection entre le tunnel et l'ouvrage, chaînage des fondations, raidissement de la structure par ceinturage ou tirantage, reprise en sous-œuvre des fondations).
 - Injections de compensation : réalisation d'injections le terrain visant à compenser (par expansion du terrain injecté) en temps réel les tassements engendrés par le creusement du tunnel.
 - Renforcement des voies ferrées : dans le cas où il n'est pas possible d'arrêter localement le trafic ferroviaire lors du passage du tunnelier sous les voies ferrées (les tassements étant par la suite compensés par du bourrage de ballast sous les voies avant reprise du trafic), il est possible de renforcer celles-ci, notamment par la réalisation d'une voute parapluie (fonçage de tubes) sous les voies à partir de puits provisoires creusés à proximité de la zone de croisement
- Adaptation des méthodes de construction : pour les passages délicats, il est important que la maintenance du tunnelier ait été faite avant d'aborder ces zones de façon à éviter les arrêts de creusement. Il est également possible d'adapter les paramètres de creusement et/ou la vitesse de creusement.

6.4.6. Recommandations sur le projet, les alternatives et les variantes

Au terme de cette évaluation les recommandations relatives aux aspects **eaux souterraines** sont les suivantes (ces recommandations globales sont valables tant pour le scénario monotube que pour le scénario bitube ainsi que tant pour les stations que les tunnels):

En ce qui concerne le suivi piézométrique :

- Faire une synthèse des piézomètres existants dans la périphérie du projet et identification des niveaux de nappe équipés pour chacun de ceux-ci ;
- Vérifier si certains piézos existants sont situés dans la zone d'emprise du chantier et seront affectés par celui-ci et si nécessaire les substituer par de nouveaux piézos ;
- Le cas échéant, et après examen du réseau existant, compléter celui-ci, si nécessaire, par des piézomètres complémentaires de manière à documenter les zones non actuellement couvertes (par exemple les zones interstations) et les différents niveaux aquifères concernés par le projet ; on peut ainsi recommander qu'au niveau de chaque

station, à son aval et à son amont, soient opérationnels au moins un doublon, voire un triplet de piézomètres contigus équipés au niveau des différents aquifères situés sur la hauteur rabattue ;

- Poursuivre le monitoring continu des niveaux piézométriques pour l'ensemble des piézomètres présents dans la périphérie directe du projet et les piézomètres complémentaires ; ce suivi doit couvrir la période actuelle pré-chantier (background) ; la période de chantier (période transitoire) et la période d'exploitation (période d'équilibre post-chantier). Le suivi est à opérer avec des loggers automatisés. Ce suivi permettra de quantifier l'impact du projet et de valider les présentes conclusions.

En ce qui concerne les effets barrages Pour la station Bordet

- L'évaluation de l'impact identifié dans le cadre du présent document peut être considéré comme conservatif. Il est recommandé de documenter de manière plus détaillée les différents niveaux de nappe présents à proximité de la station Bordet et notamment en vérifiant, pour les piézomètres existants, les niveaux équipés auxquels il est fait référence pour vérifier cette situation ;
- Procéder dès que possible à l'implantation d'au minimum un doublon de piézomètres dans la zone directement amont à la future station Bordet, l'un serait équipé dans la partie supérieure des sables Bruxellien (en première approche vers les cotes 42 à 45 m DNG au-dessus d'un petit aquitard limoneux), l'autre serait équipé plus bas (en première approche vers les cotes 30 à 35 m DNG en dessous de celui-ci) ;
- Procéder à un monitoring continu de l'évolution piézométrique dans cette zone (loggers automatiques) ;

Pour toutes les stations :

La mise en œuvre de dispositifs de passage de nappe n'est pas exclue à ce stade. En vertu du principe de précaution et en l'absence d'étude complémentaire qui permettrait de mieux évaluer le risque de remontée de nappe, des dispositifs de passage de nappe, combinés à un monitoring piézométrique devront être prévus lors de l'étude d'exécution. La maintenance de ces dispositifs devra également pouvoir être assurée pour prévenir tout risque de colmatage des drains.

Différentes options de passage de nappe peuvent être étudiées, pour autant que leur nécessité soit confirmée lors des études complémentaires le cas échéant:

- soit un passage de nappe à travers la station en créant un chemin préférentiel via des canalisations passant dans la station (techniques assez invasives cependant),
- soit un passage de nappe avec des drains périphériques extérieur, passage sous les tunnels et zones de répartition côté aval, dans cette option un chemin préférentiel se ferait à l'extérieur de la station par augmentation de la perméabilité dans la zone encaissant directement la station.

Ces aspects doivent être examinés lors des études d'exécution. Ce type de dispositif a pour but de diminuer l'effet barrage de la station et de rééquilibrer les niveaux de nappe amont plus bas que ceux engendrés par les murs de confinement.

En ce qui concerne le suivi des débits :

- Effectuer un monitoring continu des débits des eaux de drainage, au niveau de chaque station, de chaque tronçon de tunnel, des deux stations de relevage intermédiaires (P0 et Verboekhoven) et des deux stations de relevage principales (P5 et Tilleul) ; ceci afin d'évaluer leur stabilité, leur adéquation avec les fluctuations saisonnières et l'absence d'apparition de conditions anormales (qui seraient des indices d'apparition de défaut d'étanchéité avec le temps et justifieraient d'éventuelles mesures de remédiation avec le temps).
- Un suivi des débits totaux amenés aux deux exutoires est aussi recommandé (eau de drainage + eaux pluviales) afin de vérifier la conformité aux autorisations de rejet qui seront données.

En ce qui concerne l'impact du rabattement sur les tassements au droit des stations :

- Affiner l'approche d'évaluation de l'impact du rabattement sur les tassements qui a été faite, en effet l'approche Terzaghi (Artesia) est considérée comme très sécuritaire et a mené à des conclusions relatives aux CPT les plus défavorables. Il avait été identifié que potentiellement, sur base des CPT les plus critiques, les rabattements à proximité des stations Riga et Tilleul pouvaient potentiellement dépasser les seuils de rabattement admissibles (celui qui induit un tassement supérieur à 20 mm). L'approche est à réaliser sur base d'un calcul numérique et d'une caractérisation géotechnique (CPT) dans la zone de rabattement maximum du côté aval des stations concernées.
- S'il se confirmait que le rabattement est de nature à induire, localement (sur une zone limitée) un tassement pouvant excéder la valeur admissible, il serait nécessaire d'envisager la mise en œuvre d'une recharge locale de l'aquifère pour limiter localement l'effet du rabattement (spécifique à Riga et Tilleul).
- Le cas échéant, une identification de l'horizon cible est à opérer et ainsi qu'un dimensionnement du dispositif de réinjection (extension en surface, profondeur, débit). Dans cette optique il est recommandé d'utiliser le modèle Artesia pour évaluer l'effet de remontée et affiner les débits à recharger.

En ce qui concerne le modèle hydrogéologique existant :

- Affiner la calibration existante sur base des piézomètres complémentaires éventuels.
- Affiner la calibration sur base de quelques essais de pompage en régime transitoire (avec notamment identification de la perméabilité et de la conductivité hydraulique).
- Effectuer les modélisations complémentaires suivantes :
 - Une modélisation de la situation définitive en période de hautes eaux (avec pour but maximalisation du diagnostic de remontée) ;
 - Une modélisation de la situation définitive en période de basses eaux (avec pour but maximalisation des effets périphériques dus au rabattement) ;

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

- A posteriori une modélisation de retrofitting du modèle tenant compte des observations piézométrique et des chroniques de débits réellement observés après une année d'exploitation.

En ce qui concerne la conception des stations de pompage / relevage

- Vérifier que le concept hydraulique des stations prévoit une capacité suffisante de collecte des vidanges des circuits de relevage (en cas d'arrêt, de maintenance ou de panne) permettant la récupération des eaux de vidange et le maintien du pompage des eaux de drainage pendant une durée suffisante à déterminer en fonction des contraintes d'exploitation. Vérification à effectuer et le cas échéant intégration au design.

En ce qui concerne la qualité des eaux rejetées et le traitement des eaux de drainage :

- Effectuer un suivi de la qualité des eaux drainées **au droit de chaque station en phase 1 de traitement (station pilote)** selon une fréquence minimale bimestrielle. Cette période de monitoring permettra d'objectiver le design et le dimensionnement de la station définitive à mettre en œuvre par la suite vu la méconnaissance des charges polluantes drainées en régime de rabattement. Ce suivi portera sur les paramètres soumis à autorisation de rejet avec au minimum : température, pH, conductivité électrique, DBO5, DCO, COT, Matières en suspension, azote total, phosphore total, BTEX, huiles minérales, HAP, solvants chlorés (dont tétrachloroéthylène et trichloroéthylène), métaux lourds, nitrates.
- Utilisation de ces données pour proposer un traitement adapté en **situation de traitement définitif – phase 2** ; étude d'exécution à soumettre à Bruxelles Environnement. Maintien du process phase 1 (moyennant adaptation des débits), allègement du process ou renforcement de celui-ci.
- Sur base des résultats de suivi de la phase 1 étudier la pertinence d'opérer un traitement spécifiques des nitrates.
- Effectuer un suivi de la qualité des eaux drainées vers chaque exutoire en phase 2 selon une fréquence minimale semestrielle sur la liste des paramètres qui seront soumis à l'autorisation de rejet.
- Que ce soit en phase 1 ou en phase 2 monitoring du fonctionnement de la station de traitement des eaux de drainage en complétant le monitoring des eaux d'entrée (voir ci-dessus) par un monitoring des eaux après traitement.
- Maintenance des installations de traitement : décolmatage des filtres à sable, évacuation des hydrocarbures séparés, suivi de l'état de saturation des colonnes de charbon actif et le cas échéant remplacement des charges à l'apparition des percées.

En ce qui concerne le puits présents à proximité de la station Paix (captage 5240)

- Identification du propriétaire et de l'utilisation de l'ouvrage ;

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

- Si nécessaire en fonction de la situation et de l'emprise des travaux, procédure d'abandon (comblement du puits conformément aux règles de l'art) et le cas échéant indemnisation du propriétaire.

En ce qui concerne l'impact sur l'aquifère du Landénien:

A ce stade du projet, il n'y a pas d'ouvrages qui nécessitent un rabattement dans l'aquifère du Landénien. Les ouvrages les plus profonds se limitent à formation de Saint-Maur.

Cependant, il est recommandé de confirmer l'absence d'ouvrages et/ou de rabattements dans l'aquifère du Landénien lors des études d'exécution du projet. Lors de la demande rabattement, des pièces justificatives confirmant l'absence d'impact sur le Landénien devront également être fournis à Bruxelles Environnement.

Une attention particulière devra être portée sur ce point puisqu'aucun impact significatif n'est permis dans le Landénien.

En ce qui concerne la pollution du sol

- Mettre en place une procédure pour le suivi de la qualité des terres de déblais en cours de travaux
- Rester attentif quant à la présence d'indices organoleptiques de pollution (odeurs) au cours de travaux et réaliser des analyses de contrôle en cas de suspicion de pollution.

6.4.7. Tableau de synthèse des recommandations

EAUX SOUTERRAINES	
Thématique	Recommandations
Niveaux de nappe le long du tracé	Synthèse / état des lieux du réseau piézométrique existant – vérification des niveaux aquifères équipés et si nécessaire mise en œuvre de nouveaux piezomètres (au minimum clusters amont et aval aux stations et couverture des zones interstations peu documentées).
	Vérification si des piézomètres existants peuvent être affectés par l'emprise du chantier et si nécessaire les substituer. Le cas échéant procédure d'abandon des piézomètres dans les règles de l'art (cimentation).
	Monitoring continu avec loggers automatiques de l'ensemble des piézomètres (avant, pendant et après chantier en situation définitive).
Réserve non saturée potentiellement insuffisante à la Station Bordet	Eclaircir la différence des niveaux piézométriques selon les sources (différents niveaux aquifères ?).
	Implanter un doublon piézométrique (équipé à différents niveaux aquifères et monitoring des niveaux)
	Si la réserve non saturée se confirme insuffisante, étudier la mise en œuvre d'un passage de nappe au droit de la station Bordet pour annuler l'occurrence d'un effet barrage.
Effet barrage	En l'absence d'étude complémentaire qui permettrait de mieux évaluer le risque de remontée de nappe, mise en place de dispositifs de passage de nappe, combinés à un monitoring piézométrique
Suivi des débits	Monitoring continu des débits de drainage au niveau de toutes les stations, des tronçons de tunnel, des stations de relevage intermédiaires (2) et principales (2) – vérification du caractère stable outre les fluctuations saisonnières. En cas d'anomalies éventuelles recherche de la cause et remédiation.
	Monitoring des débits rejetés aux exutoires (eaux de drainage + eaux pluviales).
Impact du rabattement sur les tassements	Raffiner l'approche géotechnique sur l'impact du rabattement sur les tassements (Terzaghi étant trop conservateur) avec un focus sur les stations Riga et Tilleul, côté aval directement contigu. Vérifier, sur cette base, si le rabattement attendu est de nature à causer un tassement non admissible (> 20 mm).
	Si le seuil admissible est dépassé, intégrer au dispositif la mise en œuvre d'une recharge aquifère locale. Ceci implique une identification de l'horizon cible, de l'étendue du dispositif en fonction de la place disponible et une estimation du débit de recharge optimal.
	Dimensionnement et vérification des paramètres de design à l'aide de la modélisation hydrogéologique existante. Détermination du débit optimal pour limiter le rabattement à la valeur seuil tout en ne causant pas une remontée inacceptable.
	Sur base du modèle existant : affiner la calibration du modèle sur base des nouveaux piézomètres et en régime transitoire.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

Mise à disposition d'un outil de modélisation prédictive et de suivi	Modélisations complémentaires : situations définitives en période de hautes eaux et de basses eaux + modélisation de retrofiting du modèle sur base des gammes de débit réellement observées.
Stations de pompage / relevage	Vérifier que le concept hydraulique des stations prévoit une capacité suffisante de collecte des vidanges des circuits de relevage (en cas d'arrêt, de maintenance ou de panne) permettant la récupération des eaux de vidange et le maintien du pompage des eaux de drainage pendant une durée suffisante. Si nécessaire adaptation du design pour prendre en compte cet aspect.
Qualité et traitement des eaux rejetées	Mise en œuvre d'un traitement des eaux de drainage pour une phase 1 – station pilote, au niveau de chaque station, pendant le chantier et une première année d'exploitation. Processus unitaires proposés : séparation hydrocarbures, filtration sur sable ou équivalent et adsorption sur charbon actif.
	Suivi minimum bimestriel de la qualité des eaux drainées au droit de chaque station durant cette phase pilote (phase 1). Déterminer l'évolution des charges polluantes. Suivi des eaux traitées au minimum à la même fréquence + suivi de réglage de la station de traitement.
	Sur base du suivi de la phase 1, conception de la station définitive à mettre en œuvre au niveau des relevages principaux (station exutoires P5 et Tilleul). Mise en œuvre et suivi semestriel minimal.
	Sur base du suivi de la phase 1 étudier la pertinence de prévoir un traitement spécifique sur les nitrates en accord avec Bruxelles Environnement.
Maintenance continue des installations de traitement : décolmatage des filtres, évacuation des hydrocarbures et déchets, remplacement des charges de charbon actif quand saturées.	
Puits domestique à proximité de la station Paix (captage 5240)	Identification du propriétaire, de l'utilisation de l'ouvrage et si nécessaire procédure d'abandon et d'indemnisation.
Impétrants	Sur les 30 m de part et d'autre du tracé tunnel, toutes les canalisations d'eau en fonte grise de Vivaqua doivent être modifiées par des canalisations en acier ou en PEHD. Ces modifications doivent être réalisées avant le début de la construction du tunnel.

6.4.8. Conclusion en matière de sols et eaux

Potentiellement, le projet est susceptible d'impacter les eaux souterraines de deux façons :

- Par la présence du revêtement béton du tunnel mais également des boîtes de la station, et particulièrement des parois moulées. Ces éléments peuvent modifier l'écoulement naturels de la nappe et, dans le pire des cas, créer un effet barrage qui pourrait engendrer des remontées de nappe du côté amont.
- Par le rabattement du niveau de la nappe via le réseau de drainage du tunnel et des stations.

On notera que la mise en place des stations et du tunnel est susceptible de créer potentiellement à sa périphérie des **effets antagonistes qui se superposent** : d'une part un **rabattement extérieur à l'enceinte** du au drainage à l'intérieur de celle-ci et d'autre part un **effet barrage avec remontée de nappe du côté amont**.

Une modélisation 3D hydrogéologique a permis d'évaluer l'impact du projet sur les eaux souterraines. Le débit total drainé par l'ouvrage (tunnels + stations) a été estimé à environ 38 m³/h, avec 97% (37 m³/h) qui serait due aux stations et seulement 3% (1 m³/h) due au tunnel.

La modélisation a mis en évidence que les rabattements maximum (à l'extérieur des murs emboués) sont contigus aux bordures nord (aval) des stations. Mis à part pour le dépôt de Haren, le différentiel entre les niveaux amont et aval oscille entre 0,4 et 1,8 m.

En ce qui concerne l'extension des zones de rabattement on peut considérer les distances approximatives suivantes pour ce qui concerne leur extension maximale transversalement au tronçon :

Vers l'amont (sud-est) :

- La courbe isorabattement de 1 m est située à environ 400 m du tronçon
- La courbe isorabattement de 0,5 m est située à environ 1000 m du tronçon
- La courbe isorabattement de 0,1 m est située à environ 2000 m du tronçon

Vers l'aval (nord-ouest) :

- La courbe isorabattement de 1 m est située à environ 300 m du tronçon
- La courbe isorabattement de 0,5 m est située à environ 800 m du tronçon
- La courbe isorabattement de 0,1 m est située à environ 1200 m du tronçon

Une simulation complémentaire (scénario V2) a été effectuée pour évaluer l'effet barrage des ouvrages (en prenant des hypothèses plus conservatrices vis-à-vis de l'effet barrage). Les résultats de cette simulation montrent des remontées de nappe du côté amont (sud). Les ordres de grandeur de cette remontée restent cependant **très modérés**, ils varient de 0,3 m (Paix, Verboekhoven) à 0,7 m (Colignon, Riga, Tilleul, Bordet).

L'effet de barrage / remontée n'apparaît qu'au niveau des stations, il a tendance à se dissiper latéralement vu que les tronçons de tunnel n'ont pas tendance à créer de barrage significatif (passage libre de la nappe sous les tunnels).

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

Le niveau statique très haut pris en compte par BMN dans sa modélisation du drainage permanent dans la station Bordet, engendre un effet barrage qui pourrait donner lieu à une remontée d'eau au-dessus du niveau du sol dans les environs immédiats de la station Bordet côté amont. On rappellera que selon les sources différentes fournies par le demandeur, les niveaux statiques relatés à Bordet diffèrent significativement. On ne peut donc exclure une remontée non acceptable dans cette zone d'où la nécessité d'effectuer des études complémentaires au droit de la station Bordet (voir recommandations).

Concernant les autres stations, bien que sur base des données existantes la réserve non saturée apparaît suffisante y compris dans une optique la plus sécuritaire (modélisation avec les hypothèses V2), la mise en œuvre de dispositifs de passage de nappe n'est pas exclue à ce stade. En effet, actuellement il n'existe pas de seuil maximum admissible pour les remontées de nappe. Cette décision est évaluée au cas par cas par Bruxelles Environnement, notamment en fonction de l'ensemble des projets autres que Métro-Nord et/ou projets à venir, sortant du cadre de la présente étude.

Le creusement au tunnelier n'a pas (ou très peu) d'impact sur le niveau de la nappe puisqu'aucun rabattement n'est nécessaire lors du creusement, le cas échéant le travail au tunnelier se fait sous le niveau de nappe.

Au niveau des captages référencés dans la zone d'influence du projet, un seul captage a été identifié directement contigu à une des stations, il s'agit du captage_5240 (Object_Id 372 – Id_ouvrage 94) situé à environ 20 m de la boîte principale de la station Paix (Place de la Paix). Ce captage devra probablement être abandonné en raison de sa proximité à la station. Les niveaux de rabattement estimés sur les autres captages recensés dans la zone d'influence ne sont, en première approche, pas de nature à affecter leur productivité, à menacer leur exploitation et à induire la mise en œuvre de mesures correctives.

Au niveau des systèmes géothermiques, 5 ont été recensés à l'intérieur du périmètre d'isorabattement de 0,1 m. Aucun de ces systèmes ne sont impactés de manière significative par la mise en œuvre du projet Metro Nord.

Concernant la pollution des sols, le tunnel est creusé à une profondeur moyenne de 23m. Cette grande profondeur d'excavation minimise grandement les risques de présence de terres polluées :

- La présence de remblais pollué en métaux lourds et en HAP peut notamment être totalement écartée.
- La présence de pollutions du sol en huiles minérales et BTEX peut également être raisonnablement écartées lorsque le tunnel est localisé à plus de 15m de profondeur au droit de formations semi-perméables (formation de Tielt et de Kortijk). Au droit des formations perméables (formation de Bruxelles et dépôt quaternaires) et pour les sections moins profondeur, le risque de pollution ne peut être écarté.
- La présence de pollution du sol en solvants chlorés est finalement possible au droit de l'ensemble du tracé. Les solvants chlorés sont en effet caractérisés par une forte densité et ont, de ce fait, tendance à migrer verticalement dans les sols. Par ailleurs, la migration de ces pollutions peut être très hétérogène en fonction de la perméabilité des sols ce qui peut engendrer l'apparition de "poches" de polluants à des distances plus ou moins grandes des sources de pollutions et à des profondeurs importantes.

Concernant la gestion des déblais du tunnel, le volume total de déblai est estimé à +-472.000 m³. Les filières de valorisation dépendent de la qualité des terres et de la région où les terres seront évacuées. À ce stade de l'étude il est impossible de se prononcer sur ce sujet car le demandeur ne sait pas encore nous dire si les terres seront valorisées à Bruxelles ou ailleurs en Belgique (il y a plusieurs sites de grande ampleur à remblayer en RW mais quid d'ici quelques années) ou totalement envoyées vers les Pays-Bas.

Le demandeur devra s'assurer au moment de la réception des offres des entreprises que la filière en aval soit opérationnelle, dispose des installations et infrastructures de capacité suffisante et règlementée pour pouvoir gérer les terres issues du chantier du métro.

Au stade actuel le demandeur doit déjà travailler sur la sécurisation juridique des installations requises et des acteurs potentiels dans la gestion de ces terres.

Il n'y a pas d'impétrants à dévier au droit de l'emprise chantier du tunnel. Sur les 30 m de part et d'autre du tracé tunnel, toutes les canalisations d'eau en fonte grise de Vivaqua doivent être modifiées par des canalisations en acier ou en PEHD. Ces modifications doivent être réalisées avant le début de la construction du tunnel.

Plusieurs ouvrages classés sensibles, voire très sensibles, ont été identifiés le long du tracé du tunnel (bâtiments classés, voies ferrées, ...).

Les estimations des tassements maximums ont été comparées aux critères applicables au projet (20 mm de tassement absolu du bâti existant, 10 mm pour les voies ferrées). D'après les calculs effectués, le critère des **20 mm** n'est **jamais dépassé**. Celui des **10 mm** est par contre **dépassé au niveau des trois passages du tunnel sous les voies ferrées**, qui nécessiteront donc des mesures compensatoires.

Les rayons d'influence du tunnel sont compris entre 20 m au droit du P0, et 38 m aux abords de Verboekhoven. Le rayon moyen calculé est de 32 m.

6.5. Faune et flore

Sans objet dans le cadre du livre tunnel

6.6. Qualité de l'air

Sans objet dans le cadre du livre tunnel (voir Safety pour les fumées, voir Livre station pour qualité de l'air)

6.7. Energie

Les consommations d'énergie de traction lors de l'exploitation de la future ligne ont été estimées sur base d'une méthodologie proposée par la STIB, consistant à utiliser les consommations mesurées pendant l'année 2019 au niveau des postes de redressement d'un tronçon du réseau existant présentant des caractéristiques similaires.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

Pour ce faire, le tronçon de la ligne 1, compris entre les stations Mérode et Stockel a été considéré, pour les raisons suivantes :

- Cette ligne est principalement empruntée par des rames M6, dont les consommations sont comparables aux rames M7 desservant la future ligne ;
- Le tronçon Mérode-Stockel se situe en bout de ligne, à l'instar de la future ligne 3 ;
- Les deux lignes présentent un profil topographique similaire, moins vallonné que celui des sections centrales du réseau.

Il s'agit ensuite d'adapter les consommations de ce tronçon Mérode-Stockel en fonction de :

- la **fréquence** : toutes les 5 minutes en heure de pointe pour le tronçon Mérode-Stockel (12 véhicules par heure), tandis que l'objectif à l'horizon 2030 est toutes les 3 minutes pour la future ligne 3 (20 véhicules par heure).
- la **distance** : la future ligne présentera une longueur de 4,5 km, tandis que le tronçon Mérode-Stockel est de 6,5 km.

Dès lors, la relation suivante a été appliquée :

$$CONS_{tr\ Nord-Bordet} = CONS_{tr\ Merode-Stockel} \cdot \frac{d_{tr\ Nord-Bordet}}{d_{tr\ Merode-Stockel}} \cdot \frac{N_{vh\ Nord-Bordet}}{N_{vh\ Merode-Stockel}} = 8.660.000\ kWh$$

Où :

- $cons_{tr\ Nord-Bordet}$: consommations du tronçon Nord-Bordet, évaluées à 7.500.000 kWh (somme des consommations des postes de redressement Pauwels, Ombrages, Groenenberg, Saint-Luc et Saint-Luc Recup), comprenant les consommations des auxiliaires (7.000.000 kWh hors auxiliaires) ;
- $d_{tr\ Nord-Bordet}$ et $d_{tr\ Merode-Stockel}$: distances des tronçons Nord-Bord et Merode-Stockel ;
- $N_{vh\ Nord-Bordet}$ et $N_{vh\ Merode-Stockel}$: nombre de véhicules circulant par horaires sur les tronçons Nord-Bordet et Merode-Stockel.

En tenant compte des auxiliaires, les consommations de traction totales du réseau actuel hors dépôts se sont élevées à 86.000.000 kWh en 2019. En faisant l'hypothèse d'une évolution constante de ces consommations à l'horizon 2030, les consommations supplémentaires dues à l'exploitation du tronçon Nord-Bordet représenteront environ 9% des consommations du réseau.

En considérant un scénario d'un métro toutes 2 minutes en 2040 durant toute l'exploitation, les consommations liées à l'exploitation du tronçon Nord-Bordet sont estimées à 13.000.000 kWh. En considérant cette fois une exploitation plus soutenue en heures de pointe (toutes les 1,5 minutes pendant 2 fois 2 heures), ces consommations passent à 15.600.000 kWh.

6.7.1. Récupération de l'énergie de freinage

L'électricité est fournie à 900 V et comme courant continu par un rail séparé, souvent appelé « le troisième rail ». Le troisième est placé le long des rails principaux et se trouve à l'extérieur du faisceau - soit à gauche, soit à droite, selon des contraintes extérieures (présence des aiguillages, présence d'un chemin de service,...).

Le contact électrique entre le métro et le troisième rail est assuré par un collecteur, également appelé à la STIB un frotteur. Le captage entre le frotteur et le troisième rail est fait par le dessous. Ceci permet d'améliorer la sécurité des travailleurs en fixant une couverture isolante au-dessus du troisième rail.

Le frotteur se trouve de chaque côté du métro pour capter le courant du troisième rail. Le contact entre le frotteur et le troisième rail est assuré par un système de ressorts dans le frotteur. Des rampes dans le troisième rail permettent aux frotteurs du métro de quitter le troisième rail facilement et de s'engager doucement sur le suivant.

Les roues sont composées d'un conducteur électrique permettant au courant de les traverser et d'atteindre les rails principaux.

Les métros circulent à l'aide d'un moteur électrique alimenté par des sous-stations placées le long des voies, par l'intermédiaire du 3^e rail parcourant la totalité des différentes lignes du réseau. Les rames les plus récentes peuvent freiner de manière électrique. Cette technologie permet de récupérer l'énergie cinétique du véhicule et de la convertir en électricité.

Le principe général consiste à réutiliser dans un premier temps l'énergie récupérée pour alimenter les équipements auxiliaires (chauffage, climatisation, écrans, ...) et de renvoyer l'énergie restante sur le réseau pour en faire bénéficier un autre véhicule en phase d'accélération situé à proximité.

Ces transferts d'énergie entre métros dépendent de différents paramètres, tels que la densité du trafic, la distance entre stations, la topographie, ... Ils représentent environ 20 à 30% de la consommation totale.

Il existe plusieurs systèmes de récupération de l'énergie de freinage :

- Les **systèmes de stockage embarqués** : dans le cas où elle ne peut pas être récupérée par un autre véhicule, l'énergie de freinage est transmise à un système de stockage lié au véhicule (généralement situé sur le toit) et alimente celui-ci lorsqu'aucun autre véhicule en phase d'accélération ne se trouve à proximité. L'énergie stockée alimente alors le véhicule lors des phases d'accélération ultérieures ou ses équipements auxiliaires.
- Les **systèmes de stockage fixes** : ceux-ci sont situés le long des voies et permettent de récupérer l'énergie des véhicules en phase de freinage et de la transmettre aux véhicules en phase d'accélération ;
- Les **systèmes fixes avec renvoi vers le réseau** : l'énergie récupérée n'est pas stockée mais est réinjectée vers le réseau pour être utilisées pour d'autres applications, telles que les équipements des stations. Il s'agit d'utiliser ici une sous-station réversible, permettant de convertir le courant continu récupéré en courant alternatif, pouvant être utilisé pour l'alimentation de ces équipements, ...

Chaque système présente des avantages et des inconvénients.

La question de la récupération de l'énergie de freinage a été considérée par la STIB, notamment lors du projet européen Ticket to Kyoto, visant à réduire les émissions de CO₂ dans les transports publics et qui s'est déroulé de 2010 à 2014.

Au niveau de la STIB, toutes les rames de métro ont la capacité de récupérer l'énergie de freinage, cette capacité étant plus élevée dans les rames M6 du constructeur espagnol CAF, les plus récentes.

La technologie des **systèmes fixes avec renvoi vers le réseau** a été investiguée par la STIB : bien que plus complexe à mettre en œuvre, la réinjection sur le réseau 11 kV de l'énergie récupérée à l'aide d'une sous-station réversible a été jugée intéressante et rentable. La STIB dispose en effet de son propre réseau de distribution et de transformation électrique. A la suite de simulations théoriques, un appel à prototypes a été lancé. Des tests grandeur nature ont commencé en 2016, après le placement de 7 sous-stations réversibles réparties sur le réseau existant en fonction des espaces disponibles. Les réseaux électriques existants n'ont en effet pas été conçus en tenant compte d'une possible récupération d'énergie. La totalité du potentiel n'a en outre pas été exploitée, les emplacements choisis ont en effet été déterminés de façon à maximiser la récupération au regard des coûts et de la performance.

A la suite d'un incendie au niveau de l'une d'elles fin 2017, l'ensemble des 7 sous-stations réversibles a été mis à l'arrêt et la phase de test suspendue jusqu'à ce jour.

D'après les informations obtenues auprès de la STIB, les récupérations d'énergie au niveau d'une sous-station réversible ont pu être mesurées pendant cette phase de test et étaient comprises entre 809 et 1.533 kWh par jour. Ces valeurs permettent d'estimer un ordre de grandeur des économies annuelles réalisées, comprises entre 2.100.000 kWh et 3.900.000 kWh. Celles-ci représentent entre 2 et 4% des consommations liées à la traction (s'élevant à 93.000.000 kWh en 2017, l'année durant laquelle les tests ont été effectués). Ces chiffres ne reflètent toutefois pas la totalité du potentiel du réseau complet puisque seules 7 sous-stations ont été mises en œuvre.

Au niveau de la future ligne, des sous-stations réversibles pourraient être installées, à condition que les espaces nécessaires pour les accueillir et les raccorder aient été prévus dans les stations. L'emprise au sol de telles sous-stations est de l'ordre de 2 x 4 m. Il n'est en outre pas envisageable d'implanter une telle sous-station visant à récupérer de l'énergie en provenance de la future ligne au niveau du dépôt. Afin de garantir le plus haut niveau de sécurité électrique, celui-ci dispose de sa propre sous-station de traction, indépendante électriquement du reste du réseau.

Par ailleurs, le gain relatif issu d'une telle récupération risque de diminuer à l'avenir : le freinage des rames de métros sera en effet davantage optimisé, en raison de l'automatisation du métro, et les pertes correspondantes diminuées.

Enfin, la **récupération de l'énergie et la transmission de celle-ci vers un métro en phase d'accélération** a été écartée car peu évidente à mettre en place sur un réseau de métro tel que celui de la STIB. Ce dernier étant électriquement très segmenté, les métros se retrouvent souvent seuls sur leur inter-station, rendant impossible le transfert d'énergie vers d'autres véhicules.

6.7.2. Potentiel géothermique

La mise en œuvre de tunnels peut présenter un potentiel géothermique non négligeable. L'activation thermique de structures souterraines, type tunnels routiers ou ferroviaires, ayant une large surface de contact avec le sous-sol a récemment gagné en intérêt à travers le monde.

Ce type de systèmes appelés systèmes hydrides consiste à installer dans la paroi des tunnels des **absorbeurs géothermiques** (boucles de circulation fermées d'un fluide caloporteur).

Bien que le nombre de tunnels où ce type d'application est installée reste limité pour l'instant (principalement Allemagne et Autriche), la présente section reprend, à titre indicatif, à travers quelques exemples, quelques-uns des retours d'expérience (REX) et facteurs déterminants acquis à l'étranger dans ce type d'application ou d'expérimentations.

6.7.2.1. REX 1 : Expérimentations en Allemagne (Buhmann & Al, 2016)

En Allemagne, des sections de tunnel ont été géothermiquement activées à titre expérimental¹⁰ à Jenbach et à Stuttgart-Fasanenhof.

A Stuttgart le transport de chaleur dans le sol s'opère essentiellement par conduction dans la matrice sol-eau alors qu'à Jenbach le transport de la chaleur dans le sol se fait par convection grâce à une vitesse de circulation plus élevée de l'eau souterraine.

Comparison between Jenbach and Stuttgart tunnels.

General	Tunnel Jenbach	Tunnel Stuttgart
Utilization	Railway tunnel	Metro tunnel
Tunnel length	3470 m	380 m
Excavated section	134 m ²	72 m ²
Construction method	Mechanically driven	Mined tunnel
Absorber system		
Absorber pipes	4700 m d = 25 mm	800 m d = 25 mm
Activated area	2200 m ²	360 m ²
Section activated	54 m tunnel	2 blocks with 10 m each

Tableau 36 : Comparaison des expériences d'activation géothermique de tunnel Jenbach et Stuttgart (Buhmann & Al, 2016)

Par exemple, pour le tunnel de Stuttgart les absorbeurs thermiques sont constitués de tuyau en PE (25 / 23 mm) attachés en boucle fermée entre les revêtements intérieur et extérieur du tunnel. 800 m de tuyau ont servi à équiper 360 m² de revêtement.

¹⁰ Buhmann, Moormann, Westrich, Pralle, Friedemann 2016; *Tunnel Geothermics – A German experience with renewable energy concepts in tunnel projects*, Geomechanics for Energy and the Environment, 8, 1-7

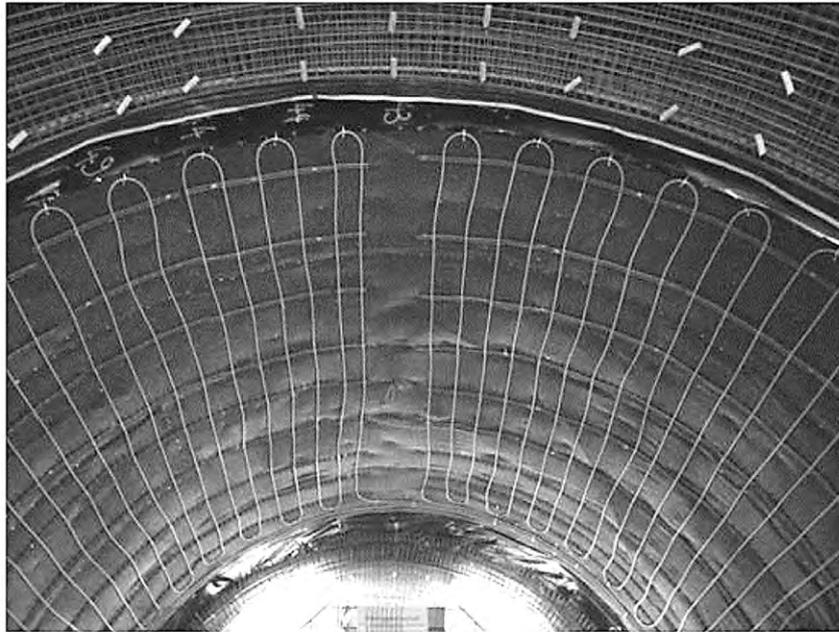


Figure 102 : Tuyaux absorbants fixés au revêtement extérieur du tunnel (Buhmann & Al, 2016)

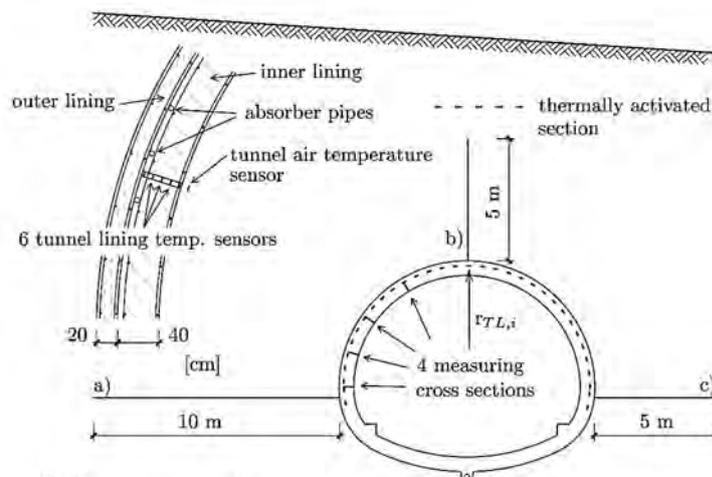


Figure 103 : Installation de monitoring : section transversale et détail du revêtement activé (Buhmann & Al, 2016)

Les boucles sont connectées à des tuyaux de 50 mm de diamètre et raccordées à un système de pompes à chaleur.

Le système est capable de travailler en mode chauffage en hiver (HM) et en mode cooling (CM) en été. En mode chauffage (HM : heating mode) la température de sortie des boucles est de l'ordre de 3 à 5°C plus chaude que la température d'entrée qui sont les plus basses pendant cette partie de l'année. En mode refroidissement (CM : cooling mode) la température de sortie est de l'ordre de 3 à 9°C plus froide que la température d'entrée qui s'équilibre vers 20-25°C.

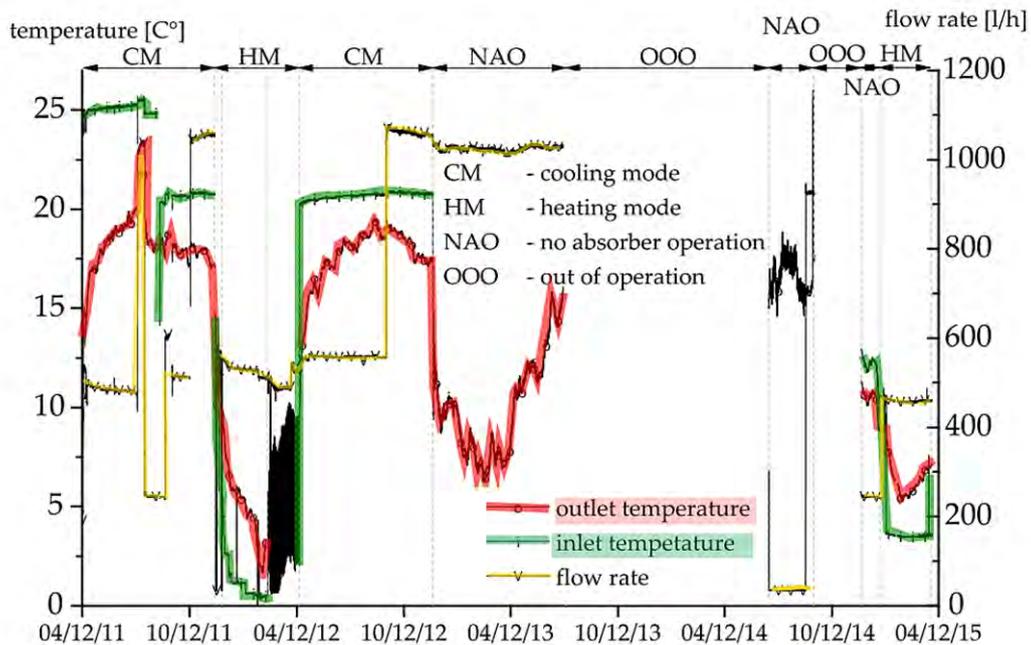


Figure 104 : Tunnel-Fasanenhof : aperçu des opérations (Buhmann & Al, 2016)

Synthétisant l'ensemble des régimes de fonctionnement testés, les densités de flux thermiques observés peuvent s'échelonner, selon les différents essais, de **5 à 30 W/m²**. Les auteurs estiment qu'en optimisant le dispositif et en prenant en compte des demandes en chaud et froid réalistes, le taux d'extraction thermique peut encore être accru. Les auteurs précisent néanmoins lors de la mise en œuvre d'installations avec une puissance excédant 30 kW, des effets pouvant donner lieu à un changement de température du sous-sol doivent être pris en compte et peuvent être mitigés par des conditions opérationnelles adéquates.

*Afin de donner un ordre de grandeur à titre de comparaison pour le projet Metro Nord, si on considère 3800 m de tunnel (scénario monotube) avec un diamètre intérieur de 8,90 m qui serait activé sur 2/3 de son périmètre, ceci représenterait une surface théoriquement activable de l'ordre de 70.000 m² et en gardant le même ratio que ci-dessus correspondrait à une puissance théorique qui varierait dans la gamme de **0,35 à 2,1 MW thermique** selon le régime de fonctionnement (pic ou base) et pouvant encore être accrue selon les conditions opérationnelles.*

6.7.2.2. REX 2 : Modélisation des transferts de chaleur par convection - tunnel du métro de Lausanne - EPFL (Peltier & AI, 2016)

En Suisse, des chercheurs de l'EPFL (Peltier & AI, 2019)¹¹ se sont attelés à quantifier les échanges de chaleur dans un tunnel en appliquant leur calcul à la future ligne de métro M3 de Lausanne et ont estimé l'économie d'énergie que ferait la ville en équipant le tunnel d'un système d'activation géothermique. Le procédé se base sur l'activation du revêtement du tunnel par une série de boucles en tuyaux PE reliés à une ou des pompe(s) à chaleur.

Dans un tunnel de métro, lorsque le métro freine et accélère, le tunnel subit un pic de chaleur. Cet air chaud se mélange à l'air naturellement présent dans le tunnel et à la chaleur d'origine géothermique. La recherche visait à donner une estimation précise notamment de la chaleur amenée par convection thermique dans les absorbeurs thermiques en fonction de la vitesse de circulation d'air dans le tunnel, de la rugosité du revêtement, etc ... La figure suivant reprend à titre indicatif la corrélation entre le coefficient de transfert thermique par convection, tels que calculé, et la vitesse de circulation de l'air pour différentes rugosités de revêtement.

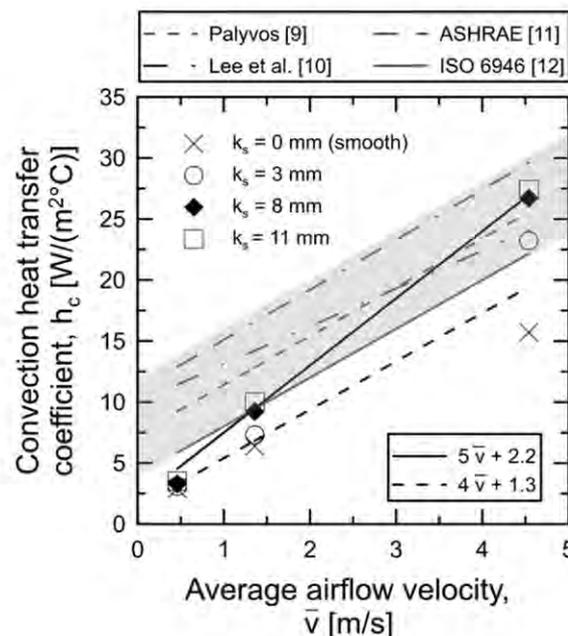


Figure 105 : Corrélation entre le coefficient de transfert thermique par convection et la vitesse de circulation d'air dans le tunnel (Peltier & AI, 2019)

Un fluide caloporteur circule dans les boucles fermées. Durant l'hiver, une eau froide entre dans le système, est réchauffée par échange thermique et est recirculée dans le circuit de chauffage. En été, le système est inversé l'eau chaude, provenant des locaux à climatiser, est introduite dans la boucle et refroidie par les échanges thermiques. Le système a l'avantage de pouvoir stocker la chaleur et la restituer en temps voulu dans les logements.

¹¹ Peltier, Rotta Loria, Lepage, Garin, Laloui, 2019 ; *Numerical investigation of the convection heat transfer driven by airflows in underground tunnel*, Applied Thermal Engineering, 159 (2019) 113844 <https://www.enerzine.com/un-tunnel-de-metro-converti-en-source-denergie-geothermique/28075-2019-07>

L'équipe de Peltier estime qu'en activant 50 à 60% du tracé planifié pour le Métro de Lausanne, de l'ordre de 60.000 m² du tunnel pourraient être activés avec ce système géothermique (même ordre de grandeur que le projet Métro Nord) et alimenter en chaleur de l'ordre de 1.500 appartements standards d'une taille moyenne de 80 m² ou 4.000 appartements Minergie (fourniture énergétique optimisée). Ils ont estimé que le système serait capable de couvrir 80% des besoins énergétiques, les besoins restant étant complétés par une autre source énergétique. Ce type d'investissement a une durée de vie allant de 50 à 100 ans ; seules les pompes à chaleur doivent être remplacées tous les 25 ans.

*Par déduction, considérant une consommation annuelle moyenne en chauffage de 8.000 kWh/an (gaz) pour un appartement traditionnel de 80 m², une couverture de 80% par le système d'activation géothermique et une durée de chauffage annuelle de 5.500 h on en déduit une puissance moyenne en mode chauffage du tunnel qui serait de l'ordre de 1,8 MW. Ceci correspondrait à une densité de flux thermique théorique de l'ordre de **30 W/m² de tunnel** (en accord avec les expérimentations allemandes).*

La réduction des émissions est estimée à 2 millions de tonnes de CO₂ par an, comparé à un système de chauffage au gaz.

Ramenant ces ordres de grandeur au cas de Métro Nord on peut estimer, en première approche et par analogie avec les estimations de l'EPFL, le potentiel théorique de la manière suivante pour l'ensemble du tracé :

- *Longueur activable : 3800 m*
- *Diamètre : 8,9 m – Périmètre équipé sur 2/3 de son développement*
- *Surface activable : 70.000 m²*
- *Densité de flux thermique théorique: 30 W/m²*
- *Puissance thermique moyenne : 2,10 MW*
- *Fourniture thermique annuelle pour 5500 heures de chauffe : de l'ordre de 11,6.10⁶ kWh/an*

Considérant une consommation en chauffage de l'ordre de 100 kWh/m².an et afin de fixer un ordre de grandeur, ceci représenterait à titre théorique le chauffage d'une superficie de logement estimée à 116.000 m² ou 1200 logements de 100 m² dans l'hypothèse d'un taux de couverture de 100% (estimation maximaliste).

6.7.2.3. REX 3 : Design de sections géothermiques de tunnel en Angleterre (Crossrail, London) (Nicholson & Al, 2014)

Nicholson & Al (2014)¹² partent du constat qu'une quantité importante de chaleur est générée par les métros, particulièrement pendant les opérations de freinage, les arrêts et redémarrages en station. Les approches conventionnelles visent à consommer une grande quantité d'énergie en opérations de ventilation et négligent la possibilité d'utiliser la chaleur extraite dans les bâtiments présents en surface.

¹² Nicholson, Chen, de Silva, Winter, Winterling, 2014 ; *The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK, Energy Sustainability*, Volume 67, Issue ES3, ICE Publishing

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

Des segments de tunnel dont le revêtement serait équipé d'échangeurs de chaleur (absorbeurs) seraient une solution alternative pour refroidir les tunnels, les terrains encaissants et fournir en chaleur les bâtiments adjacents.

Cette solution apporte aussi un bénéfice en termes de réduction des consommations pour les opérations de ventilation.

Les auteurs constatent qu'il y a une centaine d'années la température dans le tunnel était constante de l'ordre de 15°C. Sur un siècle, le sol encaissant a été incapable d'absorber toute la chaleur fatale émise par les trains et pour nombre de lignes souterraines, la température s'est accrue et excède actuellement fréquemment 30°C pour certains tronçons. A l'avenir les changements climatiques devraient encore exacerber cette tendance.

Les auteurs font une première estimation de la chaleur émise par les moteurs, les systèmes de conditionnement d'air des trains. Leur estimation porte sur un tronçon bi-tube circulant entre Whitechapel et Abbey Wood à Londres (118 railway line).

L'exemple d'estimation est donné ci-après pour illustrer l'approche et les ordres de grandeur en présence :

- Longueur du tronçon : 21 km
- Longueur effective (bi-tube) : 42 km
- En période de pointe :
 - 24 trains/heure càd un passage de train toutes les 2,5 min
 - considérant une vitesse moyenne de 60 km/h, cela prend 21 min pour faire le trajet et le nombre de trains présents dans le tunnel en pointe est de $21 / 2,5 = 8,4$ trains
 - considérant une puissance thermique dégagée par le moteur et les freinages de 1 MW et par les systèmes de conditionnement d'air de 0,1 MW, la puissance thermique générée par 8,4 trains est estimée à $1,1 \text{ MW} \times 8,4 = 9,2 \text{ MW}$
 - considérant un diamètre de tunnel de 6,2 m, la surface totale de revêtement est de 410.000 m² et la puissance thermique disponible au niveau du revêtement en période de pointe serait estimée à $9,2 \text{ MW} / 410.000 \text{ m}^2 = \mathbf{22 \text{ W/m}^2}$ de surface de revêtement
- Sur une base hebdomadaire :
 - 14 trains/heure
 - Puissance thermique moyenne disponible au niveau du revêtement : $22 \text{ W/m}^2 \times 14/24 = 13 \text{ W/m}^2$

A cette puissance s'ajoute la chaleur fournie par les freinages et les terrains encaissant. Au total les auteurs considèrent une puissance thermique pouvant varier entre **7 W/m² en situation de base à 30 W/m² en situation de pic de circulation.**

Sur base de ces estimations les auteurs estiment qu'un tronçon de 500 m de tunnel serait capable de supporter la demande thermique de 100 appartements de famille avec une demande totale de 1200 MWh/an couverte avec par une pompe à chaleur de 400 kW complétée par une chaudière de 400 kW. La puissance de chauffe fournie par le système géothermique sur les 500 m de tronçon est estimée à 70 kW en régime de base et 300 kW en régime de pointe. Considérant une longueur totale de 2 x 21 km, ceci est l'équivalent d'une puissance de chauffe extrapolée à 8400 familles, selon les ratio considérés.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

Cette approche met en évidence que la puissance disponible est fonction des débits de trafic à l'intérieur du tunnel et varie donc en période de pointe ou en période de base. Le dimensionnement du système doit tenir compte de cet aspect mais aussi de la courbe « monotone » des besoins thermiques (càd échelonnement des puissances requises en fonction du nombre de jours et de la distribution des températures).

Les figures suivantes illustrent un design schématique du système :

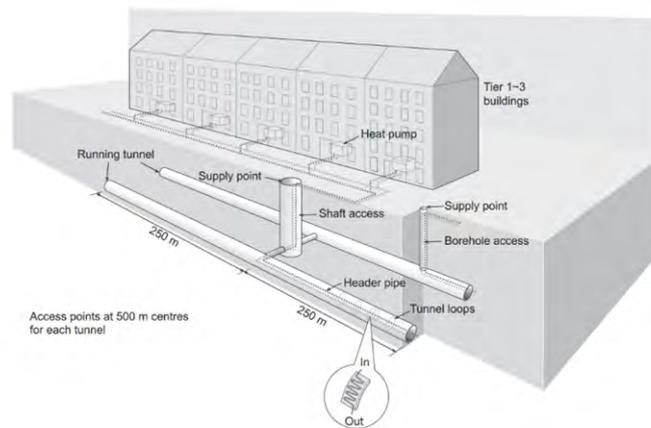


Figure 106 : Schéma de principe d'un segment de tunnel géothermique (Nicholson, 2014)

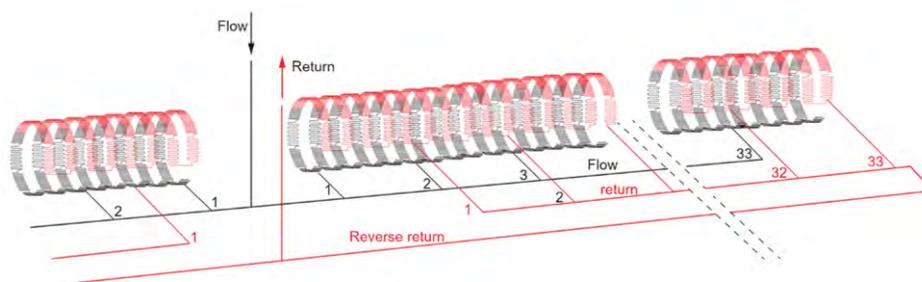


Figure 107 : Schéma de principe des connexions flow/return (Nicholson, 2014)

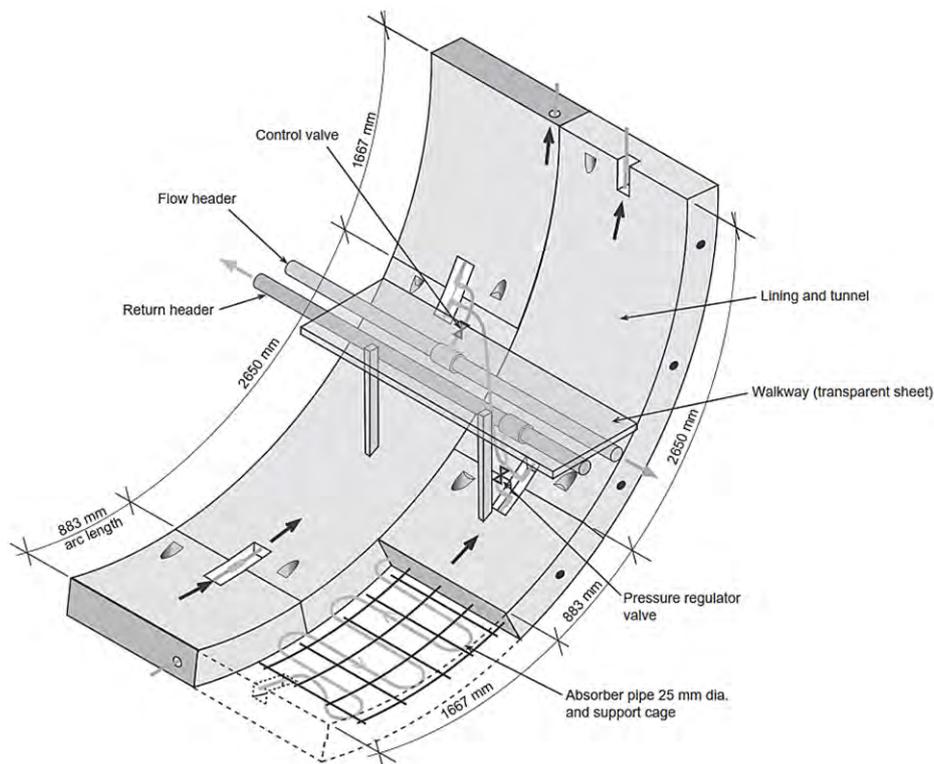


Figure 108 : Design d'une section avec absorbeur géothermique (Nicholson, 2014)

En ce qui concerne les usagers, il a été procédé, pour le cas de Londres à un inventaire des bâtiments présents le long du tracé et susceptible de recourir à la fourniture de chaleur géothermique. L'inventaire a été repris sur un GIS selon deux critères de sélection :

1. l'occurrence d'une demande en chaleur suffisante pour justifier la connexion au système. Les bâtiments ont été classés selon leur demande thermique annuelle : 600 MWh/an, 1200 MWh/an, 1800 MWh/an et 2400 MWh/an
2. un profil de demande thermique en accord avec une utilisation efficace des pompes à chaleur, c'est-à-dire une demande thermique de base suffisamment stable

Ces critères ont permis d'identifier 3 types de classes de bâtiments :

- **Tier 1** : bâtiments les plus adaptés : hôtels, larges complexes résidentiels, hôpitaux,...
- **Tier 2** : bâtiments modérément adaptés : écoles, bibliothèques publiques, musées,...
- **Tier 3** : bâtiments faiblement adaptés : bureaux, centres récréatifs, commerces détail,...

Sur cette base ont été identifiés à Londres, 365 bâtiments avec une demande thermique supérieure à 600 MWh/an à une distance inférieure à 100 m du tracé. Dans cet inventaire d'usagers potentiels 34 bâtiments sont en tier 1, 4 bâtiments en tier 2 et 327 bâtiments en tier 3.

Ce type d'étude a permis d'identifier les points de connexion possible au réseau géothermique et les zones où un renforcement de la taille des absorbeurs thermiques devrait être envisagée.

Cette approche met en évidence que la faisabilité et pertinence d'un tel système géothermique est avant tout dépendante de la position et la nature des usagers présents à proximité du tracé.

6.7.2.4. REX 4 : Modélisation de la valorisation géothermique d'un tronçon de métro à Turin, Italie (Barla & AI, 2016)

Barla & AI¹³, 2016, ont procédé, dans le cadre d'une étude de faisabilité, à la modélisation de l'activation géothermique d'un tronçon de 1350 m de la ligne 1 du métro de Turin avec une utilisation en chauffage et en refroidissement. La section proposée à l'activation s'inscrit dans le cadre de l'extension (1,9 km avec 2 stations) d'un réseau déjà existant de 13,4 km comportant 21 stations.

La modélisation a mis en évidence les bonnes performances potentielles en matière de flux thermiques pour ce tronçon de tunnel, selon les conditions de modélisation.

Pour une température du sol de 14°C, une température entrante dans le système de 4°C en hiver et de 28°C en été, le Δt (t outlet – t inlet) varierait entre + 1,4 et 4°C en hiver et -1,9 à - 4,3°C en été selon la vitesse de circulation du fluide dans les boucles thermiques.

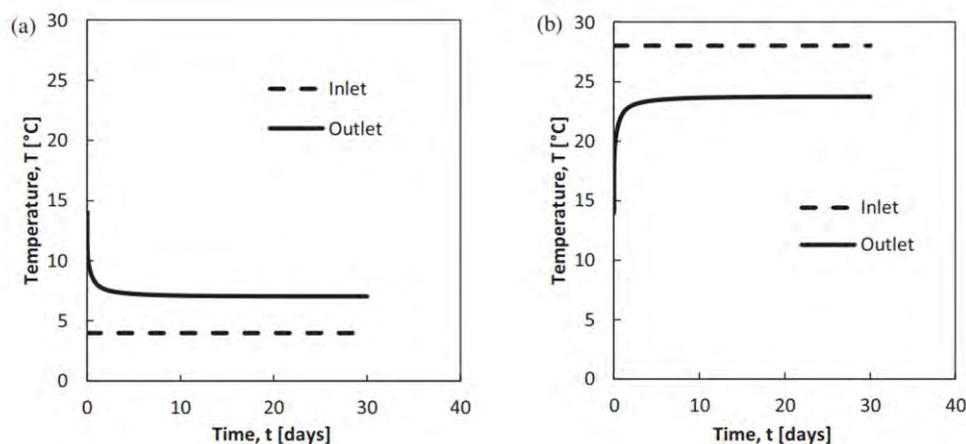


Figure 109 : Températures d'entrée et de sortie en hiver et en été (Barla & AI, 2016)

La puissance développée par le système dépend de la vitesse de circulation du fluide dans les boucles. Pour une vitesse de 0,4 m/s la puissance en mode chauffage est estimée à **53 W/m²** et la puissance en mode de refroidissement est estimée à **74 W/m²**.

Season	Total extracted/injected power, Q [kW]	Extracted/injected power per square meter, Q [W/m ²]	Extracted/injected power per meter of tunnel, Q [W/m]
Winter	1.67	52.76	1193.42
Summer	2.34	73.87	1670.81

Figure 110 : Comparaison des puissances calorifiques extraite et injectée en hiver et en été (Barla & AI, 2016)

On notera que comparativement aux niveaux observés dans d'autres cas de figure (par exemple Jenbach et Stuttgart) les puissances valorisées sont ici plus élevées. La raison principale identifiée par les auteurs est l'occurrence d'une vitesse de circulation des eaux

¹³ Barla, Di Donna, Perino, 2016 ; *Application of energy tunnels to an urban environment*, Geothermics 61 (2016), 104-113

souterraines perpendiculairement au tracé plus élevée et favorable à une recharge thermique du sol accrue, situation qui améliore l'efficacité énergétique. On notera que cette vitesse de circulation des eaux est par ailleurs fonction du rabattement en période d'exploitation.

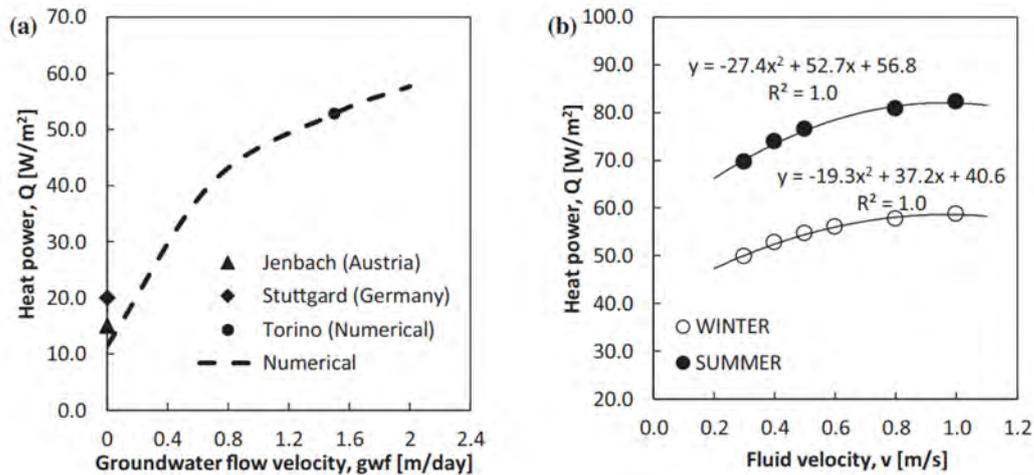


Figure 111 : Effet de la vitesse de la nappe et de la vitesse du fluide dans la boucle sur l'efficacité énergétique (Barla & AI, 2016)

Les auteurs ont par ailleurs comparé les coûts opérationnels de l'exploitation du système géothermique pour le tronçon de 1350 m avec les puissances suivantes couvertes par le système de pompe à chaleur : 2,8 MW en chauffage (avec COP : 4) et 3,8 MW en refroidissement (avec EER : 5) en comparaison des systèmes thermiques chaud-froid traditionnels. Selon leur estimation, les coûts opérationnels d'exploitation des systèmes traditionnels seraient entre 75 à 145% plus élevés que les coûts opérationnels du système avec activation géothermique.

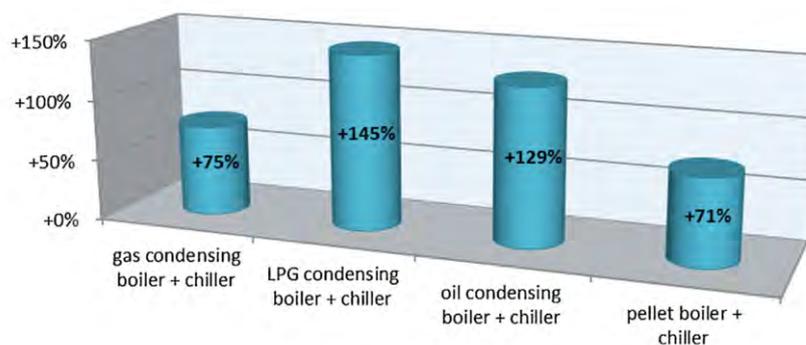


Figure 112 : Economie (%) de l'activation géothermique sur les coûts opérationnels en comparaison des systèmes traditionnels (Barla & AI, 2016)

Ils estiment aussi que la mise en œuvre du système d'activation géothermique donnerait lieu à un coût additionnel sur investissement de seulement 0,78% par rapport aux coûts de construction du tunnel. La période de payback sur les coûts additionnels est évaluée par ces auteurs à 5 années.

6.7.2.5. Conclusions quant au potentiel géothermique du projet

Au travers de ces 4 exemples il apparaît qu'une activation géothermique des tunnels dans le cadre du projet Metro-Nord pourrait, potentiellement, présenter un intérêt économique et environnemental significatif. De manière potentielle il pourrait donner lieu à une diminution des coûts énergétiques de chauffage des stations elles-mêmes ou des utilisateurs de chaud ou de froid à proximité ainsi qu'à une réduction des émissions de CO₂.

En première approche et par analogie avec d'autres situations, il est estimé que le projet aurait un potentiel de chauffage jusqu'à un équivalent de 1200 logements de 100 m² dans l'hypothèse d'un taux de couverture de 100%. En pratique le taux de couverture devra être estimé sur base d'une étude économique.

On notera cependant que la pertinence d'une telle activation est avant tout dépendante de l'occurrence d'usagers adaptés à distance réduite du tracé (en situation idéale dans un périmètre de 100 m de part et d'autre). Les usagers les plus adaptés sont ceux qui présentent une demande thermique suffisamment élevée et stable pendant toute l'année. A cet égard, les demandes de chaud et froid imputables aux stations elles-mêmes sont aussi à prendre en compte.

A ce titre, un inventaire spatial (GIS) des usagers le long du tracé Metro Nord est recommandé et serait la première démarche de faisabilité permettant de juger de la pertinence d'un tel développement.

On notera qu'en fonction de cette distribution spatiale, l'activation géothermique pourrait concerner des morceaux de tracé et non le tracé dans son entièreté.

Dans un second temps, et dans le cadre d'une étude de faisabilité, un inventaire des besoins en chauffage et climatisation ainsi qu'une évaluation du taux de couverture des besoins requis (sur base de courbes monotones) permettrait de préciser les sections à activer et le dimensionnement du système.

Parmi les paramètres à prendre en compte rentrent aussi la fréquence de circulation des métros en période de base et en période de pointe dans la mesure où elle joue un rôle dans les flux thermiques pouvant être extraits par le système.

On notera qu'idéalement et afin d'éviter toute dérive thermique à terme, il est recommandé de pouvoir utiliser le système tant en chauffage qu'en climatisation.

On notera aussi que le contexte hydrogéologique et notamment la vitesse de circulation de la nappe en exploitation est de nature à avoir une certaine influence sur l'efficacité énergétique du système.

Dans ce cadre, le potentiel géothermique effectif ne pourra être évalué qu'au terme d'une étude de faisabilité prenant en compte tous ces paramètres. Ceci est recommandé par l'auteur de l'étude d'incidences.

Il est à noter enfin que la décision d'activer géothermiquement tout ou partie du tracé du métro devra être prise de manière précoce à la conception définitive du projet dans la mesure où les éléments constitutifs de cette activation (boucles thermiques) s'insèrent à l'intérieur des éléments structurels et revêtements des tunnels mais ne peuvent être mises en œuvre a posteriori.

Le cas échéant, si les études de faisabilité confirment l'intérêt d'un tel système, la conception des revêtements, la mise en œuvre des boucles géothermiques et tous les aspects HVAC devraient être pris en compte dès les premières études d'exécution.

6.7.3. Recommandations sur le projet

Il est recommandé d'analyser la pertinence d'installer des sous-stations réversibles

Il est recommandé de prévoir l'espace pour placer des sous-station de récupération, idéalement dans les 7 stations.

Il est recommandé d'étudier plus en détail lors du projet amendé les opportunités d'utilisation de l'énergie géothermique du tunnel au niveau des stations tout en précisant les portions les plus favorables du tunnel à cet effet.

6.8. Environnement sonore et vibratoire

6.8.1. Aire géographique

L'aire géographique est reprise dans le livre Introduction.

Le métro étant enterré à plus de 10 mètres et circulant exclusivement en milieu urbain, la gêne à considérer est uniquement vibratoire pour les riverains. Cette gêne vibratoire résulte de la perception tactile et d'une nuisance acoustique liée à la mise en vibration des murs générant du bruit solidien. Le mécanisme de génération des vibrations est expliqué ci-dessous.

6.8.2. Cadre réglementaire et références

Le cadre réglementaire, les références et les définitions et notions des études sonores et vibratoires sont reprises dans le livre Introduction.

Dans le cadre du présent projet, il n'est pas prévu de mettre en œuvre des installations bruyantes au niveau des puits qui ne serviront que d'accès de service.

6.8.3. Description de la situation existante

En milieu urbain, des vibrations perceptibles par les résidents sont générées par le trafic routier et ferroviaire. Ces vibrations peuvent être gênantes.

Pour caractériser la situation existante, des mesures vibratoires ont été réalisées dans deux bâtiments. Les mesures sont faites suivant la norme DIN 4150. Les mesures sont réalisées pendant 24 heures.

6.8.3.1. Rue Henri Van Hamme 21

Les mesures sont faites à partir du mardi 8 septembre 14h pendant 24 heures.

Ce bâtiment est situé entre le tramway et le tracé du tunnel. Le tramway passe juste devant la façade à courte distance.

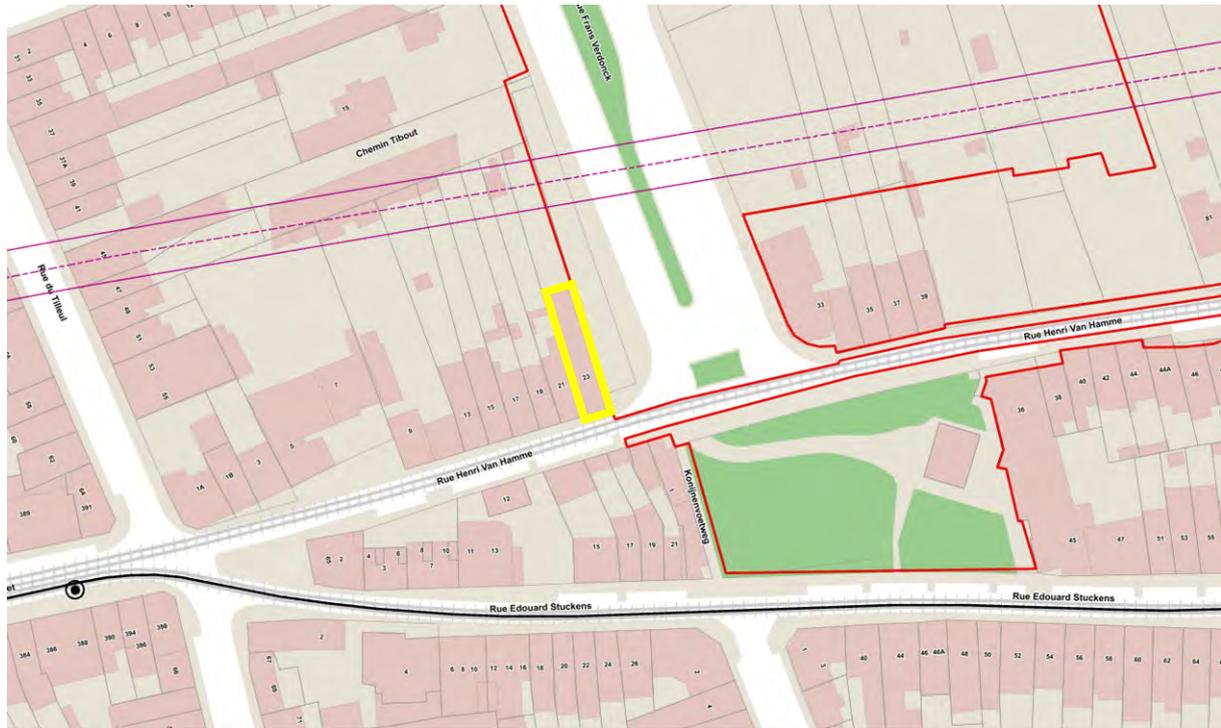


Figure 113 : Positionnement Rue Henri Van Hamme (Tractebel, 2020)



Figure 114 : Vue dans la Rue Henri Van Hamme (Tractebel, 2020)

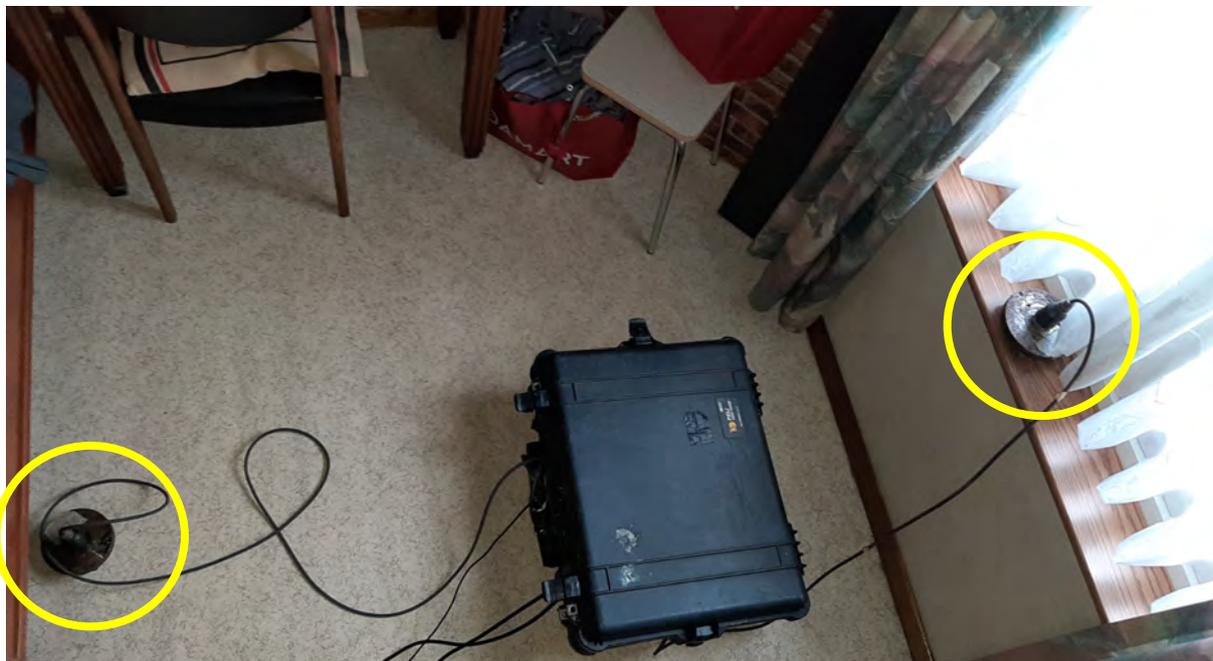


Figure 115: Vue des capteurs (Tractebel, 2020)

Les mesures sont faites au première étage. Les capteurs sont placés au niveau de la façade avant, ce qui est représentatif pour mesurer le mouvement du bâtiment, et au milieu de la pièce, au sol, pour mesurer les effets de résonances structurales.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

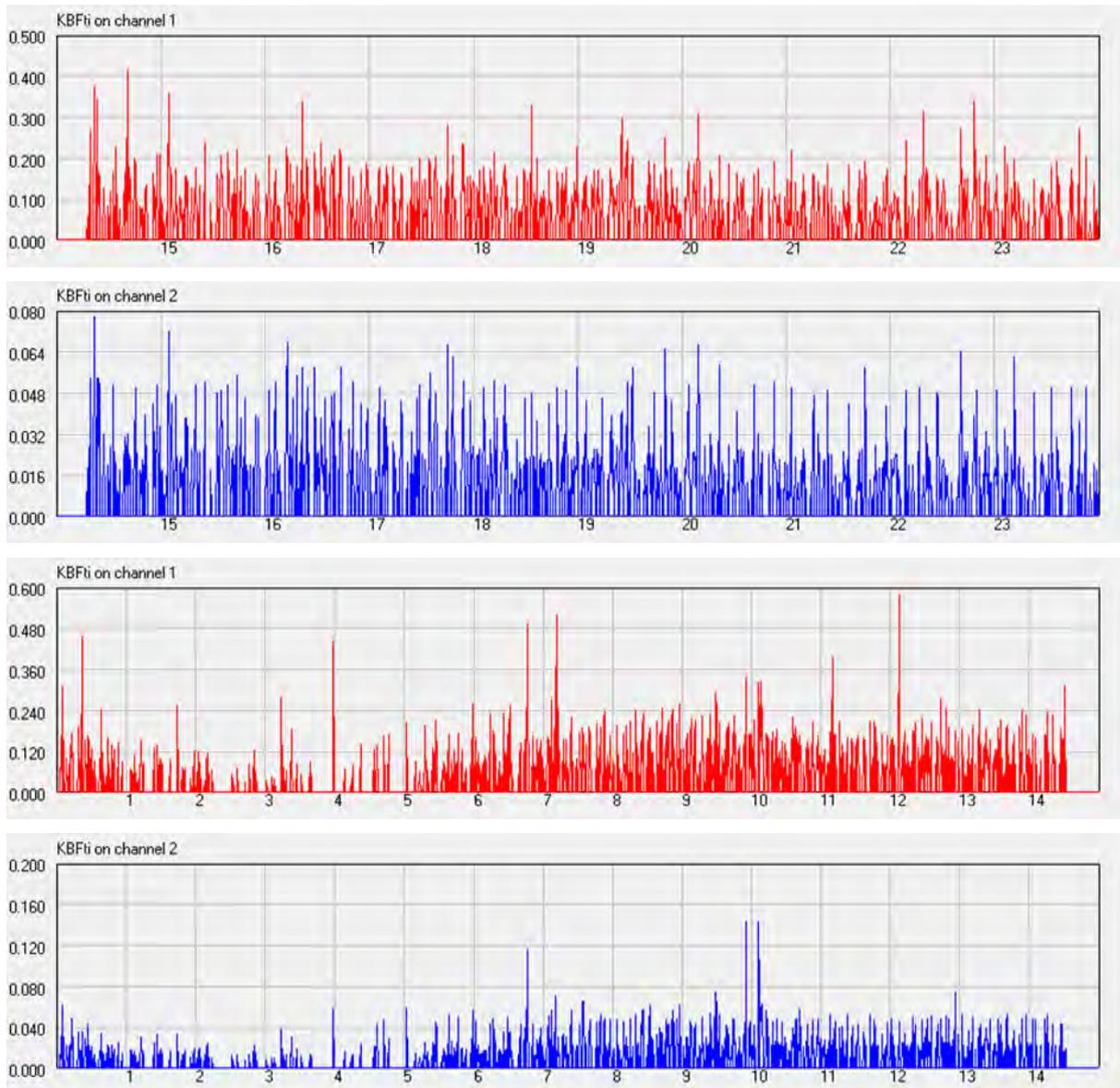
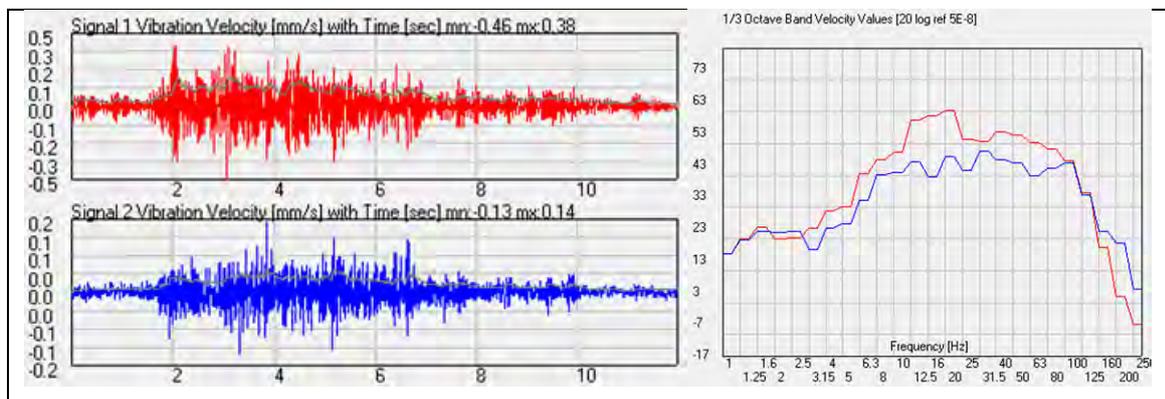


Figure 116 : Résultats mesures KBFti pendant 24 heures (Tractebel, 2020)

Les pics observés correspondent aux passages des trams et des voitures.



6. Analyse des incidences du projet et recommandations

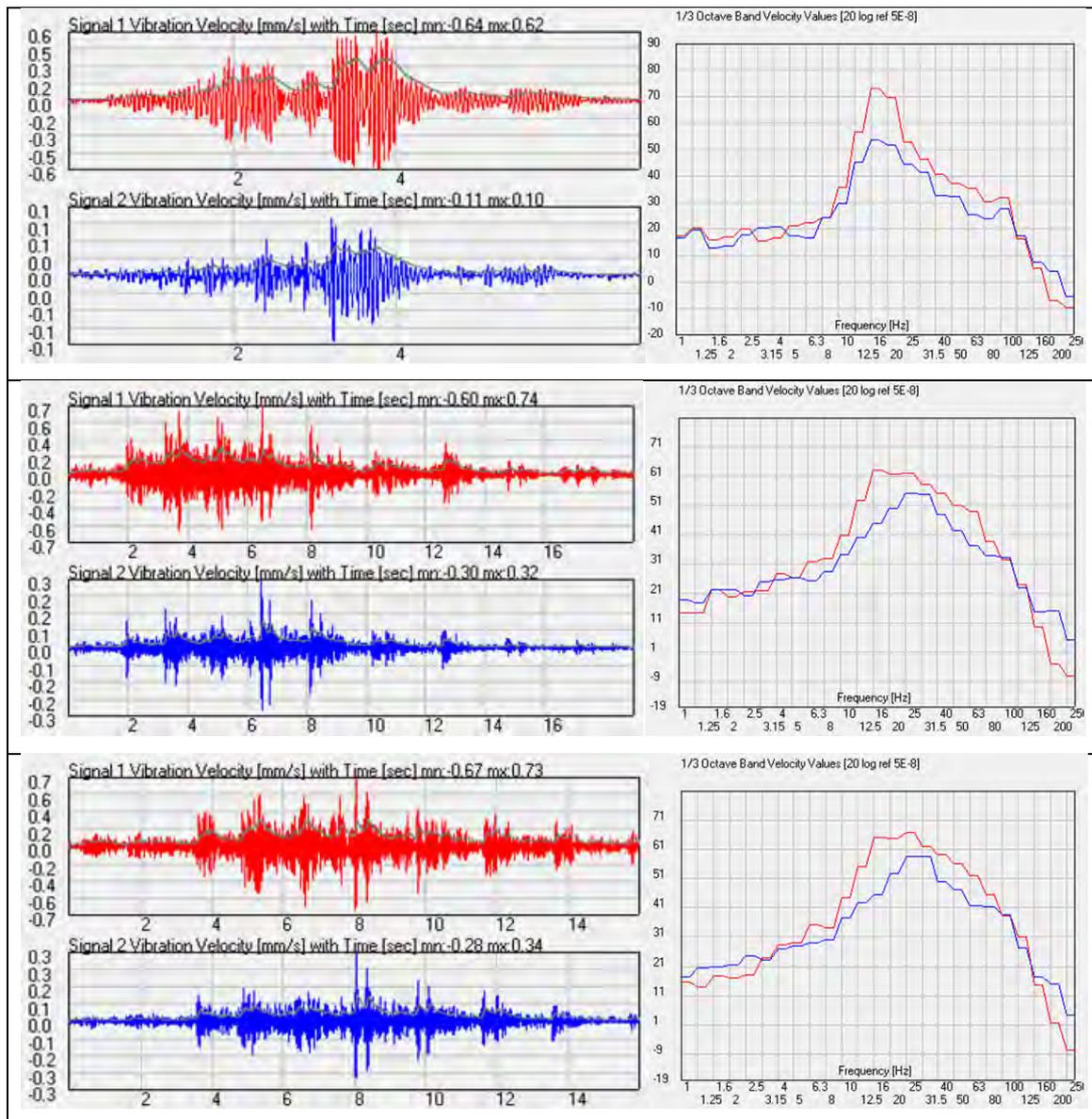


Figure 117 : Evénement à 14h58, 03h59, 09h55 et 10h06 (Tractebel, 2020)

Les figures ci-dessus donnent des détails de quelques passages dans le plan temporel ainsi que le plan spectral.

L'évaluation des vibrations suivant la norme montre que les vibrations mesurées sont tout juste acceptable en prenant en compte la proximité du tramway. En effet, la norme applicable doit être multipliée par 1,5 si l'on se trouve à proximité de transports urbains de surface existants (tramways, light rail, réseaux de banlieue). Ceci n'est pas le cas pour de nouveaux aménagements ou projets.

Période	jour		nuit	
	façade	milieu sol	façade	milieu sol
KBFmax	0.144	0.580	0.064	0.460
KBFtr	0.022	0.098	0.014	0.069
Critère	0.07 (x 1.5) = 0.105		0.05 (x 1.5) = 0.075	

Tableau 37 : Evaluation des vibrations mesuré suivant le DIN 4150

6.8.3.2. Chaussée de Haecht 1200

Ce bâtiment est situé juste au-dessus du tracé du tunnel.

Les mesures sont réalisées à partir du mardi 10 septembre à minuit pendant 24 heures.



Figure 118 : Positionnement Chaussée de Haecht (Tractebel, 2020)



Figure 119 : Vue dans la Chaussée de Haecht (Tractebel, 2020)



Figure 120 : Vue du positionnement des capteurs (Tractebel, 2020)

Les mesures sont réalisées au deuxième étage. Les capteurs sont placés au niveau de la façade avant, ce qui est représentatif pour mesurer le mouvement du bâtiment, et au milieu de la pièce, au sol, pour mesurer les effets de résonances structurelles.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

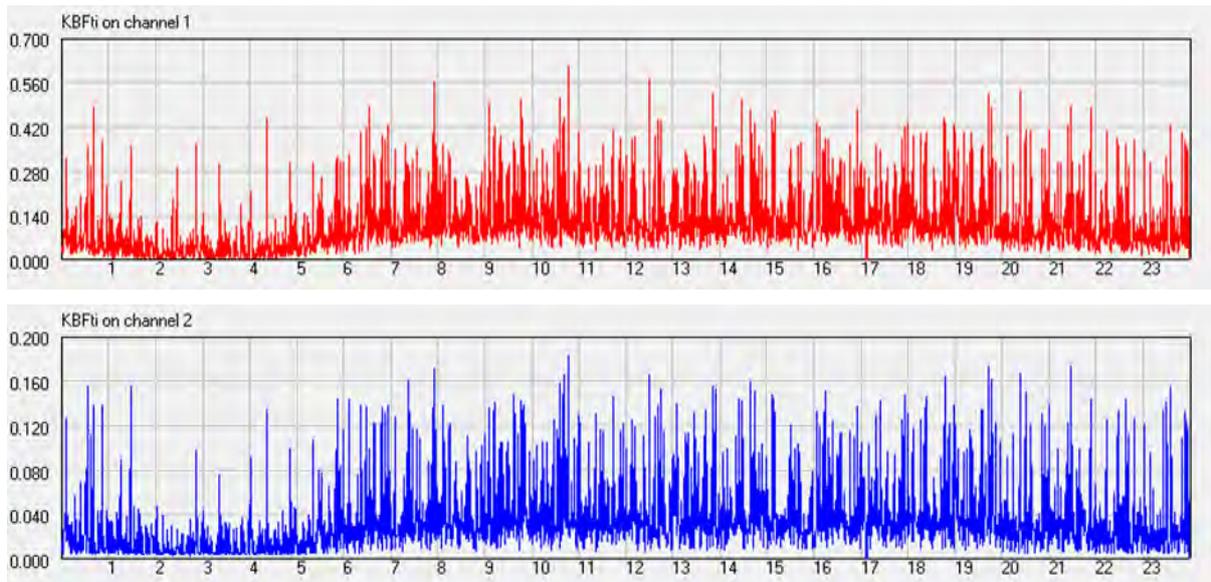
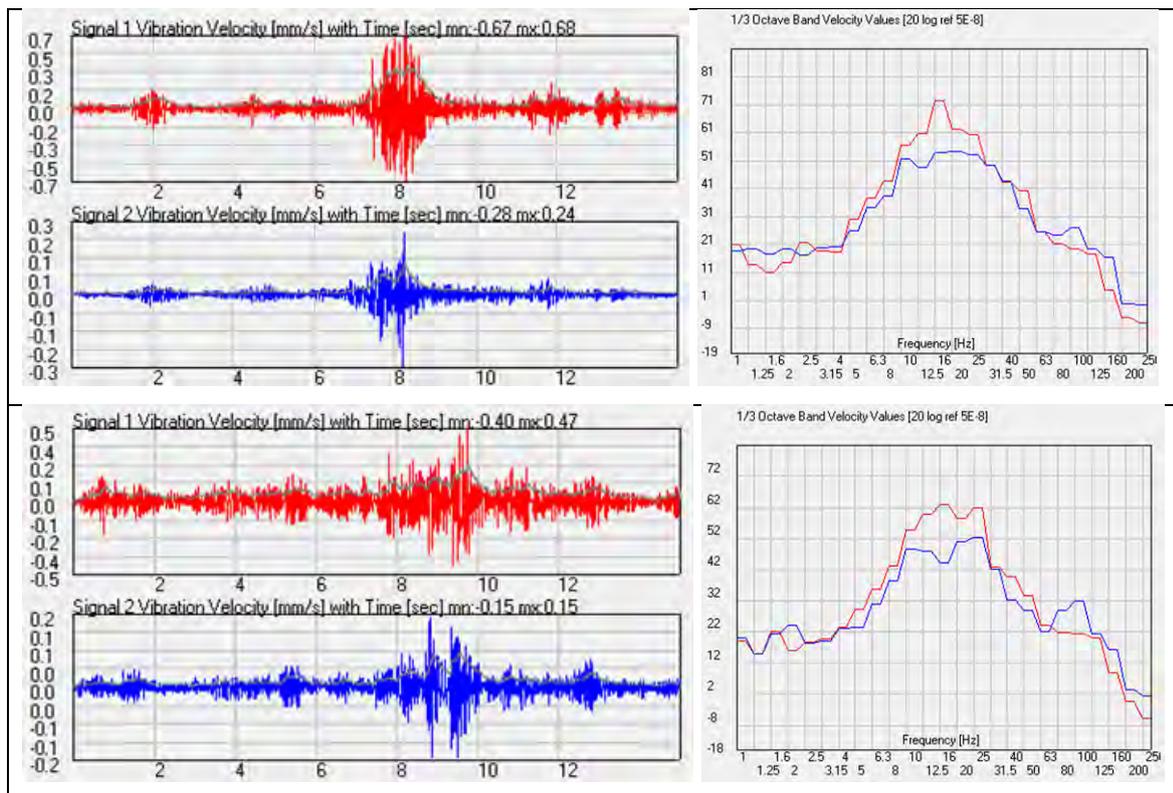


Figure 121 : Résultats mesures KBFti pendant 24 heures (Tractebel, 2020)

Les pics observés correspondent aux passages des voitures.



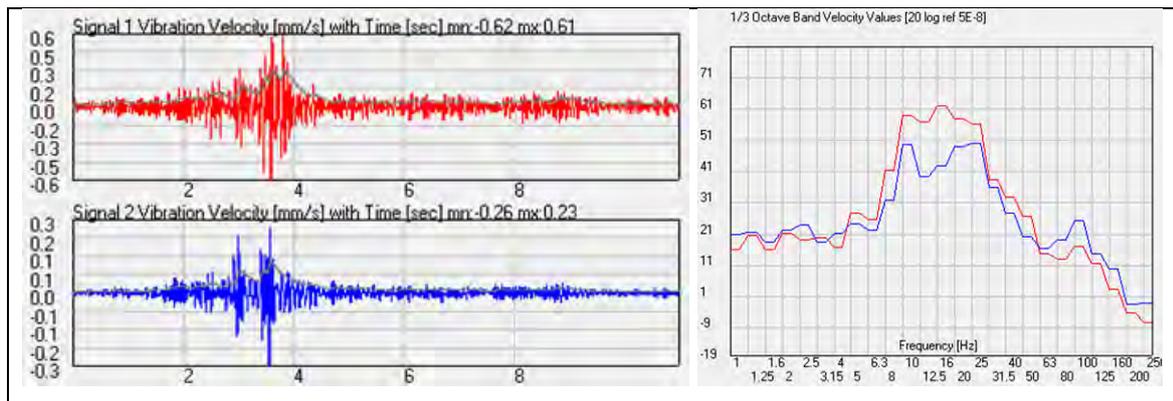


Figure 122 : Evénement à 04h22, 13h04 et 20h51 (Tractebel, 2020)

Les figures ci-dessus donnent des détails de quelques passages dans le plan temporel ainsi que le plan spectral.

L'évaluation des vibrations par rapport à la norme donne des valeurs qui sont déjà largement supérieure au critère applicable.

période	jour		nuit	
	façade	milieu sol	façade	milieu sol
KBFmax	0.183	0.611	0.155	0.478
KBFtr	0.037	0.151	0.021	0.082
Critère	0.07		0.05	

Tableau 38 : Evaluation des vibrations mesuré suivant le DIN 4150

6.8.4. Analyse des incidences du projet en situation de référence

6.8.4.1. Introduction

Les vibrations générées par le passage des métros varient assez fortement d'une configuration à l'autre. C'est pourquoi il est difficile de prévoir avec précision à l'avance les endroits sensibles. En outre il existe encore peu de méthodes totalement fiables pour prévoir les vibrations qui seront émises par les métros, cela est en partie de la difficulté de réaliser des mesures vibratoires qui reproduisent les mêmes conditions.

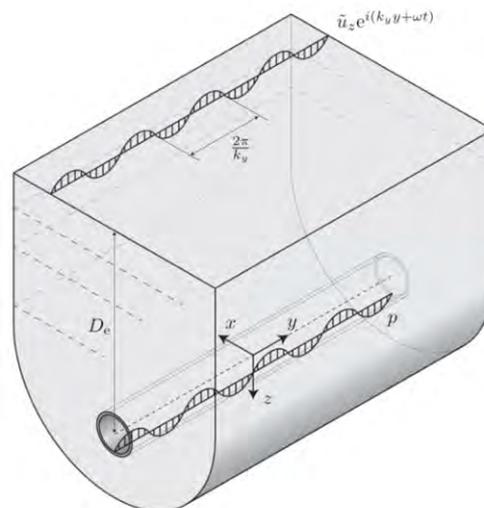


Figure 123: Transmission des ondes du tunnel vers la surface (Tractebel, 2020)

En général, la réalisation des calculs vibratoires (semi-empirique) pour la situation projetée est faite à l'aide d'une simulation numérique, calibrée avec des mesures in situ.

Ce modèle prend en compte des détails en section comme :

- la profondeur du tunnel
- la stratification du sol (les CPT data ; raideur du sol)
- le diamètre du tunnel
- les caractéristiques dynamiques des rails
- le spectre vibratoire par le métro
- la vitesse des rames

Dans le cas présent, à la demande de Beliris, BMN, en collaboration avec le bureau D2S international, a réalisé une étude début 2016 pour évaluer les vibrations prévisibles lors de l'exploitation du futur métro M3. A noter que cette simulation est applicable pour l'ensemble du projet de métro en exploitation et pas seulement pour le tronçon sous la gare de Bruxelles Nord pour une section de tunnel où la vitesse est stable (hors stations).

Le présent chapitre rappelle tout d'abord le cadre normatif vibratoire applicable puis présente les sources vibratoires générées par le passage des métros. Enfin, les principaux résultats de l'étude prévisionnelle de BMN sont précisés avec les recommandations.

6.8.4.2. Cadre normatif vibratoire

Pour rappel, le cadre normatif applicable aux nouvelles lignes de métro est décrit dans la «convention environnementale entre la Région Bruxelles-Capitale et la SITB relative au bruit et aux vibrations ». Celle-ci propose d'utiliser les valeurs limites de la norme DIN 4150-2 pour les tramways et métro. Cependant, cette norme n'est pas directement utilisable dans les calculs prédictifs lors des extensions et des renouvellements de lignes.

Pour les calculs prédictifs, la convention STIB / Région Bruxelles-Capitale définit un niveau vibratoire global et un spectre vibratoire de référence à ne pas dépasser en un point de référence, situé juste devant les façades des immeubles (moyenne pour 10 passages). Les valeurs du spectre maximum de référence utilisées sont les celles du tableau suivant :

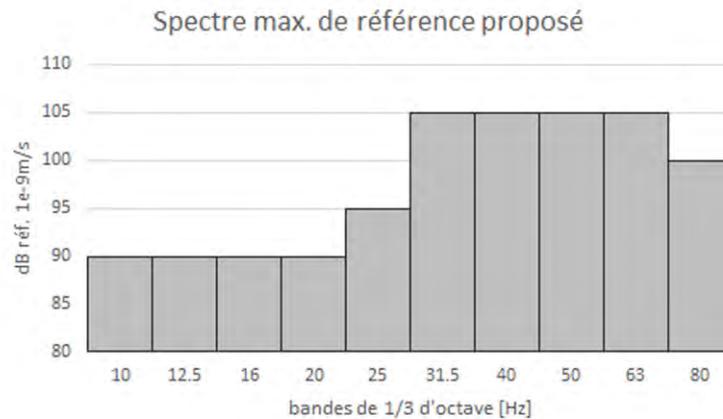


Figure 124: Spectre de référence vibratoire en dB (réf 1^e-9 m/s) de la convention STIB/RBC

Fréquence en Hz	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
Amplitude vibratoire en dB (réf 1 ^e -9m/s)	90	90	90	90	95	105	105	105	105	100

Tableau 39 : Spectre de référence vibratoire de la convention STIB/RBC

De plus, pour le métro, la convention fixe un niveau de bruit solidien maximal de 40 dB(A) pendant la nuit à l'intérieur des bâtiments.

6.8.4.3. Sources vibratoires liées aux passages des métros

Les vibrations générées par le passage des métros varient assez fortement d'une configuration à l'autre. C'est pourquoi il est difficile de prévoir avec précision à l'avance les endroits sensibles.

Transmission des vibrations

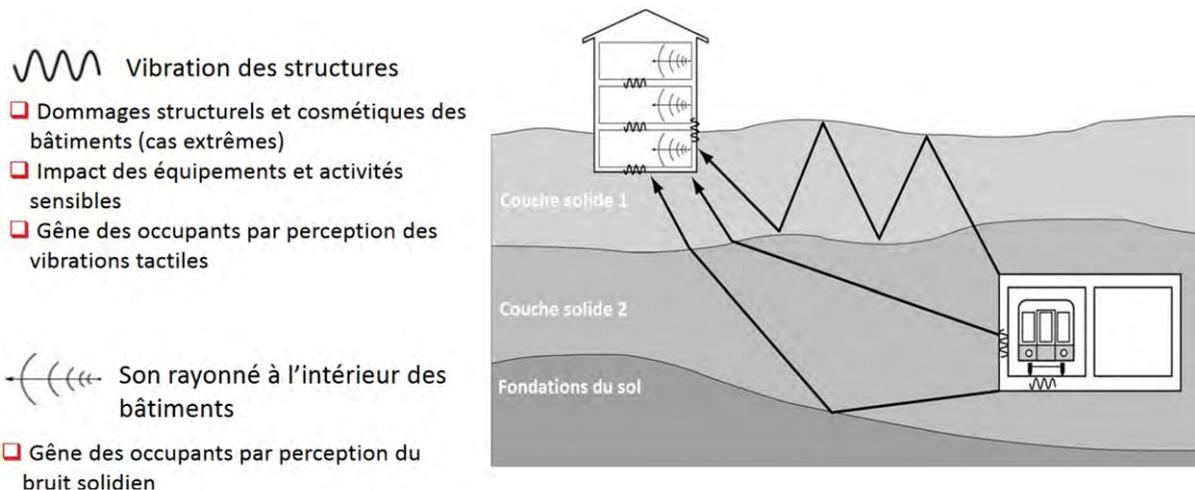
Le passage d'un métro produit des vibrations au niveau de la voie. Celles-ci sont transmises par le sol aux bâtiments et structures avoisinants dont les parois se mettent en vibration. Ces dernières peuvent constituer une nuisance pour les personnes et peuvent même, à niveau élevé, endommager des constructions.

La transmission des vibrations et leur potentielle transformation en bruit solidien dans le local, est un phénomène complexe qui met en jeux plusieurs couplages :

- Le couplage rail – sol ;
- Le couplage sol – bâtiment ;

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

- La transmission et la dissipation dans le bâtiment ;
- L'efficacité de rayonnement des parois du bâtiment.



La figure suivante illustre les phénomènes de propagation des vibrations mis en jeux lors du passage d'un matériel roulant de type métro en souterrain.

Figure 125: Schéma de principe illustrant la transmission des vibrations dans le sol, causées par le trafic ferroviaire souterrain de type métro (Rapport BMN – Etude dynamique du tunnel et radier: étude de l'extension du réseau de transports en commun de haute performance vers le nord à Bruxelles – Tranches 3 et 4: avant-projet général et détaillé)

Le mécanisme de génération des vibrations est la combinaison de deux effets :

- Le chargement quasi-statique : causé par le déplacement d'une charge sur le système voie / sol. Cet effort excite le système {voie + véhicule} principalement dans les basses fréquences entre 1 et 10/15 Hz ;
- Le chargement dynamique : lié aux irrégularités des surfaces de contact de la roue et du rail, aussi appelées rugosités. Cet effort excite le système {voie + véhicule} aux moyennes fréquences 15 Hz et 200 Hz.

Enfin, les efforts au passage de points singuliers comme les aiguillages ou les joints de rail provoquent des forces de type « choc impactant » qui sont transmises au sol en excitant une très large gamme fréquentielle.

Les principaux facteurs de vibrations sont donc :

- Le type de rame utilisée
- L'état des surfaces des rails et des roues
- La vitesse de la rame
- Le type de pose des voies.

6.8.4.4. Etude prévisionnelle des vibrations générées en phase exploitation

Ci-après, les principaux résultats de l'étude prévisionnelle de BMN sont précisés avec les recommandations établies suite aux conclusions de cette étude.

Pour rappel, l'objectif de cette étude est d'analyser le comportement dynamique du tunnel à l'aide d'un modèle éléments finis, d'analyser la pose de voie et de déterminer les éventuelles mesures antivibratoires afin d'éviter le dépassement des critères imposés par les législations en vigueur.

A. Méthodologie

L'étude prévisionnelle de BMN se base sur la définition des caractéristiques vibratoires des 3 éléments essentiels à la propagation des vibrations :

- La source constituée par le tunnel et le véhicule qui sont considérés dans le modèle comme une seule entité responsable des vibrations.
- La voie de transmission qu'est le sol et dont la faculté d'atténuation des vibrations est caractérisée à l'aide de calculs et tests in-situ
- Pour le bruit solidien, le récepteur, défini par l'évaluation du couplage sol-fondation de la convention STIB /RBC pour un bâtiment standard.

Les calculs étant très techniques, le lecteur est invité à prendre connaissance de l'étude jointe en annexe pour plus de détail.

Les chapitres suivants reprennent à titre indicatif, pour chaque élément défini ci-dessus les principales hypothèses prises en compte puis présentent les résultats prévisionnels en termes de vibrations et de bruit solidien lors du passage d'un métro. Enfin les aspects d'usure ondulatoire sont abordés.

B. Modélisation de la source (tunnel et véhicule)

La modélisation du tunnel a été effectuée par la méthode des éléments finis sur une section type du tunnel (hors station) comme illustré sur la figure ci-dessous.

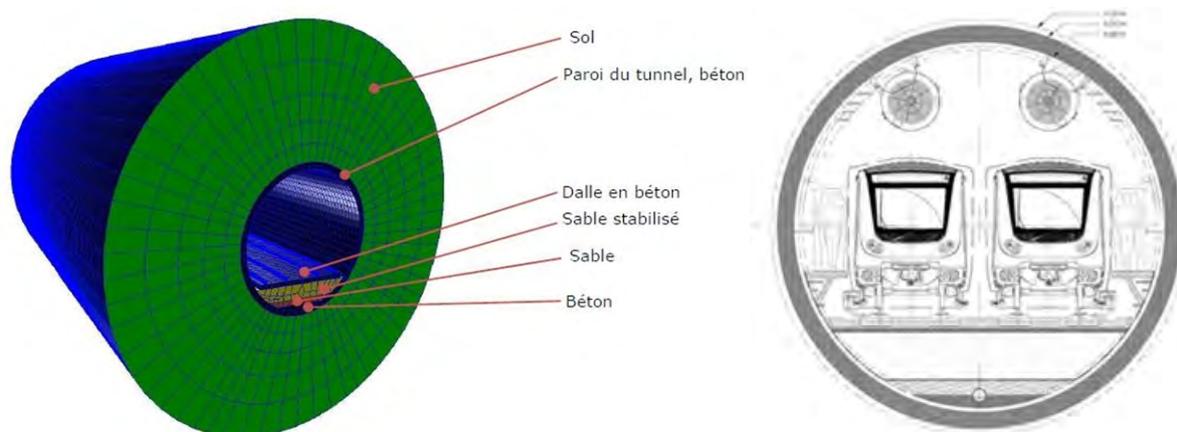


Figure 126: Modèle éléments finis d'une section type du tunnel (Source : Rapport BMN – Etude dynamique du tunnel et radier: étude de l'extension du réseau de transports en commun de haute performance vers le nord à Bruxelles – Tranches 3 et 4: avant-projet général et détaillé)

Le véhicule est représenté comme une masse (la masse non suspendue des bogies), masse qui est responsable de l'excitation dynamique de la voie, et chaque bogie est représenté par 4 masses ponctuelles. Le cas le plus défavorable a été choisi (présence simultanée de 2 véhicules). L'ensemble des hypothèses sont reprises dans le rapport mais les principales à retenir sont les suivantes :

- Pose de voie standard avec des traverses en béton
- Véhicules de type métro de 13,2T (masse non suspendue de 700kg) circulant à une vitesse de 72km/h
- Vibrations générées lors du croisement de deux véhicules
- Le tunnel et le véhicule sont représentés comme une seule entité responsable des vibrations

Les forces à appliquer pour chacun des points de contact (4 par bogie) sont ensuite calculées sur base de formules vibratoires et intégrées dans le modèle à éléments finis. Le calcul a été réalisé pour une source dont l'intensité est liée à une roue déformée, ce qui est le cas le plus conservatif.

Les résultats obtenus suite au lancement du modèle sont les niveaux vibratoires sur le toit du tunnel pour tous les points du maillage considérés, ce qui permet d'obtenir par la suite l'enveloppe des niveaux vibratoires sur la paroi du tunnel.

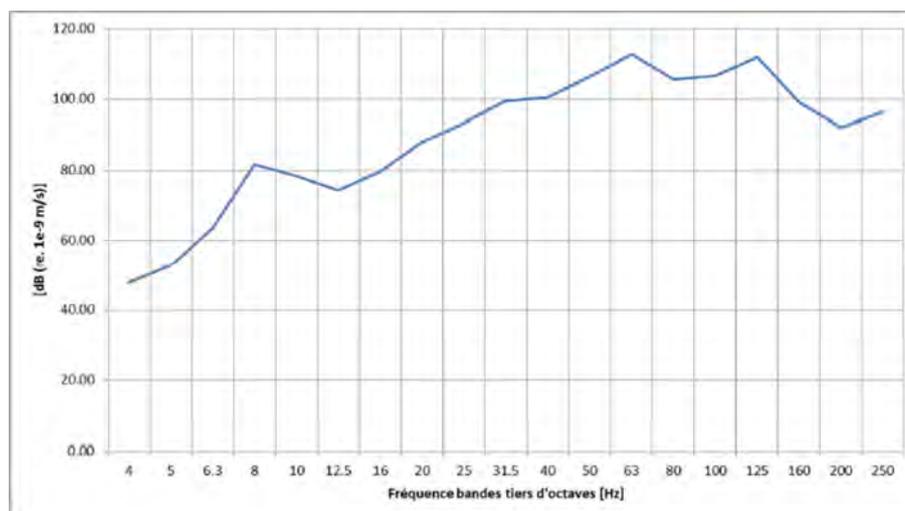


Figure 127: Enveloppe des niveaux vibratoires calculés sur la paroi du tunnel (Source : Rapport BMN - Etude dynamique du tunnel et radier: étude de l'extension du réseau de transports en commun de haute performance vers le nord à Bruxelles – Tranches 3 et 4: avant-projet général et détaillé)

A proximité d'un aiguillage standard, les niveaux vibratoires sont plus élevés d'environ 10 dB que ceux à proximité d'une voie courante. Dans le cas d'un aiguillage à cœur mobile, les niveaux vibratoires sont comparables à ceux à proximité d'une voie courante.

C. Modélisation de la voie de transmission (sol)

Les vibrations du tunnel peuvent être ressentie comme de simples vibrations ou comme du bruit solidien. Cependant ces deux phénomènes dépendent du moyen de transmission entre la source et le récepteur.

Dans le cas du tunnel, la transmission dépend de la profondeur de celui-ci et des caractéristiques du sol séparant la source et le récepteur. Dans le cas présent, la profondeur considérée dans le modèle est de 10m jusqu'à la partie supérieure du tunnel.

Les caractéristiques du sol ont quant à elles été déterminées grâce à des mesures de décroissance vibratoire le long du tracé au niveau du square François Riga. Ce site a été choisi car c'est l'endroit où les couches sableuses sont le plus proche de la surface, et donc il s'agit de la situation la plus défavorable pour l'atténuation des vibrations. La figure ci-après présente l'atténuation des niveaux vibratoires obtenue par interpolation des mesures jusqu'à 31m de distance.

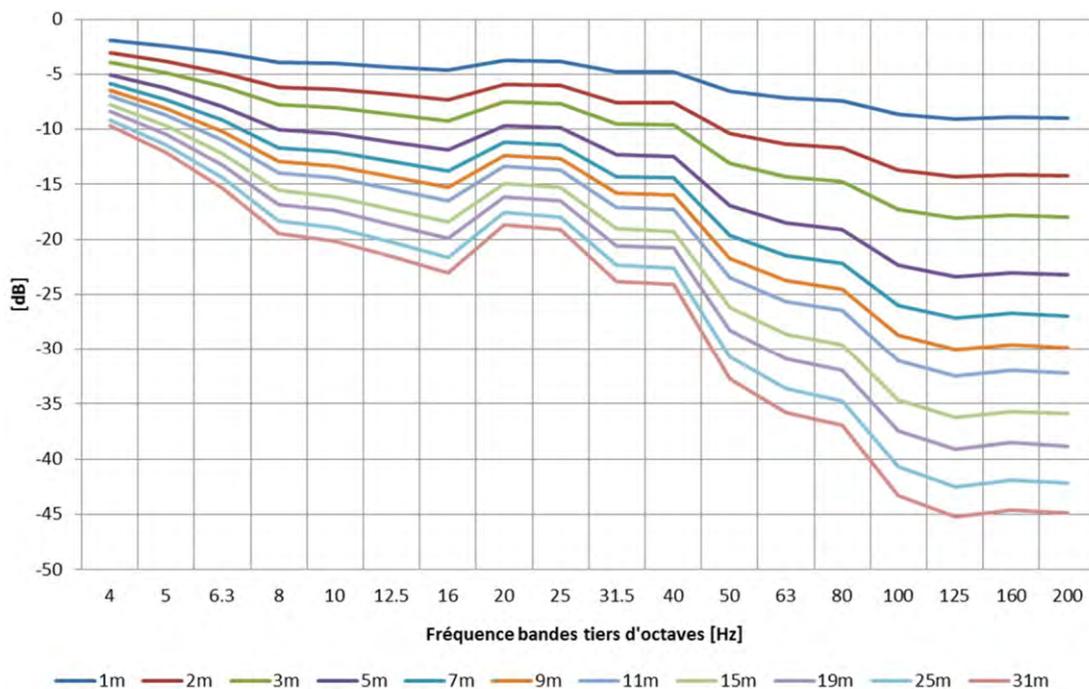


Figure 128: Atténuation des niveaux vibratoires en fonction de la distance calculée jusqu'à 31m sur base de mesures in-situ (Source : Rapport BMN - Etude dynamique du tunnel et radier: étude de l'extension du réseau de transports en commun de haute performance vers le nord à Bruxelles – Tranches 3 et 4: avant-projet général et détaillé)

D. Caractérisation du récepteur

Pour le calcul des niveaux vibratoires, il n'est pas nécessaire de déterminer les caractéristiques du récepteur car ceux-ci sont évalués sur un point au sol situé à l'avant du bâtiment.

Par contre pour évaluer le bruit solidien généré par les vibrations, il est nécessaire de caractériser le couple sol-fondation ainsi que les amplifications structurales due notamment aux résonances des planchers à l'intérieur des bâtiments.

Pour évaluer cela, l'étude de BMN suit les prescriptions de la convention établie entre la STIB et la RBC pour un bâtiment standard.

Le niveau de bruit solidien est ensuite calculé à partir de la réponse en fréquence sur la fondation à l'aide de la formule suivante :

$$L_p = L_v - 22$$

Où :

L_p : le niveau de pression acoustique (dB, réf. $20e^{-6}$ Pa)

L_v : la vitesse vibratoire résultante à l'intérieur du bâtiment (dB, réf. $1e^{-9}$ m/s)

E. Analyse de la modélisation en termes vibratoires

La figure ci-après montre les spectres vibratoires attendus en un point sur le sol devant le bâtiment et la comparaison au spectre de référence de la convention et ceci, pour une distance de 10 m entre la partie supérieure du tunnel et la surface. La courbe ADV correspond au spectre attendu pour un portion comprenant un appareil de voie (type aiguillage par exemple), soit une pénalité vibratoire de 10 dB complémentaire par rapport à une section de voie courante.

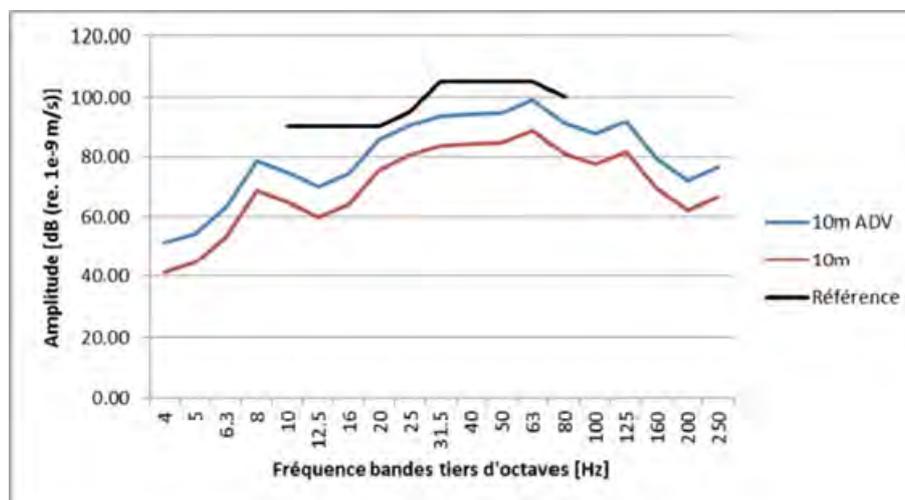


Figure 129: Résultats des calculs vibratoires, spectres vibratoires attendus et comparaison avec le spectre de référence (Source : Rapport BMN - Etude dynamique du tunnel et radier: étude de l'extension du réseau de transports en commun de haute performance vers le nord à Bruxelles – Tranches 3 et 4: avant-projet général et détaillé)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

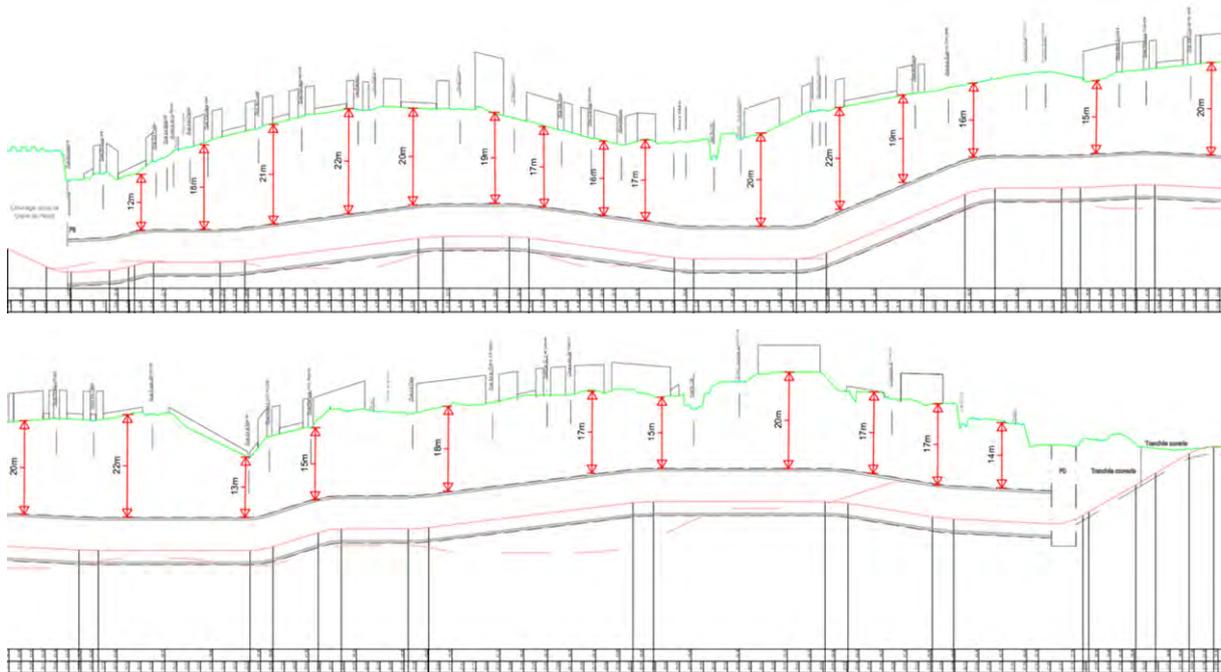


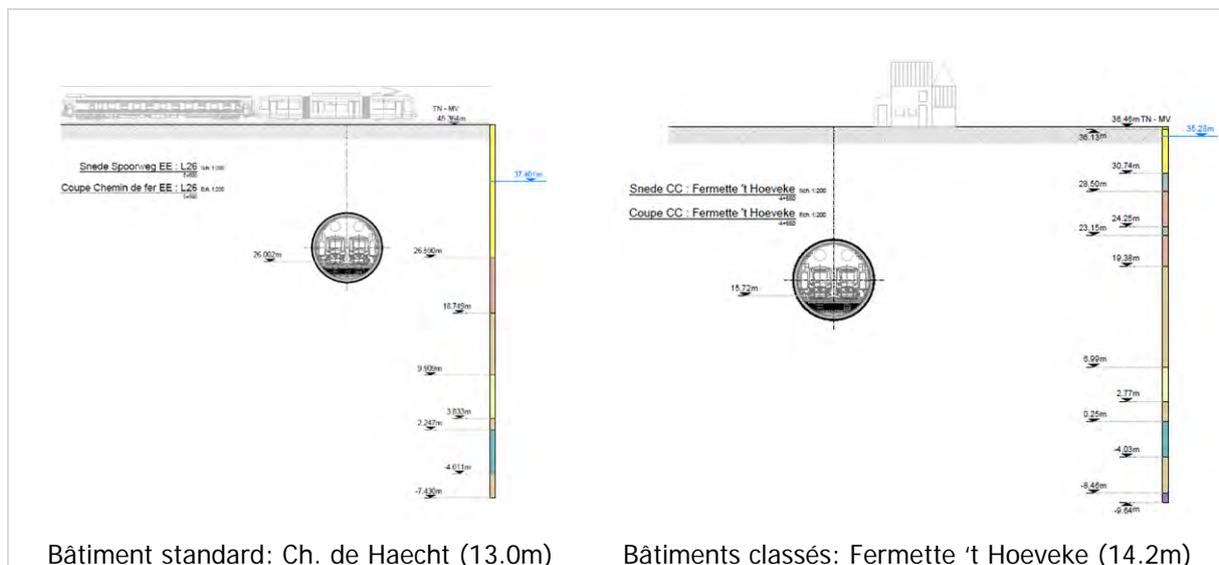
Figure 130: Profondeur du tunnel (Tractebel, 2020)

Selon le profil en long la profondeur minimale du tunnel n'est jamais inférieure à 10 m.

E. 1. Bâtiments sensibles

Un screening des bâtiments sur le tracé du métro met en évidence les bâtiments qui pourraient poser problème en phase d'exploitation car :

- ils abritent une fonction sensible (au-delà des hôpitaux), ou
- il y a un risque que la profondeur de leurs fondations soient importantes (par exemple une tour).



Bâtiment standard: Ch. de Haecht (13.0m)

Bâtiments classés: Fermette 't Hoeveke (14.2m)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

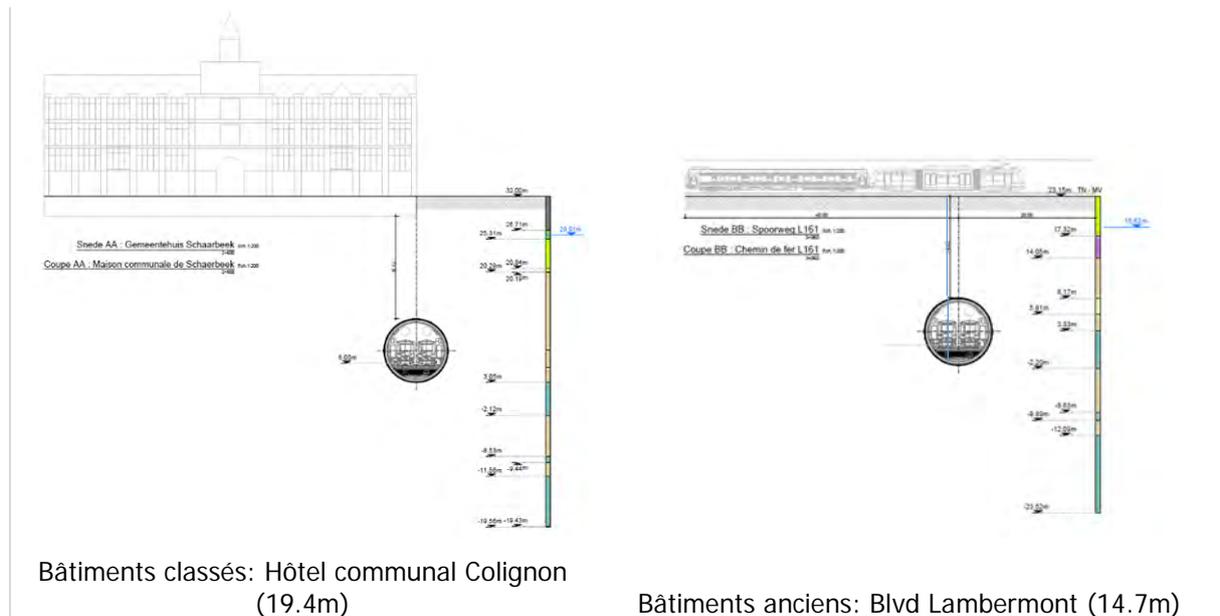


Figure 131: Screening des bâtiments sensibles le long du tunnel (Tractebel, 2020)

Une analyse individuelle par bâtiment sensible aux tassements est effectuée sur base du critère mentionné ci-dessus mais par rapport à leur vraie profondeur au sol (ou approximée).

L'étude de sensibilité aux tassements du bâti retient les bâtiments suivants:

- La liste des ouvrages classés très sensibles le long du tracé du tunnel est la suivante :
 - Fermette 't Hoeveke (Evere)
 - Maison Communale de Schaerbeek
 - L'institut Champagnat
- Autres bâtiments :

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

PK	Adresse	Écart à l'axe du tracé	Zone de criticité	Couverture	Description
1825	Rue Brabant 173	15,3 m	2-3	12,4 m	5 étages avec beaucoup de vitrage
1834	Rue Brabant 175	1,5 m	2-3	12,3 m	5 étages avec beaucoup de vitrage
2000	Rue Vandeweyer 8	2,7 m	1-2	19,1 m	5 étages
2065	Rue Locht 23	3,7 m	2-1-2	20,4 m	6 étages
2345	Rue Rubens 75	13,6 m	2-3	21,7 m	5 étages
2593	Place de Colignon s/n	Sur l'axe	Toutes	19,1 m	Maison Communale de Schaerbeek ⁴
2830	Rue Metsys 24	15,6 m	2-3	15,8 m	5 étages
3324	Boulevard Lambermont 136	21,8 m	2-3	22,6 m	7 étages avec beaucoup de vitrage
3324	Boulevard Lambermont 138	15,3 m	2	22,6 m	7 étages avec beaucoup de vitrages
3324	Boulevard Lambermont 140	1,5 m	1-2	22,6 m	7 étages avec beaucoup de vitrage
3493	Rue Dahlia 4	5,8 m	1-2	18,6 m	5 étages avec beaucoup de vitrage et mitoyen que d'un côté
3527	Eugène Demolder 137	8,1 m	2-3	17,5 m	6 étages
3540	Eugène Demolder 139-141	11 m	2-3	17,3 m	6 étages avec beaucoup de vitrage
3577	Avenue E. Demolder 151	22,2 m	3	16,6 m	5 étages et mitoyen que d'un côté
3813	Place de Riga 39	18,4 m	2-3	16,7 m	Institut Champagnat de Schaerbeek
4017	Rue F. Severin 53	5,9 m	Toutes	18,1 m	5 étages avec beaucoup de vitrage
4558	Rue de Marne 1	6 m	2-3	13,4 m	Fermette't Hoeveke (XVI ^{ème} siècle)
4720	Rue de Stuckens 125	Sur l'axe	Toutes	17,2 m	Académie de Musique d'Evere
4827	Place de la Paix 2-3	4,9 m	1-2	17,9 m	5 étages
5850	Rue du Planeur 4	5,6 m	Toutes	16,7 m	Bâtiment très large de 7 étages

Tableau 40 : Liste des autres bâtiments classés très sensibles (BMN, 2016)

- Autres bâtiments situés là où la couverture de sol au-dessus du tunnel est faible:

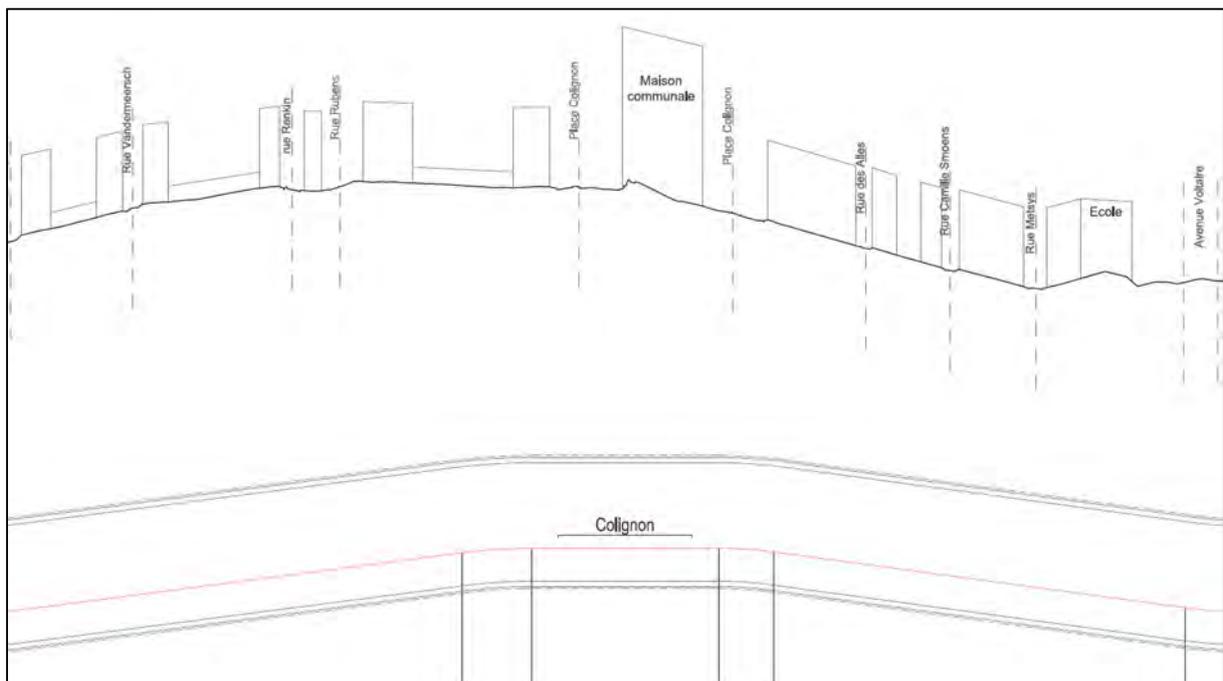
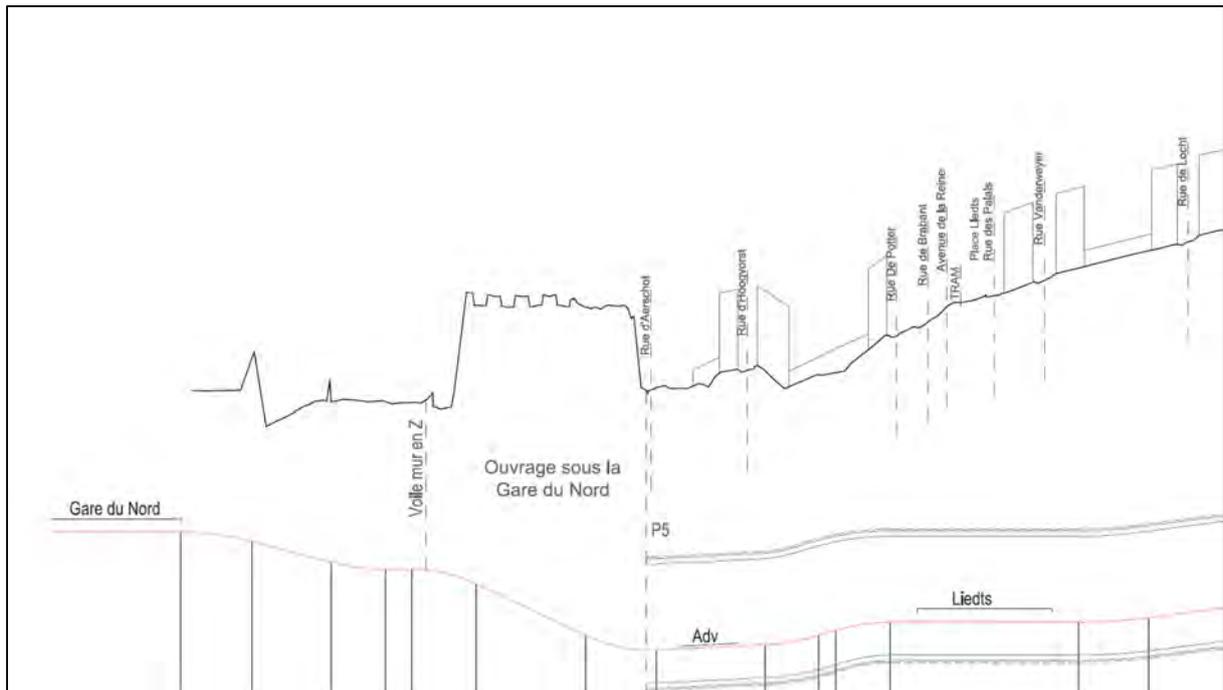
PK	Adresse	Écart à l'axe du tracé	Zone de criticité	Couverture	Description
1706	Rue d'Aerschot 126	2,7 m	1-2	12,7 m	3 étages
1710	Rue d'Aerschot 128	Sur l'axe	1-2	12,6 m	3 étages
1715	Rue d'Aerschot 130	Sur l'axe	1-2	12,5 m	4 étages
1719	Rue d'Aerschot 132	Sur l'axe	1-2	12,5 m	4 étages
1722	Rue d'Aerschot 134	Sur l'axe	1-2	12,5 m	3 étages
1725	Rue d'Aerschot 136	4,5 m	1-2	12,5 m	4 étages et mitoyen que d'un côté
1751	Rue d'Hoogvorst 8	Sur l'axe	1-2	13,6 m	3 étages et mitoyen que d'un côté
1752	Rue d'Hoogvorst 14	Sur l'axe	1-2	13,6 m	2 étages
1790	Rue d'Hoogvorst 17	Sur l'axe	1-2	12,7 m	4 étages
1799	Rue d'Hoogvorst 19	Sur l'axe	1-2	12,1 m	4 étages
1802	Rue d'Hoogvorst 21	1,9 m	1-2	12,2 m	3 étages
1805	Rue d'Hoogvorst 23	8,2 m	2-3	12,2 m	3 étages
1825	Rue Brabant 173	8,6 m	2-3	12,4 m	5 étages
1835	Rue Brabant 175	13,5 m	2-3	12,3 m	5 étages
1839	Rue Brabant 177	10,5 m	2-3	12,2 m	3 étages
1842	Rue Brabant 179	Sur l'axe	Toutes	12,4 m	3 étages

Tableau 41 : Liste des bâtiments classés sensibles (BMN, 2016)

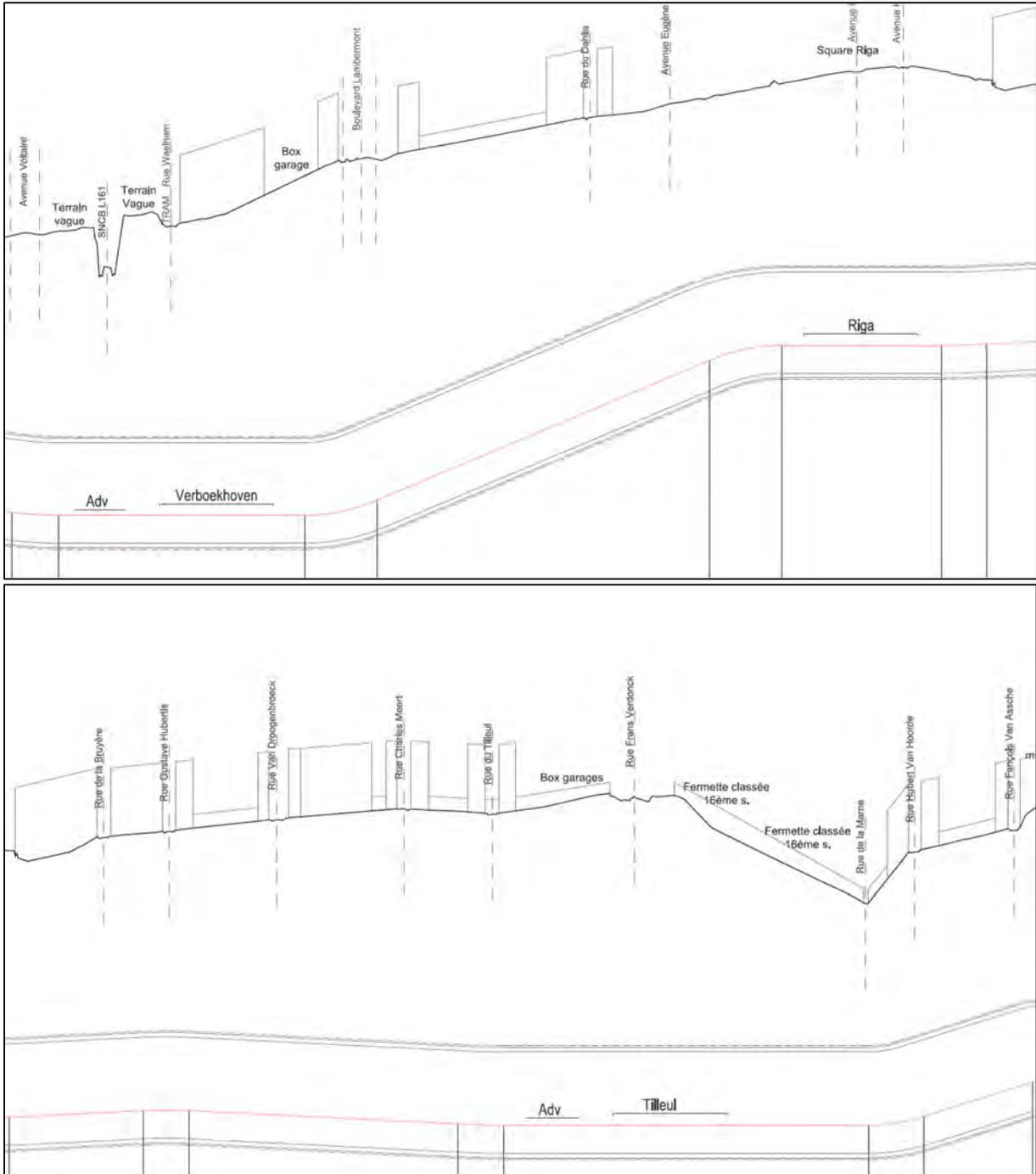
E.2. Appareils de voies

La localisation des appareils de voies le long du tracé est reprise ci-dessous. Il sera important de veiller à une pose de voies incluant des dispositifs antivibratiles au niveau des aiguillages.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations



6. Analyse des incidences du projet et recommandations



6. Analyse des incidences du projet et recommandations

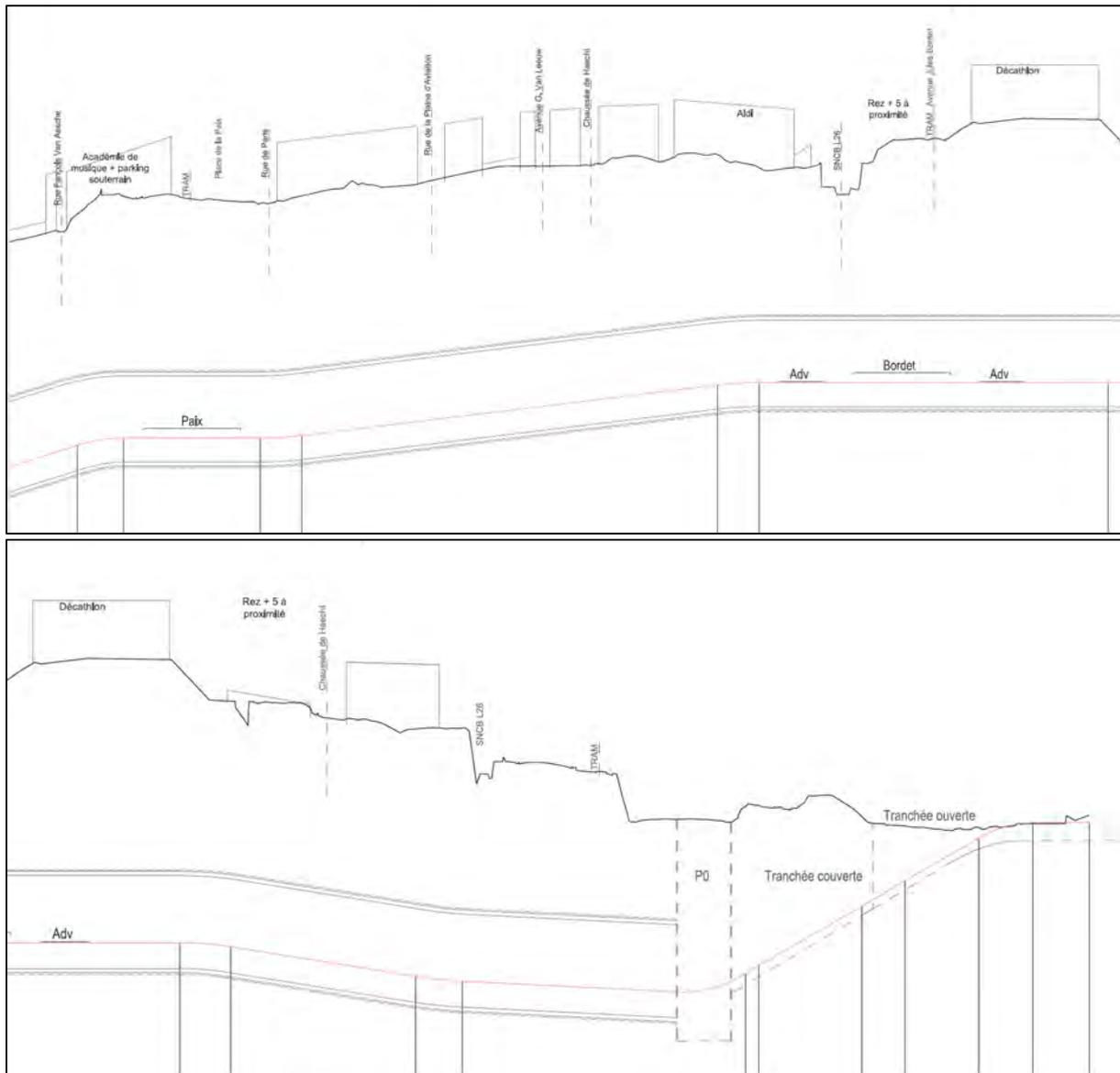


Figure 132 : Localisation des appareils de voies (ADV) le long du tracé , source : STIB

Les appareils de voies sont tous situés en ligne droite. Leur localisation vis-à-vis des bâtiments en surface ne pose pas de problème car aucun bâtiment sensible existant ne surplombe la localisation proposée.

F. Analyse de la modélisation en termes de bruit solidien

Les spectres attendus du bruit solidien sont présentés dans la figure ci-dessous, avec les niveaux globaux dans la légende.

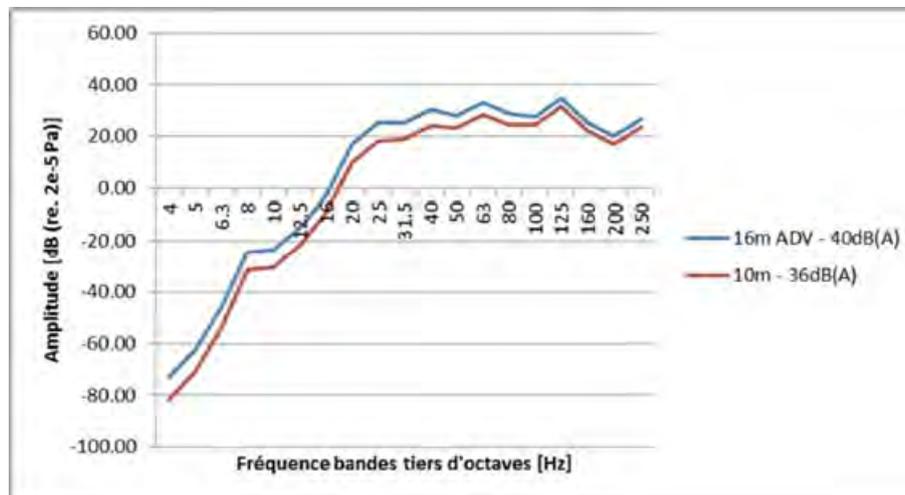


Figure 133: Résultats des calculs - spectres de bruit solidien attendu (Source : Rapport BMN) - Etude dynamique du tunnel et radier: étude de l'extension du réseau de transports en commun de haute performance vers le nord à Bruxelles – Tranches 3 et 4: avant-projet général et détaillé)

Pour la partie bruit solidien, le niveau attendu, sans appareil de voie, à une profondeur de 10m est de 36 dB(A) ce qui est inférieur au seuil de 40 dB(A).

A noter que vu les niveaux de bruit prévisibles estimés (compris entre 20 et 35 dB), il est également possible de dire que le passage des métros dans le tunnel étudié est susceptible d'être audible dans les bâtiments situés à proximité.

Malgré le fait que le bruit solidien soit conforme au seuil prévu, il est envisageable de considérer une pose de voie adaptée pour diminuer encore plus l'impact sonore dans les bâtiments.

6.8.4.5. Aspects relatifs à l'usure ondulatoire

L'usure ondulatoire du rail correspond à des efforts dynamiques élevés entre le rail et la roue causée par l'usure prématurée du rail et/ou des composants, ce qui induit des niveaux plus élevés de bruit solidien et de vibrations. L'usure ondulatoire se produit notamment dans les courbes serrées et au niveau des stations. Le projet ne prévoit pas de courbes serrées, mais il y a 7 stations où l'usure ondulatoire peut se développer plus rapidement lors de l'arrêt et du départ des rames. Il n'est pas possible à ce stade d'évaluer l'augmentation de vibrations ou de bruit solidien induit par une usure ondulatoire car celle-ci dépend de beaucoup de facteurs que l'on ne peut pas prédire.

Pour prévenir cet effet, le bureau BMN précise néanmoins quelques techniques telles que : l'emploi d'un rail plus lourd, l'usage d'appuis discrets équipés de résilient, la réduction de la distance entre les supports discrets, l'augmentation de la longueur du support du rail dans les fixations discrètes (traverses plus larges), réduire la raideur des supports discrets, etc.

6.8.4.6. Récapitulatif des incidences en matière de bruit et de vibrations

La situation actuelle en termes de vibrations mesurées sont satisfaisantes pour la rue Henri Van Hamme et insatisfaisante pour le 1200 de la chaussée de Haecht au regard des normes applicables. Les pics observés correspondent au trafic de trams et de voiture dans le premier cas et au trafic automobile soutenu dans le second.

L'étude vibratoire a montré que les niveaux vibratoires à la surface restent inférieurs au spectre de référence quand la profondeur du tunnel est supérieure à dix mètres.

La profondeur minimale rencontrée le long du tracé est toujours supérieure à 10m. Cette profondeur a été évaluée par rapport aux fondations (couverture de terre entre le tunnel et les fondations). Un dépassement des seuils n'est donc pas prévu.

La couverture pour un bâtiment standard de la chaussée de Haecht est de 13,0m, pour des bâtiments classés de la Fermette 't Hoeveke, il s'agit de 14,2m et au niveau de l'Hôtel communal Colignon on a 19,4m et pour les bâtiments anciens au Boulevard Lambermont, la couverture est de 14,7m.

En ce qui concerne les bâtiments sensibles aux tassements, la plupart ont une couverture suffisante. Le minimum étant pour un bâtiment de 5 étages avec beaucoup de vitrages au Rue Brabant 175 qui a une couverture de 12,4m.

Dans les rues d'Aarschot et Hoogvorst, il existe d'autres bâtiments où la couverture de sol au-dessus du tunnel est faible, mais toujours supérieure à 10m.

L'évaluation du bruit solidien respecte la convention entre la Région et la STIB. Cependant, le passage de rames de métro est susceptible d'être entendu.

Les appareils de voies sont tous situés en ligne droite. Leur localisation vis-à-vis des bâtiments en surface ne pose pas de problème car aucun bâtiment sensible existant ne surplombe la localisation proposée.

Les critères à utiliser sont divisés en quatre catégories qualitatives.

-  Ne modifie pas fondamentalement la situation et même l'améliore un peu
-  Est très favorable pour le critère par rapport à la situation de référence
-  Plutôt mauvais par rapport à la situation de référence
-  Impraticable, cette alternative doit être éliminée

Tracés souterrains : 

Les mesures en situation existante montrent que dans l'environnement urbain les résidents sont déjà soumis aux vibrations venant du trafic routier et ferroviaire autour d'un taux qui est considéré comme acceptable.

Le projet de métro, qu'il soit en monotube ou en bitube, combiné à la suppression du tram 55 (mais à la conservation des rails pour l'accès au dépôt, les déviations et pour l'écolage), conduira à une amélioration de l'environnement sonore, sauf en ce qui concerne les zones aux abords des stations qui devraient avoir un niveau sonore Lden augmenté (groupe de personnes, incidents nécessitant l'intervention de services de police, de secours, VP en attente de voyageurs...).

Il y aura également une amélioration de l'environnement vibratoire global de la zone desservie suite à la diminution du trafic de tram en surface et au réaménagement de la voirie dans les points noirs actuels. L'application de l'article 10 de l'ordonnance concernant la lutte contre le bruit en milieu urbain conduira à une réduction de la gêne sonore et vibratoire des trams et de la circulation automobile dans la rue van Oost. Les points noirs de la chaussée de Haecht entre la rue de Paris et l'avenue Jules Bordet et sur la place Liedts seront améliorés en remplaçant le tramway 55 par le tunnel métro et en procédant à un réaménagement de surface adéquat.

Les arbres, tous situés à plus de 9 mètres au-dessus du tunnel ne risquent pas d'être touchés dans leur système racinaire.

Stations : 

Un risque d'incidences vibratoires sur le bâti existe au droit des stations ou des puits d'aération lorsqu'une partie des nouvelles structures reprend le bâti et/ou est structurellement en contact (ponts vibratoires).

6.8.5. Mesures mises en œuvre par le demandeur en vue d'éviter, supprimer ou réduire les incidences négatives sur les bruits et les vibrations

Aucune mesure n'est proposée dans le permis d'urbanisme en phase d'exploitation. Voir plus bas les mesures proposées en phase de chantier.

6.8.6. Recommandations sur le projet, les alternatives et les variantes en phase d'exploitation

Il est recommandé de s'assurer que des dispositifs antivibratiles soient prévus au niveau des aiguillages.

L'impact de la vitesse des métros doit être calibrée au début de l'exploitation au droit des stations et auprès des bâtiments sensibles. Dans le cas où l'impact occasionne une gêne, la vitesse du métro devra être adaptée ponctuellement.

Il est recommandé d'ajouter des panneaux isolants au droit des stations et au niveau des ouvertures.

Il est recommandé de prévoir des absorbeurs de bruits au niveau des grilles de ventilation.

En ce qui concerne les aspects de l'usure ondulatoire potentiellement élevée à long terme au niveau des stations ou aux courbes, un monitoring annuel est recommandé et, le cas échéant, un meulage ou remplacement d'une partie de rail peuvent être effectués.

L'application de l'article 10 de l'ordonnance concernant la lutte contre le bruit en milieu urbain conduira à une réduction de la gêne sonore et vibratoire des trams et de la circulation automobile dans la rue van Oost. Les points noirs de la chaussée de Haecht entre la rue de Paris et l'avenue Jules Bordet et sur la Place Liedts seront améliorés en remplaçant le tramway 55 par le tunnel métro et en procédant à un réaménagement de surface adéquat.

6.8.7. Analyse des incidences sonores et vibratoires du chantier

6.8.7.1. Description des aspects sonores et vibratoires du chantier

Les incidences sonores et vibratoires des travaux sont abordées de manière qualitative en étudiant d'une part les principales sources sonores et méthodes prévues dans le cadre du chantier et d'autre part en analysant spécifiquement les impacts sonores et vibratoires de chaque phase en fonction du type de travaux réalisés. Des recommandations spécifiques sont également émises pour la phase chantier au chapitre correspondant.

A. Phases du chantier

En termes de bruit et de vibrations, les incidences les plus importantes à prévoir seront les périodes d'utilisation des engins et équipements techniques lors des phases suivantes :

- Travaux préparatoires, démolitions
- Travaux de terrassements et de fouilles à ciel ouvert
- Travaux de fondations
- Travaux en béton (gros œuvre)
- Constructions souterraines et égouts
- Super structure.
- Dans une moindre mesure les travaux de maçonnerie et de second œuvre (finition).

En outre pendant toute la durée du chantier le charroi de camions aura un impact sonore potentiel significatif car dans le cas présent le volume de terre à excaver est très important.

À titre indicatif, le tableau suivant présente les niveaux de bruits moyens prévisibles pour un chantier typique en fonction des principales phases de chantier (et sans obstacle entre le chantier et le récepteur).

Phase de travaux	Niveaux sonores indicatifs équivalents LAeq en dB(A)			
	10 à 15 m	25 à 30 m	50 à 65 m	≥100 m
Terrassement – fondations	75 à 80	71 à 76	68 à 73	≤ 70
Gros œuvre	78 à 82	73 à 77	68 à 72	≤ 67
Second œuvre	62 à 67	57 à 62	51 à 57	≤ 52

Tableau 42 : Niveaux de bruits indicatifs prévisibles à proximité d'un chantier selon différentes phases de travaux (source : Dossiers bruit de chantier 2006 – SCETAURROUTE – J.M. Abramovitch)

Les logements, commerces et immeubles de bureaux situés directement face aux emprises de chantier sont les plus sensibles aux nuisances sonores.

En effet l'environnement étant très urbain, les bâtiments font office d'obstacle au bruit. Les riverains et bâtiments plus éloignés seront donc protégés et moins soumis aux bruits générés

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

par le chantier. Des aménagements spécifiques sont prévus en phase chantier pour réduire l'impact sonore et vibratoire.

Il est prévu de démarrer les travaux de forage en janvier 2025 pour arriver au puits P5, où il sera démonté et évacué deux ans après, en mars 2027. Afin d'optimiser le délai global du Projet, toutes les stations seront excavées avant le passage du tunnelier.



Figure 134 : Calendrier prévisionnel du tunnelier (Tractebel, 2020)

Le tunnelier sera mis en place dans le P0, puits de démarrage construit au niveau du futur dépôt de Haren, et ressortira de terre au P5, puits de chantier construit à cet effet, à proximité de la Gare du Nord, au niveau de la rue d'Aerschot. Ce puits est inexploité jusqu'à l'arrivée du tunnelier. On enlève la tête de coupe et le tunnelier repart dans le sens inverse. Cet ouvrage a déjà été autorisé et étudié. Seule la sortie de la tête de coupe est prise en compte.

Le tunnel est un ouvrage intégralement réalisé en souterrain, ce qui fait que l'impact sur la situation existante en surface est minimale. La méthode de forage au tunnelier à pression de confinement comporte un niveau de tassements et de vibrations très faible.

De plus, pendant toute la durée du chantier, une surveillance des ouvrages sera mise en place, avec une attention particulière lors du passage sous certains bâtiments sensibles. La distance relative des bâtiments sensibles est un paramètre important. Un examen de la présence des bâtiments sensibles est effectué (détaillé ci-avant dans ce document).

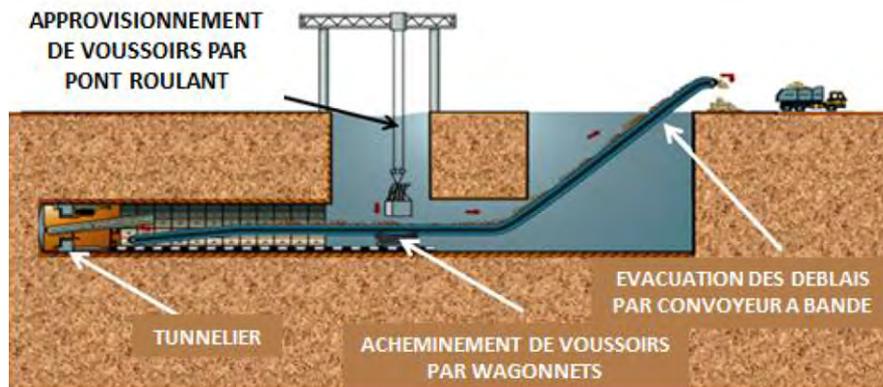


Figure 135 : Principe de fonctionnement d'un tunnelier

Les 5 grandes phases sont les suivantes :

Phase	Descriptif travaux	Durée
Phase 1	Travaux préparatoires P5 et P0 comprenant la démolition du bâtiment existant et d'une partie du mur de soutènement des quais mais aussi les travaux de déviation des concessionnaires et les installations de chantier	7 mois (P5) et 10 mois (P0)
Phase 2	Travaux de génie civil des puits comprenant les travaux d'excavation à ciel ouvert, la réalisation des parois moulés, d'un bouchon de ciment (jet- grouting) à l'intérieur du puits et d'une dalle de recouvrement	20 mois (P5) et 24 mois (P0)
Phase 3	Tunnelier de P0 à P5	26 mois
Phase 4	Démontage du tunnelier au P5	3 mois
Phase 5	Finition	6 mois

Tableau 43 : Phasage du projet

En phase 3, les travaux auront peu d'impacts sonores car le chantier se déroulera principalement en souterrain. Hormis le charroi, seules les installations hors sols restantes seront alors encore susceptibles de générer du bruit en environnement (grue, poste haute tension et stockage des matériaux).

Pour le puits P0 le montage en phase 1 et pour le puits P5 le démontage en phase 4 du tunnelier relatif à la seconde partie du métro nord générera du bruit. Le démontage du tunnelier est prévu en souterrain et son extraction en pièce détachée par une ouverture dans la rue (prévu constructivement au niveau du permis Gare du Nord).

Les travaux de finitions de la phase 5 concerneront surtout les aménagements intérieurs des puits et ne généreront pas de nuisances sonores significatives en environnement.

Le présent chapitre s'attache dans un premier temps à lister et décrire les différentes sources de bruit liées au chantier du présent projet qui, d'un point de vue sonore et vibratoire, présente une sensibilité importante du fait des travaux réalisés (démolition et travaux souterrains) mais aussi par la proximité avec des habitations ou des bureaux.

Ensuite, chaque emprise de chantier sera étudiée de manière plus spécifique en identifiant les enjeux et points d'attention à retenir. Enfin des recommandations pour réduire les impacts sonores et vibratoires sont émises.

B. Plusieurs localisations de chantiers

Pour rappel, les travaux hors sol sont les plus générateurs de bruit et concernent principalement 2 zones.

B.1. Zone du puits P5 – rue d'Aerschot

Cette zone correspond à la rue d'Aerschot, entre les numéros 122 et 128 et se situe à l'est de la gare dense en habitations et commerces. Les travaux nécessiteront des déviations pendant la phase chantier. Il s'agit uniquement de la phase de réouverture de la voirie pour sortir la tête de tunnelier. Objet du permis sur le tronçon gare du Nord délivré en mai 2020.



Figure 136: Localisation des immeubles les plus susceptibles d'être soumis aux bruits et vibrations du chantier du puits P5 (source : Google Earth)

B.2. Zone du puits P0 - Dépôt

Les riverains les plus concernés par les nuisances sonores sont les logements de la Rue du Biplan.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

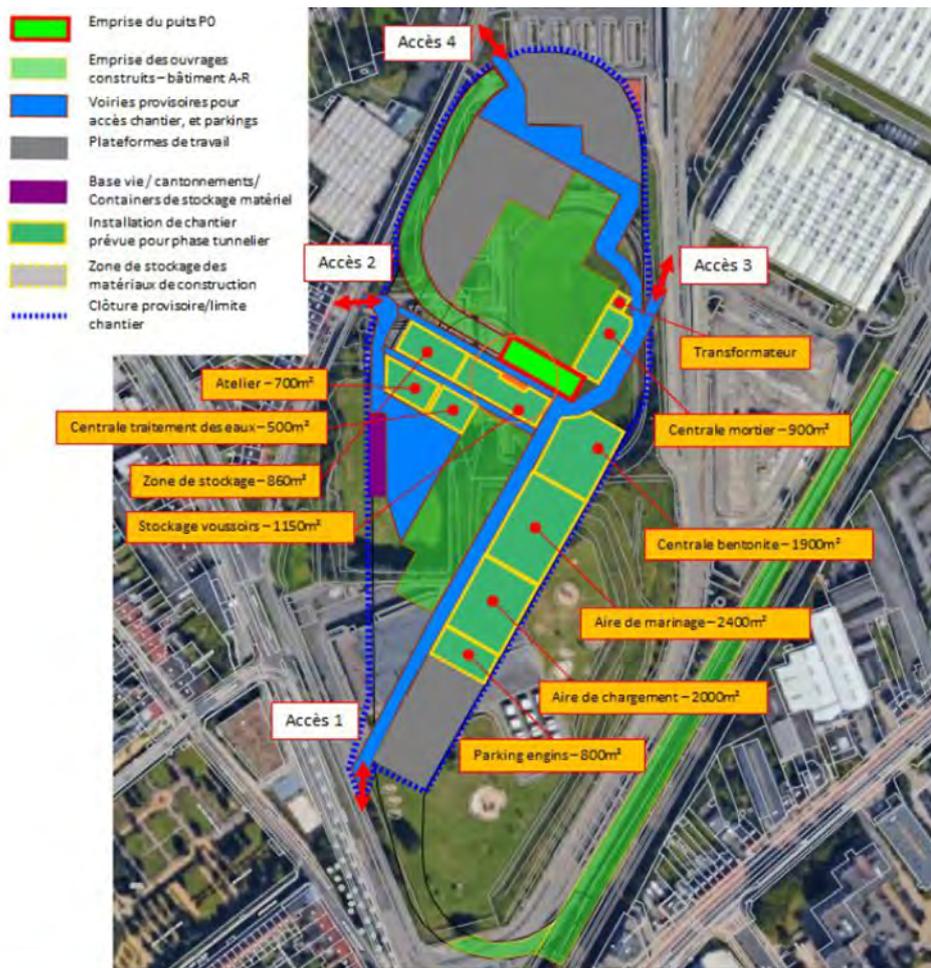


Figure 137: Chantier au niveau du dépôt (Tractebel, 2020)

Il y a différents accès au chantier.

6.8.7.2. Niveaux sonores limites

Il n'existe pas de cadre réglementaire pour les niveaux sonores limites provenant des différentes activités de chantier. Néanmoins il faut limiter la nuisance sonore chez les voisins.

L'arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 21 novembre 2002 relatif à la lutte contre les bruits de voisinage définit 3 périodes A, B, C. Il s'agit de tranches horaires journalières délimitées comme suit :

	Lun	Mar	Mer	Jeu	Ven	Sam	Dim	Jr Férié
07 :00-19 :00	A	A	A	A	A	B	C	C
19 :00-22 :00	B	B	B	B	B	C	C	C
22 :00-07 :00	C	C	C	C	C	C	C	C

Tableau 44 : tranches horaires journalières

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

Afin de limiter les bruits de chantier, des activités de chantier sont seulement admis pendant la période A. Hors de cette période, toutes les installations dont le fonctionnement est indispensable, doivent respecter les seuils de bruit de l'arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 21 novembre 2002 relatif à la lutte contre les bruits de voisinage.

Aussi pendant la période A, il faut distinguer 2 types de bruits, dont le niveau sonore est à limiter :

- Les bruits provenant du transport sur la rue
- Les bruits provenant des activités sur le chantier

Pour limiter le gêne sonore du transport de camions sur les rues, la contribution du bruit de ces camions ne peut pas augmenter la valeur $L_d(ay)$ actuelle à une valeur supérieure à $L_d + 3$ dB.

Pour limiter les bruits générés sur le chantier les niveaux sonores $L_{Aeq, \text{heure la plus bruyante}}$ ne peuvent pas dépasser les seuils du tableau 7 en limite de propriété la plus proche bâti. Dans ce tableau les bruits continus sont les bruits provenant des sources qui fonctionnent en continu pendant les heures de chantier (pompes, générateur, ...). Les bruits non continus sont les bruits provenant de toutes les autres sources de bruit.

$L_{Aeq, \text{heure la plus bruyante}}$	Actions
Bruits non continus :	
≤ 60 dB(A)	Le niveau acoustique est acceptable.
>60 dB(A) ≤ 65 dB(A)	Le niveau acoustique est acceptable sous conditions d'avoir informer par avance les personnes soumises à ces nuisances (en précisant la méthode de travail, la durée effective des opérations composants la phase de chantier considéré, en justifiant le caractère inévitable des bruits produits, les moyens mis en œuvre pour réduire au plus l'impact sonore des machines à l'origine de la nuisance, ...), les sources sonores dominantes doivent être identifiées, hiérarchisées et placées sous contrôle périodique.
>65 dB(A) ≤ 70 dB(A)	Le niveau acoustique risque de ne pas être acceptable pour les personnes soumises à ces bruits, les procédés ou sources sonores dominantes principales identifiées doivent être adaptées (réduction période horaire, réduction puissance, vérification des conditions de fonctionnement,..) ou remplacées par des installations ou procédés moins bruyants, les autres sources de bruit dominantes identifiées doivent être placées sous surveillance étroite.
≥ 70 dB(A)	Au-dessus de ce niveau, le niveau acoustique est inacceptable. Toutes les sources acoustiques dominantes identifiées doivent être immédiatement stoppées, les alternatives techniques de réalisation des travaux de chantier concernés doivent être mis en place pour respecter les seuils imposés. S'il s'agit des activités absolument nécessaires, dont il n'existe pas de méthodes alternatives il faut démontrer d'utiliser les meilleures techniques disponibles pour réduire le niveau sonore. Il est obligé d'informer par avance, les personnes soumises à ces nuisances (en précisant la méthode de travail, la durée

	effective des opérations composants la phase de chantier considéré, en justifiant le caractère inévitable des bruits produits, les moyens mis en œuvre pour réduire au plus l'impact sonore des machines à l'origine de la nuisance, ...). Ces sources sonores dominantes doivent être identifiées, hiérarchisées et placées sous contrôle périodique. Leur durée de fonctionnement est fort limitée
Bruits continus :	
≤ 50 dB(A)	Le niveau acoustique est acceptable.
> 50 dB(A)	Au-dessus de ce niveau, le niveau acoustique est inacceptable. Toutes les sources acoustiques dominantes identifiées doivent être immédiatement stoppées, les alternatives techniques de réalisation des travaux de chantier concernés doivent être mis en place pour respecter les seuils imposés. S'il s'agit des activités absolument nécessaires, dont il n'existe pas de méthodes alternatives il faut démontrer d'utiliser les meilleures techniques disponibles pour réduire le niveau sonore. Il est obligé d'informer par avance, les personnes soumises à ces nuisances (en précisant la méthode de travail, la durée effective des opérations composants la phase de chantier considéré, en justifiant le caractère inévitable des bruits produits, les moyens mis en œuvre pour réduire au plus l'impact sonore des machines à l'origine de la nuisance, ...). Ces sources sonores dominantes doivent être identifiées, hiérarchisées et placées sous contrôle périodique. Leur durée de fonctionnement est fort limitée

Tableau 45 : niveaux sonores limite de chantier en limite de propriété la plus proche bâti.

6.8.7.3. Sources de bruit liées au chantier

A. Identification des nuisances sonores

Les principales sources de bruit induites lors de la phase chantier sont les suivantes :

- L'utilisation des machines pour la réalisation des fondations (machines à pieux, hydrofraise, etc.)
- L'utilisation des engins de chantier usuels (pelleteuses, chargeuses, brise béton, tracteurs, grues, etc.),
- L'utilisation d'équipements techniques (centrale à béton ou bentonite, compresseurs, groupes électrogènes, postes haute tension, etc.),
- Les outils et machines de chantier (marteaux piqueurs, scies circulaires, bétonneuses, perceuses, etc.),
- La manipulation de matériaux (chocs, bruits de chargements/déchargements, etc.),
- Les bruits d'avertisseurs sonores type klaxon ou sirènes de recul,
- Les cris et paroles des travailleurs sur le chantier,
- Le charroi de poids lourds induit par le chantier pour l'approvisionnement des matériaux et l'évacuation des déblais,

- La déviation du trafic routier.

Les émissions sonores dépendront essentiellement des techniques spécifiques choisies, notamment pour la réalisation des pieux et des tunnels, ainsi que de la puissance acoustique théorique des engins de chantier et varieront en fonction des différentes phases de construction (terrassement, gros œuvre, etc.).

Dans le cadre du projet, chaque zone de chantier sera équipée de barraques de chantier, d'un poste haute tension, d'un magasin et de zones d'entreposage et de livraison.

Outre les engins de chantier usuels, les machines qui seront utilisées sur le chantier sont les suivantes :

- Machine pour parois moulées
- Centrale bentonite
- Centrale à béton et pompe
- Machine de pompage et de ventilation
- Machine à jet grouting
- Une grue tour (matériel de levage).

B. Engins et équipements de chantier

Les engins et machines de chantier sont soumis aux directives « machines » 2005/88/CE et 2006/42/CE. Les machines respectueuses de ces directives européennes présentent impérativement le pictogramme suivant :



Figure 138: Pictogramme marquage CE, conforme aux directives européennes 2005/88/CE et 2006/42/CE

De manière générale, on peut considérer que les engins de chantiers et équipements techniques annexes (compresseurs, groupes électrogènes, etc.) ont une puissance acoustique comprise entre 95 et 115 dB(A).

Le Directive européenne 2000/14/CE relatif à la puissance sonore des matériels destinés à être utilisés à l'extérieur donne les puissances sonores maximales des machines à ne pas dépasser.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

Type de matériel	Puissance nette installée P , en kW Puissance électrique P_{el} en kW ⁽¹⁾ Masse m de l'appareil, en kg Largeur découpe L , en cm	Niveau admissible de puissance acoustique en dB/1 pW	
		Phase I à compter du 3 janvier 2002	Phase II à compter du 3 janvier 2006
Engins de compactage (rouleaux compacteurs vibrants et plaques et pilonneuses vibrantes)	$P \leq 8$	108	105 ⁽²⁾
	$8 < P \leq 70$	109	106 ⁽²⁾
	$P > 70$	$89 + 11 \lg P$	$86 + 11 \lg P$ ⁽²⁾
Bouteurs, chargeuses, char- geuses-pelleteuses sur chenilles	$P \leq 55$	106	103 ⁽²⁾
	$P > 55$	$87 + 11 \lg P$	$84 + 11 \lg P$ ⁽²⁾
Bouteurs, chargeuses, char- geuses-pelleteuses sur roues, tombereaux, niveleuses, compacteurs de remblais et de déchets de type chargeuse, chariots élévateurs en porte-à- faux à moteur à combustion interne, grues mobiles, engins de compactage (rouleaux compacteurs non vibrants), finisseurs, groupes de puis- sance hydraulique	$P \leq 55$	104	101 ⁽²⁾ ⁽³⁾
	$P > 55$	$85 + 11 \lg P$	$82 + 11 \lg P$ ⁽²⁾ ⁽³⁾
Pelles, monte-matériaux, treuils de chantier, motobi- neuses	$P \leq 15$	96	93
	$P > 15$	$83 + 11 \lg P$	$80 + 11 \lg P$
Brise-béton et marteaux- piqueurs à main	$m \leq 15$	107	105
	$15 < m < 30$	$94 + 11 \lg m$	$92 + 11 \lg m$ ⁽²⁾
	$m \geq 30$	$96 + 11 \lg m$	$94 + 11 \lg m$
Grues à tour		$98 + \lg P$	$96 + \lg P$

Figure 139 : Puissances sonores maximales des machines (Directive européenne 2000/14/CE)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

Groupes électrogènes de soudage et de puissance	$P_{el} \leq 2$	$97 + \lg P_{el}$	$95 + \lg P_{el}$
	$2 < P_{el} \leq 10$	$98 + \lg P_{el}$	$96 + \lg P_{el}$
	► C1 $P_{el} > 10$ ◀	$97 + \lg P_{el}$	$95 + \lg P_{el}$
Motocompresseurs	$P \leq 15$	99	97
	$P > 15$	$97 + 2 \lg P$	$95 + 2 \lg P$
Tondeuses à gazon, coupe-gazon/coupe-bordures	$L \leq 50$	96	94 ⁽²⁾
	$50 < L \leq 70$	100	98
	$70 < L \leq 120$	100	98 ⁽²⁾
	$L > 120$	105	103 ⁽²⁾

(1) P_{el} pour les groupes électrogènes de soudage: courant de soudage conventionnel multiplié par le voltage de charge conventionnel pour la plus faible valeur du taux de travail donnée par le fabricant.

P_{el} pour les groupes électrogènes de puissance: énergie primaire selon la norme ISO 8528-1:1993, point 13.3.2.

(2) Les chiffres de la phase II sont indicatifs uniquement pour les types de matériels suivants:

- rouleaux compacteurs à conducteur à pied
- plaques vibrantes (> 3 kW),
- pilonneuses vibrantes,
- bouteurs (sur chenilles d'acier),
- chargeuses (sur chenilles d'acier > 55 kW),
- chariots élévateurs en porte-à-faux à moteur à combustion interne,
- finisseurs équipés d'une poutre lisseuse comportant un dispositif de compactage,
- brise-béton et marteaux-piqueurs à main à moteur à combustion interne ($15 < m < 30$)
- tondeuses à gazon, coupe-gazon/coupe-bordures.

Les chiffres définitifs dépendront de la modification de la directive à la suite du rapport visé à l'article 20, paragraphe 1. En l'absence de modification, les chiffres de la phase I resteront applicables durant la phase II.

(3) Pour les grues mobiles monomoteurs, les chiffres de la phase I demeurent applicables jusqu'au 3 janvier 2008. Au-delà de cette date, les chiffres de la phase II s'appliquent.

Le niveau de puissance acoustique admissible est arrondi par défaut ou par excès au nombre entier le plus proche (pour moins de 0,5, l'entier inférieur; pour 0,5 ou plus, l'entier supérieur).

Figure 140 : (suite) Puissances sonores maximales des machines (Directive européenne 2000/14/CE)

Le tableau ci-dessous montre les niveaux de bruit équivalent potentiel à une certaine distance de l'équipement de chantier (tenant compte de sa puissance acoustique).

Pression acoustique Lp (dB(A)) en fonction de la puissance acoustique						
Distance	Lw-Lp	Lw=115	Lw=110	Lw=105	Lw=100	Lw=95
5 m	22.0	93.0	88.0	83.0	78.0	73.0
10 m	28.0	87.0	82.0	77.0	72.0	67.0
20 m	34.0	81.0	76.0	71.0	66.0	61.0
50 m	42.0	73.0	68.0	63.0	58.0	53.0
100 m	48.0	67.0	62.0	57.0	52.0	47.0
200 m	54.0	61.0	56.0	51.0	46.0	41.0
300 m	57.5	57.5	52.5	47.5	42.5	37.5
400 m	60.0	55.0	50.0	45.0	40.0	35.0
500 m	62.0	53.0	48.0	43.0	38.0	33.0

Tableau 46 Niveaux de pression acoustique en dB(A) en fonction de la distance équivalent à des niveaux de puissance acoustique indicatifs

A l'analyse de ce tableau et compte tenu de l'environnement sonore existant (60-65 dB(A) pour les rues les plus passantes), on peut affirmer que chaque engin ou équipement de chantier peut perturber de manière significative l'environnement sonore actuel au moins sur les 50 à 100 premiers mètres par rapport aux sources considérées. Outre les bruits continus des moteurs à un niveau sonore constant, il existe sur un chantier également des bruits caractéristiques (bruit impulsionnels, bruit répétitif (ex. bip de recul)) avec une perturbation de plus de 100 m pour certaines bruits caractéristiques (ex. marteau).

Or dans le cas présent, les riverains sont situés à moins de 5m des zones de chantier prévues pour le retrait du tunnelier du puits P5 et, côté rue du Progrès, l'emprise chantier est située à environ 13m d'un immeuble de bureaux et 28m du premier immeuble de logement. Au dépôt et à proximité du P0, des habitations de la rue du Biplan sont situées à plus de 50 m des zones de construction du chantier, particulier l'atelier, le zone de stockage, et le centrale de traitement des eaux. La distance aide, mais le chantier durera des années pour les personnes qui habitent là. Une attention particulière est nécessaire. De plus, les différentes phases du chantier prévoient l'installation d'engins ou d'équipements à moins de 50m. Les autres parties sont plutôt à 150m de distance ce qui rend des niveau de pression acoustique inférieur au 60 dB(A) pour des engins avec une puissance acoustique jusqu'à 110 dB(A).

Les chantiers ne sont pas soumis à l'arrêté du 21 novembre 2002 relatif aux installations classées. Par contre, le permis environnemental peut poser des conditions particuliers. Le fait de leur proximité avec les logements, commerces et bureaux, si les équipements les plus bruyants ($L_w > 105$ dB(A)) ne sont pas protégés par des dispositifs anti- bruit, ils auront un impact sonore important sur les riverains. Afin de réduire les nuisances sonores, Beliris est actuellement en train de réfléchir à des systèmes réducteurs de bruits, tels que des palissades isolantes, des capots de protection acoustiques sur les machines, etc.

En outre, durant certaines phases de travaux (démolition, utilisation du brise béton ou marteau piqueur, compactage des terres, ...), les engins de chantier génèrent des vibrations, parfois gênantes pour le confort des riverains, mais qui ne mettent généralement pas en péril la stabilité des constructions riveraines.

Dans le cas présent la proximité de certaines emprises de chantier et les habitations permet d'affirmer que les vibrations induites pourront avoir un impact significatif sur les riverains, notamment au niveau de la rue d'Aerschot et de la rue du Biplan. Des précautions devront être prises pour limiter le risque de gêne vibratoire et une attention particulière sera également

apportée au risque d'apparition de fissures car vu la très grande proximité du chantier avec les logements (<5m), celui-ci est jugé non négligeable.



Chargeuse (pelle mécanique)



Excavatrice (ou brise-roche)



Machine à pieux forés



Hydrofraise

Figure 141: Illustration d'engins de chantier usuels susceptible d'être utilisés dans le cadre du projet

C. Charroi de chantier

Les nuisances sonores d'un charroi "chantier" dépendent des paramètres suivants :

- La vitesse des camions.
- Le chargement du camion.
- L'état du camion.
- La fréquence des camions (nbre/jour).
- La pente de voirie (bruit de moteur).
- L'état de la voirie

Le tableau ci-dessous montre les niveaux de bruit équivalent à côté d'une voirie (10 camions/h).

Distance	5m	10m	15m	20m	25m	50m	75m	100m	150m	200m
Pente 0 %										
Vitesse de 30 km/h	65,5	62,1	60,1	58,5	57,1	53,0	51,2	49,9	48,0	46,5
40 km/h	64,4	61,0	59,0	57,4	56,0	51,9	50,0	48,8	46,9	45,3
50 km/h	63,6	60,3	58,3	56,7	55,3	51,2	49,3	48,1	46,1	44,6

Tableau 47 : Niveaux de pression acoustique moyen en dB(A) obtenus à côté d'une voirie (10 camions/heure) en fonction de la distance à la voirie

Ce tableau montre que l'iso-contour de 60 dB(A) se trouve à environ 15 m de la voirie et celui de 65 dB(A) à 5m. Il est important de signaler que les niveaux de crêtes (pointes) lors du passage d'un camion sont nettement plus élevés (80 dB(A) à moins de 20 m).

En outre le tableau ci-dessus ne prend pas en compte les bruits annexes liés au charroi des camions que sont les avertisseurs sonores, les sirènes de recul des camions, la circulation à

vide des camions (tôle qui vibre), le stationnement des camions moteurs en marche, les bruits de déchargements/chargements des matières, ...

Pour le chantier côté dépôt, l'accès aux emprises de chantier se feront via Houtweg (accès 1), rue du Biplan (accès 2) et rue des Jardins Potagers (accès 4). La rue du Biplan est étroite et à sens unique.

Cependant, le passage régulier de charrois de chantier pour l'évacuation et l'approvisionnement du chantier provoque également un risque de nuisance sonore, surtout durant les phases d'excavations.

L'impact du charroi généré par le chantier au niveau du puits sera faible.

La livraison de matériaux et l'évacuation des déblais sont prévus par le côté nord de la rue d'Aerschot pour le chantier côté gare du Nord et aux différents accès au chantier côté dépôt. Le nombre de camions nécessaires au quotidien pour l'apport et l'évacuation des matériaux sera respectivement de 1, 5 et 10 camions par jour pour les phases 1, 2 et 3. Une camion par heure avec une vitesse de 40 km/h génère des niveaux sonore équivalents de moins de 55 dB(A) à 5m de distance du façade.

Au moments de crête, on comptera donc 15 camions par jour, répartis entre 6h et 22h environ. Ramené à un trafic horaire et en considérant 2 passages par camion, cela équivaut en moyenne à 3 camions par heure durant la période la plus critique, soit un trafic relativement faible par rapport au trafic routier déjà existant.

Enfin en ce qui concerne les itinéraires des poids lourds, les itinéraires plus rapides et plus courts ont été analysés.

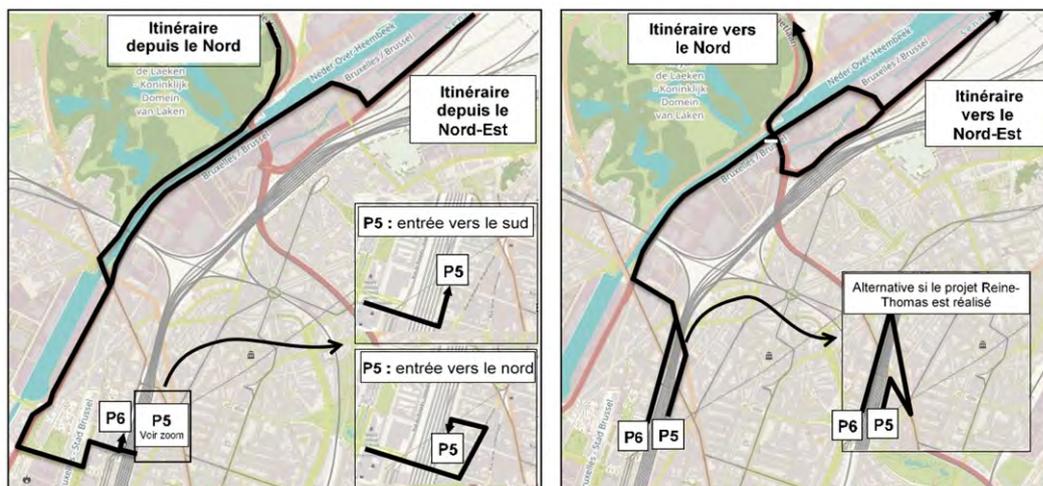


Figure 142: Proposition d'itinéraires IN/OUT en lien avec les zones de chantier (source : chapitre mobilité)

Il est jugé que pour le chantier au niveau du puits P5, l'itinéraire proposé est optimisé par rapport au plan de circulation initial prévu car évite les rues locales. En outre les routes proposées (chaussée de Vilvorde, Allée Verte, Bd Simon Bolivar...) sont de grands axes routiers mieux approprié du fait de leur grande charge de trafic actuel mais aussi en termes de configuration des voiries et d'implantation/usage des bâtiments (larges boulevards avec principalement des bâtiments de bureaux ou d'activité ayant un recul par rapport aux voiries).

Par conséquent avec les nouveaux itinéraires, le charroi généré par le chantier induira moins de nuisances sonores pour les riverains que les itinéraires initiaux envisagés.

D. Déviation du trafic routier

La rue d'Aerschot sera coupée à la circulation motorisée durant toute la construction du puits P5, ce qui imposera un report du trafic vers la rue de Brabant et une inversion de trafic sur la rue de Rogier et la rue d'Hoogvorst.

Ces déviations induiront une légère augmentation de trafic sur les portions concernées mais compte tenu que la rue de Brabant est déjà très fréquentée et que les rues Rogier et d'Hoogvorst restent à sens unique, il est estimé que les impacts sonores liés à la déviation du trafic routier en surface seront faibles. Pour certaines voiries (rue d'Aerschot et rue d'Hoogvorst, ils seront même plutôt positifs car il est prévu une moins grande fréquentation de ces voiries durant la phase chantier (voir chapitre mobilité).

Le plus grand risque de gêne sonore lié aux déviations est l'usage plus fréquent des avertisseurs sonores par les automobilistes en cas de files et d'embarras dans la circulation.

6.8.7.4. Niveaux vibrations limites

Il n'existe pas de cadre réglementaire pour les niveaux vibratoires provenant des différentes activités de chantier. Néanmoins il faut limiter la nuisance vers les résidents.

Pour les vibrations, il est proposé d'utiliser les limites de la norme allemande DIN 4150-2 pour la gêne aux personnes dans les bâtiments.

Cette norme précise les limites pour des vibrations générées par des travaux de construction sur une longue période suivant 3 niveaux.

Niveau	Mesures
I	Avec de vibrations inférieures à ce niveau on peut supposer qu'il n'y aura pas d'inconfort considérable.
II	Les vibrations inférieures à ce niveau ne devraient pas non plus provoquer d'inconfort considérable tant que les mesures suivantes sont prises : <ul style="list-style-type: none"> • Informer toutes les personnes susceptibles d'être exposées aux vibrations de la durée et de l'intensité des vibrations attendues, • Expliquer que lors de travaux de construction des vibrations sont inévitables, • Introduire des mesures additionnelles pour limiter l'inconfort comme faire des pauses, garder des périodes de calme, etc ... • Nommer une personne de contact que les personnes exposées aux vibrations puissent joindre en cas de problème, • Informer les personnes exposées aux vibrations de leur effet sur les bâtiments, • Si nécessaire, mesurer les vibrations réelles du chantier et évaluer leur effet sur les personnes et les structures des bâtiments.
III	Les effets produits par des vibrations supérieures à ce niveau ne sont pas acceptables.

Tableau 48 Conclusions et actions vibrations chantier (source : DIN4150, 1999)

Le niveau II peut être choisi si les différentes mesures sont prises avant les travaux, puisque si les vibrations restent inférieures à ces valeurs, alors on peut considérer qu'il n'y aura pas d'inconfort majeur pour les personnes. Les seuils sont présentés dans le tableau suivant.

Durée D en jours	D ≤ 1			6 < D ≤ 26			26 < D ≤ 78		
	Au	Ao	Ar	Au	Ao	Ar	Au	Ao	Ar
I	0,8	5	0,4	0,4	5	0,3	0,3	5	0,2
II	1,2	5	0,8	0,8	5	0,6	0,6	5	0,4
III	1,6	5	1,2	1,2	5	1,0	0,8	5	0,6

Tableau 49 Valeurs limite des vibrations chantier (source : DIN4150, 1999)

Le paramètre D de ce tableau correspond uniquement au nombre de jours où il y a la présence de vibration et non nécessairement le nombre de jours total de la période des travaux de construction.

Pour une durée entre 1 et 6 jours une interpolation des valeurs est à faire comme par exemple démontré ci-dessous pour le valeur A_u .

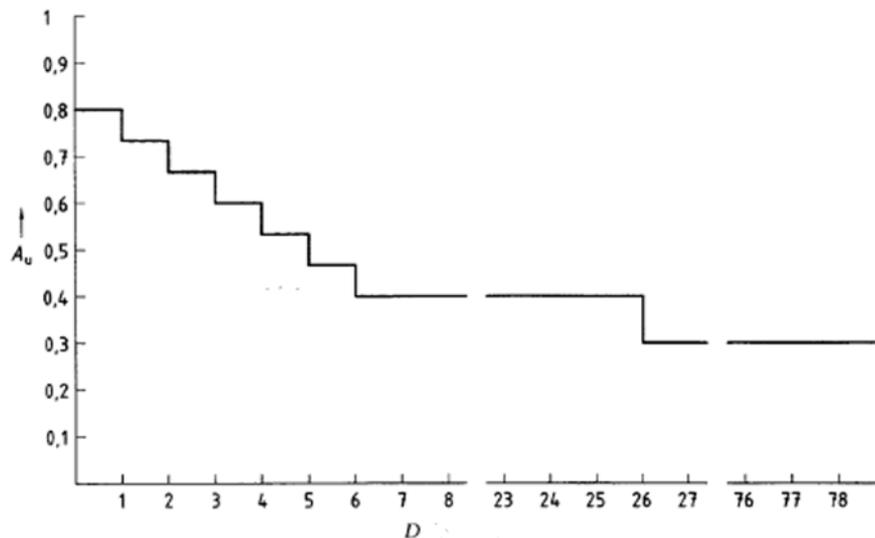


Figure 143: Interpolation valeurs limite vs la durée D (source : DIN4150, 1999)

Si KBF_{max} , est inférieure ou égale à A_u , les exigences sont remplies. Si KBF_{max} est supérieur à A_o , les exigences ne sont pas satisfaites. Dans les autres cas, les exigences sont remplies si le KBF_{Tr} n'est pas supérieur à la valeur A_r .

Le KBF_{max} est la valeur maximale des KBF_{ti} pendant une partie de la journée (jour, soir, nuit). Le KBF_{Tr} correspond au valeur effective (racine carrée moyenne) des KBF_{ti} . Les KBF_{ti} sont les valeurs maximale des KB pendant 30 secondes. Le valeur KB est la valeur de vibration progressive effective et pondéré et correspond aux valeurs de vitesses.

La présence de vibration est déterminée lorsque les limites pour des vibrations continues, en conditions normale, sont dépassées :

Catégorie	Zone	Jour			Nuit		
		Au	Ao	Ar	Au	Ao	Ar
1	Bâtiments situés dans des zones purement industrielles, où les seuls logements sont destinés aux propriétaires ou gestionnaires d'installations, aux surintendants, au personnel de secours, etc.	0,4	6	0,2	0,3	0,6	0,15
2	Bâtiments dans des zones à prédominance commerciale	0,3	6	0,15	0,2	0,4	0,1
3	Bâtiments dans des zones qui ne sont ni à prédominance commerciale ni à prédominance résidentielle	0,2	5	0,1	0,15	0,3	0,07
4	Bâtiments situés dans des zones à prédominance ou purement résidentielle	0,15	3	0,07	0,1	0,2	0,05
5	Bâtiments situés dans des zones spécialement protégées (comme les hôpitaux) ou dans des centres de cure	0,1	3	0,05	0,1	0,15	15

Tableau 50 : Valeurs limite conditions normales (source : DIN4150, 1999)

Dans ce projet le chantier dépôt se situe plutôt à catégorie 3 mais les résidents le long du tracé tunnel plutôt à catégorie 4 ainsi le chantier côté gare du nord.

6.8.7.5. Impact des vibrations des travaux en phase de chantier

A. Introduction

Les principales vibrations émises lors d'un chantier sont dues aux travaux de démolitions (brise-béton, engins de démolitions, etc.), de fondations (excavations, pieux, palplanches, marteau piqueur, etc.) et certains autres travaux (par exemple jet-grouting).

Spécifique pour ce projet, le tunnelier qui passe au-dessous du bâti peuvent générer des vibrations.

Le trafic du chantier sur une route mal aménagée (dos d'âne, inégalité, nids de poule, casse-vitesse) peut également engendrer des nuisances. Les activités du chantier qui provoquent des vibrations sont généralement liées aux sources temporaires.

Ces vibrations peuvent causer les problèmes suivants :

- La gêne des personnes > 0,1 mm/s. Les vibrations sont très vite perçues comme gênantes. La gêne est ressentie en fonction de l'amplitude de vibration et de la fréquence (Hz).

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

- Les dégâts aux bâtiments standards $> 5 \text{ mm/s}$ = 50 fois plus fort que le seuil de sensibilité d'une personne. Les vibrations sont donc plus fréquemment gênantes pour les personnes qu'à risques pour des bâtiments.
- Le dysfonctionnement d'équipements sensibles (imprimerie, microscopes électroniques). Les équipements sensibles sont rarement rencontrés mais ont des taux de vibrations admissibles fort bas.

A Haren, la distance avec les immeubles ($\pm 100\text{m}$) est plus importante. Le risque de dégâts aux bâtiments ou de gêne vibratoire y est jugé négligeable.

En général, les sources possibles de vibrations pendant la phase de construction sont:

- Entrées et sorties de véhicules lourds
- Les vibrations des compacteurs
- Le durcissement dynamique
- Travaux d'excavation et de démolition
- Explosions

Les arbres, tous situés à plus de 9 mètres au-dessus du tunnel ne risquent pas d'être touchés dans leur système racinaire.

B. Tunnelier

Quand le tunnelier creuse à travers le sol, il génère des vibrations et du bruit. Le niveau de bruit et de vibration dépend des conditions du sol. Il n'est pas possible d'éliminer complètement les vibrations générées par le tunnelier.

Le niveau de bruit solide entendu dans un bâtiment provenant du tunnelage dépend du type de bâtiment et de sa proximité vis-à-vis l'alignement du tunnel.

Certaines personnes peuvent éprouver de faibles niveaux de bruit et de vibration quand le tunnelier passe directement sous leur propriété. La nuit, lorsque le niveau de bruit de fond est faible, cela peut être plus probable.

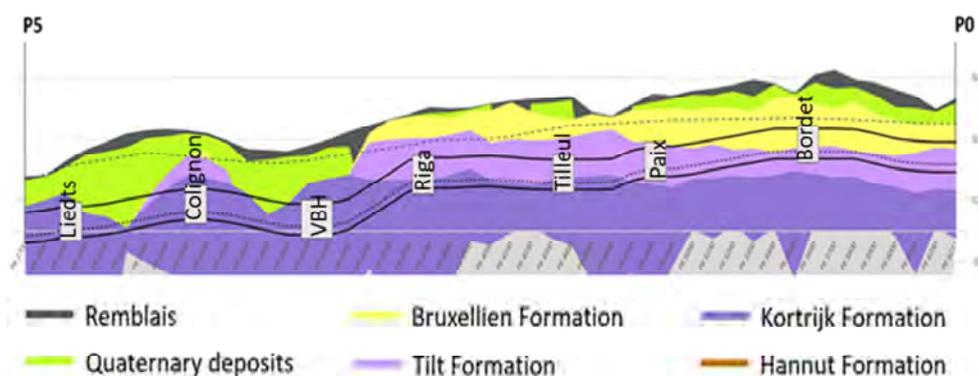


Figure 144 : Synthèse géologique le long du tracé (BMN, 2020)

Le tunnelier passe le Kortrijk, le Tilt et le Bruxellien formation qui sont composé du sable et d'argiles. Dans ces couches, le creusement est très lisse. Très peu de roches sont à retrouver qui peuvent générer des vibrations à l'impact.

Le tête du tunnelier tourne au maximum à 4 tours par minute et le tunnelier avance à 10 mètres par jour.

Rahman (2007) rapport un niveau de vibration de 1 mm/s entre 10 à 20Hz pour un tunnelier à 25m de profondeur à Dublin dans une couche d'argile avec beaucoup de rochers (Dublin boulder clay).

Un monitoring des vibrations est possible pendant les travaux sur un point fixe au-dessus le tunnel ou complémenté avec des mesures de vibrations sur le tunnelier même. Réduire instantanément la vitesse de rotation ou la vitesse d'avancement peuvent diminuer les vibrations.

Il est possible qu'on puisse apercevoir le passage du tunnelier. Les vibrations et le bruit solidien sont d'un niveau limité quand le tunnelier passe des matériaux peu rigide ou rocheuses. Ceci est présent pour quelque jours et pourrait être acceptable suivant le standard allemand pour des chantiers.

Il est à recommander que les résidents et les entreprises le long de du tunnel seront informés.

C. Entrées et sorties de véhicules lourds

Les véhicules présents sur le site et la circulation en provenance et à destination du site peuvent causer des nuisances. Deux mécanismes sont en jeu : la poussée du sol autour du véhicule en raison de son propre poids et les changements rapides de la pression du sol au niveau de chaque roue lors du passage.

L'amplitude des vibrations dépend de la charge à l'essieu, de la vitesse du véhicule et de l'état du revêtement routier.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

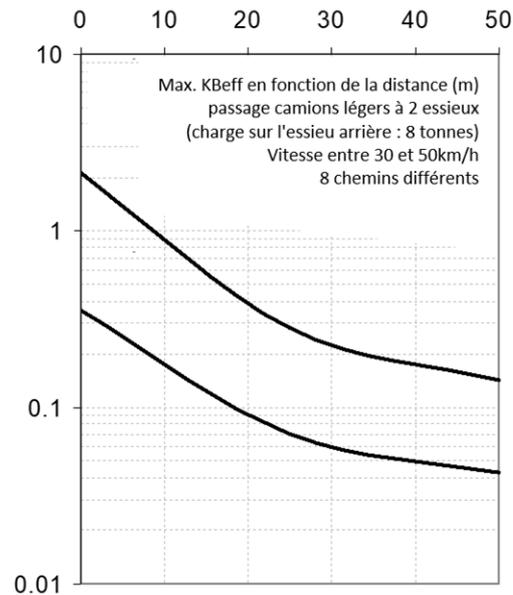


Figure 145: La vitesse de vibration maximale pour le passage d'un camion léger à 2 essieux avec une charge sur l'essieu arrière de 8 tonnes (Réf. T.E. Frydenlund du Norges Geotekniske Institutt)

Le passage est perceptible jusqu'à une distance de 20 à 30 m. Si l'intensité des camions est trop élevée ou si la distance qui les sépare des maisons est trop faible, les vibrations peuvent causer des nuisances.

À vitesse normale et sur une chaussée plane, il est très peu probable que les maisons soient endommagées.

En cas de mauvais revêtement de la route ou de franchissement d'obstacles et de ralentisseurs, on peut s'attendre à des vibrations gênantes pour les véhicules à partir de 15 tonnes. La nuit, dans les zones bâties, la valeur autorisée sera certainement dépassée pour les maisons proches de la rue.

Les mesures suivantes doivent être prises :

- Éviter autant que possible le charroi par des véhicules lourds dans les zones urbaines denses (surtout la nuit)
- Limitation des charges à l'essieu
- Limitation de la vitesse des véhicules, notamment sur les mauvais revêtements routiers
- Réparation immédiate des dommages à la surface des routes

Si nécessaire, des mesures de contrôle doivent être effectuées dans un certain nombre d'habitations afin de déterminer la charge par essieu et la vitesse autorisées.

D. Les vibrations des compacteurs

Les machines suivantes, entre autres, peuvent être cataloguées ci-dessous :

- Deux types de rouleaux vibrants d'un poids de 40 à 60kN
- Rouleaux vibrants automatiques avec roues à entraînement pneumatique de 40 à 100kN
- Rouleaux vibrants en tandem avec un ou deux rouleaux vibrants de 15 à 100kN
- Compacteurs à plaques vibrantes avec un poids statique de 1 à 8kN

Aucune mesure particulière n'est requise en cas d'utilisation de vibreurs de moins de 20 à 30 kN.

Les résonances éventuelles des habitations peuvent causer des dommages au plâtre, aux cheminées et autres. La nuisance des vibrations causée par les compacteurs est plus importante que celle du trafic routier.

Les mesures suivantes doivent être prises :

- Utiliser de faibles amplitudes de vibration à proximité des habitations
- Éviter de démarrer et d'arrêter les compacteurs plus d'une fois
- En cas de doute, des mesures de contrôle doivent être effectuées dans les logements
- Les appareils vibrants (compacteurs) dont le poids du rouleau est supérieur à 50 kN ne peuvent pas être utilisés à moins de 10 m de la maison, surtout lorsque le sol est gelé.

E. Durcissement dynamique

Lors de la construction de tranchées dans des talus (remblais), le sol peut être durci (compacté) en utilisant un marteau à chute libre. Des masses d'un poids allant jusqu'à 200 kN et des hauteurs de chute allant jusqu'à 20 m peuvent donner lieu à un apport d'énergie important dans le sous-sol. Il est recommandé d'éviter cette technique.

F. Travaux d'excavation et de démolition

Il y a une grande différence dans l'excitation des vibrations avec un sol dégelé ou gelé. Les vibrations sont principalement générées par les impacts des pelles de terrassement et des morceaux de roches détachées. Le mouvement des engins d'excavation provoque également des vibrations mais généralement beaucoup moins que celles causées par le trafic routier susmentionné. On ne s'attend donc pas à des dommages aux structures ou à de grandes nuisances vibratoires.

Si les travaux de démolition doivent être effectués trop près de la structure du bâtiment ou des installations critiques, les mesures suivantes doivent être prises :

- Recouvrir le terrain de sable
- Utilisation de grignoteuses au lieu de machines à balancier ou de marteaux piqueurs

6.8.7.6. Mesures mises en œuvre par le Demandeur en phase de chantier

Les mesures suivantes sont mises en œuvre par le Demandeur en vue d'éviter, supprimer ou réduire les incidences négatives sur le bruit et les vibrations.

- Le tunnel est un ouvrage intégralement réalisé en souterrain. La méthode de forage au tunnelier à pression de confinement comporte dans des couches sable ou d'argile peu rocheuses un niveau de vibrations limité. Par contre, les vibrations peuvent être senties pendant quelques jours du passage du tunnelier à environ 10 mètres par jour. Un plan d'action de surveillance (monitoring) vibratoire sera prévu.
- Il est préférable que pendant les phases 1 et 2 des ouvrages, une surveillance de bruit soit prévue aux limites des chantiers. Pour le chantier au dépôt à côté de rue du Biplan et pour le chantier à la gare du Nord au Rue d'Aerschot.

En ce qui concerne le chantier au niveau des puits :

- Placer les équipements techniques annexes du chantier les plus bruyants (compresseurs, groupes électrogènes, etc.) à l'intérieur d'une zone isolée (capotage), et le plus loin possible des habitations environnantes ;
- Empêcher le passage par les rues résidentielles (à PO la rue du Biplan) pour la livraison et l'évacuation pour le chantier. Préférer la livraison et l'évacuation via des autres accès ou moyens ;
- Limitation de la vitesse de circulation, tant pour la circulation locale (30 km/h maximum) que pour les transports de livraison chantier / évacuations ;
- Mise en œuvre des murs de soutènement acoustiques en gabions pour la phase chantier. Investiguer le placement adéquat des bâtiments de chantier qui peuvent eux-mêmes agir comme écran acoustique.

A propos des engins:

- Utilisation de machines et équipements portant le marquage CE attestant le respect de niveaux sonores admissibles ;

6.8.7.7. Recommandations sur le projet, les alternatives et les variantes en phase de chantier

A. Equipements et techniques

Le choix des équipements et des techniques de construction les moins bruyants est primordial pour la réduction de l'impact sonore du chantier.

Concernant les équipements et engins de chantier, il est toujours préférable d'agir à la source, les recommandations suivantes sont émises :

- Utiliser des machines et équipements portant le marquage CE attestant du respect de certains niveaux sonores maximaux admissibles ou plus silencieux. Sont particulièrement visés par les normes de bruit : le matériel et les engins de chantier, groupe électrogène de puissance ou de soudage, grue à tour, marteau-piqueur, moto-compresseur, pelles hydrauliques, etc.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

- Au besoin, enfermer ou isoler les équipements les plus bruyants et les plus proches des habitations (pompes, moteurs, groupes électrogènes...). Cette recommandation est déjà à l'étude par Beliris.
- Localiser les sources sonores dans les tranchées ou en souterrain pour réduire la propagation du bruit.
- Analyser la possibilité de construire en premier lieu le gros œuvre du dépôt qui permettra d'isoler les bruits de construction des éléments situés au sous-sol et au rez-de-chaussée du bâtiment.
- Employer des machines et outils de chantier les moins bruyants possible et bien entretenus.
- Limiter au maximum la durée d'apparition du bruit en mettant hors tension les machines dès qu'on en a plus l'utilité, en particulier la nuit et le week-end
- Interdire le stationnement prolongé (moteur en marche) des engins de chantier.
- Aménager un plan de circulation des engins de manière à limiter la mise en route de la sirène de recul.

B. Planification

Enfin la planification des tâches et l'information des riverains sont des outils essentiels pour limiter la gêne sonore ressentie par les riverains.

Au niveau de la planification et de l'aménagement du chantier :

- Conformément au RRU, fixer un horaire de chantier fixe et impératif : 7-19h et 7h-16h pour les travaux les plus bruyants et pour les évacuations des terres excavées (pour éviter le charroi et les chargements de poids lourds la nuit).
- Lors des phases les moins bruyantes du chantier, les horaires peuvent être étendus à la période de nuit mais il est recommandé de réserver pour cette période les travaux les plus calmes ou ayant lieu en souterrain. Pour les travaux en dehors des horaires classiques (7-19h), des dérogations devront être demandées par Beliris.
- Réaliser les travaux bruyants suivant un planning aussi serré que possible.
- Localiser les sources de bruit et la zone de livraison le plus éloigné possible des riverains ou prévoir des dispositifs antibruit pour réduire le bruit qu'elles émettent.
- Durant certaines phases d'un chantier, effectuer un monitoring pendant le chantier pour prévenir d'éventuels litiges.

C. Charroi du chantier

Par ailleurs, les bonnes pratiques relatives au charroi du chantier et aux livraisons sont les suivantes :

- Etablir un plan de circulation des poids lourds de manière à ce qu'ils ne puissent avoir accès aux emprises de chantier que par les routes les plus importantes et d'éviter les axes de moindre importance. Dans le cas présent (puits P5) les itinéraires les moins contraignants d'un point de vue sonore sont ceux proposés dans le chapitre 'Mobilité' et qui favorisent les grands axes routiers (chaussée de

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

Vilvorde, allée Verte, Quai des Usines...), évitent la rue Stephenson et réduisent le charroi au niveau des rues les plus peuplées (voir recommandation 2.7 du chapitre mobilité).

- Aménager une zone de chargement/déchargement des poids lourds protégée et à l'abri des riverains et où les manœuvres des camions sont limitées pour éviter les marches arrière (sirènes de recul).
- Limiter le nombre de camions de livraison / déblais par jour.
- Lors du chargement/déchargement des camions, limiter au maximum les bruits d'impacts de matériaux déplacés.
- Respect strict des limitations de vitesses et interdiction de klaxonner sur le site.
- Interdire l'arrêt ou le stationnement moteur en marche des camions, et tout particulièrement en cas de stationnement sauvage en dehors de la zone de livraisons

D. Bruit auprès des travailleurs

Enfin, le bruit auprès des travailleurs sur le chantier doit être traité de manière spécifique en informant le personnel travaillant sur le chantier mais aussi en assurant la protection des travailleurs contre les risques découlant ou pouvant découler d'une exposition au bruit pendant le travail. L'exposition quotidienne personnelle du travailleur doit être inférieure à 80 dB(A). Si cela n'est pas le cas, des mesures de protection spécifiques doivent être prises, variant selon que le niveau sonore dépasse ou non 85 dB(A) (Arrêté Royal du 16 janvier 2005). De manière générale, il faut imposer le port de protection auditive lors de l'utilisation par les travailleurs de machines bruyantes et/ou de travaux bruyants (exemple : utilisation marteau-piqueur...)

E. Traitement des vibrations

La problématique des vibrations se rapproche fort de celle du bruit : il est souvent plus intéressant de traiter les problèmes à la source que d'en réduire les conséquences.

Afin de réduire l'impact des vibrations sur le voisinage, les recommandations sont les suivantes:

- Etudier l'emplacement des sources. Les vibrations diminuent généralement avec la distance. Attention, le sous-sol peut induire des vibrations plus importantes à certains endroits éloignés en raison de la composition du sol.
- Pendant le forage, la vitesse d'avancement ou de rotation peuvent être diminués, instantanément, pour réduire les vibrations.
- Pour les compacteurs, utiliser de faibles amplitudes de vibration à proximité des habitations. Éviter le démarrage et l'arrêt plus d'une fois. Les appareils dont le poids du rouleau est supérieur à 50 kN ne peuvent pas être utilisés à moins de 10 m de la maison.
- Garder une distance maximale entre les sources de vibration et les résidences.
- Réserver de faire les travaux qui génèrent beaucoup de vibrations pendant la journée et si possible garder une fenêtre de paix au midi.

- Pour les engins, prévoit des dispositifs anti vibratiles pour l'ensemble des machines fixes (silentbloc ou plots ressorts selon les fréquences vibratoires à traiter).
- Enfin le bon entretien du matériel, des voiries d'accès ainsi qu'une utilisation en douceur des équipements, notamment les engins de chantier et poids lourds, contribuent également à réduire les nuisances vibratoires.

F. Protection et information des riverains

En matière de nuisances sonores, l'information des riverains quant à la planification des tâches est un outil essentiel pour limiter la gêne sonore ressentie par les riverains. Les recommandations en la matière sont, entre autres, les suivantes :

- Maintenir une bonne communication entre les riverains et l'entrepreneur par l'intermédiaire d'un responsable. Ce responsable se chargerait d'informer le voisinage du déroulement des travaux et des périodes durant lesquelles des activités bruyantes seront effectuées. Ce responsable pourra également traiter les plaintes des riverains relatives au bruit et vibrations.
- Mettre en place de supports d'information pendant le chantier (panneaux, plaquette, site Internet, etc.). Les riverains pourront ainsi suivre l'avancée des travaux, et mieux appréhender les nuisances sonores éventuelles.

G. Monitoring du bruit et/ou des vibrations

Cette mesure consiste à poser un ou plusieurs sonomètre(s) et/ou accéléromètre(s) au droit des logements ou bâtiments sensibles les plus proches de la base chantier de manière à surveiller les nuisances sonores et/ou vibratoires générées par les travaux, en particulier lors des phases les plus critiques.

Dans le cas présent, il semble pertinent de procéder à un monitoring ponctuel notamment au niveau des logements situés face à l'emprise chantier ou à la limite du chantier (phase 1 et 2 en priorité mais pourrait aussi être applicable en phase 3).

Pour le chantier au dépôt à côté de rue du Biplan et pour le chantier à la gare du Nord au Rue d'Aerschot.

Au vu des incidences prévues, il serait intéressant d'envisager un monitoring permanent à ces endroits ou au moins pendant les phases critiques.

L'objectif est de s'assurer que les niveaux sonores et vibratoires respectent les seuils définis.

Les mesures sonores sont à effectuer toutes les secondes et à transférer à un serveur avec un décalage de quelques minutes. Lors d'un dépassement de niveau sonore par rapport à une limite fixée d'un commun accord, le station peut envoyer un SMS aux services concernés. A ce moment le station fait une enregistrement audio pour identifier la source.

Une surveillance de vibrations est plutôt opportune au début du phase 3 dans les premiers bâtiments que le tunnelier passe.

Pendant le forage du tunnel un plan d'action du surveillance (monitoring) sera prévu. Au début du forage un monitoring au niveau du chaussée de Haecht est à prévoir pour évaluer l'impact.

Si nécessaire, un monitoring continu sur le tunnelier est à considérer. Au moments où les niveaux vibratoires augmentent au tunnelier, une réduction de la vitesse d'avancement ou de rotation peut être envisagée.

En plus, un monitoring, pendant passage du tunnelier, est prévu pour les bâtiments sensibles La Fermette et l'hôtel communal Collignon.

Le suivi vibratoire met en place une instrumentation en continu pour suivre les niveaux des vibrations générées par les travaux. Il est équipé de capteurs d'accélération. Des seuils de déclenchement seront programmés. L'appareil scrute en permanence les vibrations émanant des capteurs.

6.8.8. Conclusions en matière de bruit et de vibrations

Le projet de métro, qu'il soit en monotube ou en bitube, combiné à la suppression du tram 55 (mais à la conservation des rails pour l'accès au dépôt, les déviations et pour l'écologie), conduira à une amélioration de l'environnement sonore, sauf pour ce qui concerne les zones aux abords des stations qui devraient avoir un niveau sonore Lden augmenté (groupe de personnes, incidents nécessitant l'intervention de services de police, de secours, VP en attente de voyageurs...).

Il y aura également une amélioration de l'environnement vibratoire global de la zone desservie suite à la diminution du trafic de tram en surface et au réaménagement de la voirie dans les points noirs actuels.

Un risque d'incidences vibratoires sur le bâti existe au droit des stations ou des puits d'aération lorsqu'une partie des nouvelles structures reprend le bâti et/ou est structurellement en contact (ponts vibratoires).

Il est recommandé de s'assurer que des dispositifs antivibratiles soient prévus au niveau des aiguillages.

L'impact de la vitesse des métros doit être calibrée au début de l'exploitation au droit des stations et auprès des bâtiments sensibles. Dans le cas où l'impact occasionne une gêne, la vitesse du métro devra être adaptée ponctuellement.

Il est recommandé d'ajouter des panneaux isolants au droit des stations et au niveau des ouvertures. Il est recommandé de prévoir des absorbeurs de bruits au niveau des grilles de ventilation.

En ce qui concerne les aspects de l'usure ondulatoire potentiellement élevée à long terme au niveau des stations ou aux courbes, un monitoring annuel est recommandé et, le cas échéant, un meulage ou remplacement d'une partie de rail peuvent être effectués.

En phase de chantier, il faudra veiller à appliquer les recommandations sur les leviers suivants :

- Equipements et techniques
- Planification
- Charroi du chantier
- Bruit auprès des travailleurs
- Traitement des vibrations
- Protection et information des riverains
- Monitoring du bruit et/ou des vibrations

6.9. Être humain

6.9.1. Cadre réglementaire et références

- D'ARBOIS DE JUBAINVILLE H. et VANIER C. (ONDRP), Le sentiment d'insécurité dans les transports en commun : situations anxieuses et stratégies d'évitement. Grand Angle, n°46 (janvier 2018) ;
- L'arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 24 avril 2014 portant l'exécution de l'ordonnance du 29 mars 2012 portant intégration de la dimension de genre dans les lignes politiques de la Région de Bruxelles-Capitale ;
- L'arrêté royal du 25 janvier 2001 concernant les chantiers temporaires ou mobiles ;
- Le titre III du Règlement Régional d'Urbanisme relatif aux chantiers ;
- NOBLE J., L'insécurité personnelle dans les transports en commun. Déviance et Société, vol. 39, n°3, pp. 343-364 (2015) ;
- Les directives et règlements européens en matière de sécurité incendie (euroclasses, eurocodes, ...) ;
- Si demandées, les exigences des dérogations des autorités belges aux non conformités prescriptives ;
- Le code de bonne pratique (les normes en vigueur)
- Les exigences du SIAMU ;
- La norme ISO/TR 16738 - Ingénierie de la sécurité incendie — Informations techniques sur les méthodes d'évaluation du comportement et du mouvement des personnes ;
- La norme NFPA 130 (Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems) ;
- La norme S 21-208-1 (Protection incendie dans des bâtiments – Conception et calculs des installations d'évacuation des fumées et de la chaleur (EFC) – Partie 1 : Grands espace intérieurs non cloisonnés s'étendant sur un niveau).

6.9.2. Cadre réglementaire et références prévus en demande de permis

6.9.2.1. Cadre réglementaire

Il n'y a pas de réglementations ni de normes belges qui s'appliquent aux tunnels. La sécurité incendie est traitée sur base des standards internationaux (benchmark) et selon les règles de l'art. Le standard international est basé sur des normes disponibles en Europe (France, Italie, Allemagne, etc.) concernant des réseaux de métros ou des tunnels ferroviaires. De plus, les résultats récents des projets de recherche (comme par exemple le projet METRO de Suède ou les reports de Karl Fridolf sur l'évacuation des personnes) sont pris en compte. La norme NFPA130 (Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems) a été considérée par BMN en tant que référence normative pour le prédimensionnement des issues de secours et cadre normatif pour les tunnels en général.

L'analyse de l'application de cette norme dans le cadre de ce projet a été réalisée par le chargé d'étude. Cette analyse révèle que la norme NFPA130 n'est pas pertinente pour l'analyse des évacuations dans le cadre de ce projet. De plus, cette norme ne mentionne pas de temps d'évacuation pour les tunnels. La norme NFPA130 peut être utilisée pour l'analyse des éléments statiques comme la distance aux issues de secours. Avec l'accord du Comité d'accompagnement, la norme ISO 16738 a donc été appliquée pour les études ASET/RSET de cette étude. La norme ISO 16738 inclut notamment la gestion des comportements humains en cas d'incendie.

Pour les études de simulation d'évacuation ASET/RSET, la norme ISO 16738 relative aux méthodes d'évacuation (incluant notamment la gestion des comportements humains en cas d'incendie) a donc été appliquée.

6.9.2.2. Procédures à appliquer

Tant la demande de permis d'urbanisme que la demande de permis d'environnement ont fait l'objet d'un avis SIAMU. Ces avis sont des éléments constitutifs des dossiers de demandes de permis et sont analysés dans cette étude.

En cas de non-conformité par rapport à un référentiel prescriptif, c'est l'autorité prescriptive qui traite les dérogations par rapport à ces référentiels.

En sécurité incendie, les arrêtés royaux dits « normes de base » du Ministère de l'intérieur ne s'appliquent pas aux tunnels.

6.9.3. Sécurité objective

6.9.3.1. Prévention incendie

Les points d'analyse B.1 à B.11 correspondent aux points d'observations A.1 à A.11 du chapitre « Description de la proposition BMN (T5) » de la demande de permis, qui sont les suivants :

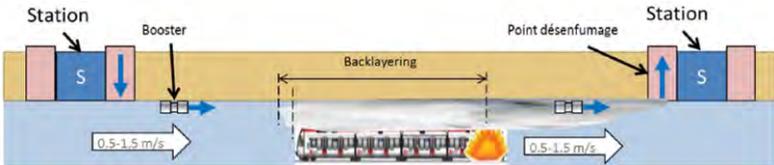
- B.1 - Compartimentage
- B.2 - Résistance structurelle au feu
- B.3 - Détection incendie et principes des alertes
- B.4 - Gestion de contrôle d'accès
- B.5 - HVAC / surpression / désenfumage

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

- B.6 – Sprinklage
- B.7 -Extinction au gaz
- B.8 - Équipements de 1er secours
- B.9 - Alimentation de secours
- B.10 - Accès des services de secours / ascenseurs pompiers
- B.11 – Signalisation
- B.12 – réaction au feu

Description du projet Extraits de textes issus de la description du projet dans la demande de permis, BMN	Evaluation du projet
<p><u>A.1 Compartimentage</u></p> <p>Actuellement le tunnel consiste en 1 compartiment.</p>	<p><u>B.1 Compartimentage</u></p> <p>Il n'y a pas de compartimentage prévu entre les stations et le tunnel.</p>
<p><u>A.2 Résistance structurelle au feu</u></p> <p>Il est proposée l'utilisation d'un enduit qui offre une protection de 2 heures.</p>	<p><u>B.2 Résistance structurelle au feu</u></p> <p>Les classes des matériaux n'étant pas encore connus à ce stade, il est supposé que les normes et standards sont appliqués.</p>
<p><u>A.3 Détection incendie et principes des alertes</u></p> <p><u>Détection incendie</u></p> <p>La détection incendie en tunnel vise à détecter un incendie produit par un équipement qui se trouve dans le tunnel (des câbles) ainsi qu'un incendie qui s'est produit en dessous du plancher d'un métro. Un incendie qui s'est produit dans la rame même ou tout près des boggies sera détecté par les détecteurs qui se trouvent dans la rame.</p> <p>Un système approprié pour la détection d'un incendie en tunnel est un système avec détecteurs linéaires. Ils seront installés dans la partie haute des tunnels et au-dessus des chemins de câbles.</p> <p>Un tel système permet de localiser l'incendie sur base de chaleur. La combinaison avec des détecteurs de fumées ponctuels obtiendra un système capable de détection rapide et précise ainsi que fiable.</p> <p>Tous les éléments de détection sont adressables.</p>	<p><u>B.3 Détection incendie et principes des alertes</u></p> <p>Une étude qui examine tous scénarios possibles et qui déterminera les stades à parcourir en cas d'un évènement (lignes de temps) doit être réalisée. Ceci est fortement relié aux actions pris par les opérateurs à l'OCC.</p>

<p>Des boutons poussoirs seront prévus pour le personnel d'entretien.</p> <p>La centrale de détection est reliée à un poste de gestion local et/ou à distance (dispatching central). Le système permet la visualisation instantanée des éléments de détection activés. De plus, le dispatching central a la possibilité de déclencher une détection manuelle sur base des images VTV ou d'un appel téléphonique (112).</p> <p><u>Principe des alertes :</u> Un Système de Transport Métro en mode d'exploitation UTO (Unattended Train Operation = métro automatique sans conducteur) garantit la sécurité des voyageurs et protège le domaine automatique des intrusions : en l'absence d'un conducteur dans les trains, il est essentiel pour les opérateurs à l'OCC (Operations Control Center = le dispatching pour superviser le métro) d'avoir une vision globale de toute la ligne. Cela inclut de connaître l'état et la position de chaque train, l'état des portes d'accès au domaine automatique et l'état des équipements d'interphonie dans les trains et les stations.</p> <p>Pour remonter ces informations aux opérateurs à l'OCC, chaque équipement enverra automatiquement, selon le paramétrage retenu, des alertes pour prévenir :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ d'une défaillance d'un train (arrêt en tunnel, perte d'alimentation, ...) ▪ d'une évacuation d'un train dans le tunnel ▪ d'une intrusion dans le domaine automatique ▪ d'un appel ou d'une défaillance du système d'interphonie dans les trains ou les stations ▪ d'une défaillance des systèmes de vidéosurveillance dans les trains ou les stations 	
<p><u>A.4 Gestion de contrôle d'accès</u></p> <p>Le projet Métro Nord a pour finalité la mise en service d'un Système de Transport Métro en mode d'exploitation UTO. Ce mode d'exploitation implique la protection du domaine automatique des intrusions : le tunnel et une partie du dépôt où circulent des trains en automatique. Cependant l'accès au domaine automatique par du personnel doit rester possible pour effectuer la maintenance (hors exploitation) et pour permettre à un agent de rejoindre un train en cas de panne (pendant l'exploitation). Cet accès au domaine automatique à partir des stations doit être possible via les portes d'accès au domaine automatique dont l'accès doit être contrôlé par badge. Indépendamment de toutes les mesures de contrôle</p>	<p><u>B.4 Gestion de contrôle d'accès</u></p> <p>Le projet est conforme.</p>

<p>d'accès, les chemins d'évacuation venant des tunnels restent garantis en tout temps même s'il n'y a pas de détection (barre antipanique) selon l'article 52 du Règlement Général pour la Protection du Travail (RGPT) et l'Arrêté Royale du 28 mars 2014 concernant la prévention.</p>	
<p><u>A.5 HVAC / surpression / désenfumage</u></p> <p>Il n'y a pas de systèmes HVAC dans les tunnels. La propagation des fumées dans les tunnels en cas d'incendie est contrôlée par un système de ventilation longitudinale. Les fumées sont poussées vers une des stations adjacentes du tunnel, où elles sont extraites avec le système de désenfumage pour le niveau quai de la station. La charge calorifique considérée est de 15 MW.</p> <p>La figure ci-dessous donne une idée du principe.</p>  <p>Figure 146 : Illustration schématique des fonctions du système d'extraction des fumées</p> <p>Il y a deux phases :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Phase d'auto-sauvetage : boosters à l'arrêt. ▪ Phase d'intervention : après un temps déterminé, le système se met (automatiquement ou bien manuellement) en régime élevé. Dès ce moment les ventilateurs dans la station extraieront le débit maximal de 134 m³/s (500.000 m³/h). Des boosters sont installés au plafond du tunnel pour atteindre la vitesse nécessaire. 	<p><u>B.5 HVAC / surpression / désenfumage</u></p> <p>Voir analyse ASET RSET ci-dessous.</p>
<p><u>A.6 Sprinklage</u></p> <p>Pas de système de sprinkler dans les tunnels.</p>	<p><u>B.6 Sprinklage</u></p> <p>Pas de système de sprinkler dans les tunnels. Ce n'est pas imposé.</p>
<p><u>A.7 Extinction au gaz</u></p> <p>Pas de système d'extinction au gaz dans les tunnels.</p>	<p><u>B.7 Extinction au gaz</u></p> <p>Pas de système d'extinction au gaz dans les tunnels. Ce n'est pas imposé.</p>
<p><u>A.8 Équipements de 1^{er} secours</u></p> <p>« Un équipement de premier secours duquel un passager pourrait se servir n'est pas prévu dans le tunnel. Néanmoins, les tunnels sont équipés d'un réseau de bornes d'incendie</p>	<p><u>B.8 Équipements de 1^{er} secours</u></p>

<p><i>avec des hydrants muraux de type DSP 70 placés tous les 50 m, alternant sur les deux côtés. »</i></p>	<p>L'accès aux équipements sont garantis. Le projet est conforme.</p>
<p><u><i>A.9 Alimentation de secours</i></u></p> <p><u>Réseau sécurité</u></p> <p>Chaque station dispose d'une alimentation des circuits normaux (réseaux de sécurité). Le transformateur et le tableau général sont installés dans un local compartimenté et séparé des normaux. Les systèmes suivants sont également alimentés par le réseau circuits vitaux selon l'article 104 du RGIE :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ L'éclairage du tunnel ; ▪ Le système de désenfumage (ventilateurs en station + boosters ▪ La détection incendie (batterie individuelle de 72 h) ; ▪ L'armoire pompiers ; ▪ L'installation no-break. <p><u>Installation no-break</u></p> <p>Des installations no-break (NB) seront prévues dans les stations et consiste en des batteries. D'une autonomie de 90 minutes les NB alimentent un tableau général NB (TGNB) équipé d'un double jeu de barres. Ce tableau répond aux mêmes spécifications que le TGBT et assure une alimentation double de l'éclairage de secours en tunnel.</p>	<p><u><i>B.9 Alimentation de secours</i></u></p> <p>Les canalisations électriques alimentant des installations ou appareils (éclairage de sécurité,...) dont le maintien en service est indispensable en cas de sinistre doivent être placées de manière à répartir les risques de mise hors service général.</p> <p>Une attestation de conformité des installations électriques doit être fournie en fin des travaux.</p>
<p><u><i>A.10 Accès des services de secours / ascenseurs pompiers</i></u></p> <p>L'accès des services de secours aux tunnels est organisé via les stations adjacentes. Dans les stations, les services disposent des connexions entre la surface et la station suivante:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ escaliers publics ; ▪ escalators publics ; ▪ ascenseurs publics (équipés comme ascenseurs pompiers) ; ▪ escaliers de secours (mis en surpression). <p>Depuis les deux quais d'une station, les services peuvent accéder aux tunnels en franchissant les portillons qui protègent le tunnel des intrusions. Les quais se raccordent directement sur les cheminements qui se trouvent sur les deux côtés des tunnels.</p>	<p><u><i>B.10 Accès des services de secours / ascenseurs pompiers</i></u></p> <p>Le projet est conforme.</p>

<p>Les connexions vers la surface sont protégées par des mesures qui empêchent la propagation des fumées vers la station et les niveaux supérieures de la station. A chaque extrémité d'une station un système de désenfumage extraira les fumées venant du tunnel.</p> <p>L'intervention dans les tunnels se passe par les stations. Il n'y a pas d'ascenseurs pompiers dans les tunnels. Les ascenseurs pompiers sont décrits dans les livres stations.</p>	
<p><u>A.11 Signalisation</u></p> <p>« Une signalisation claire, conforme à l'AR. concernant la signalisation de sécurité et de santé au travail, sera appliquée. Des pictogrammes seront apposés au minimum aux changements de direction des chemins d'évacuation, aux accès des cages d'escalier et escaliers, aux emplacements des extincteurs, des dévidoirs et des téléphones de secours. »</p>	<p><u>B.11 Signalisation</u></p> <p>Le projet est conforme.</p>
<p><u>A.12 Réaction au feu</u></p> <p>Paragraphe non traité dans le projet de référence.</p>	<p><u>B.12 Réaction au feu</u></p> <p>L'utilisation de l'annexe 5/1 des normes de base doit être utilisée. Cette annexe définit les exigences en matière de réaction au feu.</p>

Tableau 51 : Analyse des éléments du projet en matière de prévention incendie

6.9.3.2. Evacuation d'urgence /alarme

A. Description du projet de référence

A.1. Sortie et distance d'évacuation

A.1.1. Issues de secours

Chaque tronçon dans le nouveau réseau dispose d'un cheminement piéton. Ceci se trouve de chaque côté du tunnel au niveau du plancher de la rame. Les personnes qui sortent de la rame ne doivent pas franchir une différence de niveau ce qui facilite l'évacuation.

Le cheminement est équipé d'une main courante, montée sur la paroi du tunnel. Le cheminement est 0,8 m de large et est conforme aux exigences de la NFPA130 concernant le gabarit piéton (espace libre).

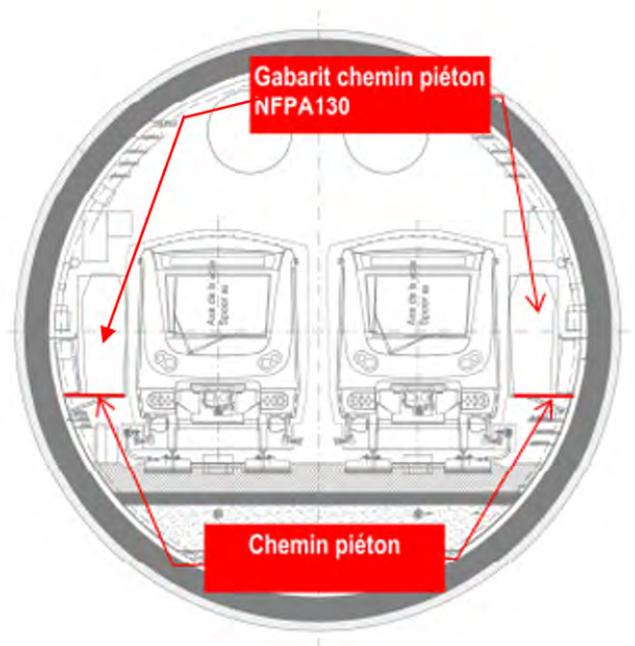


Figure 147: Tunnel – Coupe – Cheminement (BMN, 2020)

La distance maximale entre des stations de 601 m est inférieure à celle imposée dans la NFPA130 (762 m) concernant la distance maximale entre les issues de secours. Le chemin d'évacuation des tunnels amène horizontalement vers les quais des stations adjacentes. Les stations disposent des chemins d'évacuation verticaux vers la surface qui sont dimensionnés pour l'évacuation des stations et peuvent également être utilisés pour l'évacuation des tunnels :

- les escaliers / escalators reliant le niveau du quai aux niveaux supérieurs et à la surface;
- les cages d'escalier compartimentées sur le quai aux extrémités de la station.

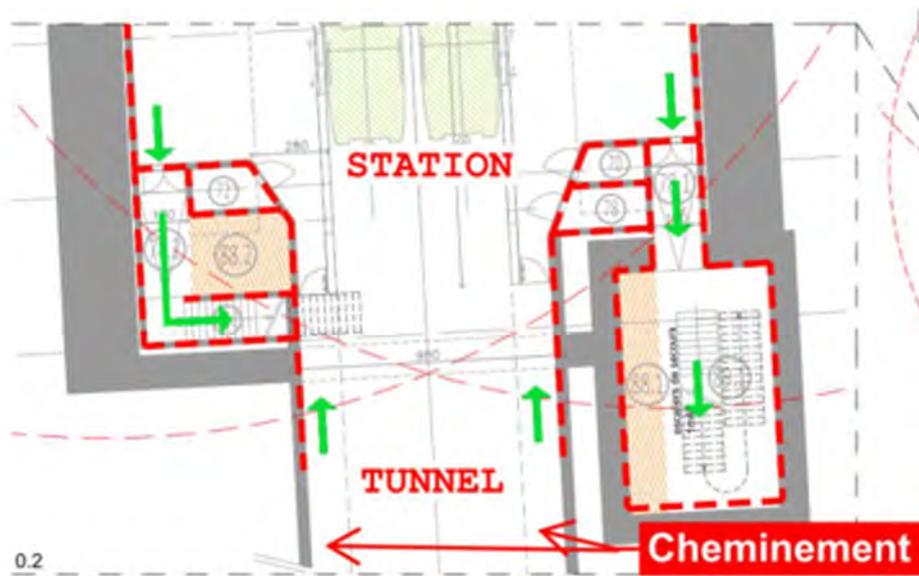


Figure 148: Tunnel – Connexion des cheminements aux quais

Voir les notes de sécurité des stations respectives pour une vue sur les issues de secours dans les stations.

A.1.2. Façades de quais (palissades)

Le projet Métro Nord a pour objectif de mettre en service un système sans conducteur, avec un niveau d'automatismes intégral (Grade of Automation GoA4 ou UTO). Dans ce cadre, le déploiement de façades de quai a été décidé pour les 7 stations de la ligne, afin d'améliorer la performance en facilitant le transfert des voyageurs et en empêchant les intrusions en voie / tunnel.

Les façades de quai répondent aux principes d'évacuation depuis le tunnel ou depuis un train arrêté (correctement ou non) à quai. Elles présentent :

- Des portes d'extrémités de quai munies de systèmes de déverrouillage pour l'évacuation
- Depuis le trottoir en tunnel ;
- Des systèmes de déverrouillage pour l'évacuation depuis un train arrêté en gare ;
- Des portes de secours avec des systèmes de déverrouillage pour l'évacuation depuis un train incorrectement arrêté en gare.

B. Sécurité en cas d'évacuation : Etudes ASET/RSET

B.1. Méthodologie

Conformément à la demande du Comité d'Accompagnement, le bureau d'étude a réalisé des études ASET/RSET afin de démontrer que les usagers sont en sécurité en cas d'évacuation.

Le calcul de l'ASET est déterminé par des simulations de fumées.

Le calcul du RSET est déterminé par des simulations d'évacuation de personnes.

L'étude ASET/RSET consiste à prouver que le temps nécessaire à l'évacuation des usagers (RSET) est inférieur au temps disponible à l'évacuation (ASET). En particulier, il faut vérifier que tous les occupants ne sont pas atteints par les fumées.

En outre, les simulations permettront de vérifier :

- Le temps de mise en sécurité (Ts)
- Le temps d'évacuation des tunnels (T_{tun})

La procédure d'évacuation de la STIB requiert que si un incident se produit dans une rame, cette rame rejoigne une station.

Nous supposons que la charge au feu de la rame est de 15 MW après proposition et validation par le Comité d'Accompagnement. Cette valeur de 15 MW est très conservative.

Une rame remplie dont le foyer d'un incendie se déclare au centre de la rame (pire scénario), bloquée entre deux stations (pire localisation), avec une charge de 15 MW (très élevée) constitue le cas le plus extrême qui puisse arriver. Le tunnel « worst case » est parmi les plus longs et ne permet qu'un seul sens d'évacuation de fumées avec une forte pente. C'est ce cas extrême qui est simulé.

Le tableau ci-dessous reprend les **paramètres principaux** de sécurité pour les différents tunnels :

- Longueur
- Pente
- Désenfumage

 valeur critique

Tunnel entre stations :		Distance (m)	Pente maximale (%)	Sens d'évacuation de fumée		Cas critiques	Worst case
				Vers VBH	Vers Riga		
Puis P5	Liedts	202	3		X		
Liedts	Colignon	511	1,3	X	X		
Colignon	Verboekhoven	498	-1,4	X	X		
Verboekhoven	Riga	467	4,2		X		
Riga	Tilleul	585	-0,5	X	X		
Tilleul	Paix	348	4		X		
Paix	Bordet	601	1,5	X	X		

Bordet	Puits P0 / Dépôt	630	-1,3	X		
--------	------------------	-----	------	---	--	--

Tableau 52 : paramètres de sécurité

Le tunnel « worst case » retenu pour cette analyse en accord avec le Comité d'Accompagnement est donc le tronçon entre Verboekhoven et Riga. En effet, ce tunnel de 467 mètres de long a une pente de 4,2 % et un seul sens de désenfumage.

L'étude se base sur 5 simulations ASET / RSET :

- Tunnel monotube ASET
- Tunnel monotube RSET
- Tunnel bitube ASET
- Tunnel bitube RSET sans rameau
- Tunnel bitube RSET avec rameau

Ces simulations du « worst case » seront prises comme référence pour les autres tronçons :

- Pour extrapoler les critères de mise en sécurité
- Pour comparer les configurations monotube / bitube

B.2. Référentiel

La méthode de l'approche performancielle est basée sur la norme ISO/TR 16738 version 2009 relative à l'ingénierie de la sécurité incendie – Informations techniques sur les méthodes d'évaluation du comportement et du mouvement des personnes. Cette norme divise le temps nécessaire à l'évacuation en plusieurs parties¹⁴.

¹⁴ « L'ISO/TR 16738:2009 est destiné à renseigner les concepteurs, les autorités réglementaires et les professionnels de la sécurité incendie sur les méthodes d'ingénierie disponibles pour les stratégies d'évacuation relatives à l'évaluation de la sécurité des personnes d'une conception utilisant l'ingénierie de la sécurité incendie. Les informations concernent l'évaluation, la quantification et la gestion du comportement des occupants, notamment le comportement lors d'une évacuation, en cas d'incendie. », source : ISO

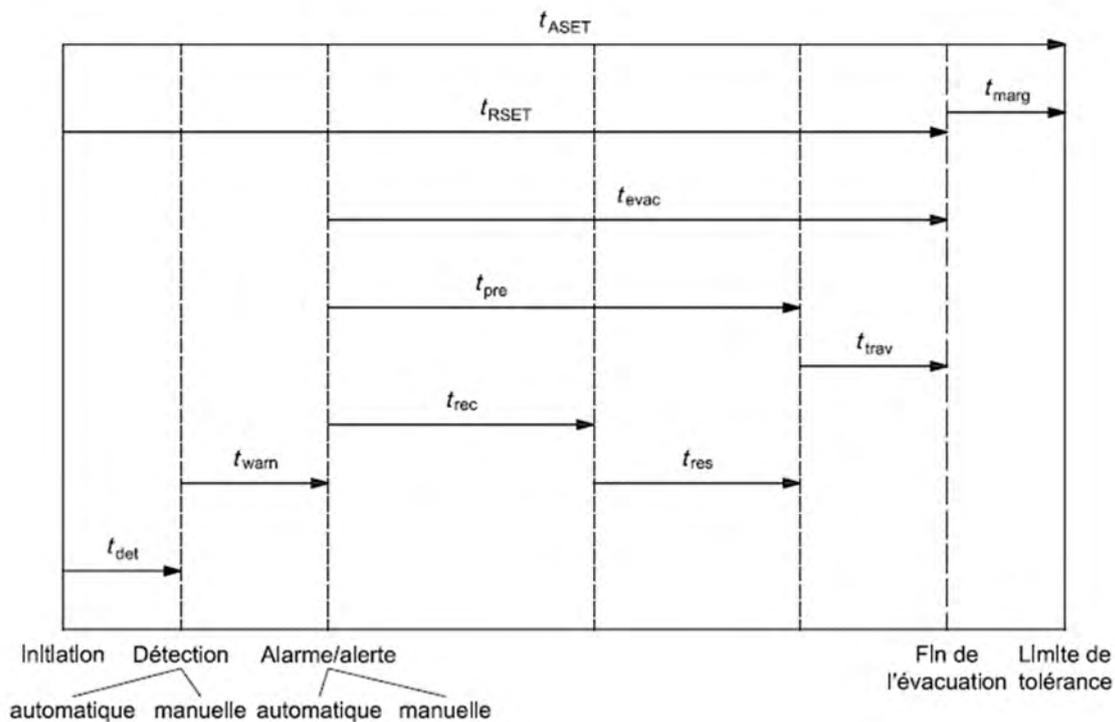


Figure 149 : Définition des temps lors d'une évacuation selon la norme ISO/TR 16738

- TASET = Temps disponible pour l'évacuation
- Tdet = Temps de détection
- Tevac = Temps d'évacuation
- Tpre = Temps de pré mouvement
- TRSET = Temps nécessaire à l'évacuation
- Trec = Temps de reconnaissance du signal d'alarme par les occupants
- Tres = Temps de réaction des occupants
- Ttrav = Temps de mouvement
- Twarn = Temps d'alerte
- Tmarg = Temps de marge de sécurité adéquate

La norme détermine également les différents paramètres (prémouvement, temps de déplacement...).

B.3. Logiciel

Les simulations ont été réalisées à l'aide du **logiciel** de CFD (Computational Fluid Dynamics) PyroSim. Ce logiciel utilise le code FDS (Fire Dynamic Simulation) développé et validé par le NIST (National Institut of Standards Technology, US).

À noter que 2 à 4 runs ont été effectués pour chaque scénario.

B.4. Critères de mise en sécurité

Les critères de mise en sécurité sont issus des normes suivantes :

- ISO/TR 16738
- ISO 13571¹⁵
- SFPE Handbook of Fire Protection Engineering
- PD 7974-6¹⁶

et sont les suivants :

- Effets de la fumée sur la vitesse de marche
- Effets de l'exposition au feu ou à la chaleur
- Toxicité des fumées (Limite dépassée quand la visibilité est inférieure à 10 m)

Ces critères doivent être remplis quand les usagers atteignent leur position de sécurité.

B.5. Paramètres RSET

L'occupation d'une rame considérée pour la simulation est de 548 personnes. Le résultat est exploitable pour l'analyse d'un métro avec une plus grande capacité car le mouvement est limité par les personnes les plus lentes. La sensibilité au nombre de personnes total est limitée. Les occupants ne passent pas par le feu et seules les portes côté trottoir s'ouvrent.

Le **pourcentage de PMR** dans les rames a été défini à 0,5% dans les études BMN. Au niveau fédéral, les bonnes pratiques requièrent de prendre en compte un taux de 1% de PMR non autonomes dans les zones publiques. Un taux de 1% a donc été considéré en accord avec le Comité d'Accompagnement, pour les simulations ASET / RSET réalisées dans le cadre de cette étude.

La région bruxelloise, qui est compétente en matière de personnes à mobilité réduite, travaille actuellement à l'établissement d'une norme de référence régionale en termes de taux de PMR à prendre en considération dans les zones publiques. Les travaux en cours semblent s'orienter vers la prise en compte d'un taux de PMR variant entre 3% et 6%. Ces travaux ne sont pas clôturés au moment où nous rédigeons ces lignes. Les indications fournies au chargé d'étude semblent indiquer que le taux de 3% serait un taux adéquat pour le présent projet. Un taux de 3% a donc été considéré en accord avec le Comité d'Accompagnement pour les occupations de rames.

¹⁵ « La norme ISO 13571:2012 est destinée à être utilisée conjointement à des modèles pour l'analyse du déclenchement et du développement du feu, de la propagation du feu, de la formation et du déplacement des fumées, de la génération, du transport et de la décroissance des espèces chimiques, et du déplacement des personnes, ainsi que pour la détection et la suppression de l'incendie. Elle ne doit être utilisée que dans ce contexte. », source : ISO

¹⁶ « Il s'agit du sixième d'une série de documents publiés à l'appui de BS 7974 - une norme britannique fournissant un cadre pour le développement d'une méthodologie rationnelle pour des conceptions qui permettent de protéger les personnes, les biens et l'environnement contre le feu. La norme utilise une approche alternative d'ingénierie de la sécurité incendie, basée sur l'application de principes scientifiques et d'ingénierie. Les documents publiés contiennent des conseils et des informations sur la manière d'entreprendre une analyse quantitative et détaillée d'aspects spécifiques de la conception. Ils sont un résumé de "l'état de l'art" et sont mis à jour à mesure que de nouvelles théories, méthodes de calcul et données deviennent disponibles. », texte traduit de l'anglais - source : BSI

Les temps de détection (Tdet) et les temps d'alerte (Twarn) sont intégrés dans le temps de prémouvement.

Le **temps de pré-mouvement** est basé sur la norme ISO/TR 16738. Pour une telle infrastructure de transport, l'interprétation de la Norme permet de considérer un temps de pré-mouvement variant :

- De 1,5 minutes pour les premiers occupants
- À 4 minutes pour les derniers occupants

Temps vers un lieu sûr : le temps de simulation pour le compartiment est calculé lorsque le dernier occupant a franchi la 1ère porte RF¹⁷ ou une station (lieu sûr).

Le **mouvement** des occupants est défini comme suit :

- Les personnes valides empruntent les escaliers
- Les personnes valides n'empruntent pas les ascenseurs
- Les PMR n'empruntent pas les escaliers, sauf quand ils sont accompagnés ; Ils sont dirigés vers les zones refuges, puis sont accompagnés vers la sortie par les pompiers ou le personnel ad-hoc.
- La norme ISO/TR 16738¹⁸ renseigne la vitesse de 1,19 m/s comme vitesse de déplacement non restreinte maximale pour les couloirs, allées, rampes et portes. Cette même norme renseigne les vitesses entre 0,85 et 1,05 m/s comme vitesses de déplacement non restreintes maximales pour les escaliers. Pour les personnes en fauteuil roulant non assisté, une vitesse moyenne de déplacement de 0,89 m/s sur les surfaces horizontales est renseignée. Une vitesse de déplacement horizontal de 1 à 1,19 m/s pour les personnes valides
- Une vitesse de déplacement horizontal de 0,57 à 0,95 m/s pour les PMR

Un **gabarit moyen** de 45 cm est considéré pour les personnes valides. Un gabarit moyen de 65 cm est considéré pour les PMR. Cette valeur correspond à la largeur d'une chaise roulante, y compris les 2 mains de la personne.

B.6. Paramètres ASET

B.6.1. Paramètres communs pour tous les tunnels

¹⁷ Porte RF : porte résistante au feu

¹⁸ Source : tableaux G2 et G4 de la norme ISO/TR 16738

Foyer et métro :

Un incendie dans le métro est simulé pour chaque modèle de simulation. Cet incendie est situé au centre d'une rame de métro.

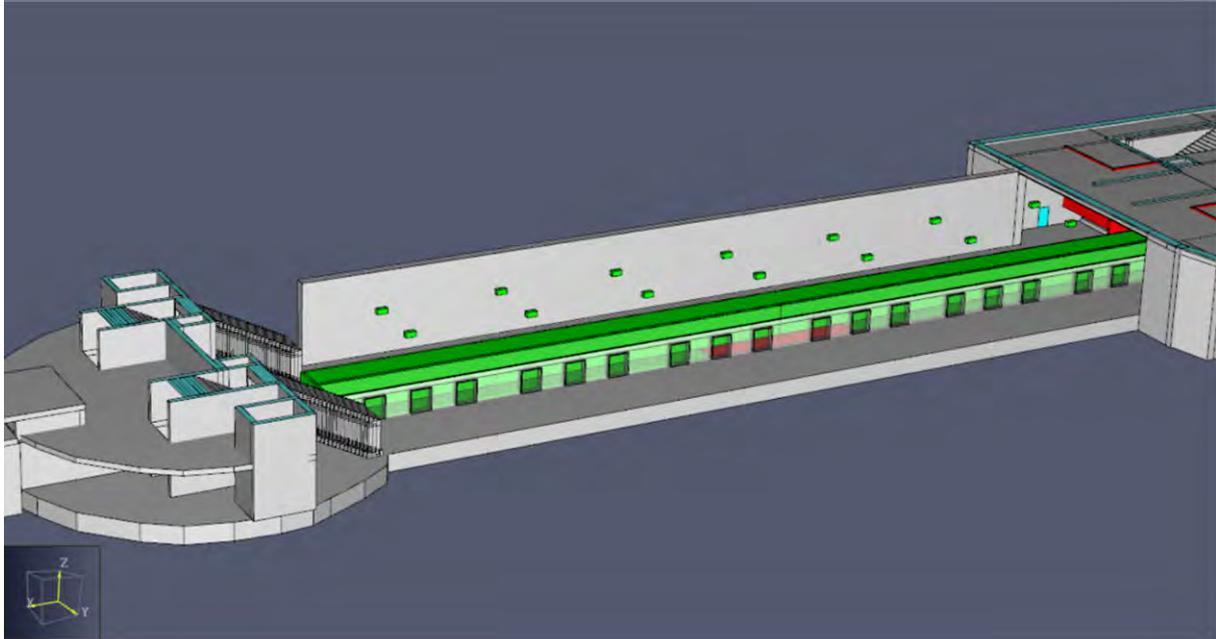


Figure 150 : Vue globale de la modélisation du métro – Station VBH (Tractebel, 2020)

Afin d'approcher le feu de manière réaliste, la **croissance du feu** est modélisée à l'aide d'un taux de propagation qui représente la croissance du feu au fur et à mesure de son évolution dans le temps. Les caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- Dimensions : 16 m x 2,7 m
- Surface du foyer : 43,2 m²
- HRRPUA : 350 kW/m²
- HRR : 15 MW
- Chaleur de combustion : 24,89 MJ/kg
- Fraction radiative : 35%
- Taux de propagation d'incendie : 4,87 mm/s
- Départ de l'incendie : central
- Matériau combustible : PMMA (C₅O₂H₈)
- Taux de suies Y_s : 0.04 g/g

Notons que la charge calorifique de 15 MW ont été retenus pour la simulation après proposition et validation par le Comité d'Accompagnement. Cette valeur de 15 MW, prise par défaut, est probablement conservatrice. Ce paramètre constitue un élément qui influe sur le résultat obtenu. A ce titre, mentionnons que cette charge au feu est variable et que notamment : « L'European Tunnel Network Fire In Tunnel (ETNFIT), groupe de travail européen chargé d'établir un consensus sur la sécurité dans les tunnels de l'Union Européenne, relate des

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

puissances thermiques de 5 à 23 mégawatts selon les rames en service en Europe. »¹⁹. La valeur de 15 MW est donc une valeur relativement haute dans cette fourchette et des valeurs significativement plus faibles sont vraisemblablement envisageables. La valeur réelle dépend du modèle de métro qui circuleront sur la ligne. Les évolutions technologiques à technologie équivalente vont dans le sens d'une réduction de la charge calorifique (meilleure prise en compte des caractéristiques des matériaux).

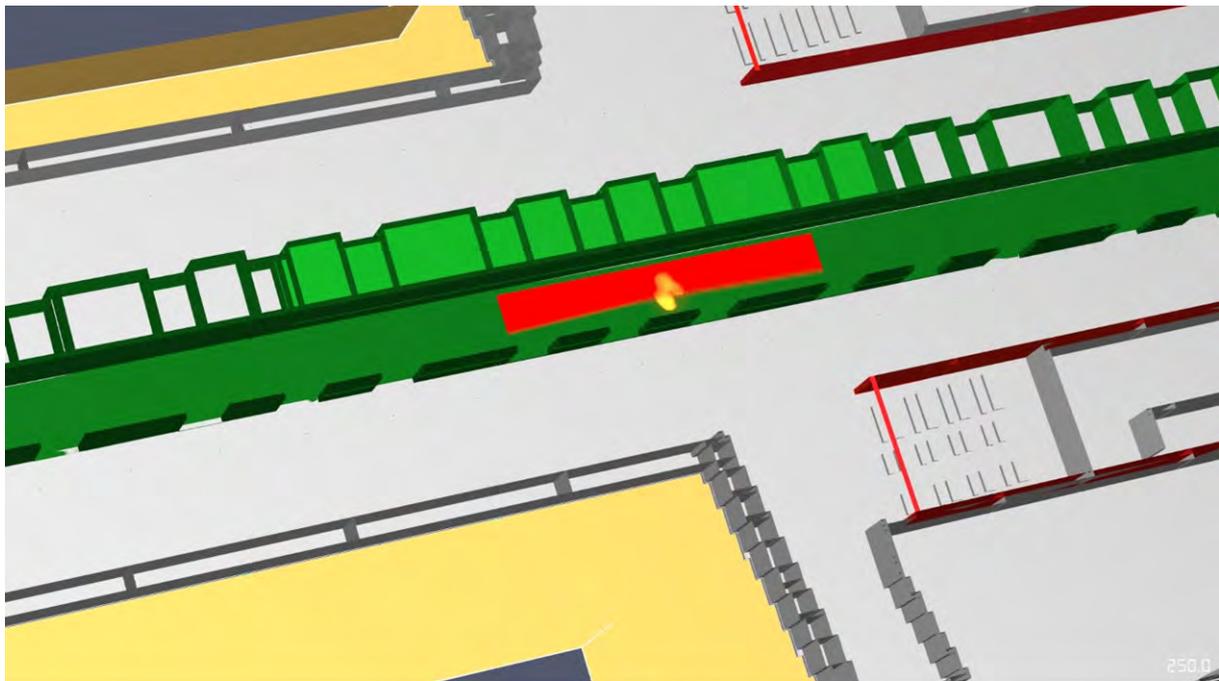


Figure 151 : Vue du foyer en propagation progressive (Tractebel, 2020)

¹⁹ Source : http://crd.ensosp.fr/doc_num.php?explnum_id=8263

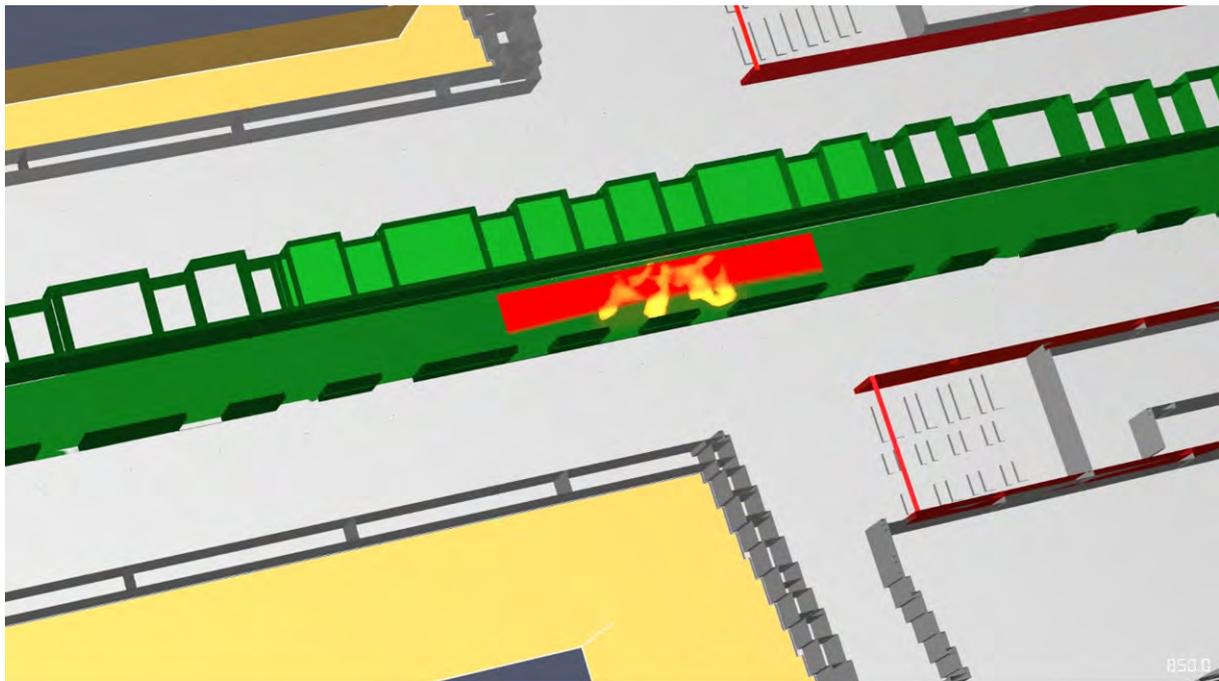


Figure 152 : Vue du foyer en propagation progressive (Tractebel, 2020)

Les **conditions initiales** implémentées dans les modèles sont les suivantes :

- Température ambiante : 12 °C
- Taille du maillage au niveau du tunnel : 0,25 m x 0,25 m x 0,25 m

Caractéristiques utilisées pour le béton :

- Densité : 2200 kg/m³
- Conductivité : 1,2 kJ/(m.K)
- Chaleur spécifique : 0,88 kJ/(kg.K)

Caractéristiques utilisées pour l'acier :

- Densité : 7850 kg/m³
- Conductivité : 45,8 kJ/(m.K)
- Chaleur spécifique : 0,46 kJ/(kg.K)

Les **limites du domaine** sont inertes.

Temps d'activation :

Afin de modéliser une approche réaliste d'un scénario d'incendie, il faut des périodes de temps qui représentent un certain temps de référence :

- A $t = 0$ s, le feu commence. Ce feu croît au fur et à mesure de l'évolution de la simulation ;
- À $t = 150$ s (2,5 min.), le système de désenfumage est mis en marche ;

- À $t = 180$ s (3 min.), le système de désenfumage fonctionne à 100 %.

B.6.2. Tunnel monotube

Dans le chapitre suivant, les paramètres particuliers du tunnel Monotube sont décrits.

Domaine, géométrie et maillage :

La géométrie est basée sur les info fournies du tunnel VBH - Riga

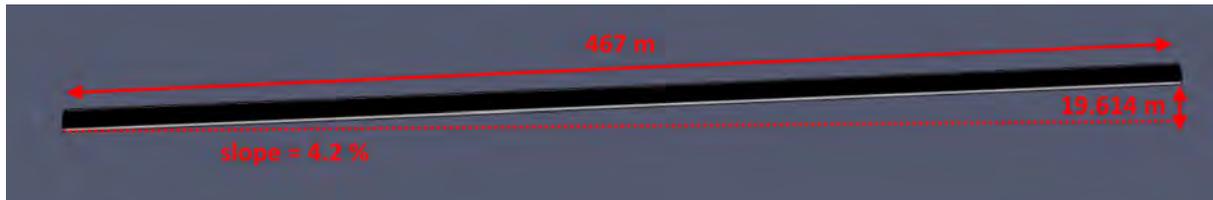


Figure 153 : Vue globale du modèle de tunnel monotube (Tractebel, 2020)

Le tunnel est long de 467 mètres et présente une pente de 4,2 %. L'ensemble du tunnel est maillé à 0,25 m avec un nombre total de 7.038.720 cellules.

Il est modélisé de manière à ce que la pente et le tracé circulaire soient approximés par une séquence de blocs de construction avec une petite variation de position.

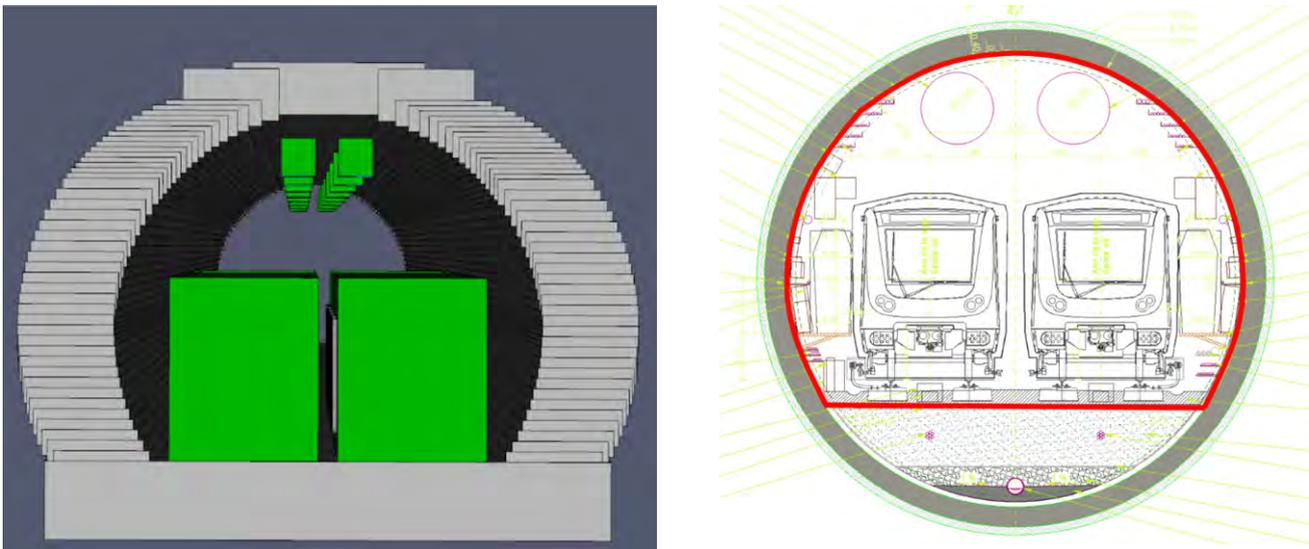


Figure 154 : Vue transversale du tunnel monotube (Tractebel, 2020)

Le tunnel a les mêmes caractéristiques que celui des stations de Verboekhoven et de Riga avec en plus la même pente que celle du tunnel.

La surface du tunnel a comme condition limite « ouvert ». La vitesse 1 m/s est appliquée au niveau des boosters de soufflage positionnés au plafond du tunnel.

Système de désenfumage :

- Le débit d'extraction

L'extraction des fumées se fait de manière mécanique avec un extracteur dont le débit et les dimensions sont renseignés dans le tableau ci-dessous.

Localisation	Hauteur par rapport au sol (m)	Dimensions	Nombre de points d'extraction	Surf par point d'extraction (nette m ²)	Surf tot (nette m ²)	Débit total (m ³ /s)
Entrée station Riga	3,75	6,4x2	1	12,8	12,8	134

Tableau 53 : Débit d'extraction dans le tunnel monotube



Figure 155 : Position de l'extracteur de fumée dans le tunnel monotube (Tractebel, 2020)

- Le débit de soufflage

Le système d'évacuation des fumées est composé de 16 boosters au long du tunnel à partir de 20 m avec un espacement de 60 m soufflant chacun 1 m/s pour envoyer la fumée à l'extrémité du tunnel où elle sera extraite par un extracteur dont les caractéristiques sont renseignées dans le tableau ci-dessous.

Ces boosters sont en réalité circulaires mais modélisés sous forme carrée tout en respectant la même surface (1,5625 m²) afin d'utiliser de manière optimale les cellules de calcul du modèle.

Localisation	Hauteur par rapport au sol (m)	Nombre de points de soufflage	Dimensions	Surface par point de soufflage (nette m ²)	Surface totale (nette m ²)	Débit total (m ³ /s)
Entrée station Riga	3,636	16	1,25x1,25	1,5625	25	25

Tableau 54 : Débit de soufflage dans le tunnel monotube

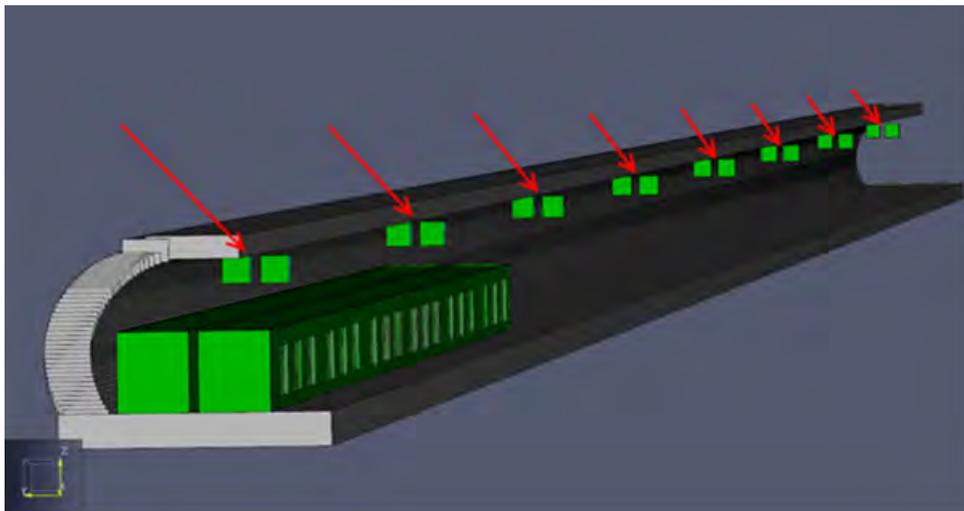


Figure 156 : Position des boosters dans le tunnel monotube (Tractebel, 2020)

B.7. Résultat des simulations RSET

B.7.1. Présentation des résultats

Pour chacune des simulations, le tableau ci-dessous donne le résultat pour les temps suivants :

- Le temps d'évacuation des quais (Tq)
- Le temps d'évacuation de la station (Tt)
- Le temps d'immobilisation des occupants (Ti)

Le tableau ci-dessous donne le résultat des temps d'évacuation pour un foyer :

		foyer - temps (min,sec)
T RSET = T det + T warn + T evac		TUNNEL MONOTUBE
		T RSET
Temps d'évacuation du tunnel	Tq	Environ 15 minutes (13,11)

Tableau 55 : Temps maximum d'évacuation du tunnel, avec T det + T warn

Les simulations complètes ASET / RSET ont été présentées et approuvées par le Comité d'accompagnement de l'étude d'incidences.

Les images ci-dessous reprennent, pour chaque simulation, des captures d'écran aux temps suivants :

- Début de la simulation
- Fin de la simulation (dernier occupant du tunnel)

Légende des occupants à évacuer dans les figures :

Personne à mobilité réduite (PMR) : vert

Personnes valides : rose

B.7.2. Tunnel monotube

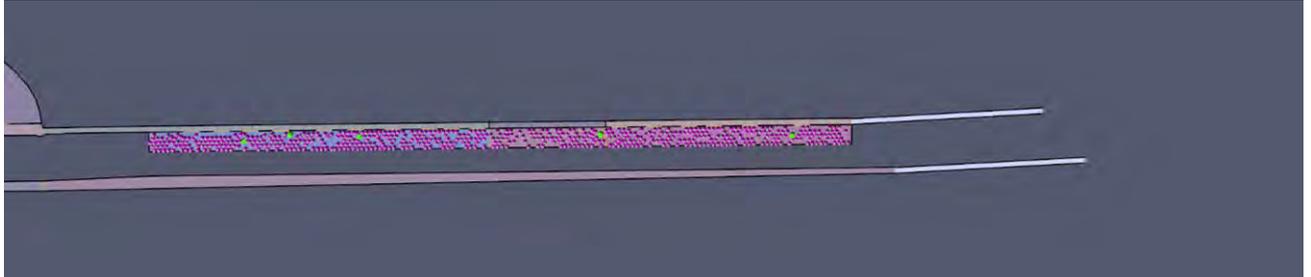


Figure 157 : simulation RSET monotube à 0 sec. (Tractebel, 2020)

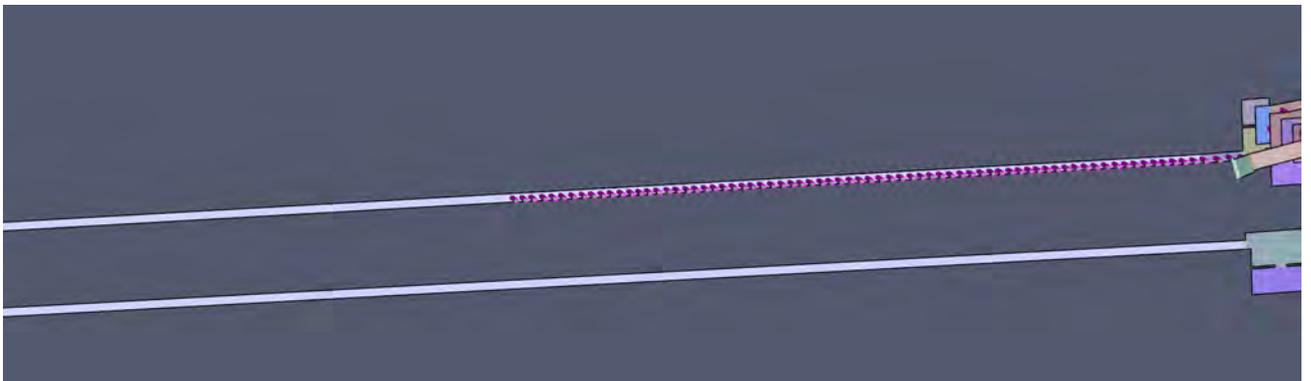


Figure 158 : simulation RSET monotube à 700 sec. (Tractebel, 2020)

L'évacuation du tunnel prend fin à 13 min 11 sec.

B.8. Résultat des simulations ASET

B.8.1. Présentation des résultats

Les critères de validation pour les simulations CFD des stations ont été approuvés par le Comité d'Accompagnement et sont définies comme suit :

- Visibilité > 10 m
- Température < 80°C
- Flux radiatif < 2.5 kW/m²

Des coupes à Z=2 m ne sont pas possibles comme le modèle est créé avec une pente. Les coupes de visibilité et de température sont donc longitudinales au niveau du trottoir comme l'exemple sur la figure ci-dessous.

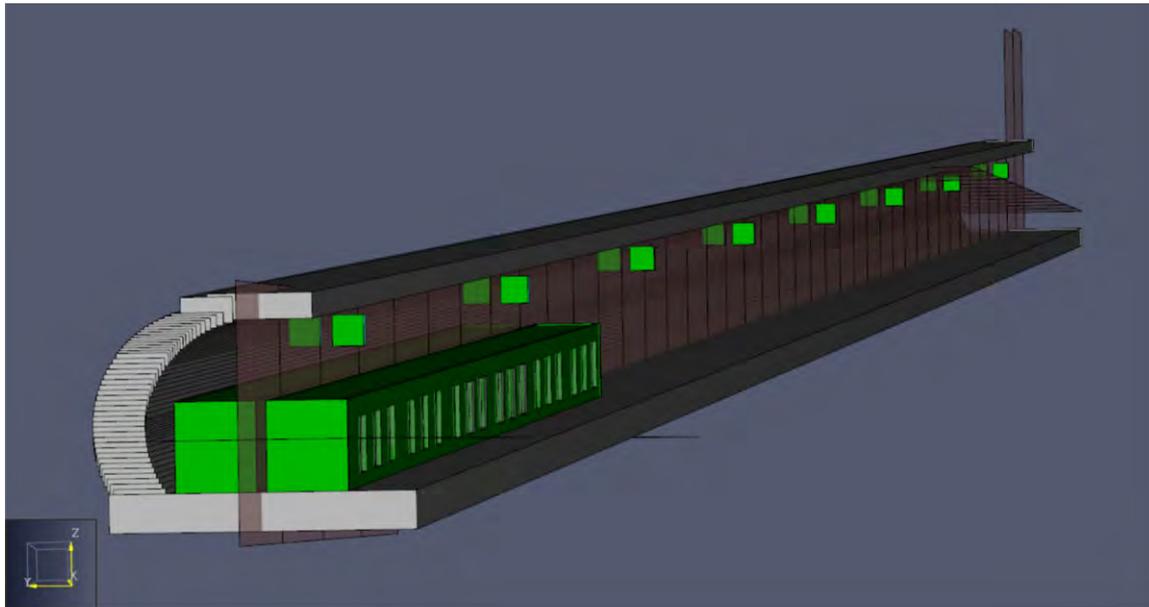


Figure 159 : Position des coupes longitudinale (Tractebel, 2020)

Les capteurs de flux radiatif sont positionnés le long du trottoir d'évacuation à 2 mètres de hauteur.

B.8.2. Résultats Monotube

- Evolution de la courbe HRR (en kW)

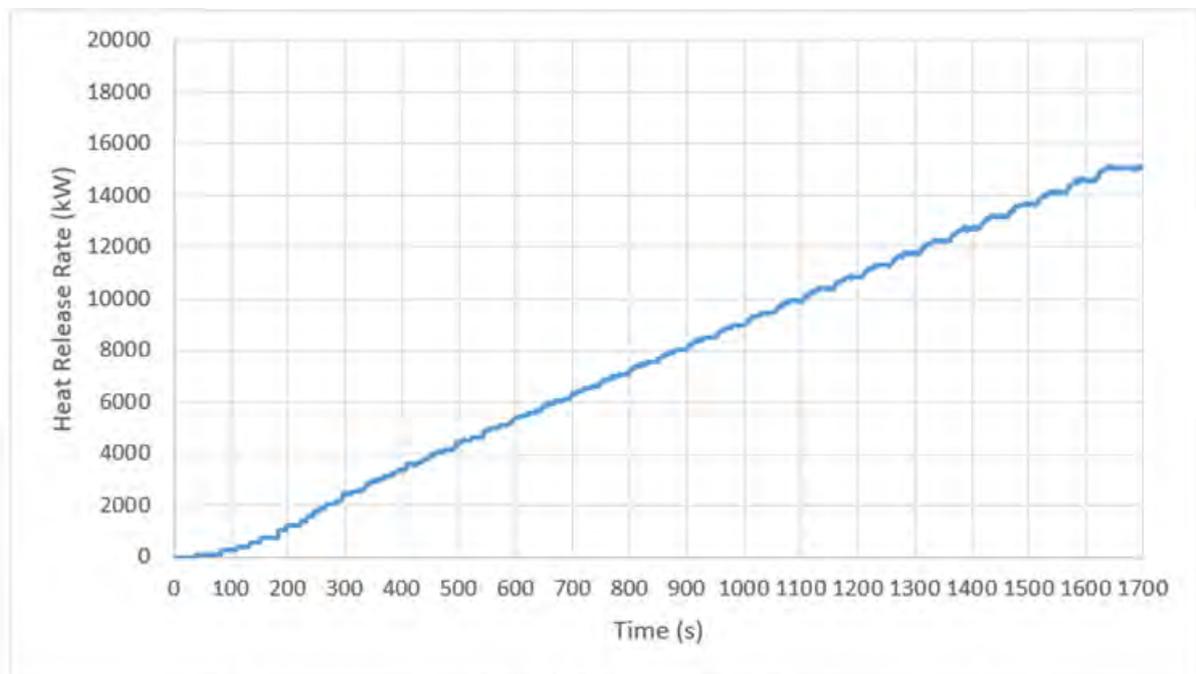


Figure 160 : Evolution HRR - Tunnel monotube (Tractebel, 2020)

La puissance du feu augmente au fur et à mesure dans le temps jusqu'à atteindre 15 MW.

On constate que le développement du feu suit l'hypothèse imposée sur la propagation dans le temps et l'espace.

- **Niveaux de visibilité dans le tunnel (en m)**

Au plus la couleur tend vers le rouge au moins la visibilité est bonne

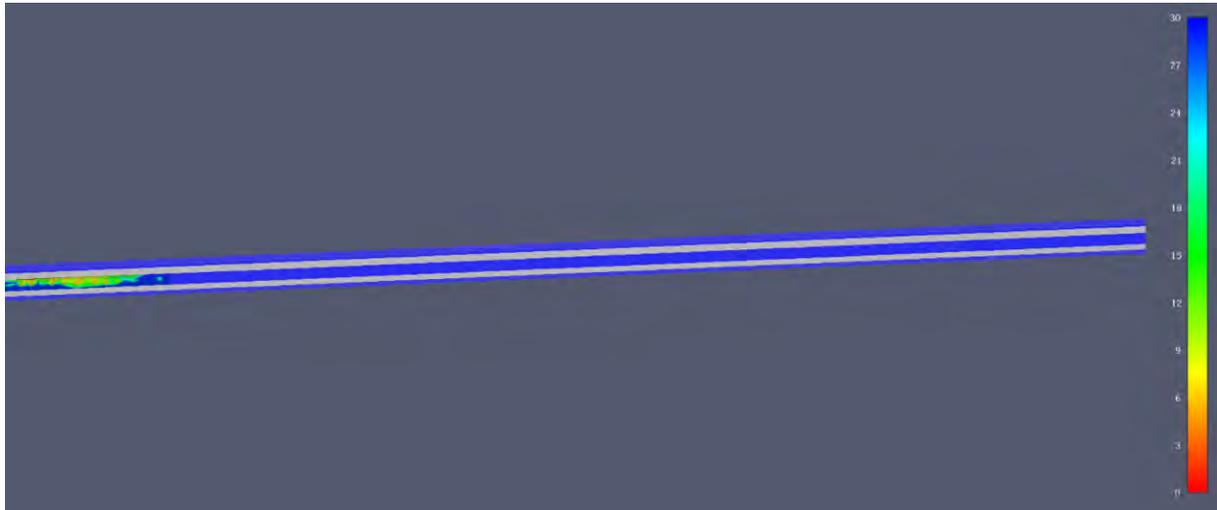


Figure 161 : Visibilité tunnel monotube à t=200 s (Tractebel, 2020)

Le résultat montre qu'à 200 s la visibilité dans la rame de métro est en dessous de la valeur admissible (10 m) et supérieure à 10 m dans le reste du tunnel.

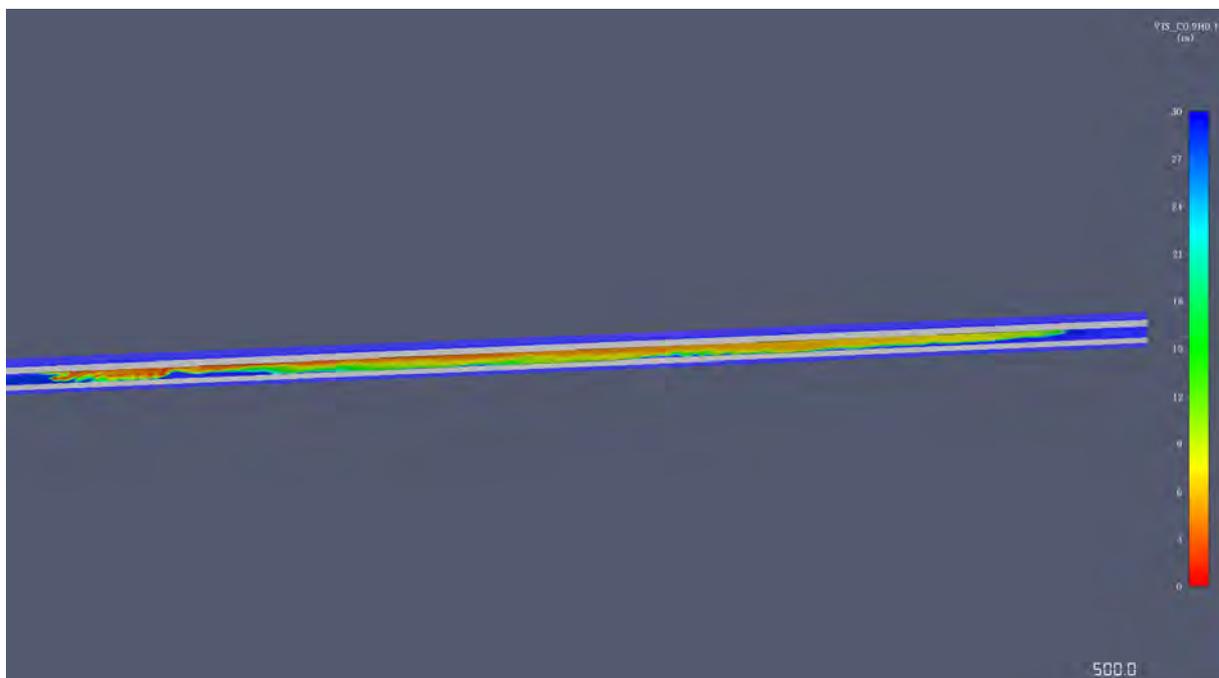


Figure 162 : Visibilité tunnel monotube à t=500 s (Tractebel, 2020)

A partir de 500 s, la visibilité est partout mauvaise car dépassant la valeur admissible qui est de 10 mètre sauf aux extrémités du tunnel.

- **Niveaux de température dans le tunnel (en °C)**

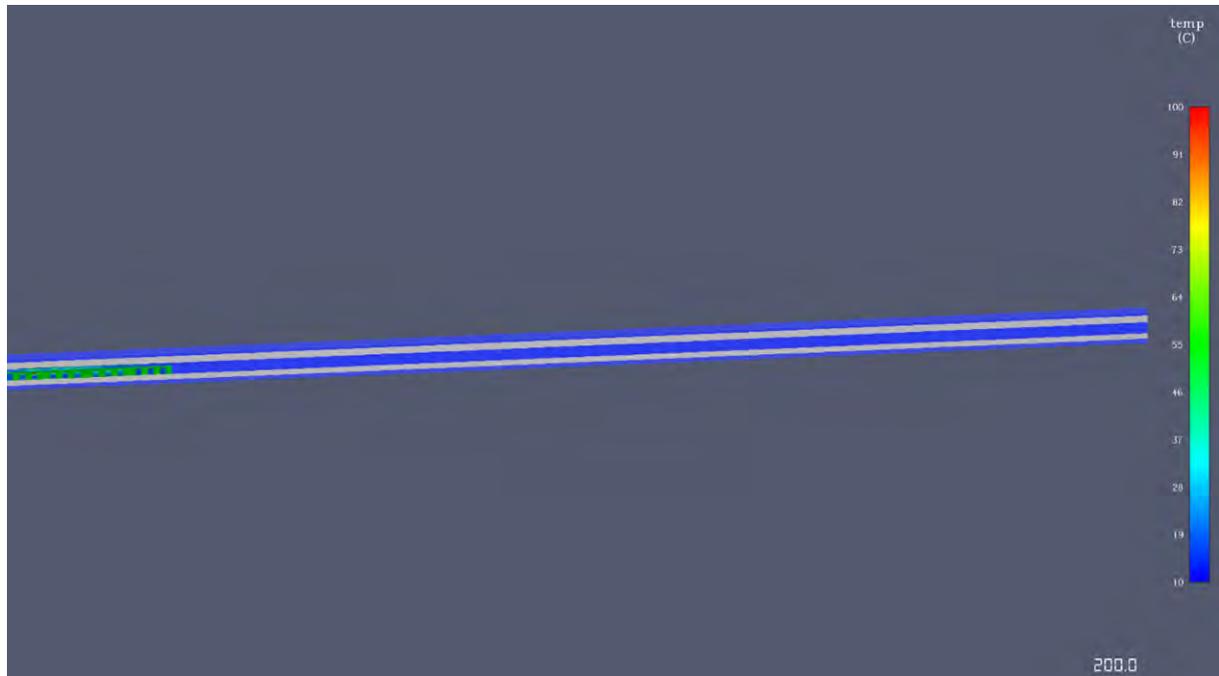


Figure 163 : Température tunnel monotube à t=200 s (Tractebel, 2020)

La figure montre qu'à 200 s, la température dans le tunnel est inférieure à la valeur limite 80°C. Par contre dans la rame en feu, on note une température plus importante (> 80°C) autour du foyer.

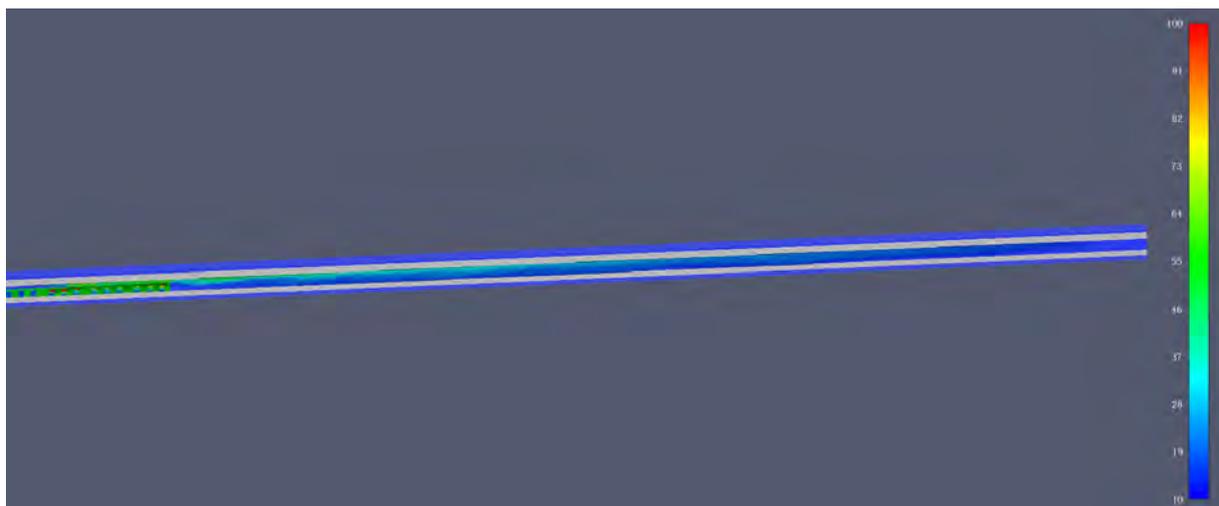


Figure 164 : Température tunnel monotube à t=500 s (Tractebel, 2020)

A partir de 500 s, la température est bonne dans le tunnel sauf au niveau de la rame autour du foyer.

- **Niveaux de flux radiatif dans le tunnel (en kW/m²)**

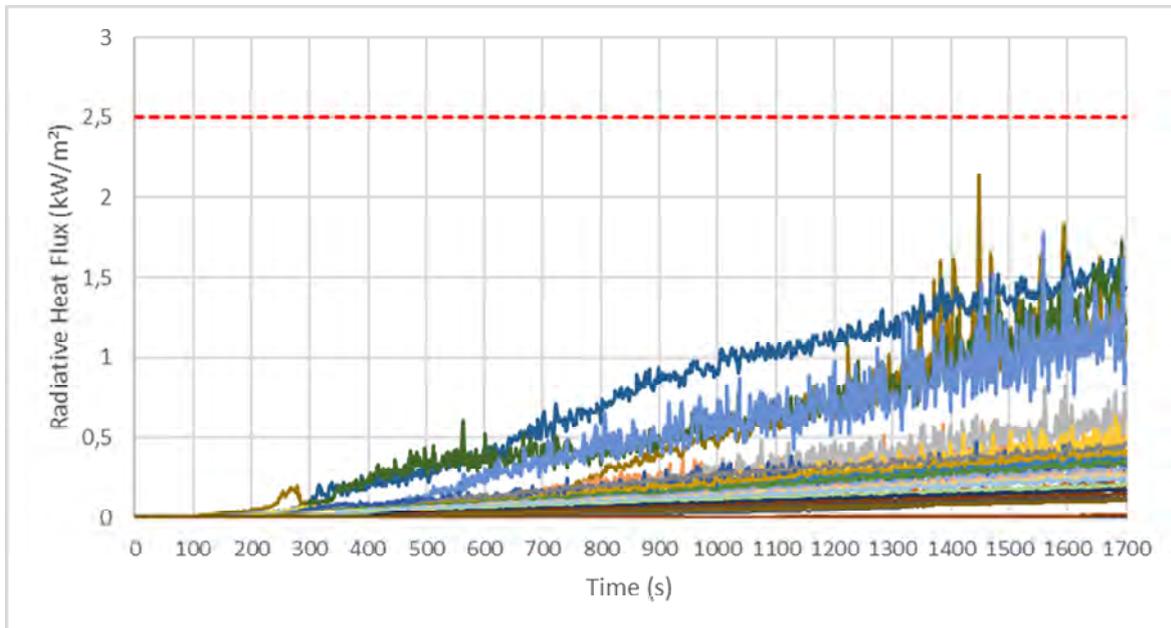


Figure 165 : Flux radiatif tunnel monotube (Tractebel, 2020)

Le résultat montre qu'aucun des capteurs ne dépasse la valeur limite du flux radiatif 2,5 kW/m².

B.9. Interprétation des simulations ASET / RSET

B.9.1. Présentation des résultats

Ce chapitre présente le résultat de comparaison ASET / RSET (Visibilité dans les fumées / Evacuation des personnes) au moment où le critère de validation n'est pas atteint.

Dans la rame en feu, les occupants n'arrivent pas à évacuer les wagons avant leur mise en sécurité. En effet, les fumées envahissent la rame à +/- 200 sec. et le critère de visibilité est atteint.

Par contre, lorsque le critère de température est atteint les occupants ont évacué la rame.

Pour les rames, ASET (temps disponible à l'évacuation) étant inférieur à RSET (temps nécessaire à l'évacuation), la sécurité des occupants n'est pas assurée dans la simulation « worst case » réalisée car ils sont rattrapés par les fumées.

La ligne du temps ci-dessous reprend le schéma théorique des temps ASET et RSET.

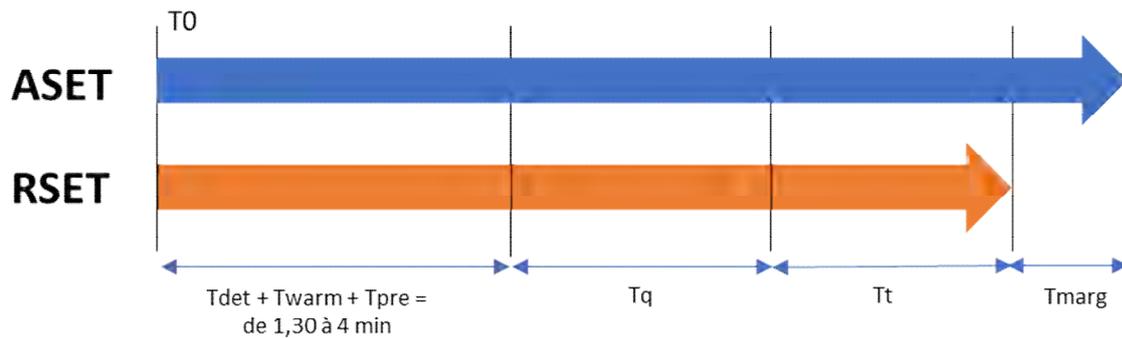


Figure 166 : ligne du temps (Tractebel, 2020)

L'analyse pour le trottoir est explicitée dans les chapitres suivants.

B.9.2. Tunnel monotube

Ce chapitre compare les résultats ASET / RSET du tunnel monotube au niveau du trottoir d'évacuation.

Le moment où les occupants atteignent le critère de visibilité est de +/- 300 sec. au droit de la rame et de +/- 400 sec. en avant de la rame.

Pour les occupants devant traverser tout le tunnel, ils sont rattrapés par les fumées après avoir parcouru 1/3 de la longueur du tunnel.

Les images ci-dessous reprennent à 300 sec. La visibilité des fumées prises en coupe verticale au niveau du trottoir ainsi que les personnes encore présentes sur le trottoir.

Par contre, **les occupants descendants vers la station proche arrivent tous en sécurité quand ils quittent le tunnel.**

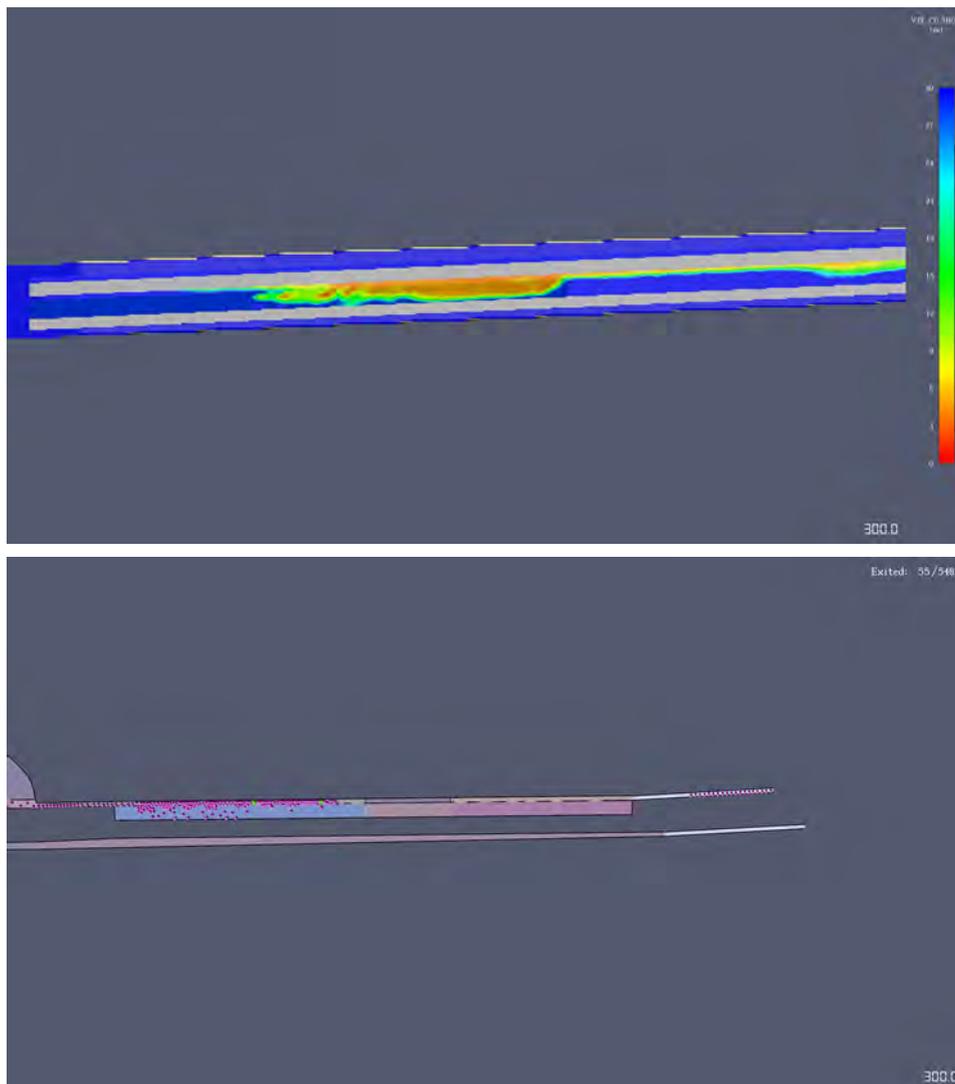


Figure 167 : comparaison ASET / RSET du trottoir monotube à 300 sec. (Tractebel, 2020)

B.9.3. Comparaison des simulations ASET / RSET pour les autres stations

Les simulations effectuées dans le tunnel Riga / Verboekhoven sont représentatives pour toutes les stations concernant les occupants de la rame.

Pour les occupants du trottoir, les simulations effectuées dans le tunnel Riga / Verboekhoven sont représentatives pour les stations ayant une seule direction de désenfumage, à savoir :

- P5 / Liedts
- Tilleul / Paix
- Bordet / P0

Pour les occupants du trottoir des autres stations, une extrapolation des résultats de ces simulations permet de considérer que les 400 sec de temps de sécurité ne permettent pas d'atteindre le bout du tunnel.

A titre informatif, il convient de préciser que suivant l'UITP, le nombre d'incendies survenus dans des infrastructures de métro recensés dans le monde entre 1903 et 2015 s'élève à 12 occurrences (hors attentats).²⁰

C. Risques d'explosions

En accord avec le Comité d'Accompagnement, il a été décidé qu'une analyse concernant le risque d'explosions sera réalisée par ailleurs et ne sera pas reprise dans la présente étude. En effet, il s'agit d'une préoccupation sensible en matière de sécurité qui mérite d'être traitée dans un cadre de confidentialité de manière à ne pas compromettre l'efficacité des mesures envisagées. Le cadre confidentiel est en effet incompatible avec le fonctionnement d'une étude d'incidences.

L'analyse des risques d'explosions sort du cadre de l'évaluation des incidences environnementales car ce sujet découle de plans d'acteurs fédéraux et de plans sécurité internes à la STIB.

Il est néanmoins essentiel que le suivi de cette préoccupation soit poursuivi au cours des étapes ultérieures de la mise en œuvre de ce projet et que les administrations délivrant les autorisations sur ce projet soient associées à cette discussion afin de pouvoir délivrer les permis en connaissance de cause, tout en garantissant un niveau de sécurité sur ces informations.

6.9.4. Recommandations sur le projet

Recommandations visant le suivi de la prévention incendie et du risque d'explosions durant la procédure et après la procédure de demandes de permis

La présente procédure de demande de permis est encadrée d'obligations en matière de prévention incendie. Il s'agit essentiellement des avis SIAMU requis dans le cadre des dossiers de demande. Nous recommandons, pour les étapes ultérieures un suivi proactif de cette préoccupation de la part de différents acteurs :

1. Dans la phase d'amendements qui suit la clôture de l'étude d'incidences et d'instruction jusqu'à la délivrance :
 - a. Le projet subira probablement des évolutions qui remettront en cause certains aspects du projet en matière de prévention incendie. Nous recommandons donc que le projet tel qu'amendé après l'étude d'incidences fasse l'objet d'une nouvelle demande d'avis SIAMU (initiative par le demandeur)
 - b. il conviendra alors de veiller à ce que l'avis SIAMU soit transmis aux autorités délivrantes avant la délivrance des permis (urbanisme et environnement) dans un timing à convenir en concertation avec les autorités délivrantes, le SIAMU et le demandeur
 - c. en ce qui concerne la charge réelle au feu des rames, nous recommandons au demandeur de convenir avec le SIAMU une valeur qui soit suffisamment sécurisante sans générer de surcoûts démesurés. Différentes pistes de réflexion pourraient mener à un affinage de cette valeur, tel que par exemple :

²⁰ http://crd.ensosp.fr/doc_num.php?explnum_id=8263, annexe IV

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

- i. vérifier dans la littérature spécialisée s'il n'existe pas des données plus fines sur cette question comme par exemple dans le cadre des travaux du de l' « European Tunnel Network -Fire In Tunnel »
 - ii. vérifier s'il est possible d'imposer une norme souhaitée aux fournisseurs de rames de métro de la STIB et assurer que le respect de cette norme soit vérifié sur base de critères vérifiables validés par le SIAMU ;
 - iii. Si nécessaire, procéder à un test de combustion en conditions réelles (en partenariat avec la STIB)
- d. dans le but d'éviter que l'avis SIAMU rendu dans le cadre du projet amendé n'implique des modifications significatives au projet, il serait utile de baliser certains sujets en amont de la demande d'avis SIAMU, nous pensons notamment, à titre d'exemple :
 - i. convenir du contenu technique et du niveau de détail des informations à fournir au SIAMU pour leur permettre d'émettre un avis aussi complet et précis que possible
 - ii. convenir des paramètres des simulations ASET/RSET qui devront être réalisées sur le projet tel qu'adapté de de faire valider ces paramètres de simulation
 - iii. définir une liste claire des classes des matériaux qui méritent d'être définis dans la demande de permis (gros-œuvre, équipements techniques, matériaux de façades, etc.) afin de clarifier leurs caractéristiques en termes de résistance au feu (sur les plans du projet amendé, par exemple) mais aussi lorsque nécessaire en termes de risque qu'ils représentent au niveau de la toxicité des fumées qu'ils représentent.
- e. Nous recommandons de procéder, dans le cadre de l'élaboration du projet amendé , à la réalisation des simulations ASET/RSET définies par la norme ISO 16738 en prenant en compte les paramètres approuvés au préalable par le SIAMU et d'en fournir les résultats au SIAMU dans le cadre du dossier de demande d'avis ainsi qu'aux autorités délivrantes. Dans ce cadre, il conviendra de vérifier si les évacuations du tunnel sont comparables dans tous les tronçons ou si les résultats du tronçon « worst-case » retenu dans le cadre de cette étude est un cas particulier. Ces résultats permettront alors de vérifier si l'ensemble des tronçons du tunnel peuvent être évacués de manière efficace ou, dans le cas contraire, s'il convient de rechercher des solutions particulières pour des portions spécifiques du tunnel ou s'il est nécessaire de procéder à une recherche de solutions plus structurelle sur l'ensemble du tracé. Pour les zones qui ne peuvent être évacuées de manière sécuritaire, le demandeur doit intégrer des solutions pour que l'évacuation des personnes puissent se faire. Ces solutions doivent prouver l'équivalence de la sécurité et, si nécessaire, faire l'objet de demandes de dérogations auprès de l'autorité prescriptrice, en se basant sur l'ajout de mesures passives, actives et/ou organisationnelles.
- f. Dans l'hypothèse où les résultats de l'ASET/RSET réalisés sur le projet amendé devaient rester problématiques de manière structurelle sur l'ensemble des tronçons pour le tunnel, compte-tenu des paramètres finalement définis, nous recommandons de prendre toutes les mesures requises pour tendre autant que

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

possible vers le risque « zéro » en termes de vies humaines. Ceci implique de prendre toutes les mesures pertinentes en ce sens tant au niveau du gros-œuvre que des équipements de gestion du risque d'incendie. Les mesures pouvant être envisagées concernent par exemple des dispositifs d'évacuation ou de mise en sécurité accrus, des équipements particuliers d'extinction/désenfumage pour les zones problématiques, etc. Le cas échéant, une étude de risque plus fouillée pourrait s'envisager pour vérifier la nécessité des solutions envisageables (rappelons que 12 incendies sont répertoriés à travers le monde dans des infrastructures de métro entre 1903 et 2015).

- g. Nous recommandons au SIAMU de veiller à être suffisamment disponibles pour ce dialogue en amont de la demande d'avis sur le projet amendé et de se positionner dès ce moment-là sur les paramètres à définir tel que décrits ci-dessus.
- h. Nous recommandons également d'ouvrir un dialogue avec le SPF Intérieur en vue d'anticiper les demandes de dérogations induites par le projet. Il conviendra également de veiller à ce que ces dérogations soient formellement sollicitées à temps pour qu'elles puissent être accordées et transmises aux autorités délivrantes avant la délivrance des permis.
- i. Nous recommandons également que le demandeur s'informe de la poursuite des travaux actuellement en cours qui visent à définir les normes à prendre en considération en termes de taux de personnes à mobilité (PMR) réduite à prendre en considération dans la stratégie d'évacuation. Dans la mesure du possible, en fonction de la date d'issue de ces travaux, adapter le projet en vue de respecter cette nouvelle norme. Si cette information n'est pas disponible suffisamment tôt, nous recommandons (1) de vérifier la possibilité d'adapter les infrastructures pour un taux de 3% de PMR, (2) d'intégrer ce taux dans le projet partout où cela est possible et (3) s'il reste des zones plus spécifiquement contraintes qui rendent l'atteinte de cette exigence particulièrement complexe, il convient alors d'expliquer ces contraintes, de définir le taux de PMR auquel le projet répond réellement et de proposer des mesures d'accompagnement qui permettent d'atténuer le risque accru que cette zone particulière induirait.
- j. En ce qui concerne le risque d'explosions, nous recommandons d'envisager un avis de Bruxelles Prévention et Sécurité (BPS) dans le cadre de l'instruction du dossier (à l'initiative du demandeur et/ou des autorités délivrantes)
- k. Dans le but d'éviter que l'avis de BPS n'induisse des modifications significatives au projet après le dépôt du projet amendé, nous recommandons que BPS se rende disponible durant la phase d'amendement pour anticiper cet avis de manière à permettre d'inclure directement dans le projet les éléments principaux (aspects structurels, par exemple).
- l. L'étude recommande d'assurer la mise à jour des plans fédéraux de la sûreté de l'état et des Plans d'Urgence de la STIB avant la mise en exploitation de la ligne de manière à assurer que l'ensemble des services concernés par la gestion de la sécurité aient bien intégré cette nouvelle infrastructure de transport dans leur organisation.

2. Durant la phase de chantier et en phase d'exploitation :

- a. Recommandation aux demandeurs : Etant donné que la législation ne définit pas de cadre de référence spécifique à ce type de projet qui tombe dès lors sous le coup des normes applicables aux « bâtiments bas » (et le tunnel n'étant pas dans leur champ d'application), il convient de s'assurer que la configuration de lieux permette effectivement l'intervention des services de secours. De manière complémentaire à ces normes et aux avis émis, nous recommandons de prévoir dans le calendrier chantier la possibilité de réaliser des tests du SIAMU en conditions réelles. Les stations et les tunnels étant des infrastructures atypiques et profondes, le SIAMU pourrait tester son matériel et ses procédures en conditions réelles lors de l'exécution du projet. Ces tests méritent être planifiés en collaboration avec le SIAMU tant au niveau de la période (par exemple au moment où le gros-œuvre est terminé) que du contenu technique des tests. Le demandeur pourrait alors prendre en compte les résultats de ces tests et adapter les équipements du tunnel. Si nécessaire, le SIAMU pourrait éventuellement également anticiper grâce à ces tests la mise en exploitation de la ligne et acquérir du matériel spécifiquement adapté ainsi que d'établir en conséquence ses procédures d'intervention.
- b. Outre les tests, l'étude recommande que le chantier fasse l'objet de visites du SIAMU à différents moments définis au préalable de manière à permettre la formulation d'observations et remarques qui pourraient alors être prises en considération par le demandeur
- c. Il est déconseillé d'arrêter une rame en feu dans un tunnel, surtout si ce tunnel n'a qu'un seul sens de désenfumage et que la position du feu oblige une partie des occupants à évacuer la longueur totale du tunnel.
- d. Nous recommandons à Beliris/la STIB de veiller à ce que l'ensemble des éléments de finition, non-soumis à permis d'urbanisme ou d'environnement (mobilier, revêtements de surface, etc.), soient sélectionnés au regard des risques que ces éléments peuvent représenter en termes de toxicité des fumées. Cette préoccupation doit être suivie attentivement durant toute la durée d'exploitation de la ligne.
- e. En ce qui concerne les alimentations de secours : les canalisations électriques de secours doivent être placées de manière à répartir les risques de mise hors service général. Une attestation de conformité des installations devra être fournie par les demandeurs avant les réceptions provisoires des installations.
- f. Recommandations aux demandeurs : dès l'achèvement des travaux, solliciter une visite de contrôle du SIAMU afin d'obtenir la délivrance d'une attestation de conformité des installations (selon l'article 55 du titre XIII du Règlement général de la bâtisse de la Région bruxelloise)

Recommandations en termes de normes à prendre en considération (rappels)

En l'absence de spécification des classes de matériaux utilisés, nous recommandons de se baser sur les performances à atteindre suivantes :

- a. Il y a lieu de respecter l'annexe 5 (réaction au feu des matériaux) à l'AR du 19 décembre 1997 modifiant l'AR du 7 juillet 1994 fixant les normes de base en matière de prévention contre l'incendie et l'explosion, auxquelles les bâtiments

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

nouveaux doivent satisfaire. Cette norme de base définit les performances de réaction au feu des matériaux de construction et l'opacité des fumées émises. Il y a lieu d'utiliser les valeurs définies pour prendre en compte les usagers non autonomes (PMR, enfants...)

- b. En ce qui concerne la toxicité des fumées générées par les matériaux de construction utilisés, bien que certaines normes d'essai existent en la matière, aucun règlement spécifique ne prescrit les limites de toxicité des matériaux à mettre en œuvre dans les bâtiments par rapport aux gaz émis lors d'un incendie (CO, HBr, HF, SO₂, Nox, ... etc). La norme ISO 16738 fait un lien entre la toxicité et la visibilité. Pour ce projet, il sera supposé que la limite de toxicité est dépassée quand la visibilité est inférieure à 10 m. (voir norme ISO 13571 et « SFPE Handbook of Fire Protection Engineering »).
- c. Pour les câbles électriques, il y a lieu de mettre en œuvre les câbles ne produisant pas de fumées denses et acides. (voir RGIE)
- d. En l'absence de spécification des classes de matériaux utilisés et des matières stockées, le livre VI du code du bien-être²¹ relatif aux agents chimiques, cancérigènes et mutagènes doit être respecté

6.9.5. Tableaux de synthèse des recommandations sur le projet monotube

Incidences	Recommandations
Sécurité incendie	<p>Recommandations aux demandeurs</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Faire une nouvelle demande d'avis SIAMU pour le projet amendé <input type="checkbox"/> Veiller à ce que l'avis SIAMU soit transmis aux autorités délivrantes avant la délivrance des permis (urbanisme et environnement) dans un timing à convenir en concertation avec les autorités délivrantes, le SIAMU et le demandeur <input type="checkbox"/> En ce qui concerne la charge réelle au feu des rames, convenir avec le SIAMU d'une valeur qui soit suffisamment sécurisante sans générer de surcoûts démesurés. Ce paramètre peut être affiné soit sur base de la littérature spécialisée (si existante), soit sur base d'engagements pris par les fournisseurs des rames de métro soit encore en procédant à un test de combustion en conditions réelles (en partenariat avec la STIB) <input type="checkbox"/> Baliser certains sujets en amont de la demande d'avis SIAMU, tels que le contenu technique et le niveau de détail des informations à fournir au SIAMU, les paramètres des

²¹ Transposition en droit belge de la Directive européenne 98/24/CE du Conseil, du 7 avril 1998, concernant la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs contre les risques liés à des agents chimiques sur le lieu de travail (quatorzième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE)

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

	<p>simulations ASET/RSET et une liste claire des classes des matériaux</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Procéder, dans le cadre de l'élaboration du projet amendé, à la réalisation des simulations ASET/RSET définies par la norme ISO 16738 en prenant en compte les paramètres approuvés au préalable par le SIAMU et en fournir les résultats au SIAMU dans le cadre du dossier de demande d'avis ainsi qu'aux autorités délivrantes<input type="checkbox"/> Vérifier au moyen des simulations ASET/RSET si le tunnel peut être évacué en toute sécurité ou, dans le cas contraire, vérifier s'il convient d'apporter des corrections ponctuelles ou plus structurelles, en ajoutant des solutions d'évacuations ou de mises à l'abri, par exemple (le cas échéant, procéder à une étude de risque plus fouillée).<input type="checkbox"/> Ouvrir un dialogue avec le SPF Intérieur en vue d'anticiper les demandes de dérogations induites par le projet. Veiller à ce que ces dérogations soient formellement sollicitées à temps pour qu'elles puissent être accordées et transmises aux autorités délivrantes avant la délivrance des permis<input type="checkbox"/> Nous recommandons également que le demandeur s'informe de la poursuite des travaux actuellement en cours qui visent à définir les normes à prendre en considération en termes de taux de personnes à mobilité (PMR) réduite à prendre en considération dans la stratégie d'évacuation. Dans la mesure du possible, en fonction de la date d'issue de ces travaux, adapter le projet en vue de respecter cette nouvelle norme. S'il reste des zones plus spécifiquement contraintes qui rendent l'atteinte de cette exigence particulièrement complexe, il convient alors d'expliquer ces contraintes, de définir le taux de PMR auquel le projet répond réellement et de proposer des mesures d'accompagnement qui permettent d'atténuer le risque accru que cette zone particulière induirait.<input type="checkbox"/> En ce qui concerne le risque d'explosions, nous recommandons d'envisager un avis de Bruxelles Prévention et Sécurité (BPS) dans le cadre de l'instruction du dossier (à l'initiative du demandeur et/ou des autorités délivrantes)<input type="checkbox"/> Il convient de s'assurer que la configuration de lieux permette effectivement l'intervention des services de secours. De manière complémentaire à ces normes et aux avis émis, nous recommandons de prévoir dans le calendrier chantier la possibilité de réaliser des tests du SIAMU en conditions réelles. Ces tests méritent être planifiés en collaboration avec le SIAMU tant au niveau de la période que du contenu technique des tests.
--	---

	<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Prévoir des visites du SIAMU sur chantier à différents moments définis au préalable de manière à permettre la formulation d'observations et remarques qui pourraient alors être prises en considération par le demandeur<input type="checkbox"/> Veiller à ce que le détail de l'ensemble des éléments de finition, non-soumis à permis d'urbanisme ou d'environnement soient sélectionnés au regard des risques que ces éléments peuvent représenter en termes de toxicité des fumées.<input type="checkbox"/> En ce qui concerne les alimentations de secours : les canalisations électriques de secours doivent être placées de manière à répartir les risques de mise hors service général. Une attestation de conformité des installations devra être fournie.<input type="checkbox"/> Il y a lieu de respecter l'annexe 5 (réaction au feu des matériaux) à l'AR du 19 décembre 1997 modifiant l'AR du 7 juillet 1994 fixant les normes de base en matière de prévention contre l'incendie et l'explosion, auxquelles les bâtiments nouveaux doivent satisfaire.<input type="checkbox"/> La norme ISO 16738 fait un lien entre la toxicité et la visibilité. Pour ce projet, il sera supposé que la limite de toxicité est dépassée quand la visibilité est inférieure à 10 m<input type="checkbox"/> Pour les câbles électriques, il convient de mettre en œuvre les câbles ne produisant pas de fumées denses et acides<input type="checkbox"/> En l'absence de spécification des classes de matériaux utilisés et des matières stockées, le livre VI du code du bien-être²² relatif aux agents chimiques, cancérigènes et mutagènes doit être respecté <p>Recommandations au SIAMU</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Nous recommandons au SIAMU de veiller à être suffisamment disponibles pour ce dialogue en amont de la demande d'avis sur le projet amendé et de se positionner dès ce moment-là sur les paramètres à définir tel que décrits ci-dessus. <p>Recommandations à BPS</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Dans le but d'éviter que l'avis du BPS n'induisse des modifications significatives au projet après le dépôt du projet amendé, nous recommandons que BPS se rende disponible durant la phase d'amendement pour anticiper
--	--

²² Transposition en droit belge de la Directive européenne 98/24/CE du Conseil, du 7 avril 1998, concernant la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs contre les risques liés à des agents chimiques sur le lieu de travail (quatorzième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE)

	cet avis de manière à permettre d'inclure directement dans le projet les éléments principaux.
Risques d'explosions	En accord avec le Comité d'Accompagnement, il a été décidé qu'une analyse concernant le risque d'explosions sera réalisée par ailleurs et ne sera pas reprise dans la présente étude. En effet, il s'agit d'une préoccupation sensible en matière de sécurité qui mérite d'être traitée dans un cadre de confidentialité de manière à ne pas compromettre l'efficacité des mesures envisagées. Il est néanmoins essentiel que le suivi de cette préoccupation soit poursuivi au cours des étapes ultérieures de la mise en œuvre de ce projet et que les administrations délivrant les autorisations sur ce projet soient associées à cette discussion afin de pouvoir délivrer les permis en connaissance de cause, tout en garantissant un niveau de sécurité sur ces informations.

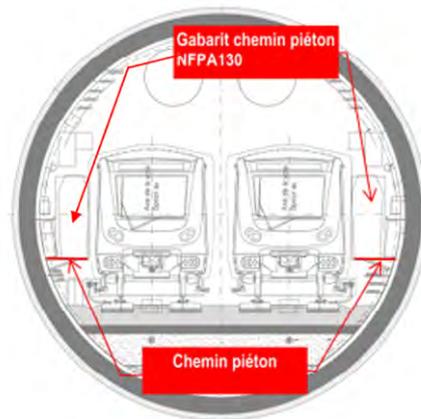
6.9.6. Conclusion

En matière de sécurité et prévention incendie, il n'existe pas de **règlementations** ni de **normes** belges qui s'appliquent particulièrement aux tunnels. La sécurité incendie est traitée sur base des standards internationaux et selon les règles de l'art. Le standard international est basé sur des normes disponibles en Europe concernant des réseaux de métros ou des tunnels ferroviaires et les résultats récents des projets de recherche sont pris en compte.

La norme NFPA130 (Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems) a été considérée par BMN en tant que référence normative pour le prédimensionnement des issues de secours et cadre normatif pour les tunnels en général.

L'analyse de l'application de cette norme dans le cadre de ce projet a été réalisée par le chargé d'étude. Cette analyse révèle que la norme NFPA130 n'est pas pertinente pour l'analyse des évacuations dans le cadre de ce projet. De plus, cette norme ne mentionne pas de temps d'évacuation pour les tunnels. La norme NFPA130 peut être utilisée pour l'analyse des éléments statiques comme la distance aux issues de secours.

Dans le projet de Métro Nord, chaque tronçon du nouveau réseau dispose d'un **cheminement piéton** conforme à la norme NFPA 130. Ceux-ci se trouvent de chaque côté du tunnel au niveau du plancher de la rame.



Tunnel – Coupe – Cheminement (BMN, 2020)

La distance maximale entre des stations de 601 m est inférieure à celle imposée dans la NFPA130 (762 m) concernant la distance maximale entre les **issues de secours**.

Le projet a pour objectif de mettre en service un système sans conducteur. Dans ce cadre, le déploiement de **palissades** a été décidé pour les 7 stations de la ligne. Les palissades décrites dans le projet répondent bien aux principes d'évacuation depuis le tunnel ou depuis un train arrêté à quai.

Avec l'accord du Comité d'accompagnement, **la norme ISO 16738 a donc été appliquée pour les simulations ASET/RSET de cette étude**. La norme ISO 16738 inclut notamment la gestion des comportements humains en cas d'incendie. La simulation ASET/RSET a été réalisée en considérant des conditions très conservatrices, voire extrêmes :

- La procédure d'évacuation de la STIB requiert que si un incident se produit dans une rame, cette rame rejoigne une station. Il est déconseillé d'arrêter une rame en feu dans un tunnel, surtout si ce tunnel n'a qu'un seul sens de désenfumage et que la position du feu oblige une partie des occupants à évacuer la longueur totale du tunnel. Le fait que la rame reste bloquée entre deux stations constitue donc le pire des cas de figure. C'est cette configuration qui a été simulée.
- Nous supposons que la charge au feu de la rame est de 15 MW après proposition et validation par le Comité d'Accompagnement. Il faut noter qu'une puissance thermique de 15 MW est très conservatrice pour du matériel récent. Le chargé d'étude recommande au demandeur de convenir avec le SIAMU d'une valeur qui soit suffisamment sécurisante sans générer de surcouts démesurés. Si nécessaire, il est recommandé de procéder à un test de combustion en conditions réelles (en partenariat avec la STIB)
- Le tunnel « worst case » est parmi les plus longs de la ligne NB et ne permet qu'un seul sens d'évacuation de fumées avec une forte pente. Pour cette analyse en accord avec le Comité d'Accompagnement, c'est donc le tronçon entre Verboekhoven et Riga qui a été retenu. En effet, ce tunnel de 467 mètres de long a une pente de 4,2 % et un seul sens de désenfumage.

6. Analyse des incidences du projet et recommandations

- Nous considérons que 548 personnes, dont des PMR, sont dans la rame et que le foyer de l'incendie se déclare au centre de la rame, forçant la moitié des passagers à se diriger vers la station la plus lointaine, à 467 mètres, en montée à 4,2%

Le résultat de cette analyse du « worst case » montre que si un feu se déclare dans la rame, la sécurité des occupants remontant vers la station la plus éloignée n'est pas assurée. Les occupants descendants vers la station proche arrivent, quant à eux, tous en sécurité quand ils quittent le tunnel.

Il faudra procéder, dans le cadre de l'élaboration du projet amendé, à la réalisation des **simulations ASET/RSET** définies par la norme ISO 16738 en prenant en compte les paramètres approuvés au préalable par le SIAMU. Dans le cas où les simulations montrent que la sécurité des occupants n'est pas assurée, des **solutions** infrastructurelles, procédurales ou équipementières devront être proposées et validées par le SIAMU.

Nous recommandons également que le demandeur s'informe de la poursuite des travaux actuellement en cours qui visent à définir les normes à prendre en considération en termes de taux de **personnes à mobilité réduite** (PMR) à prendre en considération dans la stratégie d'évacuation. Dans la mesure du possible, en fonction de la date d'issue de ces travaux, adapter le projet en vue de respecter cette nouvelle norme. Si cette information n'est pas disponible suffisamment tôt, nous recommandons (1) de vérifier la possibilité d'adapter les infrastructures pour un taux de 3% de PMR, (2) d'intégrer ce taux dans le projet partout où cela est possible et (3) s'il reste des zones plus spécifiquement contraintes qui rendent l'atteinte de cette exigence particulièrement complexe, il convient alors au demandeur d'expliquer ces contraintes, de définir le taux de PMR auquel le projet répond réellement et de proposer des mesures d'accompagnement qui permettent d'atténuer le risque accru que cette zone particulière induirait.

En accord avec le Comité d'Accompagnement, il a été décidé qu'une analyse concernant le **risque d'explosions** sera réalisée par ailleurs et ne sera pas reprise dans la présente étude. En effet, il s'agit d'une préoccupation sensible en matière de sécurité qui mérite d'être traitée dans un cadre de confidentialité de manière à ne pas compromettre l'efficacité des mesures envisagées. Le cadre confidentiel est en effet incompatible avec le fonctionnement d'une étude d'incidences.

Etant donné que la législation ne définit pas de cadre de référence spécifique à ce type de projet, il convient de s'assurer que la configuration de lieux permette effectivement l'intervention des services de secours. De manière complémentaire à ces normes et aux avis émis, nous recommandons de prévoir dans le calendrier chantier la possibilité de **réaliser des tests du SIAMU en conditions réelles le plus en amont possible de la mise en exploitation.**

Les stations et les tunnels étant des infrastructures atypiques et profondes, le SIAMU pourrait tester son matériel et ses procédures en conditions réelles lors de l'exécution du projet. Ces tests méritent être planifiés en collaboration avec le SIAMU tant au niveau de la période (par exemple au moment où le gros-œuvre est terminé) que du contenu technique des tests. Le demandeur pourrait alors prendre en compte les résultats de ces tests et adapter les équipements du tunnel. Si nécessaire, le SIAMU pourrait éventuellement également anticiper grâce à ces tests la mise en exploitation de la ligne et acquérir du matériel spécifiquement adapté ainsi que d'établir en conséquence ses procédures d'intervention. Outre les tests, l'étude recommande que le chantier fasse l'objet de **visites du SIAMU** à différents moments définis au préalable de manière à permettre la formulation d'observations et remarques qui pourraient alors être prises en considération par le demandeur.

Nous recommandons aux demandeurs de veiller à ce que les détails de l'ensemble des éléments de finition, non-soumis à permis d'urbanisme ou d'environnement (mobiliers, revêtements de surface, etc.), soient sélectionnés au regard des risques que ces éléments peuvent représenter en termes de **toxicité des fumées**. Cette préoccupation doit être suivie attentivement durant toute la durée d'exploitation de la ligne.

En ce qui concerne les **alimentations de secours**, les canalisations électriques de secours doivent être placées de manière à répartir les risques de mise hors service général.

6.10. Microclimat

Sans objet dans le cadre du tunnel

6.11. Déchets

Sans objet, voir les différents chapitres déchets dans les livres Stations, dépôt et chantier tunnel

7. Tableaux de synthèse des recommandations sur le projet

7.1. Mobilité

Incidence(s)	#	Degré de priorité	Recommandations	Intervenant
Transport des déblais et des matériaux de construction	T.1.1	+++	<p>Exiger, au moment du choix de l'adjudicataire des travaux, que les différentes entreprises produisent une note détaillée des options retenues pour le transport des déblais et des matériaux de construction pour la totalité du chantier du métro.</p> <p>Dans le but de limiter le charroi routier il faudra faire la démonstration que l'option chemin de fer a bien été étudiée à un niveau de détail suffisant visant à exploiter la ligne 26.</p> <p>De même l'option via un transport fluvial doit faire la démonstration qu'une liaison au chemin de fer a bien été évaluée pour le transport de déblais et des matériaux de construction vers l'avant-port de Bruxelles.</p> <p>Au minimum pour les travaux opérants depuis le site du dépôt (tunnelier + dépôt) mais aussi pour la station Bordet.</p>	Demandeur
	T.1.2	+++	Vu l'utilisation au minimum mais inévitable d'un itinéraire routier vers et depuis le canal, il est recommandé de prendre tous les contacts et les dispositions permettant la rénovation rapide de la rampe du Lion.	Demandeur Infrabel
	T.1.3	+++	Prendre contact avec les administrations et le port de Bruxelles pour connaître le statut de la procédure judiciaire visant au maintien de la voie ferrée vers les quais de l'avant-port de Bruxelles.	Demandeur
	T1.4	+++	<p>Pour le transport des déblais et des matériaux de construction :</p> <p>Zone 1 : « Bordet, dépôt, tunnel, Paix » = utilisation préférentielle L26 au niveau d'un quai de chargement le long du dépôt STIB. Si la L26 ne peut absorber 100% des in/out, il est recommandé l'utilisation d'un itinéraire alternatif par la route à partager entre la rampe du Lion et la chaussée de Haecht vers le zoning Buda et l'avenue de Vilvoorde.</p> <p>Zone 2 : « Tilleul » = charroi recommandé vers Stroobants – Rampe du Lion (si rénovée à temps). Si la rampe n'est pas rénovée, alors le CE recommande que la zone 2 fusionne avec la zone 1.</p> <p>Zone 3 : « Riga, Verboekhoven, Colignon » =charroi recommandé via le Lambermont, Van-Praet et ensuite destination avant-port de Bruxelles</p> <p>Zone 4 : « Liedts » = charroi recommandé via l'avenue de la Reine et quais des usines, destination avant-port de Bruxelles.</p>	Demandeur

7.2. Urbanisme, aménagement du territoire et patrimoine

Incidence(s)	#	Degré de priorité	Recommandations	Intervenant
Risque de dégradation aux habitations durant chantier	T.2.1	+++	Si le transport des déblais du tunnel est réalisé par un convoi de camions vers le port de Bruxelles, faire un état des lieux des façades en vis-à-vis du parcours du préacheminement entre les stations et le port et entre le dépôt et le port.	Demandeur
Risque sur le patrimoine au droit du tunnel	T.2.2	++	Prévoir des mesures de suivi de chantier avant, durant et après les travaux de construction du métro au droit de la ferme 't Hoeveke, afin d'évaluer le tassement produit.	Demandeur

7.3. Domaines social et économique

Sans objet dans le cadre de ce livre

7.4. Sol, sous-sol et eaux souterraines

Incidence(s)	#	Degré de priorité	Recommandations	Intervenant
Vérification des niveaux de nappe le long du tracé	T.4.6	++	Synthèse / état des lieux du réseau piézométrique existant – vérification des niveaux aquifères équipés et si nécessaire mise en œuvre de nouveaux piézomètres (au minimum clusters amont et aval aux stations et couverture des zones interstations peu documentées).	Demandeur
	T.4.7	++	Vérification si des piézomètres existants peuvent être affectés par l'emprise du chantier et si nécessaire les substituer. Le cas échéant procédure d'abandon des piézomètres dans les règles de l'art (cimentation).	Demandeur
	T.4.8	+	Monitoring continu avec loggers automatiques de l'ensemble des piézomètres (avant, pendant et après chantier en situation définitive).	Demandeur

7. Tableaux de synthèse des recommandations sur le projet

Réserve non saturée potentiellement insuffisante à la Station Bordet	T.4.9	++	Eclaircir la différence des niveaux piézométriques selon les sources (différents niveaux aquifères).	Demandeur	
	T.4.10	+	Implanter un doublon piézométrique (équipé à différents niveaux aquifères et monitoring des niveaux)	Demandeur	
	T 4.11	+	Si la réserve non saturée se confirme insuffisante, étudier la mise en œuvre d'un passage de nappe au droit de la station Bordet pour annuler l'occurrence d'un effet barrage.	Demandeur	
Effet barrage	T 4.12	+++	En l'absence d'étude complémentaire qui permettrait de mieux évaluer le risque de remontée de nappe, mise en place de dispositifs de passage de nappe, combinés à un monitoring piézométrique	Demandeur	
Suivi des débits	T 4.13	+++	Monitoring continu des débits de drainage au niveau de toutes les stations, des tronçons de tunnel, des stations de relevage intermédiaires (2) et principales (2) – vérification du caractère stable outre les fluctuations saisonnières. En cas d'anomalies éventuelles recherche de la cause et remédiation.	Demandeur	
	T 4.14	+++	Monitoring des débits rejetés aux exutoires (eaux de drainage + eaux pluviales).	Demandeur	
Impact du rabattement sur les tassements	T 4.15	+++	Affiner l'approche géotechnique sur l'impact du rabattement sur les tassements (Terzaghi étant trop conservateur) avec un focus sur les stations Riga et Tilleul, côté aval directement contigu. Vérifier, sur cette base, si le rabattement attendu est de nature à causer un tassement non admissible (> 20 mm).	Demandeur	
	T 4.16	+++	Si le seuil admissible est dépassé, intégrer au dispositif la mise en œuvre d'une recharge aquifère locale. Ceci implique une identification de l'horizon cible, de l'étendue du dispositif en fonction de la place disponible et une estimation du débit de recharge optimal. Dimensionnement et vérification des paramètres de design à l'aide de la modélisation hydrogéologique existante. Détermination du débit optimal pour limiter le rabattement à la valeur seuil tout en ne causant pas une remontée inacceptable.	Demandeur	
Mise à disposition d'un outil de modélisation prédictive et de suivi	T 4.17	+++	Sur base du modèle existant : affiner la calibration du modèle sur base des nouveaux piézomètres et en régime transitoire.	Demandeur	
	T 4.18	+++	Modélisations complémentaires : situations définitives en période de hautes eaux et de basses eaux + modélisation de retrofitting du modèle sur base des gammes de débit réellement observées.	Demandeur	
Stations de pompage / relevage	T 4.19	+++	Vérifier que le concept hydraulique des stations prévoit une capacité suffisante de collecte des vidanges des circuits de relevage (en cas d'arrêt, de maintenance ou de panne) permettant la	Demandeur	

7. Tableaux de synthèse des recommandations sur le projet

			récupération des eaux de vidange et le maintien du pompage des eaux de drainage pendant une durée suffisante. Si nécessaire adaptation du design pour prendre en compte cet aspect.		
Qualité et traitement des eaux rejetées (si la variante de gestion des eaux n'est pas retenue)	T 4.20	+++	Mise en œuvre d'un traitement des eaux de drainage pour une phase 1 – station pilote, au niveau de chaque station, pendant le chantier et une première année d'exploitation. Processus unitaires proposés : séparation hydrocarbures, filtration sur sable ou équivalent et adsorption sur charbon actif.	Demandeur	
	T 4.21	+++	Suivi minimum bimestriel de la qualité des eaux drainées au droit de chaque station durant cette phase pilote (phase 1). Déterminer l'évolution des charges polluantes. Suivi des eaux traitées au minimum à la même fréquence + suivi de réglage de la station de traitement.	Demandeur	
	T 4.22	+++	Sur base du suivi de la phase 1, conception de la station définitive à mettre en œuvre au niveau des relevages principaux (station exutoires P5 et Tilleul). Mise en œuvre et suivi semestriel minimal.	Demandeur	
	T 4.23	+++	Sur base du suivi de la phase 1 étudier la pertinence de prévoir un traitement spécifique sur les nitrates en accord avec Bruxelles Environnement.	Demandeur	
	T 4.24	+++	Maintenance continue des installations de traitement : décolmatage des filtres, évacuation des hydrocarbures et déchets, remplacement des charges de charbon actif quand saturées.	Demandeur	
Puits domestique à proximité de la station Paix (captage 5240)	T 4.25	+	Identification du propriétaire, de l'utilisation de l'ouvrage et si nécessaire procédure d'abandon et d'indemnisation.	Demandeur	
Impétrants	T 4.26	+++	Sur les 30 m de part et d'autre du tracé tunnel, toutes les canalisations d'eau en fonte grise de Vivaqua doivent être modifiées par des canalisations en acier ou en PEHD. Ces modifications doivent être réalisées avant le début de la construction du tunnel.	Demandeur Vivaqua	
Qualité sanitaire des terres et filière d'évacuation	T 4.27	+++	Le demandeur devra s'assurer au moment de la réception des offres des entreprises que la filière en aval soit opérationnelle, dispose des installations et infrastructures de capacité suffisante et règlementée pour pouvoir gérer les terres issues du chantier du métro. En amont, il est recommandé de vérifier les contraintes juridiques applicables sur les installations requises pour la gestion de ces terres.	Demandeur	
	T 4.28	+++	Actuellement la PO doit pouvoir accueillir 3 jours de stockage de terre, nous recommandons de porter à 5 jours la possibilité de stockage sur le site du dépôt.	Demandeur	

7.5. Faune et flore

Sans objet dans le cadre de ce livre

7.6. Qualité de l'air

Sans objet dans le cadre de ce livre

7.7. Energie

Incidence(s)	#	Degré de priorité	Recommandations	Intervenant
Récupération d'énergie	T.7.1	++	Il est recommandé d'analyser la pertinence et la possibilité technique d'installer des sous-stations réversibles dans chaque station	Demandeur
	T.7.2	+	Il est recommandé d'étudier plus en détail lors du projet amendé les opportunités d'utilisation de l'énergie géothermique du tunnel au niveau des stations tout en précisant les portions les plus favorables du tunnel à cet effet.	Demandeur

7.8. Environnement sonore et vibratoire

Incidence(s)	#	Degré de priorité	Recommandations	Intervenant
Vibration	T.8.1	++	Il est recommandé de s'assurer que des dispositifs antivibratiles soient prévus au niveau des aiguillages. L'impact de la vitesse des métros doit être calibrée au début de l'exploitation au droit des stations et auprès des bâtiments sensibles. Dans le cas où l'impact occasionne une gêne, la vitesse du métro devra être adaptée ponctuellement.	Demandeur
Acoustique	T.8.1	+++	Il est recommandé d'ajouter des panneaux isolants au droit des stations et au niveau des ouvertures.	Demandeur

7. Tableaux de synthèse des recommandations sur le projet

Incidence(s)	#	Degré de priorité	Recommandations	Intervenant
	T.8.2	+++	Il est recommandé de prévoir des absorbeurs de bruits au niveau des grilles de ventilation.	Demandeur
	T.8.3	+++	<p>En ce qui concerne les aspects de l'usure ondulatoire potentiellement élevée à longue terme au niveau des stations ou aux courbes, un monitoring annuel est recommandé et, le cas échéant, un meulage ou remplacement d'une partie de rail peuvent être effectués.</p> <p>En phase de chantier, il faudra veiller à appliquer les recommandations sur les leviers suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Equipements et techniques ▪ Planification ▪ Charroi du chantier ▪ Bruit auprès des travailleurs ▪ Traitement des vibrations ▪ Protection et information des riverains ▪ Monitoring du bruit et/ou des vibrations 	Demandeur

7.9. Être humain

Incidence(s)	#	Degré de priorité	Recommandations	Intervenant
Sécurité incendie	T.9.1	+++	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Faire une nouvelle demande d'avis SIAMU pour le projet amendé <input type="checkbox"/> Veiller à ce que l'avis SIAMU soit transmis aux autorités délivrantes avant la délivrance des permis (urbanisme et environnement) dans un timing à convenir en concertation avec les autorités délivrantes, le SIAMU et le demandeur <input type="checkbox"/> En ce qui concerne la charge réelle au feu des rames, convenir avec le SIAMU d'une valeur qui soit suffisamment sécurisante sans générer de surcouts démesurés. Si nécessaire, procéder à un test de combustion en conditions réelles (en partenariat avec la STIB) 	Demandeur

7. Tableaux de synthèse des recommandations sur le projet

Incidence(s)	#	Degré de priorité	Recommandations	Intervenant
			<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="790 328 1794 416">❑ Baliser certains sujets en amont de la demande d'avis SIAMU, tels que le contenu technique et le niveau de détail des informations à fournir au SIAMU, les paramètres des simulations ASET/RSET et une liste claire des classes des matériaux <li data-bbox="790 440 1794 560">❑ Procéder, dans le cadre de l'élaboration du projet amendé, à la réalisation des simulations ASET/RSET définies par la norme ISO 16738 en prenant en compte les paramètres approuvés au préalable par le SIAMU et en fournir les résultats au SIAMU dans le cadre du dossier de demande d'avis ainsi qu'aux autorités délivrantes <li data-bbox="790 584 1794 671">❑ Ouvrir un dialogue avec le SPF Intérieur en vue d'anticiper les demandes de dérogations induites par le projet. Veiller à ce que ces dérogations soient formellement sollicitées à temps pour qu'elles puissent être accordées et transmises aux autorités délivrantes avant la délivrance des permis <li data-bbox="790 695 1794 943">❑ Nous recommandons également que le demandeur s'informe de la poursuite des travaux actuellement en cours qui visent à définir les normes à prendre en considération en termes de taux de personnes à mobilité (PMR) réduite à prendre en considération dans la stratégie d'évacuation. Dans la mesure du possible, en fonction de la date d'issue de ces travaux, adapter le projet en vue de respecter cette nouvelle norme. S'il reste des zones plus spécifiquement contraintes qui rendent l'atteinte de cette exigence particulièrement complexe, il convient alors d'expliquer ces contraintes, de définir le taux de PMR auquel le projet répond réellement et de proposer des mesures d'accompagnement qui permettent d'atténuer le risque accru que cette zone particulière induirait. <li data-bbox="790 967 1794 1054">❑ En ce qui concerne le risque d'explosions, nous recommandons d'envisager un avis de Bruxelles Prévention et Sécurité (BPS) dans le cadre de l'instruction du dossier (à l'initiative du demandeur et/ou des autorités délivrantes) <li data-bbox="790 1078 1794 1230">❑ Il convient de s'assurer que la configuration de lieux permette effectivement l'intervention des services de secours. De manière complémentaire à ces normes et aux avis émis, nous recommandons de prévoir dans le calendrier chantier la possibilité de réaliser des tests du SIAMU en conditions réelles. Ces tests méritent être planifiés en collaboration avec le SIAMU tant au niveau de la période que du contenu technique des tests. <li data-bbox="790 1254 1794 1342">❑ Prévoir des visites du SIAMU sur chantier à différents moments définis au préalable de manière à permettre la formulation d'observations et remarques qui pourraient alors être prises en considération par le demandeur 	

7. Tableaux de synthèse des recommandations sur le projet

Incidence(s)	#	Degré de priorité	Recommandations	Intervenant
			<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Veiller à ce que le détail de l'ensemble des éléments de finition, non-soumis à permis d'urbanisme ou d'environnement soient sélectionnés au regard des risques que ces éléments peuvent représenter en termes de toxicité des fumées. <input type="checkbox"/> En ce qui concerne les alimentations de secours : les canalisations électriques de secours doivent être placées de manière à répartir les risques de mise hors service général. Une attestation de conformité des installations devra être fournie. <input type="checkbox"/> Il y a lieu de respecter l'annexe 5 (réaction au feu des matériaux) à l'AR du 19 décembre 1997 modifiant l'AR du 7 juillet 1994 fixant les normes de base en matière de prévention contre l'incendie et l'explosion, auxquelles les bâtiments nouveaux doivent satisfaire. <input type="checkbox"/> La norme ISO 16738 fait un lien entre la toxicité et la visibilité. Pour ce projet, il sera supposé que la limite de toxicité est dépassée quand la visibilité est inférieure à 10 m <input type="checkbox"/> Pour les câbles électriques, il convient de mettre en œuvre les câbles ne produisant pas de fumées denses et acides <input type="checkbox"/> En l'absence de spécification des classes de matériaux utilisés et des matières stockées, le livre VI du code du bien-être²³ relatif aux agents chimiques, cancérigènes et mutagènes doit être respecté 	
	T.9.2	+++	Nous recommandons au SIAMU de veiller à être suffisamment disponibles pour ce dialogue en amont de la demande d'avis sur le projet amendé et de se positionner dès ce moment-là sur les paramètres à définir tel que décrits ci-dessus.	SIAMU
	T.9.3	+++	, nous recommandons que BPS se rende disponible durant la phase d'amendement pour anticiper cet avis de manière à permettre d'inclure directement dans le projet les éléments principaux.	BPS
Risque d'explosion	T.9.4	+++	En accord avec le Comité d'Accompagnement, il a été décidé qu'une analyse concernant le risque d'explosions sera réalisée par ailleurs et ne sera pas reprise dans la présente étude. En effet, il s'agit d'une	Demandeur

²³ Transposition en droit belge de la Directive européenne 98/24/CE du Conseil, du 7 avril 1998, concernant la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs contre les risques liés à des agents chimiques sur le lieu de travail (quatorzième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE)

7. Tableaux de synthèse des recommandations sur le projet

Incidence(s)	#	Degré de priorité	Recommandations	Intervenant
			préoccupation sensible en matière de sécurité qui mérite d'être traitée dans un cadre de confidentialité de manière à ne pas compromettre l'efficacité des mesures envisagées. Il est néanmoins essentiel que le suivi de cette préoccupation soit poursuivi au cours des étapes ultérieures de la mise en œuvre de ce projet et que les administrations délivrant les autorisations sur ce projet soient associées à cette discussion afin de pouvoir délivrer les permis en connaissance de cause, tout en garantissant un niveau de sécurité sur ces informations.	

7.10. Microclimat

Sans objet dans le cadre de ce livre

7.11. Déchets

Sans objet dans le cadre de ce livre

Partie 2 : Description de l'alternative de conception (bitube)

1. Introduction

Le cahier des charges de la présente étude d'incidences impose l'étude d'alternatives au projet introduit. Ces alternatives sont des solutions de remplacement qui « doivent présenter un intérêt certain, être raisonnables quant au coût de leur mise en œuvre et répondre aux objectifs de base des demandes ».

Parmi les alternatives retenues par le Comité d'Accompagnement et reprises dans le cahier des charges de l'étude se trouve une alternative de conception du tunnel en bitube. Cette conception alternative aboutit à une solution qui prévoit 2 tunnels distincts de 7,2 m de diamètre chacun au lieu d'un simple tunnel de 9,7 m de diamètre. Cette alternative comprend également les adaptations des stations en conséquence, y compris l'ouvrage de raccordement au niveau de la gare du Nord. Selon le cahier des charges, ces adaptations ont pour objectifs « *une diminution des tailles et profondeurs des stations et une réduction de leur emprise en sol* ».

Cette alternative sera décrite en détail dans la suite du présent chapitre.

2. Présentation de l'alternative bitube

2.1. Le tracé

L'emprise du tracé de l'alternative bitube reste globalement similaire au tracé du monotube et s'étend de la gare du Nord, au niveau de la rue d'Aerschot, jusqu'au niveau de la fin de la ligne, située au dépôt de Haren.

Les deux voies principales sont dénommées VVV (voie vers ville, circulant au nord) et VVF (voie vers faubourg, circulant au sud). Notons que les tunnels accueillant ces voies seront réalisés par deux tunneliers de dimensions plus réduites que celui de la solution monotube. L'implantation des ouvrages de communication entre les deux voies est reprise conformément au schéma d'exploitation de la configuration monotube.

Des ouvrages de bifurcation ont été ajoutés à certains endroits du tracé. Ces ouvrages sont destinés à assurer des services partiels en mode dégradé (c'est-à-dire en cas d'incident sur la ligne). Ils sont composés de 2 appareils de voie permettant de basculer les métros sur l'une ou l'autre voie en cas notamment d'entretien ou d'incident. La taille de ces ouvrages est d'une centaine de mètres de long.



Figure 168: Tracé de l'alternative bitube entre Liedts et Verboekhoven (BMN, 2020)



Figure 169: Tracé de l'alternative bi-tube entre Riga et Paix (source : BMN, 2020)

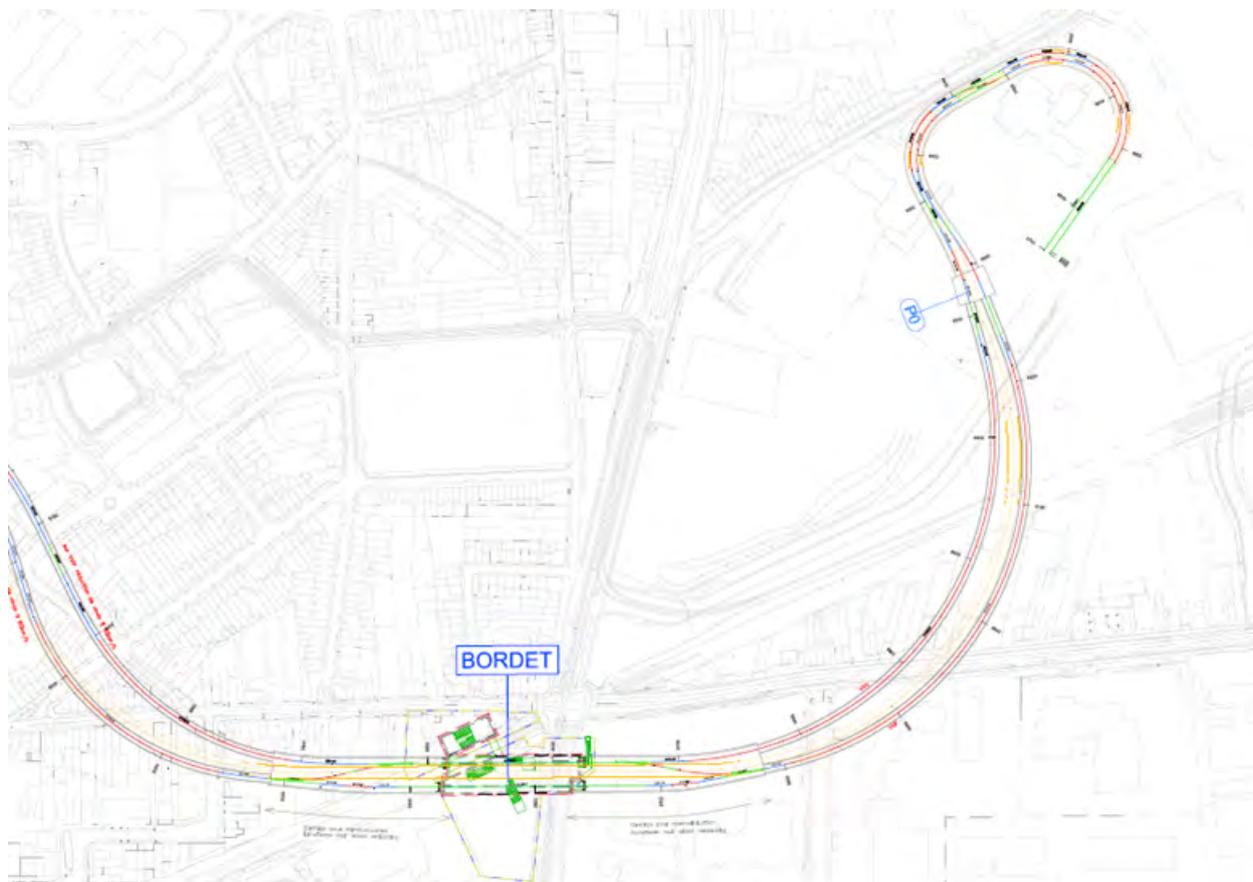


Figure 170: Tracé de l'alternative bi-tube entre Bordet et le dépôt (source : BMN, 2020)

En section courante, les axes de chaque tunnel sont espacés d'environ 18,25 m, ce qui correspond à un écartement équivalent à 1,5 fois leur diamètre (7,20 m pour le diamètre extérieur et 6,40 m pour le diamètre intérieur). Le tracé est calculé pour une vitesse d'exploitation de 72 km/h.

La configuration des quais de toutes les stations a été adaptée aux exigences du bitube, avec la mise en place de quais centraux à la place de quais latéraux dans le permis initial monotube.

La description de chaque tronçon est reprise de manière plus détaillée ci-dessous.

2.1.1. Tronçon Gare du Nord – Liedts

Dans l'alternative bi-tube, le tracé entre la gare du Nord et le puits P5 reste inchangé.

Entre le puits P5 et la station Liedts, les deux voies s'éloignent progressivement jusqu'à ce que l'écartement entre les deux tunnels soient suffisants (1,5 fois le diamètre des tunnels).

L'entraxe réduite à la sortie du puits P5 permet d'implanter un ouvrage de communication des voies (ouvrage de bifurcation). Cet ouvrage de bifurcation devra être construit avant l'arrivée du tunnelier. Il s'agit de l'ouvrage le plus contraignant à construire de cette alternative car il nécessite de travailler avec de nombreuses techniques sous le bâti existant au lieu de passer en tunnelier.

La configuration des quais de toutes les stations a été adaptée aux exigences du bi-tube, avec la mise en place de quais centraux.

Le tracé de la VVF présente une courbe en S (due aux contraintes d'implantation) induisant une restriction de la vitesse maximale à 45km/h.

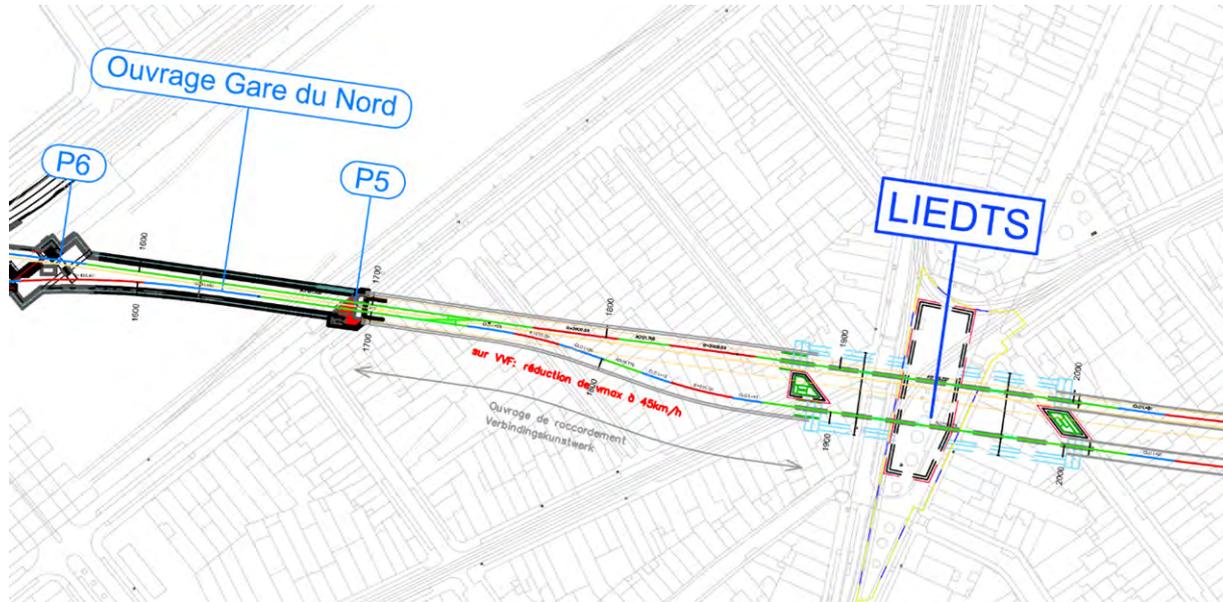


Figure 171: Alternative Bi-tube : Tronçon Puits P5 - Station Liedts (BMN, 2020) Tronçon Liedts - Colignon

Le tracé de ce tronçon suit l'allure de celui de la solution monotube. Les voies sont parallèles et légèrement désaxées plus au sud pour permettre l'écartement entre les 2 tubes. L'emprise globale du bitube est donc logiquement plus importante que celle du monotube de l'ordre du quinzaine de mètres.



Figure 172: Alternative Bi-tube : Tronçon Station Liedts – Station Colignon (BMN, 2020)

2.1.2. Tronçon Colignon – Verboekhoven

Comme pour la solution monotube, le désaxement des 2 stations impose au tracé une courbe en S. Étant donné la présence d'un ouvrage de bifurcation en avant-gare de la station Verboekhoven, le tracé bitube est différent de celui du monotube.



Figure 173: Alternative Bi-tube : Tronçon Station Colignon – Station Verboekhoven (BMN, 2020)

2.1.3. Tronçon Verboekhoven - Riga

Le tracé de ce tronçon suit l'allure de celui de la solution monotube avec des voies parallèles. L'emprise est logiquement plus importante pour le bitube



Figure 174: Alternative Bi-tube : Tronçon Station Verboekhoven – Station Riga (BMN, 2020)

2.1.4. Tronçon Riga - Tilleul

Le tracé de ce tronçon suit l'allure de celui de la solution monotube. Cependant, étant donné la présence d'un ouvrage de bifurcation en avant-gare de la station Tilleul, le tracé du bitube



Figure 175: Alternative Bi-tube : Tronçon Station Riga – Station Tilleul (BMN, 2020)

2.1.5. Tronçon Tilleul - Paix

Par rapport à la solution monotube, la légère rotation de l'axe de la station Paix impacte l'allure du tracé de ce tronçon. En effet, une rotation de quelques degrés de la station PAIX est imposée par la configuration du bitube sur le tronçon suivant (Paix-Bordet). Une courbe en S a été insérée dans chacune des voies. Elle n'impose cependant aucune restriction de vitesse.



Figure 176: Alternative Bi-tube : Tronçon Station Tilleul – Station Paix (BMN, 2020)

2.1.6. Tronçon Paix - Bordet

Comme pour le tronçon précédent, la légère rotation de la station Paix induit des rayons de courbure plus faibles et des vitesses maximum limitées à 60 km/h sur la VVF et 65 km/h sur la VVV. Il s'agit de la modification la plus importante par rapport au tracé monotube. En effet, les paramètres de courbure (R_{max}) et de distance entre les 2 tunnels du bitube imposent un tracé différent dans cette portion sinueuse entre Paix et Bordet qui dispose d'un ouvrage de bifurcation lui aussi rectiligne. Les paramètres techniques du tunnelier sont donc tirés ici à leur maximum.

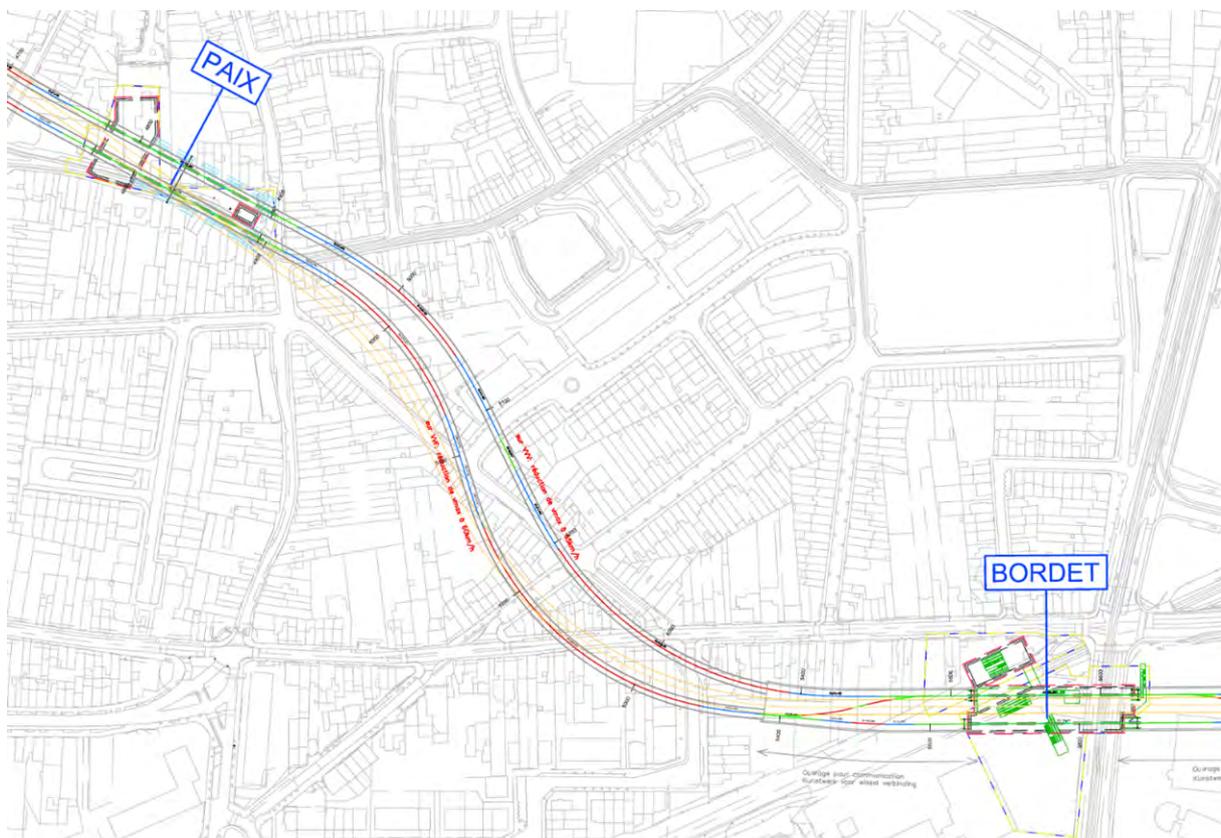


Figure 177: Alternative Bi-tube : Tronçon Station Paix – Station Bordet (BMN, 2020)

2.1.7. Tronçon Bordet – Puits P0

La présence d'un ouvrage de bifurcation en arrière-gare de la station Bordet impose une légère modification du tracé. De ce fait, les 2 voies ne sont pas parfaitement parallèles.

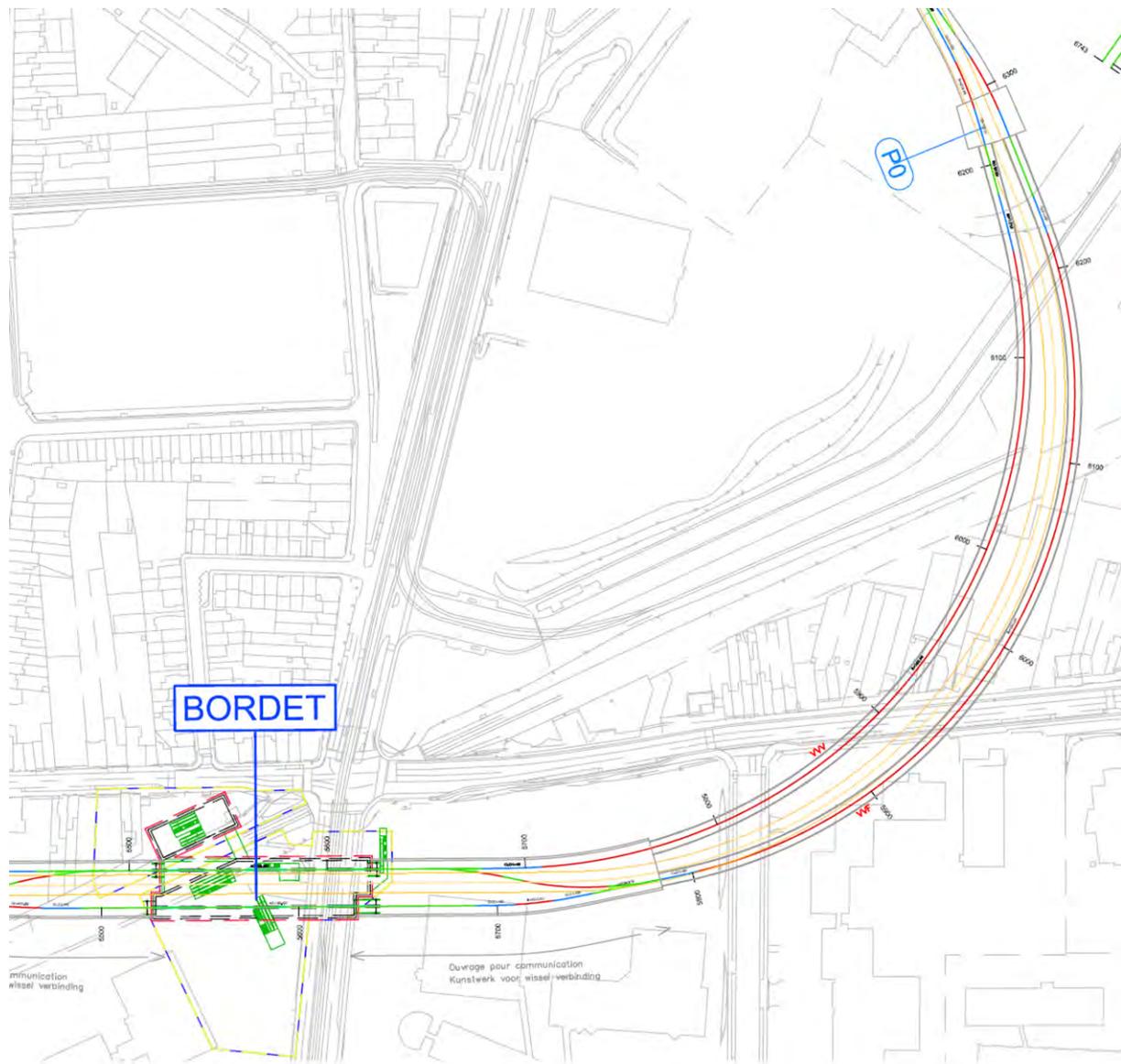


Figure 178: Alternative Bi-tube : Tronçon Station Bordet – Puits P0 (BMM, 2020)

La configuration du puits P0 et de la rampe a également été adaptée. Le puits P0 ainsi qu'une partie de la rampe ont été élargis pour maintenir l'entraxe minimale entre les deux tunnels et permettre le départ des deux tunneliers depuis le puits P0.

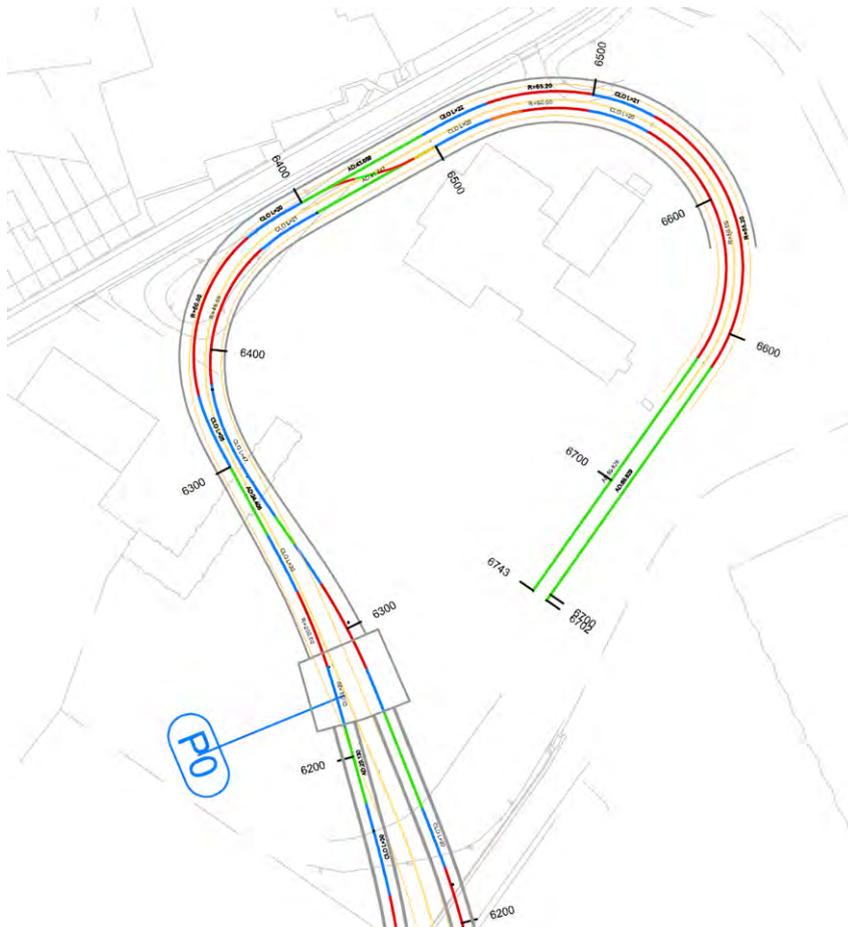


Figure 179 : Alternative Bi-tube : Puits P0 et rampe (BMN, 2020)

2.2. Les tunnels

2.2.1. Profil en long

Le linaire de chaque tunnel reste similaire à la solution monotube. La figure ci-dessous illustre le profil en long des tunnels pour l'alternative bi-tube. Les couches géologiques traversées sont les mêmes que pour le monotube.

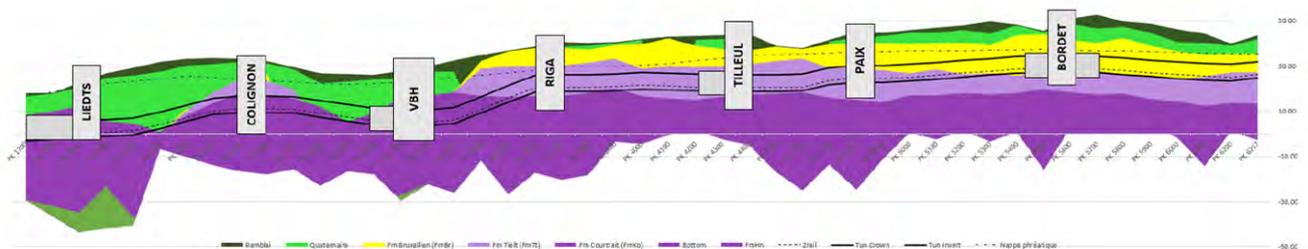


Figure 180 : Profil en long du tunnel pour l'alternative bi-tube, superposé au profil géologique (BMN, 2020)

Le profil en long de l'alternative bi-tube se base sur les mêmes hypothèses que la solution monotube. La valeur minimale de la hauteur de couverture au-dessus du tunnel est de 1.5 fois le diamètre du tunnel (11.25 m) avec des exceptions ponctuelles de 1.2 fois le diamètre du tunnel (puits P0 et sous la fermette).

L'optimisation de la profondeur pour le tracé bi-tube est synthétisé ci-dessous :

- Tronçon Puits P5 – Liedts : **identique** à la solution monotube (l'ouvrage de connexion vers la gare du nord ne permet pas de modifier le niveau du puits P5). Puisque le profil en long doit avoir une pente constante sur une distance suffisante, la profondeur du tunnel au niveau de la station Liedts est également similaire à la solution monotube.
- Tronçon Liedts – Colignon : en direction de Colignon, le profil en long peut être remonté progressivement d'environ **5 m**. La remontée est cependant limitée par la présence de la Maison Communale de Schaerbeek. (épaisseur minimum à conserver entre la Maison Communal et le toit du tunnel afin de limiter l'impact sur la Maison Communale).
- Tronçon Colignon – Verboekhoven : en direction de Verboekhoven, le profil en long peut être remonté progressivement d'environ **3.8 m**. La remontée est cependant limitée par le franchissement de la ligne SNCB 161 (hauteur de couverture minimum nécessaire).
- Tronçon Verboekhoven – Riga - Tilleul : en direction de Tilleul, le profil en long peut être remonté progressivement d'environ **4.7 m** (variable le long du tracé). La remontée est cependant limitée par la pente entre Verboekhoven et Riga, ainsi que de la hauteur de couverture minimale au nord de la station Tilleul, sous la fermette classée.
- Tronçon Tilleul – Paix – Bordet : la remontée **de 4.2m** est limitée par les contraintes liées à la technique de congélation au droit de la station Paix (nécessaire de garder un hauteur de couverture minimum au-dessus des micro-tunnels), ainsi que la hauteur de couverture minimale sous la ligne SCNB L26 au droit de la station Bordet.
- Tronçon Bordet – P0 : la remontée est limitée par le deuxième franchissement de la ligne SNCB L26, ainsi que la hauteur de couverture minimale au droit du P0.
- Bordet : **pas de gain** car le projet de base est déjà avec une hauteur de couverture minimale sous la ligne SCNB L26 au droit de la station Bordet.

Les principales caractéristiques géométriques des différents tronçons des tunnels sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Tronçons	Longueur (m)	Profondeur max (m)	Profondeur min (m)	Pente max (%)
P0 -Bordet	617	24,6	8,2	0,80
Bordet -Paix	627	18,2	14,5	0,83
Paix -Tilleul	327	16,8	10,5	3,00
Tilleul - Riga	600	18,6	14,6	0,50
Riga - VBH	433	24,1	15,0	4,86
VBH - Colignon	464	16,4	12,8	1,76
Colignon - Liedts	509	25,5	18,3	3,17
Liedts - P5	194	14,4	12,1	3,00

Tableau 56: Caractéristiques des tronçons des tunnels pour l'alternative bitube (BMN, 2020)

2.2.2. Coupe type du tunnel

La coupe type du tunnel pour l'alternative Bi-tube se base sur les même hypothèses que celles de la solution monotube à l'exception des points suivants :

- Une voie par tunnel.
- Rayon de courbure minimum de 200 m (au lieu de 250 m pour la solution monotube).

Selon ces hypothèses, le diamètre du tunnel est contraint principalement par :

- La présence des fourreaux pour la fibre optique, du collecteur, et de la plateforme pour la partie base.
- La présence des boosters et de la signalisation pour la partie haute.

Finalement, si latéralement la coupe pourrait être réduite, c'est bien la dimension verticale qui fixe le diamètre interne du tunnel à 6.2 m.

La figure ci-dessous illustre la coupe type des deux tunnels.. Les tunnels sont composés d'une paroi faite de voussoirs en béton de 35 cm d'épaisseur. Ils présentent un diamètre extérieur de 7,20 mètres, et un diamètre intérieur de 6,20 mètres, permettant d'accueillir tous les équipements nécessaires au bon fonctionnement de la ligne et d'assurer la sécurité dans chacun des deux tunnels.

Partie 2 : Description de l'alternative de conception (bitube)
 2. Présentation de l'alternative bitube

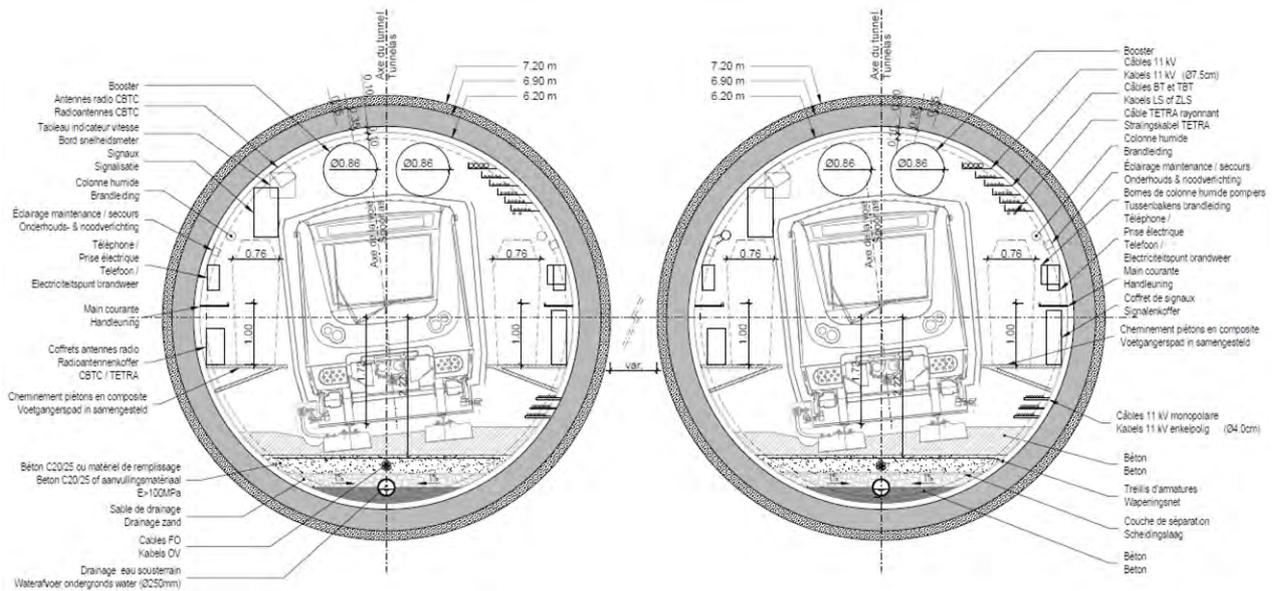


Figure 181 : Coupe transversale du Bi-tube (BMN, mai 2020)

La figure est également reprise dans l'atlas cartographique. La distance entre les tubes n'est pas représentative de la réalité.

La coupe du profil en long du tunnel sera reprise dans l'atlas cartographique.

Le dimensionnement des voussoirs n'a pas été réalisé à ce stade et se base donc uniquement sur un retour d'expérience du bureau BMN (ref : BMN-INC-GEN-RP-001) :

« L'épaisseur du revêtement est essentiellement fonction de la destination du revêtement (définitif ou provisoire), de la profondeur, des caractéristiques des terrains, de la pression d'eau, des efforts de poussée de tunnelier, de la qualité de l'étanchéité souhaitée et de la classe de résistance du béton utilisée.

L'évaluation de l'épaisseur des voussoirs peut être établie sur la base des fiches de l'AFTES des ouvrages réalisés au tunnelier au cours des 20 dernières années. Le graphique ci-dessous synthétise ce retour d'expérience. »

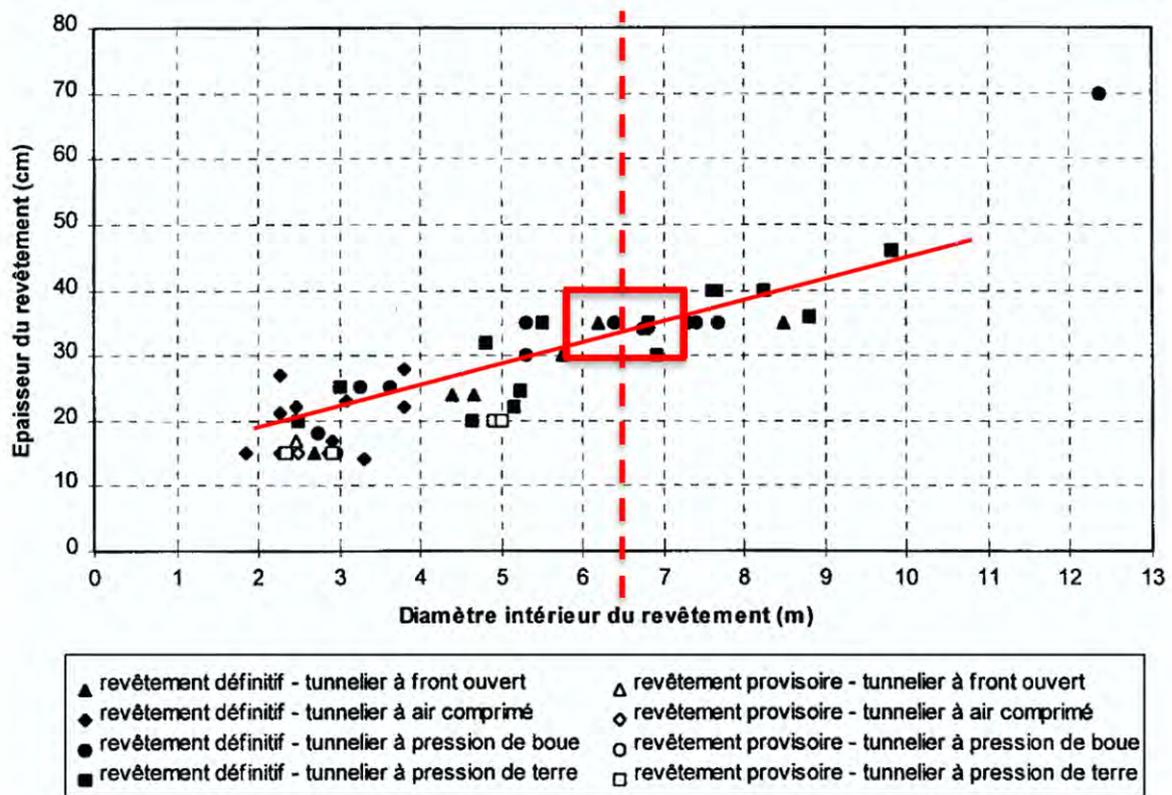


Figure 182: Epaisseur du revêtement en fonction du diamètre intérieur du tunnel (AFTES, GT18)

2.3. Chiffres clefs du Bi-tube

Longueur totale du tunnel	4544 m
Diamètre fonctionnel utile	6,20 m
Diamètre intérieur	6,20 m
Diamètre extérieur	7,20 m
Diamètre du tunnelier	7,40 m
Vitesse moyenne de creusement	250 m par mois
Vitesse d'avancement	+/- 10m/jour
Profondeur moyenne de creusement (niveau bas du forage)	20m
Profondeur maximum de creusement	25m
Volume excavé (matériaux en place)	303.304m ³
Volume déblai à évacuer (foisonnement 1.3)	394.342m ³
Volume extrait par mètre linéaire	40 m ³ x2
Durée du creusement	26 mois + 3 mois de décalage entre les 2 tunneliers

Tableau 57 : chiffres clefs du tunnel (BMN, 2020)

2.4. Les ouvrages connexes

2.4.1. Modification du puits P0 et de la rampe d'accès

Afin de permettre le creusement des deux tunnels, le puits P0 doit être élargi (voir figure ci-dessous). La rampe d'accès reste identique à la version monotube, mis à part à la jonction avec le puits P0, où la rampe d'accès est élargie pour permettre le démarrage des 2 tunneliers.

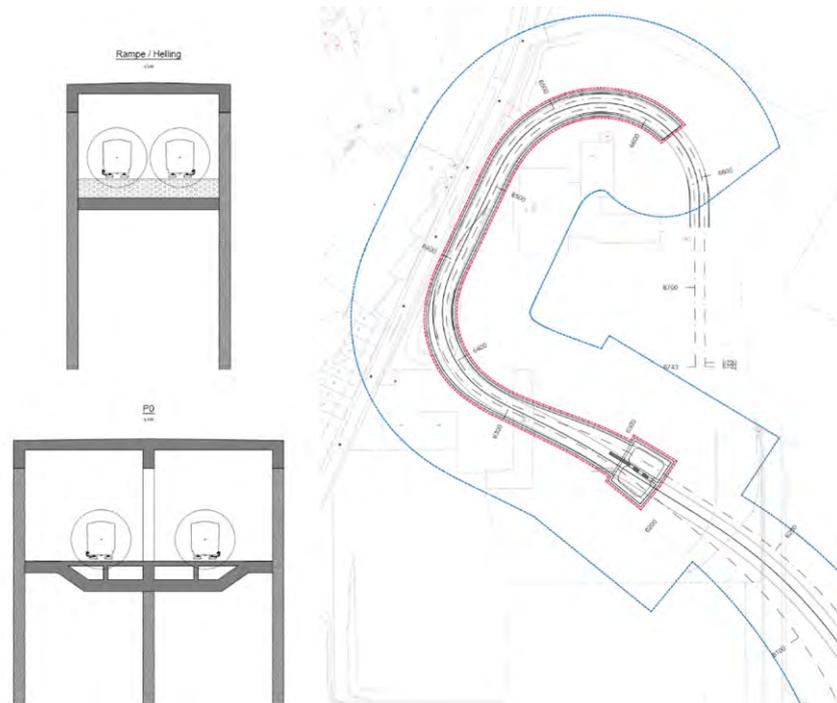


Figure 183 : Schéma de la rampe d'accès et du puits P0 pour l'alternative Bi-tube (BMN, 2020)

Sur la figure ci-dessus, les lignes tiretées correspondent au centre des 2 tunnels (de l'alternative Bi-tube) et la ligne continue représente le tracé du tunnel en monotube.

Le puits P0 a une longueur de 22,4 m et une largeur de 30,5m. L'enceinte est réalisée en parois moulées et sa profondeur est de l'ordre de 18,30 m au niveau du radier.

L'armature de la paroi de départ doit être adaptée au passage des tunneliers (ajout de fibre de verre).

Le radier a pour fonction la reprise de la pression hydrostatique à long terme et le butonnage des parois.

La toiture est munie de deux trémies centrales de 16 m (longueur) par 9,3 m (largeur), suffisante pour permettre la descente et la manutention des éléments prévus pour le montage et le démarrage des tunneliers. Après le démarrage de deux tunneliers, celle-ci est bétonnée.

Deux cadres de poutres liernes sont mis en œuvre pour la stabilité des parois moulées. Ces poutres sont exécutées en phase temporaire, pendant les premières excavations et rigidifient l'ensemble de la structure pour permettre la création du radier.

Il est important de rappeler que la structure du puits P0 est complètement indépendante de la structure du dépôt.

2.4.2. Connexion au puits P5

Le puits P5, tel que prévu actuellement, ne permet pas de démonter les 2 tunnels de l'alternative Bi-tube. Plusieurs variantes ont été étudiées par le bureau BMN :

- Variante 1 : Réalisation d'un ouvrage de raccordement entre le puits P5 et Liedts, réalisé en congélation (voir figure ci-dessous). Cette variante implique d'arrêter les tunneliers et de les démonter dans la station Liedts

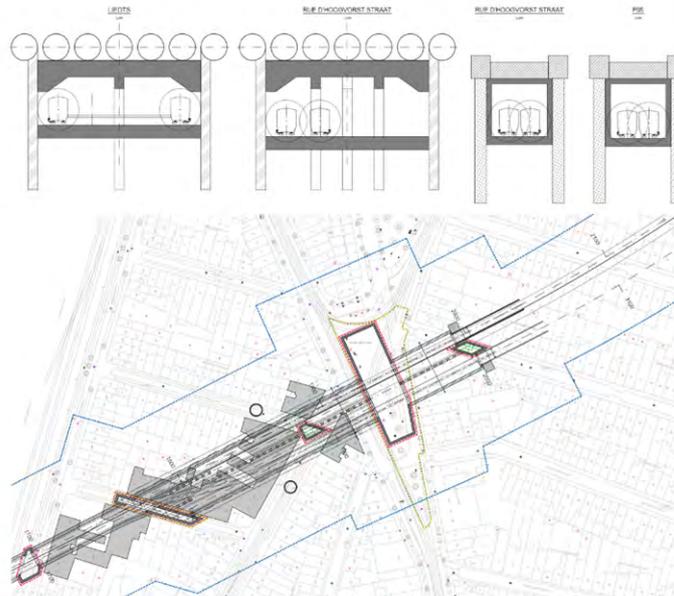


Figure 184 : Variante 1 : Ouvrage de raccordement réalisé en congélation (BMN, 2020)

- Variante 2 : Prolongements des deux tunneliers jusqu'au puits P5 et réalisation de l'ouvrage de jonction depuis les tunnels (identique aux principes d'exécution des ouvrages de bifurcation)

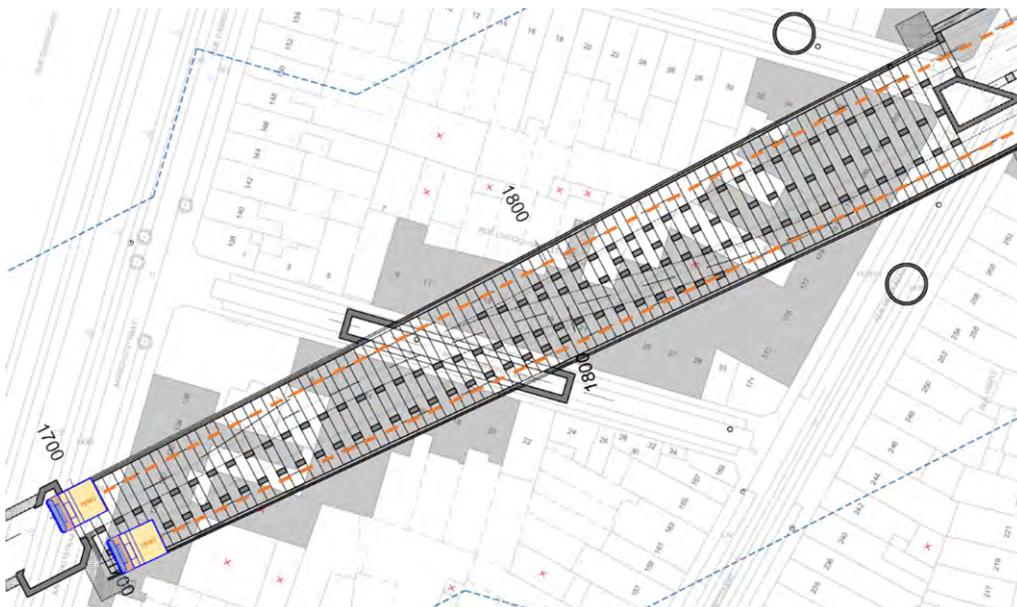


Figure 185 : Variante 2 : Prolongation des tunneliers jusqu'au puits P5 (BMN, 2020)

Au vu des risques de tassements importants et de la complexité technique de la variante 1, c'est la variante 2 qui a été retenue.

Cette 2ème variante a été déclinée en plusieurs sous variante, en fonction de la localisation de la fin des tunnels, au droit du puits P5 :

- Variante 2.1 : TBM 1 arrêté dans un bouchon injecté et démonté depuis le tunnel, TBM 2 démonté dans le puits P5 (voir figure ci-dessous). Cette variante nécessite de réaliser un bouchon de jet grouting de 12 m par 12 m depuis la surface, sous les bâtiments 122 et 128 de la rue d'Aarschot.



Figure 186: Variante 2.1 (BMN, 2020)

- Variante 2.2 : Réalisation d'un deuxième puits au sud du puits P5 : Le TBM 1 est démonté dans le nouveau puits et le TBM 2 dans le puits P5. Cette solution permet de ne pas injecter sous les bâtiments existants mais complexifie la réalisation de l'ouvrage de jonction (voir figure ci-dessous).



Figure 187: Variante 2.2 (BMN, 2020)

- Variante 2.3 : Réalisation d'un deuxième puits au nord du puits P5 : Le TBM 2 est démonté dans le nouveau puits et le TBM 1 dans le puits P5. Cette solution permet de ne pas injecter sous les bâtiments existants avec un ouvrage de jonction plus étroit que celui de la variante 2.2.

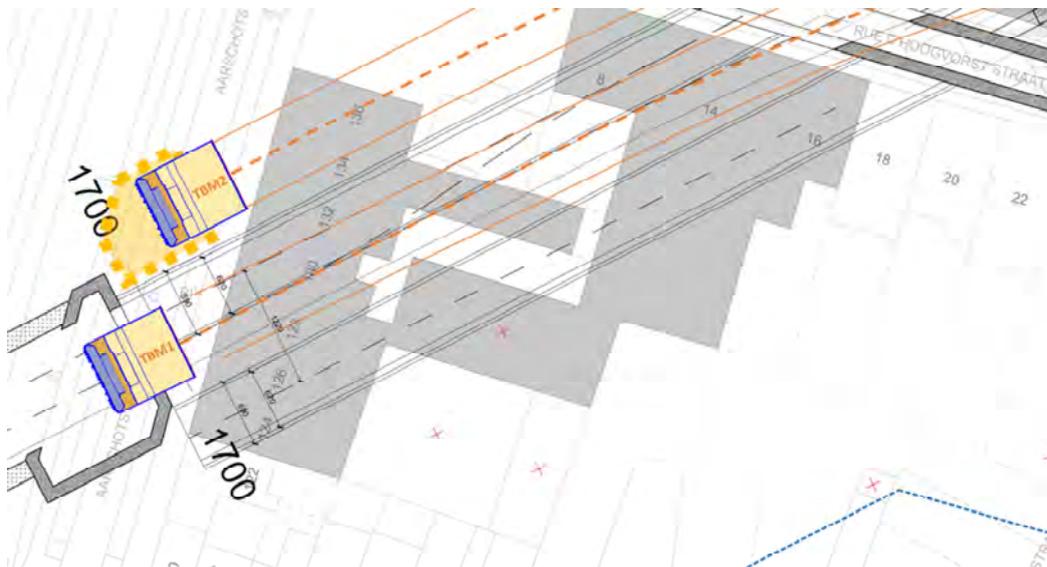


Figure 188: Variante 2.3 (BMN, 2020)

La variante 2.1 a été retenue pour la suite de l'étude. Cette variante permet de ne pas devoir réaliser un nouveau puits dans la rue d'Aerschot et également d'avoir un ouvrage de jonction le plus réduit possible.

2.5. Ouvrages d'interconnexion des voies (ouvrages de bifurcation)

2.5.1. Principe de fonctionnement

La fréquence de passage en station sera d'au minimum un train toutes les 3 minutes durant les heures de pointe. Le système est dimensionné pour garantir une exploitation normale avec le passage d'un train toutes les 90 secondes.

Un bon service aux voyageurs se définit par un temps écoulé entre le passage de deux trains consécutif court et régulier ainsi que par la vitesse de déplacement et la prévisibilité du service. Afin de pouvoir garantir une telle régularité le tronçon entre la gare du nord et Bordet la demande ide PU en monotube prévoit 5 liaisons permettant de passer d'une voie à l'autre. L'avantage du monotube est de pouvoir placer ces liaisons sans impact sur la construction/conception même du tunnel puisque cela se passe dans le même 'tube'. Pour l'alternative Bitube le concept doit donc être adapté ce qui provoque une conséquence très importante au niveau constructif, risques techniques et financiers. Le but de cette note est d'expliquer le principe de fonctionnement de ces ouvrages pour en exprimer sa nécessité du point de vue de l'opérateur STIB. La nécessité de ce type d'ouvrage est différente pour ce qui est du bout de ligne (terminus) par rapport au milieu de ligne (en ligne).

2.5.1.1. En terminus

Le train qui arrive en terminus à Bordet doit pouvoir changer de voie pour repartir dans l'autre sens. Cela peut être accompli soit par boucle soit par une bifurcation. L'avantage de la boucle est principalement lié au train conduit avec un chauffeur car cela évite à ce dernier de devoir changer de poste de conduite et on évite aussi l'erreur humaine qui est plus probable avec une liaison.

À contrario, la boucle nécessite énormément d'espace par rapport à une liaison. Dans le cas d'un métro automatique la boucle ne se justifie plus. D'autant que la boucle entrerait en conflit avec le tunnel en provenance du dépôt.

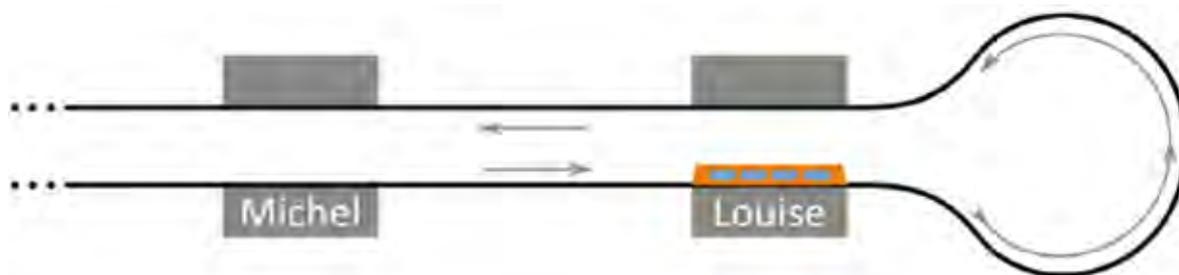


Figure 189: exemple d'un terminus en boucle (source STIB « besoins en matière de liaison en ligne M3 »; 2020)

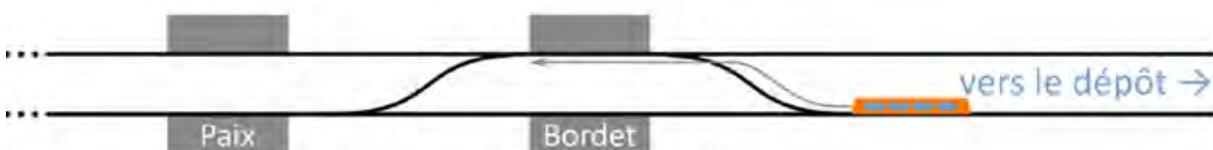


Figure 190: exemple d'un terminus en liaison (source STIB « besoins en matière de liaison en ligne M3 »; 2020)

2.5.1.2. En ligne

Il est probable que pour des raisons techniques, pour des raisons humaines, pour un entretien, ou pour une intervention, un morceau de ligne soit mis temporairement hors service voyageur. Afin de ne pas interrompre totalement le service de l'ensemble de la ligne il est important de bénéficier des voies de liaisons permettant aux trains de contourner la zone hors service. Les voyageurs sont eux dirigés vers la surface pour rejoindre un autre moyen de transport mis à leur disposition et permettant de passer de l'autre côté de la zone hors service. Plus le trajet de contournement des voyageurs est important plus la situation va être jugée comme problématique (situation dégradée). Il est donc important de bénéficier du plus possible d'ouvrage de liaison afin de pouvoir amener les voyageurs au plus proche de la section hors service ce qui permet de faire le 'saut' le plus court possible entre deux stations.

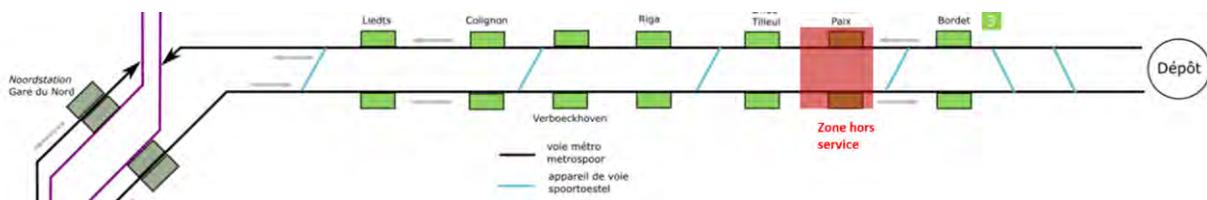


Figure 191: exemple d'une zone hors service sur la liaison N/B (source : STIB « besoins en matière de liaison en ligne M3 »; adapté par ARIES ; 2020)

D'une manière générale, l'opérateur STIB signale que de tels incidents sont courants. Ils représentent pour 50% des interruptions d'exploitation due à des tiers (blocage des porte, malaise passager, suicide,...) et pour les autres 50% cela est dû à des défauts techniques de l'infrastructure ou du matériel roulant ainsi qu'à la nécessité d'entretien de la ligne.

moyenne par an sur l'ensemble du réseau métro existant	moyenne par interruption	extrapolation sur le tronçon Bordet-Albert par an
196,8 interruptions	—	14,21 interruptions
116:44:00 heures x le nombre de trains bloqués par l'interruption	00:35:38 heures x le nombre de trains bloqués par l'interruption	08:26:34 heures x le nombre de trains bloqués par l'incident (hors prise en compte des temps d'intervention à pied d'œuvre)

Tableau 58 : exemples d'interruption du trafic au cours des cinq dernières années d'exploitation, en moyenne, chaque année (source : STIB « besoins en matière de liaison en ligne M3 »)

Le matériel roulant destiné à l'exploitation de la ligne Bordet-Nord étant du type M7 qui bénéficiera des derniers progrès en matière de fiabilité et d'automatisation.

Au vu de la fréquentation du métro qui ne cesse de croître, la part des incidents dont la cause est due à des interventions ou incidents impliquant des tiers ne cesse de croître. Le total des incidents sur la ligne Bordet-Nord devrait cependant évoluer à la baisse de façon très significative par rapport à la situation aujourd'hui rencontrée sur les lignes 1-5 et 2-6 grâce notamment à la mise en place des portiques d'accès au niveau des quais. Néanmoins, si les interruptions de service en mode d'exploitation automatique sont donc amenées à diminuer en fréquence, l'impact individuel d'une interruption de service sera significativement plus

important, puisqu'il nécessitera l'envoi d'un agent sur place pour constater l'incident et prendre les mesures adéquates en vue de restaurer le service (dans le métro actuel c'est souvent le chauffeur qui arrive à résoudre le problème).

En l'absence de liaisons de retournement régulièrement réparties sur la ligne, il en découle que pendant le temps d'intervention sur le train sur lequel se situe la cause du blocage (que ce soit un tiers ou une raison technique), non seulement le train qui a causé le blocage mais également les trains qui sont derrière lui seront également bloqués, éventuellement en tunnel. Ces trains bloqués sont alors exposés au risque d'évacuation sauvage, à savoir le fait de voir les voyageurs lassés d'attendre la reprise du trafic, quittent de façon spontanée le train immobilisé (en tunnel) et se déplacent de façon désordonnée à la recherche de la station adjacente la plus proche. Une telle évacuation sauvage est le principal risque opérationnel lié à l'exploitation en métro automatique. Il s'agit enfin d'un risque temporairement encore plus élevé lorsque la ligne est la première exploitée en mode de conduite automatique, les voyageurs n'étant pas encore tout à fait familiarisés avec le principe d'intervention à pied d'œuvre d'agents envoyés sur place lors d'un service bloqué.

Selon le demandeur, et l'opérateur, le plan d'installation des liaisons tel qu'il a été dessiné permet de limiter de façon raisonnable le nombre de trains qui pourraient être bloqués simultanément en cas d'incident avec tiers ou de défaut technique d'un train sur le tronçon Bordet-Nord. Ce plan limite ainsi indirectement le risque d'incident lié à une évacuation sauvage, d'une part par la limitation du nombre de trains et donc du nombre de voyageurs exposés et d'autre part en permettant de consacrer plus d'attention à chaque train bloqué afin d'éviter des enchaînements potentiellement catastrophiques lors d'un banal incident de type service bloqué.

Enfin, si les motifs de sécurité d'exploitation ont conduit à proposer le plan de voies tel qu'il a été spécifié, les liaisons de retournement permettent également de limiter drastiquement le nombre de trains qui lors d'un incident sont impactés en termes de régularité du trafic, limitant ainsi la période post-incident pendant laquelle la régularité de l'intervalle entre trains est mise à mal.

2.5.2. Les ouvrages d'interconnexions prévus sur la ligne N/B

2.5.2.1. Bordet

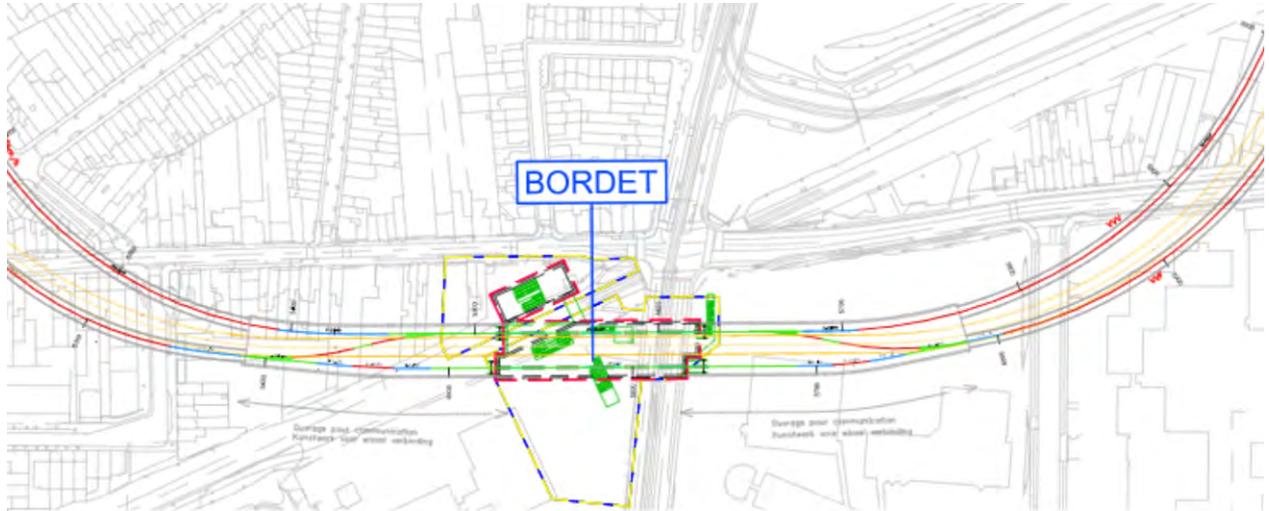


Figure 192: Localisation des ouvrages de bifurcation de la station Bordet pour l'alternative Bi-tube (BMN, 2020)

Pour l'ouvrage avant Bordet, 2 puits pour le compensation grouting sont prévus depuis la voirie afin de pouvoir compenser les tassements engendrés aux bâtiments des 2 îlots de maisons concernés :

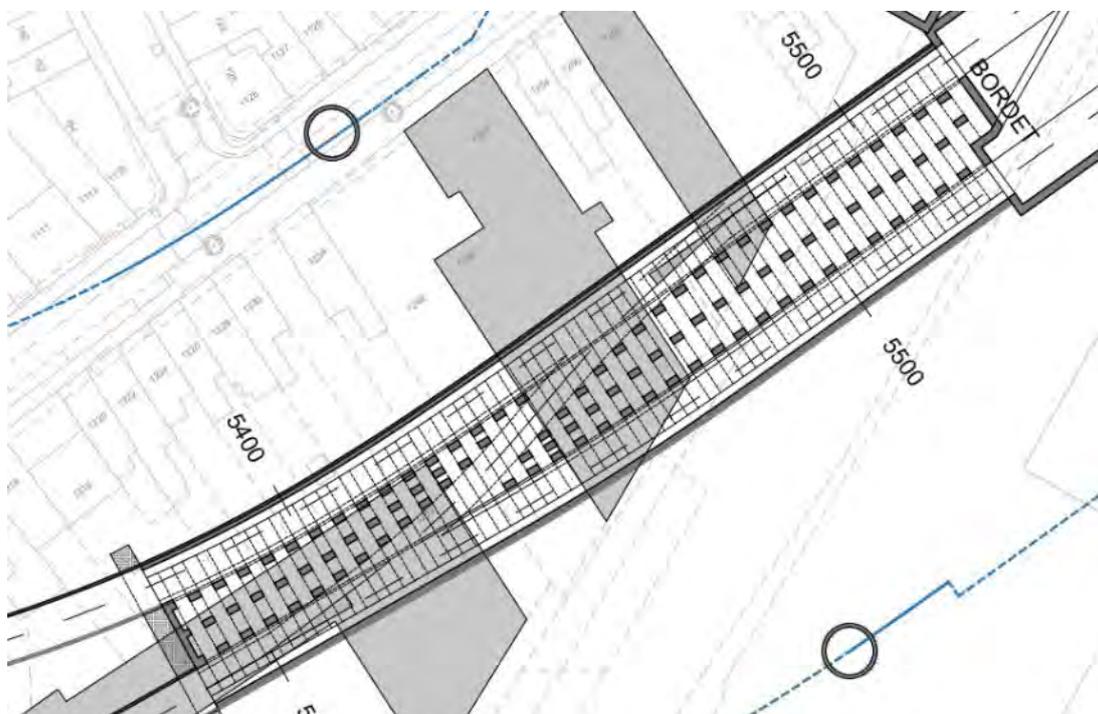


Figure 193: Implantation de l'ouvrage avant la station Bordet (BMN, 2020)

Pour l'ouvrage après la station Bordet, 2 puits pour le compensation grouting sont prévus sur la chaussée de Haecht et sur le parking du Decathlon pour compenser les tassements engendrés au bâtiment du Décathlon :

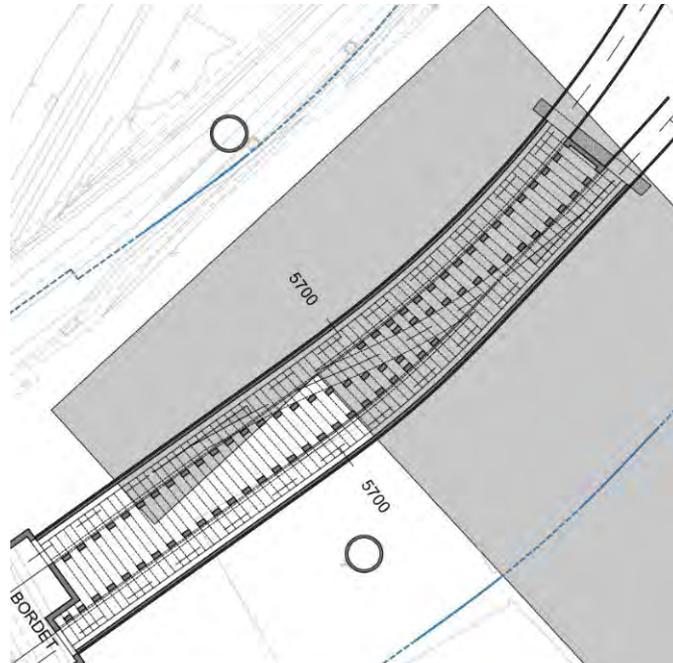


Figure 194: Implantation de l'ouvrage après la station Bordet (BMN, 2020)

2.5.2.2. Tilleul

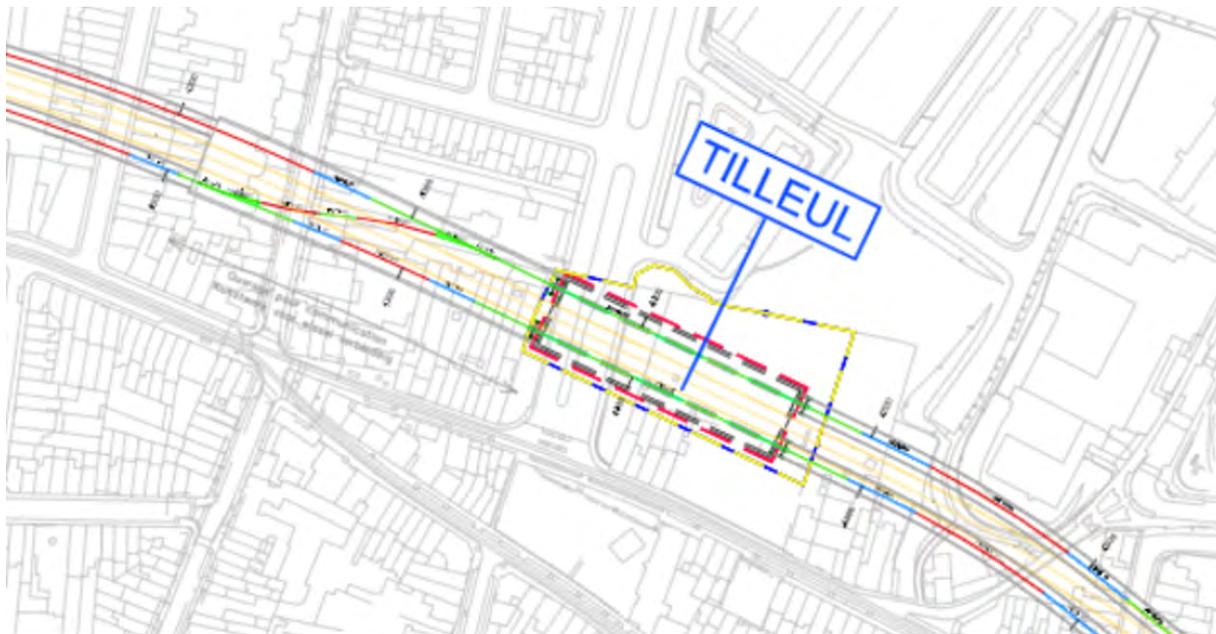


Figure 195: Localisation de l'ouvrage de bifurcation de la station Tilleul pour l'alternative Bi-tube (BMN, 2020)

2 puits pour le compensation grouting sont prévus depuis la voirie afin de pouvoir compenser les tassements engendrés aux bâtiments des 2 îlots de maisons concernés :

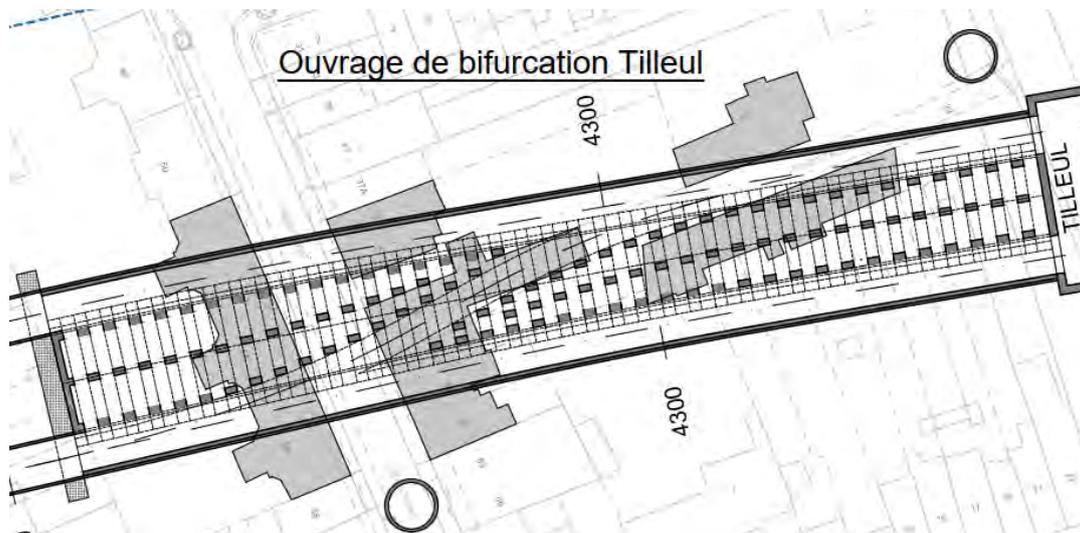


Figure 196: Implantation de l'ouvrage avant la station Tilleul (BMN, 2020)

2.5.2.3. Verboekhoven :

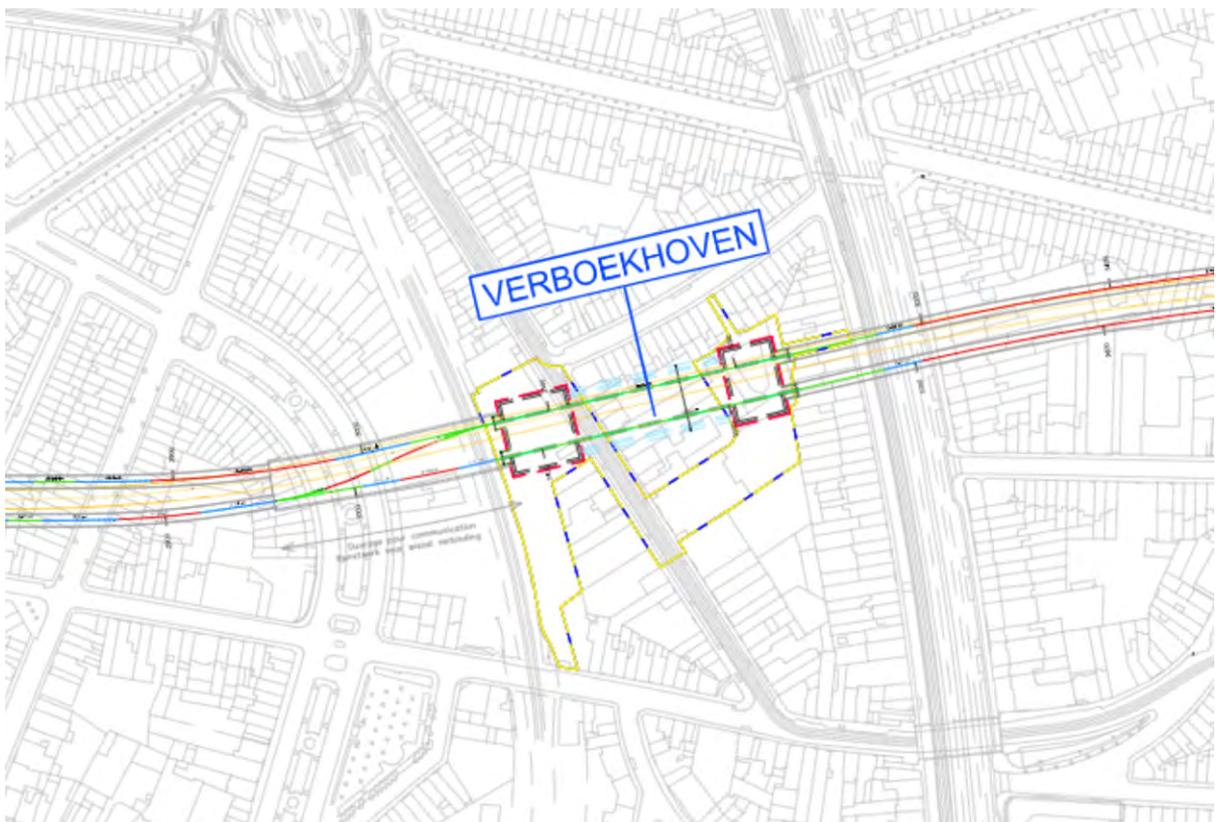


Figure 197 : Localisation de l'ouvrage de bifurcation de la station Verboekhoven pour l'alternative Bi-tube (BMN, 2020)

2 puits pour la réalisation de compensation grouting sont prévus dans l'avenue Voltaire pour permettre la gestion des tassements engendrés aux bâtiments :

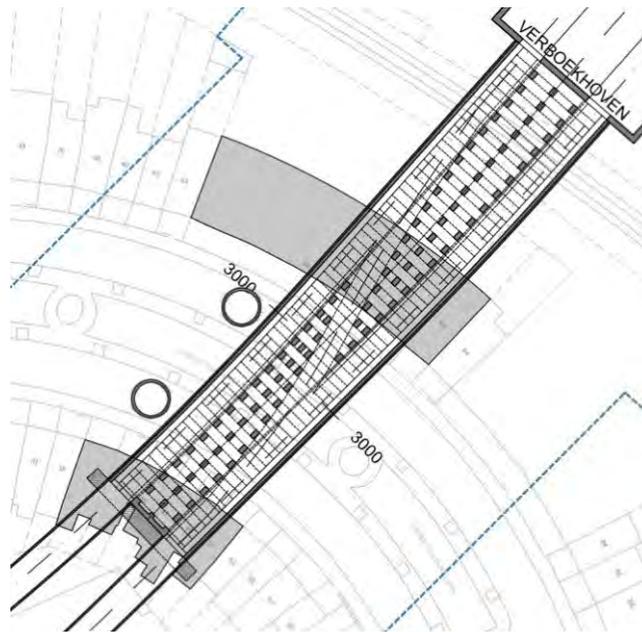


Figure 198: Implantation de l'ouvrage avant la station Verboekhoven (BMN, 2020)

Cross-passage

Un des avantages de l'alternative bi-tube est le compartimentage des voies qui permet d'augmenter la sécurité des usagers du métro. Des rameaux de connexion entre les deux tunnels ont été ajoutés afin de réduire la distance d'évacuation en cas d'incident.

En Belgique, il n'existe cependant aucune législation qui impose une distance maximale entre sorties de secours.

Le projet monotube ne comporte pas de puits de remontée vers la surface entre les stations. Le SIAMU a en effet estimé que la distance entre station est relativement faible permettant une évacuation sans faire appel à des puits intermédiaires. Cependant dans le cadre de l'alternative Bitube il a été décidé de simuler la présence de ses rameaux afin d'en apprécier l'intérêt dans cette alternative.

En attendant, l'auteur de projet a décidé de placer des cross passage tous les 250m. Le dimensionnement des rameaux a été effectué pour permettre l'évacuation des usagers en cas d'incidents, voir figure ci-dessous.

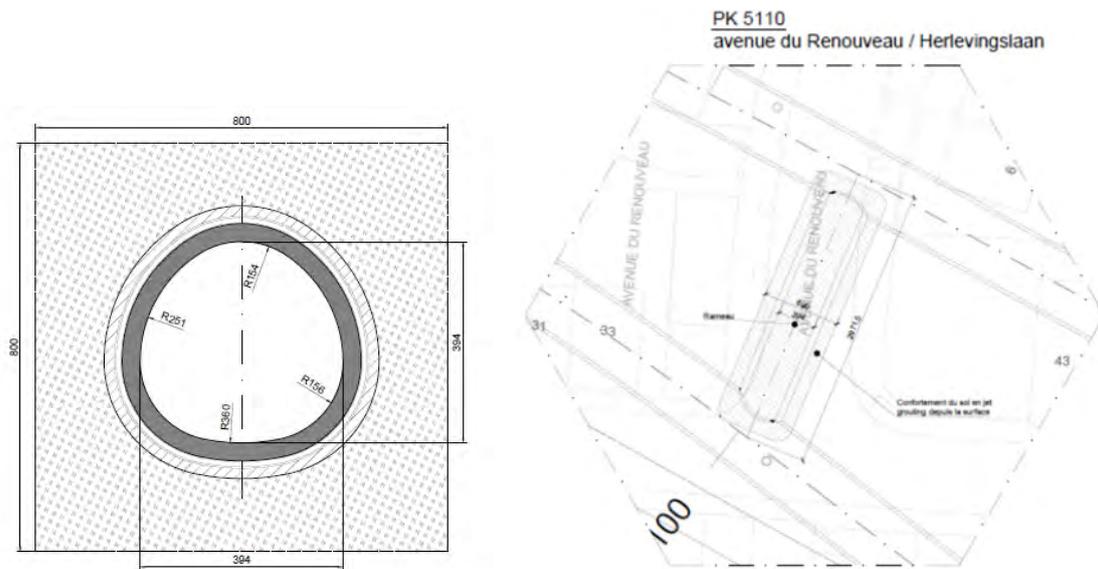


Figure 199: Coupe type d'un rameau de connexion entre deux tunnels (BMN, 2020)

Pour permettre la construction du rameau avec le moins d'impact possible sur les avoisinants, il a été décidé d'implanter les rameaux autant que possible sous des voiries.

Six rameaux sont prévus par les concepteurs de cette alternatives :

- Entre Liedts et Colignon (au droit de la rue Renkin)
- Entre Colignon et VBH (au droit de la rue Camille Simoens)
- Entre VBH et Riga (au droit du Dahlia)
- Entre Riga et Tilleul (au droit de la rue Gustave Huberti)
- Entre Tilleul et Paix (au droit de la rue Van Hoorde)
- Entre Paix et Bordet (au droit de l'avenue du Renouveau)

3. Description des contraintes liées au mode constructif et au mode d'exploitation de l'alternative

3.1. Contraintes liées au creusement de deux tunnels

Le creusement au tunnelier induit certaines contraintes qui impactent le tracé du tunnel.

De manière standard, il est recommandé d'avoir :

- Une hauteur de couverture de terre au-dessus du tunnel supérieure à la valeur du diamètre du tunnel.
- Une distance de séparation entre 2 tunnels supérieure à la valeur du rayon des tunnels.
- Un rayon de courbure supérieur à 15 fois la valeur du diamètre du tunnel.
- Une pente maximale de 10%.
- Une pente minimale de 0,5% pour garantir l'évacuation des eaux.

Ces recommandations peuvent varier en fonction de la nature du sol, de la situation en surface (présence de bâtiments sensibles ou classés) mais également des limitations du tunnelier choisi pour réaliser les travaux.

Dans le cas du présent projet, le tracé du tunnel se situe dans un milieu urbain dense. La zone d'influence géotechnique (qui représente le volume de terrain au sein duquel il y a interaction entre le tunnel et terrain) correspond à 30 m de part et d'autre de l'axe de chaque tunnel.

La profondeur minimum des tunnels (et ces stations) a été déterminée en se basant sur

- La prise en compte de la topographie et de la géologie des terrains traversés ;
- la minimisation des tassements en surface ;
- la réduction du nombre de points bas pour minimiser le nombre de points de relevage des eaux ;
- la limitation des pentes du tunnel.

L'optimisation de la profondeur du tracé des tunnels est synthétisée ci-dessous.

- Tronçon Puits P5 – Liedts : limité par la position de l'ouvrage de raccordement à la gare du Nord ;
- Tronçon Liedts – Colignon : limité par la présence de la Maison Communale (bâtiment sensible) ;
- Tronçon Colignon – Verboekhoven : limitée par le franchissement de la ligne SNCB 161 et la présence du Maelbeek (point bas topographique) ;
- Tronçon Verboekhoven – Riga - Tilleul : limité par la pente du tunnel ainsi que de la hauteur de couverture minimale au nord de la station Tilleul, sous la fermette classée.
- Tronçon Tilleul – Paix – Bordet : limité par la hauteur de couverture minimale sous la ligne SNCB L26 au droit de la station Bordet.
- Tronçon Bordet – P0 : limitée par le deuxième franchissement de la ligne SNCB L26, ainsi que la hauteur de couverture minimale au droit du P0.

4. Descriptions des solutions techniques de conception du tunnel bi-tube

4.1. Principe d'exécution des tunnels

Le principe d'exécution (creusement au tunnelier) ainsi que le choix de tunnelier reste identique à la solution Monotube.

Contrairement à la solution Monotube, deux tunneliers seront utilisés pour la réalisation des tunnels (un par tunnel). Le démarrage des deux tunneliers se font depuis le site de Haren, comme pour la solution Monotube.

Les deux tunneliers démarreront en l'un après l'autre, le deuxième tunnelier sera assemblé que lorsque les 100 premiers mètres du premier tunnel seront réalisés.

Au vu de l'augmentation de la largeur de l'ouvrage et des portées transversales, une ligne d'appuis complémentaire a été ajoutée au centre de l'ouvrage du P0.

4.2. Principe d'exécution des ouvrages de bifurcation

Les ouvrages de bifurcation sont réalisés depuis les tunnels forés et les stations adjacentes après le passage du tunnelier. Les boîtes étanches sont créées en congélation grâce à des tubes forés à partir des tunnels (en bleu sur la figure ci-dessous).

Un massif de compensation en jet grouting est mis en place depuis la surface avant le creusement des tunnels afin de ne pas perturber les ouvrages.

L'intérieur de l'ouvrage est creusé en technique traditionnelle avec la mise en place du radier, suivi du toit et des colonnes depuis les tunnel. Ensuite de l'excavation en stross entre les colonnes, depuis la station.

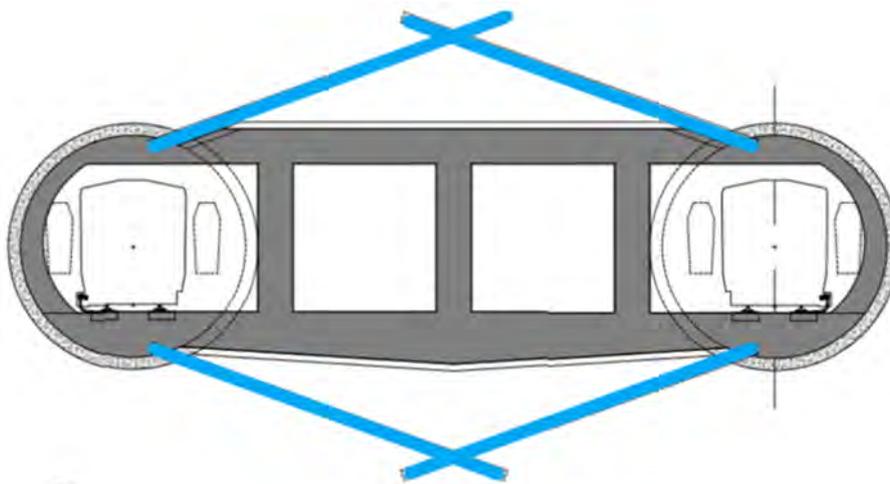


Figure 200 : Coupe transversale d'un ouvrage de bifurcation (BMN, 2020)

Contrairement aux stations, ce principe constructif peut être appliqué vu la possibilité de poser des appuis intermédiaires en bord de voie.

4.3. Principe d'exécution de l'ouvrage de jonction P5 - Liedts

Le principe d'exécution de l'ouvrage de jonction entre le puits P5 et la station Liedts est identique au principe d'exécution des ouvrages de bifurcations ci-dessus.

4.4. Principe d'exécution des rameaux de connexion

Le principe d'exécution des rameaux est le suivant :

- Excavation de la galerie en technique traditionnelle.
- Préalablement à l'excavation de la galerie, confortement du sol par jet grouting depuis la surface afin de garantir l'étanchéité et la stabilité du front lors de l'excavation (bloc de 8 m par 8 m sur toute la longueur du rameau).
- Mise en place d'un soutènement provisoire à l'avancement (20cm de béton projeté et de cintres PANTEX).
- Mise en place du soutènement définitif composé de 35 cm de béton armé coffré sur place.

5. Description du chantier

5.1. Quantitatif des matériaux

La synthèse des quantités de déblais et matériaux nécessaire à la réalisation des tunnels (hors stations et ouvrages de bifurcation) est reprise dans les tableaux ci-dessous :

Volume excavé (matériaux en place)	m³	303.340
Volume déblai à évacuer (foisonnement 1.3)	m³	394.342

Tableau 59 : Quantitatif matériaux des tunnels – Solution Bi-tube (BMN, 2020)

La synthèse des quantités de déblais nécessaire à la réalisation des ouvrages de bifurcation (hors stations et ouvrage de jonction entre le puits P5 et Liedts) est reprise dans les tableaux ci-dessous :

Volume excavé (matériaux en place)	m³	~49 750
Volume déblai à évacuer (foisonnement 1.3)	m³	~64 680

Tableau 60 : Quantitatif matériaux des ouvrages de bifurcation – Alternative Bi-tube (BMN, 2020)

La synthèse des quantités de déblais, remblais, déchets et matériaux nécessaire à la réalisation du puits P0 et de la rampe d'accès est reprise dans les tableaux ci-dessous :

Volume excavé (matériaux en place)	m³	~60 150
Volume déblai à évacuer (foisonnement 1.3)	m³	~78 200

Tableau 61 : Quantitatif matériaux du puits P0 et de la rampe d'accès - Solution Bi-tube (BMN, 2020)

La synthèse des quantités de déblais, remblais, déchets et matériaux nécessaire à la réalisation de l'ouvrage de jonction entre le puits P5 et Liedts est reprise dans les tableaux ci-dessous :

Volume excavé (matériaux en place)	m³	~12 420
Volume déblai à évacuer (foisonnement 1.3)	m³	~16 150

Tableau 62 : Quantitatif matériaux de l'ouvrage de jonction entre le puits P5 et la station Liedts - Solution Bi-tube (BMN, 2020)

5.2. Phase de réalisation

Les différentes phases de construction restent relativement similaires à ceux de la solution monotube :

- Phase préalable : installation du chantier et mise en place des confortements du sol en jet grouting au droit des futurs rameaux de connexion.
- Phase 1 : réalisation des parois moulées, excavation du puits et de la rampe d'accès, mise en place des radiers, des dalles intermédiaires et des dalles de toiture.
- Phase 2 : montage du premier tunnelier dans la rampe d'accès via le puits P0 et mise en place du remblai de préchargement.

- Phase 3 : Démarrage du premier tunnelier.
- Phase 2 bis : après 100 m de creusement du premier tunnelier, montage du 2ème tunnelier dans la rampe d'accès via le puits P0 et mise en place du remblai de préchargement.
- Phase 3 bis :
 - Démarrage du deuxième tunnelier.
 - Après 200 m de creusement, fermeture du toit du puits P0 et évacuation du remblai de préchargement.
- Phase 4 :
 - Creusement des deux tunnels en parallèle avec un décalage de 3 mois entre le lancement des deux tunneliers), du P0 vers le P5, en traversant chaque station.
 - Avant chaque entrée en station : mise en place des structures nécessaires au ripage du tunnelier dans la station.
 - Lors de l'entrée en station : réalisation de l'étanchéité entre les voussoirs et la paroi de la station.
 - Avant chaque sortie du tunnelier d'une station : mise en place de la cloche de sortie du tunnelier (permet d'assurer l'étanchéité de l'ouvrage pendant le démarrage du creusement de la paroi et la montée de la pression de confinement).
 - À la sortie du tunnelier : réalisation de l'étanchéité entre les voussoirs et la paroi de la station.
 - Mise en place d'une voute parapluie sous les maisons de la rue d'Aerschot au droit du puits P5.
- Phase 5 : Arrivée du premier tunnelier dans la station Liedts et démontage du tunnelier dans le puits P5 mis préalablement sous eau (identique à la solution monotube).
- Phase 5 bis : Arrivée du deuxième tunnelier à proximité du puits P5, dans un massif de jet grouting et démontage du tunnelier depuis l'intérieur du tunnel. Creusement des ouvrages de bifurcation

Après le démontage des deux tunneliers :

- Phase 1 : Mise en place d'un massif de compensation en jet grouting et du système de congélation :
 - Réalisation d'un massif de compensation en jet grouting réalisé depuis la surface.
 - Mise en place d'un renfort dans chaque tunnel.
 - Réalisation des tubes de congélation depuis les deux tunnels (en bleu dans la figure ci-dessous).
 - Congélation du sol au-dessus et en dessous de la futur boîte de bifurcation (créée une boîte étanche avant l'excavation de la boîte).
 - Rabattement de la nappe à l'intérieur de la boîte.

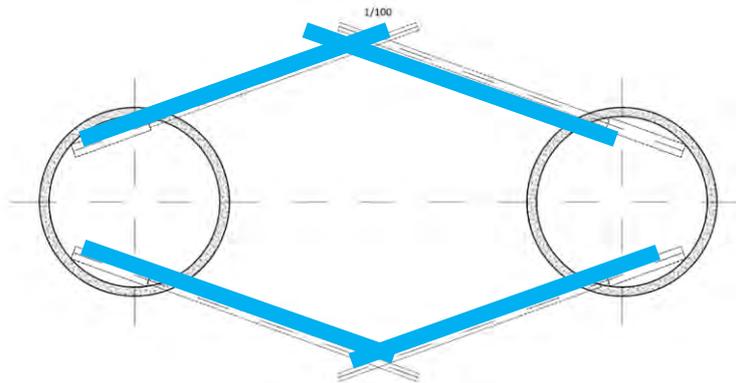
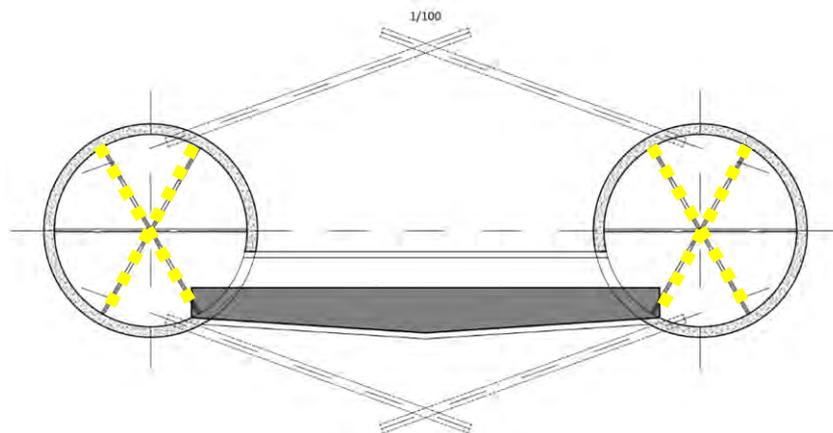


Figure 201: Réalisation des tubes de congélation (BMN, 2020)

- Phase 2 : Réalisation du radier de l'ouvrage :
 - Etançonnage des tunnels pour pouvoir réaliser le percement des voussoirs (en jaune dans la figure ci-dessous).
 - Excavation des galeries primaires d'une partie du radier et bétonnage de ces galeries.
 - Excavation des galeries secondaires du reste du radier et bétonnage de ces galeries.



- - Phase 3 : Réalisation de la toiture de l'ouvrage :
 - Excavation en galeries primaires d'une partie de la toiture de la boîte
 - Réalisation des colonnes de l'ouvrage en fouilles blindées depuis les galeries primaires. Les colonnes se posent sur le radier.
 - Bétonnage des galeries primaires.
 - Excavation des galeries secondaires du reste de la toiture et bétonnage de ces galeries.

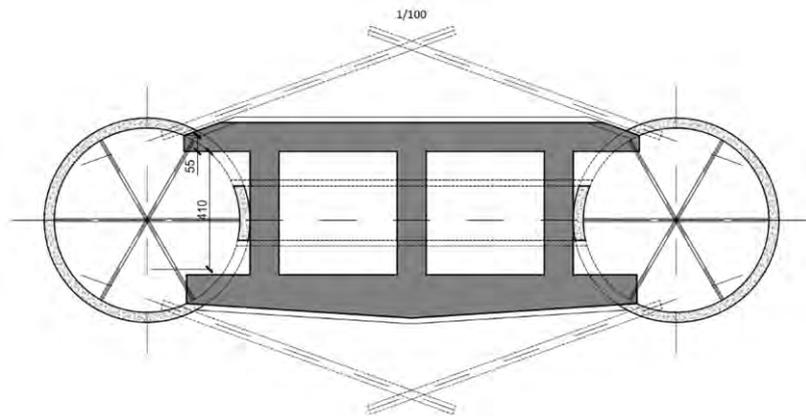


Figure 203: Réalisation du toit et des colonnes de l'ouvrage de bifurcation (BMN, 2020)

- Phase 4 : Finalisation de l'ouvrage de bifurcation :
 - Bétonnage des parois du tunnel pour consolider l'ouvrage.
 - Excavation en stross du sol entre les deux tunnels, entre le toit et le radier.
 - Réalisation du voile de fermeture par passes en en fouilles blindées depuis le haut du stross entre les deux tunnels.

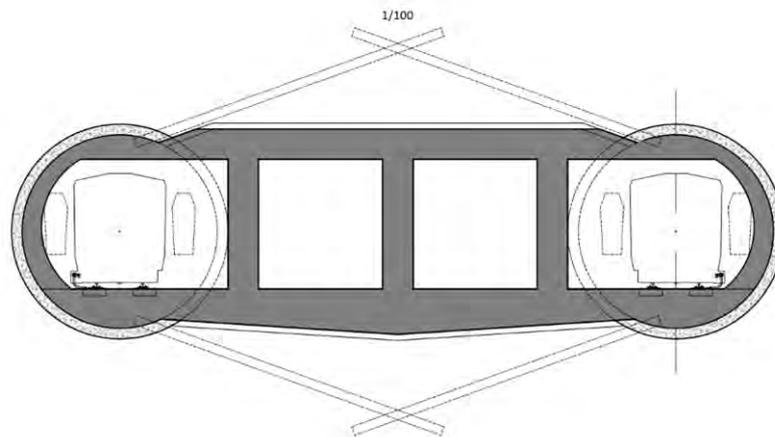


Figure 204: Finalisation de l'ouvrage de bifurcation (BMN, 2020)

5.2.1. Creusement des cross passage

- Phase 0 : Avant le creusement des deux tunnels, réalisation d'un confortement du sol par injection de jet grouting sur toute la longueur du rameau (permet également d'étanchéifier le sol).
- Phase 1 : Après le démontage des deux tunneliers, mise en place d'un renfort dans les tunnels au droit des ouvertures des rameaux et ouverture des voussoirs.
- Phase 2 : Excavation en traditionnel de la galerie avec mise en place d'un soutènement provisoire à l'avancement (20 cm de béton projeté sur les parois + cintres).
- Phase 3 : Mise en place du soutènement définitif (35 cm de béton armé).

5.3. Installations temporaires et implantation du chantier

5.3.1. Puits P0 et rampe

L'installation de chantier pour la construction du puits P0 et de la rampe reste similaire à celle de la solution monotube.

5.3.2. Tunnels

L'installation de chantier pour la creusement des tunnels reste similaire à celle de la solution monotube. Les zones de stockage devront cependant être adaptées et/ou agrandies pour pouvoir approvisionner le creusement de 2 tunneliers en parallèle.

5.3.3. Ouvrages de bifurcation et ouvrage de jonction entre le puits P5 et la station Liedts

Lors de la construction de ces ouvrages, l'emprise des installations de chantier des stations situés à proximité des ouvrages sera utilisée pour la mise en place des unités de réfrigération (pour la congélation des boîtes). Les équipements, les apports en matériaux ainsi que l'évacuation des déblais pourront être réalisés depuis les tunnels pour limiter les nuisances en surface.

5.4. Gestion des déchets

Les déchets du chantier sont principalement :

- Les déblais des tunnels (terre foisonnée) : ~384.350 m³.
- Les déblais du puits P0 et de la rampe d'accès : ~78.200 m³
- Des déchets du génie civil de la construction du P0 et de la rampe d'accès : 1.900 m³.

Le principe de transport des déblais et de valorisation est identique à celui de la solution monotube.

Les déblais des ouvrages de bifurcation et l'ouvrage de jonction entre le P5 et la station Liedts seront également évacués via les tunnels vers le dépôt de Haren.

5.5. Calendrier de réalisation

La planification générale de réalisation des travaux se base globalement sur la même logique que pour la solution monotube et est reprise à la figure ci-dessous.

Des hypothèses complémentaires sont prises dans le cadre de l'alternative bi-tube :

- Utilisation de deux tunneliers (TBM) en parallèle.



Figure 205: Cinématique de construction au tunnelier (BMN, 2020)

- Le TBM 2 commencera le forage 3 mois après le début du creusement du TBM 1 (correspond à environ 1 station de décalage).
- Le ripage des TBMs dans les stations est toujours estimés à environ 1 mois et demi par station.
- Le montage d'un TBM prend 3 mois.
- Cadence d'avancement du TBM est de 250 m/mois.
- Le démontage des TBMs aura lieu au niveau du puits P5 (TBM1 démonté depuis le tunnel, le TBM 2 est démonté dans le P5).
- Le démontage est estimé à environ 12 semaines par TBM.
- Le remplissage du radier sera réalisé après le démontage du TBM et la réalisation des ouvrages de bifurcation, avec une vitesse de réalisation de 400m/mois .

Pour les rameaux de connexion :

- Un confortement du sol par jet grouting doit être réalisé, au droit des futurs rameaux de connexion, avant le creusement des tunnels.
- Après le démontage des tunneliers, les tunnels doivent être stabilisés au droit des ouvertures des rameaux avec la mise en place d'un soutènement provisoire.
- Le creusement des rameaux de connexion se font depuis le tunnel 1 dès que le tunnelier est démonté.
- Le creusement des rameaux de connexion est estimé à environ 3 mois par rameau.

Pour les ouvrages de bifurcation :

- Les ouvrages de bifurcation sont réalisés après le démontage des tunneliers dans les tunnels.
- La durée des travaux est estimée à environ 2 ans par ouvrage. Ces travaux seront réalisés en parallèle.

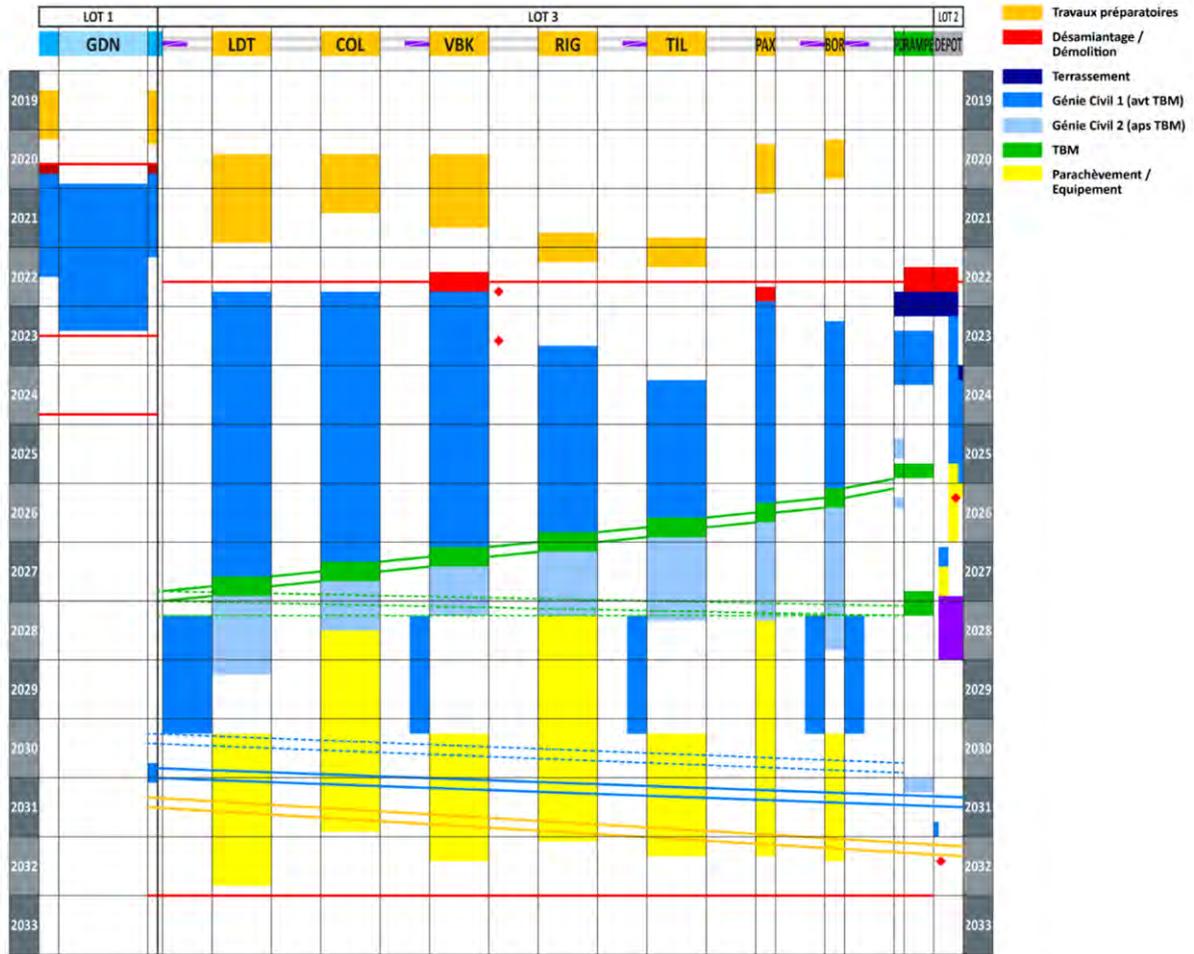


Figure 206: Calendrier global de réalisation pour l'alternative bi-tube (BMN, 2020)

Le démarrage du creusement du premier tunnelier commence plus tard que pour la solution monotube. En effet, la modification des stations pour l'alternative bi-tube engendre un délais complémentaire de construction (voir tableau ci-dessous).

Station	Impact bi-tube sur délais GC1
Bordet	+ 3 mois
Paix	+ 3 mois
Tilleul	+ 2 mois
Riga	+ 2 mois
Verboekhoven	+ 3 mois
Colignon	+ 3 mois
Liedts	+ 3 mois

Tableau 63 : Estimation de l'impact de l'alternative bi-tube sur les délais de construction du Génie Civil, phase 1, des stations (BMN, 2020)

On constate un délais d'environ 2 à 3 mois pour toutes les stations. Pour la phase Génie Civil, partie 2 (GC2), les durées restent similaires à la solution monotube.

La phase de construction du tunnel est représentée en vert sur la figure ci-dessus.

En se basant sur la même date de démarrage que pour la solution monotube (juillet 2022), la mise à disposition à la STIB pour la phase test a été estimée à juillet 2032 (au lieu de juillet 2030 pour la solution monotube). Ce délai est principalement dû à la construction des ouvrages de bifurcation puisque le parachèvement des stations situées à proximité de ces ouvrages ne pourra être réalisé qu'après la fin de la construction de ces ouvrages.

6. Analyse des incidences de l'alternative BITUBE en situation de référence (par rapport à la situation monotube) et recommandations

6.1. Mobilité

En matière de macro-mobilité, aucune différence n'est prévue entre les incidences de la solution monotube et la solution bitube.

6.2. Urbanisme, aménagement du territoire et patrimoine

6.2.1. Conformité du tracé avec le cadre réglementaire

Le tracé du bitube suit celui du monotube et donc celui validé par la carte n°6 du PRAS.

La position des stations est identique à celle du monotube.

La seule distinction par rapport au tracé monotube se situe dans la courbe entre PAIX et Tilleul. Cette dernière est modifiée de quelques dizaine de mètres plus au nord sur 150m de longueur. Cependant le tracé au PRAS (trait sur une carte) ne dispose pas du même niveau de précision que cette alternative. Une analyse approfondie d'ordre juridique devrait être réalisée pour le confirmer. Il s'agit d'une analyse qui dépasse le cadre cette étude.

6.2.2. Impact sur les parcelles

L'emprise du tracé de l'alternative bitube reste globalement similaire au tracé du monotube et s'étend de la gare du Nord, au niveau de la rue d'Aerschot, jusqu'au niveau de la fin de la ligne, située au dépôt de Haren.

Des ouvrages de bifurcation ont été ajoutés à certains endroits du tracé. Ces ouvrages sont destinés à assurer des services partiels en mode dégradé (c'est-à-dire en cas d'incident sur la ligne). Ils sont composés de 2 appareils de voie permettant de basculer les métros sur l'une ou l'autre voie en cas notamment d'entretien ou d'incident. La taille de ces ouvrages est d'une centaine de mètres de long.

En section courante, les axes de chaque tunnel sont espacés d'environ 18,25 m, ce qui correspond à un écartement équivalent à 1,5 fois leur diamètre (7,20 m pour le diamètre extérieur et 6,40 m pour le diamètre intérieur). Le tracé est calculé pour une vitesse d'exploitation de 72 km/h.

La configuration des quais de toutes les stations a été adaptée aux exigences du bitube, avec la mise en place de quais centraux à la place de quais latéraux dans le permis initial monotube.

Entre le puits P5 et la station Liedts, les deux voies s'éloignent progressivement jusqu'à ce que l'écartement entre les deux tunnels soit suffisant (1,5 fois le diamètre des tunnels). L'entraxe réduit à la sortie du puits P5 permet d'implanter un ouvrage de communication des voies (ouvrage de bifurcation).

Le long du parcours du tunnel, l'emprise est plus importante dans l'alternative bitube que pour le projet de base. Le tableau ci-dessous permet d'identifier le nombre de parcelles supplémentaires affectées en sous-sol par la réalisation du tunnel dans l'alternative bitube.

Tronçons	Solution monotube	Alternative bitube	Parcelles supplémentaires affectées
Gare du Nord – Liedts	27	32	+5 (+19%)
Liedts – Colignon	92	125	+33 (+36%)
Colignon – Verboekhoven	49	77	+28 (+57%)
Verboekhoven – Riga	25	34	+9 (+36%)
Riga – Tilleul	67	87	+20 (+30%)
Tilleul – Paix	22	33	+11 (+50%)
Paix – Bordet	67	95	+28 (+42%)
Bordet – dépôt	4	7	+3 (+75%)
<i>Total</i>	<i>353</i>	<i>490</i>	<i>+137 (+39%)</i>

Tableau 64 : Parcelles affectées en sous-sol par le tunnel : monotube vs. bitube (ARIES, 2020)

Au total, 490 parcelles sont affectées par le passage du tunnel dans l'alternative bitube (emprise à grande profondeur) au cours des différents tronçons.

6.2.3. Impact sur le patrimoine

En ce qui concerne le patrimoine, les éléments ayant un intérêt patrimonial dont l'emprise en sous-sol est affectée par le tunnel de la solution monotube sont également affectés par le tunnel de l'alternative bitube.

Voir Partie 1 :6.2.2. Impact sur le patrimoine

Compte tenu de son emprise plus importante, signalons que le tunnel de l'alternative bitube parcourt l'emprise en sous-sol de plusieurs constructions reprises à l'Inventaire du Patrimoine architectural (« Irismonument ») supplémentaires par rapport à celles identifiées dans l'analyse de la solution monotube.

De manière générale, le tunnel de l'alternative bitube est moins profond que celui de la solution monotube. Ceci risque d'entraîner un impact plus important en ce qui concerne les éventuels vestiges archéologiques retrouvés lors des travaux de construction du tunnel.

6.3. Domaines social et économique

6.3.1. Coûts d'investissement

Le chapitre ci-dessous vise à comparer les coûts d'investissement directs et indirects entre la variante bitube et la version monotube. Comme pour la variante monotube, ce chapitre se

base sur l'analyse de BMN pour la variante bitube²⁴ et vise à en présenter les principales conclusions. L'estimation pour la variante bitube est basée sur des ratios appliqués à l'estimation de la version monotube T6b du 14/02/20.

6.3.1.1. Lots impactés par le passage de la version monotube à la version bitube

Sur les 20 lots budgétisés, 6 lots (lots 3, 4, 5, 6, 8 et 15) ainsi que le marché d'aménagement de surface aux abords des stations voient leurs coûts d'investissement impactés par le passage de la version monotube à la version bitube.

Pour ces lots impactés, la figure ci-dessous présente les coûts d'investissements pour la version monotube, la version bitube ainsi que la différence de coûts entre les deux versions.

Lots impactés	Monotube	Bitube	Augmentation (absolu)	Augmentation (relatif)
Lot 3 : Tunnel, Stations, Puits P0	535.046.008 €	858.957.150 €	323.911.142 €	+61%
Lot 4 : Parachèvement	65.743.840 €	54.740.029 €	-11.003.811 €	-17%
Lot 4 : Techniques spéciales	65.886.679 €	81.256.799 €	15.370.120 €	+23%
Lot 5 : Mécanisation des accès	32.669.000 €	25.519.038 €	-7.149.962 €	-22%
Lot 6 : Voies	21.352.129 €	21.723.830 €	371.701 €	+2%
Lot 8 : Télécom	5.657.800 €	8.156.833 €	2.499.033 €	+44%
Lot 15 : SIG	20.500.000 €	26.870.000 €	6.370.000 €	+31%
Marché Aménagement de surface	13.104.580 €	14.355.550 €	1.250.970 €	+10%
Total	759.960.036 €	1.091.579.229 €	331.619.193 €	+44%

Tableau 65 : Comparaison des estimations des coûts d'investissements monotube-bitube par lots impactés (ARIES sur base des données BMN, 2020)

Le passage du monotube au bitube implique un accroissement des coûts d'investissements d'environ 332 M€, ceci est principalement en lien avec l'accroissement des coûts du **lot 3 : travaux de génie civil des stations (+323M€)**. L'analyse du **Lot 3** montre que cet accroissement des coûts d'investissements est principalement en lien avec :

²⁴ BMN & Beliris. (2020). *Note de synthèse Variante Bitube : Étude de l'extension du réseau de transports en commun de haute performance vers le nord à Bruxelles*, consulté en août 2020.

- Les travaux en zone de congélation : Les coûts d'investissement sont accrus de 178 M€ (+130%), ceci s'explique principalement par l'ajout des ouvrages de liaison
- Le gros-œuvre des stations (boîtes principales) : Les coûts d'investissement sont accrus de 72 M€ (+36%), ceci s'explique principalement par la réalisation du nouvel ouvrage de raccordement entre le puits P5 et Liedts.
- Les travaux du tunnelier (dont les rameaux) : 60M€ (+50%) plus cher que la version monotube en lien avec le quasi-doublement du linéaire tunnel, malgré la réduction de la partie P5-Liedts.

On peut néanmoins noter, que si l'on retire le surcoût en lien avec les ouvrages de bifurcations (ouvrages de bifurcations et rameaux), le Lot 3 reste plus onéreux en Bitube.

Le surcout total du bitube sans tenir compte des ouvrages de bifurcations est donc de **194M€**.

Lots impactés	Monotube	Bitube	Augmentation (absolu)	Augmentation (relatif)
Lot 3 : Tunnel, Stations, Puits P0 avec ouvrages de bifurcations	535.046.008 €	858.957.150 €	323.911.142 €	+61%
<i>Ouvrages de bifurcations Verboekhoven</i>	-	- 24.800.000 €		
<i>Ouvrages de bifurcations Tilleul</i>	-	- 30.800.000 €		
<i>Ouvrages de bifurcations Bordet</i>	-	- 71.000.000 €		
<i>Rameaux</i>	-	- 11.000.000 €		
Lot 3 : Tunnel, Stations, Puits P0 sans ouvrages de bifurcations	535.046.008 €	721.357.150 €	186.311.142 €	+35%

Tableau 66: Prix Lot 3 sans les ouvrages de bifurcations (ARIES sur base des données BMN,2020)

6.3.1.2. Comparaison coûts d'investissement total version monotube-bitube

L'estimation des coûts d'investissement s'élève **1.267 M€ pour la version bitube**. Pour rappel, pour la version monotube, les coûts d'investissement s'élèvent à 936 M€. La version bitube résultera donc en une augmentation **des coûts d'investissements totaux de 35%**.

La figure ci-après reprend le détail des coûts directs et indirects pour la version bitube et monotube pour l'ensemble des lots.

Partie 2 : Description de l'alternative de conception (bitube)
 6. Analyse des incidences de l'alternative BITUBE et recommandations

MONOTUBE T6a et T6b - 02/2020 NIV PU 2015		ratio vers bitube	BITUBE T6a et T6b - 03/2020 - NIV PU 2015		delta	
COUTS DIRECTS ET INDIRECTS € 935.763.824			€ 1.267.383.017	331.619.193 €		35%
Travaux préparatoires		1	18.319.593 €			
Concessionnaires			11.836.498 €			
Démolition Medical Center			466.615 €			
Dépôt		1	1.374.000 €			
Lots		1,37	1.234.707.874 €	330.368.223 €		37%
Lot 1 GDN/P5/P6		1	41.259.839 €			
Lot 3 TSP0		1,61	858.957.150 €	323.911.142 €		61%
Lot 2 Dépôt		1	76.290.977 €			
Lot 4 Parach et TS		1,03	135.996.828 €	4.366.309 €		3%
Lot 4 Parachèvements		0,83	54.740.029 €	11.003.811 €		-17%
Lot 4 Techniques spéciales		1,23	81.256.799 €	15.370.120 €		23%
Lot 5 Mécanisation des accès		0,78	25.519.038 €	7.149.962 €		-22%
Lot 6 Voies		1,02	21.723.830 €	371.700 €		2%
Lot 7 Marché 11kV et 900V		1	12.179.380 €			
Lot 8 Télécom		1,44	8.156.833 €	2.499.033 €		44%
Lot 9 Systèmes stations		1	2.786.000 €			
Lot 10 SCADA Energie		1	800.000 €			
Lot 11 Billetique		1	4.243.000 €			
Lot 12 Contrôle d'accès		1	400.000 €			
Lot 13 VMS		1	2.410.000 €			
Lot 14 Call Manager		1	Compris lot 9			
Lot 15 SIG		1,31	26.870.000 €	6.370.000 €		31%
Lot 16 SCADA Equipements stations		1	735.000 €			
Lot 17 Façades de quai		1	16.380.000 €			
Lot 18 Publicité		1	- €			
Lot 19 Portillons Sésame		1	Compris lot 11			
Lot 20 SPIDER		1	- €			
Marché Aménagement de surface		1,095	14.355.550 €	1.250.970 €		10%

Tableau 67: Estimations des coûts d'investissements pour les variantes monotube-bitube pour l'ensemble des lots (BMN, 2020)

6.3.2. Planning travaux

Pour l'ensemble de l'ouvrage métro, en se basant sur la même date de départ que la variante monotube soit juillet 2022, le passage de la version monotube à la variante bitube impliquera une mise à disposition de la STIB de l'ouvrage pour juillet 2032 au lieu de juillet 2030 soit un allongement des travaux de 2 ans. Ceci est principalement dû aux rameaux, à l'ouvrage P5 Liedts et aux ouvrages de communication.

De manière plus spécifique, **pour les stations**, la variante bitube résultera en un accroissement des phases de génie civil de 2 à 3 mois pour l'ensemble des stations. Seule exception, la station Liedts qui verra la durée des travaux de génie civil s'accroître de 18 mois.

Station	Impact de la variante monotube sur la durée des travaux de génie civil
Bordet	+3 mois
Paix	+3 mois
Tilleul	+2 mois
Riga	+2 mois
Verboekhoven	+3 mois
Colignon	+3 mois
Liedts	+18 mois

Tableau 68 : Accroissement de la durée des travaux de génie civil en lien avec le passage de la version monotube à la variante bitube (BMN, 2020)

6.3.3. Impact sur le foncier

Au niveau du foncier, le coût des expropriations sera plus élevé pour l'alternative bitube que pour l'alternative monotube. Ceci au regard :

- De la plus grande proximité de l'ouvrage par rapport à la surface (l'alternative rapproche l'ouvrage de 4 à 5m) ;
- De la plus grande largeur des stations
- De la construction de deux tubes, ce qui implique un plus grand nombre de parcelles impactées ;

6.3.3.1. Conclusions

Les incidences du projet version bitube (par rapport à la version monotube) au niveau socio-économique sont les suivantes :

- Un coût d'investissement total de 1.267 M€.** Sans tenir compte des ouvrages de bifurcations, ce coût s'élève à 1.130 M€. **Comparativement à la variante monotube :**
 - Accroissement des coûts d'investissements totaux de 332 M€ (+35%).

- 6 lots impactés dont principalement le lot 3 (accroissement des coûts de +323 M€).
- Sans tenir compte des ouvrages de bifurcations du lot 3, accroissement des coûts d'investissements totaux de 194 M€ (+21%).
- **Au niveau du planning travaux, travaux sur 10 ans de 2022 à 2032. Comparativement à la variante monotube :**
 - Allongement des travaux de 2 ans ;
 - Accroissement de la durée des travaux pour les stations.
- Des coûts d'expropriations plus importants que pour la variante monotube.

6.4. Sol, sous-sol et eaux souterraines

6.4.1. Eaux souterraines

6.4.1.1. Généralités – situation en exploitation

La mise en œuvre de la solution bitube (BT) comparativement à la solution monotube (MT) serait de nature à induire les effets qualitatifs suivants :

Au niveau des tunnels (tronçons):

- Légère réduction de la profondeur des ouvrages : 
- Légère réduction de la profondeur de rabattement en exploitation : 
- Réduction du diamètre des tunnels : 
- Doublement du nombre de tunnels : 
- Création de boîtes de bifurcation complémentaires au sein desquelles le niveau doit être rabattu en exploitation (intégration des 2 tunnels et de l'espace intermédiaire créé entre ceux-ci dans un espace unique) : 

Pour ce qui concerne l'exécution des tunnels elle se fait par tunnelier sans paroi de confinement que ce soit en solution monotube ou bitube.

Pour ce qui concerne l'exécution des zones de bifurcation, elle se fait sans paroi de confinement, sur base d'un plancher et d'une voute de congélation temporairement créés, lors du chantier, à partir de chaque tunnel.

Le plancher de congélation ne s'ancre pas dans l'aquitard et laisse donc une zone de passage de l'eau entre la base du tunnel et l'aquitard. Après chantier et arrêt de la congélation le passage de l'eau continue de se faire sous le plancher de la zone de bifurcation et au-dessus du toit de celle-ci.

Hors zone de bifurcation, la nappe est susceptible de s'écouler en grande partie en dessous et au-dessus du tunnel. Le débit d'entrée dans le tunnel est fonction du niveau d'imperméabilité du revêtement de celui-ci (voussoir, zone injectée, ...) et de la charge hydraulique. Ceci s'applique tant à la solution monotube qu'à la solution bitube.

Au niveau des stations :

- Légère réduction de la profondeur des radiers de fond : 
- Légère réduction de la profondeur de rabattement en exploitation : 
- Elargissement des stations et augmentation de la surface et du périmètre à rabattre en exploitation : 

Pour ce qui concerne l'exécution elle se fait, pour les deux scénarios avec la mise en œuvre de parois de confinement ancrées à la même profondeur dans un des aquitards de la formation de Saint Maur. Seul le périmètre de l'enceinte est porté à la hausse dans le cadre de la solution bitube vu l'élargissement de l'emprise des stations.

Les flèches symbolisées ci-dessus représentent l'**impact qualitatif** attendu sur les débits à extraire si la solution bitube était adoptée comparativement à la solution monotube.

Le tableau ci-après présente le ratio des superficies des boîtes principales selon les deux solutions :

OUVRAGE	PUITS P0 & RAMPE	LIEDTS	COLIGNON	VBH	RIGA	TILLEUL	PAIX	BORDET
BITUBE [m ²]	5680	1631	2371	2590	4006	3125	1690	3575
MONOTUBE [m ²]	4860	1631	2117	2609	3310	2713	1768	3230
RATIO	1,17	1,00	1,12	0,99	1,21	1,15	0,96	1,11

Tableau 69 : Ratio surfacique – comparaison bitube / monotube

Une approche comparative quantitative a été menée afin de comparer l'impact net de l'adoption d'un scénario bitube par rapport à un scénario monotube sur les débits à extraire en exploitation.

Il a été démontré dans les sections précédentes que la situation à l'équilibre en exploitation (càd après chantier) induisait les impacts les plus importants en termes de débit à extraire comparativement à la situation pendant les différentes phases de chantier. Pour celles-ci, la situation est atténuée par rapport à la situation finale en exploitation.

L'approche comparative présentée ci-après se base sur une comparaison au scénario monotube selon les hypothèses de la modélisation V1 de Artesia, qui avait tendance à maximaliser les débits à extraire et les effets périphériques (notamment par la prise en considération des valeurs hypothétiques les plus hautes de perméabilité des parois de confinement et de l'horizon d'ancrage de Saint-Maur).

L'approche quantitative est développée ci-après pour les stations et pour les tronçons de tunnel. L'effet global est ensuite mis en évidence.

6.4.1.2. Impact de la solution bitube sur les débits d'exploitation en stations

Des facteurs de proportionnalité ont été évalués station par station sur base des modifications attendues de la géométrie de la solution bitube par rapport à la solution monotube. Ces facteurs de proportionnalité cumulés permettent d'extrapoler les débits à attendre en solution bitube et l'impact net de l'alternative étudiée. L'approche a été effectuée en se basant sur les résultats de la modélisation Artesia V1 comme scénario de référence.

Les facteurs de proportionnalité calculés sont les suivants :

- Réduction du débit spécifique de transit à travers la paroi sur base du niveau statique extérieur et du niveau rabattu rehaussé à l'intérieur en régime permanent, prenant en compte une perméabilité de la paroi de 1.10^{-8} m/s (approche maximaliste) ;
- Augmentation du périmètre de paroi contribuant au débit de transit à travers la paroi ;
- Augmentation du débit de fond de boîte du fait de la modification à la hausse de l'emprise de chaque station.

Le tableau de calcul est présenté ci-après (hors gare du nord/P5 et dépôt).

Partie 2 : Description de l'alternative de conception (bitube)
6. Analyse des incidences de l'alternative BITUBE et recommandations

		LIEDTS	COLIGNON	VERBOEKH OVEN	RIGA	TILLEUL	PAIX	BORDET	TOTAL	Source
Données géométriques										
Niveau du sol	m DNG	24,5	33,8	28	42	44,5	45	48,5		BMN
Niveau statique initial	m DNG	21,13	24,03	23,5	29,94	35,95	29,94	48		BMN
Niveau inférieur radier haut	m DNG	-0,1	5,3	1,93	14,1	12,89	18,65	25,4		BMN
Niveau inférieur radier bas	m DNG	-4,13	2,82	0,55	11,52	10,94	16,07	25,4		BMN
Top horizon ancrage (St Maur)	m DNG	-10	-11	-12,8	0	-15	-12	3		BMN
Niveau de base des murs	m DNG	-12,5	-15	-15,5	-4,4	-17	-13	-1		BMN
Niveau de rabattement annoncé (monotube)	m DNG	-0,75	0,4	-3,45	10,4	13,5	15	20,7		BMN
Radier tunnel monotube	m DNG	-3,6	2,5	-2	13	12	16	24,4		BMN, bitube
Radier tunnel bitube	m DNG	-1	9	3	19	19	23	27		BMN, bitube
Delta sur radier tunnel	m	2,6	6,5	5,0	6,0	7,0	7,0	2,6		BMN, bitube
Niveau de rabattement mono-tube + delta	m DNG	1,9	6,9	1,6	16,4	20,5	22,0	23,3		
Niveau rabattement considéré monotube	m DNG	-4,13	0,4	-3,45	10,4	10,94	15	20,7		
Niveau rabattement considéré bitube	m DNG	-1,5	6,9	1,6	16,4	17,9	22,0	23,3		
Hauteurs mouillées / base des murs										
h1 monotube	m	33,6	39,0	39,0	34,3	53,0	42,9	49,0		
h2 monotube	m	8,4	15,4	12,1	14,8	27,9	28,0	21,7		
h1 bitube	m	33,6	39,0	39,0	34,3	53,0	42,9	49,0		
h2 bitube	m	11,0	21,9	17,1	20,8	34,9	35,0	24,3		
Données de calcul du débit										
Débit de rabattement mono-tube	m ³ /h	4,4	4,9	6,6	3,3	3,8	3,6	3,1		ARTESIA
	m ³ /j	106	118	158	79	91	86	74		ARTESIA
Débit de paroi	m ³ /h	4,2	4,7	6,4	2,6	3,1	2,7	2,4		ARTESIA
Débit de fond	m ³ /h	0,2	0,2	0,2	0,8	0,6	0,9	0,7		ARTESIA
Superficie des boîtes principales (A)										
Monotube	m ²	1631	2117	2609	3310	2713	1768	3230		BMN
Bitube	m ²	1631	2371	2590	4006	3125	1690	3575		BMN
<i>Ratio bitube / monotube</i>		<i>1,00</i>	<i>1,12</i>	<i>0,99</i>	<i>1,21</i>	<i>1,15</i>	<i>0,96</i>	<i>1,11</i>		<i>BMN</i>
Rayon équivalent (Re)										
Monotube	m	22,79	25,96	28,82	32,46	29,39	23,72	32,06		
Bitube	m	22,79	27,47	28,71	35,71	31,54	23,19	33,73		
<i>Ratio bitube / monotube</i>		<i>1,00</i>	<i>1,06</i>	<i>1,00</i>	<i>1,10</i>	<i>1,07</i>	<i>0,98</i>	<i>1,05</i>		
Périmètre équivalent (sur base d'un cercle équivalent)										
Monotube	m	143	163	181	204	185	149	201		
Bitube	m	143	173	180	224	198	146	212		
<i>Ratio bitube / monotube</i>		<i>1,00</i>	<i>1,06</i>	<i>1,00</i>	<i>1,10</i>	<i>1,07</i>	<i>0,98</i>	<i>1,05</i>		
Périmètre équivalent (sur base d'un carré équivalent)										
Monotube	m	161,54	184,04	204,31	230,13	208,35	168,19	227,33		
Bitube	m	161,54	194,77	203,57	253,17	223,61	164,44	239,17		
<i>Ratio bitube / monotube</i>		<i>1,00</i>	<i>1,06</i>	<i>1,00</i>	<i>1,10</i>	<i>1,07</i>	<i>0,98</i>	<i>1,05</i>		
Calcul des facteurs de proportionnalité										
Sur le débit de paroi										
<i>Sur périmètre (développé)</i>		<i>1,00</i>	<i>1,06</i>	<i>1,00</i>	<i>1,10</i>	<i>1,07</i>	<i>0,98</i>	<i>1,05</i>		
<i>Sur le débit spécifique</i>		<i>0,90</i>	<i>0,69</i>	<i>0,82</i>	<i>0,64</i>	<i>0,57</i>	<i>0,34</i>	<i>0,76</i>		
Facteur global débit de paroi		0,90	0,73	0,81	0,71	0,61	0,33	0,80		
Facteur fond de boîte		1,00	1,12	0,99	1,21	1,15	0,96	1,11		
Comparaison des débits										
Débit de paroi monotube	m ³ /h	4,2	4,7	6,4	2,6	3,1	2,7	2,4	26,1	
Débit de fond monotube	m ³ /h	0,2	0,2	0,2	0,8	0,6	0,9	0,7	3,6	
Débit global monotube	m³/h	4,4	4,9	6,6	3,3	3,8	3,6	3,1	29,7	
Débit de paroi bitube	m ³ /h	3,8	3,4	5,2	1,8	1,9	0,9	1,9	19,0	
Débit de fond bitube	m ³ /h	0,2	0,2	0,2	1,0	0,7	0,9	0,8	3,9	
Débit global bitube	m³/h	4,0	3,7	5,4	2,8	2,6	1,8	2,7	22,9	
<i>Ratio Q bitube / Q monotube</i>		<i>90%</i>	<i>75%</i>	<i>82%</i>	<i>85%</i>	<i>68%</i>	<i>49%</i>	<i>87%</i>		

Tableau 70 : Tableau de calcul des débits comparés (MT / BT) au droit des stations
(Tractebel, 2020)

Les résultats de calcul sont synthétisés à la figure ci-après (exprimés en m³/hr).

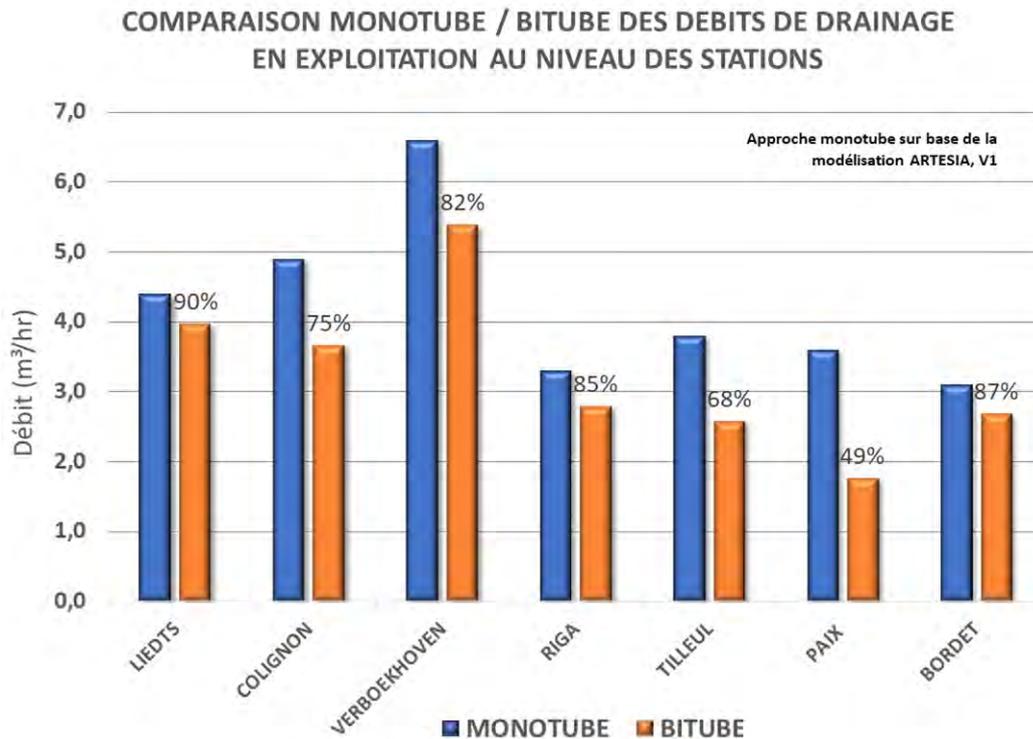


Figure 207 : Comparaison des débits de drainage (MT/BT) en exploitation en station (Tractebel, 2020)

La présente approche a permis de mettre en évidence que la solution bitube est de nature à permettre une réduction du débit de drainage dans une gamme de 49 à 90% selon les stations considérées. La variabilité est fonction des niveaux statiques et des rabattement différents ainsi que des conditions géométriques différentes pour chaque station.

Au global pour les 7 stations considérées (hors gare du nord/P5 et dépôt) le **débit total de drainage en exploitation serait susceptible de passer de 29,7 m³/h en monotube à 22,9 m³/h en bitube, soit à 77% de la solution de base.**

Vu la réduction attendue des débits, les impacts périphériques à attendre tel que décrits à la section Partie 1 :6.4.4.1.B, et bien qu'ils ne présentent pas un caractère inacceptable seraient eux aussi réduits de manière sensible.

6.4.1.3. Impact de la solution bitube sur les débits d'exploitation des tronçons de tunnel

L'approche a été exécutée en estimant, par calcul analytique, le débit de drainage d'une galerie immergée au sein d'une nappe aquifère. Dans un premier temps le débit a été estimé en monotube dans le cadre d'une galerie non revêtue située à une certaine profondeur par rapport à la surface piézométrique.

Les facteurs intervenants dans le calcul sont la perméabilité des terrains encaissants, la géométrie de la galerie ainsi que la différence de charge hydraulique imposée par le rabattement. Le niveau de rabattement correspond au radier du tunnel. Le calcul a été fait par tronçon inter-stations se basant sur des niveaux moyens calculés à partir des extrémités de chaque tronçon (niveaux statiques, niveaux des radiers de fonds, niveaux de rabattement).

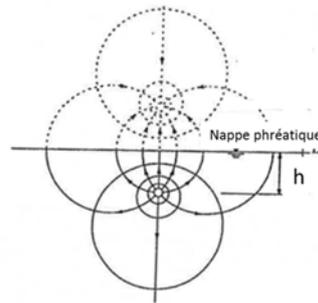


Figure 208 : Configuration de principe du calcul analytique (Tractebel, 2020)

Dans un second temps un facteur de réduction du débit a été pris en compte pour tenir compte du revêtement imperméable des galeries (ensemble voussoir / zone injectée). Ce facteur de réduction (facteur de résistance) est fonction de l'épaisseur du revêtement et de la perméabilité (K_r) de celui-ci.

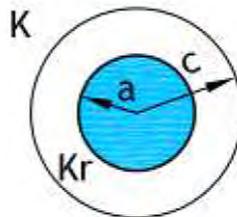


Figure 209 : Schéma de principe d'une galerie de rayon a et d'un revêtement jusqu'à l'extrados de rayon c (Tractebel, 2020)

La perméabilité du revêtement (parois du tunnel) est celle qui a été considérée dans l'étude Artesia soit $7,5 \cdot 10^{-11}$ m/s.

Les valeurs de débits spécifiques calculés par voie analytique pour la solution monotube ont été comparés avec ceux de la modélisation numérique et sont du même ordre de grandeur, ce qui a permis de valider la méthode.

Dans un second temps la même technique a été mise en œuvre avec les données géométriques de la solution bitube (diminution du diamètre, épaisseur du revêtement, niveau de rabattement rehaussé et double galerie). La perméabilité des parois de tunnel a été considérée comme la même que celle de la solution monotube, soit $7,5 \cdot 10^{-11}$ m/s.

Ceci a permis une estimation des débits spécifiques de chaque tronçon et une estimation du débit global de ceux-ci sur base de leur longueur.

Au débit des tronçons calculés ont été ajoutés une estimation des débits à drainer au sein des zones de bifurcation comprenant les 2 tunnels et la zone intermédiaire comme un espace continu. Le calcul a été fait par analogie en considérant une galerie unique équivalente de même section transversale que la section transversale de la zone de bifurcation. L'épaisseur et la perméabilité du revêtement ont été considérés comme les mêmes que ceux des galeries.

Le cumul des débits des tronçons de tunnel et des zones de bifurcation a permis de calculer le débit global de drainage de chaque tronçon en exploitation.

Partie 2 : Description de l'alternative de conception (bitube)
6. Analyse des incidences de l'alternative BITUBE et recommandations

Les tableaux de calcul sont présentés ci-après.

Tronçon		GARE DU NORD / LIEDTS	LIEDTS / COLIGN ON	COLIGN ON / VERBOE KHOVEN	VERBOE KHOVEN / RIGA	RIGA / TILLEUL	TILLEUL / PAIX	PAIX / BORDET	BORDET / DEPOT	Total
Ouvrages de bifurcation		LDT		VBK		TIL		BOR	BOR	
Données géométriques										
Longueur du tronçon total	m	194	509	464	433	600	327	627	617	3771
Longueur de la boîte de bifurcation	m	194	0	125	0	140	0	130	130	719
Longueur hors boîte de bifurcation	m	0	509	339	433	460	327	497	487	3052
Niveau moyen TN	m DNG	21,25	28,75	30,5	35	43,25	44,75	46,75	43,25	
Niveau moyen nappe	m DNG	19	22,5	23,75	26,75	33	33	39	43	
Monotube										
Niveau moyen radier	m DNG	-5,08	-0,54	0,25	5,5	12,5	14	20,21	21,21	
Diamètre extérieur	m	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	
Diamètre intérieur	m	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	
Epaisseur revêt.	m	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
Niveau de rabattement projeté	m DNG	-5,58	-1,04	-0,25	5	12	13,5	19,71	20,71	
Rayon extrados - c	m	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	
Rayon intrados - a	m	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45	
Bitube										
Niveau moyen radier	m DNG	-2,53	3,97	5,97	10,97	18,97	20,97	24,97	24,97	
Diamètre extérieur	m	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	
Diamètre intérieur	m	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	
Epaisseur revêt.	m	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Niveau de rabattement projeté	m DNG	-3,03	3,47	5,47	10,47	18,47	20,47	24,47	24,47	
Rayon extrados - c	m	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	
Rayon intrados - a	m	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	
Interdistance entre tunnel	m	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	
dont zones de bifurcation										
Section transversale	m ²	109		109		109		109	109	
Rayon extrados équivalent - c	m	5,9		5,9		5,9		5,9	5,9	
Rayon intrados équivalent - a	m	5,4		5,4		5,4		5,4	5,4	
Données géologiques										
Perméabilité équiv. de l'encaissant	m/s	5,0E-06	5,0E-06	5,0E-06	5,0E-06	5,0E-06	5,0E-06	6,0E-05	6,0E-05	
Perméabilité du revêt.	m/s	8,0E-11	8,0E-11	8,0E-11	8,0E-11	8,0E-11	8,0E-11	8,0E-11	8,0E-11	

Tableau 71 : Tableau de calcul des débits comparés (MT/TB) au droit des tronçons – données d'entrée considérées

Partie 2 : Description de l'alternative de conception (bitube)
6. Analyse des incidences de l'alternative BITUBE et recommandations

Tronçon		GARE DU NORD / LIEDTS	LIEDTS / COLIGN ON	COLIGN ON / VERBOE KHOVEN	VERBOE KHOVEN / RIGA	RIGA / TILLEUL	TILLEUL / PAIX	PAIX / BORDET	BORDET / DEPOT	Total
Ouvrages de bifurcation		LDT		VBK		TIL		BOR	BOR	
Estimation du débit de drainage des tronçons de tunnel										
Monotube										
Différence de charge hydraulique - h	m	24,08	23,04	23,50	21,25	20,50	19,00	18,79	21,79	
Débit spécif. sans revêt. - q	m³/s.m	3,3E-04	3,2E-04	3,3E-04	3,1E-04	3,0E-04	2,9E-04	3,5E-03	3,7E-03	
	l/hr.km	1,2E+06	1,2E+06	1,2E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,0E+06	1,2E+07	1,3E+07	
Facteur de résistance du au revêt.		3187	3273	3234	3442	3523	3707	44818	40639	
Débit spécif. avec revêt. - qr	m³/s.m	1,0E-07	9,8E-08	1,0E-07	8,9E-08	8,6E-08	7,8E-08	7,7E-08	9,2E-08	
	l/hr.km	372	354	362	322	308	282	278	331	
Contrôle résultat modélisation V1	l/hr.km	382	345	300	303	282	254	251	258	
Débit total des tronçons MT	m³/h	0,07	0,18	0,17	0,14	0,18	0,09	0,17	0,20	1,22
	m³/j	1,7	4,3	4,0	3,3	4,4	2,2	4,2	4,9	29,2
Bitube										
Hors ouvrages de bifurcation										
Différence de charge hydraulique - h	m	21,53	18,53	17,78	15,78	14,03	12,03	14,03	18,03	
Débit spécif. sans revêt. - q - 1 tube	m³/s.m	2,7E-04	2,5E-04	2,4E-04	2,3E-04	2,1E-04	2,0E-04	2,6E-03	2,9E-03	
	l/hr.km	9,8E+05	9,0E+05	8,8E+05	8,2E+05	7,7E+05	7,2E+05	9,3E+06	1,1E+07	
Facteur de résistance du au revêt.		4823	5228	5352	5744	6191	6893	74282	63699	
Débit spécif. avec revêt. - qr 1 tube	m³/s.m	5,7E-08	4,8E-08	4,6E-08	4,0E-08	3,5E-08	2,9E-08	3,5E-08	4,6E-08	
	l/hr.km	203	172	164	143	125	104	125	167	
Débit spécif. avec revêt. - qr 2 tube	m³/s.m	1,1E-07	9,6E-08	9,1E-08	8,0E-08	6,9E-08	5,8E-08	6,9E-08	9,3E-08	
	l/hr.km	407	344	328	286	250	208	250	333	
Ouvrages de bifurcation		LDT		VBK		TIL		BOR	BOR	
Niveau radier bifurcation	m DNG	-1,03		2,97		18,97		26,97	26,97	
Niveau statique initial	m DNG	21,13		23,5		35,95		48	48	
Différence de charge hydraulique - h	m	22,16		20,53		16,98		21,03	21,03	
Débit spécif. sans revêt.	m³/s.m	3,4E-04		3,3E-04		3,0E-04		4,0E-03	4,0E-03	
	l/hr.km	1,2E+06		1,2E+06		1,1E+06		1,5E+07	1,5E+07	
Facteur de résistance du au revêt.		3924		4148		4833		48885	48885	
Débit spécif. avec revêt.	m³/s.m	8,8E-08		8,0E-08		6,3E-08		8,2E-08	8,2E-08	
	l/hr.km	316		288		227		297	297	
Débit total des tronçons BT										
Débit total hors bifurcation	m³/h	0,00	0,18	0,11	0,12	0,11	0,07	0,12	0,16	0,88
Débit total ouvrages de bifurcation	m³/h	0,06	0,00	0,04	0,00	0,03	0,00	0,04	0,04	0,21
Débit total du tronçon	m³/h	0,06	0,18	0,15	0,12	0,15	0,07	0,16	0,20	1,09
Débit total hors bifurcation	m³/j	0,0	4,2	2,7	3,0	2,8	1,6	3,0	3,9	21,1
Débit total ouvrages de bifurcation	m³/j	1,5	0,0	0,9	0,0	0,8	0,0	0,9	0,9	5,0
Débit total du tronçon	m³/j	1,5	4,2	3,5	3,0	3,5	1,6	3,9	4,8	26,1

Tableau 72 : Tableau de calcul des débits comparés (MT/TB) au droit des tronçons – estimation des débits

Les résultats sont comparés à la figure ci-après (exprimés cette fois en m³/j).

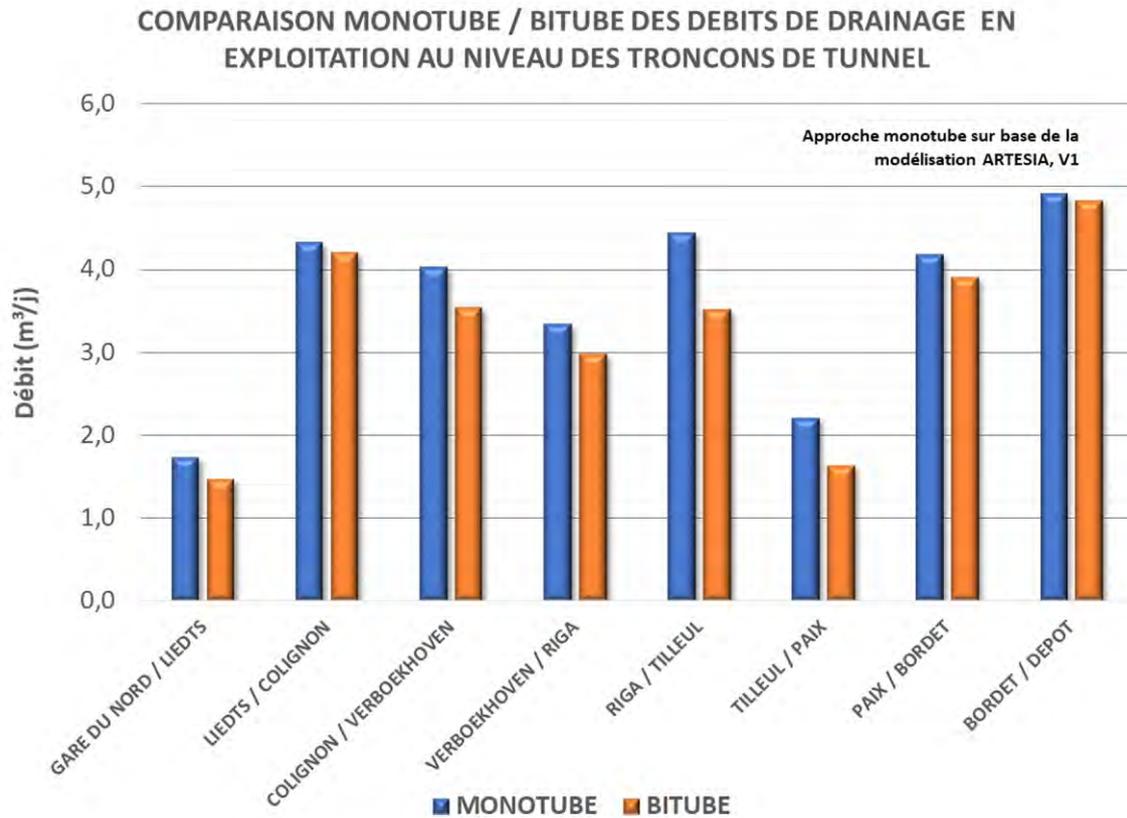


Figure 210 : Comparaison des débits de drainage (MT/BT) en exploitation pour les tronçons de tunnel (Tractebel, 2020)

On observe que pour les tronçons de tunnel, la solution bitube donne des débits de drainage très légèrement inférieurs à la solution monotube mais les ordres de grandeur selon les deux scénarios sont similaires et la différence n'est pas significative entre les deux solutions.

On obtient un débit total de drainage de l'ensemble des tronçons de 1,22 m³/h ou 29 m³/j en monotube et de 1,1 m³/h ou 26 m³/j en bitube.

Ceci est dû notamment au haut niveau d'imperméabilité considéré pour les parois des tunnels dans les deux configurations et au fait que les deux solutions laissent passer une partie importante du débit de la nappe sous et au-dessus des tunnels. Les approches précédentes avaient déjà montré que, en scénario de type V1, l'impact des tronçons était déjà beaucoup moindre que celui des stations. Le choix monotube / bitube n'est pas discriminant pour cet aspect.

6.4.1.4. Impact de la solution bitube sur les débits totaux d'exploitation du dispositif

La figure ci-après présente une comparaison des débits totaux stations et tronçons cumulés (nb. le tronçon présenté dans le graphique correspond à partir de chaque station à celui qui s'étend vers le dépôt).

Selon les hypothèses ici prises en compte le débit global des 7 stations (hors gare du nord et dépôt) et tronçons associés serait de 29,7 m³/h en solution monotube et de 22,9 m³/h en solution bitube, soit une réduction à 77%.

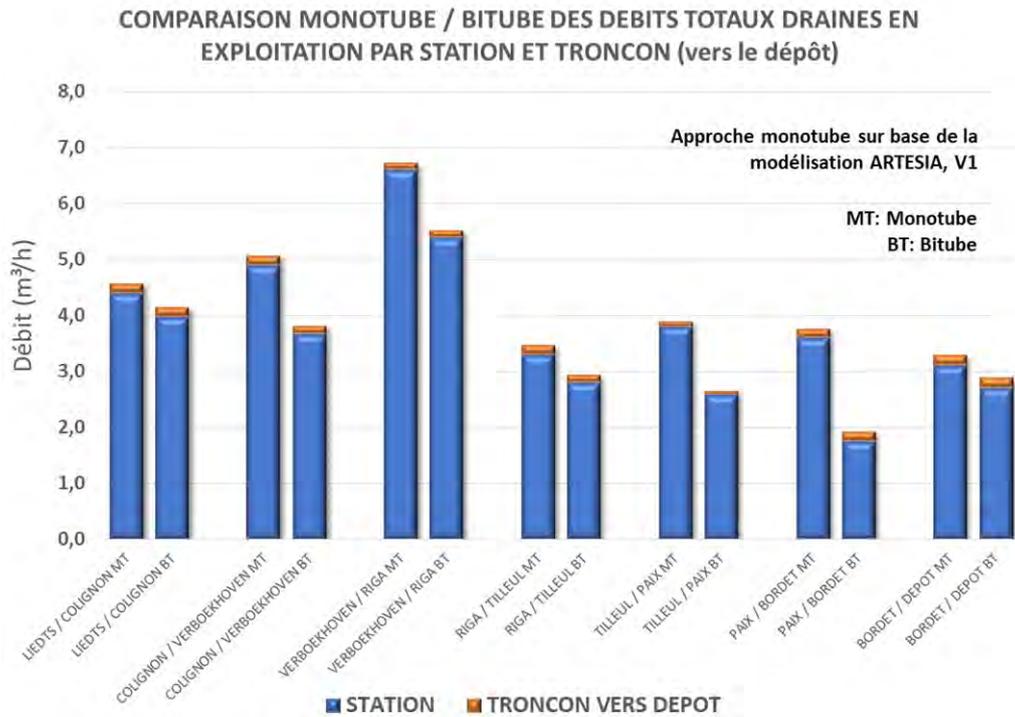


Figure 211 : Comparaison des débits de drainage (MT/BT) totaux en exploitation (Tractebel, 2020)

Ce graphique met par ailleurs en évidence que dans les deux configurations c'est surtout le débit de drainage des stations qui est impactant sur le débit global et la réduction imputable au choix d'une solution bitube, ceci pour les conditions de modélisation V1.

On notera, comme signalé dans les sections précédentes qu'en pratique, en conditions opérationnelles réelles, le débit des stations est susceptible d'être réduit par rapport à la présente estimation puisque les conditions de perméabilité des parois ici considérées sont les plus critiques ($K : 1.10^{-8}$ m/s en scénario V1 au lieu de 1.10^{-11} m/s en scénario V2).

En conclusion il apparaît qu'une solution de type bitube serait plutôt de nature à réduire les débits à extraire et les impacts périphériques comparativement à une solution monotube

6.4.1.5. Situation en phase de chantier

Comme démontré pour la solution Monotube, la situation en termes de débit à extraire est la plus impactante en situation définitive comparativement à la situation en chantier vu notamment l'organisation de rabattement progressif par époussetage de fouille dans les stations. Ce constat reste identique pour l'alternative bitube ici envisagée.

Cette solution bitube, pour ces phases chantier n'induit donc pas d'impact plus important que ceux identifiés pour la solution monotube pour ce qui concerne le rabattement. Les différences

notables reposent essentiellement sur une possible réduction des débits à extraire et sur un échelonnement potentiellement différent des étapes en fonction du planning chantier.

6.4.2. Tassements

6.4.2.1. Les tunnels

L'évaluation de l'impact du creusement des 2 tunneliers ainsi que l'estimation des tassements le long du tracé se font selon les mêmes méthodes que pour la solution monotube.

Les calculs Peck ont été réalisés au droit de 5 points sensibles. Les résultats ci-dessous illustrent :

- La profondeur des tunnels au droit des points sensibles (pour la solution monotube et bi-tube) ;
- L'interdistance entre les 2 tunnels de la solution bi-tube ;
- Les valeurs de tassements absolus droit des tunnels (pour les 2 solutions).

Dans les résultats ci-dessous, le calcul des tassements absolus totaux de la solution bi-tube correspond à la somme des tassements absolus des 2 tunnels de la solution bi-tube. Ces tassements absolus totaux bi-tube sont comparés aux tassements absolus de la solution monotube.

A. Franchissement de la ligne 26, au niveau du dépôt de Haren

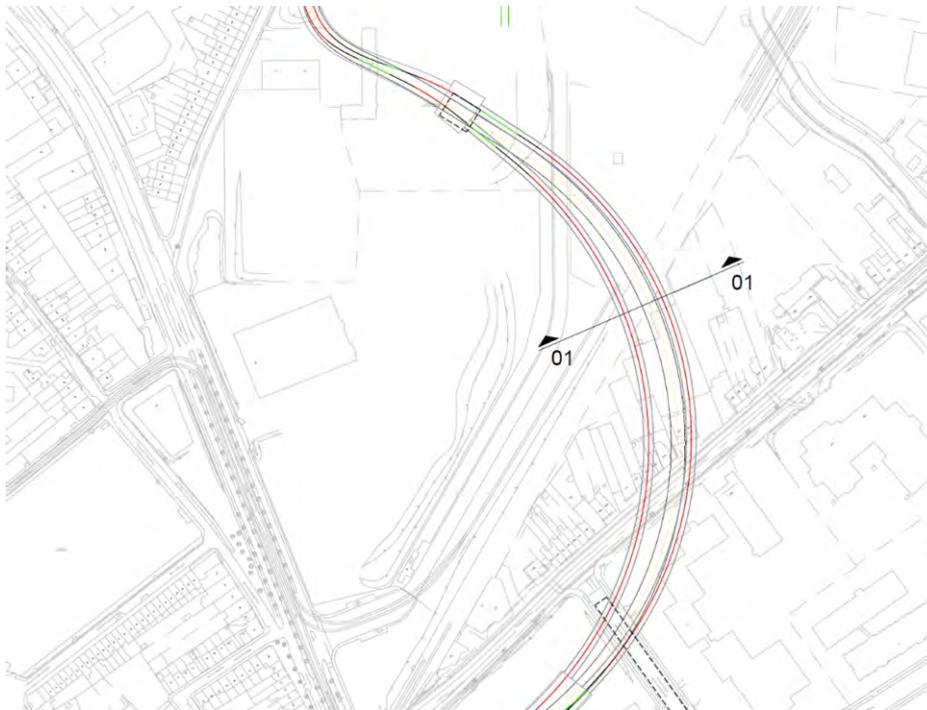


Figure 212 : Localisation de la coupe 1 (BMN, 2020)

Partie 2 : Description de l'alternative de conception (bitube)
 6. Analyse des incidences de l'alternative BITUBE et recommandations

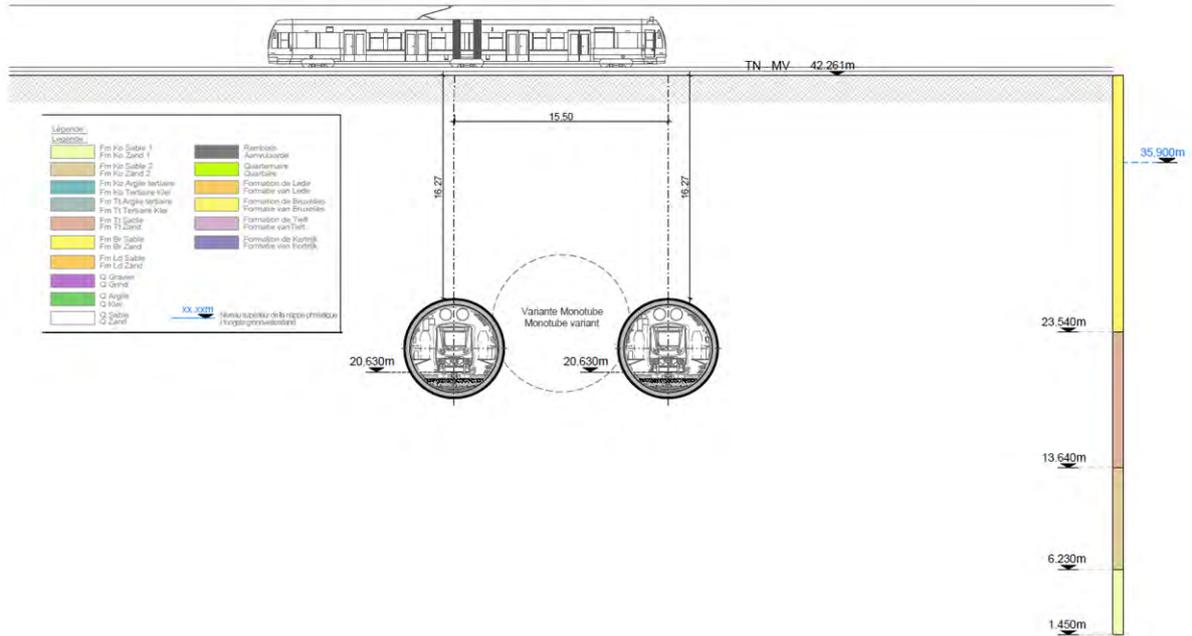


Figure 213 : Position des tunnels (monotube et bi-tube) au droit de la coupe 1 (BMN, 2020)

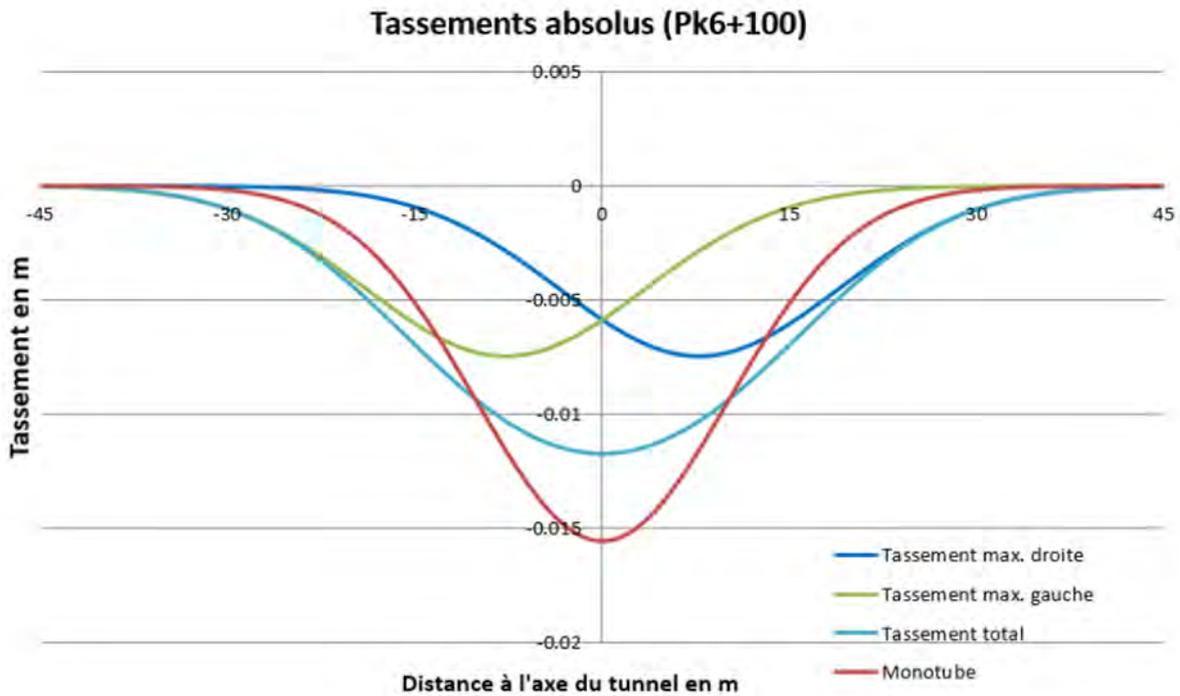


Figure 214 : Résultats des calculs de tassements absolus au droit de la coupe 1 (BMN, 2020)

B. Passage sous la Fermette d'Hoeveke

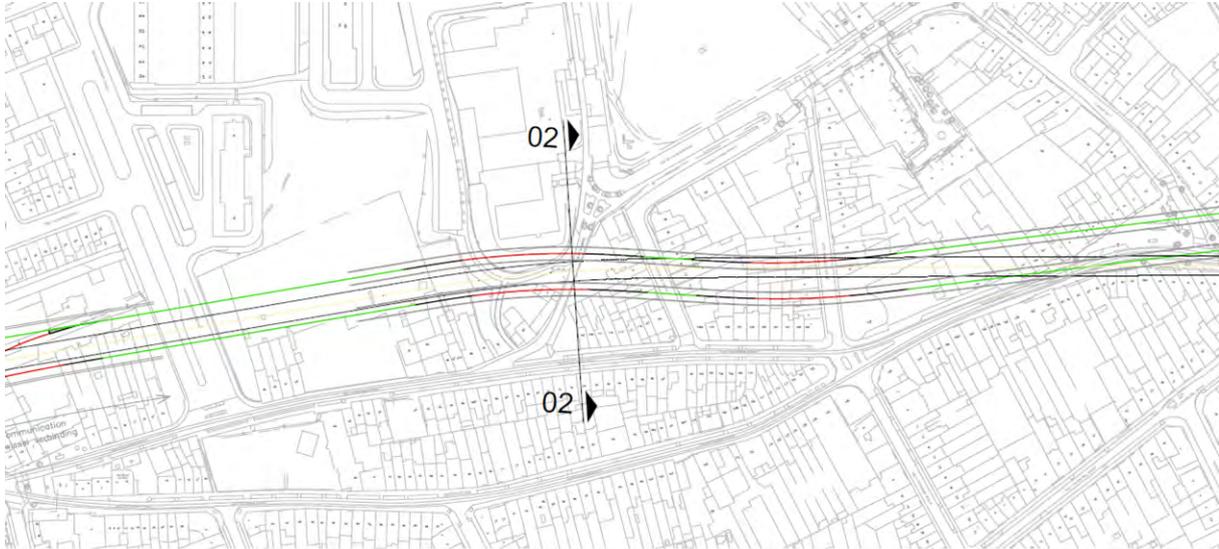


Figure 215 : Localisation de la coupe 2 (BMN, 2020)

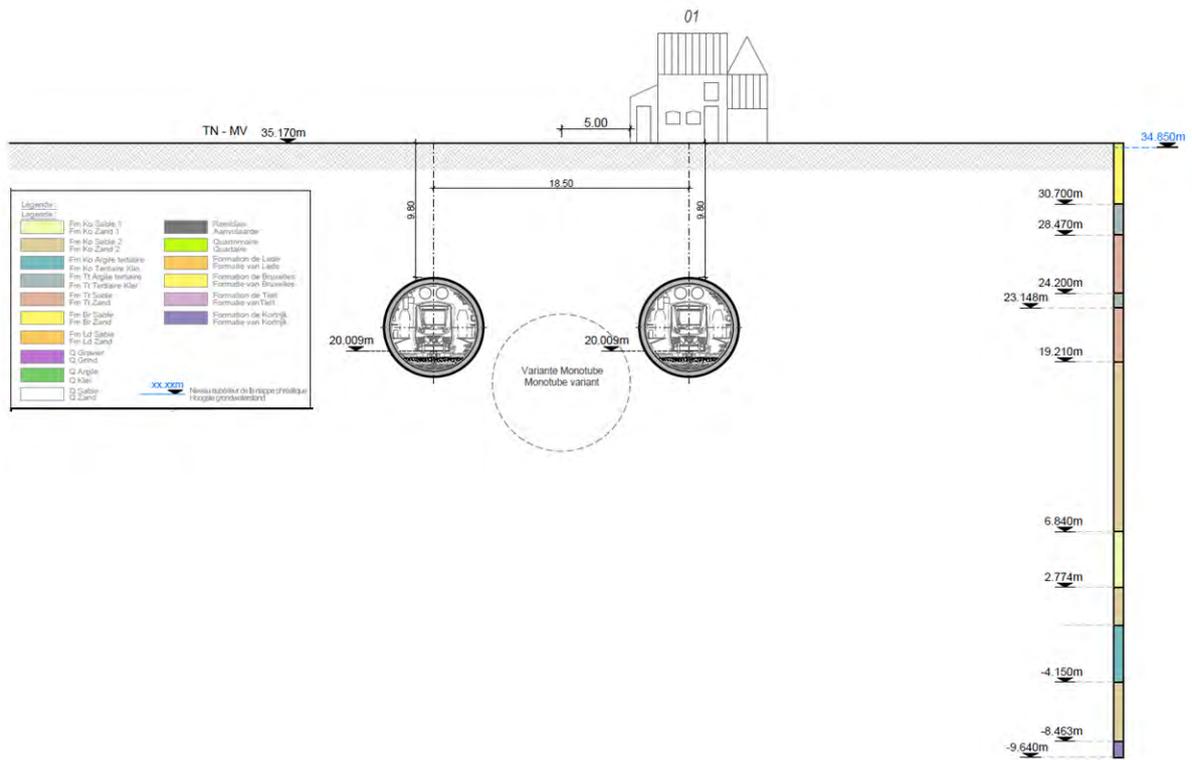


Figure 216 : Position des tunnels (monotube et bi-tube) au droit de la coupe 2 (BMN, 2020)

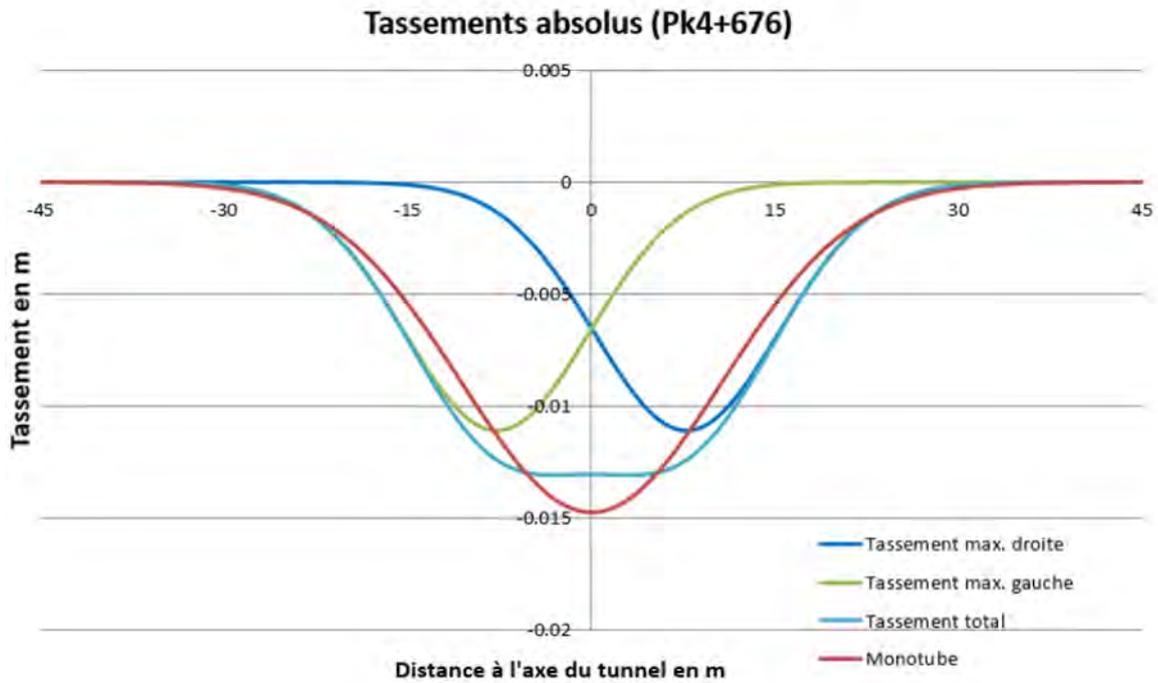


Figure 217 : Résultats des calculs de tassements absolus au droit de la coupe 2 (BMN, 2020)
C. Passage sous la ligne du tram 7, Boulevard Lambertont



Figure 218 : Localisation de la coupe 3 et 4 (BMN, 2020)

Partie 2 : Description de l'alternative de conception (bitube)
 6. Analyse des incidences de l'alternative BITUBE et recommandations

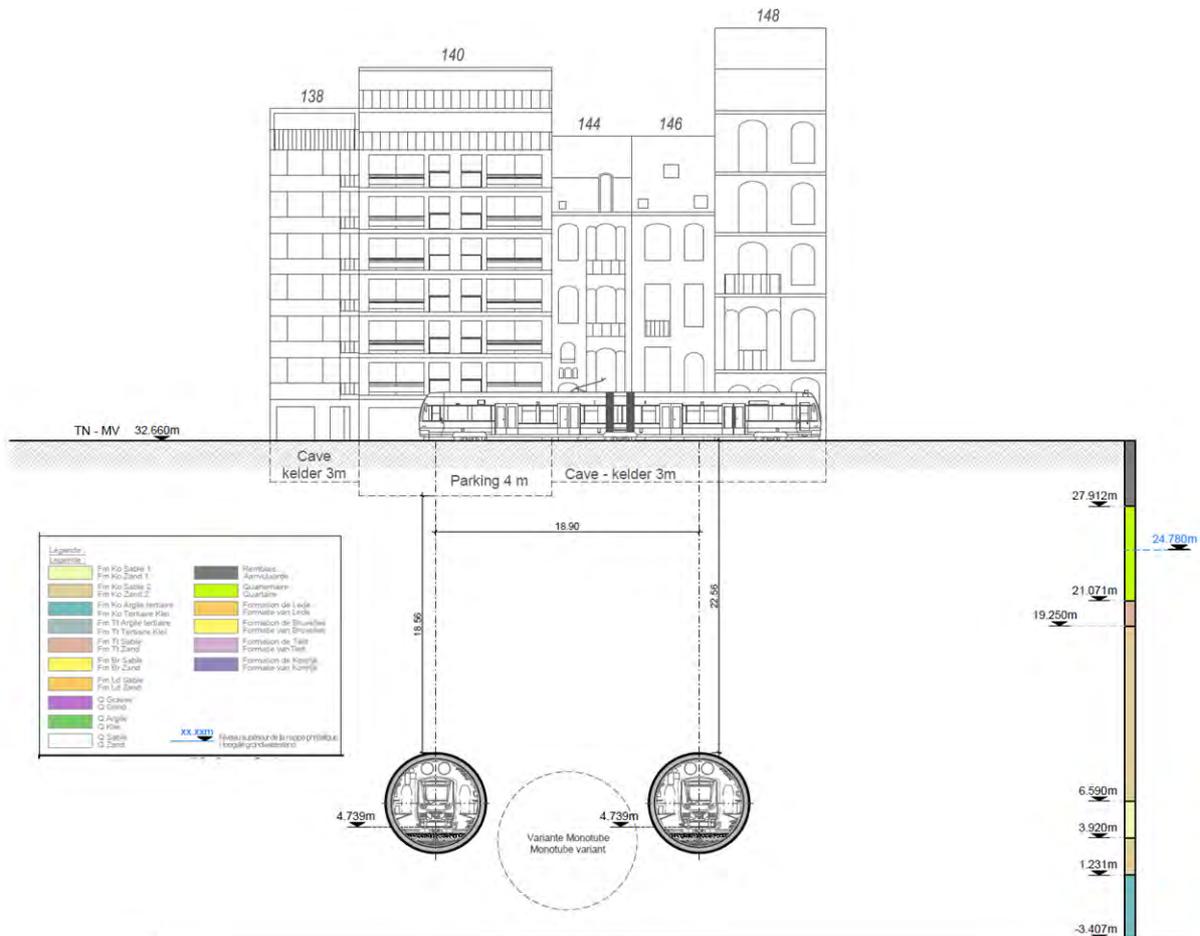


Figure 219 : Position des tunnels (monotube et bi-tube) au droit de la coupe 3 (BMN, 2020)

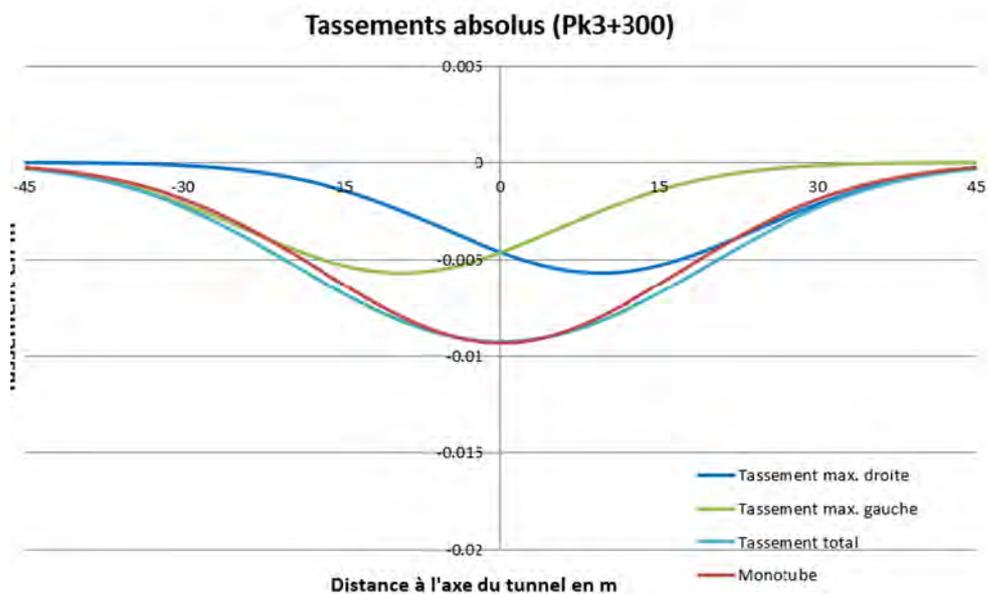


Figure 220 : Résultats des calculs de tassements absolus au droit de la coupe 3 (BMN, 2020)

D. Passage sous les collecteurs, rue Metsys à Schaerbeek

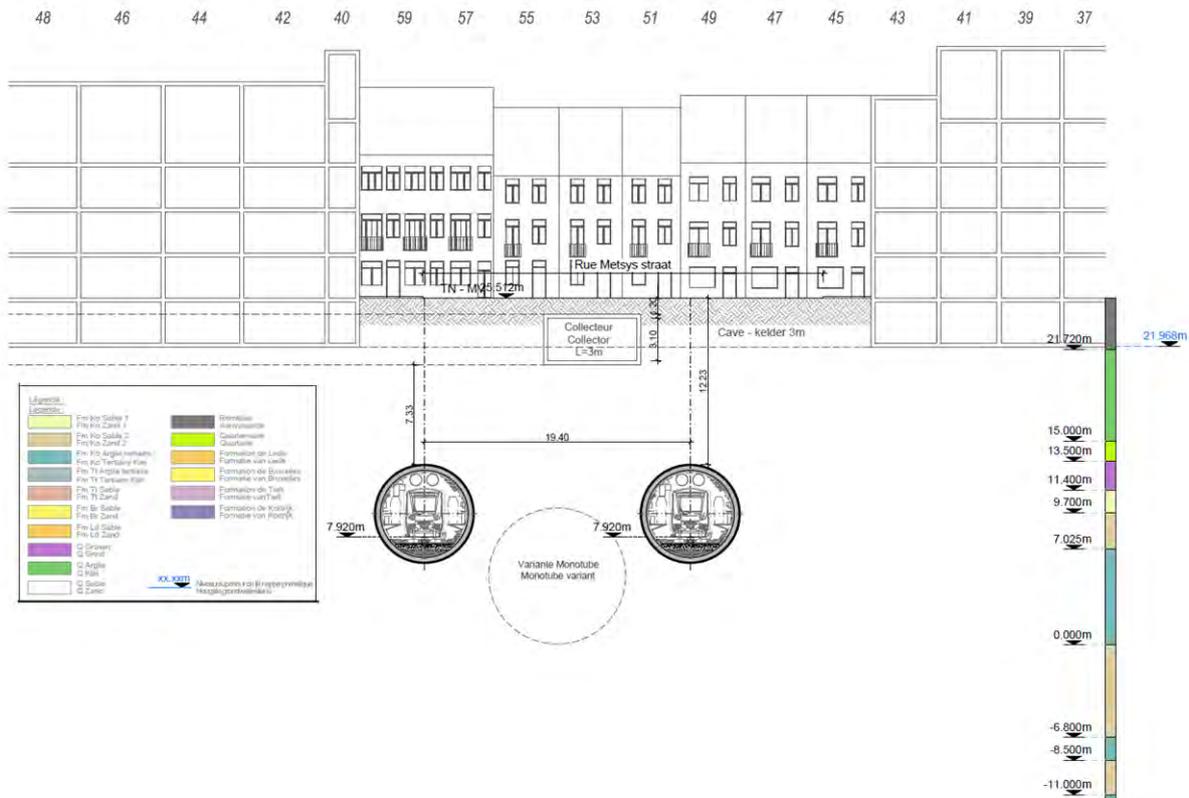


Figure 221 : Position des tunnels (monotube et bi-tube) au droit de la coupe 4 (BMN, 2020)

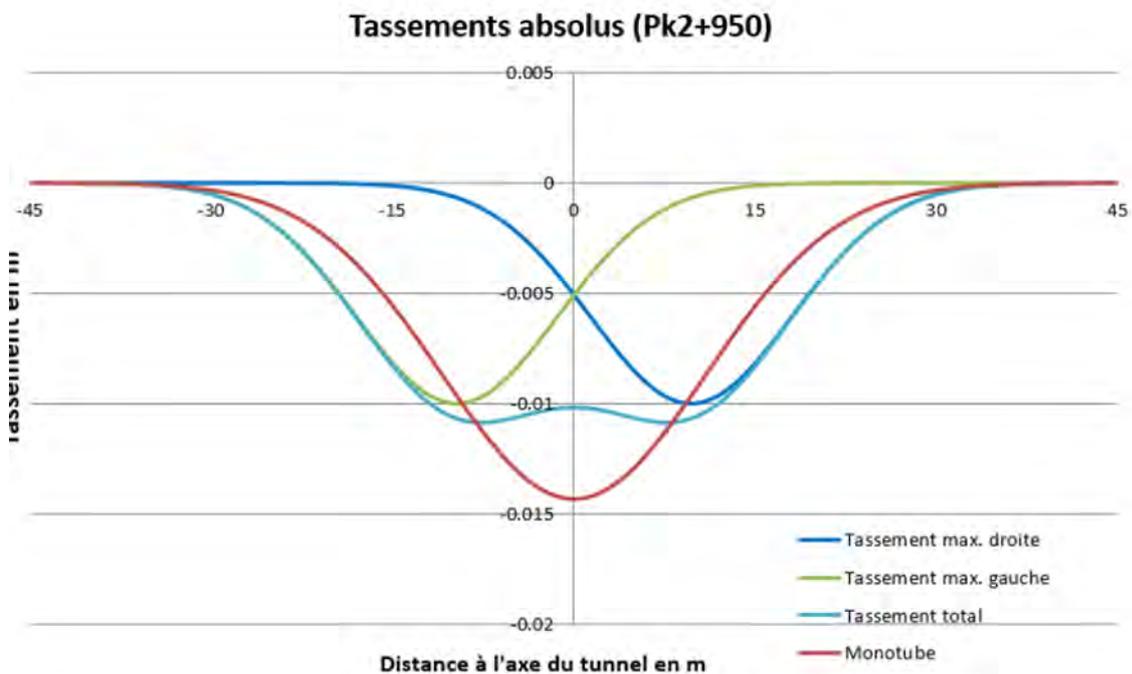


Figure 222 : Résultats des calculs de tassements absolus au droit de la coupe 4 (BMN, 2020)

E. Passage sous la rue Vandeweyer à Schaerbeek



Figure 223 : Localisation de la coupe 5 (BMN, 2020)

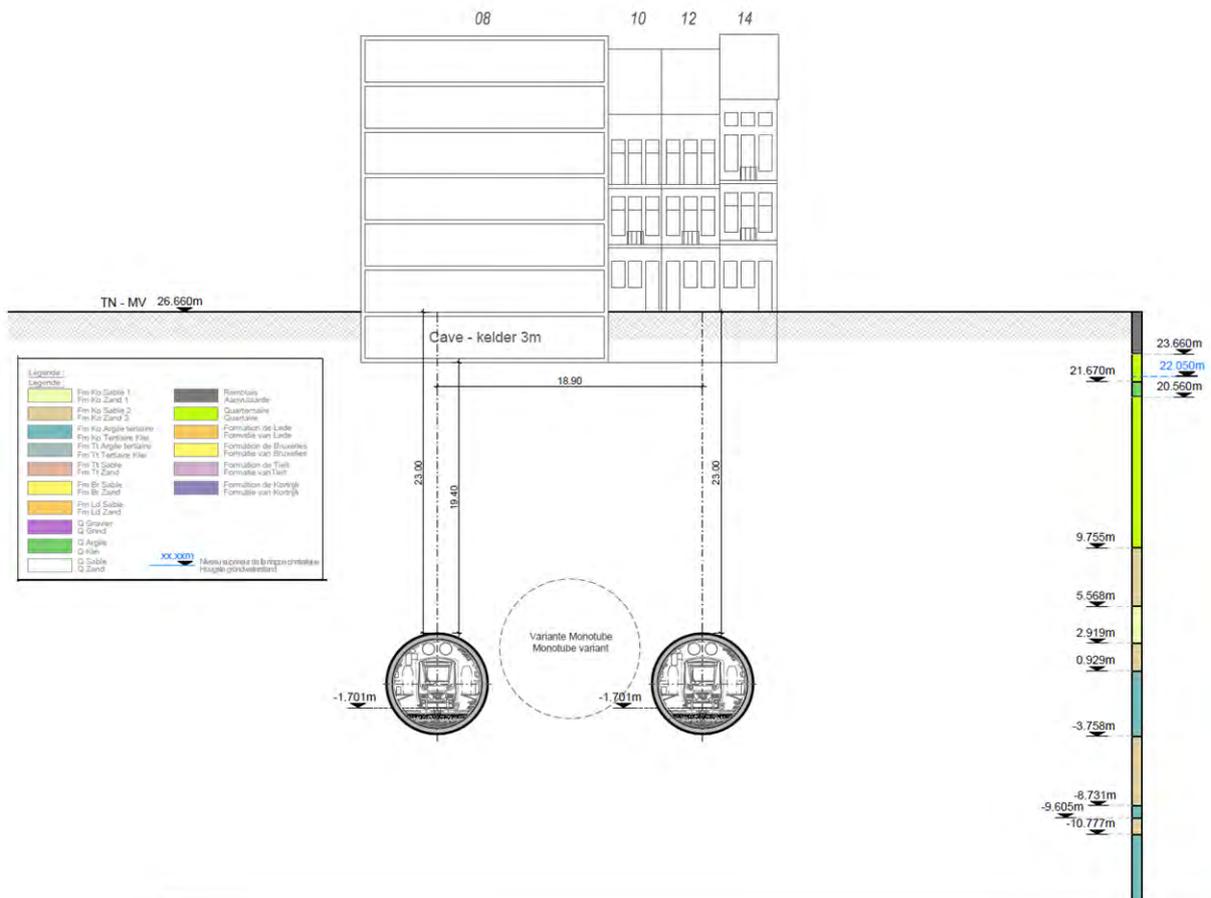


Figure 224 : Position des tunnels (monotube et bi-tube) au droit de la coupe 5 (BMN, 2020)

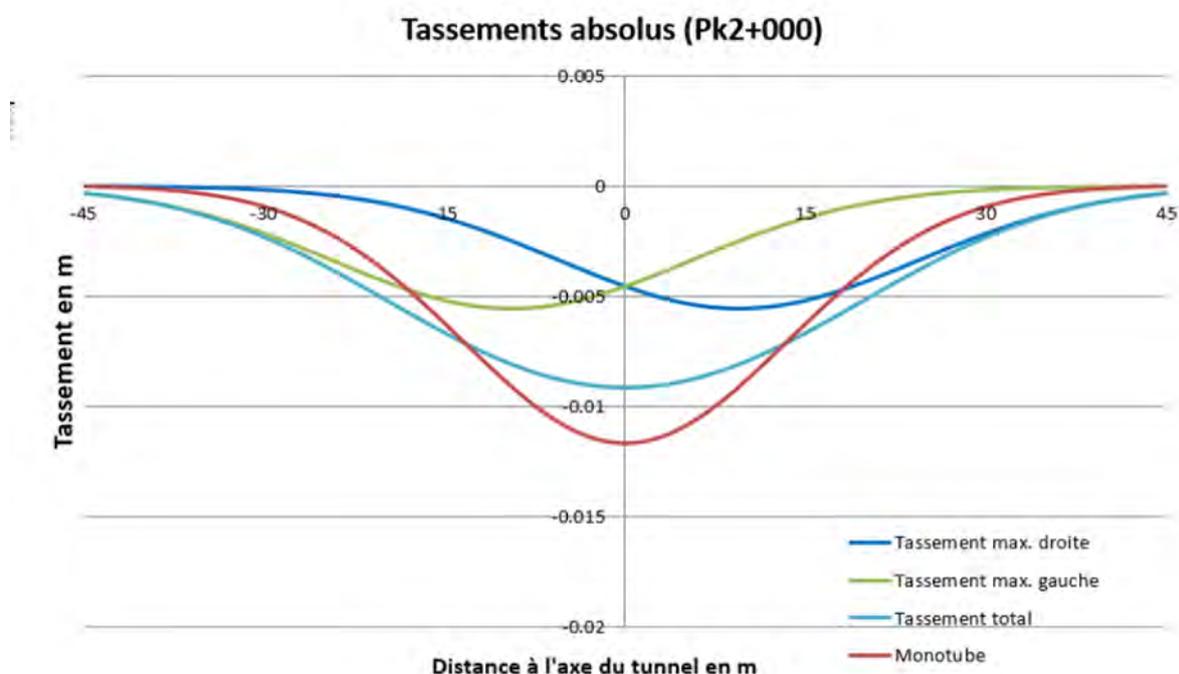


Figure 225 : Résultats des calculs de tassements absolus au droit de la coupe 5 (BMN, 2020)

On constate qu'à l'exception de la coupe 3 sous le Lambermont où les tassements absolus totaux sont similaires pour la solution monotube et bi-tube, les tassements absolus totaux maximum calculés pour la solution bi-tube sont inférieurs à ceux de la solution monotube. Cependant, on constate également que la zone d'influence des tassements est plus étendue pour la solution bi-tube, impactant de ce fait un plus grand nombre de bâtiments.

La zone d'influence totale des 2 tunnels de la solution bi-tube a été déterminé en réalisant une coupe tous les 100 m le long du tracé et en ne prenant en compte que les tassements supérieurs à 1 mm.

La zone d'influence de la solution bi-tube est représentée aux figures suivantes :

Partie 2 : Description de l'alternative de conception (bitube)
6. Analyse des incidences de l'alternative BITUBE et recommandations

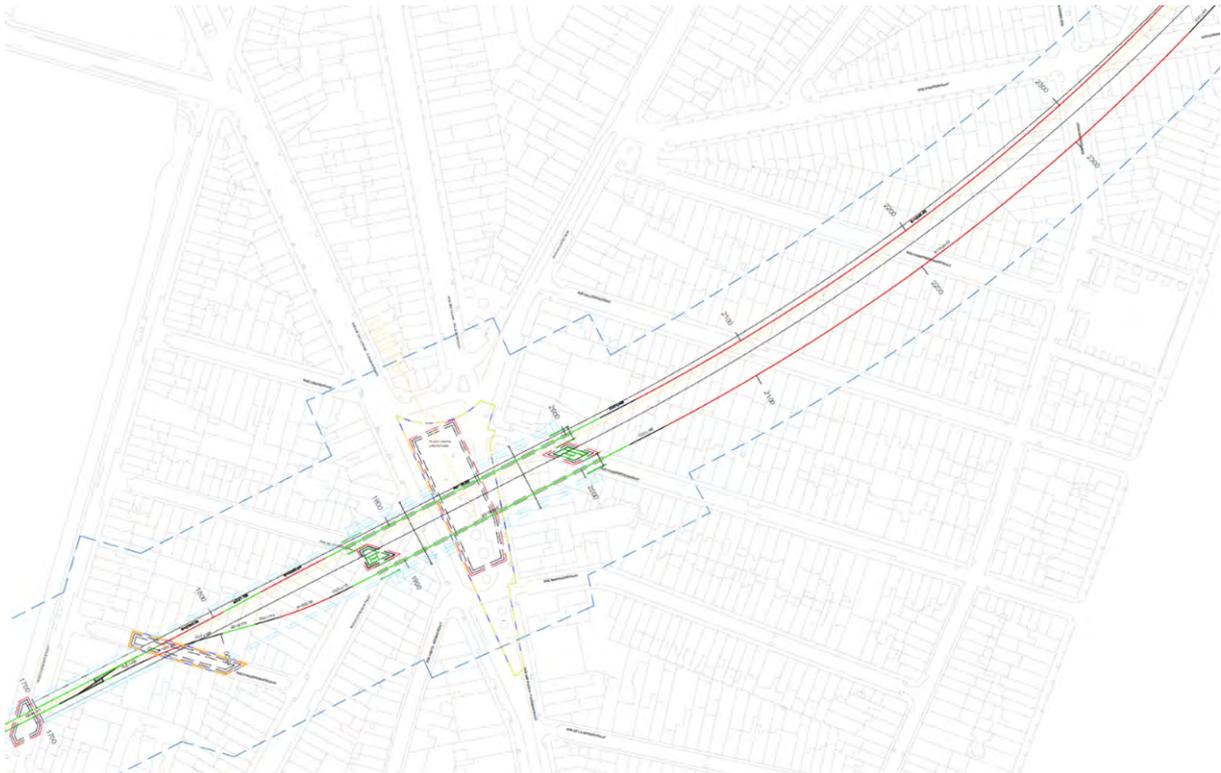


Figure 226 : Zone d'influence de la solution bi-tube au droit de la station Liedts (ligne tiretée bleu)(BMN, 2020)



Figure 227 : Zone d'influence de la solution bi-tube au droit de la station Colignon (ligne tiretée bleu)(BMN, 2020)

Partie 2 : Description de l'alternative de conception (bitube)
6. Analyse des incidences de l'alternative BITUBE et recommandations

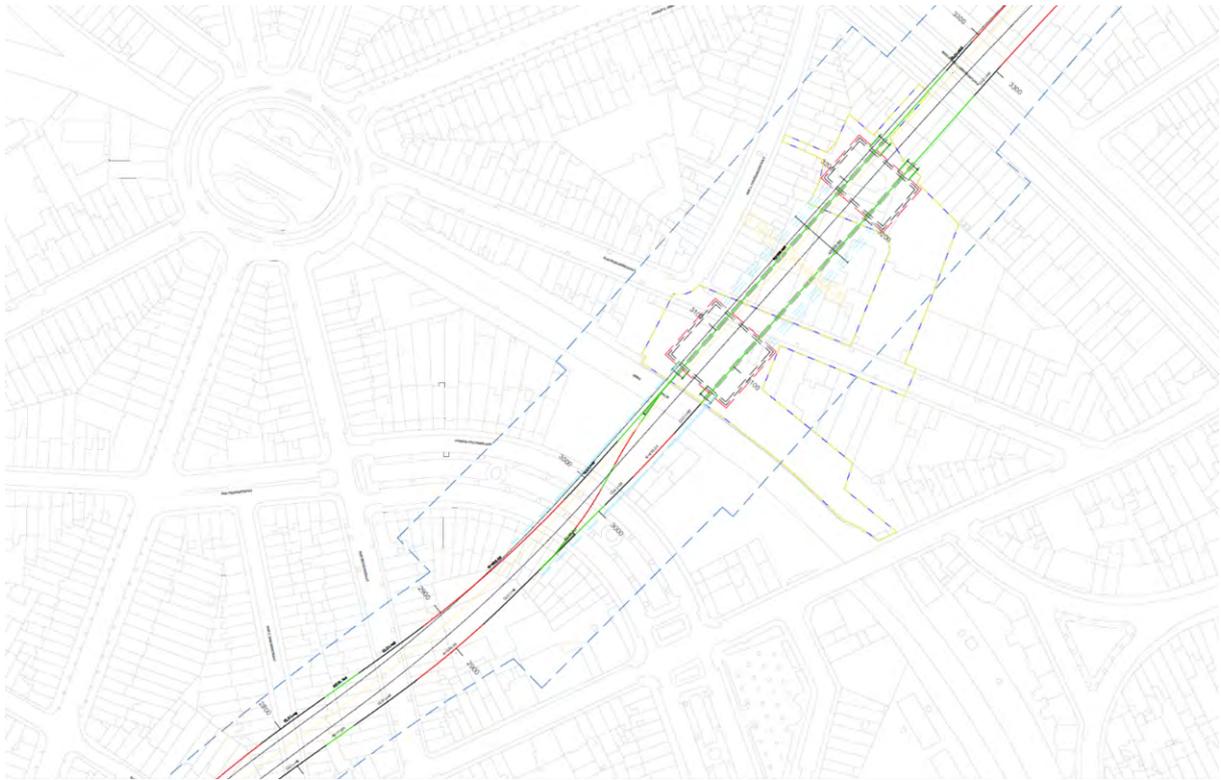


Figure 228 : Zone d'influence de la solution bi-tube au droit de la station VBH (ligne tiretée bleu)(BMN, 2020)



Figure 229 : Zone d'influence de la solution bi-tube au droit de la station Riga (ligne tiretée bleu)(BMN, 2020)

Partie 2 : Description de l'alternative de conception (bitube)
6. Analyse des incidences de l'alternative BITUBE et recommandations

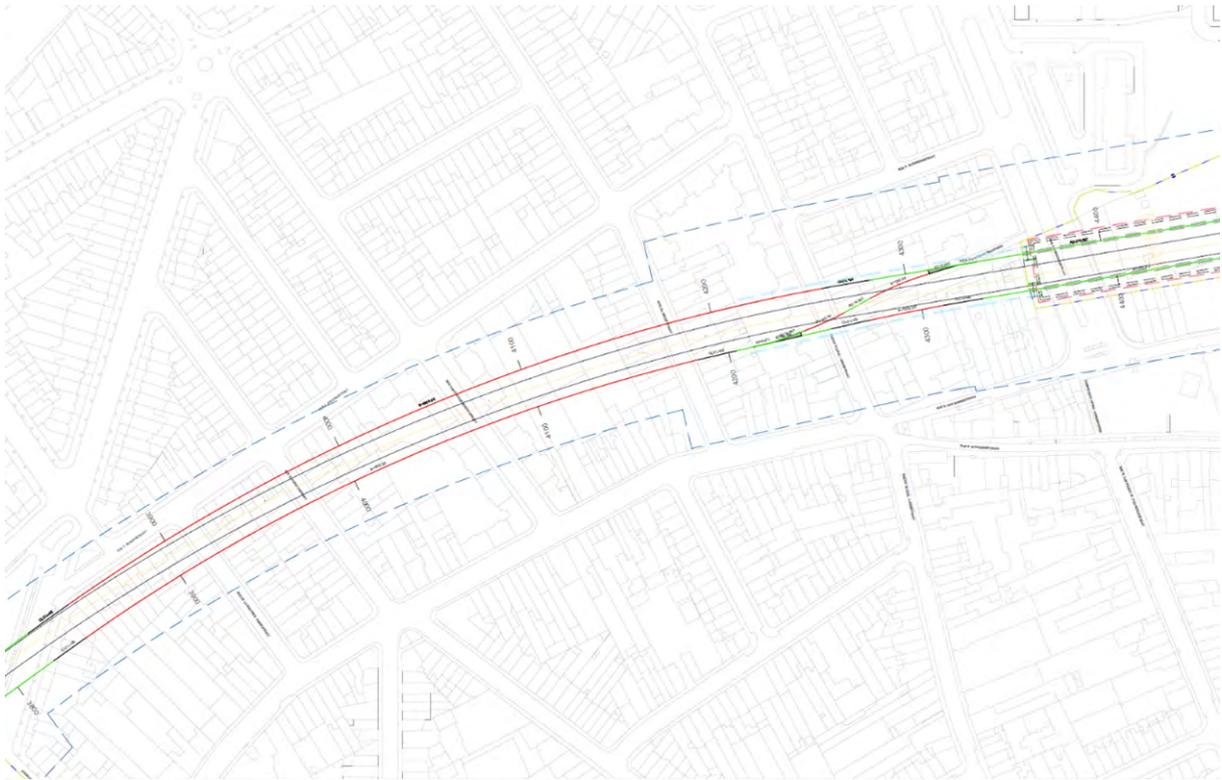


Figure 230 : Zone d'influence de la solution bi-tube au droit de la station Tilleul (ligne tiritée bleu)(BMN, 2020)



Figure 231 : Zone d'influence de la solution bi-tube au droit de la station Paix (ligne tiritée bleu)(BMN, 2020)

Partie 2 : Description de l'alternative de conception (bitube)
6. Analyse des incidences de l'alternative BITUBE et recommandations



Figure 232 : Zone d'influence de la solution bi-tube au droit de la station Bordet (ligne tiretée bleu)(BMN, 2020)



Figure 233 : Zone d'influence de la solution bi-tube vers le dépôt de Haren (ligne tiretée bleu)(BMN, 2020)

6.4.3. Ouvrages de bifurcation

Les ouvrages de bifurcation, ainsi que l'ouvrage de jonction entre le puits P5 et la station Liedts n'ont pas fait l'objet de simulation complémentaire. De ce fait, l'évaluation des tassements induits par ces ouvrages n'est actuellement pas connue.

Cependant, les risques techniques peuvent être maîtrisés. Une fois la congélation mise en place, un système de compensation devra gérer les tassements au droit des bâtiments impactés. La contrainte technique principale sera la réalisation des forages et des galeries au travers des voussoirs du tunnel, ce qui demande un principe de renfort spécifique.

La réalisation de ces ouvrages augmente l'impact de la solution bi-tube vis à vis des tassements.

6.4.4. Recommandations

6.4.4.1. Eaux souterraines

Les recommandations relatives aux aspects **eaux souterraines** décrites pour la solution monotube reste d'application pour la solution bitube.

Dans le cas où la solution bitube serait retenue, les recommandations complémentaires suivantes sont à prendre en considération :

- Effectuer une modélisation 3D complémentaire de la situation bitube en période de hautes eaux (avec pour but maximalisation du diagnostic de remontée) ;
- Effectuer une modélisation 3D complémentaire de la situation bitube en période de basses eaux (avec pour but maximalisation des effets périphériques dus au rabattement) ;
- A posteriori, effectuer une modélisation de retrofitting du modèle tenant compte des observations piézométrique et des chroniques de débits réellement observés après une année d'exploitation.

Ces modélisations complémentaires auront pour but de valider d'affiner les résultats des calculs analytiques effectuées lors de la présente étude.

6.4.4.2. Tassements

Bien que les tassements absolus maximum calculés pour la solution bi-tube soit inférieurs à la solution monotube, ils restent néanmoins non négligeables.

De plus, la zone d'influence est plus importante que pour la solution monotube, surtout au droit des zones de bifurcation.

Les mesures prévues par le demandeur pour la solution monotube pour la prévention des dégâts dus aux tassements et pour la remédiation de ceux doivent être également prévues pour la solution bi-tube.

Outre ces mesures préventives, certains points restent à approfondir et font donc l'objet des recommandations suivantes de la part du chargé d'étude :

6. Analyse des incidences de l'alternative BITUBE et recommandations

- Étude explicite des tassements dus aux travaux d'excavation des boites de bifurcation et de l'ouvrage jonction entre le P5 et la station Liedts: il est recommandé qu'une méthode de calcul approfondie soit mise en œuvre pour estimer l'ampleur des mouvements de terrain lors de la réalisation de ces boites. Cette méthode de calcul (par exemple calcul aux éléments finis) doit pouvoir prendre en compte le phasage détaillé des travaux ;
- Etude explicite des tassements dus à l'élargissement des boites des stations (avec la mise en place d'une ligne d'appuis complémentaire sur le centre du quai) ;
- Une analyse des fondations des bâtiments situés au droit de la zone d'influence des tunnels et des stations ;
- La mise à jour de la liste des bâtiments sensibles qui seraient potentiellement impactés par le projet ;
- La prise en compte de l'impact du rabattement de la nappe dans le calcul des tassements.

6.4.4.3. Tableau de synthèse des recommandations

Thématique :	Recommandations :
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> - Reprendre les recommandations de la solution monotube - Effectuer des modélisations 3D de la solution bitube afin d'évaluer le rabattement, les effets barrage et les débits d'exhaure
Tassements	<ul style="list-style-type: none"> - Reprendre les recommandations de la solution monotube - Réaliser une étude explicite des tassements dus aux travaux d'excavation des boites de bifurcation et de l'ouvrage jonction entre le P5 et la station Liedts - Réaliser une étude explicite des tassements dus à l'élargissement des boites des stations (avec la mise en place d'une ligne d'appuis complémentaire sur le centre du quai) - Réaliser une analyse des fondations des bâtiments situés au droit de la zone d'influence des tunnels et des stations - Effectuer la mise à jour de la liste des bâtiments sensibles qui seraient potentiellement impactés par le projet en solution bitube (pas exactement identique à la solution monotube)

6.5. Faune et flore

Sans objet

6.6. Qualité de l'air

Sans objet

6.7. Energie

Similaire au monotube

6.8. Environnement sonore et vibratoire

6.8.1. Analyse des incidences de l'alternative bitube

Dans l'alternative bitube, le tunnel monotube de 10m diamètre est remplacé par deux tunnels de 6m diamètre. Le tracé reste presque le même. La distance libre entre les deux tubes, en plan horizontal, est de 14m.

Le tunnel bitube (lignes grises) est parfois moins profond par rapport au monotube (lignes jaunes). Par contre, c'est au moins 10m comme indiqué sur les figures ci-dessous (ligne pointillée en mauve), mis à part entre les stations Tilleul et Paix, et alors conforme au critère de profondeur pour les vibrations. L'échelle verticale est de 10m par division.

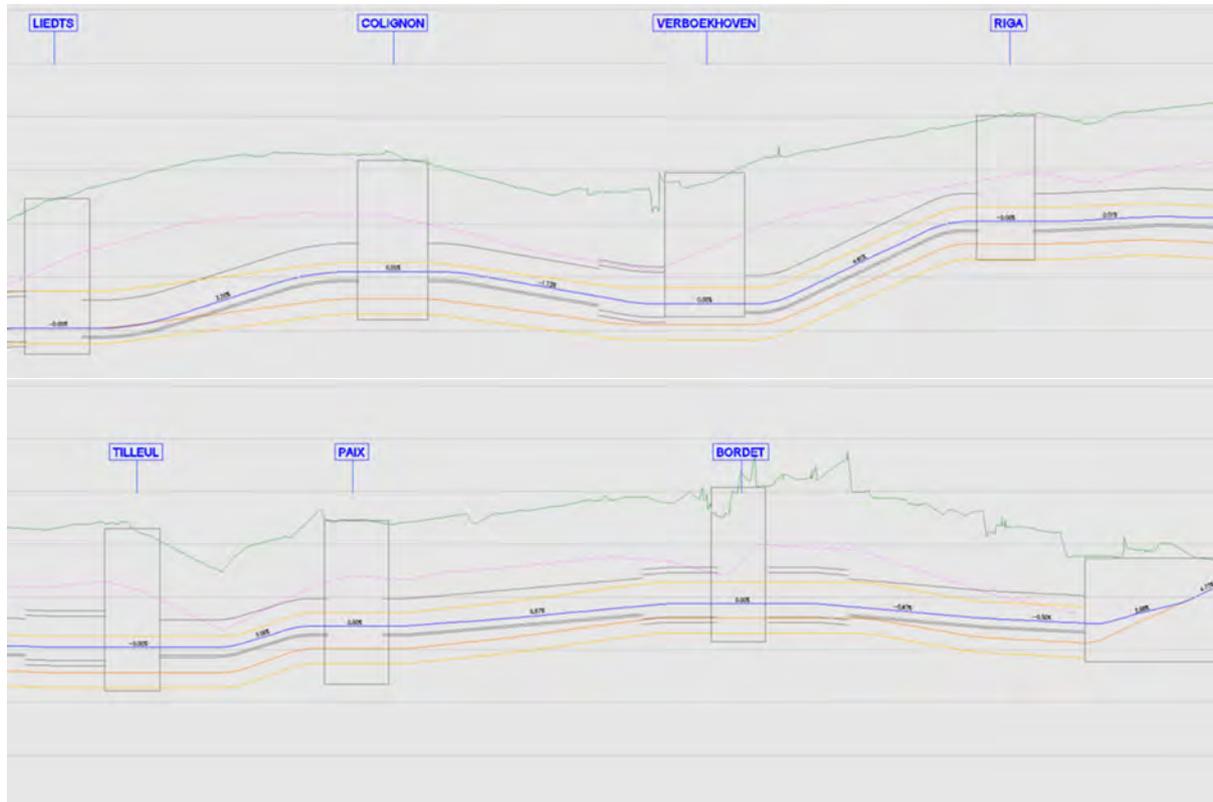


Figure 234: Profondeur du tunnel bitube (BMN, 2020)

Pour le monotube, lorsque deux métros se croisent, l'impact vibratoire au sol est superposé avec une valeur de 3dB. Pour l'alternative bitube, l'augmentation sera inférieure à 3dB car le décalage entre les deux voies est plus large. Cette augmentation reste encore acceptable dans la marge des 10m profondeur du tunnel, même quand deux métros se croisent sur un aiguillage, ce qui sera assez rare. Le croisement en station se fera à des vitesses réduites et les impacts sonores et vibratoires dus aux croisements seront donc limités pour cette alternative.

6.8.2. Recommandations

Les recommandations tant en phase d'exploitation qu'en phase chantier sont les mêmes que pour la solution monotube.

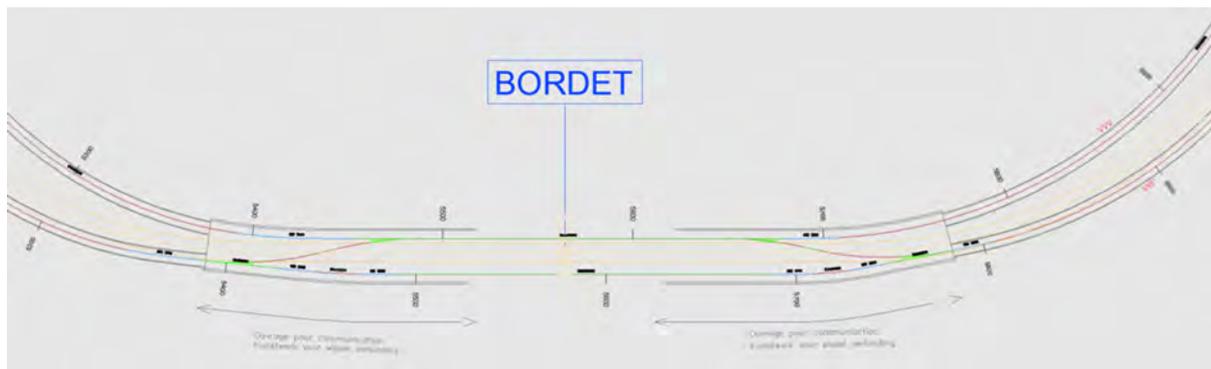


Figure 235: Détail aiguillages bitube à station Bordet (BMN, 2020)

Néanmoins, dans l'alternative bitube, il y a plusieurs aiguillages entre les deux tunnels à l'intérieur de l'ouvrage pour communication aux stations (Bordet x 2, Tilleul x 1, Verboekhoven x 1). N'oublions pas le penalty de 10dB pour les excitations des appareils de voie (les chocs) par rapport aux vibrations générées par la rugosité dans le contact rail-roue où la marge vibratoire est alors 10 dB plus élevée.

En ce qui concerne le tunnelier pendant les travaux, les deux tunnels seront construits avec le même type de tunnelier avec un diamètre plus faible, ce qui pourra limiter l'impact vibratoire dans l'hypothèse où les deux tunnels ne sont pas creusés simultanément au même endroit.

Ceci étant dit, il n'est pas attendu que les vibrations, tant pendant les travaux qu'en exploitation sera plus importante ou dépassera plus les seuils vibratoires dans l'alternative bitube que dans le projet monotube.

6.9. Être humain

6.9.1. Sécurité objective

6.9.1.1. Prévention incendie

B.1 – Compartimentage

Pas de changement par rapport au monotube.

B.2 - Résistance structurelle au feu

Pas de changement par rapport au monotube.

B.3 - Détection incendie et principes des alertes

Pas de changement par rapport au monotube.

B.4 - Gestion de contrôle d'accès

L'étude de BMN doit pourvoir assurer en configuration bitube, le maintien de la protection au domaine automatique de différentes intrusions.

B.5 - HVAC / surpression / désenfumage

Normalement il y aura un dédoublement des systèmes mais cette partie n'a pas été traité.

B.6 – Sprinklage

Néant.

B.7 -Extinction au gaz

Pas de système d'extinction au gaz dans les tunnels en monotube et en bitube.

B.8 - Équipements de 1^{er} secours

Pas de changement par rapport au monotube.

B.9 - Alimentation de secours

Les commentaires et remarques qui ont été cités en configuration monotube restent d'application. Étant donné l'extension du tunnel et la nouvelle architecture des stations, il y a lieu de réviser ou revoir le bilan de puissance de l'ensemble des équipements à secourir ainsi que l'étude de distribution et d'alimentation de ces équipements à partir du TGBT secours. Les contraintes liées à la pose des câbles doivent être analysées. La pose des câbles secours doit être conforme au RGIE. Une attestation de conformité de ces installations devra être transmise en fin de chantier.

B.10 - Accès des services de secours / ascenseurs pompiers

L'accès des services de secours se fera de la même façon qu'en configuration monotube.

B.11 – Signalisation

Pas de changement par rapport au monotube.

B.12 – réaction au feu

Pas de changement par rapport au monotube.

6.9.1.2. Evacuation d'urgence /alarme

A.1. Paramètres ASET pour l'alternative de Tunnel bitube

Dans le chapitre suivant, les paramètres particuliers du tunnel Bitube sont décrites.

Domaine, géométrie et maillage :

La géométrie est basée sur les info fournies du tunnel VBH - Riga

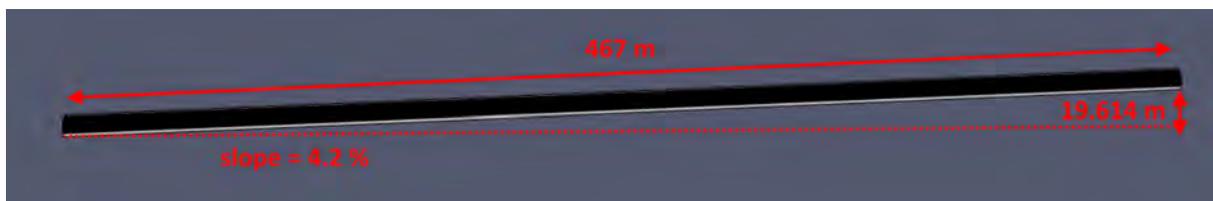


Figure 236: Vue globale du modèle de tunnel bitube (Tractebel, 2020)

Le tunnel est long de 467 mètres et présente une pente de 4,2 %. L'ensemble du tunnel est maillé à 0,25 m avec un nombre total de 3.686.400 cellules.

Il est modélisé de manière à ce que la pente et le tracé circulaire soient approximés par une séquence de blocs de construction avec une petite variation de position.

- Le débit de soufflage

Le système d'évacuation des fumées est composé de 16 boosters au long du tunnel à partir de 20 m avec un espacement de 60 m soufflant chacun 1 m/s pour envoyer la fumée à l'extrémité du tunnel où elle sera extraite par un extracteur dont les caractéristiques sont renseignées dans le tableau ci-dessous.

Ces boosters sont en réalité circulaires mais modélisés sous forme carrée tout en respectant la même surface (1,5625 m²) afin d'utiliser de manière optimale les cellules de calcul du modèle.

Localisation	Hauteur par rapport au sol (m)	Nombre de points de soufflage	Dimensions	Surface par point de soufflage (nette m ²)	Surface totale (nette m ²)	Débit total (m ³ /s)
Entrée Station Riga	2,866	16	0,75x0,75	0,5625	9	9

Tableau 74 Débit de soufflage dans le tunnel bitube

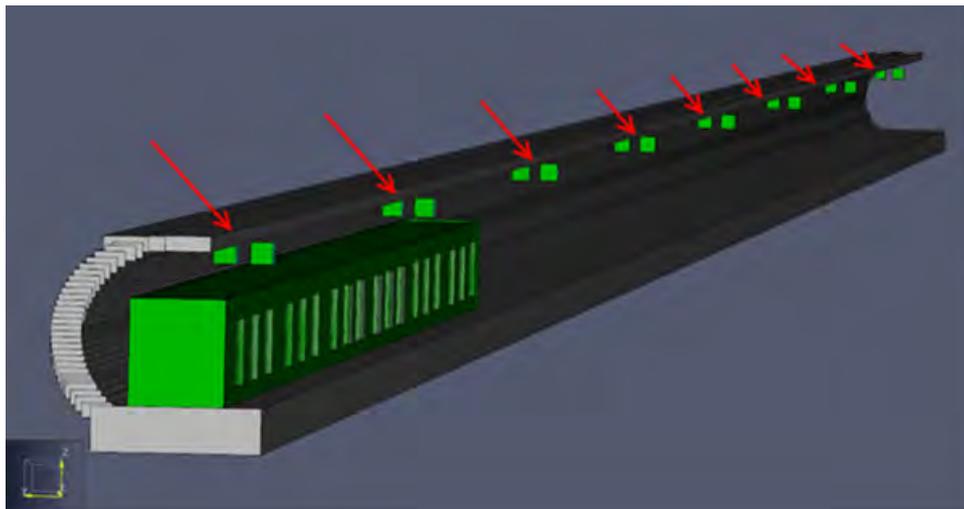


Figure 239 : Position des boosters dans le tunnel bitube (Tractebel, 2020)

A.2. Résultat des simulations RSET

A.2.1. Présentation des résultats

Pour chacune des simulations, le tableau ci-dessous donne le résultat pour les temps suivants :

- Le temps d'évacuation des quais (Tq)
- Le temps d'évacuation de la station (Tt)
- Le temps d'immobilisation des occupants (Ti)

Le tableau ci-dessous donne le résultat des temps d'évacuation pour un foyer :

T RSET = T det + T warn + T evac		TUNNEL BITUBE SANS RAMEAU	TUNNEL BITUBE AVEC RAMEAU
		T RSET	T RSET
Temps d'évacuation du tunnel	Tq	Environ 15 minutes (15,2)	Environ 9 minutes (8,23)

Tableau 75 : Temps maximum d'évacuation du tunnel, avec T det + T warn

Les simulations complètes ASET / RSET ont été présentées et approuvées par le Comité d'accompagnement de l'étude d'incidences.

Les images ci-dessous reprennent, pour chaque simulation, des captures d'écran aux temps suivants :

- Début de la simulation
- Fin de la simulation (dernier occupant du tunnel)

Légende des occupants à évacuer dans les figures :

Personne à mobilité réduite (PMR) : vert

Personnes valides : rose

A.2.2. Alternative de Tunnel bitube sans rameau

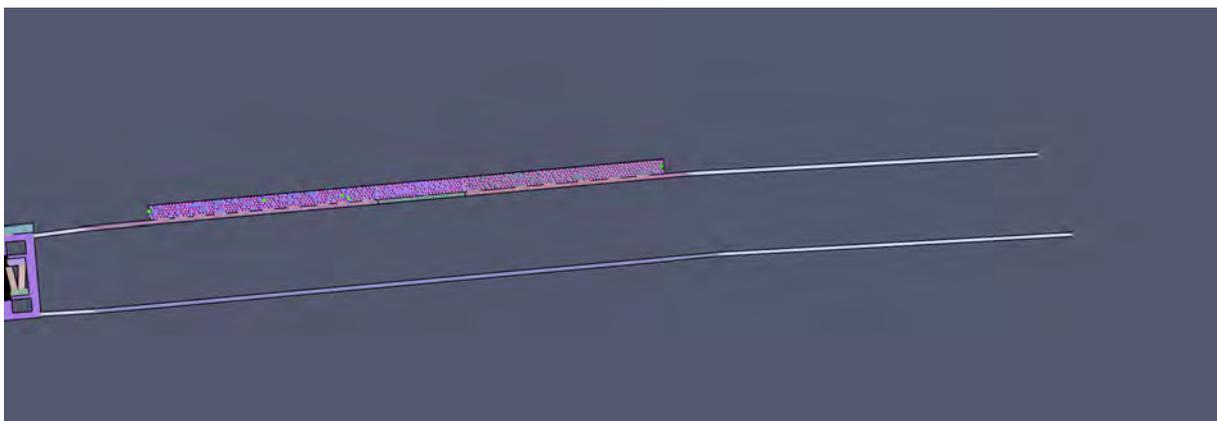


Figure 240 : simulation RSET bitube sans rameau à 0 sec. (Tractebel, 2020)

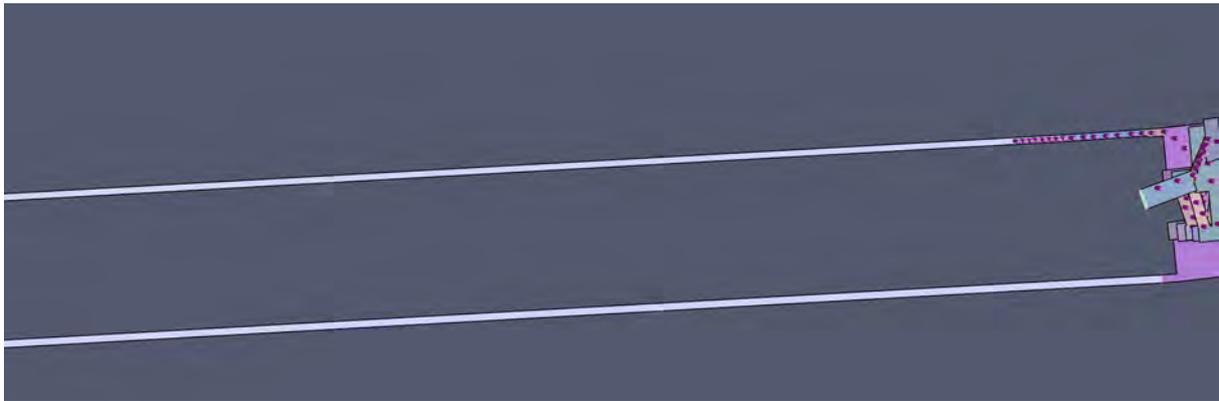


Figure 241 : simulation RSET bitube sans rameau à 900 sec. (Tractebel, 2020)

L'évacuation du tunnel prend fin à 15 min 02 sec. La différence par rapport à la simulation monotube est la présence d'un PMR en tête de groupe qui ralentit la progression et donc l'évacuation du tunnel. Ce paramètre (position du PMR) est aléatoire et sera toujours différent d'une simulation à l'autre. Théoriquement, et au vu des paramètres qui sont identiques entre monotube et bitube (pente, distance, largeur du chemin d'évacuation, etc...) le temps d'évacuation entre monotube et bitube sans rameau doit être pratiquement identique.

A.2.3. Alternative de Tunnel bitube avec rameau

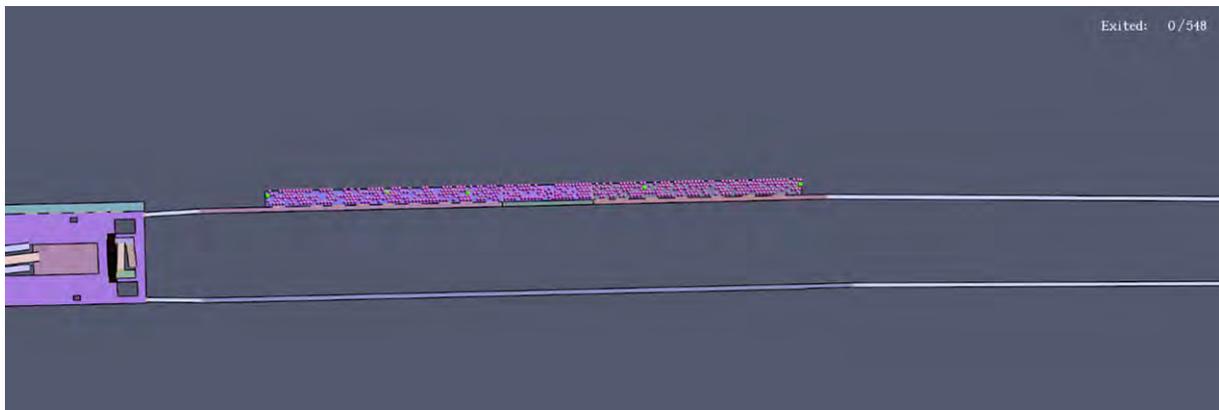


Figure 242 : simulation RSET bitube avec rameau à 0 sec. (Tractebel, 2020)

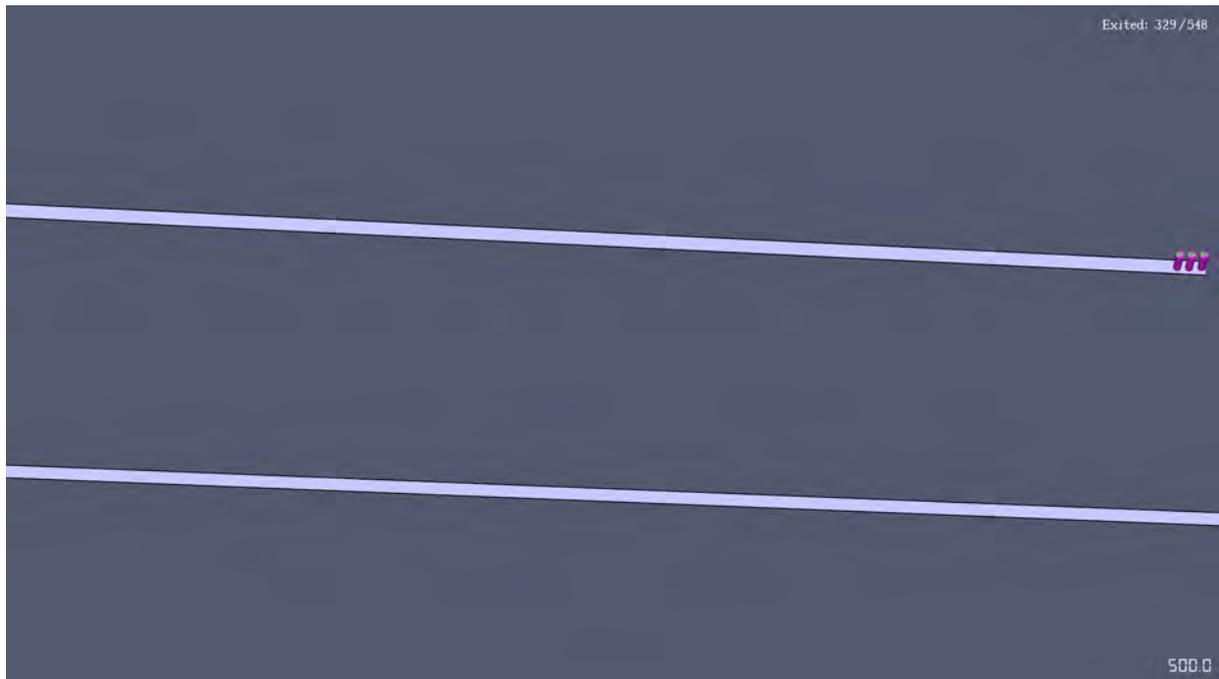


Figure 243 : simulation RSET bitube avec rameau à 500 sec. (Tractebel, 2020)

L'évacuation du tunnel prend fin à 8 min 23 sec.

A.2.4. Résultat des simulations ASET pour l'alternative de tunnel bitube

- Evolution de la courbe HRR (en kW)

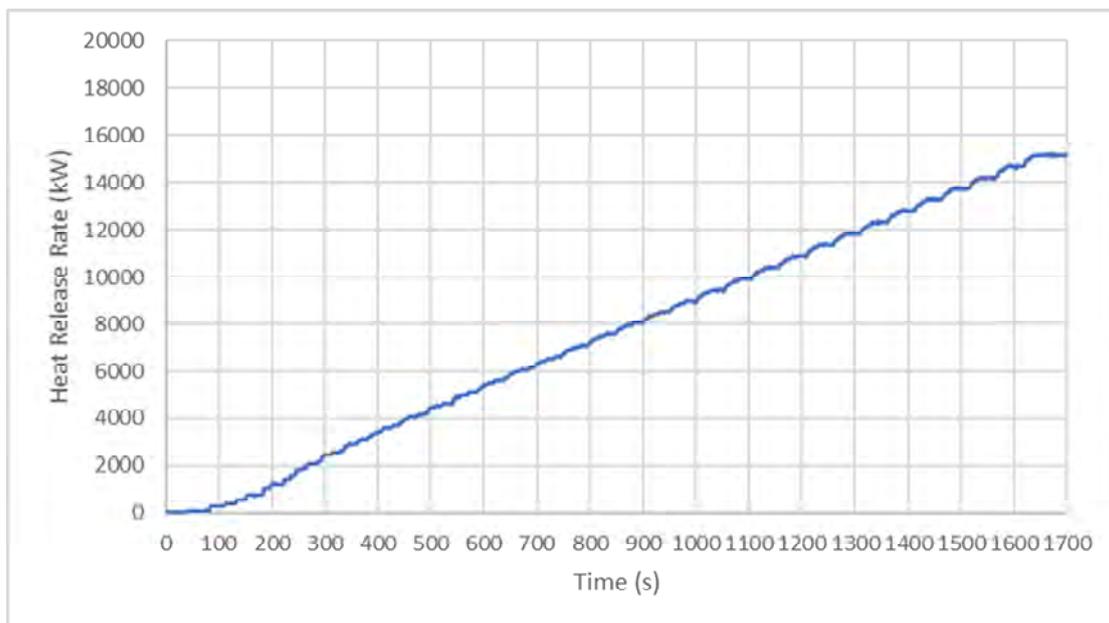


Figure 244 : Evolution HRR - Tunnel bitube (Tractebel, 2020)

La puissance du feu augmente au fur et à mesure dans le temps jusqu'à atteindre 15 MW.
On constate que le développement du feu suit l'hypothèse imposée sur la propagation dans le temps et espace.

- **Niveaux de visibilité dans le tunnel (en m)**

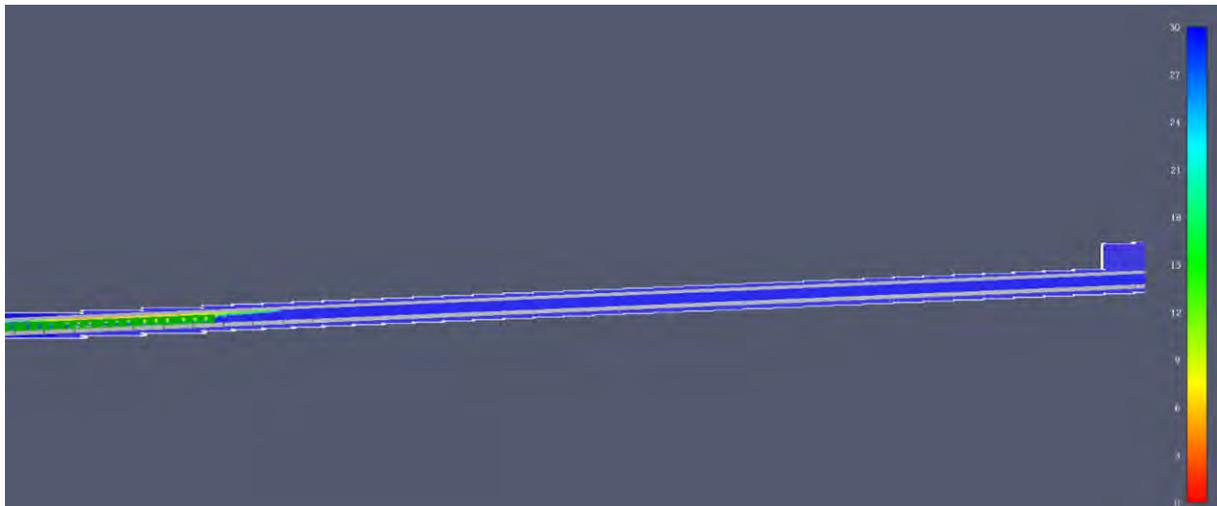


Figure 245 : Visibilité tunnel bitube à t=200 s (Tractebel, 2020)

Le résultat montre qu'à 200 s la visibilité dans la rame de métro est en dessous de la valeur admissible (10 m) et supérieure à 10 m dans le reste du tunnel.

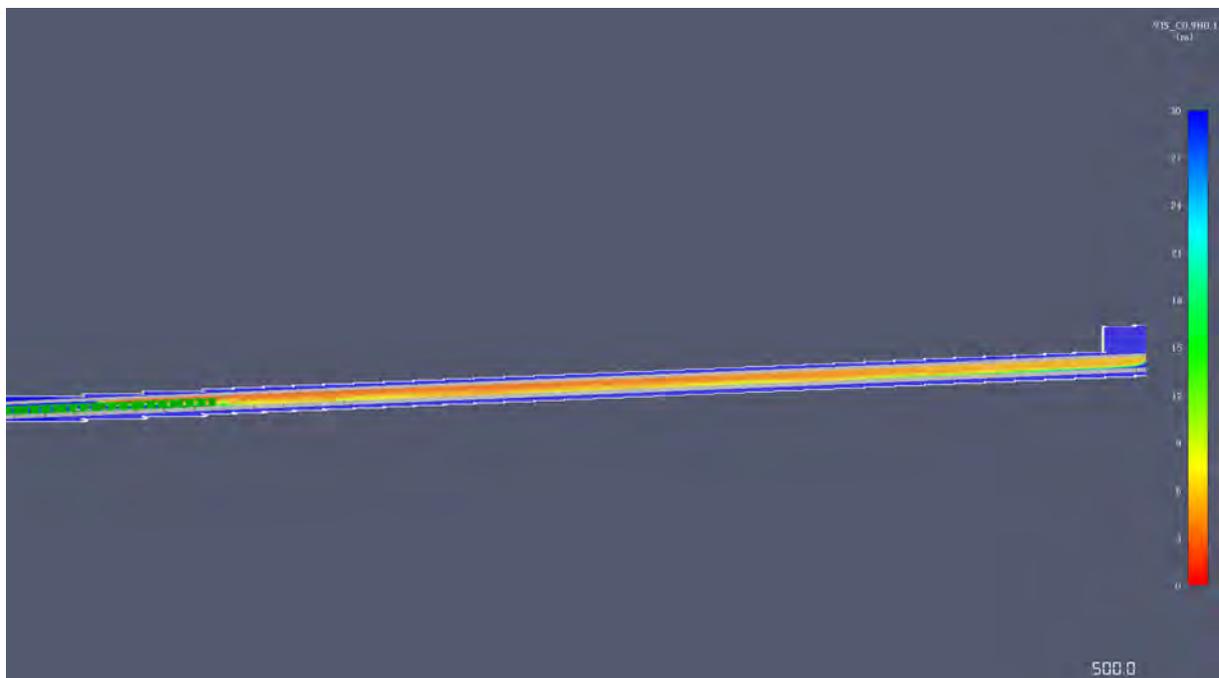


Figure 246 : Visibilité tunnel bitube à t=500 s (Tractebel, 2020)

A partir de 500 s, la visibilité est partout mauvaise car dépassant la valeur admissible qui est de 10 mètre.

- **Niveaux de température dans le tunnel (en °C)**

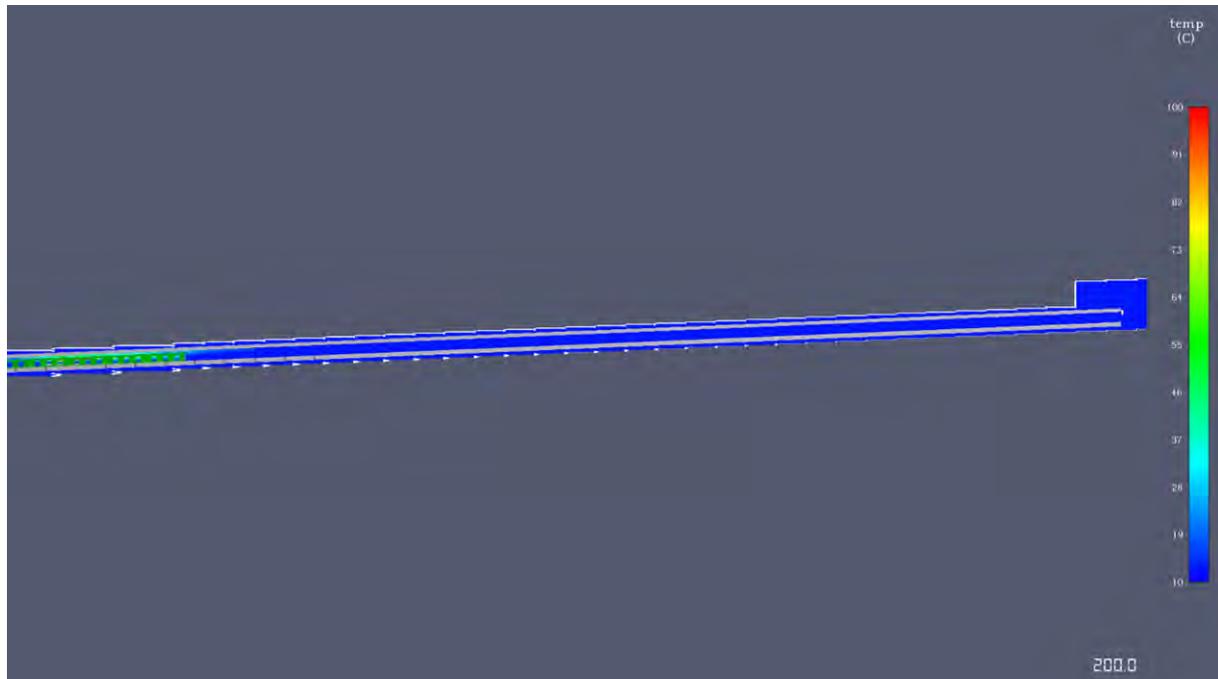


Figure 247 : Température tunnel bitube à t=200 s (Tractebel, 2020)

La figure montre qu'à 200 s, la température dans le tunnel est inférieure à la valeur limite 80°C. Par contre dans la rame en feu, on note une température plus importante (> 80°C) autour du foyer.

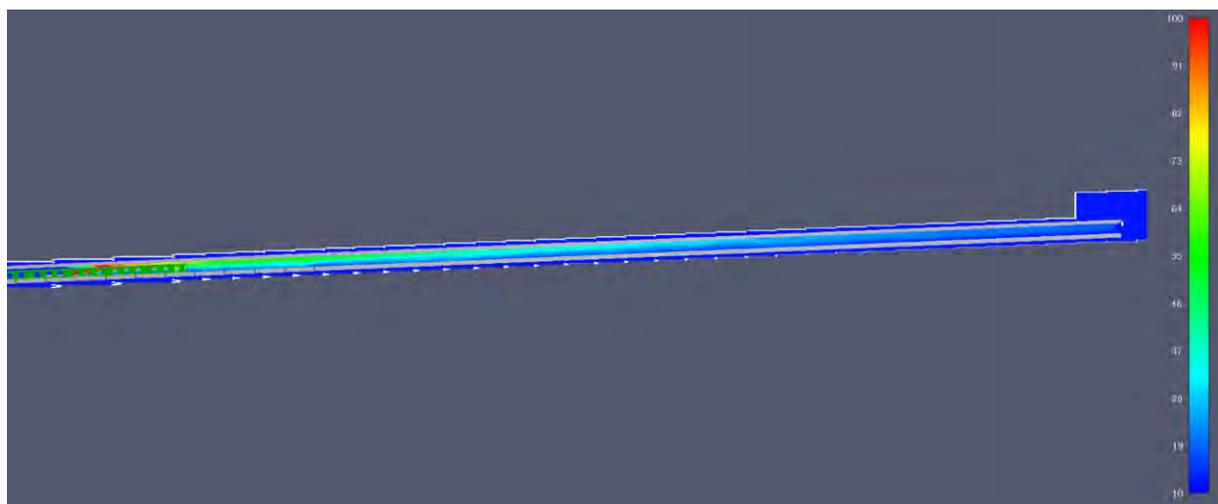


Figure 248: Température tunnel bitube à t=500 s (Tractebel, 2020)

A partir de 500 s, la température est bonne dans le tunnel sauf au niveau de la rame au tour du foyer .

- **Niveaux de flux radiatif dans le tunnel (en kW/m²)**

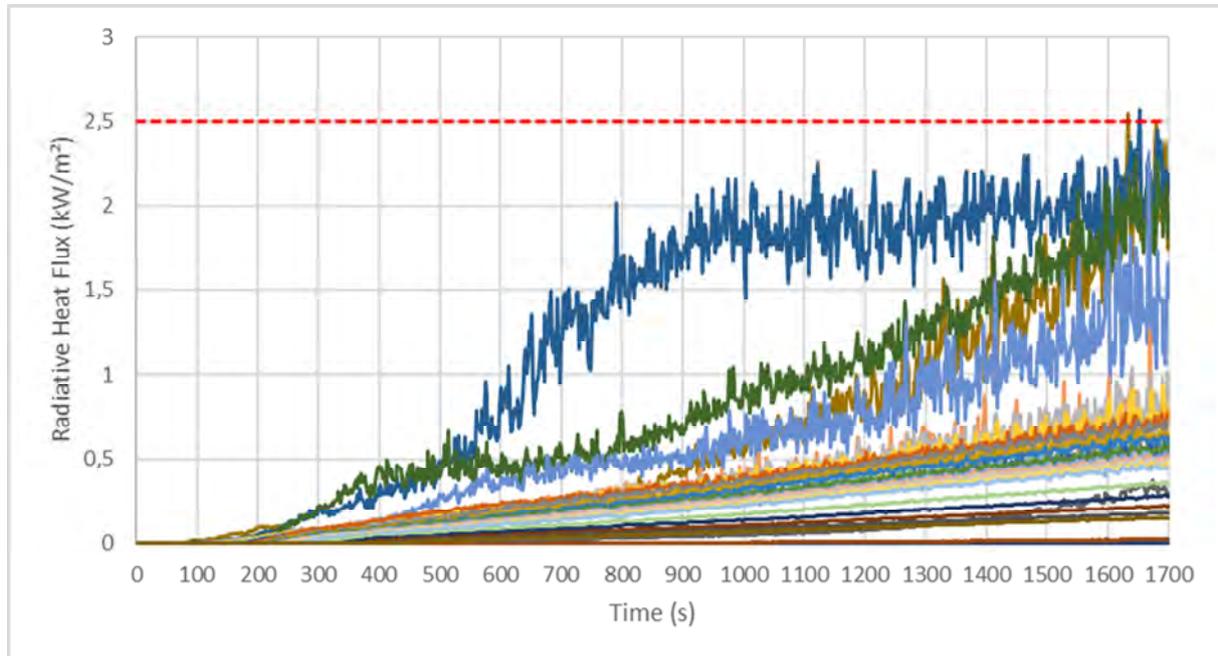


Figure 249 : Flux radiatif tunnel bitube (Tractebel, 2020)

Le résultat montre que seuls deux capteurs dépassent la valeur limite du flux radiatif, ceci est dû à leur localisation tout près du foyer et des flammes. Le reste des capteurs au niveau du quai montre que le flux radiatif est inférieur à la valeur limite de 2,5 kW/m².

A.3. Interprétation des simulations ASET / RSET

A.3.1. Tunnel bitube sans rameau

Ce chapitre compare les résultats ASET / RSET du tunnel en version bitube au niveau du trottoir d'évacuation.

Un seul trottoir est considéré pour l'évacuation car le passage des rails au bout du tunnel pour le trottoir en intérieur de station n'est pas sécurisé.

Le moment où les occupants atteignent le critère de visibilité est de +/- 300 sec. au droit de la rame et en avant de la rame.

Les images ci-dessous reprennent à 300 sec. la visibilité des fumées prises en coupe verticale au niveau du trottoir ainsi que les personnes encore présentes sur le trottoir.

Par contre, **les occupants descendants vers la station proche arrivent tous en sécurité quand ils quittent le tunnel.**

Partie 2 : Description de l'alternative de conception (bitube)
6. Analyse des incidences de l'alternative BITUBE et recommandations

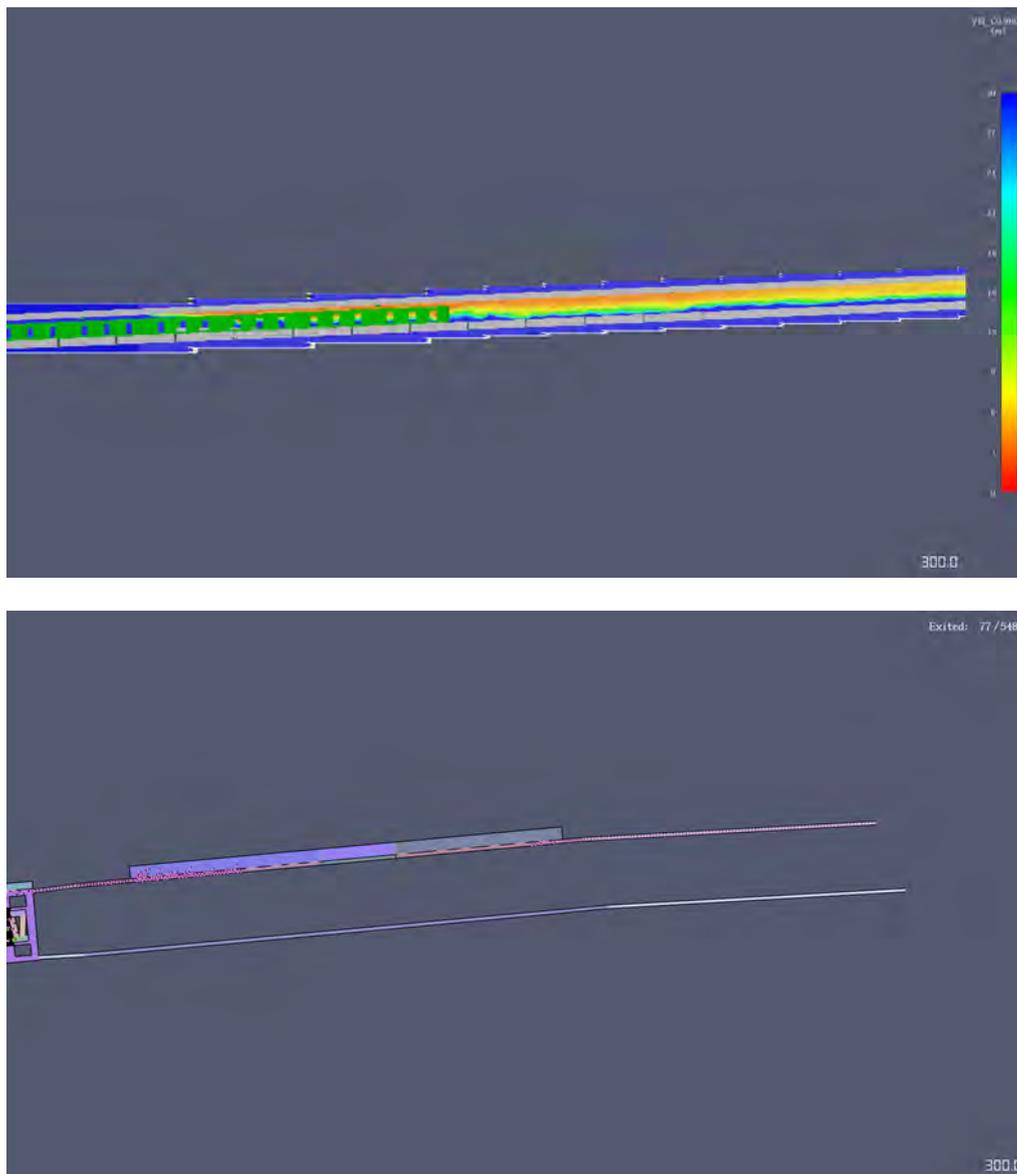


Figure 250 : comparaison ASET / RSET du trottoir monotube sans rameau à 300 sec.
(Tractebel, 2020)

A.3.2. Tunnel bitube avec rameau

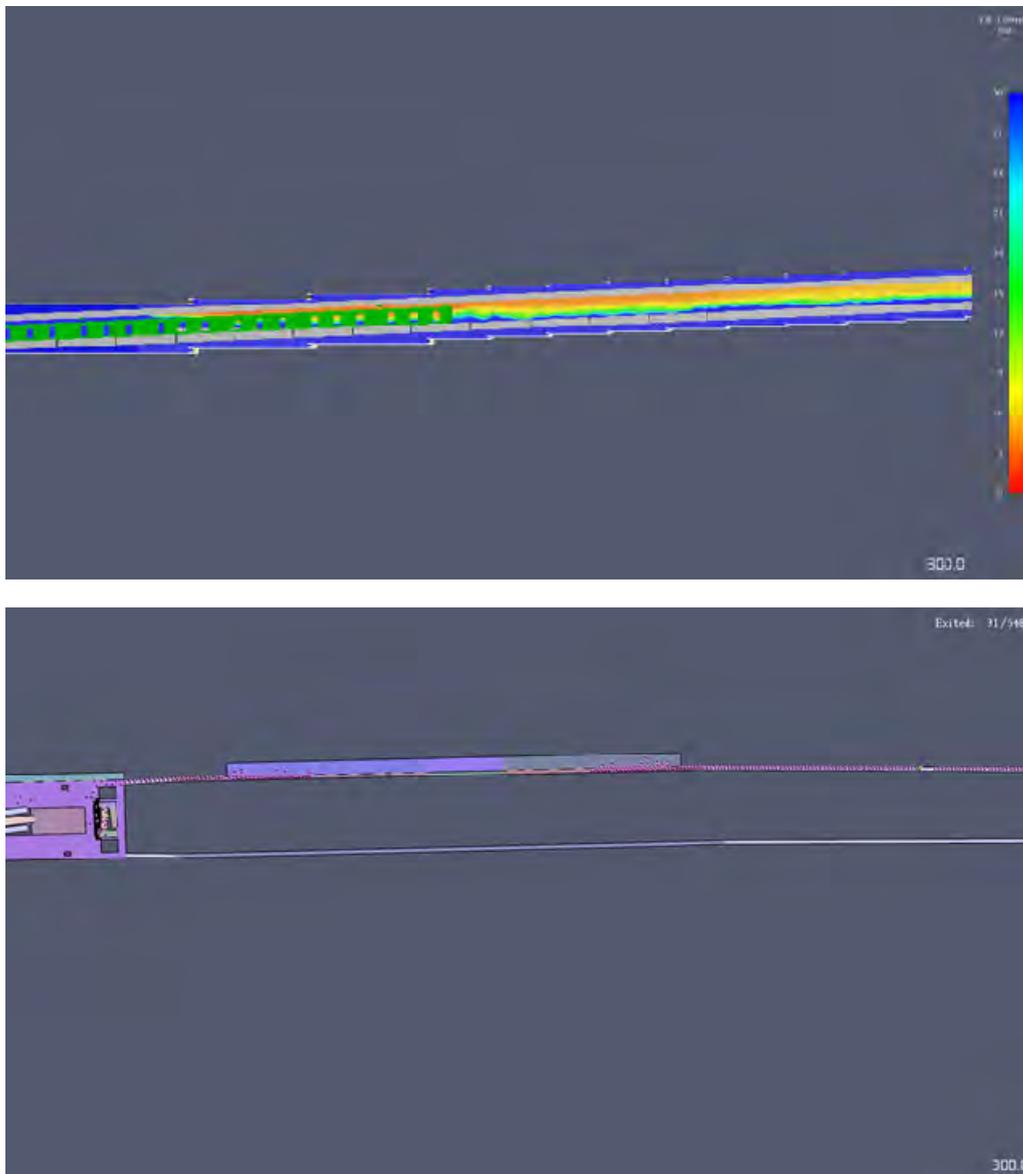
Ce chapitre compare les résultats ASET / RSET du tunnel bitube au niveau du trottoir d'évacuation.

Un seul trottoir est considéré pour l'évacuation car le passage des rails au droit du rameau n'est pas sécurisé.

Le moment où les occupants atteignent le critère de visibilité est de +/- 300 sec. au droit de la rame et de +/- 400 sec. en avant de la rame.

Les images ci-dessous reprennent à 300 sec. la visibilité des fumées prises en coupe verticale au niveau du trottoir ainsi que les personnes encore présentes sur le trottoir.

Par contre, les occupants descendants vers la station proche arrivent tous en sécurité quand ils quittent le tunnel.



**Figure 251 : comparaison ASET / RSET du trottoir monotube avec rameau à 300 sec.
(Tractebel, 2020)**

A.3.3. Comparaison des simulations ASET / RSET pour les autres stations

Les simulations effectuées dans le tunnel Riga / Verboekhoven sont représentatives pour toutes les stations concernant les occupants de la rame.

Pour les occupants du trottoir, les simulations effectuées dans le tunnel Riga / Verboekhoven sont représentatives pour les stations ayant une seule direction de désenfumage, à savoir :

- P5 / Liedts
- Tilleul / Paix
- Bordet / P0

Pour les occupants du trottoir des autres stations, une extrapolation des résultats de ces simulations permet de considérer que les 400 sec de temps de sécurité ne permettent pas d'atteindre le bout du tunnel.

A.4. *Comparaison des configurations monotube / bitube*

Pour les tunnels, les résultats des configurations monotube et bitubes sont comparables car les occupants sont atteints par les fumées dans tous les cas à temps équivalent à +/- 300 sec. De même, pour la configuration avec rameau du tunnel bitube, les occupants n'arrivent pas au rameau situé au milieu du tunnel sans être atteints par les fumées.

6.9.1.3. **Conclusion**

Concernant **l'alternative bitube**, le diamètre du tunnel est évidemment un facteur de différenciation par rapport au projet, ainsi que la présence ou pas (voir simulations) de rameaux permettant de passer plus rapidement en zone 'safe' en milieu de section de tunnel.

Avec l'accord du Comité d'accompagnement, **la norme ISO 16738 a donc été appliquée pour les simulations ASET/RSET de cette étude**. La norme ISO 16738 inclut notamment la gestion des comportements humains en cas d'incendie. La simulation ASET/RSET a été réalisée en considérant des conditions très conservatrices, voire extrêmes :

- La procédure d'évacuation de la STIB requiert que si un incident se produit dans une rame, cette rame rejoigne une station. Il est déconseillé d'arrêter une rame en feu dans un tunnel, surtout si ce tunnel n'a qu'un seul sens de désenfumage et que la position du feu oblige une partie des occupants à évacuer la longueur totale du tunnel. Le fait que la rame reste bloquée entre deux stations constitue donc le pire des cas de figure. C'est cette configuration qui a été simulée.
- Nous supposons que la charge au feu de la rame est de 15 MW après proposition et validation par le Comité d'Accompagnement. Il faut noter qu'une puissance thermique de 15 MW est très conservative pour du matériel récent. Le chargé d'étude recommande au demandeur de convenir avec le SIAMU d'une valeur qui soit suffisamment sécurisante sans générer de surcoûts démesurés. Si nécessaire, il est recommandé de procéder à un test de combustion en conditions réelles (en partenariat avec la STIB)
- Le tunnel « worst case » est parmi les plus longs et ne permet qu'un seul sens d'évacuation de fumées avec une forte pente. Pour cette analyse en accord avec le Comité d'Accompagnement, c'est donc le tronçon entre Verboekhoven et Riga qui a été retenu. En effet, ce tunnel de 467 mètres de long a une pente de 4,2 % et un seul sens de désenfumage.
- Nous considérons que 548 personnes, dont des PMR, sont dans la rame et que le foyer de l'incendie se déclare au centre de la rame, forçant la moitié des passagers à se diriger vers la station la plus lointaine, à 467 mètres, en montée à 4,2%

Concernant les incidences de l'alternative bitube **sans rameau** d'évacuation, au vu des paramètres qui sont identiques entre monotube et bitube (pente, distance, largeur du chemin d'évacuation, etc...) le temps d'évacuation entre monotube et bitube sans rameau est pratiquement identique.

Par contre la simulation indique que la **présence d'un rameau d'évacuation** en alternative bitube est un avantage puisque le temps d'évacuation passerait à 8 min.

L'analyse montre qu'importe la configuration (monotube, bitube avec ou sans rameaux), si un feu se déclare dans la rame, la sécurité des occupants remontant vers la station la plus éloignée n'est pas assurée dans les conditions actuelles de simulation.

Pour la configuration avec rameau du tunnel bitube, les occupants n'arrivent pas au rameau situé au milieu du tunnel sans être atteints par les fumées.

Il faudra procéder, dans le cadre de l'élaboration du projet amendé, à la réalisation des simulations ASET/RSET définies par la norme ISO 16738 en prenant en compte les paramètres approuvés au préalable par le SIAMU. Dans le cas où les simulations montrent que la sécurité des occupants n'est pas assurée, des solutions infrastructurelles, procédurales ou équipementières devront être proposées et validées par le SIAMU.

6.9.1.4. Recommandations

Seules les recommandations différentes par rapport au projet monotube sont reprises. En matière de prévention incendie, nous recommandons de prendre en compte les remarques suivantes :

- Gestion de contrôle d'accès : Le demandeur doit pourvoir assurer en configuration bitube, le maintien de la protection au domaine automatique de différentes intrusions.
- HVAC / surpression / désenfumage. Les systèmes doivent être dédoublés.
- Dans le cas d'un tunnel bitube sans rameau, il est recommandé de permettre une sortie sécurisée au bout du tunnel afin de permettre une évacuation par les 2 trottoirs de part et d'autre de la voie.
- Une augmentation de la vitesse des boosters (actuellement calibrée à 1 m/s) augmentera la performance du désenfumage. La vitesse devra être calibrée pour permettre une évacuation des personnes sans que les fumées ne les atteignent.

6.10. Microclimat

Sans objet

6.11. Déchets

Sans objet

voir livres stations, livres tunnel

7. Tableau de synthèses des recommandations pour le bitube

7.1.1. Mobilité

Idem que projet de base

7.1.2. Urbanisme, aménagement du territoire et patrimoine

Idem que projet de base

7.1.3. Domaines social et économique

Idem que projet de base

7.1.4. Sol, sous-sol et eaux souterraines

Seules les recommandations différentes par rapport au projet monotube sont reprises. Nous recommandons de prendre en compte les remarques suivantes :

Thématique :	Recommandations :
Eaux souterraines	Effectuer des modélisations 3D de la solution bitube afin d'évaluer le rabattement, les effets barrage et les débits d'exhaure
Tassements	Réaliser une étude explicite des tassements dus aux travaux d'excavation des boîtes de bifurcation et de l'ouvrage jonction entre le P5 et la station Liedts Réaliser une étude explicite des tassements dus à l'élargissement des boîtes des stations (avec la mise en place d'une ligne d'appuis complémentaire sur le centre du quai) Réaliser une analyse des fondations des bâtiments situés au droit de la zone d'influence des tunnels et des stations Effectuer la mise à jour de la liste des bâtiments sensibles qui seraient potentiellement impactés par le projet en solution bitube (pas exactement identique à la solution monotube)

7.1.5. Faune et flore

Sans objet dans le cadre de ce livre

7.1.6. Qualité de l'air

Sans objet dans le cadre de ce livre

7.1.7. Energie

Idem que projet de base

7.1.8. Environnement sonore et vibratoire

Incidences	Recommandations
Sonores et vibratoires	<p>Les recommandations tant en phase d'exploitation qu'en phase chantier sont les mêmes que pour la solution monotube.</p> <p>Néanmoins, dans l'alternative bitube, il y a plusieurs aiguillages entre les deux tunnels à l'intérieur de l'ouvrage pour communication aux stations provoquant un penalty de 10dB pour les excitations des appareils de voie.</p> <p>En ce qui concerne le tunnelier pendant les travaux, les deux tunnels seront construits avec le même type de tunnelier avec un diamètre plus faible, ce qui pourra limiter l'impact vibratoire dans l'hypothèse où les deux tunnels ne sont pas creusés simultanément au même endroit.</p> <p>Ceci étant dit, il n'est pas attendu que les vibrations, tant pendant les travaux qu'en exploitation sera plus importante ou dépassera plus les seuils vibratoires dans l'alternative bitube que dans le projet monotube.</p>

7.1.9. Être Humain

Seules les recommandations différentes par rapport au projet monotube sont reprises. En matière de prévention incendie, nous recommandons de prendre en compte les remarques suivantes :

Incidences	Recommandations
Sécurité incendie	<ul style="list-style-type: none"> - Recommandation aux demandeurs : - Gestion de contrôle d'accès : Le demandeur doit pouvoir assurer en configuration bitube, le maintien de la protection au domaine automatique de différentes intrusions. - HVAC / surpression / désenfumage. Les systèmes doivent être dédoublés. - Dans le cas d'un tunnel bitube sans rameau, il est recommandé d'agrandir le volume de la station afin d'y permettre une sortie sécurisée au bout du tunnel afin de permettre une évacuation par les 2 trottoirs de part et d'autre de la voie. - Une augmentation de la vitesse des boosters (actuellement calibrée à 1 m/s) augmentera la performance du désenfumage. La vitesse devra être calibrée pour permettre une évacuation des personnes sans que les fumées ne les atteignent.

8. Synthèse de la comparaison monotube – Bitube

8.1. Profil en long

Le profil en long de la solution monotube et bitube est repris dans le graphique ci-dessous :
 Un réduction de profondeur de maximum 5 m est observé pour l'alternative Bitube.

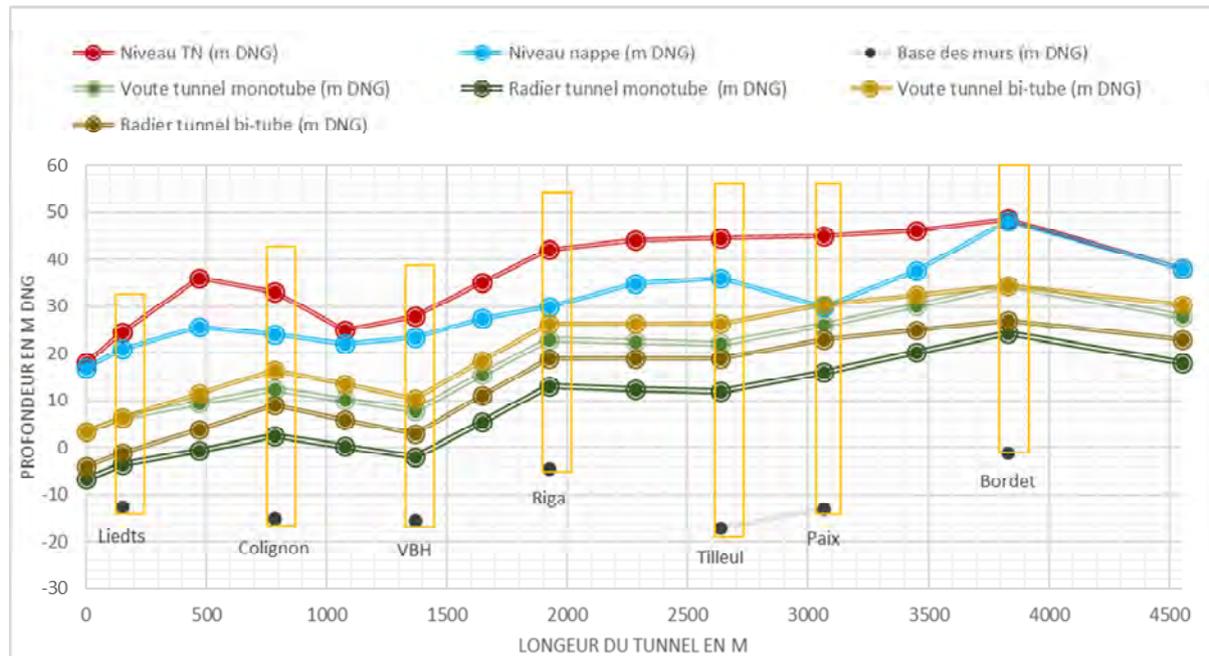


Figure 252: Comparaison du profil en long du tracé monotube et bitube (BMN, 2020)

La comparaison des pentes maximum des tronçons est synthétisé dans le tableau ci-dessous :

Tronçons	Pente max (%) - Monotube	Pente max (%) - Bitube
P0 -Bordet	1.6	0.8
Bordet -Paix	1.2	0.83
Paix -Tilleul	3.2	3
Tilleul - Riga	0.5	0.5
Riga - VBH	4.2	4.86
VBH - Colignon	1.4	1.76
Colignon - Liedts	1.3	3.17
Liedts - P5	3	3

Tableau 76: Comparaison des pentes maximum des tunnels (BMN, 2020)

8.2. Quantité de déblais

8.2.1. Tunnels

La comparaison des quantités de déblais pour chaque alternative est synthétisée dans le tableau ci-dessous :

Ouvrage	Volume de terre net [m ³]		Volume de terre foisonné [m ³]	
	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube
P0 + Rampe	65.321	60.148	84.917	78.192
Tunnel	296.339	303.340	385.241	394.342
Ouvrages de bifurcation Bordet	-	24.774		32.206
Bordet	125.580	122.484	163.254	159.229
Paix	94.364	86.691	122.673	112.698
Tilleul	99.455	96.470	129.292	125.411
Ouvrage de bifurcation Tilleul	-	14.247		18.521
Riga	108.416	111.885	140.941	145.451
Verboekhoven	136.881	125.372	177.945	162.984
Ouvrage de bifurcation Verboekhoven	-	10.733		13.953
Collignon	93.745	92.848	121.869	120.702
Liedts	99.215	98.185	128.980	127.641
Ouvrage de bifurcation P5-Liedts	-	12.419	-	16.145
Rameaux (6x)	-	-	-	-
Total	1.119.316	1.159.596	1.455.111	1.507.475
Delta		40.280		52.364

Tableau 77: Synthèse des quantités de déblais pour le monotube et le bitube (BMN, 2020)

8.2.2. Stations

Le ratio des déblais de chaque station est synthétisé dans le tableau ci-dessous :

OUVRAGE	PUITS P0 & RAMPE	LIEDTS	COLIGNON	VBH	RIGA	TILLEUL	PAIX	BORDET
BITUBE [m ³]	60.148	122.531	92.848	125.372	111.885	96.470	86.691	122.484
MONOTUBE [m ³]	65.321	99.215	93.745	136.881	108.416	99.455	94.364	125.580
RATIO	0,92	1,24	0,99	0,92	1,03	0,97	0,92	0,98

Tableau 78: Ratio des déblais des stations (BMN, 2020)

Le ratio des surfaces des boites principales est synthétisé dans le tableau ci-dessous :

OUVRAGE	PUITS P0 & RAMPE	LIEDTS	COLIGNON	VBH	RIGA	TILLEUL	PAIX	BORDET
BITUBE [m ²]	5680	1631	2371	2590	4006	3125	1690	3575
MONOTUBE [m ²]	4860	1631	2117	2609	3310	2713	1768	3230
RATIO	1,17	1,00	1,12	0,99	1,21	1,15	0,96	1,11

Tableau 79: Ratio des surfaces des boites principales des stations (BMN, 2020)

Le ratio des zones congelées pour les stations est synthétisé dans le tableau ci-dessous :

OUVRAGE	LIEDTS BRAB	LIEDTS VDW	COLIGNON	VBH	PAIX
RATIO DE SURFACE ZONE CONGELEE	1,29	1,23	1,86	1,37	1,66
BITUBE [m ²]	1360	1600	2475	2550	2600
MONOTUBE [m ²]	1055	1300	1330	1860	1560
RATIO DE LARGEUR ZONE CONGELEE	1,29	1,25	1,43	1,29	1,48
BITUBE [m]	31	30	30	31	31
MONOTUBE [m]	24	24	21	24	21
RATIO DE LONGUEUR ZONE CONGELEE	1,08	0,92	1,31	1,09	1,12
BITUBE [m]	42	45	76	84	84
MONOTUBE [m]	39	49	58	77	75
RATIO PROFONDEUR STATION	1,05	1,05	0,80	0,86	0,83
RATIO VOLUME (RATIO PROF STATION X RATIO SURFACE ZONE CONGELEE)	1,35	1,29	2,04	1,51	1,87
RATIO SURFACE JET GROUTING VOILE DE FERMETURE	-	0,64	1,67	-	1,34
BITUBE [m ²]	-	164	222	-	178
MONOTUBE [m ²]	223	258	133	-	133

Tableau 80: Ratio des zones congelées des stations (BMN, 2020)

8.2.3. Voies

La comparaison des linaires de voies est synthétisée dans le tableau ci-dessous :

Linéaire	Voies	Tubes tunnel
Bitube (m)	10335	8449
Monotube (m)	9898	4101
Delta (m)	437	4348
RATIO	1.04	2.06

Tableau 81: Linéaire de voiries (BMN, 2020)

8.3. Conclusions

L'alternative bitube permet de remonter le tunnel et les stations en moyenne de 5m vers la surface, la profondeur moyenne est de 15m. Les contraintes qui empêchent de remonter davantage le niveau des quais et du tunnel sont listées dans ce rapport (épaisseur tampon de terre nécessaire au-dessus du tunnel, passage d'ouvrages d'art, aqueduc, pente admissible pour le tunnelier et le métro en exploitation, station à plat, etc...). De ce fait, la station Liedts reste à une profondeur inchangée et Bordet n'évolue que de 2m vers la surface.

Le linéaire de forage est forcément 2 fois plus élevé pour la solution Bitube 9km au lieu de 4.5km en monotube mais pour autant, le volume des **déblais du tunnel** n'est supérieur que de 2.4% par rapport au monotube (grâce à la réduction du diamètre des tunnels). Cette différence de volume est **marginale** comparée à l'ampleur du projet. Afin de rester crédible dans le planning de construction et dans la mise en exploitation pour 2030 il convient dès-lors de travailler avec 2 tunneliers et donc 2 bases travaux, etc... Ce qui complique fortement le chantier tant au niveau du site de Haren, qu'au droit des 7 stations, qu'au droit de la rue d'Aerschot où il faudrait récupérer les roues de coupe.

Le volume de **déblais** généré par la création des **stations** pour la solution bitube est légèrement inférieur à celui de la solution monotube (réduction d'environ 3%). Cette réduction provient de la profondeur des stations, qui sont moins profonde en bitube. Cependant ce gain reste faible car partiellement perdu à cause de l'élargissement des boîtes de certaines stations.

Les avantages de cette solution bitube sont notifiés dans les différents livres « station » et peuvent-être résumés principalement via le gain d'un étage pour 5 stations sur les 7. Ainsi que la position d'un quai central permettant de rationaliser la circulation des voyageurs entre le niveau du quai et le niveau mezzanine (couplage des ascenseurs, escalators, escaliers).

Ce qui pénalise finalement la solution bitube ce sont les 5 ouvrages de bifurcation, justifiés par le demandeur et l'exploitant dans le cadre de cette étude (voir Partie 2 - chapitre 2.5).

Il y en a 2 situés aux extrémités de la liaison NB pour permettre le raccord au dépôt et à l'ouvrage gare du Nord. Et ensuite 3 sur le parcours (Verboekhoven, Tilleul, Bordet). Il s'agit d'ouvrages techniquement très conséquents à mettre en œuvre (matériaux + congélation), ils présentent un risque supplémentaire pour les bâtiments en surface ainsi qu'un calendrier de réalisation plus long que pour le projet initial. Ainsi, la jonction P5-Liedts et les bifurcations

ajoutent un volume de déblais non négligeables, environ **80.000 m³**. Cela correspond à presque **10 %** du volume de déblais total de la solution monotube.

On en conclut que l'alternative bitube engendre une augmentation de 3,6 % sur le volume total des déblais, ce qui est négligeable à l'échelle du projet. Sachant que ce sont principalement les ouvrages de bifurcation qui en sont la cause.

L'alternative bitube engendre également une **augmentation du coût** du projet d'environ **10%** pour les mêmes raisons (ouvrages de bifurcation) mais aussi à cause des quantités plus importantes de bétons et d'acier nécessaires pour construire les tunnels et les stations. Sans les ouvrages de bifurcation, les coûts entre monotube et bitube restent très similaires.

D'un point de vue **eaux souterraines**, l'alternative bitube serait plutôt de nature à **réduire les débits** à extraire et les **impacts** périphériques comparativement à une solution monotube, bien que les stations soient légèrement plus grandes et que la profondeur des parois moulées reste inchangée (dépendant la position de l'horizon étanche).

En termes de tassement et d'impact sur le bâti, les **tassements** absolus totaux maximum calculés pour l'alternative bitube sont **inférieurs** à ceux de la solution monotube. Cependant, la **zone d'influence** des tassements est **plus étendue** pour le bitube, impactant de ce fait un plus grand nombre de bâtiments. Alors que le projet initial passe en tréfonds sous 353 parcelles, 137 parcelles supplémentaires sont susceptibles d'être impactées par le passage du deuxième tunnelier dans l'option bitube.

Au niveau des **stations**, le linéaire de parois moulées est légèrement plus élevé (ainsi que la surface des stations) en bitube et a donc un **impact légèrement plus grand** sur le bâti environnant.

L'impact le plus important d'un point de vue tassement/impact sur le bâti reste la création des ouvrages de bifurcation et de jonction ainsi que la création des rameaux d'évacuation.

Dans l'alternative bitube, le démontage du 2eme tunnelier aura également un impact significatif sur la zone proche du puits P5 puisque ce tunnelier devra être démonté depuis l'intérieur du tunnel (ce qui nécessitera la mise en place d'un massif étanche supplémentaire à la rue d'Aerschot).

En résumé, d'un point de vue **incidence sur le sol, sous-sol, économique et les eaux souterraines**, **l'alternative bitube est moins favorable que la solution monotube**, principalement à cause des ouvrages de bifurcation et de jonction à l'ouvrage gare du Nord. En l'absence de ces ouvrages, l'impact de l'alternative bitube serait comparable à la solution monotube, voire légèrement plus favorable si on sort de la technique et qu'on tient compte du temps de parcours voyageur depuis la surface.

Cependant, le risque de désordre en surface ne doit pas être négligé du fait du passage d'un premier tunnelier qui provoque un désordre certes maîtrisé mais qui est suivi par un deuxième tunnelier dont le risque est d'affaiblir ce qui avait été mis en place précédemment.

En exploitation, la solution bitube est moins favorable pour les **interventions et les entretiens** en tunnel car généralement on utilise une voie pour travailler sur l'autre ce qui n'est pas possible en voie unique. Le fait de travailler en 2 tubes séparés ne permet pas non plus de mutualiser les systèmes de signalisation et d'alarmes.

En matière de prévention incendies, la solution bitube est meilleure du point de vue sécuritaire car nous n'avons qu'une seule rame par sens et donc, deux fois moins de victimes potentielles. De plus, cette solution permet la mise en place de rameaux d'interconnexion entre les 2 tubes ce qui permet en cas d'incident en tunnel d'évacuer plus rapidement les voyageurs en zone 'safe'. Cependant, dans le scénario « worst case » qui est simulé, même la présence de rameaux ne permet pas que la totalité des occupants soient mis à l'abri avant d'être atteints par les fumées.

D'un point de vue **sécurité/évacuation**, l'alternative **bitube** est plus **favorable** car il n'y a qu'un seul train par tunnel. De plus, la mise en place d'un deuxième trottoir (dans chaque tunnel) permettrait éventuellement d'évacuer les occupants des deux côtés du tunnel (l'évacuation resterait problématique pour les occupants situés à l'opposé du quai central en station bitube).

En ce qui concerne les incidences sonores et vibratoires, tant pendant les travaux qu'en exploitation, les seuils ne sont pas atteints. Les conclusions tant en phase d'exploitation qu'en phase chantier sont les mêmes que pour la solution monotube.

Partie 3 : Note de faisabilité technique d'un ouvrage de prolongement au-delà de Bordet

Extrait du CSC de l'étude :

« Pour tenir compte du potentiel d'évolution du réseau, le chargé d'étude analysera la faisabilité technique à termes de réaliser une prolongation du tracé au-delà de Bordet, par exemple desservant Haren et la zone de l'aéroport. Cela consistera en l'analyse de la compatibilité technique des ouvrages et de l'exploitation du tunnel prévus avec un tel prolongement, notamment la configuration d'une amorce de tunnel de métro vers Haren pouvant desservir une future station à Haren en lien avec le pôle d'échange SNCB. »

Cette analyse s'appuiera notamment sur les études effectuées dans le cadre du PAD Bordet. »

À noter que la dernière partie du paragraphe anticipe l'avancement du PAD Bordet et de son RIE. Au stade actuel de la rédaction de cette étude d'incidences nous tenons à signaler que ni le diagnostic ni le programme ni la spatialisation du PAD Bordet n'ont encore été validés. En février 2021 le diagnostic a été livré mais pas encore validé par le comité.

Le CSC fait bien référence à une faisabilité technique et donc indépendant des études d'opportunité de prolongement vers le nord (Haren, aéroport ou autre) qui ont déjà été menées dans les tranches préalables à cette étude d'incidences (voir livre I - Introduction).

1.1. Schéma d'exploitation de la demande de PU et contraintes

Au stade actuel de la demande de PU, aucun ouvrage n'est prévu en aval de la station Bordet (vers le dépôt) pour permettre un éventuel prolongement de ligne dans le futur vers le nord ou le nord-est de Bruxelles, ou vers la Flandre.

La tranche 2 réalisée par BMN indique pourtant dans sa conclusion page 82, source : Rapport d'étape phase 2 – Prolongation vers Haren : *« Il transparaît de l'étude que pour tous ces scénarios (3 scénario de prolongement) une telle prolongation permettrait d'attirer un nombre significatif de passagers supplémentaires et de profiter des investissements engagés en génie civil... - L'étude a démontré que le scénario A2, c'est-à-dire une prolongation jusqu'à Haren avec un terminus RER et un P+R est plus avantageux en termes de voyageurs km que les autres scénarios de prolongation à Haren et à peine moins favorable qu'un terminus métro à Bordet. »*

Toutefois, le demandeur a décidé de ne pas inclure dans sa demande de PU initiale l'ouvrage de prolongement pour la raison suivante : Le RIE du PRAS et le tracé de la carte 6 TC au PRAS ne fait pas mention d'un prolongement au-delà de Bordet. Ce tracé a été validé par le Gouvernement.

Au niveau de ce qui est prévu par la demande :

À la sortie de la station de Bordet vers le dépôt, le tunnel commence sa courbe (trait rouge sur la figure suivante) sous l'actuel Décathlon et ensuite sous le futur dépôt de métro où il termine sa remontée vers la surface. Dans le texte qui suit un module complet de rames formant le métro est appelé « train »

En exploitation (mode nominal), il est prévu que les trains en provenance de la gare du Nord, puissent changer de voie et repartir vers la gare du Nord sans devoir passer par le dépôt via « un passage de voies » ou « boîte de retournement ». Ce type d'ouvrage est habituel en bout de ligne (par exemple à Hermann Debroux). Cet ouvrage de retournement doit au minimum disposer de 170m répartis comme suit :

- Un aiguillage de 45.33m de longueur (de pointe à pointe)

Partie 3 Note de faisabilité technique d'un ouvrage de prolongement au-delà de Bordet
1.1. Schéma d'exploitation de la demande de PU et contraintes

- Une longueur de « dégagement » de l'aiguillage de 15m
- Une longueur de train de 94m
- Une zone de sécurité (freinage urgence, zone tampon) de 15m

L'aiguillage doit être placé en ligne droite. La zone de retournement peut être placée en courbe.

Cet ouvrage est prévu dans la demande de PU à la sortie de la station Bordet sous l'actuel 'Quick' (portion droite pour aiguillage) et partiellement sous le Décathlon' où le tunnel entame sa courbe de remontée vers le dépôt. La position du retournement est donc en courbe en arrière-gare de Bordet, le retournement n'est pas prévu en station pour une question d'exploitation.

Comme signalé, il s'agit d'une contrainte puisque la courbe vers le dépôt ne peut commencer qu'après l'aiguillage.

Ce rapport prend l'hypothèse PU monotube pour étudier la faisabilité technique, mais cette analyse peut également être transposée à l'alternative bitube dont les impacts sont significativement les mêmes.



Figure 253: plan du bout de ligne entre Bordet et le dépôt (source BMN, 2020)

1.2. Schéma d'exploitation dans le cas d'un prolongement et contraintes

Le tracé de la ligne de métro jusqu'au dépôt a été conçu de manière à garantir qu'un prolongement vers Haren dans une phase ultérieure serait potentiellement faisable tout en respectant le schéma d'exploitation demandé par la STIB auprès de BMN.

Le schéma d'exploitation en cas de prolongement prévoit entre les stations Bordet et Haren, une connexion depuis la voie vers ville vers le dépôt avec 2 simples voies. Le prélèvement des trains est réalisé dans le sens Haren/dépôt, l'injection des trains est réalisée vers Bordet.

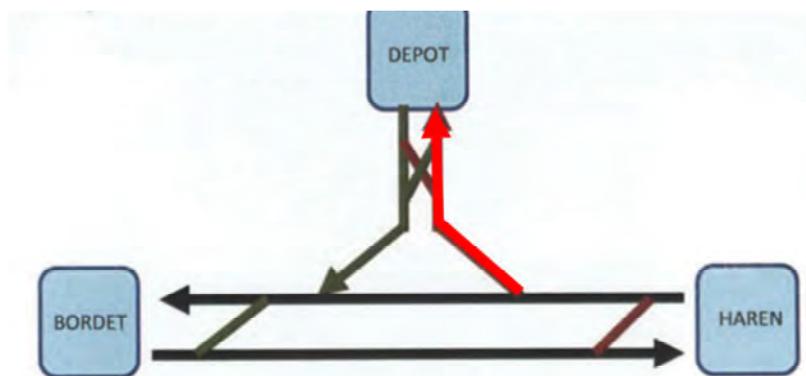


Figure 254: Schéma d'exploitation en cas de prolongement de la ligne (Source : BMN, 2020)

Il s'agit d'un schéma d'exploitation, sollicité par la STIB. Ce schéma d'exploitation 'idéal' nécessite la construction d'une nouvelle connexion au dépôt depuis la ligne en provenance du nord (en rouge sur la figure ci-dessus).

Au stade actuel de la note, il est possible de ne pas envisager cette 2^{ème} branche de connexion vers le dépôt depuis Haren (puits PC sur la figure 252). En effet, le métro en provenance de Haren pourrait effectuer son retournement (et donc la connexion au dépôt) via l'ouvrage prévu dans la demande actuelle de PU au niveau de Bordet. Il s'agit bien évidemment d'une contrainte d'exploitation mais avec l'automatisation de la ligne cette dernière est envisageable en sécurité et de toute façon déjà prévu actuellement via le système SIG-CBTC qui pilote la vitesse des trains et les arrêts en stations ainsi que les franchissements de voie pour le retournement. Ce principe d'exploitation est appelé le « carrousel des trains » (2 trains à quais, 1 train en attente dans la zone de retournement = carrousel plein).

Même dans ce schéma 'simplifié' (uniquement traits en noir), les points de contraintes restent :

- La position du dépôt ainsi que la rampe d'accès au tunnel,
- La position de la courbe vers le dépôt limitée par le fonctionnement du tunnelier et de la courbe minimale admissible au moment de la réalisation.
- La position de la station Bordet et du passage de voie en arrière-gare.

La position et la taille exacte des puits pourraient varier légèrement dépendant du tracé définitif du prolongement. Toutefois, ces petites variations n'impacteront pas significativement l'emplacement des puits qui ont été fixés de manière à pouvoir prolonger la ligne dans un entonnoir nord et réaliser une nouvelle connexion au dépôt tout en respectant le principe fonctionnel d'exploitation actuel et futur (position et dimensions des aiguillages et appareils de voie).

Partant du principe du schéma minimaliste la boîte de connexion prioritaire se situe donc entre la station Bordet et la rue du Planeur, sous l'actuel Décathlon (ouvrage dénommé PA sur la figure ci-après).



Figure 255: Tracé de la demande de PU (bleu) et ouvrages à réaliser (rouge et vert), (source BMN, 2020)

Avant de déterminer la position définitive du puits PA, plusieurs options ont été étudiées, afin d'éviter l'impact sur le bâtiment du Decathlon.

Il y a trois options envisagées suivant les points de contraintes identifiés *supra* :

1. Ouvrage à la sortie de la station Bordet vers Haren en grande partie sous l'actuel Quick et Décathlon
2. Ouvrage sous le Décathlon
3. Ouvrage en grande partie sous la rue du Planeur

1.2.1. Option Bordet

L'option Bordet est intéressante quant à son positionnement au plus proche du point de contrainte que constitue la station. En effet, au stade actuel de cette étude nous ne disposons pas d'information pouvant justifier la nécessité d'une desserte vers Haren, vers l'aéroport ou vers Diegem. Compte tenu de cette inconnue l'objectif est de se situer le plus proche possible de la station Bordet (ultime station de la demande de PU) afin de préserver un angle de desserte le plus large possible vers le nord-est. Compte tenu également de l'hypothèse qu'un prolongement serait lui aussi réalisé en tunnelier avec les contraintes de rayon que cela implique vers le nord-est.

Le second intérêt de cette option est de pouvoir cumuler les travaux de la station avec cet ouvrage de prolongement permettant de mutualiser les engins, les ouvriers, les mesures de chantier et les plannings. L'option Bordet est donc intimement liée à la demande de PU et doit

donc être fonctionnelle au moment de la mise en œuvre. Il faudrait donc qu'elle fasse partie de la demande de PU.



Figure 256: Schéma de principe de l'ouvrage de prolongement – Option Bordet (source BMN, 2020)

Si techniquement cette option est réalisable et mutualisable avec la construction de la station Bordet, elle est désavantageuse par rapport à l'exploitation. En effet, l'ouvrage de prolongement devrait se situer à la place de l'aiguillage actuellement prévu, cela signifie un déplacement de l'ouvrage de retournement qui n'est pas sans conséquence (voir ci-dessous).

Le retournement en station Bordet

Le but de cette option est de libérer l'espace de l'arrière-gare (sous l'actuel Quick et esplanade Décathlon) en profitant des quais de la station comme zone de retournement.

Cela impose alors de réaliser une double communication entre Paix et Bordet et de prévoir un quai central à la station Bordet (comme la station Roi Baudouin par exemple). C'est donc le quai de la station qui sert de zone de retournement ce qui n'est pas évident en exploitation pour respecter la cadence des 90 secondes entre trains (difficulté de gestion des montées descentes).

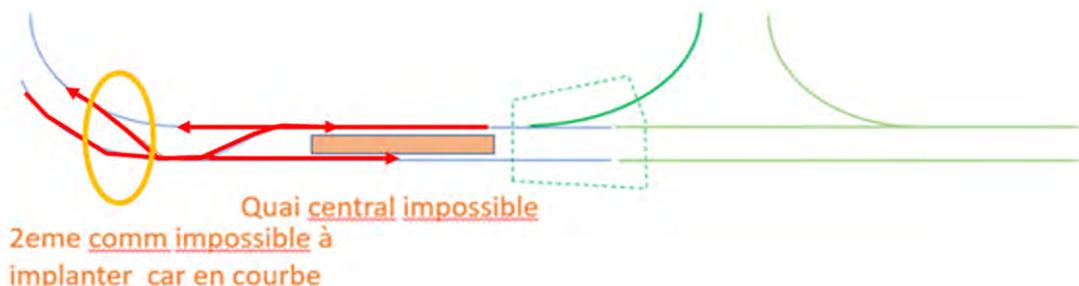


Figure 257: Schéma de principe d'un retournement en station Bordet (source BMN, 2020)

Cette solution n'est pas compatible avec le PU actuel car le monotube ne permet pas la réalisation d'un quai central dans la station Bordet et la courbe entre Bordet et Paix pose problème pour l'ajout de deux aiguillages de communication comme illustré ci-dessous. Cette

option nécessiterait de coulisser les quais et donc une grande partie de la station vers l'est. Dans le cas contraire, c'est la station Paix qui devrait être déplacée ce qui est difficilement envisageable.

Cette option nécessite donc la modification du PU avec des conséquences majeures puisque cette option touche autant l'avant gare (boite pour complexe aiguillages + nouvelle courbe vers PAIX), l'arrière-gare (Travaux sous le Quick et J.Bordet) et la station Bordet (mise en place d'un quai central). Le tracé vers le dépôt et le PO devrait aussi être modifié ce qui reste extrêmement compliqué, voir irréalisable suite aux différentes contraintes imposées dans cette zone. Il convient également de déplacer le caniveau de l'Otan qui se trouve le long de J.Bordet.

Si cette option devait être réalisée après l'exploitation, il est évident qu'elle nécessite l'interruption complète du trafic sur la ligne et le nonaccès vers et depuis le dépôt durant toute la phase de chantier.

1.2.2. Option Décathlon/Citydev (amorce longue)

L'objectif est de maintenir les aiguillages d'avant-gare et arrière-gare ainsi que la zone de retournement indépendante de la station. Par rapport à la demande actuelle de PU la différence se situe dans le positionnement de la zone de retournement non pas en courbe vers le dépôt mais bien en ligne droite sous le Décathlon et la rue du Planeur permettant de connecter plus facilement un potentiel tunnel vers le nord.

Dans cette option, le train fait son demi-tour dans l'ouvrage de prolongement et non dans la courbe vers le dépôt.

Ce principe est illustré sur la figure ci-dessous et présente trois inconvénients majeurs :

- Elle impose la réalisation de l'ouvrage au moment de la mise en œuvre du PU et lors de la première phase de travaux (le retournement étant nécessaire lors de la mise en service de la station Bordet).
- Elle impose la réalisation d'un ouvrage très long (environ 275m depuis la sortie de station Bordet) puisqu'il faut se situer après l'amorce de la courbe vers le dépôt. Ouvrage qui sera partiellement sous le Décathlon et dépassera même la rue du Planeur.
- Si le prolongement n'est pas réalisé cette zone de retournement rectiligne n'est pas nécessaire même si dans les faits cette configuration est plus praticable que dans la courbe du dépôt. Cela étant, en mode métro automatique, le fait d'être rectiligne ou en courbe ne change pas grand-chose grâce au système CBTC.



Figure 258: Schéma de principe de la variante 2 Bordet avec un ouvrage d'aiguillage et de retournement sur 275m depuis la sortie de quais à Bordet (source BMN, 2020)

Cette option nécessite une révision du PU pour toute la partie arrière gare et zone de retournement. L'ouvrage doit en effet être fonctionnel lors de la mise en œuvre du métro entre Nord et Bordet. Le tracé vers le dépôt et le PO devrait aussi être modifié ce qui reste complexe à mettre en œuvre. Cependant, cette translation du tunnel vers le dépôt n'est pas obligatoire si on part du principe de garder le point de courbe au même niveau.

L'avantage de cette option est de pouvoir maintenir une zone de retournement et donc la ligne ouverte et l'accès au dépôt même durant le chantier. Un dérangement est possible dans la zone de retournement lors du percement du tunnel permettant la liaison nord mais cela est limité à une courte période. Période correspondant au percement du fond de l'amorce (week-end) pour permettre le raccord avec le nouveau tunnel de prolongement.

Dans les deux options, le caniveau de l'Otan qui se trouve le long du bd J. Bordet entre la station et le Décathlon posera problème car il faudra le couper durant la phase chantier.

1.2.3. Option Planeur (amorce courte)

Le but de cette option est de limiter les interférences avec un bâtiment de surface pour permettre un travail depuis la surface plus aisé et donc moins long au niveau du chantier. Cette option doit aussi permettre d'être indépendant de l'actuelle demande de PU permettant d'insérer uniquement un appareil de voie.

Le but de cette option est donc de déplacer l'ouvrage au droit de la rue du Planeur afin de faciliter son exécution ultérieure.

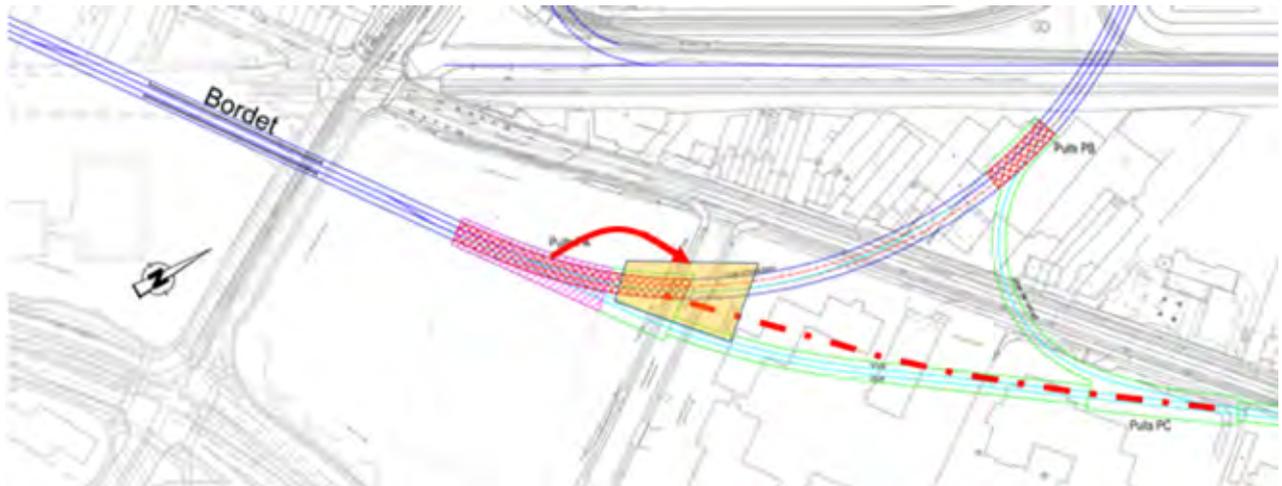


Figure 259: Schéma de principe de la position de l'ouvrage de prolongement au droit de la rue du Planeur (source BMN, 2020)

Dans cette solution, le puits est déplacé vers le nord-est, l'appareil de voie ne serait donc plus en alignement droit. Il faudrait créer une tangente au tunnel pour placer l'appareil de voie.

Dans ce cas, la future voie de desserte du dépôt ne serait pas compatible avec le tracé du tunnel décidé pour l'actuelle demande de PU. C'est à dire qu'il faut déplacer la courbe vers le dépôt (translation) de quelques mètres pour placer l'aiguillage de façon rectiligne (en direction du pointillé rouge), ceci implique une démolition/reconstruction du tunnel. Cette modification pourrait être anticipée dans le demande de PU mais elle aurait également des conséquences sur la position de la rampe de sortie et donc sur la position du dépôt.

Si cette option n'est pas anticipée au stade PU, cet ouvrage nécessite la construction d'un nouveau tunnel de raccord au dépôt et donc interruption majeure de l'exploitation. Finalement, cette option voulant être indépendante de l'actuelle demande de PU a donc un impact direct et conséquent lors de la mise en œuvre de ce prolongement. Cette option ne rend plus possible l'accès au dépôt durant toute la phase de chantier, les trains doivent faire demi-tour en arrière gare et accéder à un autre dépôt.

Par ailleurs, cette option nécessite de déplacer le bassin d'orage situé sous la rue du Planeur.

En conclusion, si une amorce minimale est décidée au stade des amendements avec une modification du PU, cette option est à retenir. Cette option permet de placer les appareils de voie et le départ des lignes.

Lors d'un éventuel prolongement, du fait de son statut d'amorce courte, il faudra prévoir une interruption de l'exploitation pour le percement du fond de l'amorce, mais cette interruption devrait être ponctuelle (plusieurs week-end). Cependant, elle restera plus préjudiciable qu'une amorce longue, au vu de la taille restreinte de la zone chantier et sa proximité avec le tunnel menant au dépôt.

1.2.4. Option Décathlon (amorce courte)

Sur base des conclusions des 2 options développées précédemment, l'objectif de cette option est de se situer entre l'appareil de voie situé en arrière gare et avant le démarrage de la courbe vers le dépôt afin de ne pas modifier le tracé.

Le puits principal (PA) de grande taille connecté au tunnel existant serait situé sous l'actuel Décathlon et permettrait la réception d'un tunnelier en provenance de Haren. Ceci nécessiterait une démolition partielle ou une reprise en sous œuvre du parking Décathlon. Pour rappel les 2 autres puits ne sont pas 'indispensables' si le passage de voie est maintenu en arrière gare Bordet.

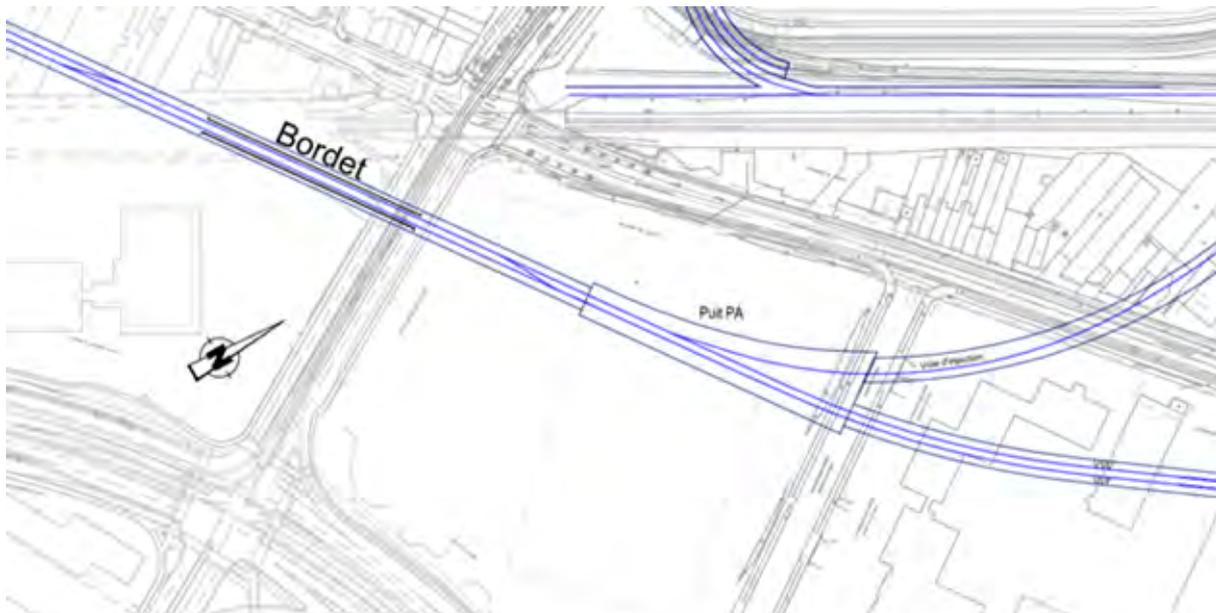


Figure 260: Schéma de principe de l'ouvrage de prolongement dont PA situé sous Décathlon (source BMN, 2020)

Comme pour les amorces 'Citydev et Planeur' cette option permet de maintenir l'exploitation durant une grande partie de la phase de chantier. La coupure de la ligne sera nécessaire mais limitée au moment du percement de l'ouvrage pour connecter l'existant et le projeté. On perd donc l'avantage de l'amorce longue sous Citydev qui permettait d'éviter la coupure.

Pour la réalisation du puits PA il sera nécessaire de prévoir la construction « d'enceintes étanches » moyennant des parois de soutènement type parois moulées ou pieux sécants qui devront être réalisées depuis la surface. D'après les premières ébauches et travaux sur base des plans des fondations Décathlon, il semble possible de réaliser cet ouvrage sous le parking de l'actuel Décathlon. La méthode sera forcément moins évidente qu'à l'air libre sans obstacle mais c'est techniquement réalisable. Cet ouvrage nécessite la réalisation d'une enceinte étanche à grande profondeur étant donné que le point bas du tunnel est situé à environ 15m sous le niveau moyen de la nappe phréatique.

Pour réaliser ces parois d'étanchéité à grande profondeur, vu la hauteur réduite de travail, nous nous orientons en pré-étude sur des parois en jet grouting.

L'utilisation de parois moulées et de pieux sécants étant très difficile vu les faibles hauteurs de travail si la seule intervention possible se fait depuis le parking. Il serait nécessaire de travailler avec plusieurs phases de terrassement et de réalisation de parois (principe choisi pour le passage sous la ligne SNCB à la station Bordet), ce qui nous semble difficile au niveau de l'amenée du matériel d'exécution.

Le principe imaginé consiste donc en les phases suivantes :

- 1/ réalisation des parois en jet grouting depuis le parking Décathlon
- 2/ premier terrassement avec mise à nu des dés de fondation existants (au-dessus du niveau présumé de la nappe)
- 3/ réalisation de poutres de support des dés de fondations existants permettant le report de la descente de charge vers des nouvelles fondations en dehors de l'enceinte de l'ouvrage.
- 4/ réalisation d'un radier étanche provisoire en jet grouting depuis cette première phase de terrassement et depuis le tunnel existant. Ce radier est ancré pour résister à la sous pression d'eau.
- 5/ terrassement à l'abri du jet grouting avec mise en place de butonnages réguliers et réalisation d'un contre voile en béton armé assurant l'étanchéité et le blindage définitifs de l'ouvrage. (Le jet grouting n'assurant qu'une étanchéité et un blindage provisoire).
- 6/ Terrassement autour du tunnelier et démolition des voussoirs de celui-ci.
- 7/ réalisation du radier définitif en béton armé (le radier en jet grouting ancré dans le sol assurant l'étanchéité provisoire du fond de fouille en résistant à la sous-pression)

La réalisation d'un puit circulaire permettant le travail en voûte de la paroi en jet grouting est un grand avantage structurel et devra être évalué en fonction des dimensions de l'ouvrage et de l'encombrement.

Partie 3 Note de faisabilité technique d'un ouvrage de prolongement au-delà de Bordet
1.2. Schéma d'exploitation dans le cas d'un prolongement et contraintes

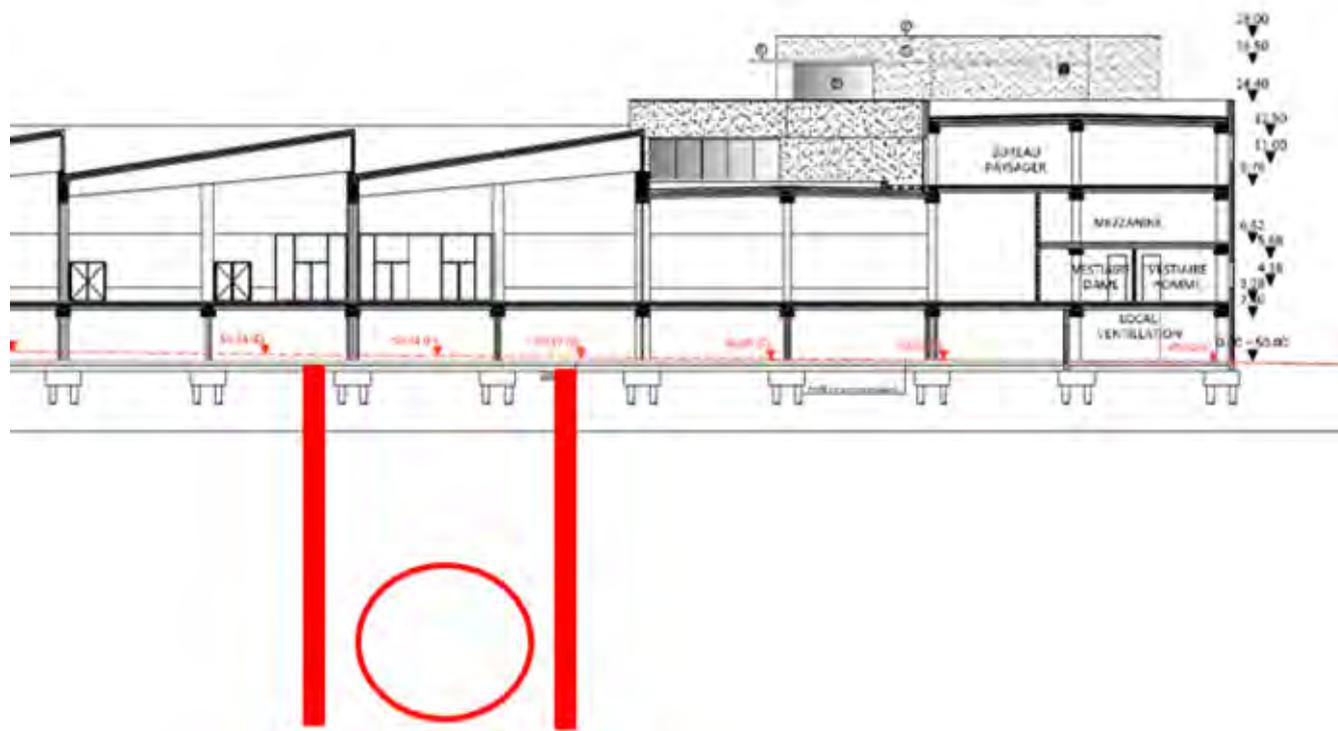


Figure 261: Coupe de principe de réalisation de l'ouvrage de prolongement sous l'actuel Décathlon (source BMN, 2020)

Cette option est donc indépendante de l'actuelle demande de PU mais nécessitera une coupure de l'accès au dépôt durant la connexion entre le nouveau et l'ancien tunnel. Cette coupure est estimée à plusieurs semaines.

Sauf à travailler via un « sarcophage » autour de la section de tunnel. Ce n'est qu'après avoir installé la boîte étanche autour du tunnel que ce dernier devra être stabilisé sur sa section d'intervention. Ensuite le percement des voussoirs pourra avoir lieu avec une interruption de la circulation de nuit et le week-end. Une interruption sur plusieurs week-end devrait être nécessaire pour installer les nouveaux appareils de voies et la signalisation.

Cette solution sera néanmoins onéreuse et demandera un chantier lent et fastidieux afin de maintenir parfaitement en place le tunnel qui se trouve dans la nappe.

1.3. Conclusion sur la faisabilité technique d'un ouvrage de prolongement vers le nord-est

1.3.1. Contexte de l'analyse

En Europe et dans le monde, la plupart des lignes récentes de métro présentent des amorces ou des travaux préparatoires en bout de lignes pour un éventuel prolongement. Cela est d'autant plus justifié que le métro est un transport structurant basé sur un horizon d'exploitation très long et qui doit donc s'adapter à la poussée démographique et l'étalement continu des limites urbaines. Tout nouveau projet qui concerne un bout de ligne, prévoit soit de placer dès le départ une amorce (si techniquement et financièrement envisageable) soit de ne pas empêcher le développement ultérieur d'un prolongement (c'est-à-dire en limitant au maximum l'interruption de l'exploitation).

Puisque la demande actuelle de PU ne prévoit pas d'ouvrage de prolongement c'est bien ce deuxième cas de figure qui fait l'objet de cette note technique.

La demande actuelle de PU ne prévoit pas cet ouvrage pour 2 raisons :

- Le RIE du PRAS a étudié un tracé avec un terminus à Bordet et ce tracé au PRAS a été approuvé par le Gouvernement avec la position de la station terminus à Bordet et la connexion au dépôt de Haren.
- Les études antérieures de BMN tranches 1&2 ont permis de démontrer la faisabilité technique d'un ouvrage prolongement vers le nord-est mais suivant les 2 points précédent il a été décidé par le demandeur de ne pas inclure cet ouvrage trop incertain quant à sa nécessité, son coût, le planning d'obtention des permis et de réalisation de l'ouvrage. Le demandeur estime que si c'est ouvrage doit être fait ultérieurement cela reste possible techniquement.

Avis du chargé d'étude :

L'analyse réalisée dans la présente étude est centrée (à la demande du CSC de l'EI) sur ce dernier point et donc sur la vérification de **la possibilité technique** d'un ouvrage de prolongement. La volonté de ce rapport a été de développer une analyse indépendante des études techniques réalisées à l'époque des tranches 1 et 2 de la conception de cette ligne de métro.

Le point de contrainte majeur est le fait que la station Bordet se situe en terminus avec la particularité d'être connectée au nouveau dépôt de métro via un tunnel réalisé au tunnelier et dont le rayon de courbure est à son maximum. Cette connexion est indispensable pour le stockage et la maintenance des trains sur le réseau STIB (et cela pour l'ensemble du réseau, pas uniquement pour la M3)

Puisque cet ouvrage de prolongement doit au minimum pouvoir se faire postérieurement à la mise en exploitation, nous avons cernés les points de contraintes qui sont liés à la demande actuelle de PU ainsi que les contraintes d'exploitation. Cela concerne la position du dépôt, la position de la station Bordet, le rayon minimum de courbure vers le dépôt et la nécessité de prévoir une zone de retournement des trains au niveau de Bordet pour éviter d'utiliser le dépôt comme zone de retournement.

La zone concernée par un ouvrage de prolongement se situe donc au niveau de l'arrière-gare de Bordet. Actuellement le complexe prévu se compose d'un appareil de voie et de la zone de retournement pour un total de 170m de longueur.

A. L'option de retournement en station Bordet

Permettrait de libérer le complexe prévu actuellement en arrière-gare (sous le Quick et esplanade Décathlon) pour y installer à la place l'ouvrage de prolongement et son appareil de voie.

L'avantage est de mutualiser les travaux de cet ouvrage avec ceux de la station tout en offrant un angle de desserte le plus large possible pour desservir le cadran nord-est. Cependant cette option nécessite une refonte complète de la demande de PU sur l'avant gare, l'arrière gare et sur la station Bordet. Pendant toute la phase d'exploitation hors prolongement, la station reste terminus comme dans la demande de PU initiale mais nécessite un quai central permettant le retournement des trains ainsi que la gestion des montées descentes des voyageurs. Cette option est intéressante car elle permet de centraliser les voyageurs sur un quai unique, mais en configuration terminus, avec des positions de départ et d'arrivée qui sont variables, cela est plus complexe à gérer pour l'exploitant. D'autre part, ce système avec croisement des rames et temps de chargement déchargement ne permet pas de garantir le passage à une fréquence de 90sec.

Dans cette option l'ouvrage de prolongement envisagé est donc intimement lié à la demande actuelle de PU qui devrait être drastiquement modifiée puisque nécessitant une modification complète de la partie inférieures de la station 'quai central, ainsi que l'ajout d'un deuxième aiguillage en avant gare. L'emplacement de cet ouvrage nécessite la déviation du caniveau de l'Otan

Par ailleurs en exploitation, tant que le prolongement n'est pas opérationnel, cette option ne peut pas garantir le maintien de la cadence des 90 secondes entre trains.

Cette option n'est pas retenue par le CE

B. L'option Décathlon + Citydev (amorce longue)

Permettrait de rester indépendant de la liaison au dépôt en proposant une amorce rectiligne à l'écart de la courbe (aiguillage) vers le dépôt. Le gros avantage de cette option réside dans le fait de proposer un retournement rectiligne en arrière-gare indépendant de la desserte du dépôt permettant un fonctionnement optimal dès la mise en exploitation (le fait d'avoir une amorce logue permet de gérer le chantier du prolongement sans interruption de l'exploitation). Cependant, cette option nécessite une amorce de longueur importante évaluée à 270m sous le Décathlon, la rue du Planeur et le 1^{er} bâtiment connexe. Il convient de préciser que cette option nécessite le déplacement du bassin d'orage situé sous le rue du Planeur.

Si cette option est retenue au moment des amendements, moyennant d'importants travaux en sous-œuvre et un surcoût important, cette option permettrait un fonctionnement optimal en exploitation tout en limitant les incidences au moment de la connexion avec un nouveau tunnel (si on part du principe de ne pas modifier la position du tunnel vers le dépôt et donc de décaler l'amorce sous le bâtiment « Blue Star »).

L'ancien bâtiment Blue-Star est sujet à d'importantes transformations c'est pourquoi ce type de servitude pourrait être envisagé avec Citydev au stade des amendements.

Grâce à son statut d'amorce longue, elle répond de façon optimale à la limitation des incidences lors d'un éventuel raccord ultérieur.

Si cette option est réalisée ultérieurement à l'actuelle demande de PU, elle n'est pas intéressante car le but de cette dernière était d'offrir une zone de retournement en exploitation tout en limitant la coupure lors d'un éventuel raccordement. Cette amorce longue aurait aucune utilité si elle est construite ultérieurement. **NON retenue par le CE.**

C. L'option Planeur (amorce courte)

Cette option avait pour but de rester d'une part indépendant de l'actuelle demande de PU et d'autre part de prévoir les travaux à ciel ouvert majoritairement sous la rue du Planeur. En cours d'étude, il est apparu que cette option nécessite des modifications au droit du tunnel de connexion au dépôt car la position de l'ouvrage est située sur la courbe vers le dépôt cette dernière étant contrainte par le passage du tunnelier en rayon minimal admissible.

Si cet ouvrage est réalisé ultérieurement, cette option nécessite une coupure de l'accès au dépôt lors de sa construction ainsi que la modification du tracé initial du tunnel. En d'autres termes, si cet ouvrage est construit ultérieurement il faut interrompre l'accès au dépôt pour reconstruire un tunnel entre le décathlon et le dépôt ! **Non retenue par le CE**

L'avantage réside dans le placement des appareil de voie dès la mise en œuvre du tunnel vers le dépôt ce qui permet de limiter le temps de coupure lors d'un potentiel prolongement.

Du fait de son statut d'amorce courte, cette option nécessite de toute façon une interruption de l'exploitation (plusieurs week-end) lors du raccord avec la nouvelle ligne. Il faut également détruire provisoirement le bassin d'orage de la rue du Planeur. La coupure de la rue du Planeur serait temporaire si le travail est réalisé en cut and cover.

Cette option est intéressante si elle est retenue au moment de l'actuelle demande de PU et donc modification du permis. Car elle permet de travailler en dehors de l'emprise du bâtiment décathlon. Elle permet de répondre au strict minimum pour faciliter le raccord à un nouveau tunnel.

Elle nécessite toutefois une translation de quelques mètres du tunnel vers le nord-est par rapport au projet actuel. Ce qui implique une modification de la rampe et donc de la position des accès au remisage.

D. L'option décathlon (amorce courte)

Il s'agit de l'option qui est retenue par le demandeur si ce prolongement devait avoir lieu ultérieurement. Cette option permet le maintien de la situation PU actuelle au niveau du complexe de retournement situé en arrière-gare.

Il s'agit de construire une 'boite' permettant l'insertion d'un complexe à aiguillages lié au nouveau tunnel. Afin de ne pas modifier la station Bordet ni la position du tunnel vers le dépôt cet ouvrage doit se situer juste au début de la courbe c'est-à-dire sous le parking couvert de l'actuel Décathlon jusqu'à la rue du Planeur. L'utilisation de parois moulées et de pieux sécants étant très difficile vu les faibles hauteurs de travail si la seule intervention possible se fait depuis le parking. Il serait nécessaire de travailler avec plusieurs phases de terrassement et de réalisation de parois (principe choisi pour le passage sous la ligne SNCB à Bordet).

Le risque porte sur la stabilité du tunnel lors de la mise en place du « Sarcophage étanche » tout en garantissant le maintien en exploitation (sauf de nuit et le week-end par phases de chantier)

SI cet ouvrage est prévu au moment de l'actuelle demande de PU, il n'est pas nécessaire de modifier le tracé vers le remisage du dépôt (par rapport à l'option Planeur). Cependant, cela implique un chantier complexe sous le bâtiment décathlon. Cette option est alors moins avantageuse que l'option Planeur.

Si cet ouvrage est prévu ultérieurement à cette demande de PU, cela reste techniquement possible moyennant d'important travaux 'à la petite cuillère' nécessitant de nombreuses phases de chantier sous le décathlon. Cette option nécessite toutefois une interruption de la desserte au dépôt lors de certaines phases de chantier qui seront en lien avec le tunnel existant. Cela nécessite une interruption de plusieurs semaines.

1.3.2. Synthèse de l'avis du CE

En conclusion, ne pas prévoir ou ne pas rendre possible la construction d'une amorce de ligne vers le nord-est serait préjudiciable compte tenu de l'évolution probable de la ville dans cette aire géographique de Bruxelles. Cependant de nombreuses incertitudes subsistent quant aux développements futurs du périmètre Bordet/Otan/Haren et les plans sont seulement en cours d'élaboration, il est donc difficile de savoir vers où prolonger la ligne.

À ce sujet, le point de départ est quasi identique entre les différentes options. Il a été vérifié que les principales dessertes futures et potentielles (Haren, Diegem, Aéroport, Prison, Otan) restent joignables via la construction d'un ouvrage de prolongement. Cela suivant les contraintes d'un rayon minimal de construction du tunnel R250m et d'un raccord à un éventuel puits 'PC' (pour rappel non indispensable), c'est donc un scénario optimal.



Figure 262: Schéma indicatif du cône d'accessibilité en tunnelier depuis un ouvrage de prolongement sous le décathlon (BMN 2021)

Dans ce contexte, et par élimination, deux possibilités s'offrent au demandeur :

- Soit une option volontariste qui consiste à inclure dès l'actuelle demande de PU un amorce de ligne permettant d'une part une exploitation efficace et d'autre part un faible impact (voire pas d'impact) sur l'exploitation durant le chantier. Dans ce cas c'est **l'option Décathlon/Citydev** qui est à privilégier. Moyennant de travaux en sous œuvre importants sous le Décathlon et sous le bâtiment actuellement « Blue Star ». Cette option nécessite de mobiliser dès le départ le financement de cet ouvrage et nécessite de revoir le planning du creusement du tunnel et des travaux autour de la gare de Bordet.

L'option Planeur est la solution minimaliste mais qui est intéressante si la décision est prise au moment de l'actuel PU. Cette option est impossible ultérieurement au PU actuel (voir *supra*).

- Soit une option prudente qui consiste à attendre la concrétisation des plans et projets de ville dans le cadran nord-est pour savoir vers où partir avec le nouveau tunnel et donc construire l'ouvrage plus tard.

Dans ce cas c'est **l'option sous le Décathlon** qui est à privilégier. En effet, cette option reste indépendante de la mise en œuvre du permis actuel mais nécessite des travaux ultérieurs importants sous le Décathlon. Ces travaux sont techniquement possibles mais complexes et onéreux à mettre en œuvre au stade actuel des connaissances d'ingénierie et techniques constructives (à voir donc en 2030 car les techniques évoluent continuellement). Cette option nécessite d'exproprier temporairement une grande partie du parking couvert et

Partie 3 Note de faisabilité technique d'un ouvrage de prolongement au-delà de Bordet
1.3. Conclusion sur la faisabilité technique d'un ouvrage de prolongement vers le nord-est

de la sortie des véhicules de Décathlon pour effectuer les travaux en fouille ouverte.

L'ensemble de ces démolitions, réaménagement des voies et des installations techniques ne pourront s'effectuer sans perturbations de l'exploitation de la ligne (option Citydev 'amorce longue' moins pénalisante que la Décathlon 'amorce courte').

1.3.3. Conclusion quant à la faisabilité technique d'un ouvrage de prolongement

Comme démontré dans cette analyse, différentes scénarii de travaux sont envisageables pour un éventuel prolongement. Soit au stade actuel de la demande, soit ultérieurement à celle-ci.

Actuellement, la demande de PU ne prévoit pas d'ouvrage de prolongement stipulant que cela reste possible par la suite. **La faisabilité technique de construction d'une amorce pour un éventuel prolongement de ligne vers le nord a bien été validée dans la présente analyse tout en identifiant différentes variantes de positionnement ainsi que les risques et les contraintes techniques de cet ouvrage à réaliser *a posteriori*.**

Nous constatons cependant que le dossier de mise en adjudication des travaux ne prévoit aucune mesure pour faciliter ces travaux potentiels. D'autre part, au moment d'écrire ces lignes, le demandeur ne nous a pas apporté d'information quant à la maîtrise du risque pour cette intervention (visant à continuer l'exploitation pendant ce chantier) ainsi que la démonstration de limiter le temps de coupure à son plus strict minimum et cela en accord avec la STIB.

Rappelons, que la STIB, membre du comité d'accompagnement, nous signale qu'il est impossible pour la poursuite de l'exploitation de l'entièreté du réseau de métro bruxellois (et pas seulement de la M3) d'avoir une interruption de trafic de plusieurs semaines entre la station Bordet et le dépôt de Haren. En ce sens l'option Planeur ultérieure n'est pas possible. L'option Citydev amorce longue n'est pas intéressante en réalisation ultérieure.

Dans ce contexte, une étude complémentaire permettrait d'une part de confirmer les interventions « type light » notamment au niveau du placement des installations techniques, ainsi que le choix du type de pose de voie (privilégier la pose sur ballast sur cette portion de tunnel), le placement de voussoirs spécifiques au droit du potentiel percement, qui pourraient être intégrées à la demande actuelle. D'autre part, cette étude devrait également aborder les risques (stabilité et temps de coupure) vis-à-vis de l'exploitation de la ligne.

1.4. Recommandations quant à la faisabilité technique d'un ouvrage de prolongement

Nous recommandons d'analyser plus en détail au stade du projet amendé, la solution amorce courte sous le Décathlon. De faire la démonstration via une note technique de la possibilité de réaliser cet ouvrage ultérieurement à la mise en exploitation du métro tout en limitant la coupure (accès au dépôt) uniquement sur quelques week-end (voire uniquement la nuit). La note devra également faire une première estimation du coût de construction de l'ouvrage et des risques éventuels sur la stabilité du tunnel en phase d'exploitation.

- Quoiqu'il en soit, au stade de l'actuelle demande, il est recommandé de mettre tout en œuvre pour faciliter le raccord à un éventuel tunnel de prolongement de ligne vers le nord.

Incidence(s)	#	Degré de priorité	Recommandations	Intervenant
Coupure de la ligne de métro - impact exploitation	PR 0.1	+++	Il est recommandé de faire la démonstration via une note technique de la possibilité de réaliser cet ouvrage de prolongement ultérieurement à la mise en exploitation du métro tout en limitant la coupure (accès au dépôt) uniquement sur quelques week-end (voire uniquement la nuit). La note devra également faire une première estimation du coût de construction de l'ouvrage et des risques éventuels sur la stabilité du tunnel en phase d'exploitation.	Demandeur
	PR 0.2	+++	<p>Au stade de l'actuelle demande, il est recommandé de mettre tout en œuvre pour faciliter le raccord à un éventuel tunnel de prolongement de ligne vers le nord en ce compris :</p> <ul style="list-style-type: none"> □ Prévoir la pose des rails sur ballast dans cette portion du tunnel susceptible d'accueillir l'ouvrage de raccord afin de faciliter la mise en place des appareils de voies. □ Prévoir la mise en place de voussoirs spécifiques permettant de faciliter le percement ultérieur sur cette section du tunnel. □ Tenir compte de cet éventuel chantier et prolongement dans cette section du tunnel au niveau de la mise en place de la signalisation et du troisième rail afin de faciliter un éventuel raccord ultérieur. 	Demandeur

Partie 4 : Analyse des incidences de la variante de gestion des eaux d'infiltration

1.1. Description de la variante

1.1.1. Principe général

Conformément au cahier des charges de cette étude : « *Une variante étudiant, dans le domaine de l'énergie, du sol et des eaux souterraines, socio-éco, une méthode alternative de gestion des eaux d'infiltration ne nécessitant pas leur renvoi complet à l'égout, étudiée pour l'ensemble des ouvrages (tunnel et stations).* »

Dans la définition des « eaux d'infiltration » issue du cahier des charges, il faut entendre « les eaux qui s'infiltrent dans les stations et le tunnel » Cette infiltration est due au fait qu'on se situe dans la plupart des cas dans la nappe phréatique et que les parois ne sont pas totalement étanches. Dans le reste de cette étude, ces eaux sont appelées « les eaux de drainage ».

Le projet tel qu'initialement déposé prévoit le rejet aux égouts de ces eaux « d'infiltration », mais également des eaux pluviales récoltées en surface au niveau des stations (après temporisation). L'objectif de cette variante est d'envisager une méthode alternative de gestion des eaux d'infiltration et des eaux pluviales ne nécessitant **pas** leur renvoi complet aux égouts. Cette variante s'applique à la gestion globale des eaux de drainage en ce compris celles du tunnel et des stations.

L'analyse du projet au niveau des débits envisagés, du profil en long, et des contacts pris avec Bruxelles environnement par rapport à l'opportunité de gestion en surface de ces eaux, ont permis de **définir deux exutoires le long du tracé** et localisés à la figure suivante.

Concernant les eaux pluviales et les eaux de ruissellement, comme détaillé dans les livres relatifs aux stations, c'est l'infiltration en surface qui est recommandée en priorité, afin de viser le zéro rejet à l'égout. Lorsque la totalité des volumes précipités n'est pas gérable par infiltration, alors le trop-plein doit en priorité être orienté vers un exutoire de surface, s'il y a un cours d'eau à proximité, et non vers les égouts.

Dans le cadre de l'analyse de la présente variante, **les débits** de fuite **considérés pour les eaux pluviales des stations** correspondent à un débit de fuite de 5 l/s/ha pour chaque périmètre des stations soit une hypothèse maximaliste **ne tenant pas compte des recommandations émises dans les livrets stations** concernant la mise en place de dispositifs d'infiltration (avec et sans rejet) et de la temporalité de l'écoulement des eaux (temps que met l'eau pour atteindre l'exutoire). Ces rejets d'eaux pluviales, s'ils existent, ne seront pas continus et seront rejetés vers les eaux de surface uniquement en période de pluie intense. **Les hypothèses qui suivent sont donc maximalistes.**

Ce scénario « worst case » sera discuté dans les conclusions de ce chapitre. Mais en première hypothèse nous considérons que les eaux de drainage du tunnel et des stations ainsi que les eaux pluviales récoltées au niveau des stations (uniquement les débits de fuite des ouvrages de tamponnement/infiltration) sont récoltées au point bas de chaque station pour ensuite être envoyées vers ces deux exutoires prévus via une conduite au sein du tunnel. Cette option est analysée dans la suite de ce chapitre.

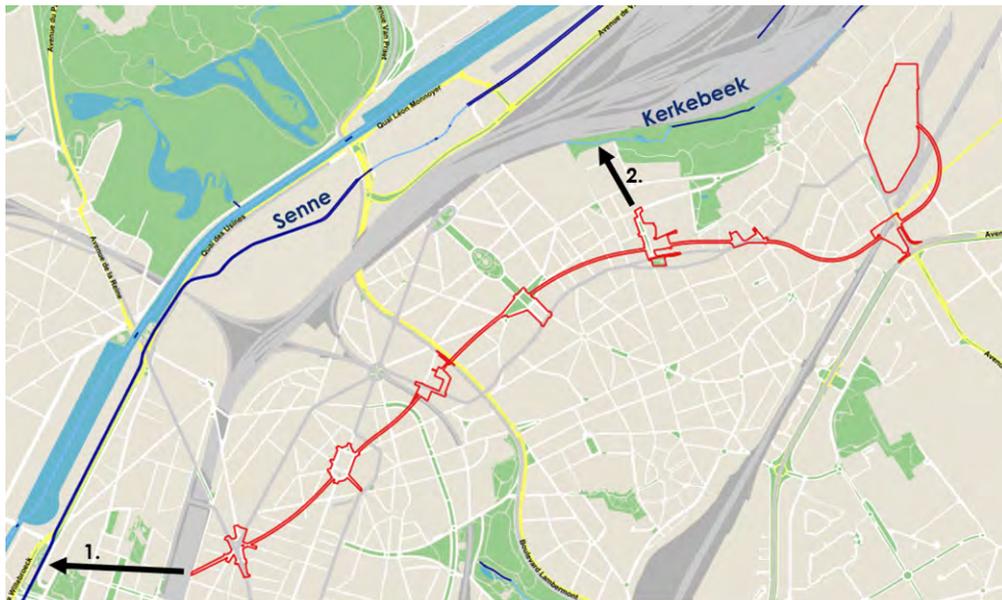


Figure 263: Localisation des deux exutoires par rapport au tracé du métro (ARIES, 2020)

1.1.2. Identification des exutoires et points de relevage

Afin de fonctionner au maximum en gravitaire, d'optimiser le chemin de l'eau et d'éviter l'utilisation de multiples pompes, les deux exutoires prévus sont localisés au droit de deux points bas du tracé : **Tilleul et gare du Nord**. Malgré cela, des pompes seront nécessaires pour remonter les eaux à différents endroits :

- [1] depuis le P0 (au niveau du dépôt) vers Bordet,
- [2] de Tilleul jusqu'à la surface,
- [3] de Verboekhoven jusque Colignon,
- [4] et de Liedts/Gare du Nord jusqu'à la surface.

Le reste du trajet de l'eau peut se faire de manière gravitaire vu le profil altimétrique du tracé.

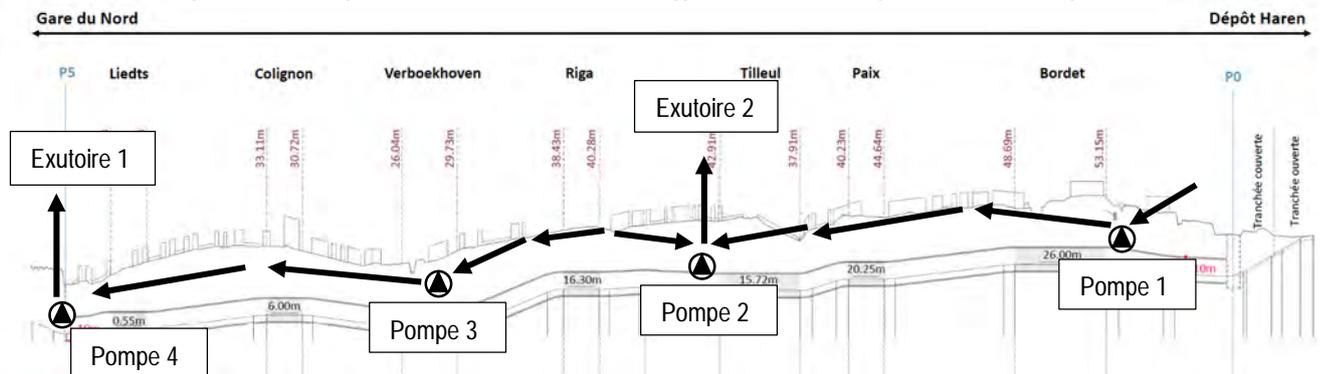


Figure 264 : Profil en long du tunnel, exutoires vers les eaux de surface et localisation des pompes (ARIES, 2020)

1.1.3. Exutoire 1 : Liedts/Gare du Nord vers la Senne

Le premier exutoire serait localisé entre les stations Liedts et gare du Nord. L'objectif étant de se raccorder dans le futur au projet Max-sur-Senne pour se diriger ensuite vers le pertuis de la Senne via une noue²⁵ sur le boulevard Bolivar reliant la gare du Nord à la Senne (cours d'eau non navigable de 1^{ère} catégorie).

Dans l'idéal il faudrait faire ressortir la conduite récoltant l'ensemble des eaux de l'exutoire 1 du côté ouest de la gare du nord (côté Senne/canal) afin de faciliter le rejet dans la noue. Techniquement cette solution est réalisable en empruntant le nouveau tunnel du métro sous la gare pour ensuite remonter via une gaine technique vers la surface (idéalement au niveau de la rue du Progrès). Mais l'intérêt de cet exutoire dépend intrinsèquement de la création de la noue sur S. Bolivar, or, au moment d'écrire ces lignes il s'agit toujours d'un projet donc la création reste incertaine au moment de clôturer cette EI.

En cas de non-réalisation de la « noue Max-sur-Senne », deux options apparaissent :

- L'installation d'une conduite reliant l'exutoire 1 à la Senne sous le boulevard Bolivar devra être construite par l'auteur du projet Max-sur-Senne. Un accord formel du gestionnaire du cours d'eau (Bruxelles Environnement) devra être obtenu au préalable avant mise en place du rejet. Ceci implique de placer une chambre d'attente du côté de la rue du Progrès. En attendant la potentielle mise en place du projet Max-sur-Senne, cela implique un rejet aux égouts du côté Ouest de la gare du nord (rue du Progrès).
- Considérant qu'il serait plus logique d'attendre la validation et la mise en œuvre du projet Max-sur-Senne, la chambre d'attente serait celle prévue également par le permis de métro LOT 1 située à la rue d'Aerschot. Dans l'hypothèse où le projet de noue se concrétise, il est tout à fait possible que les autorités demandent ultérieurement un raccord à la noue Bolivar via le tunnel du métro et le passage de la conduite de l'autre côté de la gare du Nord. En attendant la potentielle mise en place du projet Max-sur-Senne, cela implique un rejet aux égouts du côté Est de la gare du nord (rue d'Aerschot).

²⁵ Cette noue sera théoriquement prévue dans le cadre du projet Max-sur-Senne s'étendant depuis le boulevard Bolivar vers la gare du Nord. Le démarrage de ce projet (étude de faisabilité, dimensionnement, etc.) est prévu pour fin de l'année 2020.

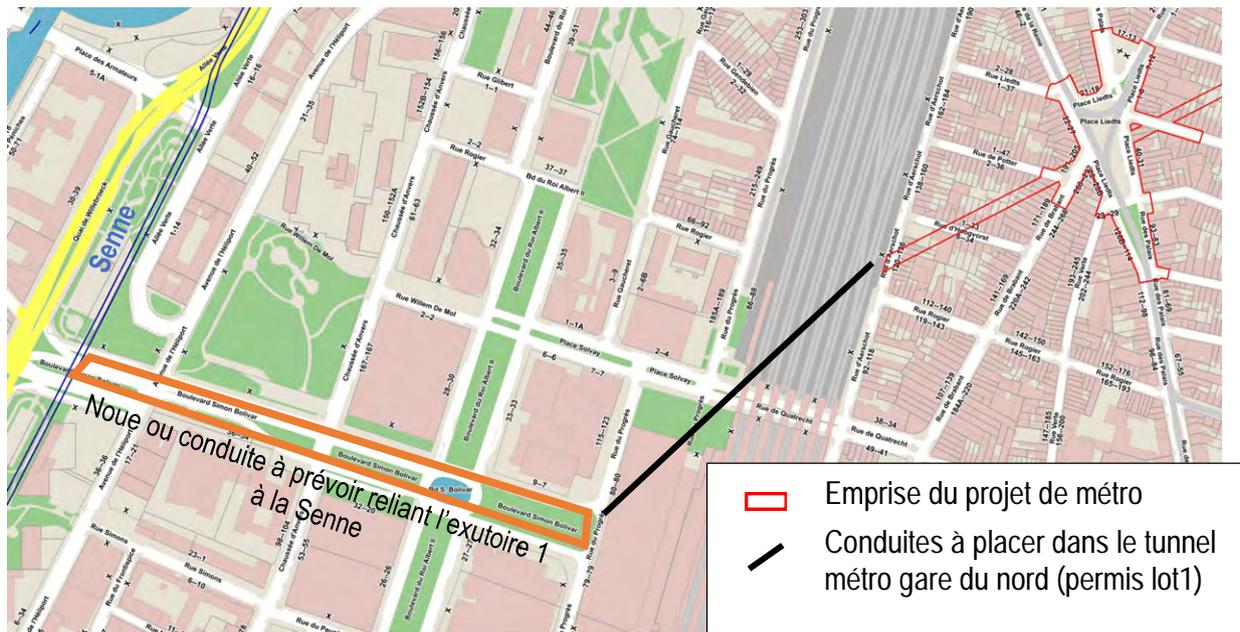


Figure 265 : Exutoire 1 - Connexion entre le tracé de métro et la Senne (ARIES, 2020)

1.1.4. Exutoire 2 : Tilleul vers le Kerkebeek

Le deuxième exutoire identifié se situe à la station Tilleul en direction du ruisseau du Kerkebeek via une conduite enterrée passant sous la rue Verdonck, le chemin du Gastendelle, la rue du Carli et la rue du Château.

Vu la topographie et la localisation de la rue Verdonck à la cote altimétrique de 44 m et le Kerkebeek en aval à la cote altimétrique de 17 m, une conduite en gravitaire de 600 m de longueur sera suffisante. La figure suivante localise le tracé approximatif de la conduite à prévoir. Un accord formel du gestionnaire du cours d'eau (cours d'eau non classé) devra être obtenu, ainsi que celui du gestionnaire de la réserve naturelle du Moeraske si des travaux y sont nécessaires. Par ailleurs, lorsque des connexions enterrées sont nécessaires comme ici, il est recommandé de disposer d'un accord préalable pour l'entretien de ces réseaux auprès d'un organisme compétent ici en l'occurrence Vivaqua et l'administration communale d'Evere.

Sachant que le permis de la station couvre un périmètre qui ne va pas au-delà de la rue de Picardie, au stade actuel de cette analyse, le demandeur ne dispose pas de la maîtrise foncière et des accords pour accéder au Kerkebeek.

Deux hypothèses :

- Hypothèse optimiste : Un accord est trouvé au stade des amendements entre l'auteur du projet métro, les administrations et le gestionnaire du réseau pour construire (au moment du chantier de la station) la conduite jusqu'au Kerkebeek.
- Hypothèse pessimiste : Pas d'accord au stade des amendements. Une chambre d'attente est toutefois placée rue Verdonck afin de permettre un éventuel raccord ultérieur au Kerkebeek ou une utilisation à proximité au niveau des équipements ou des logements. Dans ce cas nous recommandons la mise en place de la chambre d'attente avec comme exutoire les dispositifs d'infiltration recommandés à la station Tilleul (= aucun rejet aux égouts).

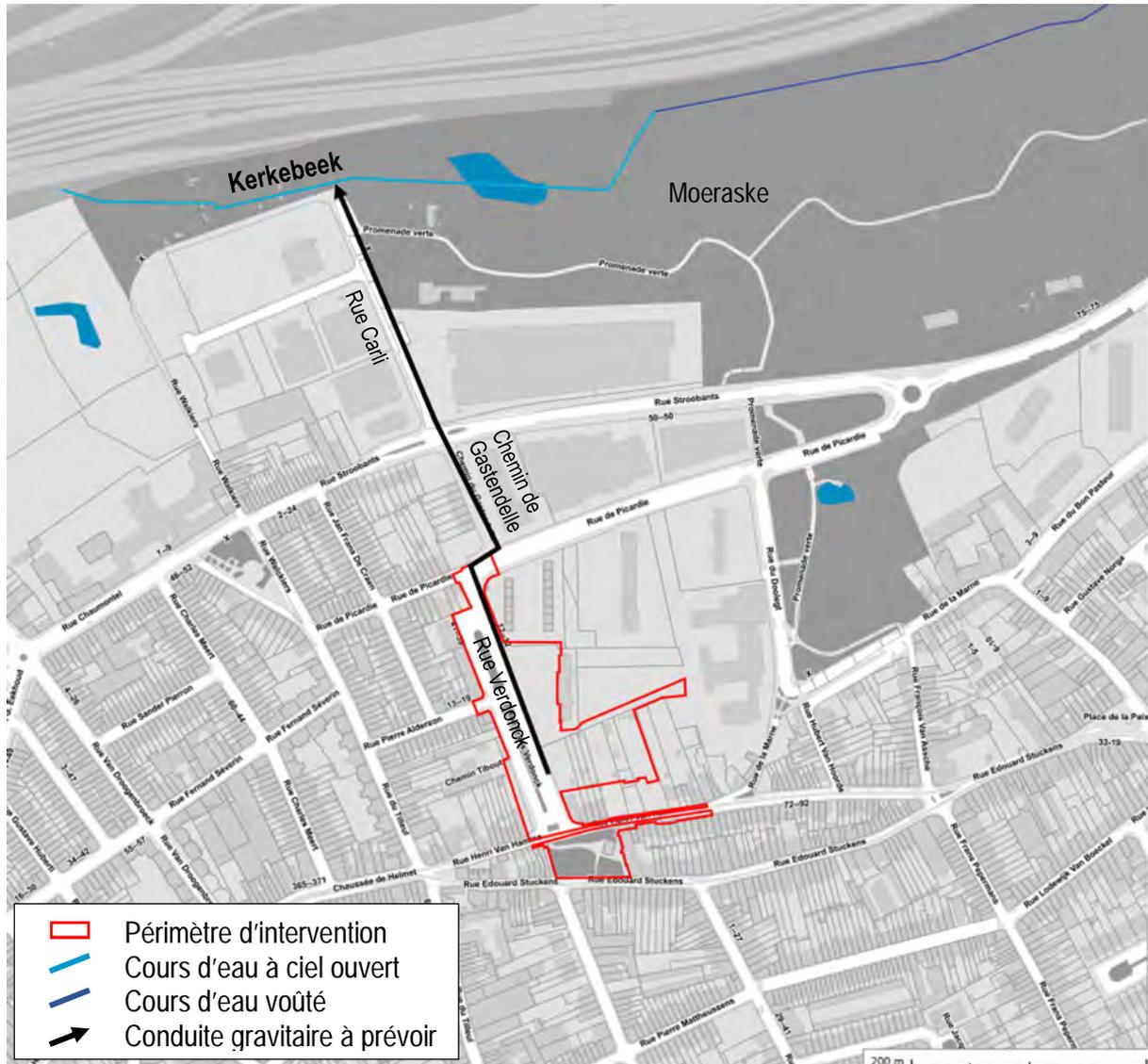


Figure 266 : Exutoire 2 - Conduite à prévoir reliant la station Tilleul au Kerkebeek (ARIES, 2020)

1.2. Analyse de la variante - Sol, sous-sol et eaux souterraines

1.2.1. Débits aux exutoires

Les tableaux suivants résument les débits attendus pour les eaux de drainage et les eaux pluviales par exutoire.

Concernant les eaux de drainage (ED), les débits présentés ici proviennent de l'étude Artesia V1 **soit l'étude maximalisant les débits drainés**. À noter que ces débits seront rejetés en continu.

Concernant les eaux pluviales (EP), les débits de fuite considérés dans ce cadre correspondent à un débit de fuite de 5 l/s/ha pour chaque périmètre des stations **soit une hypothèse maximaliste ne tenant pas compte des recommandations** émises dans les livrets stations concernant la mise en place de dispositifs d'infiltration (avec et sans rejet) et de la temporalité de l'écoulement des eaux (temps que met l'eau pour atteindre l'exutoire).

	Débits – eaux de drainage (Artesia V1)			
	[l/s]	[m ³ /h]	[m ³ /j]	[m ³ /an]
Exutoire 1 - Gare du Nord	6,4	22,9	554	200.595
Exutoire 2 - Tilleul	4,2	15,1	361,6	131.845
TOTAL	10,6	38,1	916	332.440

Tableau 82: Débits des eaux d'infiltration par exutoire (ARIES d'après Artesia V1, 2020)

	Débits – eaux pluviales ²⁶ [l/s]	Débits – eaux de drainage (Artesia V1) [l/s]	Débits totaux rejetés [l/s]
Exutoire 1 - Gare du Nord	21,9	6,4	28,3
Exutoire 2 - Tilleul	48,5	4,2	52,7

Tableau 83: Synthèse des débits eaux pluviales et eaux de drainage pour l'exutoire 1 et 2 (ARIES, 2020)

Dès lors, au niveau de **l'exutoire 1**, le débit total attendu en période pluvieuse intense s'élève à **28,3 l/s** (102m³/h) tandis que le débit total attendu en période pluvieuse intense pour **l'exutoire 2** s'élève à **52,7 l/s** (190m³/h). La partie dominante du débit serait due aux eaux pluviales. Pour l'exutoire 1, les eaux pluviales représentent 77% du débit total, pour l'exutoire 2, celles-ci représentent 92% du débit total.

En première approche, une conduite gravitaire en béton de 280 mm de diamètre (capacité de 84 l/s) serait suffisante pour récolter les débits de l'exutoire 2 et les rejeter vers le Kerkebeek. Il est recommandé d'étudier la possibilité d'installer une conduite surdimensionnée afin de permettre la connexion de futurs dispositifs de gestion des eaux pluviales entre la station Tilleul et le Kerkebeek.

1.2.2. Principe des stations de pompage / relevage

Plusieurs pompes devront être mises en place dans le cadre de cette variante. Plusieurs options sont envisageables pour le design des stations de pompage / relevage.

Les options préférentielles sont mentionnées ci-après mais leur faisabilité devra être étudiée / validée lors des études d'exécution par le contractant en accord avec le maître d'ouvrage. Au terme de cette étape, le design final sera choisi.

1.2.2.1. Stations de pompage / relevage principales

En ce qui concerne les stations de relevage principales (P2 – Tilleul et P4 - Gare du Nord) les eaux sont directement acheminées vers les exutoires prévus en surface avec un tamponnement à l'amont du rejet.

Pour le relevage principal P4 - Gare du nord, le tamponnement se ferait au niveau de la noue Bolivar qui amènera l'eau vers la Senne (option 1 - noue). Cette option privilégiée consiste à utiliser cette noue en surface comme bassin tampon des eaux pluviales afin de limiter le débit de fuite à 5 l/ha.s. En conséquence, seules des eaux de drainage ED (station + tunnel) devront être relevées du fond de station jusqu'en surface vers la noue.

Selon Bruxelles Environnement (facilitateur eau) cette noue devrait être prévue dans le projet de réaménagement du quartier nord dont les études sont en cours. Cependant si cette noue n'était pas retenue dans le projet « Max-sur-Senne » et le réaménagement de Bolivar, une conduite pourrait également être placée sous le boulevard pour rejoindre la Senne.

STATION DE RELEVAGE PRINCIPALE – OPTION 1 : NOUE

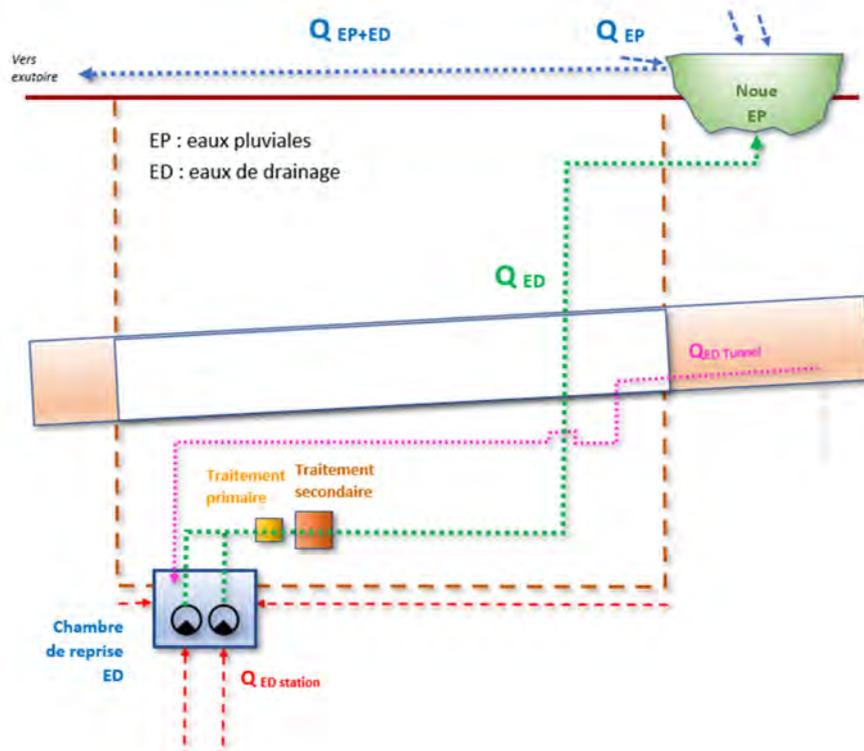


Figure 267: Principe du relevage principal (exutoire) – Option 1 : noues (Tractebel, 2020)

Dans cette configuration, une chambre de reprise des eaux de drainage est prévue en fond de station. Celle-ci collecte les eaux provenant des drains horizontaux et verticaux sous le radier et les eaux de drainage s'infiltrant dans le tunnel.

Par sécurité, il est recommandé un système de pompage double dans la chambre ED pour le refoulement des eaux : une pompe opérationnelle et une pompe en backup travaillant en alternance. Ceci permet de continuer les pompages des eaux de drainage en cas de panne ou de maintenance.

Les eaux de drainage devront subir avant refoulement un traitement approprié (traitement primaire et secondaire) qui est décrit au chapitre « traitement des eaux de drainage », plus loin dans ce rapport.

Il est par ailleurs recommandé que le système de relevage / évacuation puisse être vidangé lors des opérations de maintenance des canalisations ou des pompes. Lors des études d'exécution il devra être vérifié que la capacité de la chambre de reprise ED est suffisante pour reprendre les eaux de vidange (colonne ascendante vers la surface et eaux en provenance de Colignon) tout en continuant à collecter les eaux de drainage (station et tunnel) pendant les périodes d'arrêt / maintenance (durée à préciser par l'exploitation).

Le cas échéant si cette capacité n'était pas suffisante au niveau de la chambre ED, elle devra être adjointe en fond de station, comme proposé dans l'**option 1 bis : noue + vidange** (voir figure ci-après), une chambre de vidange des eaux de capacité suffisante pour collecter ces eaux de vidange et de drainage pendant la période d'arrêt. Ces aspects devront faire l'objet d'une note de dimensionnement à valider par le maître d'ouvrage lors des études d'exécution.

Partie 4 : Analyse des incidences de la variante de gestion des eaux d'infiltration
1.2. Analyse de la variante – Sol, sous-sol et eaux souterraines

STATION DE RELEVAGE PRINCIPALES – OPTION 1 bis : NOUE +
VIDANGE

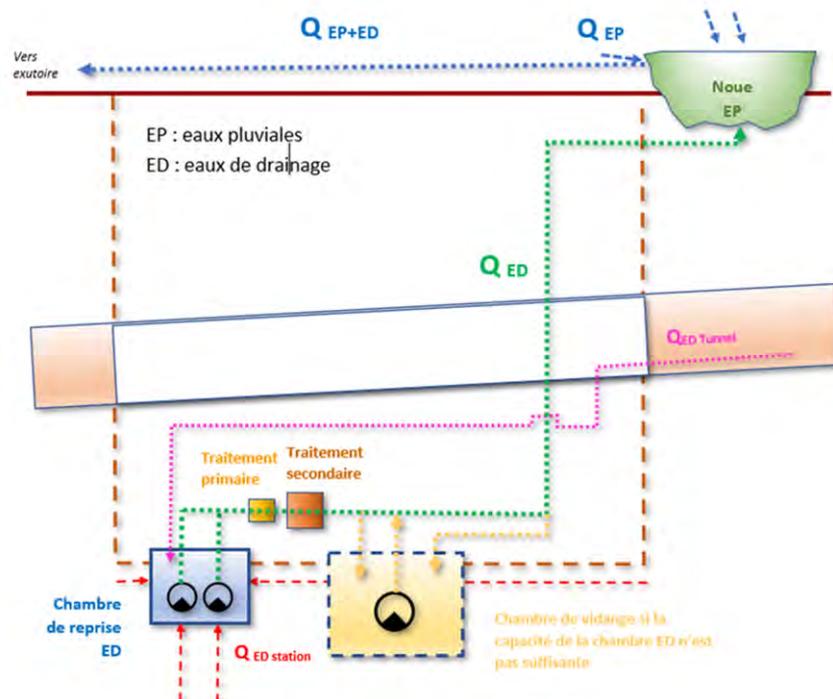


Figure 268: Principe du relevage principal (exutoire) – Option 1 bis : noue + vidange (Tractebel, 2020)

Pour le relevage principal **P2-Tilleul** un bassin tampon devra être installé, en surface, en amont de la conduite exutoire qui mène vers le Kerkebeek - **option 2 – bassin tampon**.

Dans ce bassin, ces eaux sont tamponnées de manière à ne rejeter vers le milieu récepteur que le débit de fuite autorisé de 5 l/ha.s. L'étude d'exécution devra valider la possibilité d'évacuer ces eaux de manière gravitaire vers l'exutoire. A défaut, un système de pompage devrait être mis en œuvre.

STATIONS DE RELEVAGE PRINCIPALES – OPTION 2 : BASSIN TAMPON TAMPON

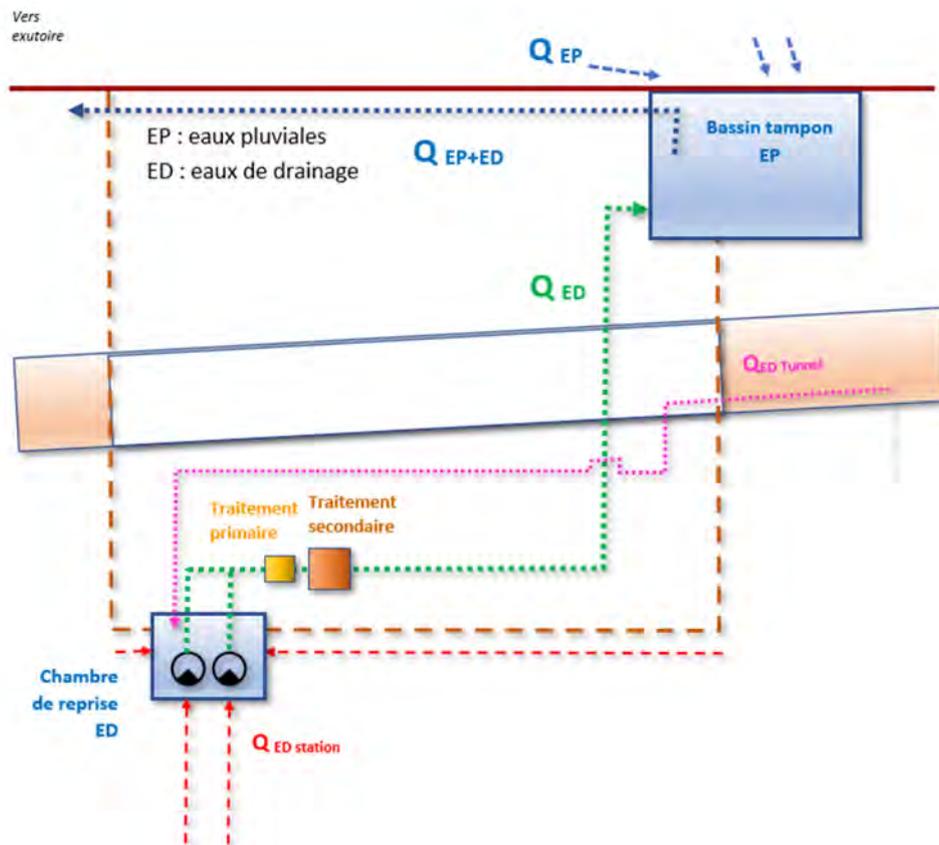


Figure 269: Principe du relevage principal (exutoire) – Option 2 : bassin tampon (Tractebel, 2020)

Comme pour l'option précédente, il est recommandé que le système de relevage puisse être vidangé lors des opérations de relevage / évacuation lors des opérations de maintenance. Il devra donc être vérifié que la capacité de la chambre de reprise aura une capacité suffisante que pour reprendre les eaux de vidange (colonne ascendante + eaux en provenance de Riga et Bordet) tout en continuant à collecter les eaux de drainage. De la même manière, si cette capacité n'est pas suffisante au niveau de la chambre ED, il devra être adjoint en fond de station, comme proposé dans **l'option 2 bis : bassin tampon + vidange** (voir figure ci-après), une chambre de vidange des eaux de capacité suffisante pour collecter ces eaux de vidange et de drainage pendant la période d'arrêt. Ces aspects devront faire l'objet d'une note de dimensionnement à valider par le maître d'ouvrage lors des études d'exécution.

Pour ce qui concerne les eaux pluviales (EP) venant de la surface, l'option privilégiée est **l'option 1 – bassin tampon EP avec écoulement gravitaire**.

Elle devrait pouvoir être mise en œuvre pour autant que le diamètre des conduites soit suffisant pour ne pas créer une perte de charge trop importante. Le dimensionnement hydraulique devra faire l'objet d'une étude d'exécution néanmoins en première approche une conduite de diamètre intérieur 280 mm reprenant le mélange ED + EP en base du tunnel devrait s'avérer adéquate.

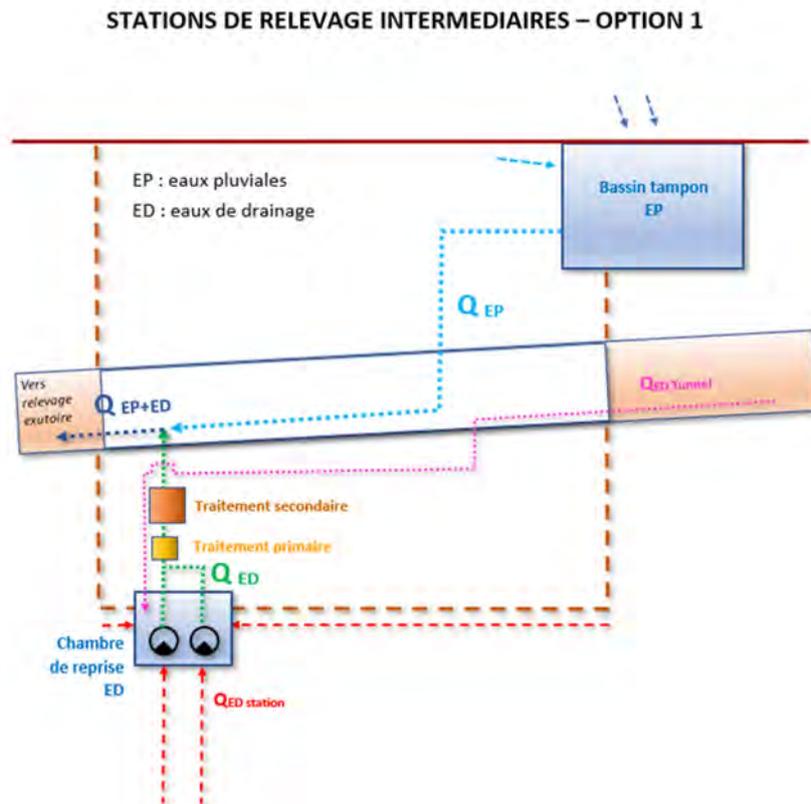


Figure 271: Principe du relevage intermédiaire – Option 1 – bassin tampon gravitaire (Tractebel, 2020)

Dans cette configuration préférentielle, le bassin tampon EP récoltant les eaux pluviales, situé en surface et permettant de limiter le débit de fuite à 5 l/ha.s s'écoulerait directement, via un piquage approprié, dans une canalisation (collecteur) en base du tunnel avec écoulement gravitaire sous l'effet de sa charge hydraulique. Cette option permettrait de se passer d'une chambre de reprise des eaux pluviales en fond de station.

Les eaux de drainage sont quant à elles rassemblées dans la chambre de reprise ED située en fond de station ; viennent s'y déverser les eaux reprises par les drains verticaux et horizontaux sous le radier de fond. Il est nécessaire aussi de prévoir un dispositif qui ramène les eaux de drainage du tunnel vers cette chambre de reprise ED.

Au sein de cette chambre de reprise une pompe refoule les eaux, dans un collecteur en base du tunnel. Les écoulements des relevages intermédiaires jusqu'aux points hauts sont en charge (c'est-à-dire de P1/Dépôt à Bordet ainsi que de P3/Verboekhoven à Colignon). Une fois les points hauts franchis, l'écoulement passe en gravitaire.

Avant piquage dans le collecteur, les eaux de drainage subissent un traitement approprié avant leur mélange avec les eaux pluviales.

Il est recommandé de doubler le dispositif de pompage au sein de la chambre de reprise ED.

Comme pour les stations principales, il est recommandé que le système de relevage puisse être vidangé lors des opérations de relevage / évacuation lors des opérations de maintenance. Il devra donc être vérifié que la capacité de la chambre de reprise ED a une capacité suffisante pour reprendre les eaux de vidange pendant la période d'arrêt tout en continuant à collecter les eaux de drainage.

Ceci concerne les vidanges suivantes :

- Pour la station P1 : les écoulements venant de Bordet et du dépôt,
- Pour la station P3 : les écoulements de venant de Riga et Colignon.

De la même manière, si cette capacité n'est pas suffisante au niveau de la chambre ED, il devra être adjoint en fond de station, comme proposé dans **l'option 2 : bassin tampon + vidange** (voir figure ci-après), d'une chambre de vidange des eaux de capacité suffisante pour collecter ces eaux de vidange et de drainage pendant la période d'arrêt. Ces aspects devront faire l'objet d'une note de dimensionnement à valider par le maître d'ouvrage lors des études d'exécution.

STATIONS DE RELEVAGE INTERMEDIAIRES – OPTION 2

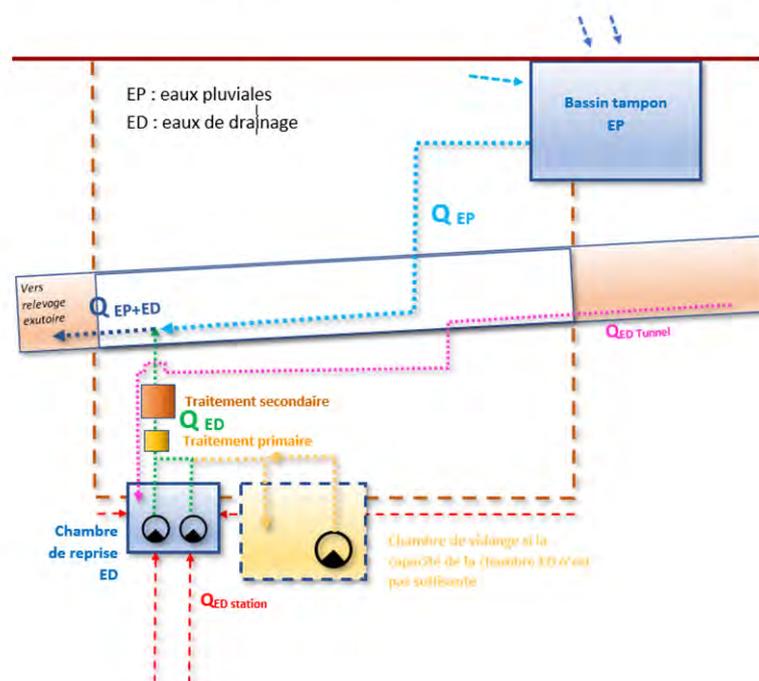


Figure 272: Principe du relevage intermédiaire – Option 2 – bassin tampon gravitaire et vidange (Tractebel, 2020)

1.2.2.3. Caractéristiques indicatives des stations de pompage

Le tableau suivant détaille les débits à gérer au droit de chaque station de pompage en considérant une situation maximaliste soit en période pluvieuse et une situation normale soit sans eaux pluviales. Le tableau identifie les débits à évacuer par relevage et les débits à évacuer gravitairement.

Le tableau reprend aussi, à titre indicatif, les hauteurs géométriques de refoulement minimum à considérer (sans calcul des pertes de charge à ce stade).

Station de relevage		P1	P2	P3	P4
Localisation		Proximité P0	Station Tilleul	Station Verboekhoven	Gare du Nord
Statut		Relevage intermédiaire	Relevage principal	Relevage intermédiaire	Relevage principal
Débits					
Débit de temps sec = eaux de drainage	l/s	1,18	4,19	2,85	6,36
<i>Evacué par relevage</i>	<i>m³/h</i>	<i>4,2</i>	<i>15,1</i>	<i>10,3</i>	<i>22,9</i>
Débit maximum de temps pluvieux	l/s	30,4	48,5	9,2	21,9
<i>Evacué gravitairement</i>	<i>m³/h</i>	<i>109,5</i>	<i>174,7</i>	<i>33,0</i>	<i>78,9</i>
Débit de temps pluvieux = eaux de drainage + eaux pluviales	l/s	31,61	52,71	12,03	28,28
<i>Total vers l'exutoire</i>	<i>m³/h</i>	<i>113,8</i>	<i>189,8</i>	<i>43,3</i>	<i>101,8</i>
Géométrie					
Cote terrain naturel	m DNG	37,5	44,5	28	18
Niveau de fond	m DNG	18	12	-2	-6,58
Niveau du refoulement ED	m DNG	24,4	44,5	2,5	18
		niv. Bordet	surface	niv. colignon	surface
Pompages					
Chambre de reprise ED		2 pompes	2 pompes	2 pompes	2 pompes
Débit	m ³ /h	4,2	15,1	10,3	22,9
Hauteur de refoulement min	m	6,4	32,5	4,5	24,6
Chambre de vidange		1 pompe	1 pompe	1 pompe	1 pompe
Débit		à préciser			
Hauteur de refoulement min		à préciser			

Tableau 84 : Caractéristiques théoriques des stations de pompage / relevage (Tractebel, 2020)

Les débits à évacuer à l'exutoire peuvent être très variables et sont susceptibles d'augmenter fortement en cas d'évènements pluvieux. La mise en place des recommandations relatives à la gestion des eaux pluviales au droit des stations (notamment le scénario optimum) permettrait de réduire les débits d'eaux pluviales rejetés via la mise en place de dispositifs d'infiltration avec et sans rejet.

1.2.3. Traitement des eaux de drainage

1.2.3.1. Principe

Par sécurité, il est recommandé de mettre en œuvre une unité de traitement des eaux pour les eaux de drainage qui seront reprises à partir des chambres de reprise ED. Les eaux ayant à subir ce traitement seront les **eaux de rabattement en fond de station** et les **eaux d'infiltration dans le tunnel**.

On notera qu'il existe actuellement une inconnue quant aux charges d'entrée dans cette unité de traitement puisque :

- Elles sont fonction de l'ensemble des sources « polluantes » présentes dans **la « zone de capture »** du projet c'est-à-dire dans la zone étendue de l'aquifère qui est susceptible d'alimenter le système de drainage des stations et du tunnel. Il s'agit d'une zone de grande ampleur influencée notamment par le cône de rabattement du projet et les alimentations amont (zone hors aire d'influence mais alimentant le dispositif).
- Elles concernent des eaux provenant de **différents niveaux aquifères intercalés par des horizons aquitards**, en d'autres termes des eaux potentiellement contaminées dans les horizons superficiels peuvent se trouver en mélange avec des eaux d'origine plus profonde peu affectées par des contaminations.

En d'autres termes, les charges polluantes résultantes ne trouvent pas leur origine uniquement dans les sources polluées identifiées au droit des stations mais seront fonction notamment du mélange entre ces sources polluantes et les eaux périphériques ou profondes polluées ou non à des degrés divers.

Afin de caractériser au mieux ces charges polluantes en présence, il est recommandé de concevoir le traitement des eaux de drainage en deux phases successives :

- **Une phase 1 = phase pilote** : une station de traitement temporaire est installée par station pendant la phase chantier et une première année d'exploitation afin de quantifier les débits et les charges polluantes jusqu'à l'équilibre et notamment sur un cycle hydrologique complet (hautes eaux / basses eaux) quand le dispositif sera en opération. La situation observée pendant cette première année d'exploitation sera la plus représentative de la situation définitive vu qu'elle intègre à ce moment l'ensemble des sources polluantes actives dans la zone de capture du projet. Pour cette phase, des unités de traitement sont prévues au niveau de chaque station vu qu'au début du chantier la jonction entre les stations ne sera pas terminée. Pendant cette phase pilote, un monitoring des charges polluantes et des débits entrants sera opéré. Une fréquence minimale bimestrielle est recommandée. Cette période de monitoring permettra d'objectiver le design et le dimensionnement la station définitive à mettre en œuvre par la suite.

Dans un premier temps, tant que les exutoires finaux ne seront pas reliés, les rejets devraient s'effectuer vers les égouts ; dans un second temps, lors de la première année d'exploitation le rejet pourra alors se faire vers les exutoires prévus. Ces stations de traitement mobiles seront démantelées à la fin de la phase 1.

- **Une phase 2 = phase définitive** : une station définitive est installée par point exutoire (soit deux stations définitives : une à la gare du Nord et une à la station Tilleul). Celle-ci sera dimensionnée sur base des données d'entrée acquises pendant la phase 1 et sur base des normes de rejet fixées par Bruxelles Environnement pour les eaux de surface.

1.2.3.2. Objectifs de traitement – normes de rejet

Les normes de rejet temporaires et définitives seront fixées par Bruxelles Environnement dans le cadre du permis octroyé.

A ce stade on peut recommander que ces normes de rejet aient pour **objectif final le respect des normes de qualité des eaux de surface en Région Bruxelloise après rejet dans le milieu récepteur** (Senne et Kerkebeek). Il s'agit de normes à l'immission.

On notera que les flux polluants autorisés au rejet doivent tenir compte par bilan massique de la charge rejetée (débit et concentration rejetés) et de la charge du milieu récepteur avant rejet (débit et concentration de fond), ceci afin d'évaluer la concentration autorisée au rejet. En d'autres termes, les objectifs de traitement tiendront compte de ce facteur d'atténuation par rapport aux normes de qualité des eaux de surface ici présentées.

Les normes de qualité des eaux de surface en vigueur sont reprises ci-après.

1) Norme de qualité de base (physico-chimique) pour les eaux de surface (source AGRBC du 24/03/11)

Normes de qualité de base (physico-chimique) pour les eaux de surface *			
Paramètre		Moyenne annuelle	Minimum-Maximum
Température	T°	< 25°C	
pH			6<x<9
Conductivité électrique		800 µS/cm	
O ₂ dissous		> 5 mg/l	
% saturation en O ₂		50%<x<120%	
Demande Biologique en Oxygène	DBO	< 8 mg/l	
Demande Chimique en Oxygène	DCO	< 40 mg/l	
Matières en suspension	MES	< 50 mg/l	
Azote total	NT	< 12 mg/l N	
Phosphore total	PT	< 1 mg/l P	

* Pour la Woluwe, masse d'eau de surface intégralement située en zone Natura 2000, des normes plus strictes sont d'application:
 - Température < 23°C (au lieu de 25°C)
 - O₂ dissous > 8 mg/l (au lieu de 5 mg/l)
 - DCO < 20 mg/l (au lieu de 40 mg/l)
 - MES < 25 mg/l (au lieu de 50 mg/l).

Tableau 85 : Normes de qualité de base (physico-chimique) pour les eaux de surface (AGRBC 24/03/2011)

2) Normes de qualité de base pour les eaux de surface (source AGRBC du 17/12/2015 modifiant l'AGRBC du 24/03/2011)

Normes de qualité de base pour les eaux de surface			
Source : AGRBC du 17/12/2015 modifiant l'AGRBC du 24/03/2011 établissant des normes de qualité environnementale, des normes de qualité de base et des normes chimiques pour les eaux de surface contre la pollution causée par certaines substances dangereuses et autres polluants			
Paramètre		Moyenne annuelle	Maximum
Chlorures	Cl ⁻	< 150 mg/l	
Sulfates	SO ₄ ²⁻	< 150 mg/l	
Cyanures totaux	CN	< 0,05 mg/l	
Cadmium total	Cd	< 5 µg/l	
Mercuré total	Hg	< 1 µg/l	
Nickel total	Ni	< 50 µg/l	
Plomb total	Pb	< 50 µg/l	
Chrome total	Cr	< 50 µg/l	
Chrome (phase dissoute)	Cr (dissous)	< 5 µg/l	
Cuivre total	Cu	< 50 µg/l	
Cuivre (phase dissoute)	Cu (dissous)	< 7 µg/l	
Zinc total	Zn	< 300 µg/l	
Zinc (phase dissoute)	Zn (dissous)	< 20 µg/l	
Arsenic total	As	< 50 µg/l	
Arsenic (phase dissoute)	As (dissous)	< 3 µg/l	
Substances tensioactives anioniques		< 0,1 mg/l	
Substances tensioactives non-ioniques et cationiques		< 1 mg/l	
Huiles minérales			Présence visible 2 fois max à l'œil nu

Tableau 86: Normes de qualité de base pour les eaux de surface (AGRBC 17/12/2015)

3) Normes de qualité environnementale (NOE) pour les eaux de surface (source AGRBC du 17/12/2015 modifiant l'AGRBC du 24/03/2011)

4) Normes chimiques pour la qualité des eaux de surface (source AGRBC du 24/03/2011)

Il s'agit de listes définissant les concentrations **moyennes annuelles (MA)** et les **concentrations maximales admissibles (CMA)** pour une série de substances dangereuses : métaux, pesticides, micropolluants organiques : organochlorés, BTEX, HAP, phénols, hétérocycles azotés, etc.).

Le tableau ci-dessous reprend une synthèse non exhaustive de ces différentes normes au regard des concentrations maximales ayant été observées dans les eaux souterraines, en dépassement des normes d'assainissement ou d'intervention de **l'ordonnance sol** (normes à l'immission dans les eaux souterraines), pour les parcelles situées à l'intérieur des périmètres des stations qui ont fait l'objet d'une étude de pollution (ordonnance sol).

Partie 4 : Analyse des incidences de la variante de gestion des eaux d'infiltration
1.2. Analyse de la variante – Sol, sous-sol et eaux souterraines

Ceci ne concerne que les parcelles dans le périmètre des stations mais ne donne pas une vision précise de ce que sera la charge polluante dans la mesure où :

- d'autres parcelles contaminées peuvent se trouver dans la zone de capture du projet ;
- certaines de ces contaminations ont déjà pu donner lieu à des mesures de remédiation locales ;
- les sources contaminantes résiduelles dans le périmètre des stations seront, de facto, amenées à être évacuées lors des excavations ;
- comme signalé les contaminations résiduelles des eaux collectées seront reprises dans le mélange global des eaux de drainage.

A ce stade, pour la **phase 1 – pilote** il est proposé de considérer comme normes de rejet celles qui sont utilisées dans le cadre des travaux d'assainissement et de mesures de gestion du risque en application de l'ordonnance sol (*code de bonne pratique 03/04/2017 - infofiche Bruxelles Environnement*).

Les valeurs significatives (en µg/l) qui en sont extraites sont reprises dans le tableau ci-après.

	Composé	Norme d'émission (mg/Nm ³)	
BTEXNS+MTBE	Benzène	1	
	Toluène	50	
	Ethylbenzène	50	
	Xylène	50	
	Styrène	50	
	Naphtalène	5	
	MTBE	50	
Organique	Huile minérale	50	
	Phénol	20	
	Crésol	20	
	Cyanure	5	
	Formaldéhyde	20	
HAP	Benzo(a)pyrène	0,05	
	Dibenzo(a,h)anthracène	0,05	
VOCL	Dichlorométhane	20	
	Trichlorométhane (chloroforme)	2,5	
	Tétrachlorométhane	3,2	
	1,1-dichloroéthane	100	
	1,2-dichloroéthane	1	
	1,1,1-trichloroéthane (méthylchloroforme)	20	
	1,1,2-trichloroéthane	20	
	Cis-1,2-dichloroéthylène	100	
	trans-1,2-dichloroéthylène	100	
	Cis+trans-1,2-dichloroéthylène	100	
	1,1 Dichloroéthylène (vinylidene chloride)	8	
	Trichloroéthylène	1	
	Tétrachloroéthylène	20	
	Chlorure de vinyle	1	
	Chlorobenzène	Monochlorobenzène	20
		1,2-dichlorobenzène	20
		1,3-dichlorobenzène	20
	1,4-dichlorobenzène	6	
	Trichlorobenzène	0,05	
	Tétrachlorobenzène	20	
	Pentachlorobenzène	0,05	
	Hexachlorobenzène	0,05	
Métaux lourds	Plomb	0,5	
	Cobalt	0,5	
	Arsenic	0,05	
	Nickel	0,5	
	Mercuré	0,05	
	Cadmium	0,05	
	Brome	3	
	Chrome VI	0,05	
Chrome	0,5		
	Sélénium	0,1	

Tableau 88: Normes de rejet dans le cadre des travaux d'assainissement

Pour ce qui concerne la **phase 2 – phase définitive**, il est recommandé que les normes soient revues par Bruxelles Environnement, en toute connaissance des charges entrantes et avec pour objectif le respect de la qualité des eaux de surface dans l'optique décrite ci-dessus.

1.2.3.3. Choix des opérations de traitement à mettre en œuvre

Compte tenu de la méconnaissance des charges entrantes à ce stade, les unités de traitement minimales recommandées à ce stade pour le traitement des eaux de drainage sont :

Pour la phase 1 – station pilote

Traitement primaire

- **Séparateur hydrocarbures** : élimination d'éventuelles couches flottantes (LNAPL) ou plongeantes (DNAPL) ;
- **Filtration sur sable ou équivalent** : abattement des matières en suspension et des précipitats Fe, Mn, ... et protection de l'étage de traitement secondaire ;

Traitement secondaire

- **Adsorption sur colonne de charbon actif (GAC)** : abattement des micropolluants organiques de manière indiscriminée : solvants chlorés, BTEX, etc. et autres polluants organiques (indicateur : DCO ou COT).

Pour la phase 2 – station définitive

En première approche, le chaînage de base serait similaire à celui prévu pour la station pilote en phase 1, avec adaptation des débits au regroupement des rejets au niveau des exutoires.

Le tableau suivant reprend les débits de projet à considérer dans les deux phases selon le calcul de rabattement effectué par Artesia avec hypothèses maximalistes (modélisation V1).

Partie 4 : Analyse des incidences de la variante de gestion des eaux d'infiltration
1.2. Analyse de la variante – Sol, sous-sol et eaux souterraines

	Phase 1 - Stations de traitement pilotes			Phase 2 - Stations de traitement définitive	
	<i>Q Station</i>	<i>Q Tunnel</i>	<i>Qtotal</i>	<i>Qtotal</i>	
	<i>m³/h</i>	<i>m³/h</i>	<i>m³/h</i>	<i>m³/h</i>	
Laison gre Nrd	3,1	0,1	3,2	EXUTOIRE 1	22,9
Liedts	4,4	0,1	4,5		
Colignon	4,9	0,2	5,1		
Verboekhoven	6,6	0,1	6,7		
Riga	3,3	0,2	3,5		
Tilleul	3,8	0,1	3,9	EXUTOIRE 2	15,1
Paix	3,6	0,1	3,7		
Bordet	3,1	0,2	3,3		
Dépôt Haren	4,1		4,1		
TOTAL	36,9	1,1	38,0		38,0

Tableau 89 : Débits de traitement des eaux de drainage pour les deux phases

La phase de monitoring phase 1 permettra de préciser, pour la phase 2, si le traitement par adsorption sur GAC :

- soit est suffisant,
- soit doit être complété par des procédés de traitement supplémentaires,
- soit peut-être démantelé en ne gardant que le traitement primaire.

Ce point devra être fait en concertation avec Bruxelles Environnement au terme de la phase 1.

Pour ce qui concerne les **nitrate**s, il n'existe pas de normes de rejet et ceux-ci ne sont pas repris dans les normes de qualité des eaux de surface. Si on se réfère à l'ordonnance sols, la norme d'assainissement est fixée à 5 mg/l ce qui peut paraître sévère en termes d'objectifs de rejet.

Pour ce qui concerne ce paramètre, il est prématuré de recommander un traitement au stade de la phase 1 – station pilote. Il est recommandé que la pertinence d'organiser ce traitement soit évaluée en fonction des résultats du monitoring de la phase 1 et des charges réelles en nitrates dans l'eau de drainage et dans le milieu récepteur.

Le cas échéant, s'il s'avère pertinent, un traitement pourra être mis en œuvre dans le cadre de la phase 2 – station définitive. Dans cette éventualité, un traitement adapté pourrait être un passage sur résine échangeuse (échange ionique). Ce point devra aussi être évalué en concertation avec Bruxelles Environnement avant le terme de la phase 1.

1.2.4. Impact sur le réseau d'égouttage et la station d'épuration

Le projet initial prévoit le rejet continu des eaux de drainage (débit total de 38 m³/h – Artesia V1, 2019 – hypothèse maximaliste) et le rejet des eaux pluviales à débit partiellement limité (tamponnement des surfaces de toitures (33 l/m²), pas de tamponnement pour les espaces publics).

La mise en place de l'alternative éviterait le rejet constant des eaux de drainage (38 m³/h – hypothèse maximaliste) et le rejet des eaux pluviales après tamponnement partiel vers le réseau d'égouttage. Cela évite ainsi d'envoyer des eaux propres dans le réseau d'égouts et la station d'épuration. Cette alternative respecte les recommandations du projet de RRU prévoyant le rejet en priorité des eaux pluviales via le réseau d'eaux de surface et favorise une gestion intégrée et durable des eaux (pluviales et de drainage).

1.2.5. Impact sur le réseau d'eau de surface

1.2.5.1. Impact quantitatif

A. Senne

Les figures suivantes présentent l'évolution du débit de la Senne à l'entrée de la Région bruxelloise et à hauteur du site Elia (en aval de la gare du Nord) entre le 1^{er} janvier et le 30 juin 2018.

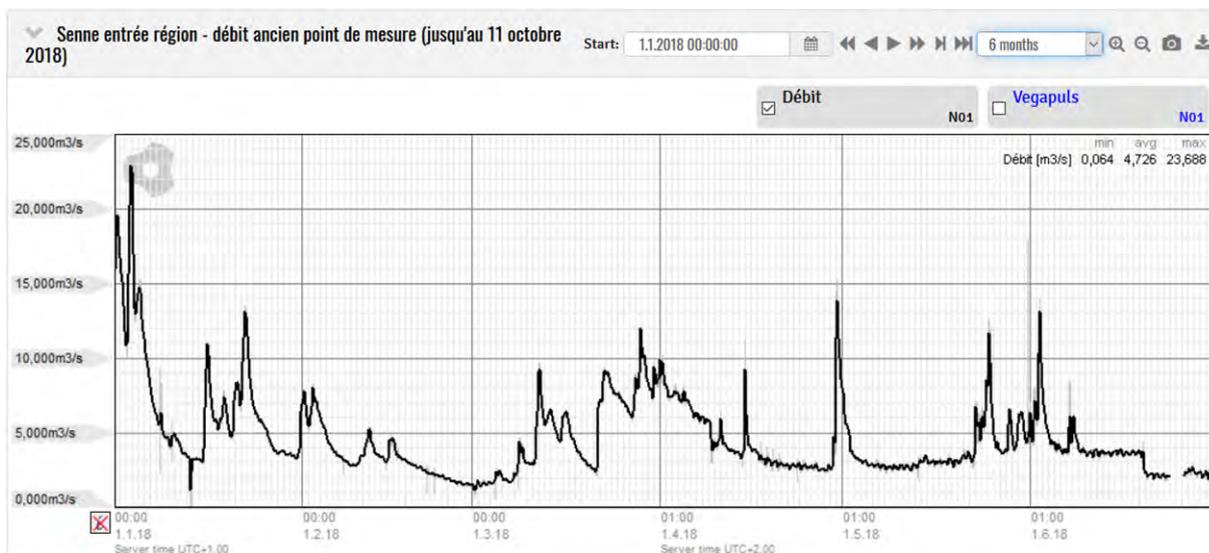


Figure 273 : Evolution du débit de la Senne à l'entrée de la Région bruxelloise entre le 1^{er} janvier 2018 et le 30 juin 2018 (Flowbru, 2020)

Partie 4 : Analyse des incidences de la variante de gestion des eaux d'infiltration
1.2. Analyse de la variante – Sol, sous-sol et eaux souterraines

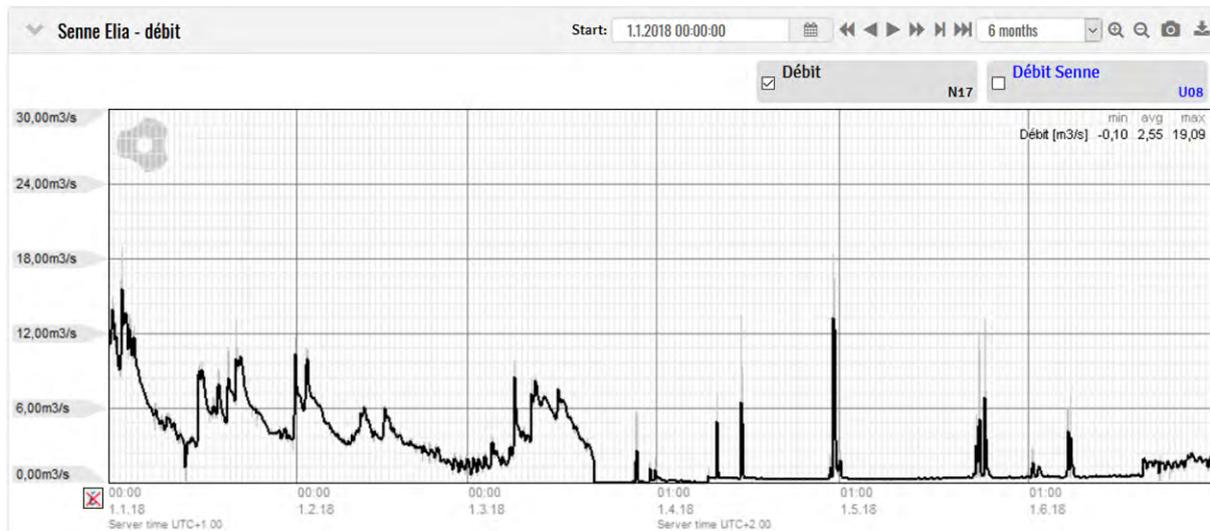


Figure 274 : Evolution du débit de la Senne à hauteur du site Elia entre le 1^{er} janvier 2018 et le 30 juin 2018 (Flowbru, 2020)

Sur cette période, le débit de la Senne est en moyenne de 4,7 m³/s (à l'entrée) et de 2,55 m³/s (à hauteur du site Elia) avec des débits de pointe à respectivement 23 et 19 m³/s. En comparaison, les débits rejetés à l'exutoire 1 représentent en situation pluvieuse 0,0283 m³/s, soit 0,1% du débit de pointe de la Senne, ce qui est non significatif. En situation non pluvieuse, les débits rejetés à l'exutoire 1 sont estimés à 0,0064 m³/s soit 0,2% du débit moyen de la Senne soit non significatif.

B. Kerkebeek

Contrairement à la Senne, aucune sonde limnimétrique n'est installée sur le Kerkebeek afin de connaître l'évolution de son débit. Par conséquent, il est difficilement possible d'évaluer l'impact quantitatif de l'exutoire 2. Toutefois, le débit relatif aux eaux pluviales représente 92% du débit total de l'exutoire 2. Au vu des recommandations faites dans chaque livre station concernant la mise en place d'un système de gestion des eaux pluviales sur l'ensemble du périmètre de chaque station favorisant l'infiltration et le tamponnement, les débits renseignés sont maximalistes.

1.2.5.2. Impact qualitatif

A. Situation existante au niveau de la Senne

La figure suivante présente l'évolution de l'état écologique des principaux cours d'eau et étangs bruxellois. On peut y observer que la Senne est en mauvais état écologique à l'entrée et à la sortie de la Région excepté en 2013 où elle a obtenu la qualité médiocre à l'entrée.

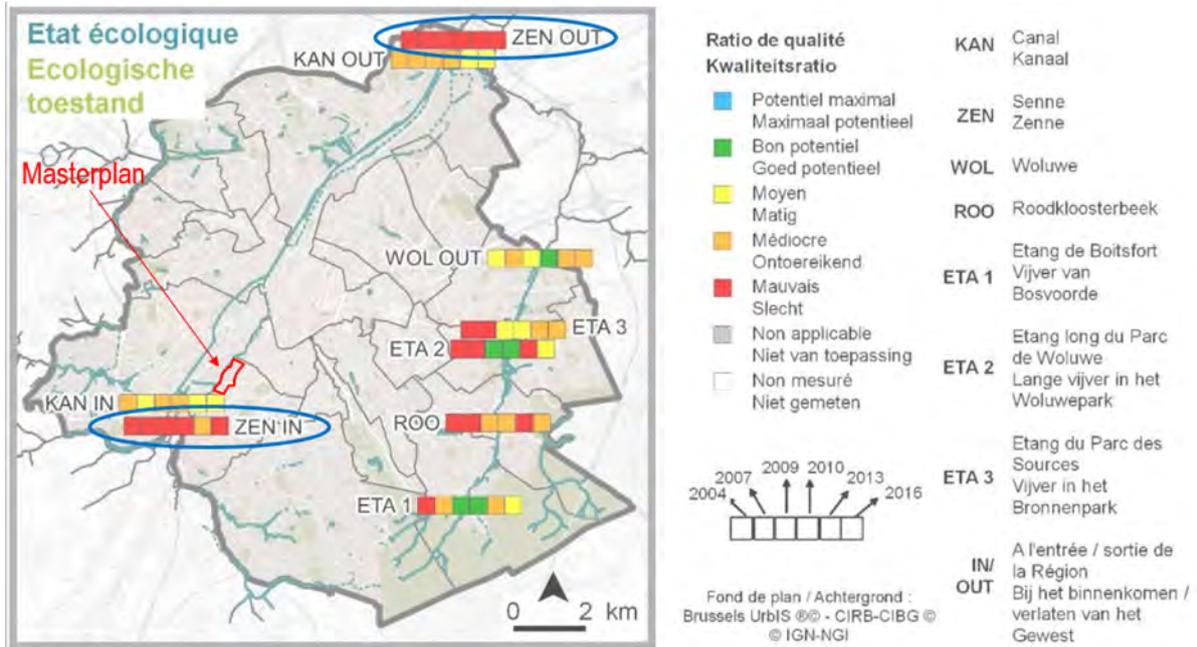


Figure 275 : Evolution de l'état écologique des principaux cours d'eau bruxellois (Bruxelles Environnement, 2016)

Les tableaux suivants détaillent l'évolution de la qualité biologique de la Senne à l'entrée et à la sortie de la Région selon les indicateurs détaillés.

Evolution de la qualité biologique de la Senne, à l'entrée de la Région (ZEN IN)						
Sources : Van Tendeloo et al., 2004, Triest et al., 2008, Triest et al. 2012, Van Onsem et al. 2014, Van Onsem et al. 2017, études commanditées par Bruxelles Environnement						
	2004	2007	2009	2010	2013	2016
Phytoplancton	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Macrophytes	0,00	0,00	0,20	0,20	0,20	0,00
Phytobenthos	0,31	0,42	0,22	0,26	0,36	0,54
Macro-invertébrés	0,30	0,30	0,20	0,40	0,40	0,40
Poissons *	0,00	0,00	NA	NA	0,00	0,35
Qualité écologique	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Médiocre	Mauvaise

* Note : Les poissons sont échantillonnés au site ZEN IN bis, après le rejet de la station Sud.

Evolution de la qualité biologique de la Senne à la sortie de la Région (ZEN OUT)						
Sources : Van Tendeloo et al., 2004, Triest et al., 2008, Triest et al. 2012, Van Onsem et al. 2014, Van Onsem et al. 2017, études commanditées par Bruxelles Environnement						
	2004	2007	2009	2010	2013	2016
Phytoplancton	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Macrophytes	0,00	0,00	0,20	0,20	0,60	0,40
Phytobenthos	0,31	0,45	0,30	0,21	0,34	0,53
Macro-invertébrés	0,00	0,30	0,20 0,20	0,20	0,30	0,20
Poissons	0,00	0,00	NA	NA	0,21	0,35
Qualité écologique	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise

Tableau 90: Evolution de la qualité biologique de la Senne à l'entrée et à la sortie de la Région (Bruxelles Environnement, 2018)

L'étude réalisée par Bruxelles Environnement en 2018 conclut les éléments suivants :

« A son entrée et à sa sortie du territoire bruxellois, la Senne relève de la classe de qualité biologique « mauvaise » et ce, depuis 2004. [...] Néanmoins, l'évolution des éléments de qualité biologique indiquent une tendance positive depuis 2010 aux deux points d'échantillonnage. Cette amélioration pourrait constituer un des effets visibles et bénéfiques de la mise en service des stations d'épuration Nord (2007) et Sud (2000) selon les auteurs des études. Celle-ci s'avère néanmoins insuffisante pour se refléter au niveau de l'état écologique global. Le retour des poissons, et dans une moindre mesure l'amélioration du phytobenthos et des macro-invertébrés, marquent une évolution très positive de la Senne. »

B. Eaux de drainage

La conception et la mise en œuvre du traitement des eaux de drainage tel que décrites et recommandées à la section 1.2.3.2 permettra de limiter tout impact négatif du rejet des eaux de drainage sur la qualité des eaux de surface.

Comme expliqué dans cette section celui-ci se base :

- Pour la phase 1 – station pilote, sur un respect des normes de rejet de projets d'assainissement ;
- Pour la phase 2 – station définitive, sur un respect des normes de qualité des eaux de surface.

Il est proposé que les objectifs de la phase 1 soient à déterminer en accord avec Bruxelles Environnement sur base des résultats d'exploitation de la phase 1 – pilote.

C. Eaux pluviales

Les eaux pluviales rejetées dans les conduites ne devront pas faire l'objet d'un traitement particulier pour plusieurs raisons :

- Mise en place de dispositif de tamponnement/infiltration qui permettront une décantation et une filtration des polluants typiquement retrouvés dans les eaux pluviales ;
- Mise en place de séparateurs hydrocarbures pour les zones à risque du dépôt.

1.3. Analyse de la variante – Energie

Les stations de pompage seront chacune équipées de 2 pompes (pour l'évacuation des eaux de drainage), dont les puissances et les consommations d'électricité annuelles correspondantes sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Pompe	Localisation	Puissance nominale [kW]	Consommations d'énergie annuelles [kWh]
P1	Proximité puits P0	0,3	2.628
P2	Station Tilleul	4	35.040
P3	Station Verboekhoven	0,4	3.504
P4	Gare du Nord	4,5	39.420
Total			80.592

Tableau 91 : Puissances et consommations d'électricité annuelles des pompes (ARIES, 2021, d'après Tractebel)

Les puissances nominales ont été déterminées sur base des éléments de développement de la variante disponibles au stade actuel de l'étude, en considérant les pertes de charge à travers un coefficient forfaitaire de 1,5. Les consommations d'électricité annuelles sont en outre évaluées sur base de l'hypothèse d'un fonctionnement des pompes permanent à puissance nominale. Par ailleurs, les consommations des pompes de vidange n'ont pas été déterminées et ne sont pas prise en compte dans cette évaluation.

En considérant les consommations d'électricité annuelles d'un ménage moyen à Bruxelles de l'ordre de 1.750 kWh²⁷, les consommations engendrées par le fonctionnement des pompes représentent les consommations d'environ 45 ménages.

²⁷ D'après les données disponibles de Bruegel relatives à un ménage moyen bruxellois : consommations annuelles de 1.600 kWh en heures pleines et de 1.900 kWh en heures creuses.

1.4. Analyse de la variante – social et économique

En matière de prix, le point ci-dessous reprend une première estimation grossière du prix des installations nécessaires à la mise en œuvre de cette alternative. Une différence est envisageable entre le coût réel de ces installations et le prix mentionné dans ce rapport :

- Prix de 48.000 € pour les 12 pompes ;
- Prix de 270.000 € pour les 4,5 km de conduite dans le tunnel ;
- Prix de 160.000 € pour les installations de filtrations des exécutoires Nord et Tilleul ;

Par conséquent, l'installations des 12 pompes, des 4,5 km de conduite d'eau ainsi que des installations de filtrations au droit des deux exécutoires impliquera un coût total estimé à ~ 500.000 euros.

Les deux exécutoires prévus dans la variante de gestion des eaux d'infiltration, permettent de drainer en continu 916 m³/jour, ou 332.440 m³/an. En sachant que le prix total d'assainissement est d'environ 1,5€ / m³ d'eau rejeté à l'égout. Si l'option vers les exutoires de surface n'est pas appliquée, le coût en situation 'provisoire' du rejet des eaux aux égouts est donc évalué à ≈ 500.000 € par an.

A noter, qu'on considère que pour les 7 stations, les recommandations formulées en matière de gestion des eaux pluviales ont été appliquées et donc qu'une gestion à la source est effectuée au niveau de ces 7 stations. Il s'agit d'un calcul financier plus complexe car il dépend de plusieurs paramètres notamment l'intensité et le temps de l'épisode pluvieux.

Pour information en cas de pluie intense pour les 7 stations et si le rejet devait se faire aux égouts sans appliquer les recommandations de gestion des eaux, cela représente environ 450€/heure de rejet.

1.5. Conclusion et recommandations sur la variante de gestion des eaux

Le projet tel qu'initialement déposé prévoit le rejet aux égouts des eaux d'infiltration récoltées principalement au point bas des stations et du tunnel. Mais également des eaux pluviales récoltées en surface au niveau des stations (après temporisation). L'objectif de cette variante est d'envisager une méthode alternative de gestion des eaux d'infiltration et des eaux pluviales ne nécessitant **pas** leur renvoi complet aux égouts et cela pour l'ensemble du tracé.

Comme pour la gestion des eaux pluviales, différents critères restent d'application :

- Stockage - utilisation
- Infiltration au plus proche de la source
- Rejet vers un réseau de surface approprié (étangs, mare, noues, rivière, ruisseau, etc...)

Concernant les eaux pluviales et les eaux de ruissellement, comme détaillé dans les livres relatifs aux stations, c'est l'infiltration en surface qui est recommandée en priorité, afin de viser le zéro rejet à l'égout. Lorsque la totalité des volumes précipités n'est pas gérable par infiltration, alors le trop-plein doit en priorité être orienté vers un exutoire de surface, s'il y a un cours d'eau à proximité, et non vers les égouts.

En concertation avec le facilitateur eau de Bruxelles Environnement, deux exutoires ont été identifiés :

Exutoire 1 : Gare du Nord – Noue Bolivar. Il est envisagé de rejeter les eaux d'infiltration de la moitié de stations et tunnel (Tilleul → P5) vers cet exutoire (S. Bolivar) qui lui-même se rejetera à la Senne. Cette hypothèse doit être prise avec toutes les mesures de réserve puisqu'au moment de clôturer cette EI le projet Max-sur-Senne n'est pas encore approuvé.

Exutoire 2 : Tilleul – Kerkebeek (Moeraske) . Il est envisagé de rassembler les eaux d'infiltration de l'autre moitié du tunnel et des stations (Bordet → Tilleul) afin de les remonter en surface et ensuite de construire une conduite gravitaire vers le Kerkebeek. À noter que le demandeur n'a pas la maîtrise de cette dernière intervention puisque le périmètre de la demande s'arrête à la rue de Picardie. Pour rendre ce rejet possible il faut donc obtenir l'aval des administrations et gestionnaires concernés.

Aucun autre potentiel exutoire n'a été identifié dans le périmètre de la demande.

Afin de garantir la compatibilité des ouvrages le scénario worst case a été estimé dans le cadre de cette analyse. Considérant alors que la totalité des eaux pluviales récoltées sur les 7 stations + les eaux d'infiltration devaient être absorbées par les 2 exutoires. Il s'agit de 28l/sec pour l'exutoire 1 (gare du Nord) et 53l/sec pour l'exutoire 2 (Kerkebeek). Cette démonstration a été faite pour un rejet vers le Kerkebeek (existant) et pour la noue Bolivar (si cette option est retenue il faudra alors s'assurer du dimensionnement du projet de noue). Mais il s'agirait alors d'une hypothèse pessimiste sachant qu'elle ne tiendrait pas compte des recommandations pour la gestion des eaux pluviales au plus proche de la source c'est-à-dire au droit des 7 stations comme recommandé dans les livres « station ». Il apparaît également inadéquat de faire descendre des eaux de pluie dans les stations et le tunnel qui, au regard du haut voltage, se doivent d'être préservés au maximum de la présence d'humidité...

Partie 4 : Analyse des incidences de la variante de gestion des eaux d'infiltration
1.5. Conclusion et recommandations sur la variante de gestion des eaux

C'est pourquoi le scénario le plus crédible est le rejet aux 2 exutoires UNIQUEMENT des eaux d'infiltration récoltées dans le fond des ouvrages. Il s'agit d'un débit évalué à 6l/sec pour les eaux rassemblées au puits P5 et de 4l/sec pour les eaux rassemblées à Tilleul.

Au vu du tracé du tunnel, une grande partie des conduites seront gravitaires. Il convient néanmoins de placer des pompes à Bordet et à Verboekhoven afin de contrer le faux plat montant de cette section de tunnel.

Les stations Tilleul et Liedts seraient équipées de pompes de relevage situées sous les quais. Les pompes doivent être doublées et compartimentées afin de pouvoir effectuer les entretiens et les réparations tout en continuant à évacuer les eaux.

Il a été convenu avec Bruxelles environnement que ces eaux devaient être filtrées avant rejet vers le réseau de surface ou infiltration. Pour une raison évidente de facilité d'entretien et de by-pass durant la manœuvre d'entretien ou de réparation (exemple : camion-vidange), le local de filtration devra se situer au plus proche de la surface et dans le périmètre d'intervention du projet.

Au niveau de la charge polluante, un pré-diagnostic a été rédigé dans le présent livre pour la partie « risque de pollution au droit du tracé 6.4.4.2 ». Il apparaît dans l'analyse que les charges polluantes résultantes ne trouvent pas leur origine uniquement dans les sources polluées identifiées au droit des stations mais seront fonction notamment du mélange entre ces sources polluantes et les eaux périphériques ou profondes polluées ou non à des degrés divers. La source polluante la plus attendue se trouve être les solvants chlorés et dans une moindre mesure les nitrates. Il est impossible à ce stade d'en évaluer les quantités présentes à ces profondeurs. Au moment du chantier il est probable qu'une grande quantité de polluants présents dans le sol migrent et se concentrent au droit des fouilles. C'est pourquoi nous recommandons l'installation d'une station pilote à Tilleul et à Liedts (ou au P5) séparateur d'hydrocarbures, filtration sur sable ou équivalent et absorption sur colonne de charbon actif. Ce dispositif devra être soumis à monitoring pour envisager un allègement progressif de l'installation via la stabilisation des débits et de la charge polluante en phase d'exploitation.

Au niveau des exutoires, comme indiqué, ils dépendent également de la volonté et des actions d'autres parties que le demandeur. Il est donc recommandé au stade des amendements de poursuivre les contacts avec les administrations pour identifier les éventuelles opportunités de couplage de ce projet avec des réaménagements prévus sur les tracés des 2 exutoires (renouvellement de voirie, passage d'impétrants, nouvel aménagement de surface, etc...) qui se feraient en concomitance avec le chantier du métro.

Quoiqu'il en soit, nous recommandons de placer une chambre (de visite) d'attente au niveau de la station Tilleul et de rejeter les eaux de drainage (après filtration) dans le circuit des eaux pluviales, lui-même suivant les recommandations émises dans le livre « Tilleul » c'est à dire une infiltration de ces eaux dans le périmètre de la demande. Si par la suite un usage est identifié pour les eaux de drainage, il suffira de se relier à cette chambre de visite.

Partie 4 : Analyse des incidences de la variante de gestion des eaux d'infiltration
1.5. Conclusion et recommandations sur la variante de gestion des eaux

Pour les eaux rassemblées au niveau de la station Liedts, nous ne disposons pas de suffisamment de relevés sur la position précise de la nappe et le potentiel d'infiltration. Suivant les premiers sondages, il est évident que la nappe est proche de la surface mais nous ne connaissons réellement le potentiel d'infiltration que lorsqu'une véritable campagne d'essais aura eu lieu (voir recommandation – sol - station Liedts).

En ce sens, une solution alternative consisterait à ramener les eaux à travers le tunnel de la gare du nord pour rejoindre la rue du Progrès et le noue Bolivar (si le projet Max-sur-Senne se concrétise).

Si jamais le projet Max sur Senne ne se concrétise pas au stade des amendements de ce PU métro, la solution de base consiste à ramener les eaux du côté de la rue d'Aerschot où se trouve d'ailleurs la chambre d'attente pour l'évacuation des eaux d'infiltration du lot 1 (tunnel gare du nord) mais toujours avec une filtration préalable au rejet de la rue d'Aerschot.

Analyse des incidences de la variante de gestion des eaux d'infiltration
1.5. Conclusion et recommandations sur la variante de gestion des eaux

Incidence(s)	#	Degré de priorité	Recommandations	Intervenant
Gestion des eaux pluviales	VAR.1.1	+++	Ne pas ramener les eaux pluviales dans le circuit des eaux de drainage en fond de station, gestion en surface le plus proche de la source	Demandeur
	VAR.1.2	+++	Suivre les recommandations pour la gestion des eaux pluviales dans les différents livres des stations	Demandeur
Gestion des eaux de drainage Infrastructure	VAR.1.3	+++	Obligation de filtrer les eaux de drainage avant rejet Installation de filtres à hydrocarbures, filtres sur sable ou équivalent, absorption sur charbon actif ou équivalent.	Demandeur
	VAR.1.4	+++	Mise en place d'un monitoring continu de la charge polluante L'unité de filtration peut être allégée en fonction des résultats du monitoring (s'il est prouvé que la charge devient constante) suivant une validation de BE	Demandeur
	VAR.1.5	+++	Dédoubler les pompes intermédiaires et les pompes de relevage afin de permettre la maintenance et d'éviter l'arrêt du pompage	Demandeur
	VAR.1.6	+++	Brancher les pompes sur un circuit électrique de secours	Demandeur
Gestion des eaux de drainage Exutoires	VAR.1.7	+++	Etape 1 Rassembler les eaux de drainage à Tilleul via un circuit Bordet-Paix-Tilleul Rassembler les eaux de drainage à hauteur du P5 via un circuit Riga- Verboekhoven-Colignon-Liedts	Demandeur
			Etape 2 Il est recommandé au stade des amendements de poursuivre les contacts avec les administrations pour identifier les éventuelles opportunités de couplage de ce projet avec des réaménagements prévus sur les tracés des 2 exutoires (renouvellement de voirie, passage d'impétrants, nouvel aménagement de surface, etc...) qui se feraient en concomitance avec le chantier du métro. En cas de notification par le demandeur de l'échec de cette option visant un raccord entre la station Tilleul et le Kerkebeek (à valider par BE ou autre opportunité), il est recommandé de poursuivre la canalisation dans le tunnel depuis Tilleul jusqu'au P5	Demandeur BE Vivaqua

Analyse des incidences de la variante de gestion des eaux d'infiltration
1.5. Conclusion et recommandations sur la variante de gestion des eaux

			<p>Etape 3</p> <p>Pour l'exutoire n°1, en cas de notification par le demandeur de l'échec des négociations pour un raccord à la noue Bolivar, il est recommandé de raccorder ce rejet à celui prévu à la rue d'Aerschot (voir permis du métro tunnel gare du nord - Lot 1).</p> <p>Ce raccord doit rester provisoire tant que la décision du projet de noue sur le projet Max sur Senne n'a pas été invalidée par l'administration. La filtration reste obligatoire même pour ce rejet provisoire.</p>	<p>Demandeur BE Vivaqua</p>
--	--	--	---	-------------------------------------

a



aries[®]
CONSULTANTS

Rue des Combattants 96 | B-1301 Bierges
Rue Royale 55 - 3^{ème} étage | B-1000 Bruxelles
T +32 (0) 10 430 110 | T +32 (0) 2 655 86 50
info@ariesconsultants.be | www.ariesconsultants.be