TUNNEL ZAOUIAT AIT MELLAL SUR L'AUTOROUTE MARRAKECH – AGADIR

Par : M. BOUJEMAOUI (Autoroutes Du Maroc)

Résumé

Le tunnel de Zaouiat Ait Mellal est situé au sud-ouest de la ville d'Imintanout dans la commune rurale Oued El Bour. Il est long d'environ 564 m. Il est constitué de deux tubes abritant chacun deux voies de circulation. La largeur roulable de la chaussée dans chaque tube est d'environ 8 m, bordée de deux trottoirs de sécurité. La hauteur libre dégagée pour la circulation est d'environ 5.4 m.

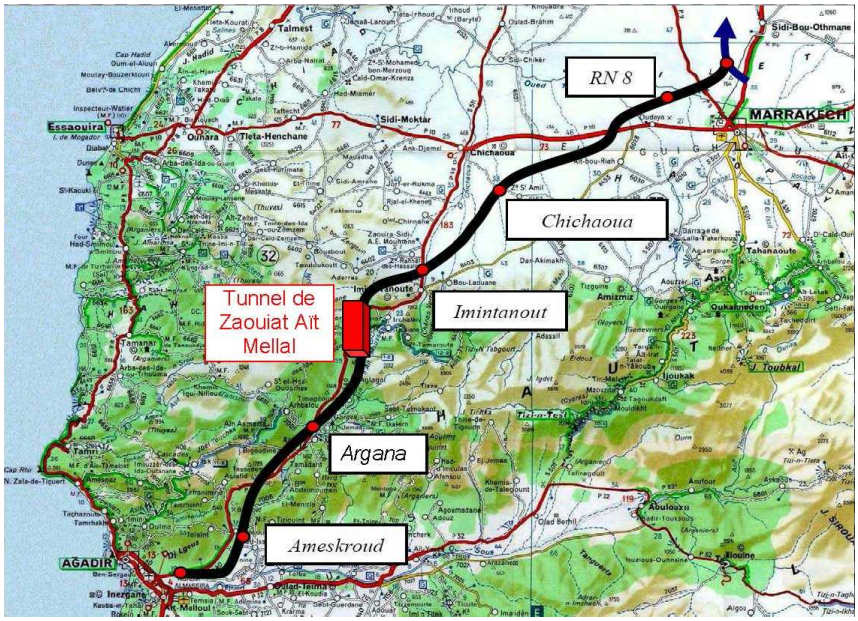
La couverture maximale est d'une centaine de mètre. Les deux tubes présentent un entr'axe constant de 19m. Le tunnel a été creusé dans des formations se caractérisant par une succession de bancs marneux, marno-calcaires et calcaires massifs à très fracturés, de moyenne à faible résistance mécanique mais de bonne tenue.

L'excavation a été assurée par des moyens mécaniques.

Le niveau d'équipement du tunnel a été défini en conformité avec la circulaire interministérielle française 2000-63 et en fonction de l'étude spécifique des dangers et d'analyse des risques réalisés au tout début de l'étude.

Il est doté des équipements nécessaires au maintien d'un haut niveau de sécurité, incluant des galeries de communication intertubes, des niches incendie et sécurité, un éclairage, des batteries de ventilateurs en voûte, un réseau d'appel, de surveillance et de détection des incidents, des conduites anti-incendie et un réseau d'assainissement et de recueil des liquides dangereux.

La supervision du tunnel est assurée par un PC de contrôle relié par fibre optique au tunnel et situé à 95 Km de celui - ci. Néanmoins, cette supervision peut aussi être assurée localement à partir des locaux techniques situés à proximité de la tête nord du tunnel ou à l'échangeur d'Imintanout situé à 15km du tunnel.



Historique des études

Le tracé retenu lors de l'étude d'avant – projet (tracé en vert : fig 1) menée par le Concédant avait opté au niveau de la section à relief difficile située entre le PK1,1 et le PK12,2 du tronçon Imintanout – Argana de l'autoroute Marrakech – Agadir pour un passage en terrassement accompagné d'une réduction de la catégorie de L1 à L2. Le tracé retenu au niveau de cette zone était caractérisé par des pentes importantes de profil en long de l'ordre de 6% et des rayons en plan faibles de l'ordre de 400 à 450 m.

Lors de la phase 1 des études d'exécution menées en 2005 par ADM, les premières variantes étaient toutes orientées vers le même principe que celui de l'avant – projet en essayant d'améliorer les caractéristiques géométriques et de diminuer les quantités de terrassement.

Suite aux reconnaissances géotechniques réalisées au niveau de cette phase, il s'est avéré que les hypothèses plutôt favorables prises initialement concernant les pentes de talus de déblais (Pente de 3V/1H) et la qualité du sol support pour les remblais n'étaient pas satisfaites.

En effet, l'exploitation des résultats de ces reconnaissances a eu pour conséquence d'augmenter énormément les quantités de déblais et de prévoir des viaducs au droit des zones de remblais de très grande hauteur.

L'accroissement considérable des volumes de déblai et la diminution très importante des volumes de remblai qui ont en résultés ont entraîné des excédents de matériaux de plusieurs millions de mètres cubes.

Dans le cadre du travail d'optimisation menée au niveau de la phase 2 des études d'exécution, quatre variantes ont été étudiées dont deux prévoyaient la possibilité de passage en tunnel. Néanmoins, la deuxième variante tunnel n'était pas faisable à cause des accidents géologiques (pendage vertical des couches) de la zone traversée.

Ces variantes se distinguaient à la fois par la nature du passage terrassement

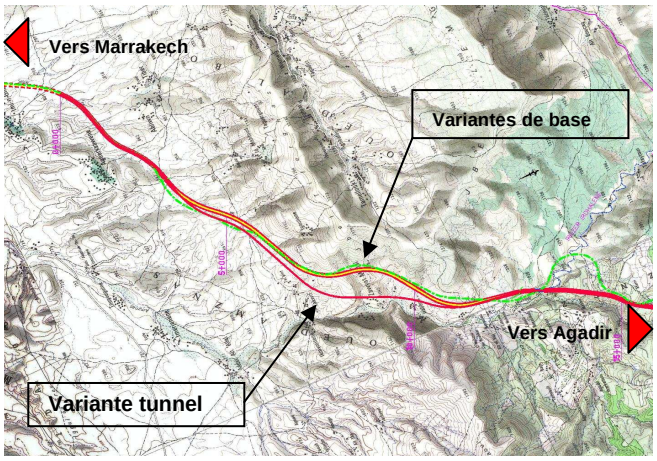


Figure 1 : Variantes de tracé au niveau de la section PK5,4 – PK 12,2 de l'autoroute Imintanout – Argana

Photo 1 : Vue du flanc de la tête sud du tunnel

Photo 2 : Vue du flanc de la tête nord du tunnel

(variantes 1 et 2) ou tunnel (variante 3), les caractéristiques du profil en long en forte pente (variante 2) ou pente modérée (variante 1).

Une description sommaire des variantes, les quantités correspondant aux postes les plus important ainsi qu'une évaluation sommaire figurent sur le tableau n°1.

Tableau 1 : Récapitulatif des variantes étudiées

Poste	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Déblai	7 500 000 m3	4 500 000 m3	2 800 000 m3
Remblai	2 150 000 m3	2 150 000 m3	1 600 000 m3
Viaduc	2 viaducs : 340 et 300 ml	3 viaducs : 340, 340 et 340 ml	1 viaduc : 480 ml
Tunnel	Néant	Néant	1 tunnel : 500 ml
Coût en millions de dirhams	605	535	506

Outre l'aspect coût, la variante n°3 a été retenue pour la suite des études pour tous les avantages qu'elle procure :

- Aspect environnemental : Les quantités de dépôt ont été réduites de deux millions de mètre cubes ;
- Aspect géométrique : le tracé est caractérisé par des caractéristiques géométriques confortables aussi bien en tracé en plan qu'en profil en long ;
- Aspect coût : la variante tunnel est moins chère que les variantes terrassement.

INTERVENANTS DU PROJET

Phase étude

Lors de cette phase ont intervenus le groupement INGEMA – INGEROP pour l'étude préliminaire du tunnel et le groupement SETEC TPI et MAROC SETEC pour l'étude d'exécution et la préparation des dossiers de consultation des entreprises (DCE).

La maîtrise d'œuvre a été assurée par l'équipe chargée du projet de l'autoroute Imintanout – Argana au sein de la Division des études d'ADM.

EGIS Tunnel a tout le long du projet assuré l'assistance au maître d'œuvre étude.

Les essais de laboratoire ont été réalisés par le Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes (LPEE).

Pour l'aspect sécurité et exploitation comprenant l'établissement du plan d'intervention et de sécurité, le calcul du risque intrinsèques et l'établissement des cahiers des consignes ADM a pris l'attache du BET EGIS TUNNEL.

Phase travaux

Les travaux ont été divisés en deux lots principaux :

Lot génie civil : ce lot comprenant tous les travaux de génie civil y compris la réalisation des têtes a été confié à l'entreprise portugaise TECNOVIA pour un montant de 215 millions de DH.

Lot équipement : ce lot comprenant tous les travaux d'équipements (Moyenne tension, basse tension, GTC, ventilation, éclairage, supervision,….) a été confié à l'entreprise espagnole INDRA pour un montant de 53,5 millions de DH.

La maîtrise d'œuvre des travaux a été assurée par la DTCA (Division des travaux de l'autoroute Chichaoua – Argana) assisté par un expert permanent mis en place par SETEC.

Les essais et contrôles ont été réalisés par le laboratoire de l'Entreprise dans le cadre des contrôles à la charge de celle – ci et par le LPEE pour le compte de la maîtrise d'œuvre travaux.

CONTEXTE GEOLOGIQUE

Contexte géologique et structural

L'ouvrage s'intègre dans un massif rocheux sédimentaire de l'Eocène et du Crétacé à dominante calcaire.

De point de vue structural, la zone de l'ouvrage est constituée par une série sédimentaire normale monoclinale à pendage faible (15 à 20°) vers le nord.

Aucune faille majeur ou structure tectonique de grande ampleur n'a été observée dans la zone d'implantation de l'ouvrage.

Hydrogéologie

Les écoulements temporaires dans le massif liés aux épisodes pluvieux circulent à la faveur des fractures de la roche, des zones de dissolution karstiques des calcaires et des discontinuités stratigraphiques, en étant canalisés en direction du nord par le pendage général de la structure. Aucune nappe phréatique n'a été détectée.

Géologie

Les différents faciès présents dans le massif traversé par le tunnel ont été classés en 7 classes de I à VII :

- Marnes et marcno-calcaires localement gréseux, formant le versant nord de la butte ;
- Calcaire massif beige (type I), formant le sommet de la butte,
- Calcaire massif localement vacuolaire et siliceux (type II et III) formant le sommet de la falaise tête sud

Photo 3 : Calcaire massif localement vacuolaire et siliceux formant le sommet de la falaise tête sud

- Calcaire fragmenté rognoneux (type IV et V) formant la partie médiane de la falaise tête sud ;

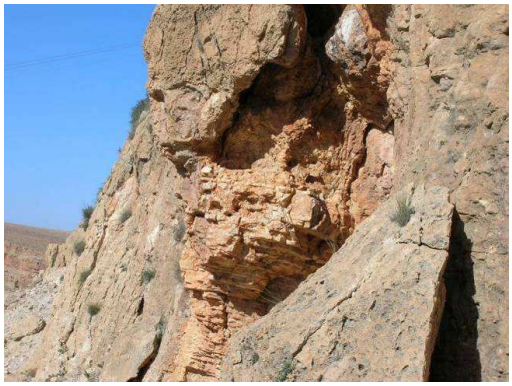


Photo 4 : Calcaire fragmenté rognoneux (type IV et V)

- Calcaire beige clair moyennement fracturé à fracturé (type VI)
- Marno-calcaires et marnes gris-beige (type VII) .

Les types I à VI ont des matrices calcaires qui ne présentent pas de caractère évolutif ou de sensibilité à l'eau. En revanche, les marnes et marno-calcaires du versant nord de la butte et les marno-calcaires et marnes gris-beige du type VII sont des terrains présentant une composante argileuse et dont le comportement peut fortement varier dans le temps et en présence d'eau.

<u>Reconnaissances Géotechniques</u>

Sondages

Les reconnaissances réalisées au stade des études préliminaires en 2006 comprenaient :

- 7 sondages carottés et essais pressiometriques ;
- 1 sondage dilatométrique au niveau de la tête sud ;
- 1 sondage pressiométrique au niveau de la tête nord.

Tous les sondages ont été descendus à 10m au dessous du niveau de la ligne rouge du tunnel.

Essais de laboratoire

Sur les sondages réalisés, des essais de laboratoire ont été programmés dans le but de caractériser les propriétés de la matrice rocheuse qui ont une incidence sur le mode d'excavation.

Les essais de laboratoire réalisés ont concerné en particulier :

- Densité et porosité ;
- Teneur en carbonate ;
- Résistance uni-axiale à la compression ;
- Module d'Young ;
- Vitesse sonique ;
- Abrasivité ;
- Résistance à la traction ;
- Résistance à la compression entre pointes (essai Franklin).

Les moyennes des valeurs par type de faciès sont récapitulées dans le tableau ci-après :

Tableau 2 : Caractéristiques des faciès I à VII

	I	II	III	IV	V	VI	VII
Densité (t/m3)	2.42	2.65	2.54	-	-	2.49	-
Porosité (%)	10.2	4.5	5	-	-	6	-
Résistance uni-axiale (1)	39	32.9	39.7	23.3	21.8	32	26.6
Module d'Young (Mpa)	53.7	55.8	64.8	50	33.3	37.5	29.7
Vitesse sonique (m/s)	4500	4400	4900	3500	4181	2900	2300
Abrasivité (1/10 mm)	1.8	3.5	3.6		2	1.8	4
Résistance à la traction (Mpa)	4.5	5	3.7	2.8	3	6	4.2
Résistance à la compression (Mpa)	39	32.9	39.7	23.3	21.8	32	26.6

(1) : sur échantillon sec

Les ouvrages de tête et l'architecture

Devant la beauté du site, sa puissance minérale brute et sa richesse expressive, les architectes du projet MM LAVIGNE et CHERON ont évité tout geste précieux ou artificiel dans le parti architectural adopté.

Photo 5 : Site du tunnel et de ses alentours

Aussi ont – ils cherché à privilégier la sobriété, la modestie dans le dessin des têtes du tunnel afin que celles – ci s'insèrent au mieux dans le paysage.

Les principales pistes de recherches architecturales ont été le travail à l'échelle et le respect de la minéralité.

En effet, une recherche a été faite pour tenir compte de la géologie et de la topographie du site et ainsi réduire réellement et visuellement l'atteinte aux versants due aux travaux de terrassements qui seront réalisés au droit de têtes.

La minéralité est l'autre élément majeur du site qu'il fallait respecter. Aussi, l'usage de matériaux massif (béton) a – t – il été privilégié au détriment d'éléments plus manufacturés ou usinés (métal) . De même, le choix des teintes a été guidé par l'harmonie existante, dans la gamme des jaunes sables jusqu'au marron – ocre des affleurements rocheux.

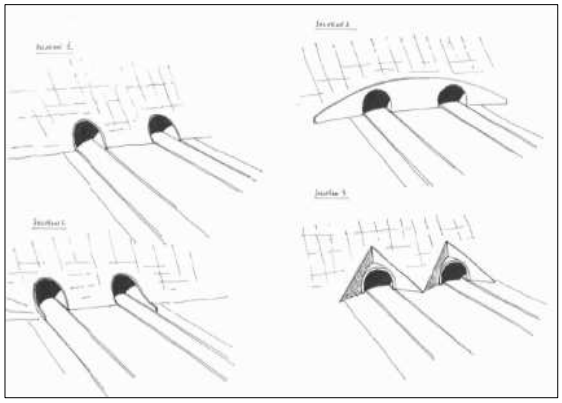


Figure 2 : Variantes architecturales des têtes

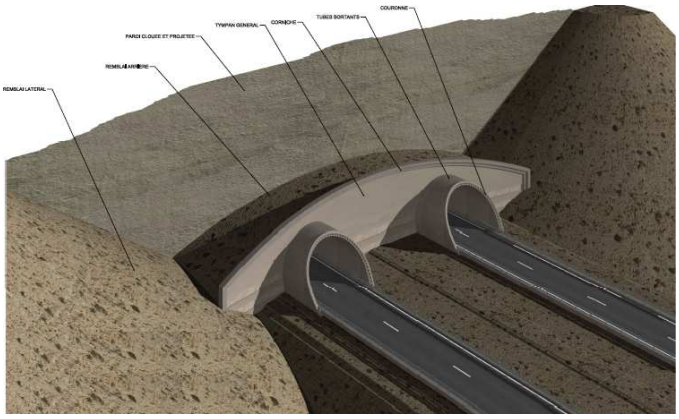


Photo 6 : Esquisse architecturale tête Nord

Photo 7 : Esquisse architecturale tête Sud

Les caractéristiques de l'ouvrage

Le tunnel comporte deux tubes à deux voies de circulation de 3.50m de largeur chacune, une bande dérasée de droite de 0.5m et une bande dérasée de gauche de 0.5m. Des trottoirs de 0.74m et 0.94m bordent la chaussée respectivement du côté gauche et droit.

Les deux s'inscrivent dans un gabarit de 8m de largeur roulable et 5.00m de hauteur libre minimale. La vitesse de référence est de 100 Km/h pour les véhicules légers et de 80 Km/h pour les véhicules lourds.

La longueur du tunnel creusé est de 496m. La longueur totale des ouvrages, tunnel creusé et ouvrages à l'air libre (faux tunnel) est de 564m.

Le tracé en plan est en partie en courbe et en partie en alignement droit. Le profil en long descend du Nord vers le Sud avec une pente constante de à 1.39%.

Les caractéristiques du tunnel figurent sur le tableau 3 ci – après :

Tableau 3 : Caractéristiques du tunnel

Caractéristique	Valeur
Longueur	546 m
Section moyenne	65 m² environ
Pente moyenne	+1,4% (Dans le sens Sud-Nord)
Profil	2 tubes monodirectionnels à 2 voies de 3,50 m
Bande dérasée	0,5 m à droite et à gauche dans chaque tube
Trottoirs	0,94 m du côté droit & 0,74 m du côté gauche
Hauteur libre	5,00 m + 50cm de revanche de protection
Niches de sécurité/incendie	2 par tube + 1 à chaque tête
Galeries Communications intertubes	2
Transport de Matières Dangereuses	Oui (autorisé)
Vitesse autorisée	100 Km/h

Les profils en travers types à l'intérieur du tunnel et au droit des niches et galeries sont représentées au niveau des figures 3 et 4 ci-après.

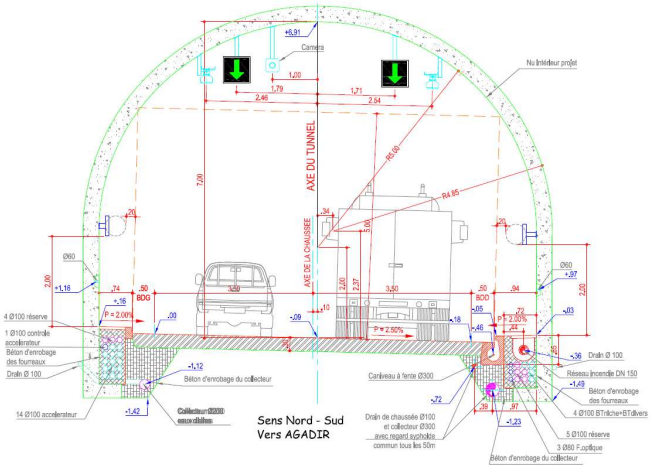


Figure 3 : Profil en travers type du tunnel

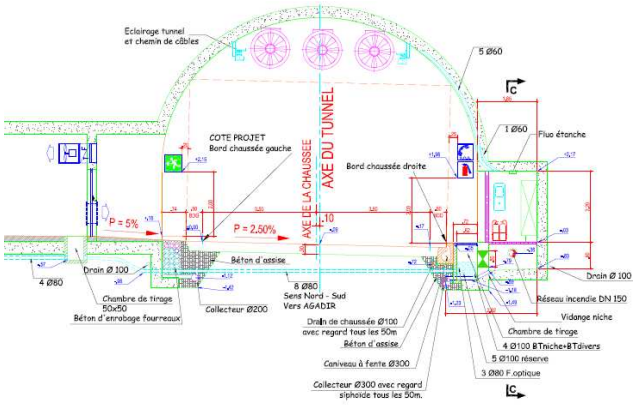


Figure 4 : Coupe sur niche et galerie

Les équipements

Le tunnel Z.A.M est équipé de systèmes de sécurité et d'exploitation garantissant un fonctionnement optimal et un niveau de sécurité élevé : ventilation sanitaire et de désenfumage assuré par 14 accélérateurs dans le tube Ouest et 11 dans le tube Est, éclairage renforcé et variable aux entrées, plots de jalonnement chaque 10m, réseau de défense incendie y compris un réservoir de 200m3, recueil des matières dangereuses par caniveau, siphons coupe-feu et bassin déshuileur, niches de sécurité et d'incendie, deux galeries de communication intertubes, réseau d'appel d'urgence, système de surveillance vidéo équipé de DAI (Détection Automatique d'Incidents) à l'aide de 17 caméras dont 2 au niveau des entrées, installations de

contrôle d'atmosphère à l'aide de détecteur de niveau de CO et NO, système de fermeture d'accès au tunnel, signaux d'affectation des voies et système de régulation de trafic à l'aide de PMV et de PMP à proximité du tunnel.

L'alimentation électrique du tunnel se fait depuis la ville de Chichaoua, pas le biais d'une ligne 22KV dédiée et de deux postes transformateurs de 1250 KVA chacun.

De plus, les équipements importants seront alimentés par une ASI (« alimentation sans interruption ») d'une autonomie d'au moins 30 min.

En cas de perte de l'alimentation ONE, un groupe électrogène de 4h d'autonomie est prévu, le groupe électrogène alimentera tous les équipements excepté la ventilation.

Tous ces équipements sont reliés à la GTC (Gestion Technique Centralisé) implanté au niveau du local technique situé à proximité de la tête nord du tunnel.

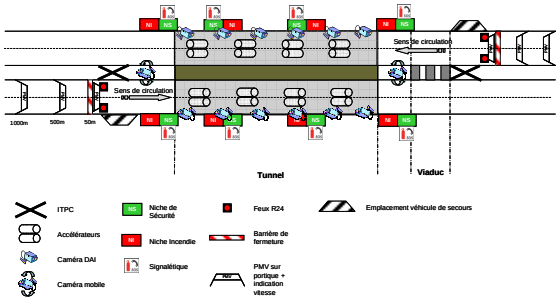


Figure 5 : Synoptique des équipements de sécurité

Le système de supervision du tunnel

L'exploitation du tunnel de Zaouiat Aït Mellal sera intégrée dans le système global mis en œuvre pour la gestion de l'autoroute Marrakech-Agadir.

La supervision se fera à partir du PC de supervision situé au niveau du centre d'exploitation de l'échangeur Marrakech Ouest situé à environ 95 Km du tunnel grâce à une liaison en fibres optiques.

Le PC de Marrakech est secondé par un point d'appui situé au niveau de l'échangeur d'Imintanout à environ 15km du tunnel.

Le point d'appui comporte un poste de contrôle pour la gestion et la surveillance du tunnel, des locaux pour la gendarmerie et des locaux pour les sapeurs pompiers en plus des locaux techniques nécessaires à l'entretien, le rangement/stockage des matériels de secours et pièces de rechange.

En outre, il hébergera tous les moyens (véhicules, matériels de lutte anti incendie, ambulance,grue etc.) permettant des opérations d'intervention rapides en cas d'incident dans le tunnel.

Le dossier de sécurité

Dans le but d'assurer une meilleure exploitation du tunnel et une bonne coordination des différents intervenants (exploitant, gendarmerie, protection civile,….) plusieurs réunions ont été tenues avec les parties prenantes et les documents suivants ont été produits :

- Plan d'Intervention et de Sécurité : il définit la politique d'exploitation de l'ouvrage, l'organisation de l'exploitant et des intervenants externes en cas d'incident, afin d'assurer la sécurité des usagers en tunnel.
- Plans événementiels : définissent en fonction de l'événement, l'état du tunnel (fermé, voie lente fermé, …) et les dispositions à prendre en terme de signalisation.
- Manuel d'exploitation et de supervision et cahiers de consignes.

Travaux de Génie Civil

Terrassement et soutènement à l'air libre

Préalablement aux travaux de creusement et de soutènement du tunnel, des travaux de terrassement et de soutènement à l'air libre ont eu lieu au niveau des deux têtes.

Terrassements et soutènement coté Nord

Pour atteindre la cote de sommet de la paroi clouée qui marque le point de départ des travaux en souterrain (Vrai tympan), 90 000 m3 de matériaux ont été excavés à l'explosif.

Photo 8 : Terrassement au niveau de la tête Nord du tunnel

Ces travaux ont duré 3 mois. Ils ont été suivis par la mise en place d'un soutènement en parois clouée consistant en la mise en place de :

- 10 lignes de barres d'ancrage Φ32 (longueurs 5-6m) espacés de 2m avec mise en place des plaques de répartition et des barres de renfort (281 barres d'ancrage)
- Béton projeté : mise en place d'une couche de 10 cm
- Drainage : 69 barbacanes (maille de 20m2), 20 drains longitudinal de 15m de long, 24 tranches de complexe Drainant (1m d'épaisseur), drain collecteur des eaux drainées par les complexes drainants

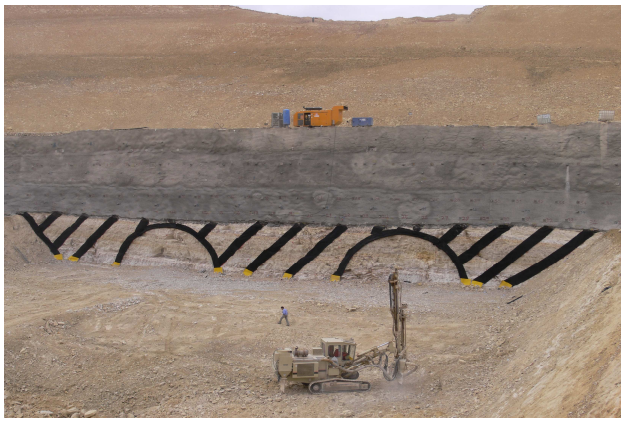


Photo 9 : Mise en place du drainage et du béton projeté au niveau de la tête Nord du tunnel

Terrassements et soutènement coté Sud

Les travaux de terrassement côté sud ont duré trois mois.

Ils ont été suivi des travaux de soutènement côté sud qui ont consisté en la mise en place de :

- 15 lignes de barres d'ancrage Φ32-Φ40 (longueurs 5,5-9m) espacés de 1,5 m avec mise en place des plaques de répartition et des barres de renfort (616 barres d'ancrage)
- Béton projeté : mise en place d'une couche de 20 cm de béton non teinté et 5 cm de béton teinté
- Drainage : 124 barbacanes (maille de 12m2), 26 drains longitudinal de 15m de long, 25 tranches de complexe Drainant (1m d'épaisseur), 3 drains collecteurs des eaux drainées par les complexes drainants

Photo 10 : Mise en place soutènement au niveau de la tête Sud du tunnel

Soutènement du talus dominant la tête Sud

La falaise surplombant la tête Sud du tunnel présentait un risque de chute de blocs contre lequel il fallait absolument se prémunir aussi bien en phase travaux qu'en phase d'exploitation.

En effet, le déconfinement du massif au voisinage de la falaise d'une part et l'altération liée à la circulation d'eau dans les grandes fractures subverticales d'autre part ont pour effet de déstabiliser de nombreux blocs instables « pré-découpés » à la faveur de ces grandes fractures subverticales.

Photo 11 : Blocs instables surplombant la tête Sud

Ainsi, pour sécuriser la zone des travaux et avant la mise en place d'un système de soutènement des travaux de purges des blocs instables ont été effectués.

Ces travaux ont été suivi par la mise en place d'un système de filets type spider à base d'une membrane d'acier de haute limite élastique (1770-2020 N/mm) combiné avec boulons de diamètres 32 mm et 43mm avec un maillage variable garantissant un support de 40-70KN/m2.

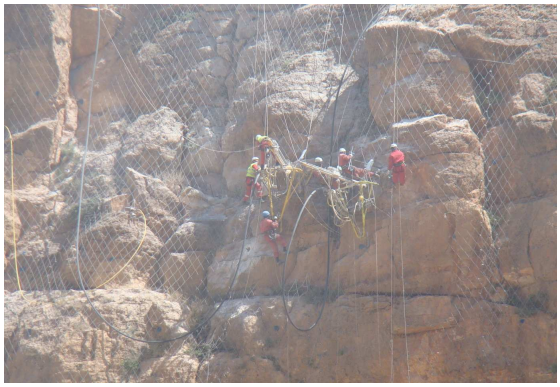


Photo 12 : Travaux de mise en place de la maille spider et des ancrages pour soutènement des blocs instables

Travaux de creusement et de soutènement en souterrain

Après achèvement des travaux des tympans le creusement et le soutènement du tunnel a été entamé comme suit :

1. Entrées sous voûtes parapluie réalisées avec des barres d'acier (Tête nord) ou tubes pétroliers (tête sud) ainsi que la mise en œuvre des boulons en fibres de verre;
2. Creusement, ventilation, purge et marinage ;
3. Soutènement

Soutènement préalable aux travaux de creusement

Avant d'entamer les travaux de creusement, des voûtes parapluies ont été exécutées au niveau des périmètres des entrées assurant ainsi un pré soutènement du terrain au fur et à mesure de l'avancement des travaux d'excavation

- Tête Nord : Mise en place de barres d'acier HA Φ32 de longueur 6m (41 barres à chaque entrée).
- Tête Sud : Mise en place un enfilage plus résistant constitué par des tubes pétroliers Φ114 en acier N80 de 12m de long.

Des ancrages en fibres de verre ont été utilisés au niveau des entrées du tunnel pour palier contre des risques éventuels d'éboulement de front.

Creusement, purge et marinage

Le creusement a été fait en pleine section et réalisé principalement par des tirs à l'explosif et à l'aide de moyens mécaniques (Brise roches, pelles, fraise…). Des plans de tir ont été élaborés et un soin particulier a été porté au découpage périphérique pour minimiser les hors profils.

Photo 13 : Forage des trous à l'aide du jumbo robotisé à trois bras

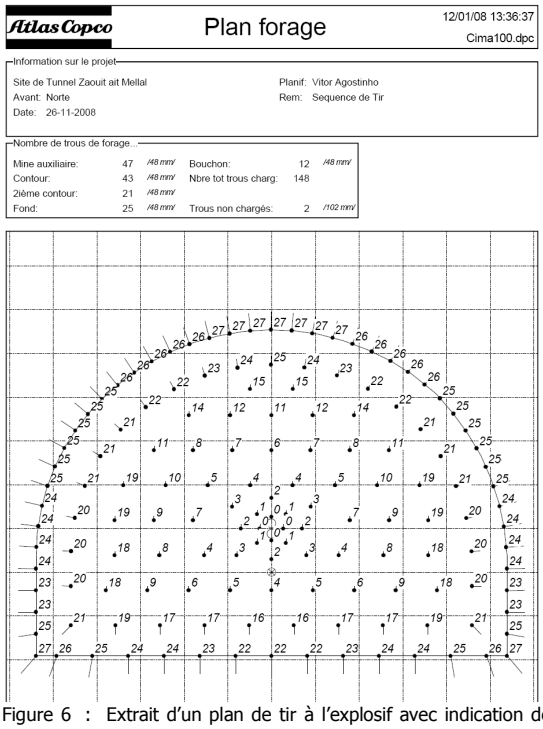


Figure 6 : Extrait d'un plan de tir à l'explosif avec indication des séquences de tir.

L'utilisation d'explosif a été assujettie à un amorçage séquentiel, un reprofilage par des moyens mécaniques a été fait après les tirs.

Photo 14 : Tirs à l'explosif

Le creusement des tubes a été précédé par des sondages de reconnaissance à l'avancement réalisés à l'aide du Jumbo robotisé pour déterminer les classes de déblais.

Juste après les tirs, la mise en marche de la ventilation pour traiter les polluants et satisfaire les besoins en air neuf était systématique.

Avant de procéder à la projection du béton projeté, des mesures profilométriques ont été effectuées pour s'assurer de la conformité de la section excavée avec les modes de soutènement prévus (Epaisseur du béton projeté à réaliser)

Photo 15 : Ventilation pendant la phase travaux

Soutènement

En fonction des terrains traversés (données recueillies à partir des relevés géologiques) il a été appliqué quatre modes de soutènement :

Soutènement type RP1

Ce soutènement a été appliqué dans les sections où le tunnel traverse un massif avec de bonnes caractéristiques de résistance et de déformabilité, correspondant aux calcaires massifs avec des fractures éloignées. Il a consisté en la mise en œuvre une épaisseur de 5cm de béton projeté fibré sur toute la section auquel est associé à un boulonnage des blocs instables avec des boulons type Swellex de 4m de long.

Dans ce type de soutènement, l'excavation a été réalisée en pleine section par pas de 4m au maximum.

Ce type de soutènement a été adopté sur 156 ml, ce qui représente près de 15,73 % du linéaire soutenu.

Soutènement type RP2a

Ce soutènement a été appliqué dans les sections où le tunnel traverse un massif avec des caractéristiques de résistance et de déformabilité moyennes. Il a consisté en la mise en place d'une épaisseur de 10cm de béton projeté fibré sur toute la section combiné à un boulonnage avec un maillage moyen de 2m x2m. Dans ce type de soutènement l'excavation a été faite en pleine section par pas de 2,5 m au maximum. Ce type de soutènement a été adopté sur 583ml, ce qui représente près de 58,77 % du linéaire soutenu.

Photo 16 : Mise en place des boulons swellex

Soutènement type RP2b

Ce soutènement a été appliqué dans les sections où le tunnel traverse du calcaire fragmenté

Le soutènement a consisté en la mise en place d'une épaisseur de 15cm de béton projeté fibré sur toute la section combiné à un boulonnage avec des boulons type Swellex de 4m de long avec un maillage de 2m x2m.

Dans ce type de soutènement l'excavation a été faite en peine section par des pas 2,5m au maximum. Ce type de soutènement a été adopté sur 178 ml ce qui représente près de 17,94 % du linéaire soutenu.

Soutènement types RP3

Ce soutènement a été appliqué dans les sections où le tunnel traverse un massif avec caractéristiques de résistance et de déformabilité faibles, correspondant au marno calcaire et aux calcaires marno très fracturés. Il a consisté en la mise en place de cintres métalliques HEB 180, espacées de 1,0 m, associé à 23,0 cm de béton projeté fibré. Ponctuellement dans les zones présentant des hors profils considérables des plaques de blindage avec un béton de blocage ont été prévues. Ce type de soutènement a été adopté sur 75ml (au niveau des entrées) ce qui représente 7,56 % du linéaire soutenu.

Un récapitulatif des modes de soutènement prévus figure sur le tableau 4 ci-après :

Tableau 4 : Modes de soutènement envisageable

Soutènement	Section			
	RP1	RP2a	RP2b	RP3
Béton projeté fibré (cm)	5	10	15	23
Cintre lourds (entraxe)	*	*	*	HEB180 [1,5m]
Boulonnage (maille)	Eventuel	ERB160+ [2*2m]	ERB160+ [2*2m]	*
Retard de mise en place (m)	4	2,5	2,5	1,5

Mesures de convergence

Des mesures des convergences ont été faites tout le long des travaux de creusement-soutènement et ce pour

s'assurer de la bonne adéquation du profil de soutènement avec les terrains rencontrés en s'assurant que les déformations des parois du tunnel (convergences et tassements) restent dans les limites attendues (limites des convergences données par l'étude de soutènement).

Etanchéité et drainage du tunnel

L'étanchéité du tunnel est assurée par la mise en œuvre d'un Dispositif d'Etanchéité par Géomembrane (D.E.G.). Il a été appliquée au niveau des entées du tunnel, aux emplacements des accélérateurs, et aux zones où il y a eu des venues d'eaux.

Un complexe de drainage a été mis dans tous le tunnel à l'exception des zones où est placé le DEG.

Le DEG est constitué :

- par un écran de protection d'extrados (géotextile anti – poinçonnement) en contact avec le béton projeté
- par la géomembrane d'étanchéité d'épaisseur 2mm à base de PVC-translucide.
- et au niveau des zones armées, par un écran de protection d'intrados posé sur la géomembrane d'étanchéité, constitué par une membrane en PVC-P d'une épaisseur de 2mm.

Les éventuelles eaux collectées par le DEG et le complexe drainant sont acheminées vers des drains (Φ100 en polychlorure de vinyle non plastifié (PVC-U)) placés en pied de piédroit sur l'ensemble du linéaire des ouvrages en tunnel et sont enveloppés sur les 2/3 de leurs diamètres.

Revêtement définitif

Une étude spécifique du revêtement définitif a été faite et a défini 2 sections de béton coffré :

- Section type RS1 : Mise en place de 35 cm de béton de revêtement (B30) sur toute la section transversale (Voute, piédroits et banquette). Cette section est appliquée dans les zones des profils de soutènements type RP1/RP2a/b.
- Section type RS2 : Mise en place de 45 cm de béton de revêtement (B30) sur toute la section transversale (Voute, piédroits et banquette). Cette section est appliquée dans les zones des profils de soutènements primaires type RP3.

En partie courante du tunnel le béton coffré n'est pas armé excepté dans les zones suivantes :

- Semelles et naissances des piédroits
- Au niveau des zones d'ancrage des accélérateurs
- Intersection entre les tubes principaux et les galeries de communication et avec les niches de sécurité.

Le coffrage outil est ancré dans la banquette par des barres Dywidag, Ø 20, tous les 0,83 m, et 0,60 m au-dessus de la semelle (la banquette sera soumise aux poussées de bétonnage), il est constitué des éléments suivants :

- Panneaux de coffrage : donnant l'aspect fini du revêtement
- Gabarits métalliques : constituent la principale structure résistante dans la phase de bétonnage
- Portique mécanique : supportant le coffrage lors de l'ouverture et permettant le déplacement de la structure.

Photo 17 : Coffrage outils utilisé pour le revêtement du tunnel

Le coffrage outil utilisé était équipé de 52 vibreurs externes, 28 bouches de bétonnage, 8 fenêtres d'inspection ainsi que de 3 plates formes de travail.

Le décintrement ne se réalisait qu'après l'obtention d'une résistance min de 8 MPa.

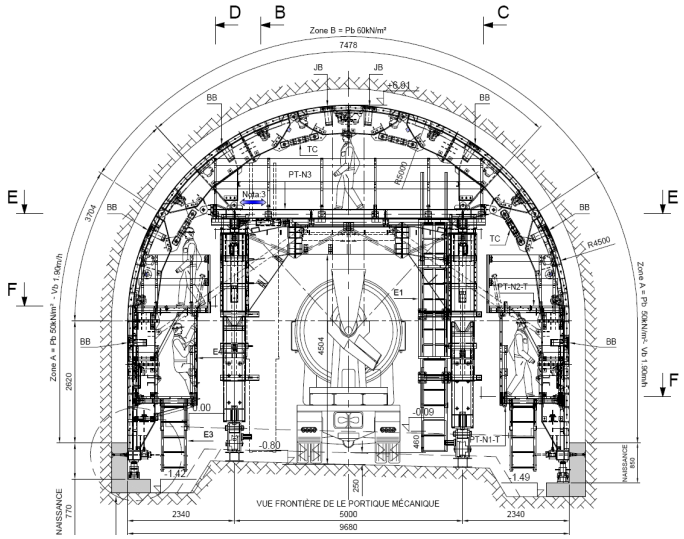


Figure 6 : Schéma du coffrage outils

Les travaux de bétonnage ont été suivis par les travaux suivants :

- Remplissage des vides au niveau des zones des hors profils.
- Pose des fourreaux longitudinaux,
- Réalisation des travaux d'assainissement avec la pose du collecteur des eaux usées Ø 300 en CAO (réalisés au niveau de la voie lente noyées dans un béton d'enrobage),
- Pose du drain de chaussée Ø 100 PVC noyé dans un béton poreux
- Réalisation du caniveau à fente et pose des regards siphoïdes chaque 50m
- Réalisation du caniveau pour conduite incendie et pose de la conduite incendie DN150

Les travaux de Génie civil à l'intérieur du tunnel (génie civil) ont été finalisés par la réalisation des travaux de chaussée et de peinture.