



Ingénieurs Conseils
Ingenieur & Berater
Consulting Engineers

RFF Direction Régionale Ile de France

Extension du RER E à l'Ouest

Prestation Préalable au Débat Public

Analyse comparative Monotube-Bitube

RFF Direction Régionale Ile de France

Extension du RER E à l'Ouest

Prestation Préalable au Débat Public

Analyse comparative Monotube-Bitube

Version	-	a	b
Document	7153.02-RN-0066		
Date	6 septembre 2010		
Elaboration	M. Chapeland S. Minon		
Visa	M. Russo		
Collaboration			
Distribution	RFF		

© BG



Extension EOLE à l'Ouest - Analyse comparative Monotube-Bitube

Table des matières	Page
Introduction	1
1. Référentiel sécurité	2
1.1 Cadre normatif	2
1.2 Besoins réglementaires en matière d'accès des secours et sortie voyageurs	2
1.3 Besoins réglementaires en matière de ventilation	2
2. Contraintes géométriques et d'emprises disponibles	3
2.1 Profil en travers type	3
2.2 Occupation d'emprises et géométrie des ouvrages	3
2.3 Tracé et rayons de courbure	4
3. Estimation des influences liées au choix d'une solution	6
3.1 Tassement	6
3.2 Ouvrages annexes et équipements	9
3.3 Chantier	9
3.4 Procédures de sécurité et accidents	10
3.5 Exploitation courante, dégradée et maintenance et fonctionnalités assurées	10
3.6 Gestion des urgences et accidents	11
4. Conformité aux réglementations en vigueur (construction et exploitation)	11
5. Possibilités d'évacuation et d'intervention en cas d'incendie	12
6. Coûts paramétriques du GC par rapport à la configuration choisie	12
6.1 Ouvrages au tunnelier – Hypothèses et bases de coûts	13
6.2 Inter-tube	14
6.3 Gare	15
6.4 Ouvrages annexes	15
6.5 Chiffrage des différentes configurations	15
7. Effets sur les délais de construction	16
8. Benchmark de l'existant (repris et complété à partir de notre dossier précédent)	18
9. Conclusions	20



Extension EOLE à l'Ouest - Analyse comparative Monotube-Bitube

Annexes

1. Exemple d'annexe / Beilagenbeispiel Numéro/Nummer

Introduction

Concernant le projet d'extension du RER E à l'Ouest la possibilité de réalisation de l'infrastructure selon deux configurations, monotube et bitube, a été évoquée dans les études préliminaires. En phase travaux, ainsi qu'en phase d'exploitation, ce choix aurait des répercussions importantes, compte tenu de ses implications.

Dans ce rapport les deux configurations sont décrites et une analyse des avantages-inconvénients par rapport à coûts, construction et exploitation est proposée. Cette analyse sera conduite à travers l'étude des points suivants :

- Contraintes géométriques et d'emprises disponibles
- Estimation des influences (tassements, chantiers, ...) liées au choix d'une solution
- Contraintes d'exploitation en situation normale et en situation d'incident / incendie ;
- Conformité aux réglementations en vigueur (construction et exploitation);
- Possibilités d'évacuation et d'intervention en cas d'incendie ;
- Coûts paramétriques du GC ;
- Effets sur les délais de construction.
- Benchmark de l'existant (repris et complété à partir de notre dossier précédent)

En ce qui possible, les analyses proposées sont réalisés sur la base des tracés "Porte Maillot", "Ternes" et "Porte de Clichy".



Figure 1: Tracés prolongement (d'après rapport tracé et Gares - Systra)

1. Référentiel sécurité

1.1 Cadre normatif

Le RER E fait partie du réseau Ferré National RFN et, à ce titre, entre dans le cadre normatif suivant:

- Décision de la Commission du 20 décembre 2007 – Spécification Technique d'Interopérabilité - STI - 2008/163/CE;
- Instruction Technique Interministérielle ITI 98 300;

Toutefois l'Arrêté du 22 Novembre 2005 relatif à la sécurité des tunnels des systèmes de transports guidés publics (STGP) urbains fixe parfois des exigences plus contraignantes, notamment en matière de ventilation et d'espacement des émergences le long du tracé dans un système métro, et, bien que non applicable, nous l'avons pris également en compte dans les considérations exposées dans la suite.

1.2 Besoins réglementaires en matière d'accès des secours et sortie voyageurs

Le cadre normatif définit les exigences suivantes en matière d'accès des secours et de sortie des voyageurs :

- L'IT98-300 spécifie la nécessité de prévoir le passage d'un tube à l'autre aux têtes de tunnel en cas de tunnel bitube;
- Pour les lignes urbaines, l'IT demande des dispositifs d'accès des secours vers la surface inter-distant de 800 m au maximum; Ces dispositifs devant avoir une largeur de 2 unités de passage (1.40m) et une hauteur minimale de 2.2 m ;
- La STI impose des issues secours latérales et/ou verticales vers la surface prévues au moins tous les 1 000 m avec une largeur minimale de 1.5 m pour une hauteur de 2.25 m
- Dans le cas particulier d'un tunnel bitube, la STI donne des exigences sur les galeries de communication inter-tubes permettant d'utiliser le tunnel adjacent comme refuge. Il doit être prévu un inter-tube tous les 500 m au maximum. Ces inter-tubes doivent respecter un gabarit de passage de 2.55 x 1.50 m (H x L)
- La STI définit également le gabarit des cheminements d'évacuation: largeur minimale de 0.75m pour une hauteur libre d'au moins 2.25 m

Commentaire [Mino1] : minimale

Commentaire [Mino2] : mètre ?

1.3 Besoins réglementaires en matière de ventilation

- L'arrêté du 22.11.2005 prescrit une ventilation (tout comme l'IT 98-300 en cas de ligne voyageurs urbaine) avec une distance maximale parcourue par les fumées de 1600 m.
- La STI ne donne pas d'indications sur la nécessité ou non d'un équipement de ventilation.

	Configuration monotube			Configuration bitube		
	Emprises sous domaine privé (m²)			Emprises sous domaine privé (m²)		
	CNIT par Diderot	Bd circulaire	Gambetta	CNIT par Diderot	Bd circulaire	Gambetta
Tracé Porte Maillot	45 000	45 000	40 000	125 000	125 000	115 000
Tracé Ternes	25 000	25 000	15 000	80 000	80 000	70 000
Tracé Porte de Clichy	70 400	78 650	70 400	202 400	224 150	202 400

	% du tracé sous domaine public			% du tracé sous domaine public		
	CNIT par Diderot	Bd circulaire	Gambetta	CNIT par Diderot	Bd circulaire	Gambetta
	Tracé Porte Maillot	48%	47%	56%	48%	49%
Tracé Ternes	72%	71%	82%	66%	67%	72%
Tracé Porte de Clichy	31%	22%	32%	31%	22%	32%

La configuration monotube apporte l'avantage de réduire les emprises à acquérir. Le tracé Ternes permet de caler le tracé de l'ouvrage au maximum sous le domaine public et donc de limiter les acquisitions de tréfonds. Avec une configuration monotube, le tracé "ternes" dans son option Gambetta reste sur plus de 80% de son emprise, sur le domaine public.

Aussi le choix d'une configuration bitube entrainerait la nécessité de prévoir des géométries de station différentes pour accueillir les deux tubes aux extrémités ce qui peut s'avérer assez contraignant dans le cas de la gare prévue à La Défense. Les géométries définitives de ces ouvrages n'ont toutefois pas été étudiées ici.

2.3 Tracé et rayons de courbure

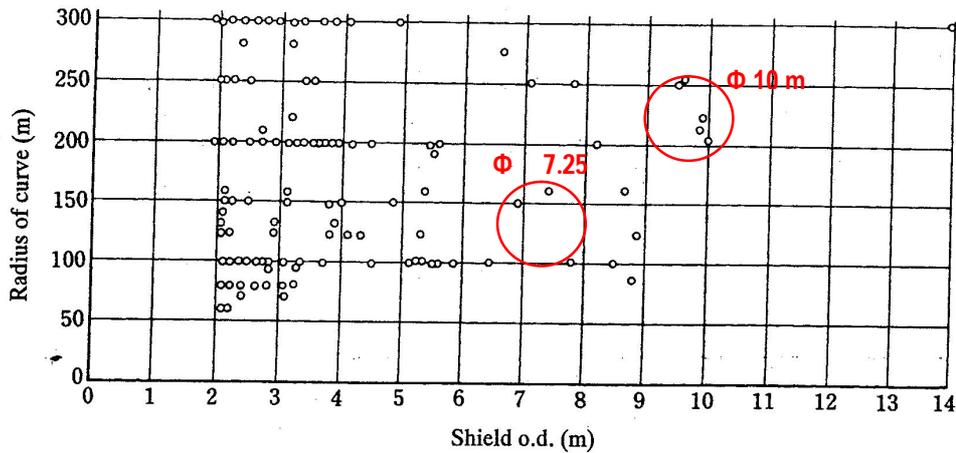
Les tracés d'axe proposés dans l'étude Systra 2010 ne prennent pas en compte la configuration bitube, écartée sur la base d'une analyse multicritère.

Les tracés conduisent aux rayons de courbure suivants:

	Tracé		
	Par Porte de Clichy	Par Av. des Ternes	Par Porte Maillot
Station intermédiaire	Porte de Clichy	Aucune	Porte Maillot
Longueur du tracé (variante base CNIT dans la défense)	9.4 km	7.9 km Option Diderot	8.0 km Option Diderot
Longueur du tracé (variante Bd.Circulaire dans la défense)	9.3 km	7.8 km Option Diderot	7.2 km Option Diderot
Longueur du tracé (variante Av. Gambetta dans la défense)	9.4 km	8.2 km	8.8 km
Distance en ligne droite	6989 m	6260 m	5566 m
Distance en courbe	2411 m	1521 m	2318 m
Rayon de courbure minimum (hors secteur la Défense)	380 m	600 m	
Rayon de courbure minimum (dans la Défense)	200 m	200 m	

On attire ici l'attention sur le fait que dans l'étude Systra 2010 uniquement l'axe du tracé en configuration monotube est matérialisé dans les plans. En configuration monotube cet axe correspond à l'axe du tunnel. En configuration bitube, compte tenu des rayons de courbure assez réduits, il pourrait être nécessaire de faire une révision de détail dans le secteur de La Défense car une simple translation d'axe pourrait comporter des rayons minimaux trop réduits et incompatibles avec les vitesses d'exploitation recherchées.

Pour ce qui est de la réalisation, dans le cas d'un creusement par méthode traditionnelle, ces rayons de courbure ne sont pas une contrainte. Cela peut s'avérer moins vrai dans le cas d'un creusement au tunnelier. Les tunneliers actuels permettent de creuser sous des rayons de l'ordre de 200-250m pour un DN10m, jusqu'à 150m pour un DN7.25m. Ces rayons de courbure vont également conditionner le mode de marouflage. (La plage d'utilisation d'une bande transporteuse débute avec des rayons de courbure proches de 250 m).



Note: Both completed projects and projects being planned are included. Only those projects that did not, or will not use auxiliary measures and the articulation device are counted. "Shield o.d. 8 to 10m" includes railroad projects being planned. "Nine meters and above" has few performance data, and the radius of curve mentioned is for the railroad purpose. This radius of curve was determined by considering the purpose of use.

Figure 3 - Rayon de courbe en fonction du diamètre du tunnelier (Japanese standard for shield tunnelling 1996)

Globalement les rayons projetés sont réalisables bien que à la limite de la technique d'utilisation des tunneliers et avec des dispositions constructives particulières (surcoupe, tunnelier à double articulation).

Vu les aléas rencontrés en travaux souterrain, il est préférable de prévoir une marge de sécurité importante, et de s'éloigner des limites des machines. La configuration monotube offre une meilleure réponse à ce critère que la configuration bitube même si celle ci reste tout à fait viable.

3. Estimation des influences liées au choix d'une solution

3.1 Tassement

Cette approche préliminaire de l'estimation des tassements est effectuée selon la méthode semi empirique de PECK. Cette méthode détermine les répercussions en surface en fonction de la perte de volume $\Delta V/V$ de l'excavation sur l'effet des déformations :

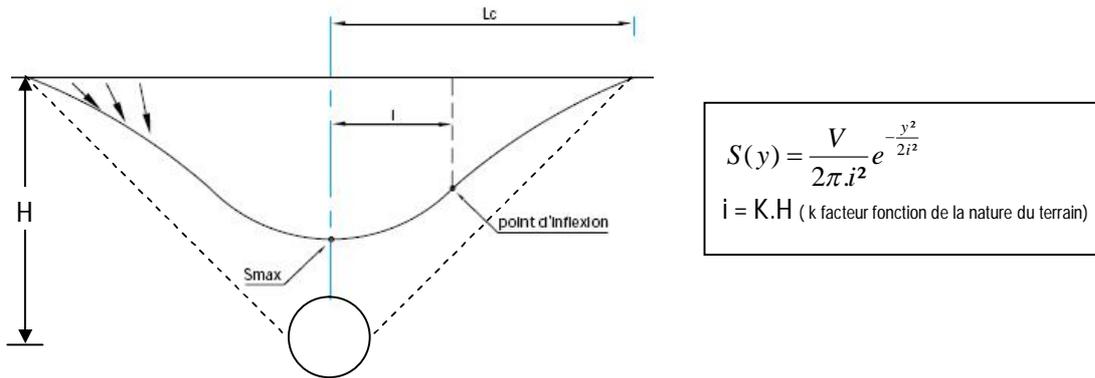


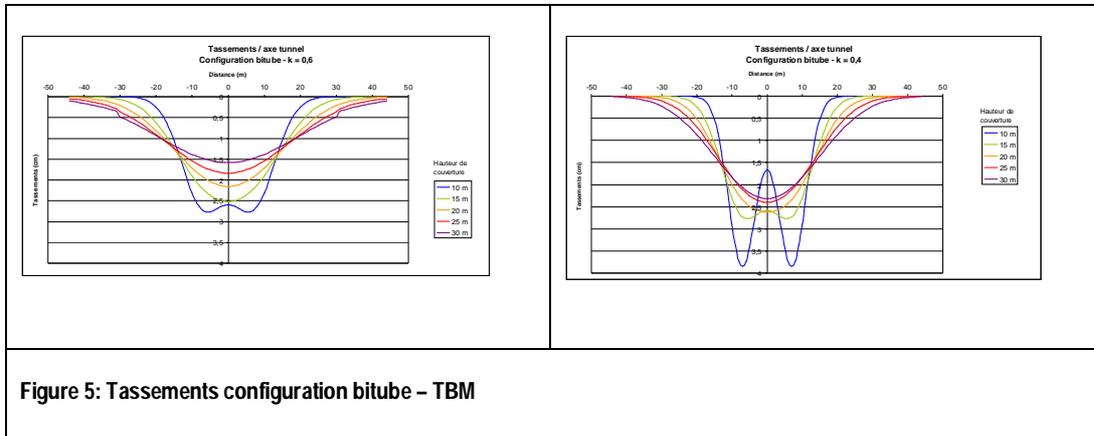
Figure 4: Cuvette de tassement

Les différents retours d'expérience montrent que la perte de volume est le plus souvent inférieure à 1 %. L'utilisation d'un tunnelier à confinement permet de limiter cette valeur à 0.5 %. Nous retiendrons dans la suite, une perte de volume de 1 % pour un creusement traditionnel et 0.5% dans le cas de figure d'utilisation d'un tunnelier.

Le facteur K dépend de la nature du terrain, avec :

- Entre 0.4 et 0.6 pour les argiles ;
- Entre 0.25 et 0.45 pour les sables et graviers.

Au vu des formations rencontrées, les tassements seront évalués avec $K = 0.4$ et 0.6 afin de borner les estimations. Dans le cas d'un bitube, nous avons retenu la configuration la plus défavorable avec un espace entre tubes de 1 diamètre.



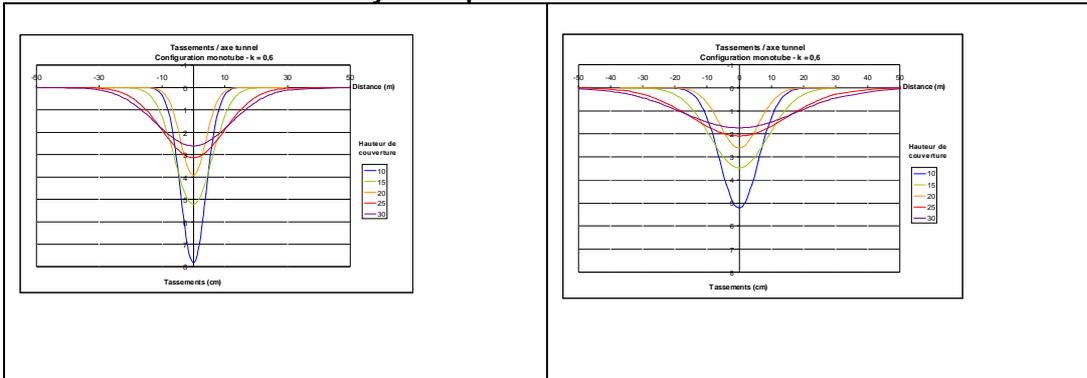


Figure 6: Tassements configuration monotube – TBM

Avec un creusement mécanisé au tunnelier, les tassements seront divisés par 2 avec une largeur de cuvette équivalente.

Les profils en long de l'étude conduite par SYSTRA montrent une hauteur de couverture nominale de l'ordre de 30 m. Les tassements estimés pour un creusement sous cette hauteur de couverture sont :

- Configuration bitube: $1.7 < S_{max} < 2.1$ cm
- Configuration monotube: $1.7 < S_{max} < 2.6$ cm

Il s'agit d'une fourchette haute, dans le cas d'un creusement mécanisé à confinement, les tassements seront réduits de moitié.

On remarque que l'effet induit par une configuration bitube s'estompe avec la hauteur de couverture. Avec la profondeur, la configuration bitube tend à se rapprocher d'une configuration monotube:

Hauteur de couverture	Rapport Tassements Bitube / Tassements Monotube	
	K = 0.4	K = 0.6
10	2,1	1,9
15	1,9	1,4
20	1,6	1,2
25	1,3	1,2
30	1,2	1,1

Pour une hauteur de couverture de 30 m, les tassements estimés sont quasi similaires pour les 2 configurations.

Extension EOLE à l'Ouest - Analyse comparative Monotube-Bitube

9

Pour un tassement équivalent, le bitube offre la possibilité de remonter le profil en long par rapport à la configuration monotube mais avec augmentation de la largeur de la cuvette de tassement.

L'encombrement du sous sol nécessite d'approfondir l'axe de l'ouvrage. L'influence de la configuration sur les tassements sera donc réduite. La réduction des tassements passera plutôt par le choix de la méthode de creusement et du phasage.

L'effet sur le bâti des tassements est étudié dans le mémoire "Risques d'effondrements".

3.2 Ouvrages annexes et équipements

Les études fonctionnelles produites par Systra en 2010 préconisent des communications ferroviaires entre les voies tant en amont qu'en aval des gares. En correspondance des communications entre les tubes (cross-overs) l'indépendance aéraulique des deux tubes doit être garantie, ce qui peut entraîner des augmentations de coûts dans le système de ventilation.

En configuration bitube, des rameaux intertubes sont à prévoir tout les 500 m maximum (si les STI sont applicables); aucune distinction n'est faite entre les deux configurations au sujet des besoins de puits de liaison avec la surface. Les puits d'accès des secours ainsi que les puits de ventilation, devront permettre l'accès à chacun des tubes indépendamment. Pour cela il faut soit qu'ils soient doublés en nombre, soit qu'ils soient placés en correspondance avec les rameaux intertubes ce qui induit une flexibilité considérablement réduite dans leur localisation.

Par ailleurs le pas imposé pour les puits d'accès et ventilation n'est pas multiple de celui imposé pour les rameaux dans la STI, ce qui pourrait comporter une augmentation des rameaux le long de la ligne pour les placer en correspondance des puits.

Les équipements pour les secours, les éclairages et les balisages, sont doublés dans le cas du bitube, ce qui pourrait accroître les frais d'installation et exploitation.

Dés lors les équipements de ventilation et sécurité des rameaux devront assurer la ventilation des voies d'issue à partir de l'extérieur, ce qui pourrait nécessiter d'une gaine séparée au travers d'un des tubes si le puits n'est pas prévu en position centrale entre les deux tubes.

Des équipements supplémentaires en termes de portes et signalisation des issues peuvent aussi être nécessaires.

3.3 Chantier

Une limitation des influences du chantier passe par une diminution :

- des emprises;
- des flux entre le chantier et l'extérieur.

A ce titre, la configuration et le tracé présentant le moins de débouchés en surface est à privilégier. En effet, la réalisation de chaque puits est d'autant de chantier local et de gêne supplémentaire aux usagers. Sur la base de ce critère, l'avantage revient au tracé Avenue des Ternes, sans gare intermédiaire, dans sa configuration bitube (puits limités aux puits de ventilation)

Extension EOLE à l'Ouest - Analyse comparative Monotube-Bitube

10

La section d'un tunnel monotube de 10.40 m de diamètre est quasi similaire aux sections de 2 tunnels bitube de 7.25m de diamètre. Le volume des marins issus par le creusement du tunnel (hors ouvrages annexes et stations) sera donc presque identique dans les deux configurations. A part les transports de matériaux issus du creusement, pendant la construction le principal flux concernera l'alimentation en voussoir dans le cas d'un creusement au tunnelier ou en matériaux de soutènement/revêtement pour un creusement traditionnel. Sur la base de voussoirs d'épaisseur 0.40 m pour le tunnel monotube et 0.35 m pour le bitube, la configuration bitube représente un volume de voussoir à transporter de près de 20% supérieur à la configuration monotube.

3.4 Procédures de sécurité et accidents

Outre que sur les aspects liés à la construction (coût, emprises, délais, effets sur le bâti de surface), le choix de la configuration monotube-bitube a des répercussions sur l'exploitation de la ligne et sur les stratégies de sécurité à adopter. Pour ce point on renvoie au rapport BG 7153.01-RN-002 note d'orientation sur les Enjeux de sécurité liés au choix de la configuration du tunnel. On en reprend uniquement les éléments principaux dans la suite.

Ici on rappelle uniquement que, en général, les textes de référence admettent que *"La sécurité n'a une incidence sur le profil transversal que dans des cas exceptionnels"* (UIC 779-9).

Le choix du type de tunnel – double voie ou voie unique – dépend de plusieurs critères: coûts et date de construction, risques, exploitation (concept d'entretien, liaison entre les voies), topographie (y compris l'espace vers les entrées), aspects aérodynamiques et sécurité. La sécurité est influencée par la densité et le type de trafic (trafic mixte p.ex.), la longueur du tunnel, la possibilité de réaliser un concept de secours avec des distances d'évacuation raisonnables, en une ou plusieurs phases d'intervention.

En ligne générale, en complément on cite la UIC 779-9: *"Si tous les critères de sécurité tels que la largeur des itinéraires d'évacuation, etc. peuvent être respectés, il n'y a pas d'autre exigence vis-à-vis du profil transversal du point de vue de la sécurité."*

3.5 Exploitation courante, dégradée et maintenance et fonctionnalités assurées

L'exploitation courante pourrait être facilitée par une configuration monotube. Les communications entre les voies se font directement dans l'espace du tunnel lui-même, sans la nécessité de création de chambres de connexion (crossovers). Ces éléments peuvent être difficiles à construire compte tenu de la dimension de ces ouvrages et peuvent aussi avoir une influence négative sur le flux régulier de la ventilation. L'indépendance aéraulique des deux tubes doit être assurée en cas d'incendie à ces endroits, à moins de perdre complètement les avantages liés à des gaines trafic séparées.

D'autre part, disposer les deux voies dans le même volume permet de réaliser l'insertion des appareils de voie garantissant les fonctionnalités ferroviaires à l'endroit le plus convenable.

Dans la configuration bitube, où une chambre de longueur importante (qui dépend de la vitesse d'exploitation recherchée) est nécessaire pour y installer les communications, les appareils de voie permettant ces fonctionnalités ferroviaires doivent être prévues à proximité des gares, où les excavations doivent être élargies sur des longueurs bien plus importantes.

Extension EOLE à l'Ouest - Analyse comparative Monotube-Bitube

11

En configuration monotube, l'effet de pistonement créé par la circulation des trains dans chaque sens tend à se compenser, rendant plus fréquent le fonctionnement de la ventilation sanitaire, ce qui peut entraîner des frais d'exploitation plus importants.

En modalité dégradée d'exploitation d'un tunnel monotube, la présence de communications rapprochées entre les voies peut permettre la banalisation d'une voie sur des distances réduites lors de travaux sur une des voies.

3.6 Gestion des émergences et accidents

La mise au point des stratégies de sécurité est fortement impactée par la configuration de l'ouvrage. Se référer au rapport 7153-RN-002 Note d'orientation sur enjeux de sécurité liés au choix de la configuration du tunnel. Ici on rappelle que la stratégie de gestion d'un événement dépend largement de l'infrastructure et de détails actuellement non définis tels que:

- Longueur de la zone élémentaire pour l'alimentation électrique de la caténaire
- Délais garantis par la signalisation pour l'arrêt des trains
- Interdistance des convois
- Itinéraires, vitesses et trafic
- Caractéristiques de l'alimentation (séparation de phase, de tension, etc...)

En ligne générale dans un tunnel monotube l'équipement ferroviaire doit permettre le rebroussement d'un train sur un tronçon équivalent à celui envahi par les fumées.

Une analyse spécifique de risques devra permettre de définir les dimensionnements adéquats pour infrastructure et équipements.

L'orientation actuelle de la réglementation (arrêté 22.11.05, qui n'est toutefois pas applicable dans le cas en examen) impose que la distance maximale d'évacuation des fumées en tunnel en cas d'incendie soit de 800 m, indépendamment de la configuration choisie. Tout train à distance de plus de 800 m de l'accident se trouve alors dans une zone ne pouvant pas être envahie par les fumées.

Alors, imposer aux trains circulant dans la même direction le maintien d'une interdistance adéquate permet d'exclure que deux trains circulants dans le même sens soient impliqués dans le même accident, la solution monotube ne permet pas d'exclure la présence d'un convoi voyageant dans le sens inverse à distance inférieure à 800 m de celui incidenté. En cette garantie réside l'avantage principal d'une configuration bitube par rapport à la sécurité de la ligne. Toutefois une analyse de risques prenant en compte les conditions de trafic, les dispositifs de signalisation, les caractéristiques des convois et la géométrie de la ligne est nécessaire pour estimer l'effective criticité de cette situation.

4. Conformité aux réglementations en vigueur (construction et exploitation)

Les deux configurations sont conformes aux règlements et réglementations en vigueur en phase exploitation en tenant compte des détails décrits auparavant dans le chapitre relatif à la sécurité de l'ouvrage.

En phase de construction également les deux configurations sont gérables dans le respect des réglementations et règles de l'art actuelles. Récemment, dans des projets se rapprochant d'une

Extension EOLE à l'Ouest - Analyse comparative Monotube-Bitube

12

solution bitube (galerie de sécurité du Tunnel du Fréjus) les Services d'Intervention et de Secours ont exigé, dans le cas de configuration bitube, que les rameaux soient creusés à l'avancement à une distance maximale du front de taille, ce qui, bien que très contraignant pour l'avancement du chantier, permet de garantir un chemin d'issue indépendant en cas d'accident avec incendie lors de la réalisation de l'ouvrage sans devoir remonter l'intégralité du tunnel.

La plupart du tracé préconisé se situant sous nappe, la réalisation des passages intertube va nécessiter des opérations préalables de pré-traitement.

5. Possibilités d'évacuation et d'intervention en cas d'incendie

Les dispositifs d'accès des services d'intervention et secours sont définis par les normes actuellement en vigueur à 800 m de distance. En cas de configuration bitube ces dispositifs sont à intégrer avec des passages inter-tube tout les 500 m en cas d'application des STI.

Le positionnement en position centrale aux deux tubes est à préférer en cas de configuration bitube. Il faut, en effet, prévoir des cheminements vers la surface qui évitent le passage des personnes dans le tube incidenté à partir du tube sain et des fumées du tube incidenté au sain.

Indépendamment de la configuration choisie, les puits d'accès peuvent demander des équipements supplémentaires selon leur profondeur. Si la profondeur du fond du puits dépasse les 15m il faudra prévoir une poulie de descente matériel (capacité 50 kg) et des trappes de dimensions minimales 1x2 m; si la profondeur du fond du puits dépasse les 28 m il sera nécessaire de prévoir un ascenseur pour brancard (valeurs plus contraignantes en IT 98-300).

6. Coûts paramétriques du GC par rapport à la configuration choisie

Dans la suite on propose une estimation des coûts paramétriques des deux configurations dans l'option de tracé Avenue des Ternes. Ces estimations, basées sur des coûts issus de chantiers de travaux souterrains similaires, ne tiennent pas compte des coûts des équipements et des ouvrages annexes.

Les considérations décrites dans la suite ont été conduites pour l'option de tracé CNIT dans La Défense. Elles restent généralisables aux autres options de tracé.

Seuls les coûts des éléments qui sont modifiés par le choix de la configuration ont été pris en compte. L'achat du foncier étant quantifié dans l'étude Systra, il n'a pas été repris en compte dans les considérations qui suivent. De la même façon, une série d'éléments tels que puits, gares têtes, etc., qui ne varient pas de façon significative entre les deux configurations, n'a pas été prise en compte dans les estimations des coûts relatifs détaillées ci-dessous.

Pour comparer les tracés, les configurations et les méthodes de creusement, seul les éléments qui pouvaient varier entre les options et configurations ont été prises en compte:

- Tunnel de ligne
- By-pass inter tubes
- Ouvrages annexes

Extension EOLE à l'Ouest - Analyse comparative Monotube-Bitube

13

Seul les coûts de réalisation du creusement sont indiqués, aucune hypothèse n'a été faite, à ce stade, par rapport aux frais annexes (transports, accès etc...)

Ces estimations visent à définir un ordre de grandeur des écarts de coûts entre les deux configurations. Aucune provision pour aléa ni pour consolidation n'a été prise en compte. En particulier en ce qui concerne les consolidations, si nécessaires, le choix d'une solution bitube pourrait conduire à des écarts supérieurs en termes de coûts liés aux quantités majeures de terrain à traiter.

6.1 Ouvrages au tunnelier – Hypothèses et bases de coûts

A ce stade des études, le type de tunnelier n'ayant pas été arrêté, nous sommes partis sur la base d'un tunnelier à confinement par pression de boue, tunnelier qui implique un coût d'investissement plus élevé (hypothèse contraignante).

Le prix d'un tunnelier à confinement de type à pression de boue d'un diamètre d'environ de 7 m (configuration bitube) est évalué à 12 M€ HT. (Ce coût inclut la fourniture, le transport, le montage, le démontage, ...). Le coût de la station de traitement des boues est estimé à 4M€ HT, soit un coût total d'investissement de 16 M€ HT pour le poste tunnelier bitube. De façon sécuritaire, nous n'avons pas intégré une reprise de la machine par le constructeur en fin de chantier (normalement de l'ordre de 10% de l'investissement). *Dans la configuration bitube on va recourir à 2 tunneliers afin de tenir des cadences similaires au tunnelier monotube.*

Le prix d'un tunnelier à confinement de type à pression de boue d'un diamètre d'environ de 10 m de diamètre (configuration monotube) est évalué à 16 M€ HT. (Ce coût inclut la fourniture, le transport, le montage, le démontage, ...). De façon sécuritaire, nous n'avons pas intégré une reprise de la machine par le constructeur en fin de chantier (normalement de l'ordre de 10% de l'investissement). Le coût de la station de traitement des boues est estimé à 6M€ HT, soit un coût total d'investissement de 22 M€ HT.

Pour les coûts de Génie Civil réalisé au tunnelier et dans la mesure où ces ouvrages sont parfaitement identiques d'une extrémité à l'autre, les coûts ont été estimés au mètre linéaire de tunnel. Ce poste correspond à :

- Coût d'avancement au tunnelier: il correspond au coût du personnel travaillant sur le tunnelier auquel s'ajoute le coût des différentes fournitures nécessaires à son bon fonctionnement (consommables, énergie, etc...). Si le coût de la main d'œuvre dépend peu du diamètre de la machine, celui de l'énergie et des consommables y est strictement lié. Bien que le nombre total de personnes intervenant sur le chantier sera plus important pour le tunnelier bitube (deux machines), ce poste dépend essentiellement de la cadence d'avancement car à une cadence élevée, la mobilisation des équipes sera réduite par rapport au m³ de terrain excavé. Il a été considéré des équipes de 20 (pour le tunnelier bitube) à 30 personnes (pour le tunnelier monotube) / poste / 3 postes par jour / 26 jours par mois. (Les équipes intègrent le personnel en surface dédié directement à la marche du tunnelier mais pas le personnel nécessaire à la préfabrication des voussoirs, préparation des bétons). En se basant sur l'expérience dans chantiers similaires, le coût du m³ de terrain excavé se situe entre 180 et 200 €/m³.

Extension EOLE à l'Ouest - Analyse comparative Monotube-Bitube

14

- Coût du revêtement en b.a. préfabriqué. Ce coût a été estimé base 2010 à 450€/m³ de revêtement armé à 90kg/m³
- Coût des injections du vide annulaire derrière les voussoirs. Ce coût a été estimé base 2010 à 250€/m³

6.2 Inter-tube

Si les STI sont applicables, les inter-tubes de communication entre les tubes seront réalisés en traditionnel avec une section d'environ 7m³. Le creusement par la méthode traditionnelle de ces éléments demandera, lorsque l'excavation est sous nappe, un prétraitement du terrain autour de la cavité.

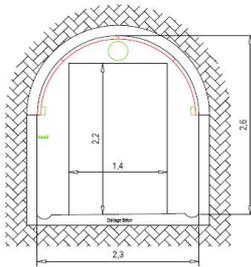


Figure 7 : Section type galerie inter-tube

L'estimation des ouvrages souterrains exécutés par la méthode traditionnelle a été établie sur la base de prix unitaires issus de notre base de données de coût, adossés aux quantités correspondantes.

Le creusement peut être évalué à 800 € le m³ excavé y compris les ouvrages de raccordement avec le tube principal, soit 15ml x 7m³ x 800 € = 84 000 €.

A ce montant il faut ajouter:

- les traitements de terrain (en particulier dans les tronçons de tracé sous nappe dans terrains granulaires), qui est estimée à 250 €/m³ de terrain traité (estimé égal à 25 m³ en traitant une couronne de 1.5 m autour de la cavité). Les coûts des traitements s'élèverait à 25x200=6'250€/bypass
- Les revêtements et finitions (estimées à 20% du coût d'excavation)

Un coût pour intertube de environ 110'000€ est ainsi estimé.

Il est prévu un inter-tube tous les 500 m maximum, nous avons estimé 15 inter-tubes dans les tracés Porte Maillot, 16 sur le tracé Ternes (linéaire tunnel hors station plus important), et 19 dans le tracé Porte de Clichy.

6.3 Gare

Pour les gares, nous avons repris les données du rapport *Etudes techniques* [Systra 2010], qui évalue à 280 M€ une gare sans alternat et 400 M€ une gare avec alternat.

Cette étude ne fait pas de différence par rapport à la configuration choisie, ce qui est acceptable si une solution à quai central est envisagée pour l'architecture de la gare. Ici on a alors estimé les mêmes coûts pour les gares bitube et monotube. Dans le cas où des quais latéraux sont à prévoir, le volume intéressé par la gare est augmenté à cause de l'écartement minimal des tubes en tête de gare.

6.4 Ouvrages annexes

L'installation des appareils de voie permettant les différentes fonctionnalités prévues nécessitent des chambres de communications entre les tubes (cross-overs) ces chambres seront plus ou moins importantes selon les vitesses de projet de la ligne.

A minima, pour les vitesses en projet, une longueur de 250 m est nécessaire pour installer les deux appareils (dimension indiquée dans l'étude Systra 2010). A cette longueur il faudra rajouter le tronçon droit qui est d'autant plus long que les voies sont écartées (à cause de l'entraxe entre les deux tubes).

Nous estimons alors une chambre d'une largeur moyenne de 10 à 15 m et longueur d'environ 300 m de part et d'autre de la gare.

Prenant l'hypothèse de 800 €/m³ excavé (comprenant revêtement et finition) en découle un coût de 60k€/m environ. Ce qui comporte un coût supplémentaire des gares en configuration bitube de l'ordre de $2 \times 300\text{m} \times 60\text{k€} = 36 \text{ M€}$.

6.5 Chiffrage des différentes configurations

Le tableau suivant présente le coût de chacune des options en fonction des prix unitaires et hypothèses présentées précédemment:

Le tracé le plus intéressant, d'un point de vue économique, revient à l'option Ternes. C'est la gare intermédiaire qui augmente fortement l'option Porte Maillot.

Avec un creusement mécanisé, les solutions monotube sont légèrement plus économique (de l'ordre de 15%) que les solutions bitube (qui implique l'investissement de 2 tunneliers afin de suivre les cadence de creusement du monotube). Toutefois les effets du choix de la configuration sur les géométries de la gare n'ont pas été quantifiés.

Le maintien des fonctionnalités ferroviaires prévues dans les études proposées par Systra en 2010 peut comporter une augmentation sensible des coûts liée à la nécessité d'ouvrages accessoires pour loger les communications ferroviaires entre les voies et pour les équipements de sécurité nécessaires (indépendance aéraulique des deux tubes, etc...)

		Longueur (km)	Nombre gares souterraines	Puits	bypass	Coûts tunnels	Coûts Gares (sans alternat)	Coûts Bypass	Coûts solution
Ternes	Monotube	7.9	1	10		218 M€	250 M€		469 M€
	Bitube				16	212 M€	286 M€	1 728 k€	500 M€
Porte Maillot	Monotube	8	2	10		221 M€	500 M€		721 M€
	Bitube				15	215 M€	572 M€	1 620k€	789 M€
Clichy	Monotube	9.4	2	12		260 M€	500 M€		760 M€
	Bitube				19	252 M€	572 M€	2 052 k€	827 M€

7. Effets sur les délais de construction

Les estimations ont été établies avec les hypothèses d'un travail en 3 postes de 8h, 5 jours par semaine:

- Tunnel creusé au tunnelier: 200 m/ mois;
- Ripage à travers les stations: 3 mois.

Nous avons fait également l'hypothèse que le temps nécessaire à la fabrication du tunnelier était inclus dans la phase de préparation de chantier, estimée à 12 mois.

Le deuxième tunnelier sera lancé avec 4 mois de retard par rapport au premier dans l'hypothèse bitube. De façon sécuritaire, les cadences moyennes du deuxième tunnelier sont estimées être égales au premier tunnelier compte tenu de la bonne connaissance de la géologie homogène sur l'intégralité des tracés.

Nous avons pris l'hypothèse que le creusement procédera depuis le site de La Folie, où les espaces sont suffisants pour lancer les deux tunneliers. De telle façon on estime aussi minimiser les transports de matériaux en ville qui seront limités uniquement aux chantiers des puits.

Les différents plannings pour les trois tracés sont représentés dans les figures suivantes pour les configurations mono ou bitube.

Planning Tracé "Porte Maillot"

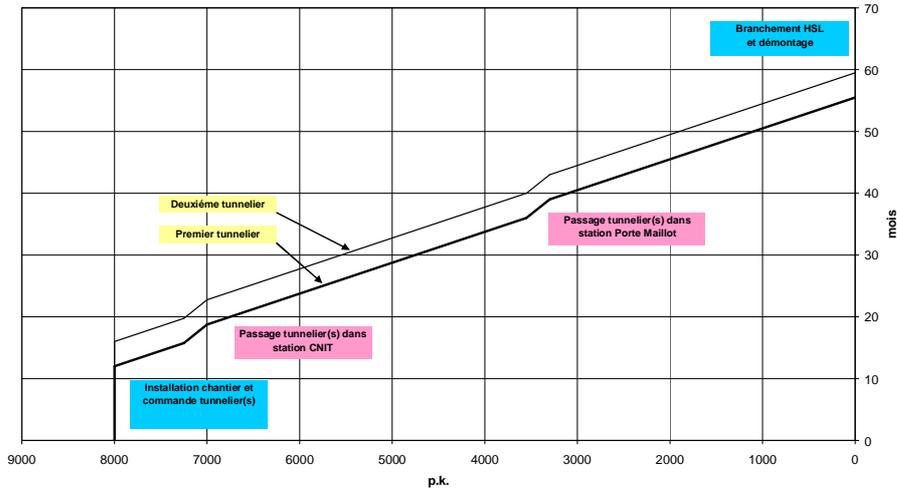


Figure 8 : Courbe d'avancement tracé Porte Maillot

Planning Tracé "Ternes"

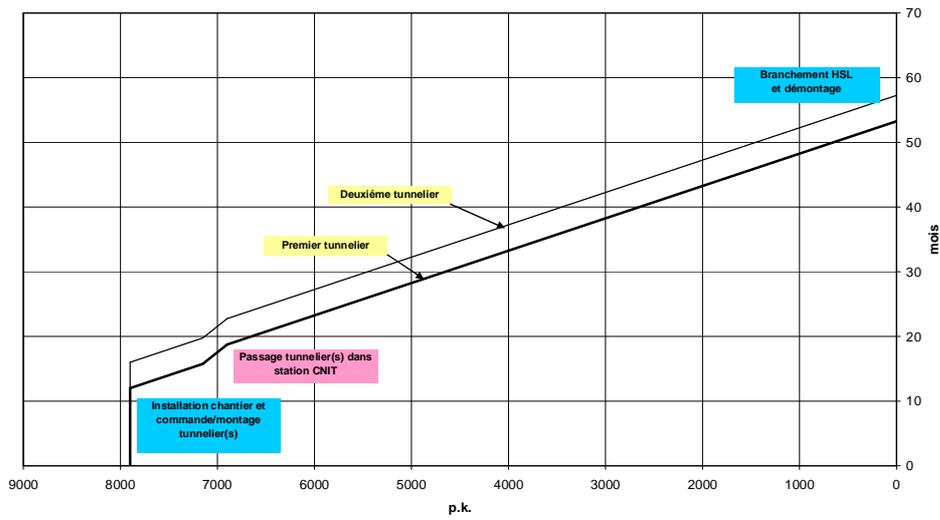


Figure 9 : Courbe d'avancement Tracé Ternes

Planning Tracé "Porte de Clichy"

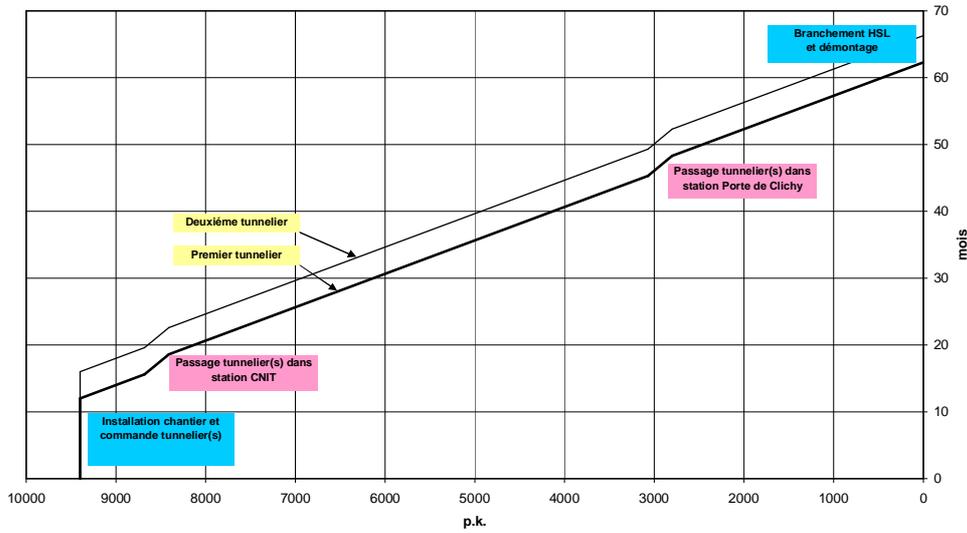


Figure 10 : Courbe d'avancement Tracé Porte de Clichy

Le choix du tracé est, pour les délais de réalisation, le critère le plus influant. On retrouve les délais suivants pour la réalisation du Génie Civil de la ligne:

	Délai global monotube	Délai global bitube
Option tracé Porte Maillot	56 mois	60 mois
Option Tracé Ternes	54 mois	58 mois
Option Tracé Porte de Clichy	63 mois	67 mois

La configuration choisie comporte une différence de l'ordre de 6 à 10% environ dans les délais de construction.

8. Benchmark de l'existant (repris et complété à partir de notre dossier précédent)

Il n'y a pas configuration préférentielle entre monotube et bitube. Pour les lignes urbaines, en Europe, les bitubes sont assez peu répandus et on limite ce choix lorsque les conditions géologiques le demandent.

Le choix de configuration monotube ou bitube semble être assez variable, dans les pays anglo-saxons une préférence semble se faire vers les configurations bitubes dans les projets récents.

Ci-dessous une liste des projets récents en France et Europe avec configuration choisie et quelques observations.

Projets			
Ligne	Lieu	Configuration	Observation
Metro L 4	Paris (F)	Monotube Ø7.30 Extension 2.7 km	3 stations 4 puits
Metro L 12	Paris (F)	Monotube Ø8.80 Extension 3 km	3 stations 4 puits
Metro L 1	Turin (I)	Monotube Ø7.75 Longueur 9.6 km	Puits entre stations (14 stations) Inter-distance stations ≈600 m
Cityringen	Copenhague (DK)	Bitube Ø5.70 Longueur 16 km	14 stations 4 puits de ventilation 3 cross-overs
Metro ligne 9	Barcelone (E)	Monotube Ø9.40 (à Ø12 divisé) Longueur 46 km	51 stations
Crossrail (RER Londres)	Londres (UK)	Bitube Longueur 21 km	12 stations
Tramway Rotonde – Les Halles	Strasbourg (F)	Monotube Ø8.30 Longueur 1.2 km	
RER D Chatelet Les Halles – Gare de Lyon	Paris (F)	Bitube Ø7.05 Longueur 2x1.6km	
Méteor L14	Paris (F)	Monotube Ø8.60 Longueur 4.5km	2 traversées de station 1 puits de départ et d'arrivée
Méto Ligne D Gorge de Loup	Lyon (F)	Bitube Ø6.27 Longueur 2x0.9km	1 puits

Projets			
Ligne	Lieu	Configuration	Observation
Méto Ligne A lot 3	Toulouse (F)	Monotube Ø7.65 Longueur 3.1km	6 stations en tranchée couverte 5 puits (ventilation, épuisement)
Metro de Singapour		Bitube Ø5.89 Longueur 2x1.5km	
Méto de Caracas	Caracas(V)	Bitube Ø5.89 Longueur 2x1.5km	10 ouvrages de ventilation
Metro ligne C Rome	Rome (I)	Bitube Ø6.70 Longueur souterrains 17.6 km; total 25.5 km	30 stations
KCR320	Hong Kong	Bitube Ø7.62 Longueur 2x1.8km	Rameaux de communication tous les 90 m

9. Conclusions

Les considérations exposées dans ce rapport appellent les conclusions suivantes:

- Dans le cadre référentiel et normatif on ne fait pas de distinction particulière entre les deux configurations. Dans la configuration bitube, en cas d'application des STI, des bypass de secours sont à prévoir tout les 500m. *"La sécurité n'a une incidence sur le profil transversal que dans des cas exceptionnels" (UIC 779-9)*, donc les textes réglementaires admettent que choix de la configuration ne devrait pas être dictée par des considérations purement attenantes à la sécurité.
- La configuration monotube (\varnothing tunnel \cong 10.5 m) demande des emprises de l'ordre de 12 à 13 m le long du tunnel permettant des rayons de courbure de 200 m minimum dans La Défense avec l'axe matérialisé par l'étude Systra.
La configuration bitube (\varnothing tunnel \cong 7.25 m) demande des emprises de l'ordre de 30 à 32 m le long du tunnel et va probablement nécessiter une étude supplémentaire de tracé pour garder des rayons de courbure de 200 m minimum dans le secteur de La Défense sur les deux tubes. La solution bitube pourrait être difficile à mettre en œuvre dans le sous-sol encombré du secteur de La Défense.

- Sous une hauteur de couverture nominale de l'ordre de 30 m, les tassements estimés sont :
 - Configuration bitube: $1.7 < S_{\max} < 2.1$ cm
 - Configuration monotube: $1.7 < S_{\max} < 2.6$ cmLes largeurs des cuvettes de surfaces intéressées sont plus importantes dans la configuration bitube que dans la monotube.
- Les équipements de ventilation peuvent être plus complexes dans la solution bitube où les by-pass et les cross-overs ne doivent, en aucun cas, permettre la propagation des fumées d'un tube à l'autre.
- Concernant les conditions d'exploitation courante le maintien des fonctionnalités ferroviaires prévues demande, dans la configuration bitube, des ouvrages accessoires importants (cross-overs) pour permettre la communication entre les voies. L'exploitation courante semble alors être facilitée en cas de tunnel monotube où une plus ample liberté est donnée pour l'intégration des appareils nécessaires aux fonctionnalités prévues.
- Les conditions d'exploitation en cas d'accident, surtout dans le cas d'accident avec incendie ou déraillement, semblent, elles, simplifiées en configuration bitube, où la circulation des trains en sens inverse à celui du train incidenté ne demande pas un arrêt immédiat et où un lieu non envahi par les fumées est retrouvé dans le tube sain. D'autre part des équipements supplémentaires sont nécessaires pour la ventilation des by-pass et cross-overs afin d'éviter la propagation des fumées d'un tube à l'autre par ces éléments de liaison.
- Bien que les coûts par mètre linéaire de tunnel monotube et bitube semblent être similaires, la deuxième configuration nécessite des ouvrages annexes souterraines plus importantes qui, comportant une variation de prix de environ 10%, doivent être prises en compte lors du choix définitif de la configuration.
- Compte tenu de l'indépendance des deux tubes, les cadences de creusement estimées sont assez indépendantes du diamètre des tubes. Ce qui comporte des délais de réalisation similaires dans les deux configurations (variations de l'ordre de 5 à 10%).