CDG Express
Groupement d'Intérêt Économique

SNCF
DIRECTION DE L'INGENIERIE

DIRECTION TECHNIQUE
DEPARTEMENT DES OUVRAGES D'ART DES INFRASTRUCTURES NOUVELLES
Division des Tunnels Neufs – IG.ONT
122, rue des Poissonniers
75876 PARIS CEDEX 18

LIAISON CDG EXPRESS

Etude de niveau schéma de principe

Ouvrage souterrain entre Noisy et Tremblay

Mémoire technique

Date de 1ère émission :	Révision en date du : 10 Septembre 2001

Auteur	Vérificateur	Le Responsable d'affaire
G. Paradis	D. André	G. Paradis

Rev.	Date	Page (s) modifiée (s)	Modifications
B	sept. 01	toutes	mise à jour
A	mars 01	toutes	révision complète du mémoire

N° AFFAIRE : QB33	N° DOCUMENT : APS . IGONT . 200.B	

CDG Express
Groupement d'Intérêt Économique

GIE CDG Express
40, rue d'Alsace
75010 PARIS
tél : 01.40.18.83.80
fax : 01.40.18.60.52

ETUDE DE NIVEAU SCHEMA DE PRINCIPE DES INSTALLATIONS D'INFRASTRUCTURE

Secteur Paris Est à Roissy

Ouvrage souterrain entre Noisy et Tremblay

MEMOIRE TECHNIQUE

SNCF
DIRECTION DE L'INGENIERIE

SEPTEMBRE 2001

SOMMAIRE

1 - OBJET DE L'ETUDE **4**

2 - PROGRAMME DU PROJET **5**

2.1 - HYPOTHESES D'ETUDE 5
2.2 - PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE 5

3 - CONTEXTE GEOLOGIQUE **6**

4 - DEFINITION DES OUVRAGES **9**

4.1 - SECTION TYPE DU TUNNEL 9
4.2 - CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES DE LA LIGNE 11
4.2.1 - Tracé en plan *11*
4.2.2 - Profil en long *12*
4.2.3 - Implantation du tunnel *12*
4.3 - EVACUATION DES EAUX 13
4.4 - DISPOSITIONS DE SÉCURITÉ 13

5 - REALISATION DU TUNNEL **16**

5.1 - MÉTHODE D'EXÉCUTION DU TUNNEL 16
5.1.1 - Généralités *16*
5.1.2 - Creusement du tunnel *18*
5.1.3 - Particularités d'exécution *19*
5.2 - CHOIX DU TYPE DE TUNNELIER 19
5.2.1 - Bouclier mécanisé à confinement de boue *20*
5.2.2 - Bouclier mécanisé à confinement de terre *20*
5.3 - CADENCES – AVANCEMENT DES TUNNELIERS 20

6 - LOGISTIQUE CHANTIER **22**

6.1 - PUITS DE CHANTIER 22
6.1.1 - Puits de chantier de Noisy *22*
6.1.2 - Puits de chantier de La Poudrette *23*
6.2 - INSTALLATIONS DE CHANTIER 24
6.2.1 - Aire d'installation de chantier de Noisy *24*
6.2.2 - Aire d'installation de chantier de La Poudrette *24*
6.2.3 - Aire d'installation de chantier de Tremblay *26*
6.2.4 - Récapitulatif des aires d'installation de chantier possibles *26*
6.3 - TRANSPORT DES MATÉRIAUX 27
6.3.1 - Evacuation des déblais *27*
6.3.2 - Approvisionnement des voussoirs *27*
6.3.3 - Modes de transport possibles *28*
6.3.4 - Récapitulatif des modes de transport et fréquences envisagées *31*
6.3.5 - Conclusion sur la desserte des différentes attaques *32*

7 - ESTIMATIONS **33**

8 - DELAIS DE CONSTRUCTION **35**

DOCUMENTS JOINTS A CE MEMOIRE

Liste des pièces constitutives du dossier tunnel :

APS IGONT 200. B	Mémoire technique
APS IGONT 204. B	Note technique emmarchements
APS IGONT 210. B	Détails des emmarchements
APS IGONT 211. A	Emmarchements TGV et Eurostar
APS IGONT 212. B	Coupe type du tunnel en alignement
APS IGONT 213. B	Coupe type du tunnel en courbe
APS IGONT 216. A	Puits de chantier de Noisy – installation de chantier
APS IGONT 217. A	Puits de chantier de Noisy – coupe transversale 1-1
APS IGONT 218. A	Puits de chantier de Noisy – coupe transversale 2-2
APS IGONT 219. C	Noisy – principe de confortement au droit de l'A3
APS IGONT 220. B	Profil en long du tunnel – zone de Noisy
APS IGONT 221. A	Position des aires d'installations de chantiers sud
APS IGONT 221bis. 0	Position des aires d'installations de chantiers nord
APS IGONT 223. A	Puits de La Poudrette – installation en tête de puits
APS IGONT 224. A	Puits de La Poudrette – installation en fond de puits
APS IGONT 225. B	Puits de La Poudrette – coupe AA
APS IGONT 226. A	Installation de chantier à La Poudrette
APS IGONT 240. A	Profil en long géologique
APS IGONT 250. A	Planning travaux – scénario n° 1
APS IGONT 251. A	Planning travaux – scénario n° 2
APS IGONT 252. A	Planning travaux – scénario n° 3

De plus, la note de synthèse géotechnique joint au dossier général complète le dossier tunnel

APS IGONT 201. 0	Note de synthèse géotechnique

1 - OBJET DE L'ETUDE

La liaison CDG Express est un projet de desserte ferroviaire dédiée « voyageurs » entre la gare de Paris Est et l'aéroport de Roissy Charles de Gaulle ; le maître d'ouvrage est le GIE CDG Express.

Le présent mémoire technique s'inscrit dans l'étude de niveau schéma de principe qui a été confiée à la direction de l'Ingénierie de la SNCF.

Ce document concerne l'ouvrage souterrain de 10 425m de longueur à réaliser en Noisy le Sec et Tremblay en France et son objet est de fournir les coûts et délais de construction ainsi que les éléments techniques justificatifs, à savoir :

- la définition de la géométrie de l'ouvrage,
- le mode de réalisation envisageable,
- les points singuliers et les particularités d'exécution,
- la définition des emprises nécessaires,
- les possibilités d'évacuation des déblais.

2 - PROGRAMME DU PROJET

2.1 - HYPOTHESES D'ETUDE

Les hypothèses retenues dans le cadre de cette étude sont les suivantes :

- Le débranchement des voies de la liaison CDG Express se fait sur les voies Paris Mulhouse dans la zone de Noisy le Sec avec une vitesse de 120 km/h.
- Le tracé est en ligne nouvelle depuis Noisy le Sec jusqu'à son raccordement avec la LGV Interconnexion. Le réaménagement de la gare de Roissy TGV CDG2 se fait sur la base du scénario retenu dans l'étude CEDEGEST de mai 2000.
- La liaison CDG Express est considérée comme une ligne à voyageurs à double voie sans transit fret.
- La vitesse potentielle maximale de la ligne est de 160 km/h.
- L'entraxe des voies est fixé à 3,62 m.
- La tension d'alimentation est de 25 kV.
- Le gabarit 3.3, autorisant la circulation de matériels à deux niveaux, est à dégager.
- L'objectif de mise en service de la liaison CDG Express est fixé à l'année 2006.

2.2 - PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE

La présente étude conduit aux caractéristiques d'ouvrage suivantes :

- Longueur : 10 425m en tunnel (+119m de tranchée couverte coté Noisy).
- Section libre : 47m^2 - section excavée : 80m^2.
- Diamètre de foration : 10,10m (en méthode tunnelier).

3 - CONTEXTE GEOLOGIQUE

La campagne de reconnaissance préliminaire réalisée par GEOTEC en mai-juin 2001 ainsi que les documents d'archives : cartes géologiques de Paris, Lagny et Dammartin en Goële au 1/50.000, sondages de la banque de données du BRGM (une trentaine de sondages recensés dans un faisceau de 3km centré sur le projet), guide géologique régional de Paris et ses environs de Ph. Diffre et Ch. Pomerol, permettent une approche de la géologie du site.

La note géotechnique joint au dossier sous le n° APS.IGONT.201.0 développe les données géologiques, hydrogéologiques et géotechniques qui ont servi de base à l'étude du projet.

En résumé le projet se situe sur la plate-forme des marno-calcaires de St Ouen de la Plaine de France (Parisis).

Sur le plan litho-stratigraphique, au droit du projet, sous la couverture de remblais et d'alluvions quaternaires, les terrains du substratum appartiennent aux formations traditionnelles du Bassin de Paris, et se rapportent pour l'essentiel aux formations tertiaires du Bartonien (calcaires de St Ouen et sables de Beauchamp) et du Lutétien (Marnes et Caillasses).
Les ordres de grandeur des épaisseurs des différentes formations au droit du projet sont :

- 12m env. pour les marno-calcaires de St Ouen,
- 10m env. pour les sables de Beauchamp,
- 15m en moyenne pour les Marnes et Caillasses.

Sur le plan structural la région se caractérise par un environnement faiblement tectonisé, avec de larges ondulations de direction Nord Ouest – Sud Est. Le projet traverse la grande structure synclinale délimitée par la fosse de St Denis de très faible pendage ; il s'agit en fait d'un synclinorium marqué par de nombreuses ondulations secondaires de plus forts pendages et d'orientations diverses qui peuvent influer sur l'écoulement des nappes.
A une échelle plus réduite, existent également de petits accidents géologiques dus aux effets de versant ou aux phénomènes d'affaissement et d'effondrement sur des vides de dissolution du gypse lutétien, entraînant ainsi des variations notables d'épaisseur des formations géologiques, notamment des Marnes et Caillasses.

Sur le plan hydrogéologique, les différentes natures de terrains, les changements fréquents de faciès, et les fortes variations de perméabilité, déterminent des conditions hydrogéologiques particulières dont il est difficile de présenter un modèle au stade actuel des études compte tenu des renseignements très ponctuels des sondages réalisés (5 sondages sur 10 km de tunnel).
Il faut noter que les dissolutions de gypse dans les Marnes et Caillasses entraînent des modifications de circulation des eaux souterraines pouvant occasionner des difficultés lors du creusement en méthode mécanisée (instabilité de front...).
Le niveau piézométrique général repéré en sondages oscille à la cote :

- +44 NGF à la tête Noisy,
- +40 NGF dans la zone de La Poudrette,
- +54 NGF à Sevran,
- +65 NGF à la tête Tremblay.

Dans ces conditions, le tunnel se situe entièrement sous nappe avec une charge d'eau de l'ordre de 20m.

Sur le plan géotechnique, les résultats des essais et mesures géotechniques réalisés au cours de la campagne de reconnaissance préliminaire sont résumés dans la note de synthèse géotechnique joint au présent dossier (document n° APS.IGONT.201.0).
S'agissant d'une campagne préliminaire, ces résultats sont encore peu représentatifs pour caractériser totalement chaque formation traversée ; de ce fait, dans le tableau ci-dessous les paramètres de calculs - au stade actuel du projet – issus de la campagne de sondages ont dû être complétés par des caractéristiques provenant de projets similaires (EOLE...) réalisés en région parisienne.

Formations géologiques	*description*	γ_h kN/m³	C_u kPa	φ_u °	C' kPa	φ' °	R_c MPa	E_0 MPa	K_0
Formations superficielles	Remblais, alluvions, marnes	18	10	20	0	20	<0,1	5 à 10	-
Calcaire de St Ouen	Marnes crèmes	18	30	15	30	34	10	100 à 200	0,45
Sables de Beauchamp	Sables argileux vert	21	30	35	0	35	<0,1	300	0,43
Marnes et Caillasses	Marnes blanches Calcaire crayeux	21	200	25	40	35	30	300 à 500	0,45

Tableau des paramètres géotechniques

Légende du tableau : γ_h : masse volumique spécifique apparente - C_u : cohésion à court terme - φ_u : angle de frottement interne à court terme – C': cohésion à long terme - φ': angle de frottement interne à long terme - Rc : résistance à la compression simple – E_0 : module de déformation instantanée – K_0 coefficient de pression des terres au repos.

Outre les résultats de la campagne de reconnaissance GEOTEC, les principales incertitudes subsistant à ce stade des études portent sur :

- Le toit du substratum, susceptible de varier de plusieurs mètres, l'existence de chenaux alluvionnaires (surcreusements) n'est pas à exclure.
- La présence de fondations anciennes (pieux, palplanches...) ou de remblais de nature diverse.
- L'amorce de fontis dus à la dissolution des gypses dans les Marnes et Caillasses. Un vide franc de 1,45m a été observé dans le sondage SC3 (sur le site de La Poudrette), à la cote 36 NGF, soit à 7m sous le radier du tunnel.

- Certaines particularités géologiques qui sont propres à chaque formation, notamment :
  - la présence et la fréquence de gros blocs (> 100 mm) dans les formations superficielles (alluvions, remblais),
  - la présence de niveaux de gypse plus ou moins dissous dans les formations superficielles, les marno-calcaires de St Ouen, les sables de Beauchamp et les Marnes et Caillasses,
  - l'occurrence des niveaux indurés, grésifiés ou bien altérés, dans les marno-calcaires de St Ouen et les sables de Beauchamp,
  - l'importance des bancs de caillasses très durs au toit des Marnes et Caillasses.

Enfin, il faut noter que la zone d'entrée en terre dans le secteur de Noisy le Sec a été fortement bombardée pendant la seconde guerre mondiale et le risque de trouver des explosifs au cours des terrassements est à prendre en compte.

Au stade ultérieur des études, des reconnaissances complémentaires seront nécessaires pour confirmer les hypothèses retenues et réduire les incertitudes.

Elles ont pour objet de caractériser le comportement géomécanique des terrains à court et long termes, déterminer leur aptitude au creusement mécanisé et évaluer plus précisément les rendements. Les particularités des différentes formations et leurs variations seront étudiées à ce stade.

Ces reconnaissances comprendront une diversification des sondages, ainsi que des essais en laboratoire et in-situ, et des investigations géophysiques (recherche de cavités éventuelles, de poches d'altération, de passages indurés...).

Selon les résultats d'essais et les problèmes soulevés, elles pourront éventuellement nécessiter la réalisation de puits et galerie de reconnaissance.

L'ordre de grandeur du montant total de ces reconnaissances peut être estimé à 15 MF.

4 - DEFINITION DES OUVRAGES

Le débranchement de la ligne nouvelle (PK 0+00 de la liaison), se fait au PK 9+201 sur les voies de Paris – Est.

Les ouvrages souterrains rencontrés sur le tracé de la liaison CDG sont successivement :

- une tranchée couverte de 119m de longueur (PK 0+366 au PK 0+485), à Noisy,
- un tunnel de 10 425m de longueur (PK 0+485 au PK 10+910).

La tranchée couverte a fait l'objet d'une étude particulière traitée dans le cadre des ouvrages d'art du débranchement ferroviaire de Noisy. Le présent mémoire concerne donc uniquement le tunnel.

4.1 - SECTION TYPE DU TUNNEL

Compte tenu de la longueur de l'ouvrage, un creusement par méthode mécanisée est envisagé (cf. § 5). Une des missions d'étude a consisté à optimiser la section du tunnel afin de proposer des dimensions raisonnables pour les machines.

La coupe type du tunnel est présentée dans les plans :

- n° APS.IGONT.212 (en alignement)
- n° APS.IGONT.213 (en courbe de dévers maximum dans la bifurcation de Noisy).

Cette coupe type a donc été étudiée dans l'optique d'obtenir la section minimale en tenant compte des données suivantes :

- tunnel double voie,
- circulation des rames à une vitesse maximale de 160 km/h,
- dégagement du gabarit matériel 3.3,
- dégagement du gabarit caténaire 25000 V normal cuivre, plan de contact à +4,69 m,
- entraxe des voies de 3,62 m,
- rayon minimal de tracé en plan de 625 m dans la bifurcation de Noisy (V = 120 km/h),
- rayon minimal de tracé en plan de 1785 m en zone courante du tunnel (V = 160 km/h),
- prescriptions de l'Instruction Technique Interministérielle relative à la sécurité dans les tunnels ferroviaires de juillet 1998 - I.T.I. n° 98-300.

La section type ne tient pas compte de la présence éventuelle de signaux dans le tunnel, en l'absence de toute donnée disponible au stade actuel des études.

Plateforme

La pose de voie directe sur dalle béton, permet de ménager un caniveau à eau continu dans l'entrevoie, axé sur le tunnel.

Le dévers est variable suivant le tracé en plan de l'ouvrage :

- à l'extrémité Ouest de l'ouvrage, côté Noisy le Sec, le dévers est à son maximum de 150mm avec un excentrement de l'axe de la plateforme par rapport à l'axe du tunnel (swing) de 15 cm côté intérieur de la courbe,
- au-delà de Noisy, le dévers varie de 0 en alignement à 50 mm en courbe sans excentrement plateforme / tunnel.

Pistes

Les circulations piétonnes pour la maintenance ou l'évacuation des voyageurs se font par une piste latérale contiguë à chaque piédroit du tunnel. La largeur du cheminement est de 70 cm hors obstacle.

La piste, dont le niveau est à 0,55 m au dessus du plan de roulement permet d'implanter le caniveau à câbles et les réservations nécessaires (colonne incendie, fourreaux électriques, chambres de tirage...).

L'emmarchement vertical entre la piste et les marchepieds des rames (ZTER et TGV) est dans tous les cas inférieur à 40 cm (valeur maximale autorisée par l'ITI 98-300) en tenant compte du dévers maxi. Cette contrainte a amené à placer la piste à la cote +0,55m, par référence au plan de roulement (cote 0,00), cf. note technique n° APS.IGONT. 204.B.

Géométrie de l'ouvrage

Le choix d'un mode de construction au tunnelier, compte tenu de la grande longueur de l'ouvrage, de l'urbanisation de surface, et de l'objectif de mise en service en 2006, entraîne une section de forme circulaire avec un revêtement en voussoirs préfabriqués.

Le rayon d'intrados est de 4,50 m ; il comprend une marge de 10 cm, pour tenir compte des éventuelles déviations de trajectoire du tunnelier en cours de creusement. Si l'on considère une épaisseur de voussoirs de 40 cm et une épaisseur de jupe de 15 cm (espace annulaire injecté derrière les voussoirs), le diamètre nominal de foration du tunnelier est de 10,10 m.

L'axe de l'ouvrage se situe à 1,60 m au dessus du plan de roulement.

La section d'air dégagée est de 47 m², pour une section excavée de 80 m².

Contraintes de construction

Par ailleurs, le choix d'un mode de construction au tunnelier avec un revêtement en voussoirs préfabriqués, amène à envisager la suppression de certains aménagements habituellement réalisés sur les ouvrages construits en méthode traditionnelle.

Cela concerne notamment :

- les niches pour la sécurité du personnel de maintenance ; des dispositions réglementaires devront préciser les conditions d'intervention du personnel d'entretien dans l'ouvrage vis à vis des circulations, puisque le cheminement ne peut être dégagé au delà de la zone dangereuse (limitation de la vitesse de circulation en cas d'intervention par ex.),

- les surexcavations pour appareil tendeur ; le dispositif devra être adapté en conséquence.

4.2 - CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DE LA LIGNE

4.2.1 - Tracé en plan

Les communes concernées par le tracé en plan du projet dans sa partie souterraine sont successivement : Noisy Le Sec, Bondy, Les Pavillons sous Bois, Aulnay sous Bois, Sevran, Villepinte et Tremblay en France.

La zone de débranchement de la ligne nouvelle est située peu après la gare de Noisy ; il s'agit d'un nœud ferroviaire dense avec les voies grandes lignes Paris Mulhouse, Paris Strasbourg, les voies banlieues et la Grande Ceinture.

La liaison CDG Express se débranche des voies principales Paris Mulhouse au PK 9+201, au niveau du poste 1, nécessitant le ripage de la voie V2L4 de Paris – Mulhouse et le passage sous les voies V1L4 et V1B4 de Paris – Mulhouse.

Le tunnel commence au PK 0+485 de la ligne nouvelle, juste avant le franchissement de la RN 186. Dans cette zone le tracé s'incurve par une courbe serrée de rayon 625 m en direction de Bondy.

Dès le PK 2+000, l'ouvrage prend une direction générale Nord-Est qu'il conserve jusqu'à la jonction avec la LGV Interconnexion. A partir du franchissement du canal de l'Ourcq (PK 3+250 environ), le tracé reste parallèle au canal, en rive droite, à une distance d'environ 100m. La quasi totalité du tracé se situe en zone urbanisée - zones pavillonnaires (Bondy, Les Pavillons sous Bois, Aulnay sous Bois, etc…) et zones d'immeubles (Sevran, etc…).

L'extrémité du tunnel est au PK 10+910, au lieu-dit « La Garenne » derrière la maison d'arrêt de Villepinte. Il s'agit d'une zone agricole en bordure de la plaine de France.

Le tunnel projeté passe sous les voies de transport suivantes :

- la RN 186 dénommée avenue de Rosny à cet endroit,
- l'autoroute A3 qui passe en viaduc,
- les voies ferrées de la ligne de Grande Ceinture,
- les voies ferrées de la ligne Paris – Strasbourg peu avant la gare de Bondy,
- la RN 3 (avenue Gallieni) à proximité du carrefour de La Fourche,
- le canal de l'Ourcq,
- l'allée de Montyon au droit de la zone de La Poudrette,
- la ligne à voie unique Aulnay – Bondy,

- la RN 370 (avenue de Villenaut),
- la ligne du RER B en direction de Mitry-Claye,
- la RD 115 (avenue Robert Ballanger),
- l'autoroute A 104 au niveau de l'échangeur avec l'avenue Clemenceau.

4.2.2 - Profil en long

Après le débranchement à Noisy, la plateforme plonge avec une pente de 34‰ pour passer sous les voies impaires Paris Mulhouse et rentrer en tunnel avant la RN 186. A partir du PK 0+972, la pente s'adoucit à 2 ‰ seulement, jusqu'au point bas de la ligne situé au PK 3+886, au droit de la Zone Industrielle de La Poudrette. La plateforme remonte ensuite, d'abord en rampe douce à 2 ‰ jusqu'au PK 10+133, puis en forte rampe à 35‰ pour sortir de terre en rampe à 14 ‰ dans le déblai de Tremblay en France.

Le profil en long retenu présente donc un point bas au premier tiers du linéaire en souterrain, et de forte déclivité à chaque extrémité sur des distances toutefois relativement faibles :

- coté Noisy : 34‰ sur 783m (entre sommets des tangentes),
- coté Tremblay : 35‰ sur 605m.

La pente minimale de 2‰ en partie courante (sur 9161m) permet un écoulement gravitaire vers le point bas unique, dans la zone industrielle de La Poudrette, à une profondeur de 28m par rapport au terrain naturel.

La profondeur moyenne du tunnel est relativement faible (couverture maxi 21,50m), mais a priori suffisante. En fait, le profil en long a été calé dans le souci de limiter la profondeur du puits d'attaque à La Poudrette. De ce fait, le tunnel est implanté en majeure partie dans les sables de Beauchamp et le toit des Marnes et Caillasses en essayant de ménager une couverture essentiellement constituée des marno-calcaires de Saint Ouen, horizon en bancs suffisamment rigides pour limiter l'influence de l'excavation en surface.

Il faut noter que le calage du profil en long a été réalisé à partir de données bibliographiques extrapolées au droit du tracé, et validé par les 5 sondages carottés de la campagne de reconnaissance préliminaire réalisés par GEOTEC en mai-juin 2001. Cependant, les variations d'épaisseur de la formation des marno-calcaires de St Ouen en couverture devront être étudiées précisément lors des reconnaissances complémentaires, afin d'adapter si nécessaire le projet à la géologie.

4.2.3 - Implantation du tunnel

A la tête Noisy, la tranchée d'accès au tunnel traverse successivement les alluvions, les Marnes et Masses du gypse éboulées, les Sables Verts et les marno-calcaires de St Ouen.
Le débouché du tunnel se fait en partie haute des marno-calcaires, dans les Sables Verts et à la base des Marnes et Masses du gypse. A cet endroit, la couverture avoisine les 8.00 m.

Le tunnel est essentiellement creusé dans les sables de Beauchamp mais également dans la base des marno-calcaires de St Ouen et le sommet des Marnes et Caillasses. Bien que ces terrains soient de natures lithologiques fort différentes, la mécanisation de l'excavation ne devrait pas poser de problème particulier compte tenu de l'expérience des réalisations similaires en région parisienne (ligne RER EOLE...), dans les mêmes horizons.

A la tête Tremblay, le débouché du tunnel se fait principalement dans les sables de Beauchamp surmontés des marno-calcaires de St Ouen et d'une couche d'alluvions. La couverture est de l'ordre de 7,00m.

4.3 - EVACUATION DES EAUX

Les données hydrogéologiques actuellement connues situent la nappe à la cote +44 NGF à la tête Noisy et +65 NGF à la tête Tremblay. Le tunnel est donc situé entièrement sous nappe, avec une charge hydraulique maximale de l'ordre de 2 bar.

Le profil en long qui présente un point bas à La Poudrette entraîne la nécessité d'un dispositif de collecte, de pompage et de relevage des eaux du tunnel qui seront rejetées dans le réseau d'égout existant à La Poudrette.

- Pendant les travaux, le relevage des eaux d'exhaure se fera dans le puits d'attaque de La Poudrette, sur une hauteur de 33m environ. Les eaux seront déshuilées et décantées avant rejet dans le réseau d'égout existant.
- En cours d'exploitation, le mode de construction de tunnel (au tunnelier), avec un revêtement par anneaux de voussoirs en béton armé préfabriqués comportant une étanchéité au moyen de joints périphériques de type néoprène ou équivalent placés entre voussoirs, permet de supposer de très faibles venues d'eau en souterrain. L'essentiel des arrivées d'eau éventuelles proviendra des zones de trémies des têtes, dont les pentes de la plateforme sont orientées vers le tunnel. Ces eaux seront évacuées par la station de relevage.

4.4 - DISPOSITIONS DE SECURITE

La liaison CDG Express est considérée comme une ligne à voyageurs sans transit de fret.

Il faut noter que d'une manière générale, un tunnel ferroviaire est un ouvrage qui présente plutôt moins de risques que les tronçons de ligne à l'air libre ; c'est en effet un milieu protégé et les appareils de voie y sont rares.

Compte tenu de la longueur totale en souterrain - 10544m en cumulant la longueur du tunnel et celle de la tranchée couverte - ce projet échappe en principe au champ d'application de l'Instruction Technique Interministérielle (ITI 98-300).

Les prescriptions de sécurité doivent être soumises à l'avis d'une commission ad-hoc.

En première approche cette étude prend en compte les équipements prescrits par l'ITI 98-300 pour un tunnel de longueur inférieure ou égale à 10km recevant un trafic « voyageurs » uniquement, dans la mesure où la liaison CDG Express n'est pas classée comme ligne urbaine, ni comme ligne à trafic Fret ou mixte.

Indépendamment des équipements de second œuvre - alimentation électrique, éclairage, repérage des issues, détecteurs de boîtes chaudes, liaisons sol-train, contrôle de vitesse – qui n'ont que très peu d'influence sur le génie civil du tunnel, si ce n'est quelques réservations, certaines prescriptions ont un caractère dimensionnant pour l'ouvrage et doivent être prise en compte. Il s'agit des dispositions suivantes :

- Un cheminement latéral de 0,70 m de largeur et 2,00 m de hauteur, hors de tout obstacle est réservé le long des piédroits des ouvrages (tunnel et tranchée couverte). Le diamètre intérieur du tunnel de 9,00m en tient compte.

  Il faut noter que dans le tunnel, la distance du bord extérieur du rail au piédroit ne permet pas de dégager la largeur du cheminement au-delà de la zone dangereuse (2,00 m pour V = 170km/h). De plus, le mode de creusement envisagé (au tunnelier) rend difficile la création de niches de garage du personnel de maintenance. Dans ces conditions, il est souhaitable de limiter les circulations ferroviaires à une seule voie lorsque des agents sont amenés à pénétrer dans le tunnel.

  Une main courante équipe les piédroits dans le tunnel.

- l'emmarchement vertical entre une marche de voiture et la piste est inférieur à 40 cm ; ce point qui a été vérifié pour différents types de rames (ZTER, TER2N, TGV Réseau, TGV duplex, TGV Eurostar), a nécessité de placer les pistes latérales à la cote +0,55m au dessus du plan de roulement.

- L'alimentation électrique est protégée contre l'incendie ; il s'agit de caniveaux à câbles en piste et de fourreaux ignifugés en piédroits, disposés en quinconce.

  A titre indicatif, sur le même piédroit, les espacements des fourreaux de câbles sont de :

  - 50m pour l'éclairage,
  - 100m pour le repérage des issues,
  - 200m pour les prises électriques 240/400V – 10/20A – 12kVA.

- L'alimentation en eau incendie est assurée par une colonne sèche noyée dans le béton de second œuvre de l'une des pistes. Tous les 100m, une remontée de cette colonne sèche munie de 2 prises ϕ 40mm et de 1 prise ϕ 65mm permet le branchement des appareils de lutte contre l'incendie. Au droit de chaque remontée, la main courante est interrompue.

  Compte tenu de l'environnement périurbain de l'ouvrage, il n'a pas été pris en compte de réserve permanente d'eau.

L'alimentation se fait à partir des têtes et de la zone intermédiaire de La Poudrette (accès par le dispositif de relevage des eaux d'exhaure) ; de plus, des alimentations intermédiaires devront être crées par forages tubés, afin que la partie en traînasse de la colonne incendie n'excède pas 800m de longueur.

- Des anneaux de relevage de 120mm de diamètre intérieur minimum offrant une résistance minimale de 5 000daN pour la désincarcération, sont disposés en quinconce sur les piédroits tous les 30m. Ils sont implantés à une hauteur comprise entre 0,50m et 1,00m par rapport à la piste.

- Un anneau de rappel ϕ 200mm minimum, permettant une force de traction de l'ordre de 200daN, implanté à une hauteur comprise entre 1,00m et 1,50m de la piste, complète le dispositif à chaque tête du tunnel et à proximité du puits d'accès de La Poudrette

- A chaque extrémité de l'ouvrage, un accès routier mène à la tête du tunnel et à une aire de parking et de retournement des véhicules de secours ; ainsi :
  - à l'extrémité coté Tremblay, l'accès routier peut être aménagé à partir de la RD 88, qui se raccorde à l'A104.
  - à l'extrémité coté Noisy, l'accès routier peut être aménagé à partir de la RN 186 (avenue de Rosny), qui se raccorde à l'A3. Il faut noter que la situation des ouvrages souterrains enclavés dans un environnement ferroviaire dense, rend très complexe l'aménagement d'une aire de secours à la tête du tunnel. Il est proposé d'accéder au tunnel par l'accès de chantier à la tranchée couverte maintenu en phase définitive.

La résistance au feu de la structure du tunnel devra être justifiée par calcul, à un stade ultérieur des études, pour des expositions au feu représentées par les courbes mentionnées dans l'Eurocode 1 : courbe température – temps normalisée (ISO 834).

5 - REALISATION DU TUNNEL

5.1 - METHODE D'EXECUTION DU TUNNEL

5.1.1 - Généralités

Une méthode de creusement mécanisée pour la réalisation du tunnel est proposée compte tenu :

- de la géométrie de l'ouvrage : grande longueur (10km) et section excavée raisonnable (80m²) pour un diamètre de tunnelier de 10,10m.
- de l'environnement du projet et son impact en phase travaux : urbanisation forte et limitation du nombre des attaques.
- du contexte géologique, et hydrogéologique du site : creusement sous nappe dans les formations du bassin parisien.

Ces conditions amènent à envisager un tunnelier à confinement de front, bien adapté à la traversée des terrains de mauvaise tenue sous nappe (confinement par pression de terre ou par pression de boue).

Rappelons que le principe de creusement au tunnelier consiste à excaver le terrain à l'abri d'un bouclier, en assurant la stabilité du front de taille et en équilibrant la charge hydrostatique à l'aide d'une contre-pression au front (pression de boue bentonitique ou pression de terre).

En fait, le tunnelier assure différentes fonctions :

- le creusement et le marinage des déblais
- le soutènement du front de taille
- la pose du revêtement à l'arrière du bouclier (voussoirs béton armé).

Le bouclier est donc la partie active qui assure le creusement par des outils (barreaux et/ou molettes) fixés sur la roue de coupe tournant à l'avant du bouclier ; il est poussé par des vérins prenant appui sur le revêtement déjà réalisé. Dans le cas présent, les outils devront être adaptés pour terrasser aussi bien en terrains durs (molettes), que dans les terrains tendres et abrasifs (barreaux).

La technologie de ce type de machine est actuellement bien maîtrisée par les constructeurs et par les entreprises utilisatrices.

Les tunneliers de grand diamètre, supérieur à 10m, existent depuis longtemps : le creusement de la section Etoile – Pont de Neuilly de la ligne A du RER, réalisé à l'aide d'un bouclier de ϕ 10,28m, date des années soixante.

Il sera toutefois nécessaire, lors de sa conception, de porter une attention particulière :

- au maintien de la stabilité du front dans les phases de travail et de maintenance (la maîtrise des pressions de confinement joue un rôle prépondérant au regard des tassements),
- à l'assemblage de la machine pour satisfaire aux contraintes de transport et de montage-démontage sur site (un transport par voie fluviale peut être envisagé, compte tenu de la proximité du canal de l'Ourcq),
- à l'accessibilité à la chambre d'abattage pour des interventions sous air comprimé,
- à la conception du train suiveur « back up » tracté par la machine et supportant les équipements nécessaires à son fonctionnement.

L'expérience des chantiers mécanisés actuels ou passés dans des terrains similaires de la région parisienne doit permettre d'orienter les investigations et reconnaissances ultérieures afin de déterminer les caractéristiques de la machine. Parmi ces chantiers, il faut citer :

- ligne RER D, tronçon Châtelet – Gare de Lyon (bitube - ϕ 7,05m),
- ligne Métro n°14 (METEOR), tronçon Bastille - Madeleine (double voie - ϕ 8,60m),
- ligne RER E (EOLE), tunnel intergare (bitube - ϕ 7,40m),
- ligne T.G.V. Atlantique, tunnel de Villejust (bitube - ϕ 9,25m),
- desserte d'ORLY par le VAL (double voie - ϕ 7,66m),
- bouclage de l'A86 à l'Ouest, tunnel VL SOCATOP (en chantier - ϕ 11,78m).

Au stade ultérieur des études, les campagnes de reconnaissance complémentaires permettront d'appréhender :

- La dureté et l'abrasivité des niveaux indurés des bancs de caillasses du Lutétien, ou des niveaux grésifiés du Bartonien, afin d'adapter les outils de la tête de coupe et éventuellement de prévoir un concassage des déblais avant marinage dans le cas d'un marinage hydraulique.
- La présence de vides de dissolution du gypse dans les Marnes et Caillasses (risque de perte brutale de pression de confinement).
- La nature des niveaux marneux et argileux dans les formations du Bartonien et du Lutétien, dans l'éventualité d'un marinage hydraulique, en vue d'analyser les opérations de séparation des déblais et de la boue bentonitique (criblage, cyclonage, clarification,...).

L'élaboration de la section type en fonction du cahier des charges amène à proposer un diamètre de tunnelier de 10,10m pour réaliser l'ouvrage. Ce diamètre tient compte d'un espace annulaire de 15cm d'épaisseur, correspondant à la jupe du bouclier, et qui sera comblé par un mortier de bourrage après pose du revêtement.

Le revêtement est constitué d'anneaux de voussoirs préfabriqués en béton armé, de 40 cm d'épaisseur posés à l'arrière du bouclier ; ces voussoirs sont équipés de joints périphériques d'étanchéité.

Le dimensionnement des voussoirs devra tenir compte d'une part des charges statiques de pression de terrain et de pression d'eau, et d'autre part des efforts de poussée du tunnelier.

Le train suiveur (back up) assure la logistique tunnelier : il porte les équipements de puissance et de commande de la machine ainsi que les équipements nécessaires à la manutention des voussoirs, à la mise en œuvre du mortier de bourrage et au marinage ; il permet également le transfert entre la logistique d'approvisionnement du tunnel et la machine (réseaux, puissance, marinage, eaux, air comprimé, exhaure...).

5.1.2 - Creusement du tunnel

La grande longueur de tunnel à creuser, plus de 10 km, et l'optique de mise en service de la ligne du CDG Express en 2006 conduisent à envisager au moins 2 scénarios de creusement en considérant l'utilisation de 2 ou 3 tunneliers.

Scénario 1 : le creusement est réalisé à l'aide de 2 machines à partir d'une attaque commune par puits à La Poudrette. Les machines sont acheminées sur site en pièces détachées par voie fluviale.

- Le premier tunnelier (attaque Sud) réalise 3351m en attaque montante, favorisant ainsi l'évacuation des eaux d'exhaure. Il débouche dans le puits de Noisy réalisé préalablement. La machine est ensuite démontée et ressortie pour quitter le chantier.
- Le second tunnelier (attaque Nord) doit creuser 7044m en attaque montante également et sort à la tête Tremblay dans le grand déblai.

Scénario 2 : le creusement est réalisé avec 3 machines :

- Les 2 premières machines comme précédemment démarrent dans le puits de La Poudrette pour réaliser 3351m en attaque montante vers le Sud et environ 3500m en attaque montante vers le Nord.
- Le 3ième tunnelier démarre à la tête Tremblay en attaque descendante pour aller à la rencontre du tunnelier de l'attaque Nord depuis La Poudrette (creusement sur 3500m environ). A la jonction, les machines sont démontées (les jupes sont abandonnées), et ressorties par le puits de la Poudrette pour être évacuées par voie fluviale.

Compte tenu de la position particulière du puits de La Poudrette, situé sensiblement au premier tiers du linéaire du tunnel, un dernier scénario peut être envisagé :

Scénario 3 : le creusement est réalisé avec 2 machines, dans les mêmes conditions de démarrage que le scénario 1, mais avec transfert en fin de creusement du tunnelier de l'attaque Sud (sortie Noisy) pour démarrer en tête Tremblay, en attaque descendante (creusement sur 1300m environ) et aller à la rencontre du tunnelier de l'attaque Nord depuis La Poudrette.

5.1.3 - Particularités d'exécution.

Le profil en long établi dans la zone de la tête Noisy (cf. plan APS.IGONT.220) résume bien les difficultés de réalisation du tunnel dans ce secteur du fait de la très faible couverture et des infrastructures routières et ferroviaires existantes.

Le passage du tunnelier sous la RN 186 se fait sous une faible couverture, 8m environ. Pour éviter tout désordre dans la chaussée, il est prévu de consolider la zone préalablement au passage du tunnelier en réalisant une voûte parapluie sur une trentaine de mètres.

Cette technique, très utilisée dans les terrains de mauvaise tenue en site urbain, consiste à sceller au coulis de ciment des tubes métalliques (type tubes pétroliers de ϕ 100 à 200mm) dans des forages parallèles à l'axe de l'ouvrage. Ce confortement sera réalisé à partir du puits de chantier de Noisy.

Un autre point singulier est le passage entre les fondations des piles du viaduc de l'A3. Le tunnel est axé entre les piles avec une garde de terrain de l'ordre de 4,00m par rapport aux coins les plus proches des semelles de fondations (cf. plan n° APS.IGONT.216). A priori, le viaduc repose sur des semelles superficielles fondées sur les marno-calcaires de St Ouen. Il est probable que les palplanches qui ont servi de blindages des fouilles pour les semelles soient restées en place.

Lors du creusement au tunnelier dans cette zone, l'entreprise devra faire preuve d'une vigilance particulière pour ne pas déconsolider le terrain environnant (bonne maîtrise de la stabilité du front). Cependant, afin de parer à toute amorce de déplacement des fondations, un traitement préalable est envisagé par pieux réalisés de part et d'autre du tunnel sur un linéaire d'ouvrage d'une cinquantaine de mètres permettant ainsi de limiter l'influence de la cuvette de tassement au passage du tunnelier sous faible couverture (9,00m).

Enfin, au droit du passage sous la voie de la Grande Ceinture, la couverture est également très faible – 5,0m environ. Il sera nécessaire de placer la voie sur tablier auxiliaire pendant les travaux et de traiter préalablement la zone par jet-grouting par exemple, si nécessaire.

5.2 - CHOIX DU TYPE DE TUNNELIER

A ce stade des études, le type de machine envisagé pour le creusement du tunnel n'est pas encore arrêté. En effet, différents paramètres influencent le choix du tunnelier, mais les paramètres relatifs à la maîtrise de la stabilité du front de taille sont déterminants (hétérogénéité des terrains et charge hydraulique).

Dans le cas présent, les machines doivent être à front confiné afin d'assurer la stabilité du front de taille. Les deux grandes méthodes actuelles de confinement – par pression de boue ou par pression de terre – sont envisageables.

5.2.1 - Bouclier mécanisé à confinement de boue

Dans ce type de machine, la chambre d'abattage avant, étanche, est remplie de boue bentonitique maintenue à une pression supérieure à la pression hydrostatique. La bentonite sert également à évacuer les déblais en mode hydraulique. Les déblais, mélangés à la boue sont pompés et évacués vers une usine de traitement et de recyclage de la boue à l'extérieur du tunnel.
L'avantage de ce type de machine réside dans la finesse de la régulation de la pression de front (notamment dans le cas d'une régulation par bulle d'air comprimée).
Le coût d'installation et de fonctionnement du système de traitement des boues constitue son principal inconvénient.

5.2.2 - Bouclier mécanisé à confinement de terre

Dans ce type de bouclier, l'extraction des matériaux d'abattage remplissant la chambre au moyen d'une vis d'Archimède est contrôlée, et le débit est asservi pour maintenir une pression constante au front. La maîtrise du confinement se fait par la vis, dont la longueur est fonction de la charge hydraulique ; là encore le contrôle du volume de matériau extrait est primordial.

L'avantage de cette solution est d'être plus souple ; son inconvénient est le manque de précision de la pression au front. Cependant des progrès ont été faits dans ce domaine et l'ajout de fluidifiant dans le déblai améliore les performances de ces machines.

Il faut noter également l'existence de boucliers mécanisés à confinement mixte, capables de réaliser un confinement de terre et un confinement de boue. C'est le cas notamment du tunnelier prévu pour le projet de bouclage de l'A86 à l'Ouest (tunnel VL) en région parisienne.

A ce stade du projet, le choix entre ces deux grands types de machines n'a pas de conséquence sensible dans la mesure où leurs coûts et leurs cadences sont assez proches.

Les investigations géologiques à venir préciseront les conditions de creusement et devraient permettre d'affiner le choix de la méthode de confinement.

5.3 - CADENCES – AVANCEMENT DES TUNNELIERS

Les tunneliers sont parfois associés à des performances d'avancement élevées qui peuvent être trompeuses et doivent être relativisées.

D'une manière générale, la vitesse moyenne d'avancement exprimée en mètres / mois est la valeur qui paraît la plus pertinente pour la planification des projets au tunnelier. Cette vitesse est très inférieure aux performances affichées par les constructeurs (vitesse instantanée, vitesse de pointe...).

La vitesse moyenne d'avancement est calculée comme le rapport entre le linéaire de tunnel effectivement creusé au tunnelier et le temps qu'il a passé dans le terrain depuis son démarrage jusqu'à sa sortie.

Ce temps inclut non seulement les temps de foration pure mais également les temps passés en arrêts :

- à caractère technique : mise en place des voussoirs, injections de bourrage, reconnaissance à l'avancement, maintenance, pannes de la machine, interventions au front...
- à caractère social : postes de nuit, arrêts de week-end, congés, grèves...

La bibliographie montre que :

- *pour les boucliers à pression de terre* : la vitesse moyenne reste dans la gamme des 200 à 300m/mois,
- *pour les boucliers à pression de boue* : la vitesse moyenne est fonction de la longueur forée. Elle passe de 100m/mois pour les tunnels de 1km longueur, à 200m/mois pour 3km de longueur, voire 300m/mois pour des longueurs de l'ordre de 4,5km et plus.

Ces valeurs ne sont bien sûr que des ordres de grandeur indicatifs. Dans le cas présent, compte tenu du retour d'expérience des entreprises sur les chantiers mécanisés en région parisienne, il a été envisagé une **vitesse moyenne d'avancement de 300m/mois**.

A cette vitesse optimale, une **marge pour aléa de 2 mois** sur la durée du creusement a été ajoutée de manière systématique ; ce qui ramène la vitesse moyenne à environ 250m/mois pour les différentes attaques (longueurs de creusement variant de 3,3 à 7 km).

La vitesse d'avancement moyenne journalière prise en compte dans l'étude de la logistique chantier (cf. §6 suivant) est de 15m/j.

De plus, il a été tenu compte d'une période de démarrage correspondant aux temps nécessaires à la mise en route, aux tests de la machine, à la formation et au rodage des équipes, et à la montée en cadence. Cette **période de démarrage** a été estimée à 6 mois à une vitesse moyenne de l'ordre de 160m/mois.

6 - LOGISTIQUE CHANTIER

6.1 - PUITS DE CHANTIER

A l'exception de l'extrémité Tremblay où la liaison CDG Express se retrouve en grand déblai, les attaques et sorties de tunnelier se font par l'intermédiaire de puits de chantier.

- Dans le cas d'un creusement avec 2 tunneliers (scénario 1), il est prévu deux puits : le puits de La Poudrette (2 entrées en terre) et le puits de Noisy (sortie de tunnelier).
- Dans le cas d'un creusement à 3 tunneliers (scénario 2) ou à 2 tunneliers avec transfert (scénario 3), une entrée en terre depuis l'extrémité de la tranchée de Tremblay en France est nécessaire, mais il n'y a toujours que deux puits : le puits de La Poudrette (2 entrées en terre) et le puits de Noisy (sortie de tunnelier). Dans cette hypothèse, les jupes de 2 tunneliers sont abandonnées à la jonction des machines (attaques Tremblay et La Poudrette) aux environs du PK 7+400 (scénario 2) ou PK 9+600 env. (scénario 3).

Ces puits ont plusieurs fonctions :

- la descente ou la remontée des éléments du tunnelier,
- le montage ou le démontage de la machine,
- la préparation des attaques et des sorties des machines (berceaux, voûte parapluie,...),
- le transit du matériel et du personnel,
- l'évacuation des déblais (sauf Noisy).

6.1.1 - Puits de chantier de Noisy

Le puits de chantier de Noisy est présenté sur les plans n° APS.IGONT.216.à 218.

Il s'agit d'un puits de sortie pour le tunnelier de l'attaque Sud de La Poudrette. Il est réalisé en parois moulées, axé sur la plateforme des voies CDG Express, et implanté à une vingtaine de mètres de l'axe de la chaussée de la RN 186 (avenue de Rosny).

Les dimensions de ce puits sont les suivantes :

- une largeur utile de 14,00m, ce qui permet de ménager un espace d'environ 1,70m de part et d'autre de la jupe de la machine, pour son démontage et sa manutention,
- une longueur utile d'environ 19,00m, permettant de remonter le bouclier et les remorques du train suiveur une à une, et laissant la possibilité de réaliser la voûte parapluie sous la RN186 en tubages pétroliers de grande longueur,
- une profondeur de 17,50m, correspondant à l'arase supérieure du radier situé à environ 1,00m au dessous du point bas du tunnel afin de permettre la mise sur berceau du tunnelier pour son démontage.

Le volume terrassé pour réaliser ce puits est d'environ 6500 m^3, et en fin des travaux, ce puits est intégré dans la tranchée couverte adjacente. Il sera donc obturé par une dalle supérieure et remblayé jusqu'au niveau du terrain naturel.

6.1.2 - Puits de chantier de La Poudrette

Le puits de chantier de La Poudrette est présenté sur les plans n° APS.IGONT.222 à 224.

Il est implanté sur l'axe du tracé, à une distance d'environ 100m du canal de l'Ourcq, dans la Zone Industrielle de La Poudrette sur la commune des Pavillons sous Bois, au Sud du pont de Monthyon, sur des terrains appartenant à la ville de Paris, bordant l'allée du Luxembourg. (cf. plan APS.IGONT.226).

Il s'agit d'un puits cylindrique de grande dimension, réalisé en parois moulées et destiné à la descente de deux tunneliers. Les dimensions importantes de cet ouvrage sont imposées par la simultanéité des deux chantiers de creusement et de leur emprise nécessairement indépendante en fond de puits, permettant de monter les deux machines dos à dos, en considérant une longueur de bouclier de l'ordre de 12m. En fait, pour ne pas péjorer le planning, il a été choisi de démarrer les deux machines pratiquement en même temps, à quelques semaines d'intervalle.

Les amorces du tunnel sont implantées sur les deux parois opposées Sud-Ouest et Nord-Est du puits.

Ce puits d'un diamètre utile de 30,00m, a une profondeur de 32,00m environ (arase supérieure du radier) soit 1,00m au dessous du point bas du tunnel pour permettre le montage des tunneliers.

Des massifs de réaction sont à construire en fond de puits pour le démarrage des tunneliers ; ensuite, durant la phase de creusement, un remplissage d'environ 2,00m est nécessaire pour poser les voies de service des trains d'alimentation des tunneliers.

Il traverse successivement des remblais, les Masses et Marnes du Gypse, les Sables Verts, les marno-calcaires de St Ouen et les Sables de Beauchamp. Les parois moulées sont fichées dans les Marnes et Caillasses sous-jacentes.

La cote du niveau de la nappe au droit du puits est à environ +40 NGF, pour une altitude du terrain naturel est à environ +56 NGF. La charge hydraulique maximale en fond de puits est donc inférieure à 20 m (2 bar).

A priori, le rabattement général de la nappe n'est pas envisagé du fait des répercussions sur l'environnement ; il a donc été retenu de réaliser une enceinte étanche descendue jusque dans les horizons marneux du Lutétien, suffisamment peu perméables pour tolérer des débits pompés n'excédant pas 1 l/s en condition de service, avec un radier général en fond de puits.

Les eaux d'exhaure du chantier seront rejetées dans le réseau d'égout après traitement (déshuilage, décantation...). Il n'est pas envisagé de rejeter ces eaux dans le canal de l'Ourcq. Des études complémentaires à un stade ultérieur, permettront d'affiner ce point (capacité du réseau EU, loi sur l'eau...).

6.2 - INSTALLATIONS DE CHANTIER

Dans sa partie souterraine, la liaison nouvelle CDG Express s'insère dans un environnement très urbanisé. Le choix d'un terrain comme installation de chantier dépend certes de son emplacement par rapport au tracé, mais également des possibilités offertes d'acheminement des matériaux et de leur impact sur l'habitat voisin.

Sur le linéaire du tunnel et pour l'ensemble des scénarios, plusieurs aires d'installation de chantier potentielles ont été recensées. Après analyse, 3 zones sont proposées, et leur implantation figurent sur les plans n° APS.IGONT.221 et 221bis.

6.2.1 - Aire d'installation de chantier de Noisy

A Noisy, les différents lots de travaux d'ouvrages d'art (tunnel, tranchées d'accès au tunnel, saut de mouton futur de la V2L4...) requièrent leur propre aire d'installation de chantier. Or les terrains disponibles dans cette zone sont rares, certains très enclavés, difficiles d'accès et/ou morcelés. Il sera donc souhaitable, à un stade ultérieur du projet, d'étudier ce point d'une manière globale. A priori, l'aire proposée pour le tunnel devrait pouvoir assurer également la logistique chantier des autres ouvrages.

Les seuls travaux inhérents au tunnel sont dus à la réalisation du puits et du confortement préalable sous la RN 186 pour le débouché du tunnelier, et à la sortie du tunnelier par le puits de chantier (démontage et repliement de la machine).

L'aire nécessaire est donc réduite, de l'ordre de 5000 m² voire moins. Elle est implantée le long de la RN 186, entre le talus bordant les voies impaires Paris – Mulhouse au Sud-Ouest et la voie routière d'accès au poste SNCF au Nord. La surface est constituée de broussailles avec une dénivelée notable. L'acquisition des pavillons existants en bordure de la RN 186 s'avère nécessaire.

Il est à noter que la RN 186 qui dessert le chantier est un axe de forte circulation routière, qui permet de se raccorder facilement à l'autoroute A3 à environ 1,2km (vers le pont de Bondy).

6.2.2 - Aire d'installation de chantier de La Poudrette

Il s'agit de l'aire principale d'installation de chantier pour le creusement du tunnel avec le démarrage quasi simultané des deux tunneliers à partir du puits de chantier.

Les surfaces nécessaires sont donc doublées (par rapport à une attaque unique), aussi bien pour la logistique propre aux tunneliers, que pour le stockage du matériel, des matériaux et le traitement éventuel des déblais. Il est envisagé une surface totale de l'ordre de 3 ha.

Après une entrevue avec le service des canaux de la ville de Paris et la municipalité des Pavillons sous Bois, l'aire d'installation est implantée sur 2 sites voisins, distants de 200m environ, tous deux dans la zone industrielle de La Poudrette, au sud de l'allée de Monthyon.

Le premier site, de 2,4 ha est situé le long de l'allée du Luxembourg, à coté des entrepôts Point P (cf. plan APS IGONT 226A), à une distance d'environ 80m du canal de l'Ourcq. Il comprend le puits de chantier, les usines de traitement des déblais et les locaux de bureaux...

Le second site de 0,8 ha, plus au Sud, en bordure du canal, permet le stockage des voussoirs ainsi que le chargement et l'évacuation des déblais par barges.

Un convoyeur à bande d'environ 2000 t/h permet le transit des matériaux de déblais d'un site à l'autre (cordon ombilical). Ce convoyeur est semi enterré en bénéficiant de la topographie du site et passe sous la voie de desserte de Point P (voirie future) en dalot.

Les circulations de camions se font essentiellement par l'allée du Luxembourg, ce qui permet d'éviter ainsi les circulations le long des berges du canal.

Les avantages de cette implantation sont multiples :

- surface importante (> 3ha), permettant une installation de chantier aisée,
- accès facile depuis les grands axes de la banlieue Est parisienne (RN 3, A3, etc...),
- à proximité du canal de l'Ourcq, qui présente dans cette zone une largeur suffisante (26m) pour les manœuvres de barges d'approvisionnement et d'évacuation des matériaux et matériels...,
- relativement à l'écart des habitations (zone industrielle), limitant ainsi fortement les nuisances vis à vis des riverains.

L'insertion d'une installation de chantier d'une telle ampleur dans un secteur globalement urbanisé nécessite la prise de mesures conservatoires dès le début des travaux, notamment au regard de la réglementation sur le bruit pour les installations de surface (dispositif de ventilation, habillage phonique des trémies de chargement, mur écran phonique sur une hauteur de 4,50m environ autour de l'emprise du puits et en rive du canal...), ainsi que pour la circulation des véhicules de chantier.

Il faut noter que durant au moins 2 ans, (3 ans dans le cas d'un percement en 2 attaques) le personnel, les tunneliers et le matériel, l'approvisionnement des voussoirs et l'évacuation des déblais d'une grande partie du tunnel transitent par ce site.

Les travaux de creusement sont envisagés en 3 postes de 8h par jour. Les horaires de chantier en surface devront être limités à une tranche horaire acceptable vis à vis des riverains du canal, 7h – 22h par exemple (à titre indicatif, pour les travaux EOLE dans Paris la plage horaire autorisée au regard du bruit était de 7h – 20h30).

Les matériaux issus de l'excavation sont ramenés à la surface en modes hydraulique ou mécanique (bandes transporteuses ou wagonnets) selon le type de bouclier.

- dans le cas d'un bouclier à confinement de boue, la centrale de séparation et de qualité de la boue doit être dimensionnée en fonction des débits correspondant à l'avancement maximal possible de la machine.
- dans le cas d'un bouclier à confinement de terre, le transport par wagonnets entraîne des discontinuités dans l'évacuation des déblais et un ralentissement lors des fortes cadences d'avancement. De plus, le marin a une teneur en eau assez forte et nécessitera un traitement avant transport et mise en dépôt.

L'alimentation électrique du site de La Poudrette devra être assurée par un poste source EDF en moyenne tension (de l'ordre de 20kV) avec, en cas de défaillance de cette ligne, une alimentation de secours permettant de reprendre les fonctions vitales liées au fonctionnement du chantier (confinement des chambres d'abattage, ventilation et éclairage en tunnel, marinage en position week-end...). En cas de panne simultanément des deux lignes EDF, des groupes électrogènes de secours basse tension (400V triphasé) alimentent les appareils et machines prioritaires.

6.2.3 - Aire d'installation de chantier de Tremblay

L'implantation de l'aire de chantier est envisagée derrière la maison d'arrêt de Villepinte, dans un environnement plat et agricole qui a priori ne devrait pas poser de problème particulier.
Un accès routier aisé est prévu depuis la RD 88 ou la RD 88^{E}.

- Dans le scénario de creusement n° 1, les travaux se limitent à la préparation de la sortie du tunnelier. L'aire d'installation de chantier peut être relativement réduite, de l'ordre de 5000m², suffisante pour permettre les travaux de confortement de la tête pour la sortie du tunnelier ainsi que le démontage et l'évacuation de la machine.
- Dans les scénarios de creusement n° 2 et 3, la surface nécessaire pour le montage et le démarrage du tunnelier est de 10 000m² ; elle permet l'implantation de toute la logistique d'un chantier mécanisé : usine de traitement éventuel des déblais, dépôt provisoire, stockage des voussoirs de revêtement, cantonnement, etc.

6.2.4 - Récapitulatif des aires d'installation de chantier possibles

Aires d'installation	*Avantages*	*Inconvénients*
Noisy sortie tunnelier	- accès routier aisé	- aire réduite et enclavée, à fort dénivelé - circulation routière et ferroviaire dense - nuisances / riverains - évacuation par camions uniquement
La Poudrette 2 attaques tunnelier	- aire vaste - accès routier aisé - peu de nuisances / riverains - évacuation par barges aisée - point bas du tracé	
Tremblay sortie tunnelier - sc.1 attaque tunnelier - sc.2	- aire vaste - accès routier aisé - pas de nuisances / riverains	- évacuation par camions uniquement

6.3 - TRANSPORT DES MATERIAUX

6.3.1 - Evacuation des déblais

Pour un tunnel de diamètre foré 10,10m et de 10 425m de longueur, le volume (en place) de matériaux excavés est de 840 000 m^3. Avec un coefficient de foisonnement de 1,20, le volume total de matériaux à transporter est alors de 1 000 000 m^3, ce qui représente un tonnage de $1{,}8.10^6$ tonnes (densité en place 2,1).

Si on considère une cadence moyenne de creusement au tunnelier de 15m/jour, le volume journalier de marin est 1500m^3 foisonnés; à noter que ce volume correspond à une vitesse d'avancement moyenne et que pour garantir cette cadence pendant le chantier, la vitesse de pointe du tunnelier atteindra des valeurs bien supérieures. Il faut donc dimensionner les équipements d'évacuation des déblais pour pouvoir absorber au moins 3000m^3/j par attaque, ce qui représente quelques 6000m^3/j pour la zone de La Poudrette.

Des stocks tampons de matériaux sont à prévoir pour absorber les volumes de déblais extraits pendant ces périodes de pointe. De plus il est souhaitable de pouvoir stocker sur site la production d'une semaine de marin, dans l'éventualité d'une difficulté d'évacuation des matériaux (crues, pannes, grèves,...). La capacité de stockage nécessaire est d'environ 15000 m^3 par attaque de tunnelier, soit 30 000m^3 pour le site de La Poudrette.

6.3.2 - Approvisionnement des voussoirs

Pour l'avancement moyen journalier (15m/j), il est nécessaire de transporter 450t/j par attaque (1 tunnelier), ce qui représente pour le site de La Poudrette : 900t/j pour 2 attaques, voire 1350t/j dans le cas de trois attaques desservies par le site de La Poudrette.

Ce tonnage est doublé en cadence de pointe, il pourrait donc être nécessaire de dimensionner les moyens de transport en conséquence. Toutefois, il parait utile de pouvoir bénéficier sur le site de La Poudrette d'une aire de stockage correspondant à environ une semaine de travail. Le schéma d'installation proposée (cf. plan APS.IGONT.222) permet de stocker quelques 240 anneaux de voussoirs, sur une surface d'environ 3600m^2 (en empilant les voussoirs et en considérant une surface moyenne de 15m^2 par anneaux). Dans ces conditions l'acheminement des voussoirs peut être envisagé en cadence moyenne.

6.3.3 - Modes de transport possibles

Plusieurs possibilités existent pour le transport et la desserte des différentes attaques chantier.

- **transport routier** : compte tenu du réseau routier existant (RN3, A3, A104...), le transport par camions est envisageable ; cependant cette solution est à éviter dans la mesure du possible à cause de l'environnement général très urbanisé. En effet, la fréquence de rotation des camions constituerait une nuisance certaine dans ces zones d'habitat relativement dense, et l'ajout d'un nombre important de camions pénaliserait fortement un trafic déjà saturé en période normale. Les tableaux récapitulatifs du §6.3.4 donnent les fréquences prévisibles pour chacun des sites envisagés.

  Concernant les sites de La Poudrette et Tremblay, il faut considérer :

  - pour l'évacuation des déblais : 150 camions par jour et par attaque (en cadence moyenne de creusement), qui peut atteindre 200 camions / jour / attaque en période de pointe (en résorbant l'excédant grâce à des dépôts provisoires),
  - pour l'approvisionnement des voussoirs : 24 camions par jour et par attaque (en cadence moyenne), à raison de 2 à 3 camions par anneau de voussoirs.

  Si le transport par camions peut être évité au site de La Poudrette grâce à la présence du canal, le site de Tremblay, est totalement dépendant de ce type de transport.

  En ce qui concerne le site de Noisy, compte tenu du volume terrassé (uniquement le puits qui représente 6500m^3), les fréquences seront bien moindre que les sites précédents et le transport se fera obligatoirement par voie routière.

- **transport par voie fluviale** : Cette solution est particulièrement intéressante pour l'évacuation des déblais des tunneliers et l'approvisionnement en voussoirs du site de La Poudrette.

Le canal de l'Ourcq dans cette zone est en effet suffisamment large (26m de largeur en moyenne) pour permettre l'évolution et le stationnement de barges.

Le transport fluvial envisagé correspond à des navettes entre Les Pavillons sous Bois et le port de Gennevilliers, en utilisant le canal de l'Ourcq (9km), puis le canal St Denis (6,6km) et enfin la Seine (6,4km), ce qui représente un parcours de 22km.

Sur la Seine les capacités de transport sont importantes (convois de 3000 à 5000t de plusieurs barges avec pousseur développant 6000ch.

Sur le canal St Denis et le canal de l'Ourcq les possibilités sont plus modestes, mais toutefois acceptables pour ce projet.

Le tableau suivant résume les caractéristiques de ces deux canaux :

Gabarits autorisés	**canal St Denis**	**canal de l'Ourcq**
Largeur type du canal	30m	26m (rétrécissements à 18m)
Tirant d'air (gabarit aérien)	4,40m	4,00m
Tirant d'eau (mouillage mini)	2,60 à 3,00m	2,60m

Ces voies d'eau autorisent le gabarit « Freyssinet » (40m de longueur, 5,25m de largeur, 2,20m de tirant d'eau, 3,70 de tirant d'air) permettant de transporter 250 à 300t de fret. Ce gabarit a été amélioré par approfondissement et allongement des écluses du canal St Denis, ce qui autorise sur le parcours envisagé l'utilisation de barges de 500 à 600t avec pousseur.

Il faut noter également que le canal St Denis est ouvert à la navigation uniquement la journée, durant 13h (de 6h30 à 19h30), ce qui nécessitera une organisation adaptée pour la rotation des pousseurs. Le temps de trajet Les Pavillons sous Bois – Gennevilliers est estimé à 6h pour parcourir les 22km et passer les 7 écluses du canal St Denis.

L'emploi de barges avec pousseur permet de réaliser des stockages flottants à bon compte puisque les manutentions de mise en stock et de reprise sont évitées.

Les déblais doivent être relativement secs pour pouvoir être facilement transportés par barges. Ces déblais transitent dans le port de Gennevilliers et sont ensuite emmenés par convois vers des carrières épuisées pour y être enfouis selon les normes en vigueur (centre d'enfouissement de classe 3). La contrainte importante porte sur la pollution des déblais par l'emploi d'adjuvants au front de taille (agents dispersants ou lubrifiants pour les boucliers à pression de terre...). Une étude d'écocompatibilité sera à mener à un stade ultérieur du projet.

Si l'on considère des barges de 500 à 550t de charge utile pour tout type de transport sur le site de La Poudrette, il faut :

- *pour l'évacuation des déblais* : en cadence moyenne de creusement au 2 tunneliers (2 fois 15m/j), le tonnage de déblais à évacuer chaque jour est de 5000t, ce qui représente 10 barges. En cadence maximale la quantité de déblais est doublée, mais peut être résorbée en partie grâce au dépôt tampon sur le site.

  En tenant compte des périodes de circulation sur le canal St Denis, l'évacuation d'une journée moyenne d'excavation représente 2 barges par heure, (départ de La Poudrette entre 7h00 et 14h00, pour un trajet de 6h).

- *pour l'approvisionnement en voussoirs* : dans le cas de 2 attaques (scénario 1), à raison de 15m/j (cadence moyenne), les 2 tunneliers nécessiteront l'approvisionnement de 900t/j de voussoirs ; ainsi deux barges équipées spécifiquement pour ce type de transport suffisent amplement, sachant qu'en période de pointe, on peut puiser dans le dépôt tampon de 240 anneaux sur site.

Dans le cas d'une 3ième attaque à Tremblay (scénarios 2 et 3), il est tout à fait possible d'approvisionner par voie d'eau jusqu'à La Poudrette la totalité des voussoirs nécessaires au 3 attaques, ce qui représente alors 1350t/j, soit 3 barges dédiées à ce transport. La partie des voussoirs de l'attaque Tremblay est ensuite acheminée par la route à raison de 24 camions par jour (2 à 3 camions par anneau de voussoirs).

- *pour les autre matériaux*, nécessaire à la construction du puits et des équipements, ainsi qu'à l'approvisionnement de la centrale à béton ou de l'usine de bentonite, les 10 barges servant à l'évacuation des déblais pourront servir également à l'approvisionnement du chantier à leur trajet de retour, afin de limiter les voyages à vide.

- *pour le transport des tunneliers et matériels* : à l'image du chantier de l'A86, les tunneliers peuvent être acheminés en pièces détachées par voie d'eau, limitant ainsi la circulation des convois exceptionnels en zone urbanisée, au transit du matériel nécessaire à la 3ième attaque (scénario 2).

  A priori les éléments de tunneliers les plus lourds ne dépassent pas 150t, pour un poids total de la machine en ordre de marche d'environ 2000t (bouclier ϕ 10,10m + back up). De plus, un train d'approvisionnement pour la logistique tunnelier pèse environ 100t à vide.

6.3.4 - Récapitulatif des modes de transport et fréquences envisagées

Hypothèses retenues :- cadence moyenne d'un tunnelier : 15 m / jour
- amplitude horaire : 7h – 22h
- masse volumique des terres en place : 2,1t/m^3
- volume utile d'un camion : 10m^3 ou 20t
- tonnage d'une barge : 500 à 550t

Scénario n°1 : 2 attaques à La Poudrette

Aire d'installation de chantier	*Transport par camions*	*Transport par barges*
Noisy	déblais ≈ 20 camions / jour	impossible
La Poudrette	*déblais = 300 camions / jour* *voussoirs = 48 camions / jour*	déblais = 10 barges / jour voussoirs = 2 barges / jour
Tremblay	négligeable	impossible

Scénarios n°2 et 3 : 2 attaques à La Poudrette + 1 attaque à Tremblay

Aire d'installation de chantier	*Transport par camions*	*Transport par barges*
Noisy	déblais ≈ 20 camions / jour	impossible
La Poudrette	*déblais = 300 camions / jour* *voussoirs = 48 camions / jour*	déblais = 10 barges / jour voussoirs = 3 barges / jour
Tremblay	déblais = 150 camions / jour voussoirs = 24 camions / jour	impossible

Les mentions en italiques sont les solutions à ne retenir qu'en second choix.

6.3.5 - Conclusion sur la desserte des différentes attaques.

Les volumes journaliers importants à excaver sur une période d'au moins deux ans voire trois, ainsi que l'environnement très urbanisé, la présence du canal de l'Ourcq, incitent à éviter un mode d'évacuation des déblais par route. Un tel choix impliquerait des circulations à la limite du possible pour le site de La Poudrette notamment.

Ceci amène à préconiser un mode d'évacuation par barges depuis l'aire de la Poudrette. Seule la desserte du chantier de l'attaque Tremblay (scénarios n°2 et 3) se ferait par route.

De même, compte tenu des faibles quantités de déblais (6500m^3) du chantier de la tête Noisy, l'évacuation des terrassements du puits peut se faire par camions ; la fréquence de rotation restant acceptable sur un laps de temps relativement court (1 mois environ).

7 - ESTIMATIONS

Il faut rappeler que le coût d'un tunnel dépend essentiellement de l'environnement géologique (lithologie, structure, hydrogéologie...), de la logistique chantier (accès, installations, dépôt, attaques...), de la méthode d'exécution (abattage à l'explosif, machine à attaque ponctuelle, tunnelier) et de la conjoncture économique du moment.

En méthode mécanisée et à ce stade des études, les coûts du tunnel prennent en compte les déblais au tunnelier, le transport de ces déblais et leur mise en dépôt, la fourniture et la pose des voussoirs préfabriqués en béton armé, les injections du vide annulaire derrière la jupe, et le béton de second œuvre en radier (remplissage en grave ciment et béton pour les banquettes et la dalle de roulement), ainsi que les postes complémentaires (drainage, auscultation,...) évalués à 4%.

A titre indicatif, le coût unitaire du génie civil tunnel seul est d'environ : **115 kF/m**. (coût H.T.), hors aménagements connexes (zones de tête, confortements) et logistique (puits et installations de chantier, tunneliers) ; il concerne un linéaire de 10 395m creusé au tunnelier.

Les coûts comprennent également la mise à disposition, l'amenée et le montage des tunneliers, leur démontage et leur repliement en fin de chantier, pris en compte selon le scénario envisagé, notamment : le démontage, déplacement et remontage d'un tunnelier dans le cas du scénario n°3 (avec transfert).

Le coût d'une machine est estimé à 170MF, pour un diamètre de foration de 10,10m.

A ces coûts d'ouvrage sont ajoutées les parts fixes forfaitaires, toujours importantes en travaux urbains mécanisés ; il s'agit des installations de chantier, des puits d'accès et des aménagements hydrauliques (relevage et traitement des eaux d'exhaure), ainsi que de l'usine de traitement des déblais si nécessaire.

Le comblement des puits de chantier est pris en compte ainsi que la restitution des aires d'installation de chantier libres de toute occupation.

Sont également pris en compte dans les estimations, les coûts des équipements définitifs de l'aménagement hydraulique de relevage des eaux à La Poudrette, ainsi que des équipements de sécurité (colonne incendie et prises pompier, mains courantes, anneaux de relevage, éclairage, repérage des issues...).

Les confortements nécessaires au passage du tunnel sous la RN186 et entre les piles du viaduc de l'A3, ont été également pris en compte ; de même pour le renforcement de la tête du tunnel coté Tremblay, pour le débouché ou l'attaque du tunnelier.

Les coûts du génie civil tunnel sont établis :

- hors taxes, hors frais généraux, aux conditions économiques de juin 2000,
- hors frais d'étude de reconnaissance et de maîtrise d'œuvre,

- hors acquisitions foncières,
- hors frais d'indemnisations des riverains,
- hors travaux préliminaires (déviations de réseaux,...),
- hors tranchées d'extrémités,
- hors équipements ferroviaires (voie, caténaire, SES,...).

Le montant du génie civil du tunnel est résumé dans le tableau suivant selon les deux scénarios envisagés :

	Scénario n° 1 *(2 tunneliers)*	***Scénario n° 2*** *(3 tunneliers)*	***Scénario n° 3*** *(2 tun. + transfert)*
Génie civil tunnel	1 176 MF	1 190 MF	1 191 MF
Aménagements connexes	88 MF	88 MF	88 MF
Logistique chantier	486 MF	666 MF	486 MF
Montant total H.T. (c.e.06.00)	**1 750 MF**	**1 944 MF**	**1 765 MF**

Par ailleurs, le coût des reconnaissances complètes du projet (sondages, investigations géophysiques, puits d'essais,...) est estimé à 15 MF.

Enfin, en ce qui concerne le degré d'incertitude de ces coûts, il faut noter qu'en matière de travaux souterrains, il est fréquent de constater des écarts entre les coûts prévisionnels et les coûts de réalisation plus élevés que dans d'autres domaines du génie civil. Les raisons sont nombreuses, mais l'un des facteurs prépondérants est la connaissance relative du sol dans lequel les ouvrages seront creusés. Il est d'usage de considérer une fourchette d'incertitude de + ou - 20 % à ce stade des études.

Aussi pour fiabiliser les coûts au stade ultérieur des études, des reconnaissances sont indispensables afin de cerner au mieux les problèmes et d'apprécier les risques encourus.

8 - DELAIS DE CONSTRUCTION

Les différents plannings d'exécution du tunnel sont présentés sur les plans APS.IGONT. 250, 251 et 252.

Les hypothèses prises en compte pour l'étude des différents scénarios sont les suivantes :

- Le délai de commande et de construction d'un tunnelier est estimé à 1 an, auquel il faut ajouter les 3 mois nécessaires au montage et aux essais avant démarrage des travaux de creusement.
  Il faut noter qu'une machine d'occasion permettrait probablement de gagner 6 mois sur un délai de 15 mois.

- Pour les attaques à partir du puits de La Poudrette, le démarrage du second tunnelier est envisagé 2 à 3 semaines après le premier.

- Cette attente (15 mois) est mise à profit pour réaliser les études d'exécution, les installations de chantier, l'aménagement des accès, les terrassements des attaques (puits). Le délai de construction du puits d'attaque de La Poudrette peut être estimé à 6 mois, et le puits Noisy à 4 mois.

- Pour le creusement au tunnelier, l'expérience des chantiers actuels montre qu'il faut tenir compte d'une période de rodage des équipes tunneliers d'environ 6 mois. La cadence d'excavation retenue pendant cette période est d'environ 8 m/j soit 160 m/mois.
  Après la période de rodage, la vitesse de progression du tunnelier peut atteindre la moyenne de 15 m/j soit 300 m/mois.
  Ces cadences sont établies sur la base de trois postes de 8 heures par jour à raison de 15 postes par semaine. Les opérations d'entretien de la machine, de reconnaissances au front et d'auscultation sont effectuées pendant le poste de nuit et éventuellement le sixième jour. Toutefois, en cas de dérapage du planning, ce poste de nuit peut devenir productif.

- Une marge pour aléas de 2 mois à 3 mois sur chaque machine est prise en compte selon le scénario considéré ce qui ramène à 250m/mois les cadences moyennes.

- La cadence moyenne retenue pour les travaux de finition est de 500 m/mois.

- Suivant les scénarios, les travaux de finition sont achevés de 5 à 6 mois après le percement du tunnel. Ces délais sont mis à profit pour le démontage et le repliement des tunneliers, ainsi que le comblement des puits chantiers.

- En fin de chantier, après l'achèvement des travaux de finitions, une période de 2 mois est prise en compte pour le repliement des aires d'installation de chantier.