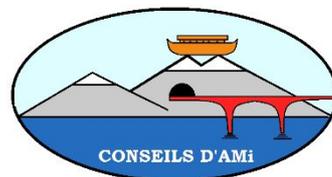


Noeud Ferroviaire Lyonnais

Expertise de la faisabilité d'un scénario en tunnel

Rapport de synthèse



Réseau Ferré de France

Noeud Ferroviaire Lyonnais

Expertise de la faisabilité d'un scénario en tunnel

Rapport de synthèse

Version	-	a	b
Document	FF7792.04/RN001-CI	FF7792.04/RN001a/CI	
Date	28 janvier 2015	5 mars 2015	
Elaboration	Daniel Collomb André Mitildjan François Sabatier	Daniel Collomb André Mitildjan François Sabatier	
Visa	Laurent CHANTRON	Laurent CHANTRON	
Collaboration			
Distribution	RFF	RFF	

© BG

TABLE DES MATIÈRES		Page
1	Introduction	4
2	Cadre de l'expertise	5
2.1	Documents de base	5
2.2	Limites de l'expertise	5
3	Méthodologie générale	5
4	Aperçu de retours d'expériences comparables ou innovantes en France et à l'étranger	6
4.1	Station EOLE-Magenta à Paris	6
4.2	Station EOLE- St Lazare – Condorcet devenue Haussmann St Lazare à Paris	7
4.3	Stations Annibaliano et Libia de la ligne B1 du métro de Rome	9
4.4	30 stations en section tunnelier sur la ligne 9 du métro de Barcelone	10
5	Contexte souterrain du secteur Part-Dieu à Lyon	11
5.1	Ouvrages souterrains profonds et fondations profondes	11
5.1.1	Situation actuelle	11
5.1.2	Projets de construction de grande hauteur	12
5.1.3	Synthèse	14
5.2	Contexte géologique / géotechnique	14
5.2.1	Structure lithologique	14
5.2.2	Contexte hydrogéologique	15
5.2.3	Caractéristiques géotechniques	17
5.2.4	Synthèse	18
5.3	Identification des points sensibles pour le projet	19
5.3.1	Tronçons en tunnel	19
5.3.1	Secteur de la gare souterraine	20
6	Analyse critique du scénario tunnel de l'étude de faisabilité	20
6.1	Les sections de tunnel	20
6.1.1	Conception générale	20
6.1.2	Méthodes de réalisation	21
6.2	Les entonnements	22
6.3	La gare souterraine	23
6.3.1	Conception générale	23
6.3.2	Méthodes de réalisation	26

NFL - Expertise de la faisabilité d'un scénario en tunnel		2
6.4	Conclusion sur la faisabilité du scénario	28
7	Possibilité de solution(s) alternative(s)	29
7.1	Éléments principaux de conception	29
7.2	Aperçu des variantes envisagées	29
7.2.1	Variante 1	30
7.2.2	Variante 2	31
7.3	Approfondissement d'étude de la variante 1 : gare à 2 tubes ferroviaires avec quais décalés	32
7.3.1	Prédimensionnement du tracé	32
7.3.2	Prédimensionnement d'un tube ferroviaire	33
7.3.3	Conception générale de la gare	35
7.3.4	Méthodes de réalisation	37
7.4	Éléments de planning	38
7.4.1	Creusement des ouvrages	38
7.4.2	Durée totale de réalisation	39
7.5	Éléments de coût	39
7.6	Réflexions complémentaires sur la solution proposée	40
7.6.1	Limitation les impacts chantiers dans le secteur de Part-Dieu	40
7.6.2	Références d'utilisation de tunneliers à confinement de gros diamètre	41
7.6.3	Enseignements pour le projet	42

NFL - Expertise de la faisabilité d'un scénario en tunnel	3	
7.7	Conclusion sur la faisabilité technique du projet	44
8	Conclusions – reconnaissances complémentaires	45
8.1	Réponses aux questions RFF pour la présente expertise (cf. cahier des charges)	45
8.2	Reconnaissances géologiques	46

ANNEXES

1. Reportage photographique de la visite de terrain du 21 novembre 2014
2. Toit des formations molassiques dans le secteur Part-Dieu
3. Détail estimatif de la solution 1
4. Planning de foration / percement des souterrains
5. REX tunneliers de grand diamètre dans le monde

1 Introduction

RFF, en tant que maître d'ouvrage de l'infrastructure ferroviaire, est chargé par décision ministérielle de mener des études de faisabilité sur les perspectives de développement des services ferroviaires à l'horizon 2030+ dans le nœud ferroviaire lyonnais.

Ces études sont coordonnées par le CGEDD et pilotées par un comité de partenaires comprenant notamment l'Etat, la Région Rhône Alpes, le Grand Lyon, RFF et SNCF.

L'étude de faisabilité globale est menée par le bureau d'études EGIS depuis septembre 2013. Une étude d'aménagement de la gare en configuration future a été simultanément confiée à AREP, sous maîtrise d'ouvrage SNCF Gares & Connexions.

Parmi les scénarios analysés, l'hypothèse d'une gare souterraine sous la gare actuelle de la Part Dieu est avancée. Cette gare souterraine de 4 voies à quai serait desservie par deux voies en souterrain nord-sud de Saint-Clair à Guillotière.

Des missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage confiées au Centre d'Etudes des Tunnels (CETU) et à SNCF – Ingénierie – Ouvrages d'Arts – Tunnels ont permis d'engager un dialogue technique sur les questions de faisabilité des ouvrages souterrains.

Les études ont révélé d'importantes difficultés pour la réalisation du scénario en tunnel et notamment de la nouvelle gare souterraine envisagée à la Part-Dieu, du fait des contraintes géologiques du sous-sol lyonnais, de la situation de la gare en milieu urbain dense et des exigences fonctionnelles de la gare en termes de positionnement (correspondances, multimodalité, accès aux zones d'emploi), de dimensions (fréquentation voyageurs, longueur des trains) et d'exploitation (gestion des situations perturbées, évacuation incendie, etc..)

Dans son rapport de juin 2014, le bureau d'étude EGIS reste très prudent sur la faisabilité de cet ouvrage : « compte tenu du caractère exceptionnel et sans précédent de cet ouvrage, des données d'entrée limitées (géotechniques, ouvrages existant) et du niveau de détails des études, une démarche prudente doit dès à présent être adoptée et aucune garantie quant à la faisabilité technique de l'ouvrage ne pourra être donnée. »

Par ailleurs, l'enveloppe financière prévisionnelle du projet évaluée à ce stade d'études est prohibitive. Elle est directement liée à l'accumulation d'importantes provisions pour risques, notamment celles relatives à la construction des ouvrages souterrains.

Partant de ce constat, RFF a décidé de confier à un collège de trois experts, respectivement un expert géologue, un expert méthodes de travaux et un expert conception des ouvrages souterrains, la réalisation d'une expertise portant prioritairement sur la question de la faisabilité du scénario en souterrain, tant pour les tunnels d'approche que pour la gare.

La mission a été confiée à MM. François Sabatier, André Mitildjan et Daniel Collomb, respectivement responsables des volets Géologie, Méthodes travaux et Conception des ouvrages souterrains, Daniel Collomb assumant par ailleurs la charge de piloter / coordonner / assembler les contributions des autres experts.

Le présent document constitue le rapport de synthèse de la mission.

2 Cadre de l'expertise

2.1 Documents de base

Les documents remis aux experts pour la mission ont été :

- Le dossier final EGIS des études de faisabilité sur le scénario tunnel, constitué des documents suivants : Rapport final Synthèse (version B du 13-10-2014), Volet technique Scénario B (version C du 08-10-2014), Dossier de plan scénario B0 (version B du 11-06-2014), Dossier de plan scénario B4 (version B du 11-06-2014), note d'hypothèses technique (version A du 27-09-2013), note d'hypothèse chiffrage (version C non datée), étude hydrogéologique (version B du 09-09-2014), Annexe 5-Scénario B0 monotube (matrice arc en ciel du 07-10-2014) et Annexe 5-Scénario B4 bitube (matrice arc en ciel du 07-10-2014),
- Le rapport AREP "Inscription et interfaces du projet NFL long terme sur le projet à terme tranche 1 et 2 du PEM de la gare de Lyon Part-Dieu" (version F du 17-10-2014) et son annexe "Plans du projet PEM de Lyon Part-Dieu tranche 1 et tranche 2" (version F du 17-10-2014),
- Le compte rendu de la réunion RFF_CETU_SNCF_EGIS du 16-01-2013 relative au scénario tunnel,
- Les notes du CETU (contrôle extérieur) des 30-05-2014 et 11-07-2014.

2.2 Limites de l'expertise

La présente expertise s'entend "à dire d'expert" sur les problématiques de faisabilité technique relative à la conception générale des ouvrages et aux méthodes de réalisation.

Elle en reste aux aspects de pré-dimensionnement des ouvrages et des structures en lien avec les conditions de sol et du bâti portés à la connaissance des experts par RFF et/ou tirés des retours d'expériences dont ils disposent de réalisations souterraines comparables. Aucun calcul n'est réalisé à ce stade.

Les trois experts mandatés ici n'ayant pas prétention de compétence sur l'architecture des gares, non plus que sur la conception de pôles d'échange multimodaux, les pièces graphiques de ce rapport en lien avec l'organisation des accès et les circulations voyageurs dans la gare sont à considérer seulement comme des esquisses de principe.

3 Méthodologie générale

La méthodologie générale mise en œuvre pour la présente expertise peut être résumée de la manière suivante :

- 1 – Bref aperçu de retours d'expériences comparables ou innovantes en France et à l'étranger
- 2 - Analyse du contexte souterrain du secteur d'étude : géologie/géotechnique, hydrogéologie, fondations profondes
- 3 – Identification des criticités principales pour la réalisation d'ouvrages souterrains de grandes largeurs
- 4 – Analyse du projet retenu en regard des criticités identifiées

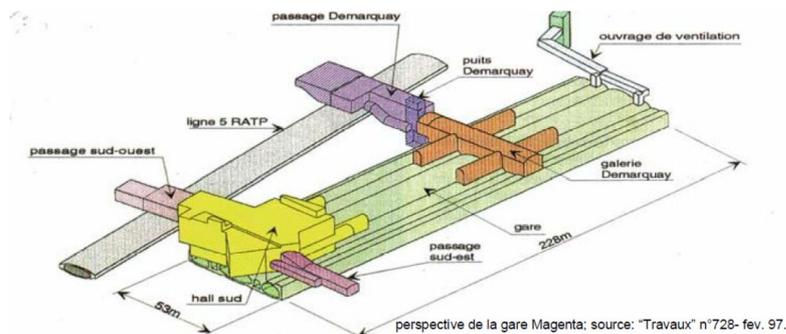
- 5 – Conclusion quant à la faisabilité du projet retenu
- 6 – Identification de solutions plus favorables vis-à-vis de ces criticités
- 7 – Analyse sommaire des risques associés à ces solutions
- 8 – Conclusion sur la faisabilité d'une gare souterraine à Part-Dieu

4 Aperçu de retours d'expériences comparables ou innovantes en France et à l'étranger

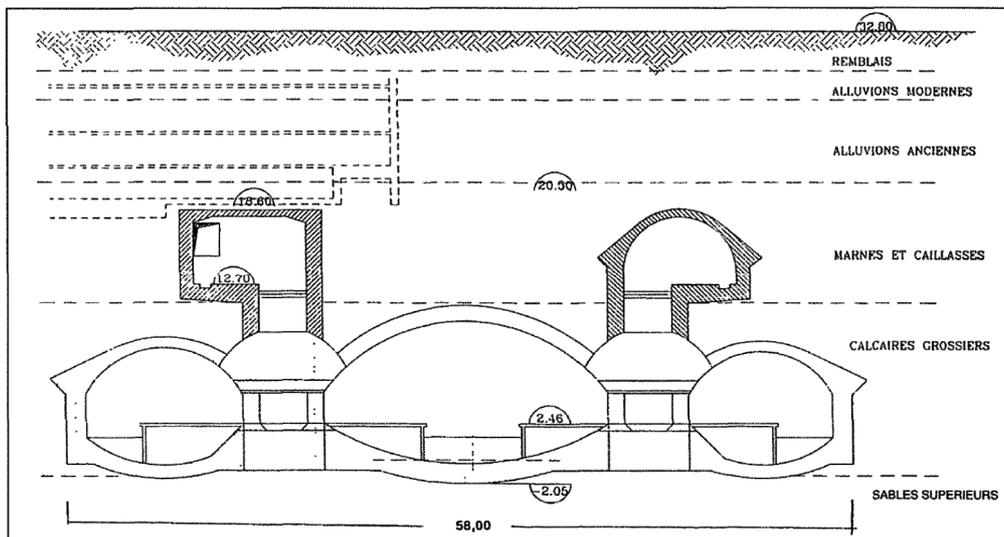
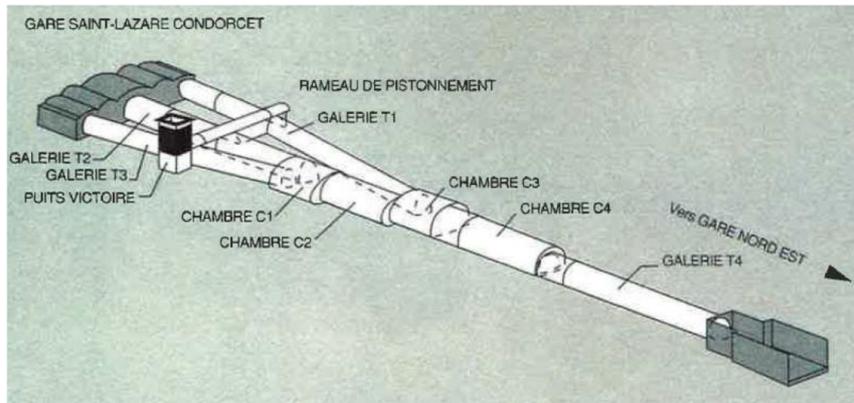
4.1 Station EOLE-Magenta à Paris

Caractéristiques principales

- Inauguration : 1999
- Stations avec 4 voies à quai
 - Longueur : 255 m; largeur : 54 m,
 - Profondeur : 20 m sur calotte; 33 m sous radier (niveau rail vers - 29 m),
 - 3 tubes ferroviaires : tube central à 2 voies et tubes latéraux à 1 voie,
 - Des culées creuses entre les tubes ferroviaires,
 - Géologie principale : marno-calcaire et sables de Beauchamp,
 - Niveau nappe phréatique : environ 6 m au-dessus du radier.



- Longueur : 260 m; largeur : 58 m,
- Profondeur : 22 m sur calotte; 35 m sous radier (niveau rail vers - 31 m),
- 3 tubes ferroviaires : tube central à 2 voies et tubes latéraux à 1 voie,
- Des culées creuses entre les tubes ferroviaires,
- Géologie principale : calcaires grossiers, mais présence des Marnes et Caillasses au-dessus des clefs de voûte et des Sables Supérieurs à la base des radiers,
- Niveau nappe phréatique : environ 20 m au-dessus du radier.



- Réalisation en méthode traditionnelle,
 - Traitement préalable de terrain par injection dans les marnes et caillasses et les calcaires grossiers (à partir de 2 galeries longitudinales réalisées dans le périmètre de 2 culées creuses),
 - Consolidation des appuis de culées par colonnes jet dans les Sables Supérieurs,
 - Abaissement nappe phréatique pour travailler hors d'eau,

- Excavation en section divisée avec culées creuses en 1^{ère} phase (division verticale calotte – stross pour les 2 galeries concernées), tubes ferroviaires latéraux en 2^{ème} phase et portée principale en 3^{ème} phase,
- Méthode autrichienne pour les tubes latéraux. (2 x 1 voie avec quai),
- Voûte active (Jacobson) pour la portée principale (2 voies avec quais latéraux),

Enseignements pour le projet Part-Dieu

L'abaissement de la nappe phréatique après injection massive du terrain a permis de résoudre la problématique des venues d'eau à l'excavation. Pour les mêmes raisons qu'indiqué précédemment, cette méthode n'est pas techniquement concevable à Part-Dieu.

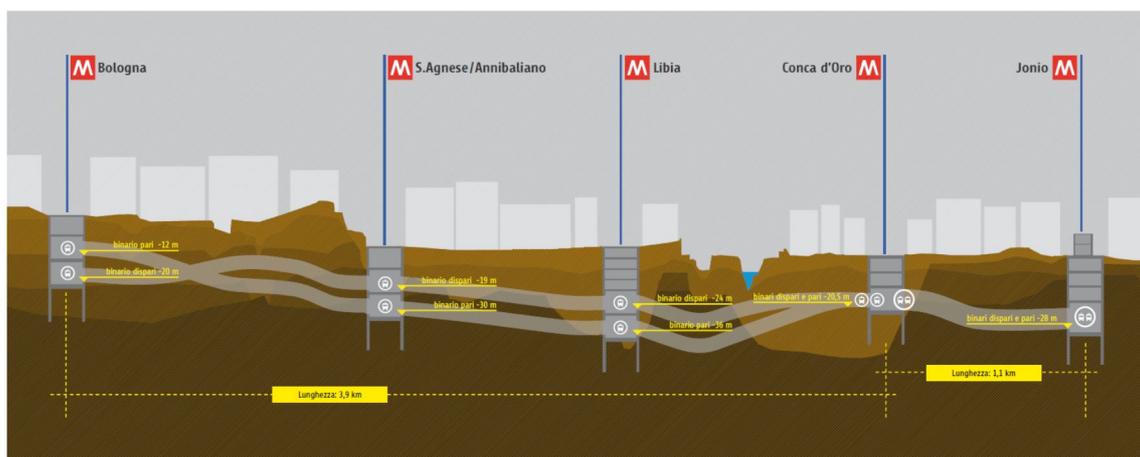
Même conclusion que précédemment : la conception de la station Haussmann St Lazare n'est selon nous pas adaptée à la géologie et à l'échelle du projet de la gare souterraine de Part Dieu.

4.3 Stations Annibaliano et Libia de la ligne B1 du métro de Rome

Caractéristiques principales

- Inauguration fin 2014
- Stations à voies superposées
 - Avec quais à -17 et -28 m pour Annibaliano; à -25m et -36 m pour Libia,
 - Réalisées en taube entre des parois moulées.
- Deux tubes superposés (en profil en long) entre les deux stations
 - Superposition des tubes seulement en sortie des stations, ceux-ci s'écartant progressivement en interstation,
 - Les tubes forés au tunnelier EPB pour un diamètre de 7,8 m,
 - Espacement des tubes de 3 m environ (extrados) en sortie des stations.

Le profil en long schématisé de la ligne est donné ci-après :



À noter que le choix de quais superposés résultait de la double volonté de :

- Réaliser les stations en taupe,
- Réduction de la largeur des emprises en surface.

Enseignements pour le projet Part-Dieu

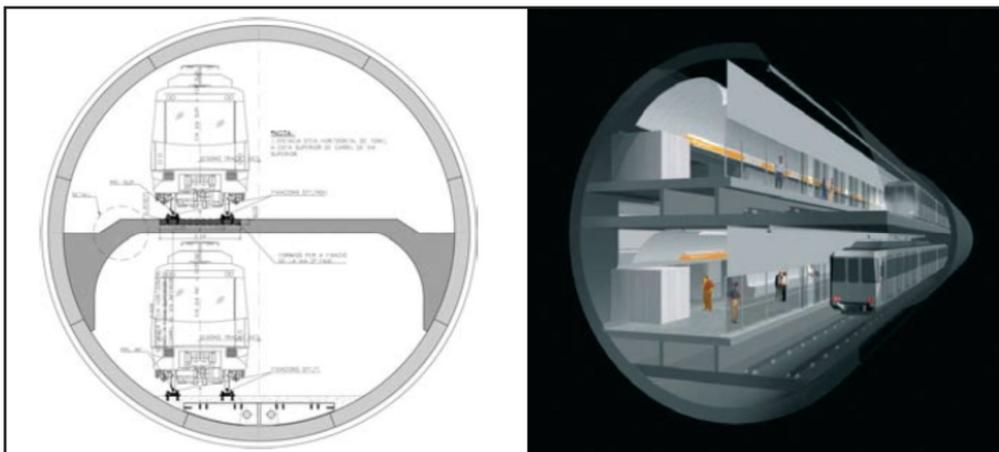
Cette référence récente est intéressante selon nous par le fait qu'elle rompt avec la vision habituelle quelque peu dogmatique de conception horizontale d'une gare, l'aspect d'insertion dans le contexte urbanisé en surface ayant été privilégié ici au détriment de l'ergonomie de fonctionnement.

4.4 30 stations en section tunnelier sur la ligne 9 du métro de Barcelone

Caractéristiques principales

- Inauguration : par étape, entre 2010 et 2015
- 30 stations à voies superposées
 - Réalisées en puits,
 - Quais superposés du même côté.
- Un tube unique avec 2 voies superposées entre les deux stations
 - Dalle horizontale de séparation des voies,
 - Les tubes forés au tunnelier EPB pour un diamètre de 12,06 m.

Une coupe type en tunnel et une vue 3D en station sont données ci-après :



Enseignements pour le projet Part-Dieu

Cette référence récente est intéressante, le critère d'économie ayant prévalu ici par rapport à celui d'ergonomie de fonctionnement.

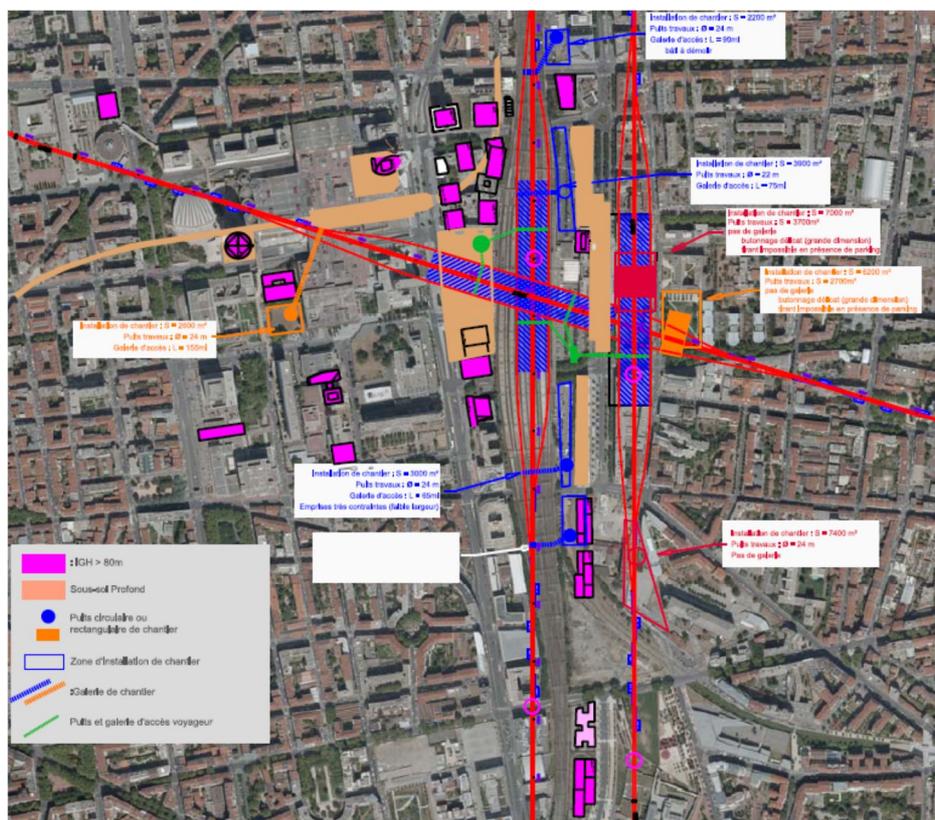
5 Contexte souterrain du secteur Part-Dieu à Lyon

5.1 Ouvrages souterrains profonds et fondations profondes

5.1.1 Situation actuelle

Les fondations de plusieurs ouvrages recourent la molasse à proximité immédiate de la gare actuelle de Part-Dieu. On citera notamment les parkings LPA Gare Part-Dieu, Tour Oxygène, parking Qpark...).

L'extrait ci-après de la carte des contraintes pour les tracés monotubes étudiés par Egis donne une vue synthétique des bâtiments de grande hauteur actuels ou en projet bien avancés, ainsi que des ouvrages profonds dans le secteur Part-Dieu (source Egis).



Il en ressort notamment que les immeubles actuels de grande hauteur sont majoritairement situés à l'Ouest de la gare.

Il est à noter que la pénétration dans la molasse des structures de fondation ou soutènement de ces ouvrages (pieux, parois moulées) n'excède généralement pas une quinzaine de mètres, avec une base de fiche située au-dessus de la cote 135 m (138,15 m pour la paroi moulée du parc LPA Gare Part Dieu).

5.1.2 Projets de construction de grande hauteur

Des projets de construction de grande hauteur sont à l'étude ou même déjà en passe d'être réalisés dans le périmètre du projet de gare souterraine Part-Dieu.

Les trois extraits du document "Plan de référence (V2)" de septembre 2014 du Grand Lyon ci-après donnent les perspectives actuelles de réalisation de bâtiments de grande hauteur dans le secteur Part-Dieu aux horizons 2015, 2021 et 2030.

Horizon 2015 :

1. Le Lyon Thiers (GO_01)
2. Le Carat (GO_02)
3. Le Lugdunum (GO_03)
4. Edison (GO_04)
5. Le Crystallin (GO_05)
6. B10 (démolition) (GO_06)
7. Le Terra Mundi (GO_07)
8. Hôtels Villette-Pompidou (GO_08)
9. Tour et Cours Oxygène (CPD_01 / CPD_02)
10. Tour Part-Dieu (réhabilitation de l'hôtel) (CPD)
11. Tour Incity (CPD_04)
12. Le Victoria (LCD_01)
13. ZAC de La Bulre (PDS_01 / PDS_02 / PDS_03 / F)
14. Archives Départementales du Rhône (PDS_05)
15. Equinox (PDS_06)
16. Terralta (PDS_07)

A. T4 et prolongement de la rue Mouton-Duvernet
 B. Esplanade Nelson Mandela provisoire
 C. Rue Garibaldi phase 1

Horizon 2021 :

17. Complexe Lafayette-Villette (GO_09)
18. Tour Swisslife 2 (GO_10)
19. Two Lyon (GO_11)
20. Gare - tranche 1 (GO_12)
21. Le 107 (CPD_05)
22. 25 rue Doreille (CPD_06)
23. Le Primat (CPD_07)
24. Auditorium et Bâtiment-Gradins (CPD_08 / CPD_09)
25. Tour Part-Dieu (réhabilitation des bureaux) (CPD_10)
26. Centre commercial (CPD_11)
27. Bibliothèque Centrale de Lyon (CPD_12)
28. Silx 1 / Silx 2 (LCD_02 / LCD_03)
29. Résidence Desaix (réhabilitation) / Desaix Sud (LCD_04 / LC)
30. France TV Ouest / France TV Est (LCD_06 / LCD_07)
31. Saint Sacrement (LCD_08)
32. Groupe scolaire Léon Jouhaux (extension) (LCD_09)
33. Sky 56 (PDS_08)
34. Orange (PDS_09)

D. Boulevard Vivier-Marie, aménagement espace public et pôle
 E. Place Béraudier, espace mobilités et infrastructures du sou
 F. Place de Francfort phase 1
 G. Rue Boschut phase 1
 H. Place Charles de Gaulle et terrasses du centre commercial
 I. Rue Garibaldi phase 2

Horizon 2030 :

35. Gare - tranche 2 (GO_13)
36. Gemellyon (GO_14)
37. Tour Villette-Francfort (GO_15)
38. Résidence étudiante / Equipement place de Francfort
39. Opération Place de Milan (GO_18)
40. Hôtel Swisslife (GO_19)
41. Le PDG (CPD_13)
42. Le Britannia (CPD_14)
43. Caisse d'Epargne (CPD_15)
44. Cité Administrative d'Etat (CPD_16)
45. Lot 3 (CPD_17)
46. Silx 3 (LCD_10)
47. Tour RTE (LCD_11)
48. M+M (LCD_12)
49. Grand Lyon (réhabilitation Hôtel de Communauté) (LC)
50. Résidence du Lac (parties communes et socle) (LCD_1)
51. Tour Paul Bert (PDS_10)
52. Tour Mouton Duvernet (PDS_11)
53. Pointe Sud (PDS_12)

J. Place du Lac et parvis M+M
 K. Esplanade Nelson Mandela définitive

5.1.3 Synthèse

Au final, on peut résumer le cadastre souterrain du secteur d'étude de la manière suivante :

- Des emprises souterraines jusqu'à 30 m de profondeur,
- Des fondations profondes : pieux et parois moulées,
- Plusieurs lignes de métro : A, B, et D. Il est à noter ici que la ligne B impacte directement le périmètre de la gare souterraine projetée,
- La gare actuelle de Part-Dieu et les tronçons de voies attenants,
- Des bâtiments de grande hauteur existants ou en projet,
- Des réseaux importants, pour l'assainissement notamment.

À des degrés divers, tous les ouvrages listés ci-avant sont sensibles aux tassements.

5.2 Contexte géologique / géotechnique

5.2.1 Structure lithologique

Le secteur de Part Dieu se caractérise par la succession lithologique suivante :

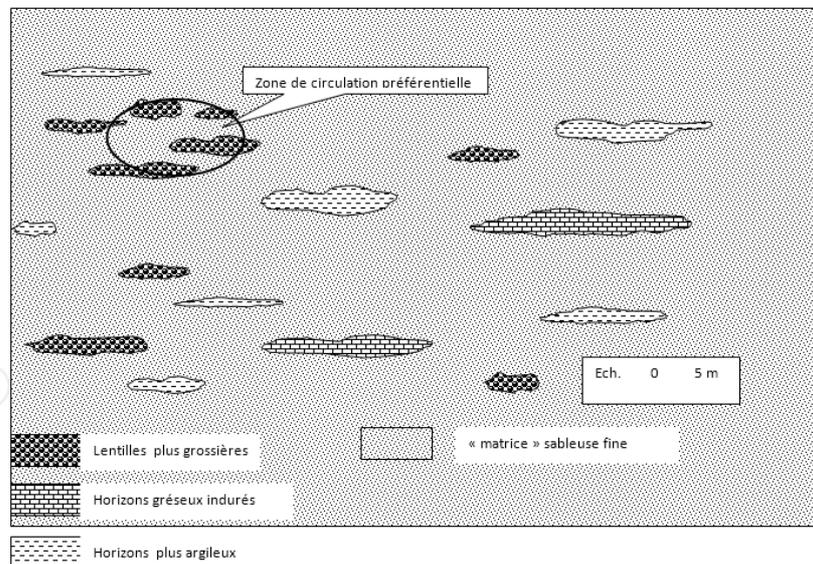
- Remblais d'épaisseur variable (5 m max.),
- Alluvions fluviales sur une épaisseur moyenne de 15 à 20 mètres,
- Substratum molassique Miocène sur une épaisseur de plus de trente mètres.

Sur la base des éléments recueillis lors des précédents travaux d'aménagement dans le secteur (voir détail en annexe 2), le toit des formations molassiques peut être situé entre les cotes 145 et 151 m au droit de la future gare souterraine.

Les alluvions fluviales présentent un faciès sablo-graveleux avec présence de lentilles argilo-limoneuses de faible extension intercalées.

La molasse, du fait d'une sédimentation très irrégulière, présente une très grande hétérogénéité de faciès et consistance. De par ses conditions de mise en œuvre, on peut constater, à l'échelle régionale, un caractère grossier qui s'estompe d'Est en Ouest. Ainsi la dominante est sableuse au droit du quartier de Part Dieu, mais avec présence de passes tantôt plus graveleuses tantôt plus argileuses et d'horizons grésifiés consolidés épars. Le caractère très aléatoire de cette hétérogénéité de faciès et cimentation rend la détection et localisation prédictive d'éventuels chenaux plus perméables très difficiles.

Une coupe lithologique illustrative de la molasse lyonnaise (sédimentation lenticulaire) est donnée ci-après :



Cet ensemble se retrouve de manière très homogène jusqu'à proximité de la berge rive gauche du Rhône où des formations détritiques en provenance des collines dominant la plaine alluviale peuvent alors être rencontrées, intercalées au sein de l'horizon molassique.

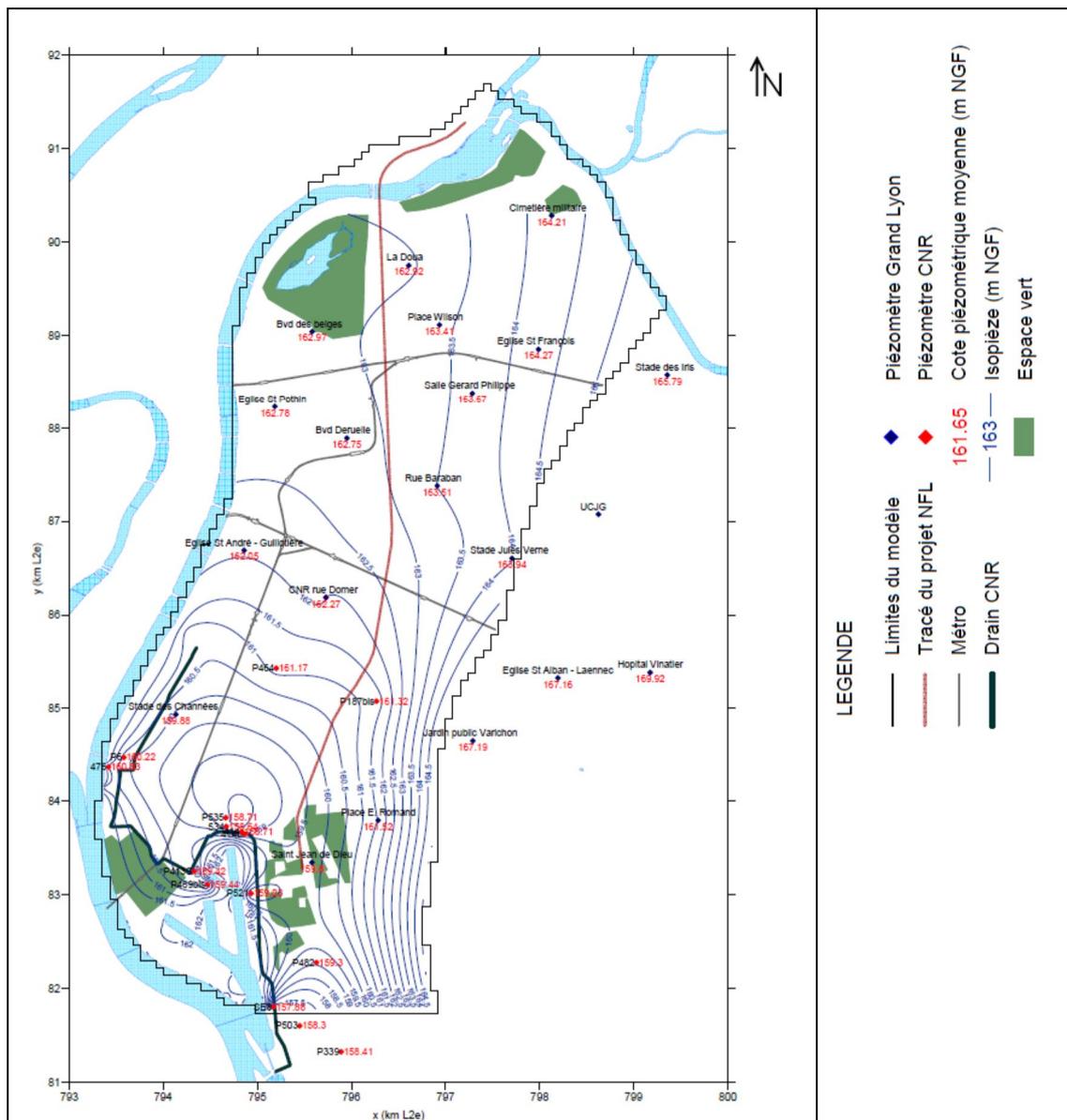
De tels horizons ont notamment été mis en évidence, sur plusieurs mètres d'épaisseur, lors de la construction du Parc de stationnement souterrain P0 de la Cité Internationale en 2002. Ils constituent un faciès très hétérogène avec des éléments grossiers emballés dans une matrice argilo-limoneuses plus ou moins abondantes et sont donc susceptibles d'impacter fortement les caractéristiques de perméabilité du terrain.

5.2.2 Contexte hydrogéologique

Les alluvions fluviales présentent une perméabilité très élevée, comprise entre $5 \cdot 10^{-2}$ et $5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Elles sont le siège d'une nappe dont le niveau le plus fréquent, à proximité de la gare Part Dieu, se situe vers la cote 163 m, et qui présente un sens d'écoulement général Est-Ouest pour un gradient moyen de l'ordre de 1/1000.

Niveau de nappe moyen	163 NGF
Niveau de nappe décennal	164,2 NGF
Niveau de nappe centennal	167,46 NGF

La carte piézométrique ci-après extraite de l'étude hydrogéologique Egis du 05-07-2014 (réf. G0855P01 – RT02 B) donne le niveau moyen de la nappe sur la période 2006 – 2013 sur l'entier de l'aire d'étude.



La molasse, bien que présentant un contraste de perméabilité marqué avec les alluvions, constitue également un horizon aquifère. Les précédents travaux de fouilles et d'exhaure réalisés dans le secteur et mobilisant le substratum molassique conduisent à considérer une perméabilité « en grand » relativement homogène et qui peut être estimée de l'ordre de $5 \cdot 10^{-5}$ m/s (Kh), avec une nette anisotropie : $K_h/K_v = 3$ à 5.

Cette valeur de perméabilité « en grand » a une signification selon nous toute relative, puisqu'elle traduit la coexistence de zones très peu perméables avec des zones de perméabilité élevée au niveau des chenaux sableux ou graveleux d'extension subhorizontale, niveaux qui communiquent toujours plus ou moins entre eux.

On citera ici l'exemple du parking Brosset au Brotteaux, où les tentatives d'assèchement de la fouille ont nécessité un pompage considérable (285 m³/h) en dépit de parois moulées fichées profondément (7 m) dans le substratum molassique (cf. R. Lebeaud et M. Guillaud; congrès AFTES Lyon; thème A3; octobre 2014).

5.2.3 Caractéristiques géotechniques

Il convient de préciser que la plupart des données présentées se rapporte à des essais réalisés sur la tranche superficielle du substratum molassique avec une profondeur d'investigation n'excédant pas 15 m / toit de la molasse.

Granulométrie :

Comme précédemment indiqué, la molasse rencontrée dans le secteur de Part-Dieu se présente principalement sous la forme d'un sable fin brun verdâtre, avec présence de passages indurés.

À l'issue de la réalisation de la paroi moulée des parcs de stationnement LPA Part-Dieu, une synthèse des essais d'identification physique a été réalisée (Antea Group, 1994). Cette synthèse met en évidence un matériau de classe D au sens de la classification GTR :

- Passant à 2 mm supérieur à 75 %,
- Passant à 80 µm inférieur à 15%, avec une moyenne à 8%,
- Valeur au Bleu inférieure à 0,08 g/100g.

Les essais plus récemment réalisés dans le cadre du projet Tour Incity ou des investigations IMSRN place Béraudier confirment cette classification. Il est à noter que la campagne IMSRN 2014 fait également apparaître (essais GTR2 et GTR6) des passages graveleux non consolidés.

Remarque concernant les travaux au tunnelier récemment réalisés dans le secteur de Gerland : les données obtenues dans le cadre de la réalisation des travaux de prolongement de la ligne B du métro doivent être analysées en tenant compte du caractère argileux plus marqué de la molasse dans le secteur de Gerland : les essais d'identification réalisés (Antea Group, 2008) conduisent en effet à classer les échantillons prélevés dans cette zone en catégorie GTR A1 à A2, avec :

- Passant à 2mm supérieur à 90%,
- Passant à 80µm moyen compris entre 55 et 75%, mais pouvant localement atteindre 100%,
- Des valeurs au bleu variant de 0,5 à 5,3 g/100g.

Résistance au cisaillement :

Les mesures de résistance au cisaillement réalisées sur les parties non indurées de la molasse font apparaître un angle de frottement élevé et une cohésion faible mais non nulle :

- $\phi' = 37$ à 40° ,
- $C' = 10$ à 20 KPa.

Caractéristiques pressiométriques :

Les caractéristiques mécaniques sont généralement relativement bonnes au-delà de 5 m de profondeur par rapport au toit de la molasse :

- PI = 5 à 7 MPa (moyenne sur 70 essais analysés : 6,7 MPa),
- EM = 100 à 200 MPa (moyenne sur 70 essais : 150 MPa).

Résistance à la compression :

Il n'y a pas eu à notre connaissance d'essais de résistance à la compression simple réalisée sur la molasse dans le secteur Part-Dieu.

On soulignera que les essais et observations réalisés dans le cadre du chantier du prolongement de la ligne B du métro dans le secteur de Gerland font apparaître, pour les parties gréseuses indurées, des valeurs de Rc comprises entre 10 MPa et 20 MPa.

Module de cisaillement dynamique :

De même, il n'y a pas eu à notre connaissance d'essais de détermination du module de cisaillement dynamique de la molasse dans le secteur de Part Dieu.

Pour les travaux de la Tour Incity, une valeur de module dynamique approchée à partir du module pressiométrique ($G_{Max} = 6 \text{ à } 10 E_M$) de 1200 MPa a été retenue.

Cette valeur s'avère cohérente avec la valeur retenue lors de la construction de la centrale du Bugey, site sur lequel des essais Cross-Hole avaient été réalisés :

- $E_{Max} = 3\,900 \text{ MPa}$,
- $\nu_{Max} = 0,4 \text{ à } 0,45$, soit $G_{Max} = E_{Max} / [2 (1 + \nu_{Max})] \sim 1\,400 \text{ MPa}$.

5.2.4 Synthèse

Le contexte géologique / géotechnique du secteur Part-Dieu peut être synthétisé de la manière suivante :

- Une lithologie tabulaire avec 3 formations principales :
 - Des remblais d'épaisseur variable jusqu'à 5 m de profondeur environ,
 - Des alluvions fluviales d'épaisseur variable de 15 à 20 m. Des faciès sablo-graveleux y sont prédominants avec intercalation de lentilles argilo-limoneuse de faible extension,
 - Un substratum molassique d'âge Miocène à partir d'environ 22 m de profondeur (fourchette 19 à 25 m reconnue à ce jour selon nos informations); lithologie qui présente une grande hétérogénéité de faciès et de consistance (sédimentation irrégulière), avec dominante sableuse vers Part-Dieu et passes tantôt graveleuses tantôt argileuses et des horizons grésifiés épais consolidés,
- Nappe phréatique dès environ 7 m de profondeur (pour une altitude moyenne du terrain naturel à Part-Dieu admis à 170 NGF).

D'où le résumé ci-après au plan constructif : Terrains meubles jusqu'à environ 22 m de profondeur, roche molassique au-delà et nappe dès 7 m environ.

5.3 Identification des points sensibles pour le projet

Une 1^{ère} identification (sans prétention d'exhaustivité) de points sensibles pour la réalisation d'ouvrages souterrains dans l'aire d'étude est fournie ci-après sous forme de tableau en distinguant les tronçons des tunnels et de la gare souterraine du projet Egis.

5.3.1 Tronçons en tunnel

Point sensible	Risque particulier
<u>Pour l'ouvrage définitif :</u>	
Exigences d'étanchéité du revêtement des tunnels	
<u>Pendant les travaux :</u>	
Travaux à proximité des voies sous exploitation zones raccordement lignes existantes	<ul style="list-style-type: none"> • Tassements • Corrosion armatures du fait des courants vagues
Proximité fondations ouvrages d'art	<ul style="list-style-type: none"> • Tassements
Passage sous le Rhône	<ul style="list-style-type: none"> • Surcreusement lit du Rhône / faible couverture • Perméabilité > 10⁻²
Nappe phréatique	<ul style="list-style-type: none"> • Pollution • Rabattement
Hétérogénéité des alluvions	<ul style="list-style-type: none"> • Blocs erratiques • Terrains abrasifs
Hétérogénéité de la molasse	<ul style="list-style-type: none"> • Argiles collantes
Proximité fondations profondes	<ul style="list-style-type: none"> • Tassements • Corrosion armatures du fait des courants vagues
Proximité immeubles de grande hauteur	<ul style="list-style-type: none"> • Tassements • Corrosion armatures du fait des courants vagues
Proximité réseaux et voiries (y c. voies ferrées)	<ul style="list-style-type: none"> • Tassements • Corrosion armatures du fait des courants vagues

5.3.1 Secteur de la gare souterraine

Point sensible	Risque particulier
<u>Pour l'ouvrage définitif :</u>	
Question sections étanches ou pompage permanent en radier des ouvrages	<ul style="list-style-type: none"> • Défaut d'étanchéité • Coût pompage
Horizons aquifères dans la molasse	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessité pompage important en phase exploitation de la gare si revêtement non étanche • Pollution • Rabattement
Hétérogénéité de la molasse	<ul style="list-style-type: none"> • Fluage dans horizons argileux, • Gonflement fractions argileuses
<u>Pendant les travaux :</u>	
Exploitation de la gare pendant les travaux	<ul style="list-style-type: none"> • Tassements • Vibrations
Travaux à proximité des voies sous exploitation	<ul style="list-style-type: none"> • Tassements • Corrosion armatures du fait des courants vagabonds
Horizons aquifères dans la molasse	<ul style="list-style-type: none"> • Maîtrise insuffisante des venues d'eau • Pollution • Rabattement
Hétérogénéité des alluvions	<ul style="list-style-type: none"> • Blocs erratiques
Hétérogénéité de la molasse	<ul style="list-style-type: none"> • Argiles collantes • Fluage dans horizons argileux • Gonflement fractions argileuses
Proximité fondations profondes	<ul style="list-style-type: none"> • Tassements • Corrosion armatures du fait des courants vagabonds
Proximité immeubles de grande hauteur	<ul style="list-style-type: none"> • Tassements • Corrosion armatures du fait des courants vagabonds
Proximité réseaux et voiries (y c. voies ferrées)	<ul style="list-style-type: none"> • Tassements • Corrosion armatures du fait des courants vagabonds

6 Analyse critique du scénario tunnel de l'étude de faisabilité

6.1 Les sections de tunnel

6.1.1 Conception générale

Les caractéristiques principales de la conception retenue pour les sections de tunnel dans l'étude de faisabilité sont résumées ci-après :

- Tunnels bitubes simple voie avec rameaux intertubes tous les 500 m ou tunnels monotubes double voie avec puits de secours tous les 800 m, excavés en terrains meubles sur un 1^{er} tronçon aux extrémités, en molasse pour le reste,
- Têtes à St Clair et La Guillotière respectivement pour les tunnels Nord et Sud,
- Diamètres excavés de 9,6 m et 12,5 m respectivement pour les deux solutions (bitube et monotube),
- Profondeur tracé jusqu'à 43 m environ (niveau du rail admis vers 127 NGF), c'est-à-dire sous environ 36 m de charge hydraulique,
- Franchissement du Rhône avec une couverture d'environ 13 m à 14 m, respectivement pour les solutions monotube et bitubes.

Avis des experts :

- Conception conforme aux spécifications STI et ITI 98-300 et méthode bien adaptée selon nous au contexte géotechnique ainsi qu'à l'environnement du projet,
- La proximité de fondations d'ouvrages existants, dans les zones d'approfondissement du tracé aux deux extrémités du tunnel (notamment viaduc Joseph Picot au Nord) est un point sensible du projet vis-à-vis des risques de tassement. Les difficultés attendues ici ne relèvent cependant pas selon nous de la faisabilité du projet,
- La couverture de terrain de 13 à 14 m sous le lit du Rhône nous paraît suffisante dans l'hypothèse d'une réalisation au tunnelier à front confiné du tunnel Nord,
- Les choix d'implantation des émergences des puits de secours pour la solution tunnel monotube n'iront probablement pas sans poser problème en termes d'acceptabilité et d'impact tra-vaux. Ils ne relèvent cependant à priori pas de la faisabilité du projet.

6.1.2 Méthodes de réalisation

Egis prévoit la réalisation des tunnels avec des tunneliers à front confiné, préférentiellement à pression de boue (Slurry Pressure Balance).

Nous jugeons cette méthode adéquate, l'expérience récente de la section Gerland – Oullins de la ligne B du métro de Lyon ayant montré le bon comportement de l'SPB (Slurry Pressure Balance) dans les mêmes lithologies qu'attendues pour le projet NFL (alluvions et molasse lyonnaise).

Pour la solution tunnel bitube, la réalisation des rameaux intertubes sera probablement très délicate techniquement, notamment dans les alluvions fluviales étant données les charges hydrauliques en jeu. Des traitements lourds de terrain type injection ou congélation seront probablement nécessaires, en association avec la mise en œuvre de présoutènements. Les difficultés attendues ici ne relèvent cependant pas de la faisabilité du projet étant donnés les linéaires relativement faibles concernés.

6.2 Les entonnements

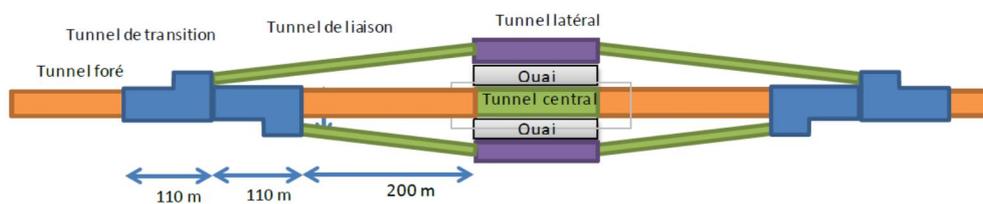
Ci-après pour information la photographie d'un entonnement type tiré du rapport Egis.



Les caractéristiques principales de la conception retenue pour les ouvrages d'entonnement dans l'étude de faisabilité sont résumées ci-après :

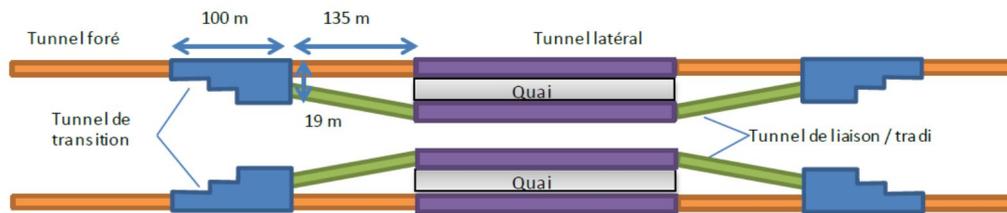
Pour la solution de tunnel monotube avec gare unique :

- Rayon de 475 m et appareil de voie tg 0,085 pour une vitesse de 60 km/h dans les entonnements,
- Deux cavernes d'entonnement décalées (bout à bout), de manière à limiter la portée maximale à 22 m dans chaque entonnement,
- Implantation dans la molasse,
- Réalisation en méthode traditionnelle,
- Longueur de 110 m pour chaque entonnement, subdivisée en 2 sections.



Pour la solution de tunnel bitube avec gare double :

- Rayon de 475 m et appareil de voie tg 0,085 pour une vitesse de 60 km/h,
- Implantation dans la molasse,
- Réalisation en méthode traditionnelle,
- Longueur : 100 m, subdivisée en 3 sections.



Avis des experts :

La conception retenue est classique. Le décalage des entonnements pour la solution de gare unique est tout à fait justifié selon nous, la réduction y relative de portée de 32 à 22 m correspondant de facto à une réduction d'un facteur 2 des tassements en surface (proportionnel au carré de la portée, toute chose restant égale par ailleurs).

Elle suppose une réalisation en méthode traditionnelle, vraisemblablement en section divisée compte tenue des portées en jeu et de la nature du terrain.

Quand bien même nous jugeons tout à fait justifiée l'implantation dans la molasse des cavernes d'entonnement, il n'en reste pas moins que la réalisation de ces ouvrages de grande portée et de longueur importante constitue un défi technique compte tenu des éléments suivants :

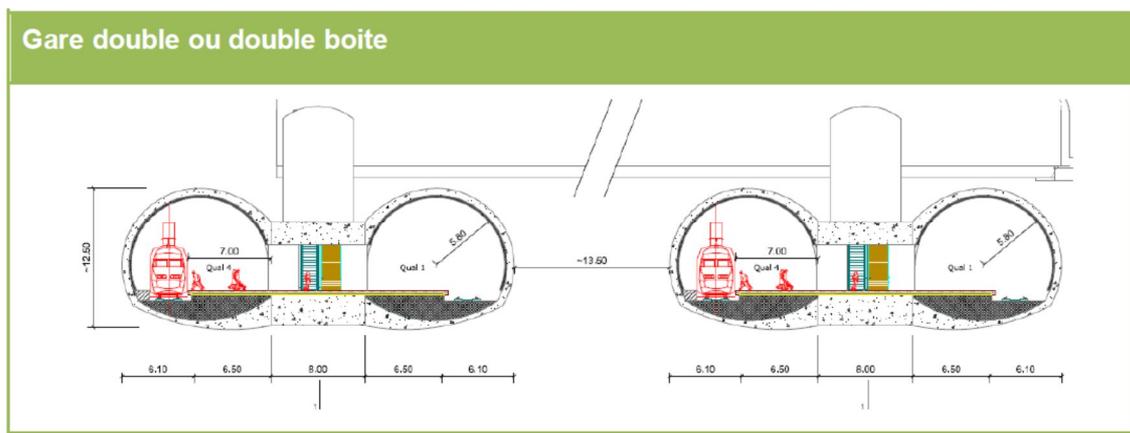
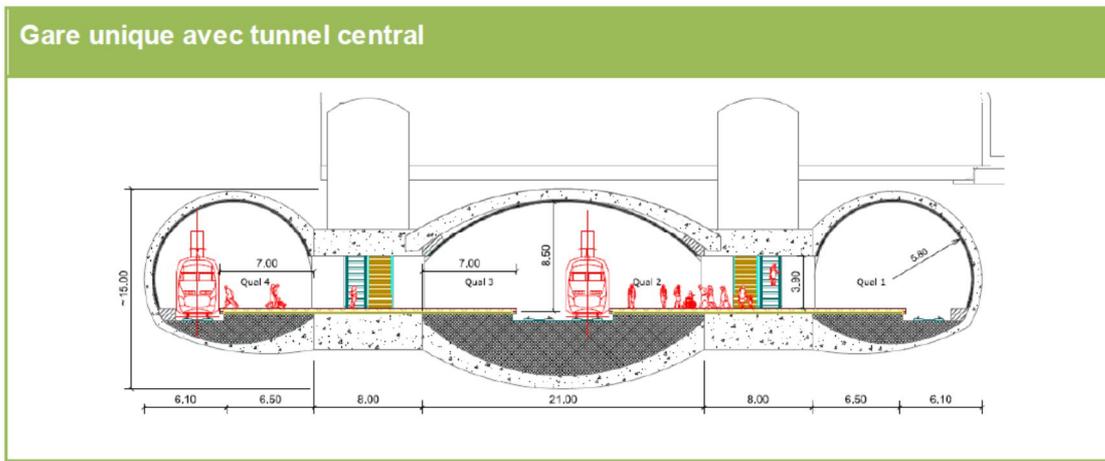
- Risque de débouillage à l'excavation, au passage de chenaux sablo-graveleux mal cimentés, du fait d'un gradient hydraulique important dans la tranche de molasse située immédiatement au-dessus de la calotte des excavations,
- Risque de maîtrise insuffisante des circulations d'eau dans lesdits chenaux sablo-graveleux, ceci malgré le pré-soutènement probablement prévu,
- Risque de maîtrise insuffisante des déformations (tassements) engendrées par la succession des phases d'excavation/soutènement nécessaires.

6.3 La gare souterraine

6.3.1 Conception générale

Les caractéristiques principales de la conception retenue pour la gare dans l'étude de faisabilité sont résumées ci-après :

- Gare souterraine de 4 voies à quai conçue avec 2 culées creuses et 3 ou 4 tubes ferroviaires selon la solution envisagée,
- Solutions de gare unique de 62 m de largeur ou gare double de 2 x 33 m de largeur avec un pilier de terrain de 14 m, les tubes ferroviaires étant reliés directement par culées creuses,
- Implantation des tubes ferroviaires dans la molasse, la calotte étant positionnée vers + 137 NGF (Zrail correspondant vers +127 NGF), c'est à dire selon une couverture minimale extradoss dans la molasse d'environ 7 m,
- Implantation des galeries d'échange pour partie en molasse et pour partie dans les alluvions (niveau radier vers + 140 NGF).



Avis des experts :

Bien que le schéma fonctionnel de la gare considéré par AREP soit applicable aux deux configurations envisagées (gare unique ou gare double), AREP privilégie une gare unique (des volumes plus agréables pour les voyageurs), tandis qu'Egis retient le principe d'une gare double (réduction des risques de tassement important en surface).

Il est à noter ici que la conception générale retenue pour l'option gare unique est très proche de celle considérée pour les stations Magenta et Haussmann-St Lazare à Paris, à la différence près d'une profondeur plus importante ici (niveau des rails vers -43 m) pour permettre l'implantation des tubes ferroviaires dans la molasse.

Le projet consiste au plan statique pour le seul périmètre de la gare (sans les accès) à enlever une tranche de terrain d'environ 330 m x 62 m x 15 m ou deux tranches de terrain d'environ 330 m x 33 m x 15 m, respectivement pour les solutions de gare unique (tunnels associés en monotube ou bitube) ou de gare double (tunnels associés en bitube), pour y substituer par étapes une structure porteuse.

Au plan statique, la nécessité de devoir reprendre l'entier du poids des terres induit des efforts très importants dans les murs des culées creuses et surtout dans les éléments de voûte Jacobson (cf.

proportion des murs porteurs par rapport au périmètre de la gare sur les coupes horizontale et transversale).

Au plan des déformations, cette conception ne peut selon nous se concevoir sans des tassements importants du fait des facteurs défavorables principaux suivants :

- La portée des excavations (le poids total des terres devra être supporté par la structure sans participation du terrain),
- Les nombreuses étapes nécessaires pour la réalisation des travaux (déconfinement et sur-sollicitations locales provisoires du terrain à chacune des étapes).

De fait, l'importance des tassements en surface constitue selon nous le **point négatif principal de cette conception**.

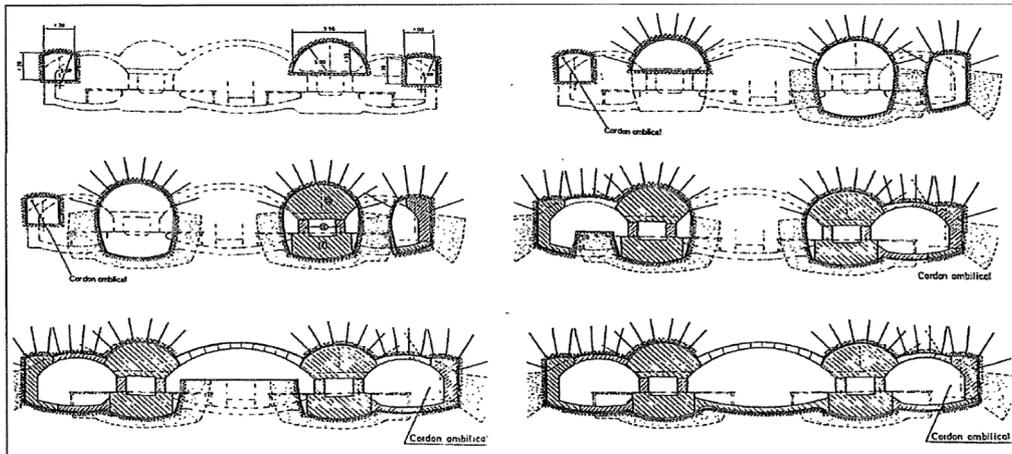
Les calculs de prédimensionnement joints en annexe du Volet technique - scénario B du rapport final (réf. 3670 RG140370 – vers C du 08-10-2014) indiquent des ordres de grandeur des tassements de 8 et 12 cm, respectivement pour les scénarios de gare double et de gare unique, et une Zone d'Influence Géotechnique (cuvette de tassement) d'environ 160 m de largeur.

Quand bien même Egis indique que ces ordres de grandeur sont probablement conservateurs, la possibilité de les diminuer d'un facteur supérieur à 2 par des traitements de terrain et de méthodes lourdes de présoutènement nous paraît assez peu vraisemblable ici, étant donné les éléments suivants :

- Pour les deux scénarios de gare envisagées, une subdivision transversale minimale de l'excavation en 5 ou 6 galeries parallèles est nécessaire (les 2 culées creuses, puis les 2 tubes latéraux, ...), avec pour corollaire dans la plupart des cas (seul les terrains qui restent à l'état "élastique" font exception) des tassements cumulés supérieurs à la valeur déduite du modèle théorique correspondant à un ouvrage réalisé en une seule étape¹,

La figure suivante illustre ce propos. Elle montre en effet les principales étapes d'excavation réalisées pour la station EOLE - Magenta à Paris.

¹ Ce phénomène s'explique dans les terrains médiocres par le fait que l'état d'équilibre (en contraintes et en déformations) obtenu après une étape N d'excavation se traduit par des zones de terrain décomprimé et des zones de terrain sur-sollicité (plastifié), ces dernières engendrant des déformations / tassements d'autant plus importants que leurs caractéristiques géo-mécaniques sont faibles en regard des sollicitations qui les concernent. Ainsi, même si lesdites zones disparaissent à l'étape d'excavation N+1 ou voient leurs sollicitations baissées dans le nouvel état d'équilibre, elles auront participé à l'augmentation des déformations et donc engendré des tassements en surface.



- Le même principe de subdivision reste valable à "l'échelle micro", c'est à dire pour les étapes d'excavation de chaque partie d'ouvrage. Par exemple pour la réalisation de colonnes jetting, le forage préalable à la réalisation d'une colonne constitue une excavation locale sans confinement des parois excavées. Il induit donc des déformations locales qui s'additionnent à celles des forages environnants et ainsi de suite²,
- Quand bien même les galeries d'accès et les zones d'échange représentent un volume d'excavation important et à relativement faible profondeur, ces ouvrages n'ont à notre connaissance pas été pris en compte dans le prédimensionnement des tassements réalisé par Egis.

Au final, on peut considérer en 1^{ère} approche des ordres de grandeur des tassements de 2 à 5 cm et 5 à 10 cm, respectivement pour les solutions de gare double et de gare unique considérées dans l'étude de faisabilité.

Ces valeurs sont selon nous inacceptables sans confortement préalable pour de nombreuses constructions, des réseaux et voiries, et pour la gare de Part-Dieu (cf. recommandation AFTES GT 16 "Tassements liés au creusement des ouvrages en souterrain").

6.3.2 Méthodes de réalisation

Ouvrages réalisés depuis la surface :

Nous jugeons adéquat le principe de réalisation des puits à l'abri de parois moulées fichées profondément dans la molasse.

² Au final, les colonnes jetting réalisées renforcent bien le terrain mais au prix d'un incrément de déformation du terrain donc de tassement en surface. Ainsi, quand bien même l'intérêt de présoutènements lourds types jetting ou voûte parapluie ou encore arc cellulaire ne peut pas être remis en question pour garantir la stabilité des excavations dans des conditions de terrain difficiles, il n'en reste pas moins la nécessité de devoir compter avec des tassements probablement très significatifs pour le projet malgré la mise en œuvre de telles dispositions

Un bémol cependant : certains puits sont prévus rectangulaires, disposition qui nécessite des ancrages et/ou des butons pour reprendre les sollicitations importantes des parois en flexion jusqu'à ce que les dalles intermédiaires auront été réalisées.

La présence de souterrains profonds et/ou de fondations profondes (parois moulées notamment) dans certains secteurs rendra très problématique la possibilité d'implanter des ancrages, avec pour conséquence la réalisation de butons qui pénaliseront les circulations verticales de matériel dans les puits. On pense notamment à la sortie et à l'entrée de la tête de forage et du bouclier des tunneliers aux puits d'extrémité des zones d'entonnement de part et d'autre de la gare.

Nous proposons de recourir à des puits elliptiques ou circulaires, cette disposition étant très bien adaptée aux poussées hydrostatiques (alluvions avec nappe phréatique dès 7 m de profondeur environ). La juxtaposition de 2 ou 3 puits cylindriques secants avec intersections butonnées est également envisageable pour dégager des espaces rectangulaires longs.

Ouvrages réalisés en souterrain :

Egis prévoit la réalisation des ouvrages souterrains de la gare pour l'essentiel dans la molasse et en méthode traditionnelle, à l'abri de traitements de terrain et/ou d'un présoutènement type voûte parapluie auréolaire + renforcement du front et/ou de colonnes jetting et/ou ou selon la méthode de l'arc cellulaire et/ou encore selon la méthode de voûte active dite Jacobson.

Si nous jugeons judicieux le fait de viser une implantation des ouvrages pour l'essentiel dans la molasse, nous n'approuvons pas cependant le choix de la méthode de réalisation eu égard :

- Au risque de débouillage à l'excavation, au passage de chenaux sablo-graveleux mal cimentés, du fait d'un gradient hydraulique au moins localement très élevé dans la tranche de molasse située immédiatement au-dessus des excavations en méthode traditionnelle (sans contrepression). On peut estimer une valeur maxi de ce gradient à environ $2,5^3$ (= rapport de la charge d'eau au toit de la molasse (env. 18 m pour molasse à + 145 NGF) sur la couverture minimale de molasse mesurée à la calotte du tunnel ou d'un entonnement (env. 7 m pour molasse à + 145 NGF). Un débouillage pourrait conduire à l'envahissement d'une partie du chantier par des matériaux molassiques, avec formation de graves fontis en surface. Ce risque est probablement non maîtrisable, donc inacceptable, pour deux raisons : d'une part l'hétérogénéité de la molasse, d'autre part la grande extension du chantier souterrain (≈ 1 km), qui rend très probable la rencontre inopinée de lentilles non cimentées,
- Au risque de maîtrise insuffisante, malgré le pré-soutènement prévu, des circulations d'eau (bien que relativement ponctuelles) susceptibles de se développer dans la molasse à la faveur desdits chenaux sablo-graveleux,

Étant donnée l'hétérogénéité de faciès et de consistance de la molasse lyonnaise, les performances à attendre en termes de consolidation et d'étanchéité des traitements de terrain par injection et/ou jetting sont en effet sujettes à caution selon nous (risque de venues d'eau résiduelles encore importantes), et ce d'autant plus que les ouvrages à traiter sont

³ Il est à noter que les cross-over du tunnel sous la manche ont été creusés en méthode traditionnelle avec une couverture de 30 m sous le fond de la mer, elle-même profonde de 28 m pour le cross-over anglais et de 45 m pour le français. Le gradient hydraulique maximal correspondant de l'ordre de 1,5 (45/30) était donc plus faible que celui attendu pour NFL, et surtout les conditions lithologiques et géo-mécaniques sont très différentes, la craie du tunnel sous la manche étant très homogène et étanche sur des dizaines de kilomètres, contrairement à la molasse lyonnaise.

longs. Il convient de noter à ce propos que l'on ne dispose d'aucun retour d'expérience de traitement par imprégnation à grande échelle de la molasse sur l'agglomération lyonnaise et que les chances de réussite de tels traitements nous paraissent assez faibles compte tenu des granulométries en jeu (finesse du matériau).

Les traitements par congélation (azote ou saumure) offrent selon nous de bien meilleures chances de réussite (maîtrise des venues d'eau notamment), mais à un coût malheureusement prohibitif à grande échelle. Cette technique est probablement intéressante ici selon nous pour des traitements locaux, pour la réalisation des rameaux notamment.

- Au risque de maîtrise insuffisante des déformations (tassements) engendrées par la succession des phases d'excavation/soutènement prévues. Comme déjà explicité, les phases d'appui provisoire associées à la réalisation par étapes successives engendrent des sur-sollicitations locales du terrain qui au final se traduisent par des tassements en surface plus importants que si la réalisation devait / pouvait être conduite en une fois.

6.4 Conclusion sur la faisabilité du scénario

L'importance des tassements maximaux à attendre en surface pour la solution de gare unique envisagée dans l'étude de faisabilité (ordre de 5 à 10 cm) est rédhibitoire selon nous pour cette solution. La limitation à des valeurs acceptables pour les constructions environnantes nécessiterait en effet la mise en œuvre à grande échelle de mesures très lourdes type reprise en sous œuvre des fondations et vérinage et/ou injections de compensation des tassements, mesures dont le coût serait de toute évidence prohibitif.

Ainsi, quand bien même la solution de gare unique est intéressante en termes d'exploitation, elle doit selon nous être rejetée.

Les tassements à attendre sont moindres pour la solution de gare double, mais leur limitation à 1 ou 2 cm, valeurs maxi jugées ici acceptables en 1^{ère} approximation pour les constructions avoisinantes, suppose la conjonction des conditions favorables suivantes :

- Absence d'horizons sableux lâches aquifères ou, à défaut, bonne injectabilité de ces horizons par des traitements de terrain type imprégnation,
- De bonnes caractéristiques géomécaniques de la molasse (résistances en compression et traction, module de déformation), à même de limiter fortement les déformations (tassements) engendrées par la succession des phases d'excavation/soutènement prévues,
- Un niveau régulier du toit de la molasse, c'est à dire sans surcreusement dans le périmètre de la gare et des zones d'entonnement.

Une telle conjonction favorable à l'échelle du périmètre de la gare étant selon nous peu probable dans le contexte de la molasse lyonnaise, la faisabilité technico-économique de la solution de gare double ne peut pas être garantie.

La question se pose bien sûr des reconnaissances nécessaires pour lever cette indétermination.

Compte tenu de l'hétérogénéité de la molasse explicitée précédemment (hétérogénéité à l'échelle des fronts de taille d'excavation), il nous paraît illusoire d'espérer lever les incertitudes explicitées ci-avant par une campagne d'investigations réalisées depuis la surface.

Au final, nous sommes d'avis que les aléas géotechniques inhérents à la molasse lyonnaise sont rédhibitoires pour les deux conceptions de gare envisagées dans l'étude de faisabilité.

7 Possibilité de solution(s) alternative(s)

7.1 Éléments principaux de conception

Les problématiques exposées dans les chapitres précédents de tassement excessif en surface et de maîtrise insuffisante des gradients et venues d'eau pendant les travaux d'excavation étant pour une part importante associées au choix de la méthode traditionnelle opérée dans l'étude de faisabilité pour la réalisation de la gare, nous proposons de privilégier l'utilisation de tunnelier pour la réalisation de cette gare.

Il en ressort les éléments de conception listés ci-après :

1. Excavation au tunnelier à contre-pression (type SPB privilégié) des tubes ferroviaires de la gare (diamètre suffisant pour l'inscription d'un quai dans la section).
2. Diamètre du tunnelier au plus égal à 17 m (valeur maxi permise par la technologie actuelle).
3. Espacement minimum des tubes / galeries de 1,5 diamètre hors zones de sortie d'entonnement / séparation de voies.
4. Positionnement de toutes les galeries dans la molasse (galerie principale d'échange, galeries de communications, galeries techniques et pour l'exploitation) au même niveau que les tubes ferroviaires (tubes de gros diamètre et étanches) et à l'intérieur de la tranche de terrain (en molasse) qu'ils délimitent, de manière à profiter du cloisonnement extérieur qu'ils réalisent vis-à-vis des potentielles circulations d'eaux dans les horizons sablo-graveleux aquifères.
5. Tous les puits de forme circulaire ou elliptique et réalisés à l'abri de parois moulées fichées profondément dans la molasse.
6. Les séparations de voie réalisés dans des puits circulaires de gros diamètre ou elliptiques, non pas dans des entonnements.

7.2 Aperçu des variantes envisagées

Les éléments de conception listés ci-avant sont déclinés en 2 variantes de projet de gare, respectivement pour les solutions monotube et bitube des sections de tunnel depuis St Claire et la Guillotière.

- Variante 1 : Gare à 2 tubes ferroviaires parallèles avec quais décalés,

- Variante 2 : Gare à 4 tubes ferroviaires parallèles.

7.2.1 Variante 1

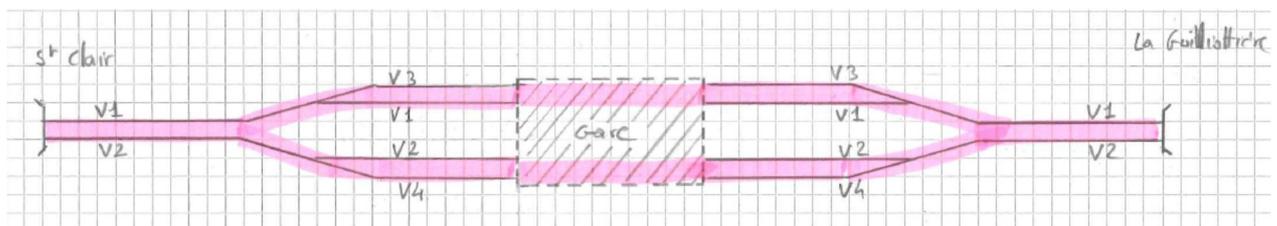
Le tracé de la variante 1 reprend sans modification celui de la solution monotube double voie d'Egis pour les secteurs St Clair et La Guillotière, mais s'en écarte aux environs du 1^{er} kilomètre en souterrain (tunnel Nord et tunnel Sud) de manière à viser des zones de séparation des voies identifiées comme potentiellement favorables pour recevoir un puits vertical de gros diamètre (50 m environ) et distantes d'au moins 400 m du milieu de la gare actuelle.

Une difficulté importante pour la conception de cette variante est l'implantation des 2 puits de gros diamètre dans l'hyper-centre de Lyon. Les deux sites pressentis dans le cadre de cette expertise sont respectivement situés dans les secteurs des Brotteaux et de l'avenue Félix-Faure (voir reportage photographie à l'annexe 1).

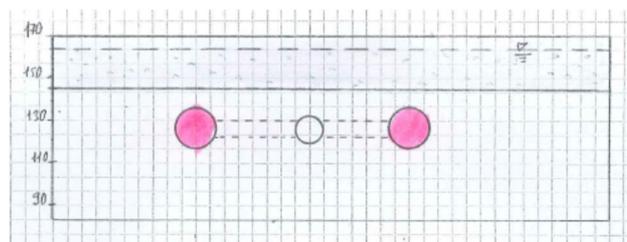
Chacun des tunnels monotubes double voie (respectivement au Nord et au Sud) se dédouble en un bitube simple voie à partir de la bifurcation des Brotteaux au Nord et de celle de Félix-Faure au Sud, pour se prolonger ensuite par une section à double voie dans chacun des tubes.

Cette variante consiste en fait à inscrire au niveau de la gare souterraine les 4 voies à quai dans 2 tubes ferroviaires réalisés au tunnelier.

Les deux esquisses suivantes illustrent la conception générale du tracé en référence à la solution monotube double voie pour les tunnels depuis St Clair et La Guillotière (tubes ferroviaires tramés en rose).



Situation de principe

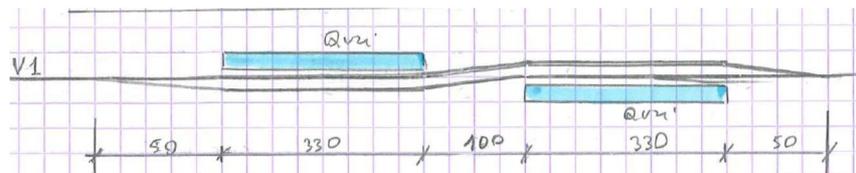


Section transversale de principe

Elles illustrent notamment le principe de cloisonnement transversal du périmètre de la gare explicité au chapitre 7.1, les tubes ferroviaires (gros diamètre) étant situés à l'extérieur, tandis que le tube central, de plus petit diamètre (galerie d'échange voyageurs ici), est protégé des potentielles circulations d'eaux dans les horizons sablo-graveleux aquifères.

L'inscription de 2 voies et de 2 quais dans la même section n'étant pas possible pour la gamme de diamètre des tunneliers 15 à 17 m considérée ici, les quais d'un même tube (V1 et V3 ou V2 et V4) doivent être décalés longitudinalement

L'esquisse suivante montre le décalage nécessaire des quais dans un même tube ferroviaire.



Il en ressort un étirement de la gare sur 760 m environ (2 quais de 330 m de longueur et une zone de transition de 100 m), les circulations horizontales étant réalisées au moyen de trottoirs roulants (voir chapitre 7.3.2)

Le niveau du rail en gare pour cette variante est positionné à environ +130 NGF.

7.2.2 Variante 2

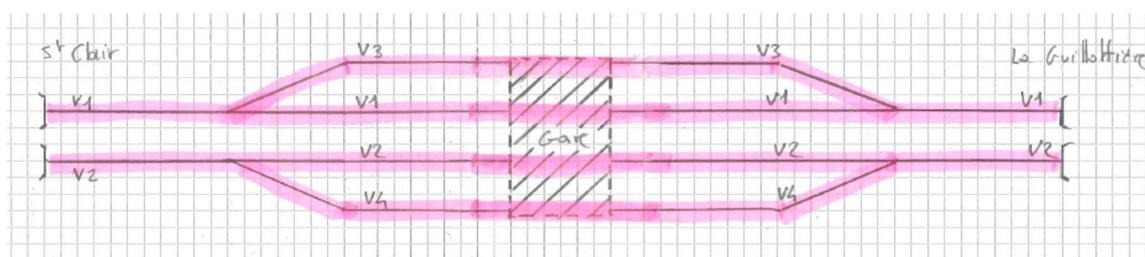
Le tracé de la variante 2 reprend sans modification celui de la solution bitube simple voie d'Egis pour les secteurs d'entrée en tunnel à St Clair et La Guillotière, mais s'en écarte aux environs du 1^{er} kilomètre en souterrain (tunnel Nord et tunnel Sud) de manière à viser des zones de séparation des voies identifiées comme potentiellement favorables pour recevoir un puits vertical de gros diamètre (50 m environ) pour chaque tube.

Une difficulté très importante pour la conception de cette variante est l'implantation des 4 puits de gros diamètre dans l'hyper-centre de Lyon. Deux sites sont pressentis dans le cadre de cette expertise, respectivement dans les secteurs des Brotteaux et de l'avenue Félix-Faure (les mêmes que pour la variante 1).

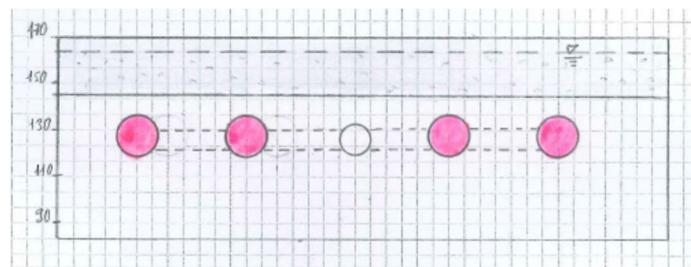
Chacun des tubes simple voie (respectivement 2 tubes au Nord et 2 tubes au Sud) se dédouble en un bitube simple voie à partir des deux zones de séparation au Nord et des deux zones de séparation au Sud.

Au final, le périmètre de la gare est traversé par 4 tubes ferroviaires simple voie avec quai.

Les deux esquisses suivantes illustrent la conception envisagée pour cette variante (tubes ferroviaires tramés en rose).



Situation de principe



Section transversale de principe

Le niveau du rail en gare pour cette variante est positionné à environ +130 NGF (idem variante 1).

Pour cette variante, la longueur de gare est identique à celle des solutions gare unique et gare double de l'étude de faisabilité, c'est-à-dire de 350 m environ.

C'est un point évidemment favorable par rapport à la variante 1 précédente.

Cela étant, nous n'allons pas plus loin dans l'étude de cette variante dans le cadre de cette expertise étant donnée la difficulté de trouver dans l'hyper-centre de Lyon les quatre sites nécessaire d'implantation des puits de gros diamètre (environ 50 m). L'analyse de cette solution pourrait être poursuivie à l'AVP.

7.3 Approfondissement d'étude de la variante 1 : gare à 2 tubes ferroviaires avec quais décalés

7.3.1 Prédimensionnement du tracé

Les éléments principaux de prédimensionnement du tracé sont indiqués ci-après :

- Prise en compte du bâti et des voiries existantes, avec notamment l'éloignement d'au moins 1,5 diamètre des ouvrages projetés par rapport aux fondations profondes existantes,
- Prise en compte des perspectives de réalisation de bâtiments de grande hauteur selon chapitre 5.1.2 du présent rapport,
- Séparation des voies à partir de puits circulaires de gros diamètre (environ 50 m) réalisés depuis la surface. À noter qu'à ce diamètre en tête de puits correspond la possibilité d'inscrire un tracé R 300 m sur une voie à la séparation des voies en base de puits⁴.

L'esquisse suivante montre l'inscription proposée des deux tubes ferroviaires par rapport aux bâtiments actuels de grande hauteur (couleur rose).

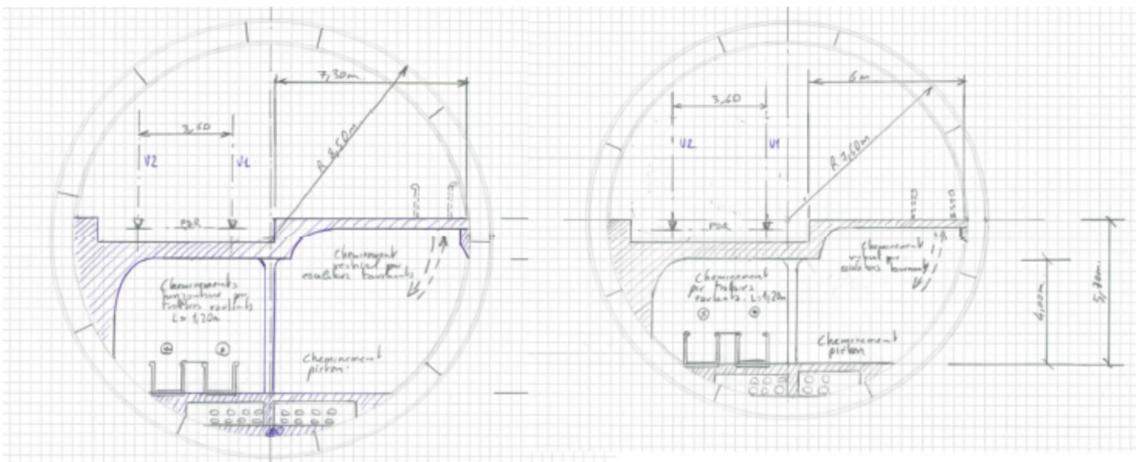
⁴ Une approche analytique simple permet d'estimer à environ 60 km/h la vitesse de projet dans les zones de bifurcation de voies au droit des puits Brotteaux et Félix-Faure (calcul pour un dévers nul des voies dans les zones de bifurcation et pour une insuffisance de dévers de 160 mm).



Les zones d'entonnement retenues à ce stade de l'étude sont situées dans les secteurs des Brotteaux au Nord et de l'avenue Felix Faure au Sud. À noter qu'elles ont été repérées via Google-Earth et Street-view dans un 1^{er} temps, et par visite sur site dans un 2^{ème} temps (voir l'annexe 1).

7.3.2 Prédimensionnement d'un tube ferroviaire

Les deux esquisses ci-après montrent la solution proposée pour l'implantation d'une double voie ferroviaire dont une à quai, respectivement pour des largeurs quai de 7 m et 6 m.



Les éléments principaux suivants composent ce profil :

Au niveau supérieur (= niveau ferroviaire) :

- Deux voies ferrées (V1 et V3 ou V2 et V4),

- Un quai de 6 ou 7 m,

Au niveau inférieur (= niveau circulations longitudinales) :

- Deux lignes de trottoirs roulants (largeur ext. 1,2 m, type aéroport), chaque ligne étant composée d'une suite de trottoirs roulants de 50 m environ espacés de secteurs piétons de 10 m de longueur environ,
- Un cheminement piéton.

La photographie suivante prise dans à l'aéroport de Genève montre un trottoir roulant et un cheminement piéton accolé.



Entre les deux niveaux (= circulations verticales) :

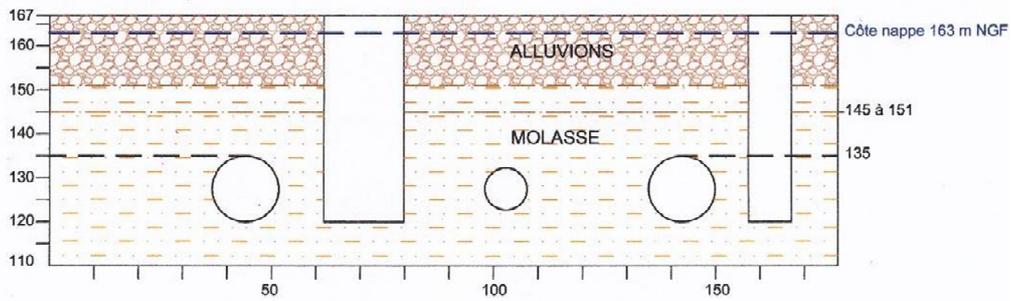
- Des batteries de deux escalators tournants : un montant et un descendant (nombre à prédimensionner),
- Des batteries d'un escalator tournant montant et d'un escalier (nombre à prédimensionner),
- Un ascenseur à chaque extrémité de quai (à vérifier).

La photographie suivante montre un trottoir tournant.



7.3.3 Conception générale de la gare

La figure suivante illustre la section transversale dans l'axe des puits d'accès depuis la gare existante et la place de Francfort.



L'esquisse ci-après montre les ouvrages principaux constitutifs de la gare, ainsi que les tubes ferroviaires associés entre les puits des Brotteaux et Felix-Faure.

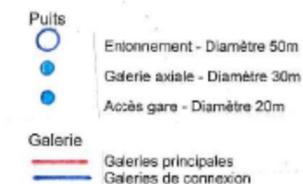
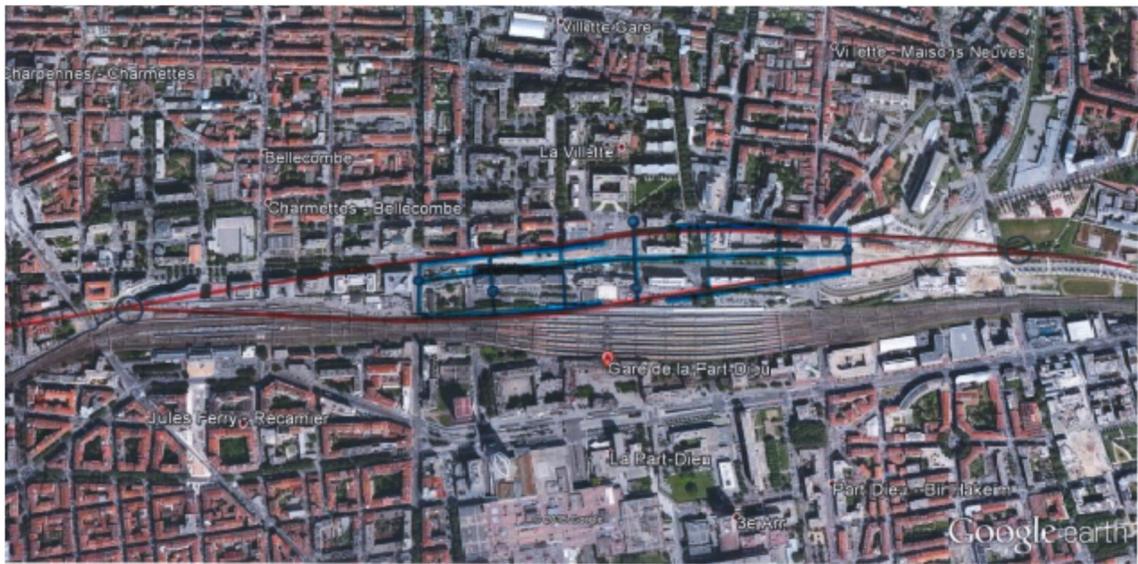


Fig. XXX :

La conception proposée ici peut être résumée comme suit :

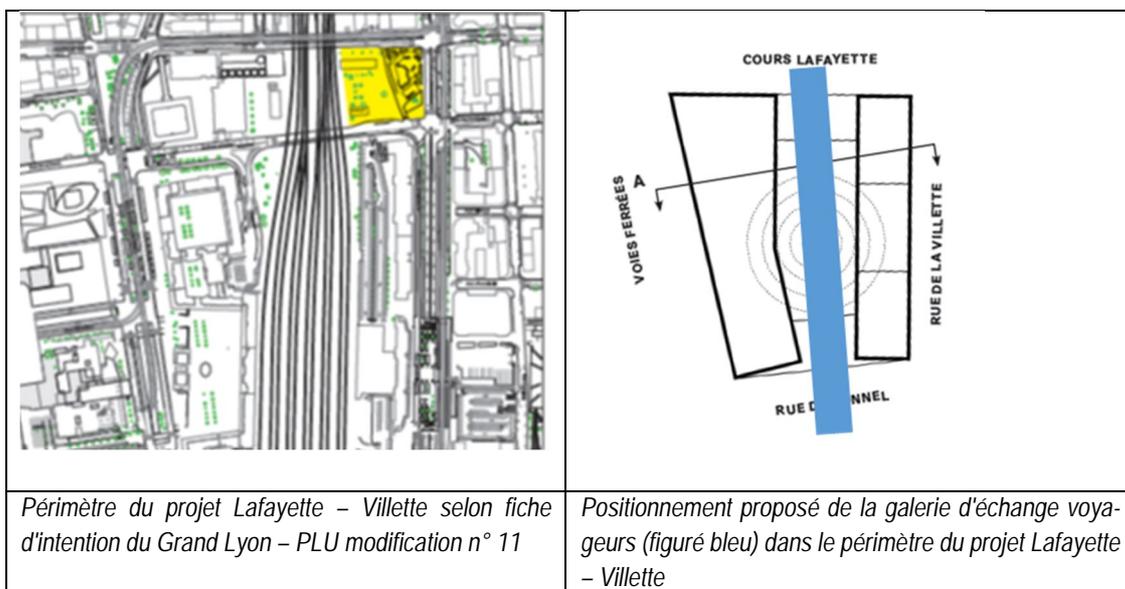
- 2 tubes ferroviaires avec chacun 2 voies à quai, les quais (repérés par une surligneur en bleu sur le tracé des tubes ferroviaires figuré en rouge de la figure précédente) étant décalés longitudinalement (cf. explication précédente sur les circulations horizontales en partie inférieure des tubes ferroviaire en gare),
- Une galerie d'échange voyageurs au centre,

- Des rameaux de connexion entre les tubes ferroviaires et la galerie d'échange; prédimensionnement : 2 x 7 unités,
- Un puits vertical de 30 m de diamètre à chaque extrémité de la galerie d'échange (fonctions accès chantier et accès secours + désenfumage de la gare) ; prédimensionnement : 2 unités,
- Des puits verticaux de 20 m de diamètre à proximité de la gare actuelle (fonctions accès chantier et accès voyageurs); prédimensionnement : 3 unités.

Le positionnement des ouvrages proposé ici doit être compris comme un positionnement de principe qu'il conviendra de préciser dans une phase ultérieure du projet, notamment en ce qui concerne les rameaux de connexion et la galerie d'échange voyageurs qui peuvent être ripés et/ou en courbe si nécessaire.

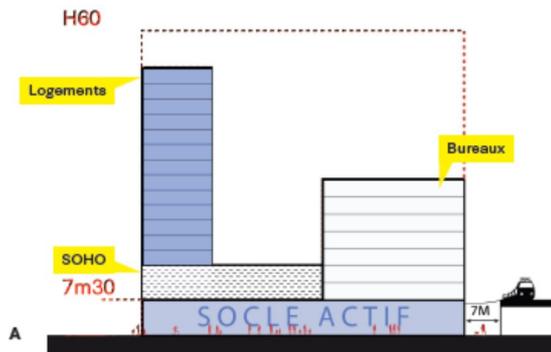
En outre, il peut être considéré une contrainte d'éloignement des fondations notablement plus faible pour les bâtiments envisagés aux horizons 2021 et 2030 (cf. chapitre 5.1.2) que pour les bâtiments de grande hauteur existants. On peut admettre en 1^{ère} approximation pour ces bâtiments futurs des parois moulées ou des pieux jusqu'à 0,5 diamètre des ouvrages de la gare souterraine, voire même directement au-dessus de ces ouvrages dans certains cas, la conception des fondations des bâtiments futurs pouvant être adaptée en conséquence si nécessaire.

Pour l'implantation des ouvrages proposée à la figure proposée, les deux vues ci-après montrent l'existence d'un conflit apparent de positionnement de l'extrémité Nord de la galerie d'échange voyageur avec le périmètre du projet Lafayette – Vilette.



Ce conflit est tout à fait gérable selon nous, étant donné la disposition des volumes du bâtiment prévue dans le projet du Grand Lyon (cf. coupe A ci-après), avec une partie logements côté Vilette, la seule réellement de grande hauteur, une partie bureaux côté plateforme ferroviaire et une partie centrale / médiane de hauteur modeste, le tunnel projeté (galerie d'échange voyageurs) étant axé

sur cette dernière partie. Les fondations profondes nécessaires pour les parties Logements et Bureaux du projet Lafayette- Villette pourront ainsi être positionnées en dehors du périmètre du tunnel.



Projet Lafayette-Villette; Coupe A-A du bâtiment selon figure précédente (= coupe transversale Est-Ouest)

En définitive, on propose de conserver l'implantation de la galerie d'échange voyageurs proposée ci-avant, une alternative possible, mais moins favorable selon nous au plan de la conception générale du projet, étant de réduire la longueur de la galerie d'échange pour positionner son extrémité Nord dans la rue de Bonnel, c'est-à-dire juste avant la parcelle du projet Lafayette-Villette. Concernant le puits d'extrémité de cette galerie au niveau du cours Lafayette, son positionnement exact devra être étudié à un stade ultérieur des études étant entendu que le diamètre de 30 m prévu au stade actuel pourra probablement être revu à la baisse si nécessaire⁵.

7.3.4 Méthodes de réalisation

Les sections de tunnels hors zone gare :

Dispositions identiques à l'étude de faisabilité, c'est à dire :

- Attaque St Clair avec un tunnelier type SPB Ø 12,50 m,
- Attaque la Guillotière avec un tunnelier type SPB Ø 12,50 m.

Avec ici sortie des tunneliers sans leur back-up aux puits Brotteaux et Félix-Faure, respectivement pour les deux tunneliers.

Les puits des Brotteaux et de Félix-Faure :

- Réalisation parois moulées circulaires (diamètre 50 m) fichées dans la molasse, par étape avec balancement des circulations sur chaussée provisoire,
- Bétonnage dalles de couverture partielle des puits et remise en place circulations sur la voirie initiale reconstituée au puits des Brotteaux,

⁵ Les fonctions principales du puits Lafayette sont en phase travaux un accès chantier et le puits de sortie du tunnelier qui aura réalisé la galerie d'échange voyageurs; et pour la phase exploitation de la gare : accès des secours, sortie de secours et conduit de désenfumage.

- Excavation sur toute la hauteur des puits.

Les puits du secteur de la gare :

- Réalisation parois moulées circulaire (diamètre 20 ou 30 m) fichées dans la molasse,
- Bétonnage dalles de couverture partielle des puits et remise en place des circulations piétons et/ou routières selon le cas (cf. cours Lafayette),
- Excavation à ciel ouvert sur toute la hauteur des puits.

Les sections de tunnels dans le périmètre de la gare :

Montage tunnelier type SPB Ø 17 m en fond de puits aux Brotteaux avec assemblage du back-up et à l'installation de boue utilisés par le SPB Ø 12,50 m de St Clair,

- Creusement du 1^{er} tube ferroviaire par le tunnelier SPB Ø 17 m de Brotteaux à Félix-Faure;

Sortie du tunnelier sans son back-up au puits Félix-Faure,

Recul en tunnel du back-up de Félix-Faure à Brotteaux et transfert en aérien de Félix-Faure aux Brotteaux de la tête de coupe et du bouclier,

2^{ième} montage en fond de puits aux Brotteaux du même tunnelier type SPB Ø 17 m et avec le même back-up,

- Creusement du 2^{ième} tube ferroviaire par le tunnelier SPB Ø 17 m de Brotteaux à Félix-Faure;

2^{ième} sortie du tunnelier SPB Ø 17 au puits Félix-Faure,

Montage au fond du puits de l'Esplanade Nelson Mandela du tunnelier SPB Ø 12,5 m qui a creusé le tunnel Sud,

- Creusement galerie d'échange par le tunnelier SPB Ø 12,5 m.

Les rameaux de communication dans le périmètre de la gare :

- Creusement en méthode traditionnelle à partir des 5 puits réalisés dans le périmètre de la gare (2 de diamètre 30 m et 3 de diamètre 20 m)

7.4 Éléments de planning

7.4.1 Creusement des ouvrages

Hypothèses principales :

- T0 : date de notification et OS de préparation,
- Les délais de montages des 2 tunneliers SPB ont été pris à 4 mois,
- Les délais de démontage du SPB Ø 12,50 m ont été pris à 3 mois,
- Les délais de démontage du SPB Ø 17 m ont été pris à 4 mois,
- Cadences moyennes d'avancement considérées :

- tunnelier SPB Ø 12,50 m : 12 m/j sauf pour le tronçon de 800 m pris à 9 m/j
- tunnelier SPB Ø 17 m : 5 m/j (travail en mode dégradé car utilisation du back up et de la station de traitement du SPB Ø 12,50 m).

Planning creusement :

Voir planning joint pour les 2 tunneliers Ø 17 m et Ø 12,50m.

Il ressort du planning de creusement les délais partiels suivants :

- le creusement avec le SPB Ø 12,50 m sera terminé et la machine démontée et évacuée à T0 + 55 mois,
- le creusement avec le SPB Ø 17 m sera terminé et la machine démontée et évacuée à T0 + 67 mois,
- le creusement des 8 rameaux inter tubes pourra débuter à T0 + 60 mois et sera terminé à T0 + 84 mois (avec 3 ateliers), soit 8 mois par rameau.

7.4.2 Durée totale de réalisation

Considérant que la mise en place des équipements pourra débuter à T0 + 80 mois pour une durée de 12 mois, l'ouvrage serait terminé à T0 + 92 mois.

La prise en compte de 12 mois supplémentaires pour les essais conduit à une mise en service à T0 + 104 mois, d'où une durée totale de réalisation de 9 ans jusqu'à la mise en service.

7.5 Éléments de coût

L'estimation financière des postes principaux de travaux est donnée à l'annexe 3.

Elle est basée principalement sur les retours d'expérience de la section Gerland – Oullins de la ligne B du Métro de Lyon ainsi que d'autres projets récemment réalisés.

La définition des ouvrages dans le périmètre de la gare étant encore succincte à ce stade, nous considérons de manière prudente pour l'estimation financière un quantitatif plus grand que ce qui ressort du prédimensionnement du chapitre 7.3.3, à savoir : 8 galeries de 100 m de longueur (= 16 rameaux de connexion), non pas 7, 8 puits verticaux (respectivement 2 de Ø 30 m et 6 de Ø 20 m), non pas 5, la galerie d'échange voyageurs sur la longueur de la gare restant par ailleurs inchangée (Ø 12,5 m).

On notera également que :

- des traitements de terrain pour les galeries de connexion ont été provisionnés,
- Les équipements ont été globalement comptés à 22% de l'ensemble de l'ouvrage,

- Les postes Raccordement Nord, Raccordements Sud et EALE ont été repris à l'identique du chiffrage d'Egis (dispositions identiques pour la solution1 proposée ici).

Enfin, une SAV de 15% et une PRI de 15% ont été considérés.

L'estimation globale atteint 2,5 Md€ HT

Pour rappel, les estimations Egis varient entre 3,2 Md€ HT et 4,2 Md€ HT.

7.6 Réflexions complémentaires sur la solution proposée

7.6.1 Limitation les impacts chantiers dans le secteur de Part-Dieu

La solution proposée permet de limiter les impacts chantiers dans le secteur Part-Dieu sur toute la durée des travaux de par les circonstances suivantes :

- Les installations de chantier les plus imposantes et génératrices de gênes au niveau sonore⁶ sont déportées à Saint Clair et à La Guillotière,
- Ces installations sont utilisées non seulement pour la réalisation des tunnels de raccordement au Nord et au Sud, mais également pour les travaux souterrains réalisés dans le périmètre de la gare souterraine,
- Une mécanisation maximale des chantiers y compris ceux réalisés dans le périmètre de la gare souterraine.

Comme déjà indiqué, les deux tubes ferroviaires réalisés à partir du puits Brotteaux seront alimentés et les matériaux d'excavation seront évacués à partir de la tête St Clair avec la même installation que pour le tunnel St Clair – Brotteaux. Cela limitera de manière importante les installations au droit du puits des Brotteaux.

⁶ Les installations importantes à St Clair et à la Guillotière concernent les éléments suivants :

- les stations de traitement des boues qui imposent une surface au sol d'environ 5 000 m²
- la zone de stockage des voussoirs ainsi que les moyens de manutentions (portique, grue à tour, etc..) – surface au sol de 2 000 m²
- la centrale à mortier de bourrage (vide annulaire entre les voussoirs et le terrain en place)
- les stations de traitements des eaux
- la tour de refroidissement du tunnelier
- les ventilateurs, groupes électrogènes de secours et compresseurs,
- la zone de stockage des consommables (tuyaux de marinage, bidons des huiles et de graisses, bentonite, chaux, câbles électriques, etc..)
- zone de stockage des passerelles piétons, des gaines de ventilation, etc..
- les ateliers mécaniques, électricité et chaudronnerie,
- les bureaux principaux de chantier
- les bungalows de chantier (réfectoires, vestiaires)

De même, le tube central dans le périmètre de la gare (galerie d'échange voyageurs) peut être pour partie au moins alimenté et les matériaux d'excavation pour partie évacués depuis la Guillotière. À noter que la limitation possible des installations au droit du puits Sud de ce tube (esplanade Nelson Mandela) est à mettre en balance avec les coûts de la logistique nécessaire dans ce secteur (cheminements verticaux et horizontaux via le puits Félix-Faure).

Au final, avec la solution proposée ici, il restera dans l'environnement de la Part Dieu principalement les installations nécessaires à la réalisation des puits, tous les chantiers souterrains de la gare étant principalement alimentés et marinés via les tubes ferroviaires de et vers Saint Clair et La Guillotière.

Les installations prévues à Saint Clair et à La Guillotière sont en fait très semblables en nature et volume à celles prévues par Egis pour la réalisation des tunnels de raccordement au Nord et au Sud.

Cela étant, un avantage en termes d'impact travaux de la solution que nous proposons ici tient au fait que lesdites installations sont utilisées pour l'entier des travaux génie civil du projet (raccordements + gare), alors qu'elles sont utilisées principalement / essentiellement pour les tunnels de raccordement dans la solution Egis.

D'autres installations et une organisation spécifique sont nécessaires dans le périmètre de la gare souterraine pour la méthode traditionnelle prévue par Egis, avec pour corollaire un trafic chantier plus important en surface dans le secteur Part-Dieu.

7.6.2 Références d'utilisation de tunneliers à confinement de gros diamètre

Le tunnelier à pression de boue a été très récemment mis en œuvre sur le Métro de Lyon à Oullins (2010-2013) dans une géologie très similaire à celle attendue pour le projet Part Dieu.

Cette expérience a démontré la maîtrise parfaite (coûts et délais) de cette solution technique dans les couches géologiques complexes de Lyon, tant pour le tunnelier que pour la station de traitement de boue et les équipements qui participent à l'avancement du tunnelier.

Il est à noter que le retour d'expérience avec la station de traitement de boue atteste de la possibilité de réutiliser 100% des alluvions extraits. C'est un des éléments importants à prendre en compte au niveau impact environnemental du projet.

Il est important selon nous pour la fiabilité de l'opération que la conception de la nouvelle gare se fasse autour de ce type de solution. La maîtrise des coûts et des délais est un avantage indéniable avec ce type de solution (bien évidemment la qualité des entreprises intervenantes doit être regardée avec la plus grande rigueur).

Les tunneliers de grand diamètre (> 15 m) sont mis en œuvre depuis plus de 15 ans partout dans le Monde.

On remarque, sur la liste à l'annexe 5, les excellentes performances des tunneliers S317 et S318 de Herrenknecht, d'un diamètre de 15.43 m, mis en œuvre par une entreprise chinoise (STEC : Shanghai Tunnel & Engineering Co.) entre 2007 et 2010 à Shanghai et qui ont atteints les performances suivantes (à 7j/7 et H24) :

- Meilleur jour : 26 m,

- Meilleure semaine : 144 m,
- Meilleur mois : 556 m.

Et des cadences moyennes de 12 m/j soit 84 m/semaine. À comparer, bien sûr, aux cadences prises dans notre projet et qui sécurisent par conséquent le planning que nous proposons (12 m/j pour le tunnelier Ø 12,50m et 5 m/j pour le tunnelier Ø 17 m).

À noter également que ces 2 tunneliers ont d'abord creusé 7 500 m chacun puis ont été réutilisés, après remise en état (S317 devenu S593 et S318 devenu S569) pour encore 3 250 m.

Côté constructeurs de tunneliers, cinq d'entre eux ont des références actuelles dans les diamètres supérieurs à 15 m : Herrenknecht, NFM, Mitsubishi, Hitachi et IHI (même si Herrenknecht tient le haut du pavé avec 13 TBM sur les 21 TBM de plus de 15 m, 4 pour NFM, 2 pour Mitsubishi et 1 pour Hitachi).

Le retour d'expérience pour des tunneliers de l'ordre de 17 m est encore faible à ce jour puisqu'il concerne deux machines seulement : un EBP à Seattle par le consortium Dragados + Tutor Perini, un SPB à Hong-Kong par Bouygues TP. Le 1^{er} tunnelier est actuellement en réparation, le second est en montage.

Notre analyse de l'expérience Seattle nous permet d'expliquer tout ou partie au moins des difficultés rencontrées par les circonstances suivantes de ce chantier :

- La technologie EPB (pression de terre) atteint probablement ses limites actuelles avec une tête de forage de 17,5 m, étant donnée l'importance du couple nécessaire pour vaincre les efforts de frottements dans la chambre d'abattage et sur le bouclier. Il est à noter d'ailleurs que le bouclier utilisé a été sous dimensionné, raison pour laquelle son renforcement structurel est en cours,
- Le roulement utilisé comporte plusieurs segments et des problèmes avaient été constatés sur ce roulement lors des essais préalables réalisés en usine.

Bouygues et Herrenknecht ont tirés les leçons de cette expérience en optant pour la technologie SPB (pression de boue) pour le projet de tunnel sous-marin à Hong Kong que Bouygues a remporté en 2014, la technologie pression de boue requérant un couple beaucoup plus faible que la pression de terre.

Actuellement, quatre groupements français peuvent prétendre répondre à de tels Appels d'Offres: Vinci/SB, Eiffage, Razel et Bouygues. Grâce aux travaux du Grand Paris qui auront lieu dans les prochaines années, plus d'entreprises françaises seront probablement à même de concourir pour ce projet. Des entreprises étrangères compétentes pourront également répondre concourir.

Par conséquent, le nombre de candidats potentiels devrait être suffisant pour permettre la concurrence souhaitable pour ces travaux.

7.6.3 Enseignements pour le projet

On peut déduire des retours d'expérience analysés les conditions suivantes pour maîtriser les risques dans l'utilisation de tunneliers de très gros diamètres (ordre de 17 m) pour le secteur Part-Dieu :

- Le tunnelier devra être à pression de boue (SPB) afin de limiter le couple de creusement (grâce à la boue bentonitique),
- Le fabricant du tunnelier devra avoir des références dans ce type de tunnelier de grand diamètre (diam > 15 m),
- L'entreprise qui réalisera les travaux devra avoir du personnel aguerri avec ce type de tunnelier (pression de boue). Nous rappelons que si le prolongement du Métro de Lyon à Oullins s'est passé dans d'excellentes conditions pour le Sytral, c'est grâce en partie au fait que les équipes de creusement avaient, en continuité, réalisé déjà plus de 3 chantiers au tunnelier avant Oullins,
- Le roulement devra être monobloc (diam < 7,80 m) : en effet, compte tenu des difficultés de fabrication des roulements segmentés (non monobloc), de distribution de charges entre les segments et de déformation possible du support, ces derniers doivent être prohibés,
- La cadence de creusement ne devra pas être élevée (ce qui est le cas dans notre projet – 5m/jour),
- Pour éviter les interventions en hyperbare, les changements des outils de coupe devront pouvoir se faire depuis l'intérieur du tunnelier à la pression atmosphérique. Actuellement un tunnelier à pression de boue de diam 13,60 m traverse le Bosphore à 12 bars de pression et est équipé d'un tel système qui fait ses preuves.

D'ici au lancement du projet, les éléments principaux suivants sont susceptibles de renforcer le choix de la solution proposée :

- Avancée technologique des tunneliers (évolution rapide de la technologie qui rend un tunnelier obsolète en moins de 5 à 7 ans). À titre d'exemple, actuellement, les fabricants travaillent sur la robotisation des changements d'outils pour éviter les interventions en hyperbare,
- Accroissement en nombre des entreprises compétentes (en plus du Grand Paris, de Cigéo, voir de LTF, de nombreux projets dans le Monde avec l'utilisation des tunneliers soit pour des métros, soit des autoroutes ou encore des voies ferrées),
- Accroissement du nombre de fabricants de tunneliers dans le Monde grâce aux nombreux projets déjà lancés (Chine, Sud Est asiatique, Australie, Grande Bretagne, Europe, USA, Russie, etc..) – Déjà 21 recensés à ce jour.

Par ailleurs, les dispositions particulières suivantes devront être prescrites selon nous dans les spécifications techniques, afin de réduire encore les risques de surcoûts et/ou dérapage de délais :

- Utilisation de tunneliers neufs,
- Laisser le temps nécessaire de fabrication et de montage à blanc (ne pas réduire ce délai car sources de d'aléas sur le chantier par la suite),
- Spécifications très strictes sur les qualités intrinsèques des tunneliers,
- Le roulement du tunnelier devra être en un seul élément (monobloc) et devra pouvoir être démonté, en cas de rupture, depuis l'intérieur du tunnelier et un roulement devra être immédiatement disponible en usine en cas de casse,
- La roue de coupe devra être articulée et translatable afin de détecter tout effort anormalement élevé sur celle-ci,
- La durée de montage d'un anneau devra être de 20 mn maximum,

- L'efficacité du tunnelier devra être de 95% minimum (hors périodes de maintenance).

Pour résumer ce chapitre, on peut dire que les risques techniques sont bien maîtrisables pour les deux variantes proposées, pour autant que les conditions de conception / de réalisation listées ci-dessus soient respectées.

7.7 Conclusion sur la faisabilité technique du projet

La faisabilité technico-économique de la variante 1 de gare souterraine que nous proposons ici peut être considérée selon nous comme assurée⁷, eu égard aux retours d'expérience importants au niveau mondial dans l'utilisation de tunneliers à boue (SPB) de l'ordre de 15 m de diamètre et des progrès en cours dans le design de machines de l'ordre de 17 m pour le même mode de confinement.

L'expérience récente du prolongement de la ligne B à Oullin gare dans des conditions géologiques identiques constitue un gage de fiabilité aux plans techniques et de la maîtrise des coûts de la technologie SBP dans le contexte Part-Dieu, quand bien même la machine utilisée avait un diamètre notablement plus petit que celui nécessaire ici.

La maîtrise des risques techniques constitue en fait l'atout principal indéniable selon nous de la conception proposée.

Un autre avantage important de cette variante est le déport des installations principales à St Clair et la Guillotière pour toute la durée des travaux, avec pour corollaire des installations minimales et un trafic chantier moindre dans le secteur de la Part Dieu que pour les solutions envisagées dans l'étude de faisabilité.

Quand bien même la solution est compatible avec des tunneliers de l'ordre de 15 m, un diamètre d'environ 17 m peut être considéré comme l'optimum probable à l'horizon de la réalisation des travaux, cette valeur permettant de dégager des volumes de circulation voyageurs plus agréables.

L'inconvénient principal de cette solution tient probablement à l'étirement en longueur de la gare (contre un étirement en largeur pour la variante 2 proposée), avec pour corollaire des chemineaux horizontaux relativement importants.

Aux plans de l'architecture et de l'ergonomie, la variante 1 est probablement également moins favorable que les solutions envisagées dans l'étude de faisabilité.

Cela étant, comme déjà mentionné (chapitre 2.2), les trois experts mandatés pour la présente expertise n'ont pas prétention de compétence en matière d'architecture des gares, non plus que pour

⁷ La faisabilité de la variante 2 esquissée sommairement dans ce rapport peut également être considérée comme acquise, sous réserve de trouver dans l'hyper centre de Lyon 2 x 2 sites conjugués (4 sites au total), respectivement 2 sites au Nord et 2 sites au Sud, pour recevoir des puits de gros diamètres (environ 50 m) nécessaires aux bifurcations de voies en souterrain.

la conception de pôles d'échange multimodaux. Il y a donc probablement lieu de compléter / d'optimiser la / les solution(s) proposée(s) ici, tout en conservant les principes constructifs sur lesquels elle(s) est / sont fondée(s).

8 Conclusions – reconnaissances complémentaires

8.1 Réponses aux questions RFF pour la présente expertise (cf. cahier des charges)

Les questions principales du cahier des charges RFF pour la présente expertise sont reportées ci-après en caractères tramés, avec nos réponses en correspondance.

- L'hypothèse de faisabilité d'un ouvrage souterrain de grande longueur et de grande profondeur est-elle crédible, au vu du contexte géologique et hydrogéologique de la zone urbaine concernée ?

La faisabilité technico-économique d'un ouvrage souterrain de grande longueur et de grande profondeur à Part-Dieu est crédible selon nous, mais pour une conception différente de celles envisagées dans l'étude de faisabilité. La variante 1 dont nous avons esquissé les principes de conception et de méthode de réalisation dans le présent rapport atteste de cette faisabilité.

- L'hypothèse de faisabilité d'une gare souterraine à 4 voies à quai située sous ou à proximité immédiate de l'actuelle gare de la Part Dieu, est-elle crédible, au vu du contexte géologique et hydrogéologique de la zone concernée, de la présence de très nombreux immeubles (dont des IGH) existants ou en projet, et des installations de surface (ferroviaires et intermodales) présentes, avec lesquelles elle devra être facilement connectée ?

Le tracé proposé dans la variante 1 pour les tubes ferroviaires et les ouvrages de la gare est partout distant en plan (= en situation) d'un moins 1,5 diamètre des bâtiments de grande hauteur actuels. En outre, la solution permet toutes les connexions nécessaires aux installations de surface à Part-Dieu,

Le bémol de cette solution est bien sûr l'étiement de la gare par rapport à d'autres conceptions, la parade proposée ici étant l'utilisation de trottoirs roulants à l'instar de ce qui se fait dans tous les aéroports importants.

- Les éléments d'études à disposition permettent-ils de garantir au maître d'ouvrage que les risques majeurs associés à la construction des ouvrages dudit scénario sont bien tous identifiés? Sinon, compléter l'identification et la qualification de ceux –ci.

Oui, les éléments d'études à disposition permettent de garantir que les risques majeurs sont tous identifiés pour la solution proposée, eu égard à la faible sensibilité de cette solution aux aléas géotechniques du secteur Part-Dieu et au retour d'expériences déjà important au niveau mondial d'utilisation de tunneliers de grand diamètre.

- Quelles seraient les conditions essentielles à remplir dès ce stade d'études, pour lever les risques liés à la faisabilité technique du scénario tunnel et en particulier de la gare souterraine?

Comme déjà indiqué, la faisabilité technique de la variante 1 proposée est acquise.

Le risque principal selon nous pour cette solution est son rejet pur et simple du fait que la conception proposée n'est pas en ligne avec les standards habituels, avec les standards français en particulier.

C'est une solution certes novatrice, mais uniquement dans son assemblage. Elle n'a en effet rien de révolutionnaire dans ses composants considérés isolément.

- Quelles études complémentaires ou investigations ciblées seraient à engager pour disposer d'une évaluation financière crédible des provisions risques respectives, soit immédiatement pour les risques liés directement à la faisabilité technique, soit lors de la prochaine phase pour l'estimation financière des risques?

La faisabilité de la variante 1 proposée est avérée et n'est pas susceptible d'être remise en question par les résultats des investigations à venir. Toutefois, afin de disposer des éléments nécessaires à l'optimisation du pré-dimensionnement des ouvrages et préciser l'enveloppe financière des travaux, nous proposons au chapitre suivant des reconnaissances géotechnique à mener préalablement à la poursuite des études au niveau AVP.

8.2 Reconnaissances géologiques

Nous proposons ci-après l'ébauche d'un programme de reconnaissance à lancer avant d'engager les études niveau AVP du projet :

- Vérifier le niveau du toit de la molasse au droit des différents puits,
- Mesurer les caractéristiques mécaniques de la molasse plus en profondeur de la tranche de terrain superficielle d'une quinzaine de mètres d'épaisseur classiquement reconnue : les investigations devront être conduites jusque vers la cote 105 m - 1 diamètre sous tunnelier - et comporter des essais pressiométriques Haute Pression (8MPa), des mesures de R_c et R_p , des essais de cisaillement au Tri-axial,
- Apprécier, dans cette même tranche de profondeur, le faciès dominant de la molasse au moyen de sondages carottés et d'essais d'identification et caractérisation en laboratoire : analyse granulométrique et sédimentométrique, limites d'Atterberg, dureté et abrasivité Cerchar,
- Vérifier, notamment à proximité de la zone d'implantation de la future gare souterraine, la perméabilité moyenne de la molasse à cette profondeur : réalisation d'essais de pompage en vraie grandeur à partir de triplets de forages dont les chambres de mesure et pompage auront été préalablement parfaitement isolées des alluvions.

ANNEXES

1. Reportage photographique de la visite de terrain du 21 novembre 2014
2. Toit des formations molassiques dans le secteur de Part Dieu
3. Détail estimatif de la solution 1
4. Planning de foration / percement des souterrains
5. REX tunneliers de grand diamètre dans le monde



NFL - Expertise de la faisabilité d'un scénario en tunnel

1