

# EXPERTISE DES COUTS NFL LONG TERME

## ETUDE FAISABILITE EGIS - DOSSIER VARIANTE TUNNEL BITUBE ET GARE EN TRANCHEE COUVERTE

21 Août 2015



Rédacteur : IP OA TuG – S. LASSALLE  
Vérificateur et approbateur : IP OA TuG – Y. CHAMEROIS

# 1. ANALYSE DES QUANTITES ET DES COÛTS

Le présent chapitre traite des principaux écarts sur les quantités et/ou coûts unitaires entre notre estimation SNCF et l'estimation réalisée par la MOE EGIS.

## Parois moulées, y compris butonnage provisoire

La réalisation de l'ouvrage cadre de la gare débute par des parois moulées périphériques d'une profondeur de 48,5m dont 15m de fiche dans les molasses plus compactes. Ces parois, de 1,5m d'épaisseur, servent de revêtement définitif. Le terrassement est ensuite réalisé entre ces parois rigides, limitant ainsi l'influence du creusement de la gare sur les bâtis en surface.

Ces parois moulées constituent un des points durs du chantier. En effet, leur grande profondeur nécessite une maîtrise parfaite du risque de déviation verticale de chaque panneau pour limiter les problèmes de défauts d'étanchéité entre panneaux, ainsi que l'utilisation des machines excavatrices spéciales.

D'après nos retours d'expérience sur les différents chantiers parisiens (Rosa Park avec des parois d'une vingtaine de mètres de profondeur, ou encore puits HSL), le prix de revient d'une paroi moulée est de 800 €/m<sup>3</sup> pour des profondeurs allant jusqu'à 20-30m. Pour des profondeurs plus importantes, un coefficient de complexité de 1.2 est appliqué arbitrairement pour prendre en compte des sujétions d'exécution plus contraignantes (machine plus puissante, station de recyclage des boues plus importante, cadence de creusement plus faible...).

Le prix unitaire est donc ramené à 960 €/m<sup>3</sup> de paroi moulée, contre 1000 €/m<sup>3</sup> pour EGIS.

Au fur et à mesure du terrassement entre parois moulées, pour limiter les efforts de poussée des terres sur ces parois, un butonnage provisoire est mis en œuvre. Ce butonnage n'étant pas décrit dans la notice, nous prenons pour hypothèse une maille de 5m x 5m, soit 7 lignes de butons (sur une hauteur totale de 33m terrassée) espacés horizontalement tous les 5m.

En considérant un prix unitaire de 10 000 € par buton, la plus-value pour la réalisation du butonnage provisoire ramenée au coût unitaire des parois moulées est de 200 €/m<sup>3</sup>, soit 1160 €/m<sup>3</sup> de parois moulées y compris le butonnage, contre 1300 €/m<sup>3</sup> pour EGIS.

Le coût global pour la réalisation des parois moulées, y compris butonnage provisoire, est inférieur de 8% au coût d'EGIS, soit -16 M€.

L'écart entre les parois moulées supplémentaires (1000 €/m<sup>3</sup>) et les parois moulées périphériques (1300 €/m<sup>3</sup>), y compris le butonnage, semble légèrement surévalué. Il serait intéressant que la MOE justifie cet écart entre ces deux coûts unitaires.

## Parois moulées supplémentaires

Pour limiter le flambement des dalles de grande portée de l'ouvrage cadre (largeur d'une trentaine de mètres), des appuis intermédiaires verticaux doivent être mis en œuvre aussi bien au droit de la zone de quai qu'en dehors (entonnement).

En dehors de la zone de quais, l'hypothèse est prise de considérer une paroi moulée longitudinale identique à celles délimitant l'ouvrage cadre (épaisseur de 1,5m et fiche à 48,5m) et servant d'appui aux dalles.

Au droit de la zone de quai où la libération des emprises doit être optimale, nous considérons dans notre chiffrage la réalisation de pieux depuis la surface de diamètre 1.2m, de 48.5m de profondeur et disposés tous les 8m selon deux lignes de part et d'autre des circulations verticales.

Le retour d'expérience des ouvrages Caumartin et Havre du projet EOLE 1<sup>ère</sup> phase donne un coût au mètre linéaire de poteau ferrailé (pieu) de 2100 €. En considérant un coefficient de complexité de 1.2 tenant compte du contexte urbain défavorable et des très fortes profondeurs des pieux, cela revient à un coût de 2520 €/ml.

À la place des pieux au droit de la zone de quai comme évoqué dans leur notice, la MOE semble avoir chiffré uniquement des parois moulées intermédiaires, d'où un léger écart de prix avec notre estimation pour le poste de parois moulées supplémentaires (51 M€ pour le chiffrage SNCF contre 45 M€ pour la MOE).

## Étanchéité de l'ouvrage cadre de la gare

D'après la notice explicative des travaux de la gare réalisée en tranchée couverte, seules les parois moulées, d'une hauteur totale de 48m, assurent le rôle de revêtement définitif. Il n'est donc pas prévu de dispositif d'étanchéité à l'intrados des parois. Pour un ouvrage de cette ampleur, traversant la nappe alluvionnaire et recevant du public (ERP), il paraît indispensable d'assurer une étanchéité parfaite.

Même si les parois moulées offrent un certain niveau d'étanchéité, ce dernier n'est pas parfait en particulier lorsque la profondeur des parois est importante. Dans le cas de la présente gare, les parois ont une profondeur de 48m, augmentant ainsi le risque de divergence dans le plan vertical entre deux panneaux contigus. Ces défauts, même légers (de l'ordre de 1%), peuvent se traduire par des défauts d'étanchéité au droit des joints entre deux panneaux.

En revanche, dans le sous-détail d'estimation, il est fait mention d'une étanchéité sans préciser le type adopté : extradossé de type Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane (DEG) ou intradossé de type Système d'Étanchéité Liquide Armé (SELA) ou Système d'Imperméabilisation Liquide (SIL). D'après les quantités annoncées (125 000m<sup>2</sup> environ), il s'agirait d'une étanchéité appliquée sur tout le pourtour de l'ouvrage cadre.

Les parois moulées assurant le rôle de revêtement définitif, l'étanchéité pensée par la MOE serait une étanchéité appliquée en intrados.

Comme aucune précision n'est apportée sur le type d'étanchéité, nous supposons que la MOE est parti sur l'hypothèse d'une étanchéité de type SIL (Système d'imperméabilisation Liquide) ou SELA (Système d'étanchéité Liquide Armé) qui assure une double fonction d'imperméabilisation et de structure résistante vis-à-vis des efforts.

Le projet parisien EOLE 2 (extension de la ligne du RER E de l'arrière gare HSL vers la Défense) utilise cette technique d'étanchéité appliquée en intrados, notamment au droit des puits réalisés en parois moulées. Le prix au m<sup>2</sup> du procédé SELA est de 200€ environ, contre 150€/m<sup>2</sup> pour le procédé SIL.

Comme ce procédé a déjà fait l'objet d'une demande de dérogation de la part de la MOE dans le cadre du projet EOLE 2, nous souhaitons alerter la MOA sur ce procédé d'étanchéité intrados.

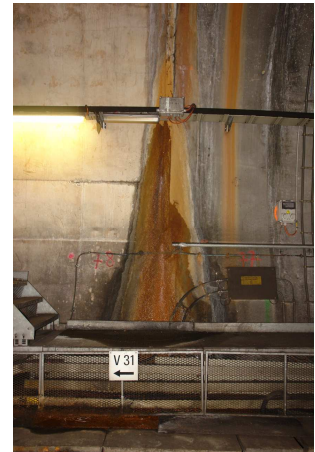
Les ouvrages seront entièrement baignés par les nappes phréatiques de l'horizon alluvionnaire, avec des charges d'eau atteignant 25 mètres par rapport au futur radier.

Sur le plan réglementaire, l'étanchéité des ouvrages souterrains fait l'objet de règles exprimées dans le fascicule 67 titre III du CCTG qui stipule que tout ouvrage sous pression hydrostatique

doit-être étanché avec un système extradossé de type géomembrane synthétique. Dans le cas d'une étanchéité de type intrados, une demande de dérogation devra être formulée.

Au-delà de l'aspect réglementaire, le comportement des ouvrages souterrains d'EOLE première étape, au regard du critère étanchéité, constitue le meilleur retour d'expérience disponible après 15 ans d'exploitation.

Les arrivées d'eau, de loin les plus importantes, sont concentrées dans les ouvrages dépourvus de membrane d'étanchéité (avant-gare Sud de la gare Magenta ; avant-gare Est de la gare HSL ; impasses de sécurité Ouest HSL ; et locaux techniques également construits sans membrane). Ces arrivées d'eau essentiellement localisées au droit des raccords entre plots et reprises de bétonnage (y compris en radier) nécessitent de nombreuses et coûteuses opérations de maintenance dans un milieu fortement exploité (cf. photo ci-contre- infiltration d'eau au droit des joints / avant-gare Est HSL non pourvue de membrane DEG).



Dans le cas de la gare Part Dieu réalisée en tranchée couverte, les joints entre les différents panneaux de parois moulées seront autant de points d'infiltrations préférentiels.

Dans les ouvrages recevant du public tels que les gares Magenta et HSL, une membrane extradossée de type DEG a été mise en œuvre. Les ruissellements et infiltrations d'eau sont bien inférieures et leurs traitements sont facilités (injection par compartiment).

La mise en œuvre d'une membrane étanche extradossée, qui constitue une technique éprouvée, apporte une garantie de pérennité bien supérieure, et un gain financier certain à long terme sur les opérations de maintenance.

Il n'y a actuellement pas un retour d'expérience suffisant sur le vieillissement du procédé type SELA. Il est appliqué, en régénération sur quelques ouvrages d'art seulement (hors tunnel) à la SNCF, dans des conditions hors nappe, et la RATP commence seulement à mettre en œuvre ce produit en tunnel. En tant que futur gestionnaire du réseau, nous ne pouvons pas prendre le risque de l'utilisation d'un tel procédé sur un chantier aussi sensible en termes d'exploitation et d'environnement (forte charge en eau, ouvrage recevant du public...) que la gare souterraine de Part Dieu.

Dans le cadre du chiffrage, nous proposons donc de considérer la mise en œuvre d'une membrane de type DEG appliquée sur les parois moulées périphériques et revêtue en intrados d'un chemisage en béton coulé d'une épaisseur de 30-40cm. Cette structure garantit une étanchéité parfaite, même au droit des joints des panneaux de parois moulées. La membrane DEG permet également de traiter par compartiment les éventuels défauts d'étanchéité apparus en cours d'exploitation.

Une membrane type DEG associée à un chemisage en béton coulé de 50cm d'épaisseur est estimé à 250€/m<sup>2</sup>.

La MOE devra préciser le dispositif d'étanchéité prévu dans leur dossier afin de vérifier si toutes les exigences réglementaires et fonctionnelles de la gare sont bien assimilées.

En considérant une étanchéité par membrane type DEG, l'écart entre notre estimation et celle d'EGIS est important (+18 M€).

## Soutènements plateformes SNCF

La proximité immédiate de l'ouvrage cadre de la gare avec les voies ferroviaires exploitées impose des contraintes de réalisation strictes. Côté Ouest, notamment au droit des puits Nord et Sud, l'ouvrage cadre se situe à 3,9m de l'axe de la voie L et à 2m des fondations de cette voie.

Cette proximité nécessitera quelques interruptions de circulation sur les voies contigües aux travaux. Pour limiter cette interruption de circulation et l'impact des travaux sur la stabilité des voies ferroviaires, un soutènement préalable de la plateforme est nécessaire.

Même si ces travaux figurent dans le sous-détail de l'estimation établie par la MOE, ils ne sont pas précisés dans la notice explicative.

Nous avons donc fait l'hypothèse d'un soutènement de type paroi berlinoise constituée de profilés métalliques fichés à 3-4m de profondeur reliés par des bastaings au fur et à mesure du terrassement.

Par manque d'explication de la part de la MOE, nous ne pouvons pas comparer notre quantitatif avec celui proposé dans le tableau.

Nous avons considéré l'application de cette paroi berlinoise au droit des puits Nord et Sud, soit sur 131m de linéaire.

D'après le retour d'expérience des chantiers de régénération sur le RFN, le prix de parois berlinoises au m<sup>2</sup> est de 1275 € en considérant une profondeur de 3-4m.

## Structure béton armé des butons définitifs

Pour reprendre les efforts de poussée des terres sur les parois moulées de grande profondeur, plusieurs lignes de butons intermédiaires et définitifs sont nécessaires.

La notice explicative réalisée par la MOE ne précise pas la distribution géographique de ces butons ainsi que leur section.

À partir de nos retours d'expérience sur des projets d'ouvrage cadre similaires à grande profondeur (TC de Saint André sur la LN5), l'hypothèse suivante est prise : 1 ligne de buton par niveau, espacés tous les 5m et de 1m<sup>2</sup> de section transversale.

En partant sur ces hypothèses et en considérant un prix de béton armé à 300kg/m<sup>3</sup> de 900 €/m<sup>3</sup> (yc coffrage, ferrailage, béton), notre chiffrage est supérieur de 30% par rapport à celui mené par la MOE, soit +2.7 M€.

## Remblai

Suite à l'excavation des différents niveaux de l'ouvrage cadre et de la mise en oeuvre de la dalle supérieure, un remblaiement est réalisé sur la dalle de couverture sur une épaisseur de 5m au droit de la zone de quai (3 niveaux) et de 11m en dehors de la zone de quai (2 niveaux). Ce remblaiement sert également de lestage de l'ouvrage pour contrebalancer les sous pressions hydrostatiques au niveau du radier.

D'après le retour sur les chantiers des gares de Caumartin et du Havre (EOLE 1<sup>ère</sup> phase), le prix de remblaiement sur les dalles de couverture est de 50 €/m<sup>3</sup>. Notre estimation pour les remblais est supérieure de 14% par rapport à l'estimation EGIS, soit +1.3 M€.

## Travaux de terrassement en taupe sous dalle

Deux méthodes de construction sont envisagées pour la réalisation des différentes parties de l'ouvrage cadre de la gare :

- La méthode sous couverture d'une dalle (top and down)
- La méthode à ciel ouvert (bottom/up)

Les secteurs sensibles traversés par l'ouvrage (routes, voie de tram...) nécessitent une méthode limitant au maximum l'interception de ces ouvrages sensibles.

La méthode top and down permet de libérer rapidement les emprises en surface (route, voie de tram, ...).

Une fois la réalisation des parois moulées et de la dalle de couverture terminée, la dalle est recouverte de remblai et les travaux de terrassement pour les niveaux inférieurs se font de haut en bas, en taupe sous la dalle de couverture.

Le terrassement en taupe nécessite des sujétions d'exécution beaucoup plus contraignantes qu'un terrassement classique à l'air libre, entre les parois moulées (milieu confiné, hauteur sous dalle limitée, difficulté de retournement des engins, évacuation des déblais compliquée...).

D'après notre retour d'expérience sur les grands chantiers parisiens (EOLE 1<sup>ère</sup> phase, Caumartin et Havre), les prix de terrassement sont les suivants :

- 60 €/m<sup>3</sup> de déblai entre paroi moulée à l'air libre (idem ratio EGIS)
- PV de 140 €/m<sup>3</sup> de déblai pour des travaux réalisés en taupe (contre 150 €/m<sup>3</sup> considéré par EGIS)

La méthode top and down est adoptée dans 5 secteurs qui sont la rue de Bonnel, et la cours Lafayette au Nord, le franchissement de l'avenue Pompidou et la rue Paul Bert au Sud, ainsi que le parvis de la gare Part Dieu en partie centrale. Notre quantitatif de déblai en taupe est établi sur ces secteurs.

Nous obtenons 22% de déblais supplémentaire par rapport à la quantité annoncée par la MOE.

Le prix global des déblais réalisés en taupe est supérieur de 13% par rapport à celui d'EGIS, soit +2.2 M€.

## Béton de rechargement

En plus des remblais disposés sur la dalle de couverture de l'ouvrage cadre, un lestage du radier s'avère nécessaire pour contrebalancer les sous pressions hydrostatiques.

La notice explicative ne mentionne pas les caractéristiques de ce béton ainsi que son épaisseur.

Nous partons sur une hypothèse de 1,5m de surépaisseur de béton, type C20/25, disposé sur toute la largeur du radier, à 200€ du m<sup>3</sup> en place.

La MOE annonce un prix de 100 €/m<sup>3</sup> de béton en place, ce qui semble sous-évalué par rapport aux prix classiques de béton de remplissage obtenus sur des chantiers de tunnel (150-200 €/m<sup>3</sup>).

Le coût global de revient du béton de rechargement est 80% plus cher (soit +3.5 M€) que celui annoncé par EGIS, du fait de leur coût unitaire faible.

## Conclusion sur les coûts et quantités

Le bilan des écarts entre quantités et coûts pour chaque poste est établi dans le tableau ci-dessous :

		Quantité		Coût unitaire (€)		Total (€)				
		EGIS	SNCF	EGIS	SNCF	EGIS	SNCF			
<b>Partie d'ouvrage</b>	<b>Caractéristiques partie d'ouvrage</b>	Unité	Unité							
Parois moulées contour boîte y compris butonnage	Ep. 1,5m, hauteur 48,5m dont 15m de fiche	m3	m3	158 832	164 124	1 300	1 160	206 481 600	190 383 840	
Poteaux au droit zone de quais	Pieux diamètre 1,2m profondeur 48,5m tous les 8m	PM	ml		4 426		2 520	0	11 153 520	
Parois moulées supplémentaires	Non décrit sur note: supposées identiques aux parois périphériques	m3	m3	45 198	41 686	1 000	960	45 198 000	40 018 320	
Soutènements plateforme SNCF	Non décrit sur notice. Hypothèse: paroi berlinoise prof. 3m au droit puits Nord et Sud	m3	m2	903	393	1 300	1 275	1 173 900	501 075	
Bouchon étanche en fond de fouille	PM	m2	PM	25 175		-			0	
Excavation y compris évacuation et pompage	Terrassement entre parois moulées	m3	m3	830 775	830 775	60	60	49 846 500	49 846 500	
Structures béton armé dalles (béton, acier, coffrage)	ép. 1,5m pour dalle et 3,5m maximum pour radier (hypothèse : armé à 300kg/m3)	m3	m3	147 562	154 340	900	900	132 805 800	138 906 000	
Structures béton armé butons (béton, acier, coffrage)	Non précisé sur note. Hypothèse: 1 ligne de butons par niveau espacé tous les 5m. Section 1m <sup>2</sup>	m3	m3	10 070	13 044	900	900	9 063 000	11 739 600	
Étanchéité	Non décrit sur note. Hypothèse : Sous dalle de couverture, en radier et sur parois.	m2	m2	125 445	122 158	100	250	12 544 500	30 539 500	
Remblai	ép. 5m sur dalle de couverture sur la zone de quais et 11m en dehors	m3	m3	233 298	213 415	40	50	9 331 920	10 670 750	
Plus-value pour travaux sous dalle	PV pour travaux en taupes sous dalle de couverture (au droit zone top/down)	m3	m3	111 210	135 212	150	140	16 681 500	18 929 680	
Béton de rechargement	béton pour le lestage du radier. Hypothèse: Ép. 1.5m béton C25/30) sur toute la surface du radier	m3	m3	40 872	37 763	100	200	4 087 200	7 552 500	
								<b>TOTAL GC</b>	<b>487 213 920</b>	<b>510 241 285</b>
								avec SAV (15%)	<b>560 296 008</b>	<b>586 777 478</b>
								avec équipement (+30%)	<b>728 384 810</b>	<b>762 810 721</b>
								PR (30%)	<b>946 900 254</b>	<b>991 653 937</b>
								Ecart		4.7%
								Ratio au m3 excavé de TC	586	614
									€/m3	

L'écart global entre l'estimation faite par EGIS et notre estimation s'élève à **+5%**. Le coût global génie civil de la partie gare, y compris SAV, est 587 M€ contre 560 M€ pour EGIS.

De manière générale, nous arrivons au même ordre de grandeur de prix pour la partie gare réalisée en tranchée couverte en appliquant nos ratios et nos quantités.

Nos métrés accostent globalement bien avec les quantités présentées par EGIS.

Les écarts de coûts se jouent essentiellement sur les postes ci-dessous.

Même si le coût unitaire des parois moulées périphériques intègre le prix du butonnage provisoire, l'écart de ce coût unitaire avec celui des parois moulées supplémentaires semble légèrement surévalué. Il serait intéressant que la MOE justifie cet écart entre ces deux coûts unitaires.

Concernant le béton de remplissage pour assurer le lestage du radier, la MOE annonce un prix de 100 €/m<sup>3</sup> de béton en place, ce qui semble sous-évalué par rapport aux prix classiques de béton de remplissage obtenus sur des chantiers de tunnel (150-200 €/m<sup>3</sup>).

La MOE devra préciser le dispositif d'étanchéité prévu dans leur dossier afin de vérifier si toutes les contraintes réglementaires et fonctionnelles de la gare sont bien assimilées.

En considérant une étanchéité par membrane type DEG, l'écart entre notre estimation et celle d'EGIS est important (+18 M€).

Dans un contexte hydrogéologique aussi sensible que celui de la nouvelle gare Part Dieu, ce poste d'étanchéité ne doit pas être sous-estimé. La gare est un établissement destiné à recevoir du public et le moindre ruissellement ne pourra être toléré.

La MOE ne semble pas avoir intégré ces contraintes dans leur estimation. D'après leur coût unitaire (100 €/m<sup>2</sup>), leur étanchéité consisterait en une simple imperméabilisation du parement des parois moulées. Ce procédé n'est pas suffisant, notamment au droit des joints entre panneaux des parois moulées où le moindre défaut d'étanchéité entraînera de forte pression sur le procédé d'imperméabilisation, qui n'a pas vocation à résister aux efforts.

## Coût reconnaissances géotechniques pour phases ultérieures

La note établie par la MOE ne précise pas la consistance des investigations géotechniques à prévoir dans le cadre des études à venir pour la conception des ouvrages linéaires (tunnels) et autres (gare en TC, ouvrage de tête...).

Nous rappelons, comme pour notre première expertise de fin 2014, que l'enveloppe annoncée par EGIS, dans le cadre des variantes souterraines, pour provisionner les reconnaissances géotechniques des phases ultérieures nous paraissait très en-deçà du besoin réel en données géotechniques pour un projet aussi complexe (seulement 500k€).

Par exemple, il est seulement provisionné deux sondages carottés pour les reconnaissances en zone de gare Part Dieu.

Pour la variante en TC, cette enveloppe reste toujours très insuffisante.

Pour donner un ordre de grandeur, il faudrait une enveloppe de l'ordre de 10 à 40 M€ pour les reconnaissances géotechniques de l'ensemble du projet pour toutes les phases d'étude (gare, tunnel et ouvrages connexes). Cette enveloppe reste toutefois une estimation basse au regard de la longueur des ouvrages souterrains et des aléas encore existants à cette phase d'étude (variabilité de perméabilité des molasses, niveau de l'interface alluvion/molasse incertain dans certaine zone...).



## 2. ANALYSE DE LA PRI

### ANALYSE CRITIQUE DE LA PRI PROPOSEE PAR EGIS

Comme pour l'analyse des risques menées sur les différentes variantes souterraines du scénario B, l'analyse de risques effectuée par la MOE EGIS dans le cas de la variante « gare en Tranchée couverte » ne présente pas de valorisation des risques en terme de vraisemblance d'apparition et de conséquence au regard des objectifs, notamment l'objectif coût, qui intéresse directement la provision pour risques.

Cette approche empirique, à l'aide de ratios globaux, mérite donc d'être comparée à une analyse de risque plus détaillée.

### METHODOLOGIES ADOPTEES POUR EVALUATION DE LA PRI

Nous proposons la méthodologie suivante pour juger de la pertinence des ratios pris par EGIS en termes de provisions pour risques. Notons que la provision pour risques calculée ne concerne que les risques techniques. À cette provision, doit être ajoutée la provision pour les risques non techniques (fonciers...).

Puisque les ouvrages « gare souterraine » et « tunnels » représentent deux types d'ouvrage totalement différents de par leur méthode constructive, l'analyse de risques et l'estimation de la provision sont réalisées indépendamment pour la gare et le tunnel.

**L'analyse des risques menée sur la partie tunnel pour la variante bitube côté Vilette reste inchangée** par rapport à l'analyse présentée en annexe de notre premier livrable de fin 2014.

A ce stade très amont des études du projet NFL où la connaissance géotechnique est essentiellement bibliographique (données BRGM), la présente analyse consiste à identifier les principaux écarts prévisibles, mais non certains, entre le modèle et les conditions susceptibles d'être rencontrées pendant l'exécution des travaux.

L'analyse des risques techniques est menée en utilisant la méthode recommandée par le GT32-2 de l'AFTES (Tunnels et Espace Souterrain n°232 – Juillet/Août 2012) ainsi que le « Manuel de maîtrise des risques » de RFF. L'analyse de risques reprend la terminologie définie au niveau international par les normes ISO 31000 et ISO Guide 73.

Les sources de risque conduisent à un **événement** dont les conséquences néfastes pour le projet sont identifiées par le géologue-géotechnicien en fonction du contexte dans lequel s'inscrit l'ouvrage souterrain.

Pour chaque événement, sa **vraisemblance** d'apparition lors du creusement de l'ouvrage est estimée. Cette probabilité varie entre 1 (Improbable), 2 (très peu probable), 3 (peu probable) et 4 (possible).

Les **conséquences** de l'apparition de cet événement sont données à travers un critère de « conséquences » qui s'échelonne entre 1 (faibles), 2 (moyennes), 3 (fortes) et 4 (très fortes). Ces conséquences dépendent des objectifs principaux du projet à savoir le respect du délai, le coût, la sécurité et l'environnement. Pour estimer la provision financière pour chaque risque, les objectifs visés sont le coût ou le délai de réalisation qui impactent directement l'enveloppe financière globale du projet.

En combinant la vraisemblance et les conséquences d'un événement, la **matrice des risques** s'établit comme suit :

MATRICE DES RISQUES		VRAISEMBLANCE			
		Improbable 1	Très peu probable 2	Peu probable 3	Possible 4
CONSEQUENCES	Faibles 1	1	2	3	4
	Moyennes 2	2	4	6	8
	Fortes 3	3	6	9	12
	Très fortes 4	4	8	12	16

**Matrice des risques issue du GT AFTES n°32-2**

Le **niveau de risque**, obtenu en effectuant le produit de la vraisemblance et de la conséquence, s'échelonne de 1 à 16 et permet d'apprécier les actions de traitements à mettre en œuvre.

## APPLICATION AUX OUVRAGES SOUTERRAINS DU PROJET NFL

Les principales sources de risques géotechniques et événements associés identifiés sur le projet NFL concernent :

- Tassement excessif sous les installations ferroviaires
- Tassement excessif avec dommage sur ouvrages, bâtis voisins ou routes
- Déviation anormale et difficulté dans la réalisation des parois moulées de fortes profondeurs
- Instabilité du front de taille par défaut du maintien de la pression de confinement du tunnelier
- Blocage de la roue de coupe du tunnelier
- Très fortes arrivées d'eau, ralentissant l'avancement du tunnelier et pouvant créer des phénomènes de Renard en base de l'ouvrage cadre de la gare
- Effet barrage créé par les tunnels et la gare sur la nappe des alluvions, pouvant entraîner des avaries au droit des fondations des bâtis de surface
- Découverte de fondations imprévues au moment du terrassement
- Présence de terre polluée, susceptible d'augmenter considérablement le coût de terrassement et de traitement de ces terrains
- Interface entre les travaux de la gare en tranchée couverte et la gare Part Dieu exploitée, pouvant fortement ralentir les travaux
- Mouvements de camions plus importants que prévus, nuisances excessives liées à la logistique chantier.

À ce stade très amont des études, la méthode constructive n'étant pas figée définitivement, notre analyse repose sur une dizaine de risques techniques principaux que nous considérons représentatifs du contexte géotechnique, hydrogéologique et environnemental du projet.

Deux approches complémentaires sont proposées pour évaluer la provision pour risques.

## Approche par calcul du niveau de risque global

Un **niveau de risque global** est indiqué pour chaque nature d'ouvrage (gare/tunnel) de chaque variante. Ce niveau de risque global est calculé en faisant la somme des niveaux de risque (NR) des événements indépendants identifiés.

Ce niveau de risque global par nature d'ouvrage n'a qu'une valeur indicative puisqu'il constitue l'agrégation d'évènements de natures différentes qui ne se réaliseront vraisemblablement pas tous au moment de la construction.

A ce stade très amont des études, où la connaissance du contexte géotechnique reste très sommaire et où le modèle initial mérite d'être fiabilisé par des reconnaissances complémentaires, ce niveau de risque global sert essentiellement à donner une indication sur l'importance relative des provisions (PRI) à prévoir.

Cette approche du niveau de risque global permet également de comparer de manière relative les provisions pour risques entre chaque variante.

Cette approche par calcul du niveau de risque global ne permet pas de comparer la variante de gare réalisée en TC avec les autres variantes réalisées en souterrain. En effet, le champ d'application est complètement différent (méthode de réalisation, environnement) ; cela se traduit par des risques nouveaux pour la variante en TC. Pour cette raison, le niveau de risque global obtenu n'est pas indiqué dans le tableau bilan et la comparaison entre la variante TC et la variante souterraine n'est réalisée qu'à partir de la valorisation de chaque risque.

Cette méthode explicitée ci-dessous permet de quantifier de manière absolue la provision pour risques de chaque variante.

## Approche par valorisation de chaque risque

La valorisation de chacun des risques identifiés repose sur son impact en terme de dépassement de l'estimation du coût technique de la nature d'ouvrage considérée (gare/tunnel).

L'estimation de l'enveloppe à provisionner pour chaque risque est ensuite donnée en appliquant à cet impact, sa probabilité d'apparition.

La PRI globale est ensuite obtenue en faisant la somme des valorisations de chaque risque.

Nous rappelons que les provisions estimées ne couvrent que les risques techniques liées à des causes géotechniques, hydrogéologiques ainsi qu'à des causes environnementales (riverains...). À cette provision doit être ajoutée la provision couvrant les risques non techniques tels que les risques d'ordre foncier ou d'ordre contractuel.

Le tableau ci-dessous définit la correspondance entre la vraisemblance d'apparition d'un risque (de 1 à 4) et le pourcentage retenu pour le calcul de la provision de ce risque.

Note matrice risques	pour des	Echelle des vraisemblances	Valeur retenue pour provision probabilité d'apparition	= Seuil de vraisemblance
4		Possible	30%	Événement envisageable
3		Peu probable	20%	Événement pouvant survenir dans les conditions de réalisation prévues
2		Très probable peu	10%	Événement identifié comme du domaine du possible
1		Improbable	5%	Requiert une combinaison de situations exceptionnelles ou un événement ayant été exclus de l'analyse des reconnaissances

**Tableau des vraisemblances**

Le tableau ci-dessous définit la correspondance entre la conséquence d'un risque (de 1 à 4) et sa valorisation en termes de pourcentage de dépassement du coût technique.

Note pour matrice des risques	Echelle des conséquences	Objectifs du projet			
		Délai, exprimé en dépassement (1)	Coût, exprimé en dépassement (2)	Sécurité chantier et matériel roulant	Environnement (stabilité tunnel, maison, habitants)
4	Très fortes		$C > 20\%$ (30%)		
3	Fortes		$10\% < C < 20\%$		
2	Moyennes		$5\% < C < 10\%$		
1	Faibles		$C < 5\%$		

(2) Dépassement en % par rapport au coût technique de la nature d'ouvrage considéré

### Tableau des conséquences

## CONCLUSIONS

La détermination des risques, de leurs impacts, de leurs vraisemblances, de leurs conséquences et des niveaux de risques associés sont détaillées dans le tableau d'analyse de risques joint ci-après. Le second tableau fait état du bilan des PRI associées à chaque variante.

L'analyse de risques pour les variantes de gare souterraine réalisés en méthode conventionnelle reste inchangée par rapport à l'étude menée en fin d'année 2014.

À ce stade très amont des études, et contrairement à la solution de la gare réalisée en souterrain, nous proposons de prendre pour la gare la valeur haute de la PR calculée dans le tableau ci-après, comme pour les tunnels.

En effet, le coût de construction comparativement plus modeste de la gare nécessite de prendre la provision haute pour provisionner l'apparition d'un risque à impact fort (dépassement de 10 à 20% du coût technique).

**Analyse Provision pour risques variante gare en tranchée couverte - Villette**

Catégorie	Identification du risque	Impact sur objectifs	Ouvrage concerné	Analyse de risques selon GT32						Argumentaire	Provision basse du risque = vraisemblance * impact sur coût	Provision haute pour ce risque = vraisemblance * impact sur coût
				Vraisemblance	Vraisemblance	Conséquence	Impact	Impact	Niveau de risque			
GÉOTECHNIQUE	Tassement excessif sous les installations ferroviaires	Perturbations sur l'exploitation ferroviaire	Tunnel	1	5%	3	10%	20%	3	Vraisemblance plus importante pour variante sous voie ferrée et pour solution monotube ou l'ouverture est plus grande et conduit à une cuvette de tassement plus forte	0.5%	1.0%
			Gare	1	5%	2	5%	10%	2	Conséquence moyenne sur ligne ferroviaire surexploitée avec des tassements moindres par rapport à la gare souterraine sans tranchée. Les parois moulées limitent en grande partie le phénomène de cuvette de tassement. Vraisemblance faible, soutènement de la plateforme SNCF prévu au droit des ouvrages proches des voies exploitées	0.3%	0.5%
	Tassement excessif sous les ouvrages, bâtis voisins ou routes	Dommages sur les bâtis / perturbation sur le trafic routier dense	Tunnel	2	10%	3	10%	20%	6	Influence uniquement sur bâtiment ou sur route au droit des émergences. Influence quasi-nulle du tunnel sur les ouvrages de part leur profondeur.	1.0%	2.0%
			Gare	1	5%	2	5%	10%	2	Vraisemblance faible sur gare Part Dieu puisque ouvrage décalé Conséquence moyenne sur bâtis voisins avec des tassements moindres par rapport à la gare souterraine sans tranchée. Les parois moulées limitent en grande partie la propagation de la cuvette de tassement.	0.3%	0.5%
	Cadence de terrassement / réalisation dalle de couverture trop faible	Perturbation trafic routier / Immobilisation prolongée des routes	Gare	1	5%	2	5%	10%	2	Vraisemblance faible: dans les alluvions, peu de formations indurées pouvant ralentir les cadences. Conséquence faible sur route avec une réalisation en top & down. L'immobilisation des routes sera faible puisqu'il suffit de réaliser la première dalle de couverture pour libérer l'emprise en surface.	0.3%	0.5%
	Déviations anormales/Difficulté réalisation parois moulées (grande profondeur, présence de niveaux indurés dans les molasses)	Retard de chantier / reprise des joints et étanchéité	Gare	2	10%	2	5%	10%	4	Vraisemblance moyenne pour une profondeur de parois de 40m environ dans des matériaux potentiellement hétérogène. Technique maîtrisée par de nombreuses entreprises. Conséquence moyenne nécessitant la reprise des joints d'étanchéité entre parois (travaux d'injection et de reprise de joints...)	0.5%	1.0%
Instabilité du front de taille par défaut du maintien de la pression de confinement	Ralentissement des cadences d'avancement du tunnelier	Tunnel	1	5%	3	10%	20%	3	Vraisemblance improbable car creusement majoritairement dans les molasses Conséquence importante pouvant aboutir à un arrêt de chantier de plusieurs mois et impact sur bâtis en surface.	0.5%	1.0%	
Blocage de la roue de coupe du tunnelier par présence de poche argileuse dans molasses	Arrêt de chantier / immobilisation du matériel	Tunnel	2	10%	4	20%	30%	8	Peu probable au regard des résultats des reconnaissances et de la nature des molasses. Impact critique avec arrêt de chantier pendant des mois.	2.0%	3.0%	
HYDROGÉOLOGIE	Fortes arrivées d'eau ponctuelles	Front instable par phénomène de boulangerie des matériaux / adaptation méthode et traitement terrain à l'avancement	Tunnel	2	10%	2	5%	10%	4	Au tunnelier confiné, le risque d'instabilité du front est très faible. La pression de confinement (1-2MPa voire plus) garantit une bonne stabilité du front. En cas de présence d'eau, le confinement par pression de boue permet de diminuer le risque.	0.5%	1.0%
			Gare	1	5%	3	10%	20%	3	Méthode parois moulées adaptées dans milieu sous nappe. La réalisation de la gare en TC se fait par section séparée, avec pompage des eaux. Risque de phénomène de Renard en base des parois moulées pouvant générer des défauts de butée. Vraisemblance faible avec parois fondées dans molasse peu perméable et présentant une certaine cohésion. Impact fort (ralentissement du chantier, injection en arrière des parois...)	0.5%	1.0%
	Effet barrage des ouvrages sur la nappe - remontée excessive du niveau de la nappe	Dommage sur ouvrage environnants (inondations, tassement)	Tunnel	2	10%	2	5%	10%	4	En dehors des tranchées couvertes ou des puits d'accès, le tunnel impacte peu la nappe de part sa faible hauteur. Au droit des tranchées couvertes aux extrémités du projet, le risque de remontée de la nappe est plus fort.	0.5%	1.0%
Ouvrages et bâtis voisins	Découverte de fondations imprévues au moment du terrassement	Ralentissement du chantier et reprise en sous-œuvre des fondations des bâtis voisins	Tunnel	2	10%	3	10%	20%	6	La profondeur et les dimensions des tunnels ainsi que l'absence ou le peu d'émergence en surface pour la partie tunnels limite le risque de rencontre de fondations existantes.	1.0%	2.0%
			Gare	2	10%	3	10%	20%	6	Vraisemblance plus importante en méthode TC puisque cette méthode intéresse les niveaux plus superficiels, donc plus de probabilité de rencontrer des tirants. Au droit de la gare, peu de bâtiments et parkings Conséquence importante nécessitant la reprise des fondations des bâtis existants (retard chantier, reprise en sous-œuvre...)	1.0%	2.0%
Avoisinant et environnement	Présence de terre polluée dans le périmètre de la gare réalisée en TC	Augmentation des coûts de déblai, retard de chantier	Gare	2	10%	2	5%	10%	4	Vraisemblance moyenne (possibilité de vestige d'ancienne station essence dans le périmètre) Conséquence moyenne (prix de déblai multiplié par 2 ou 3 par rapport à déblai non pollué)	0.5%	1.0%
	Contraintes d'exploitation imposées par la gare existante	Retard de chantier, ralentissement des cadences	Gare	2	10%	4	20%	30%	8	Ce risque n'existe pas dans le cas d'une réalisation de gare souterraine. Conséquence très forte puisque tout le phasage du chantier pourrait être remis en cause.	2.0%	3.0%
	Rotations de camions excessifs, nuisance sonore excessive	Ralentissement des cadences, logistique perturbée par adaptation de la méthode	Tunnel	2	10%	2	5%	10%	4	Peu d'émergence en surface donc moins de nuisances vis-à-vis des riverains. Seulement deux attaques pour la réalisation des tunnels. L'évacuation des déblais est donc plus maîtrisée.	0.5%	1.0%
			Gare	4	30%	2	5%	10%	8	Vraisemblance plus importante en gare du fait des nombreuses émergences en surface (puits de chantier et accès voyageurs). L'évacuation des déblais nécessitera de nombreux mouvements journaliers de camions.	1.5%	3.0%

**NR global**

**PRI basse**

**PRI haute**

TITRE : INGÉNIERIE & PROJETS – EXPERTISE COUT NFL VARIANTE GARE

DATE : 21/08/2015

DIFFUSION LIMITEE

NR global gare **43**  
NR global tunnel **38**

**Gare**

**Tunnel**

**7.4%**

**6.5%**

**14.0%**

**12.0%**



## BILAN

		Bitube				Monotube		
		Sous voie ferrée	Diagonale	Villette	Villette TC	Sous voie ferrée	Diagonale	Villette
Approche SNCF	PRI technique gare	22.0%	18.0%	14.0%	14.0%	26.0%	23.0%	16.0%
	PRI technique tunnel	13.0%	12.0%	12.0%	12.0%	18.0%	15.0%	15.0%
	NR global gare	63	56	45		70	65	51
	NR global Tunnel	41	38	38		51	45	45
EGIS	PRI globale gare*	30	25	20	20	30	25	20
	PRI globale tunnel*	20						

\* y.c. PRI non technique

Nous rappelons que les provisions calculées sont basées uniquement sur les risques d'ordre technique. À ces provisions doivent être ajoutées les provisions pour les risques non techniques (fonciers, administratives...).

L'analyse de risques montre que la provision pour risque pour la partie gare reste inchangée entre la variante bitube de la gare réalisée en souterrain côté Villette et la variante de gare réalisée en TC, soit 14% de l'estimation brute.

**La variante de position de gare sous Villette en solution bitube est la variante à niveau de risques le plus faible.** Cette variante présente l'intérêt de ne pas ou peu impacter la gare Part Dieu en terme de tassement. Les accès chantier se trouvent également facilités pour cette variante où l'environnement est moins dense en surface.

Lors de l'analyse faite en fin d'année 2014, nous avons proposé de comparer les PRI en % de l'estimation brute entre les différentes variantes. Cela était probant puisque les coûts entre les différentes variantes variaient très peu.

En revanche, dans le cas de la variante de gare réalisée en TC, le coût de construction de la part génie civil de la gare est environ deux fois plus faible que le coût de la gare réalisée en souterrain.

Par conséquent, même si les % de PRI sont identiques entre la gare souterraine et la gare en TC, la provision est moindre dans le cas de la gare réalisée en TC. Cette méthode apporte donc moins de risques par rapport à la réalisation d'une gare entièrement souterraine aux dimensions hors normes dans un contexte urbain très sensible.

Les techniques de construction (parois moulées, méthode top and down...) sont mieux maîtrisées et permettent de limiter les impacts sur les ouvrages de surface (gare Part Dieu, voies ferroviaires et bâtis).

### 3. ANALYSE DE LA SAV

La Somme à Valoir est destinée à couvrir :

- les imprécisions sur les quantités (longueur de l'ouvrage, longueur d'application des soutènements, longueur des parties en tranchées couvertes, ...),
- les imprécisions sur les coûts unitaires linéiques des ouvrages amenés à évoluer et liées aux aménagements complémentaires avérés nécessaires dans les phases ultérieures.

La MOE EGIS propose des taux de Somme à Valoir identiques pour la gare et les tunnels par rapport à la solution de gare réalisée en méthode entièrement souterraine :

- 15% pour la gare souterraine
- 10% pour les tunnels

Même si ces taux semblent cohérents d'après nos retours d'expérience sur des projets d'envergure similaire (LN PCA, LNMP), il semble plus judicieux de prévoir une enveloppe plus importante dans le cas de la réalisation d'une gare réalisée par la méthode de tranchée couverte.

En effet, la gare, réalisée en tranchée couverte et située dans un environnement complexe, est sujette à la présence de la gare Part Dieu, des routes, des parkings souterrains et des fondations des bâtis en surface. Le tracé définitif ainsi que la définition technique de la méthode de conception de la gare dépendent fortement de l'exactitude de ces données. S'agissant d'un projet à l'horizon 2030, les bâtis de surface et les parkings souterrains sont susceptibles d'évoluer, notamment aux alentours de la gare Part Dieu avec le projet de PEM.

Pour la gare réalisée en tranchée couverte, les quantités de chaque poste (déblais, parois moulées, béton des dalles, ...) ainsi que les ratios adoptés pour cette phase très amont sont donc susceptibles de varier sensiblement.

Dans le cadre d'une gare réalisée en tranchée couverte, les imprécisions sur les quantités et coûts de construction sont plus importantes que dans le cas d'une gare réalisée entièrement en souterrain. Les évolutions des implantations des bâtis en surface et des parkings souterrains impactent directement le tracé de la gare réalisée depuis la surface.

**À ce stade très amont des études, nous proposons donc d'augmenter la SAV de 2 points par rapport à la solution de gare souterraine, soit une SAV pour la gare de 17%.**

Cette SAV élevée a évidemment vocation à diminuer aux stades d'étude ultérieurs.

La partie « tunnels » se situe exclusivement en souterrain puisqu'en solution bitube, l'évacuation des usagers en cas d'incendie dans un tube se fait à travers l'autre tube grâce à des rameaux de connexion. Il n'y a donc aucune émergence en surface. Les imprécisions sur les quantités sont par conséquent plus faibles. La méthode de réalisation des tunnels par tunnelier est une technique maîtrisée dans un environnement géologique de type alluvions et molasse. Les coûts linéiques de construction sont moins sujets à évoluer lors des phases ultérieures.

## 4. ANALYSE DU TAUX DE MOE

Le dossier présenté par EGIS sur la variante de gare en TC n'évoque pas le calcul du taux de MOE.

Notre calcul du taux de MOE pour la globalité du projet est basé sur les principes de la loi MOP. Le forfait de MOE est fonction de l'étendue de la mission (nombre et volume des ouvrages, nombre de variantes...), du degré de complexité (type et technicité des ouvrages, contraintes environnementales, géotechnique...) et du coût prévisionnel des travaux.

Ce taux de MOE est égal au produit du taux de référence donné par des tables par un coefficient de complexité :

$$Q = C_{comp} * p_0$$

D'après les courbes de tendance fournie dans la loi MOP, le taux de référence pour une enveloppe travaux de 600 millions d'€ (enveloppe du coût technique de la gare en méthode tranchée couverte) s'élève à 7,2% environ. Pour les ouvrages de type tunnels, le taux de référence est estimé à 7% pour une enveloppe de 1 milliard d'€.

Le degré de complexité est lié aux contraintes physiques du projet ainsi qu'à son insertion environnementale, à la nature du programme, aux spécificités du projet ainsi qu'aux exigences contractuelles.

Dans le cas du projet NFL et de la variante souterraine, il paraît indispensable de dissocier les ouvrages linéaires courants tels que les tunnels et ouvrages connexes (puits, rameaux...) des ouvrages spéciaux comme la gare souterraine.

En effet, la réalisation de la gare souterraine nécessite une expertise plus poussée que les tunnels en raison :

- Du contexte environnemental très sensible de la gare avec la proximité immédiate de la gare Part Dieu en surface ainsi que des voies SNCF exploitées, des parkings souterrains et des fondations d'immeubles de grande hauteur.
- des dimensions hors normes de la gare souterraine réalisée en ouvrage cadre (longueur de 940m, largeur de 22 à 38m, 33m de profondeur) imposant des dispositions constructives adaptées pour limiter les tassements en surface et les déformations des parois moulées. Leurs grandes profondeurs et portées imposent une maîtrise parfaite de la conception de l'ouvrage cadre (appui intermédiaire, système de butonnage, maîtrise de la déviation des parois...)
- De la réalisation d'un ouvrage cadre en partie sous nappe nécessitant de prévoir des dispositions constructives limitant l'effet barrage de l'ouvrage sur l'écoulement des eaux (réalisation de fenêtre dans l'ouvrage cadre, lestage de l'ouvrage pour lutter contre la poussée d'Archimède, ...). Ces techniques augmentent considérablement la mission d'expertise de la MOE (multiples notes de calcul, expertise technique).

Ces diverses contraintes augmentent le taux de maîtrise d'œuvre par rapport au taux de MOE pour la partie tunnel.

Pour des études d'ouvrages souterrains, le coefficient de complexité varie entre 0,8 pour des ouvrages classiques et 1,4 pour des ouvrages complexes.

Nous proposons donc un coefficient de 0,8 pour les tunnels et ouvrages connexes et un coefficient de 1,4 pour la gare réalisée en TC. Ce coefficient de 1,4 est identique au coefficient adopté pour la gare réalisée en méthode conventionnelle souterraine. Bien que la méthode de conception « à ciel ouvert » soit plus classique que la méthode entièrement souterraine, le contexte environnemental



très sensible ainsi que les fortes dimensions de l'ouvrage nécessitent une bonne expertise de la part de la MOE et justifient un coefficient de complexité identique.

Ces coefficients de complexité nous conduisent aux taux suivants :

- **Taux MOE tunnels = 6%**
- **Taux MOE gare = 10%**

# CONTRIBUTEURS

AUTEUR	PRÉNOM NOM
<b>Auteur</b>	Sylvain Lassalle – IP OA TuG
<b>Vérificateur et approbateur</b>	Yves Chamerois – IP OA TuG
<b>Destinataires</b>	Yves Simond – chef de projet Nœud Ferroviaire - SNCF Réseau

# DOCUMENTS JOINTS

DOCUMENT	DESCRIPTION