



REPUBLIQUE TUNISIENNE
Ministère de l'Équipement , de l'Habitat et
de l'Aménagement du Territoire

Direction Générale des Ponts et Chaussées

Unité de Suivi de la Réalisation des Projets des Autoroutes
et de la Libération d'Emprise des voiries Structurantes des Villes

Deuxième Consultation Publique relative au projet de réalisation de l'autoroute Bousalem—Frontière Algérienne Etape Avant Projet Sommaire

Rapport de synthèse - Avant Projet Sommaire



Novembre 2017

SOMMAIRE

1	Contexte et objectifs du projet	7
1.1	CONSISTANCE DE LA MISSION DU BUREAU STUDI	8
1.2	CONSISTANCE DE LA MISSION d'assistance de SCET-TUNISIE	8
1.3	Rappel des études préliminaires.....	9
1.4	Objet du présent document.....	10
2	Contraintes d'occupation du sol.....	11
3	ETUDE GEOMETRIQUE SOMMAIRE.....	12
3.1	Normes techniques d'aménagement	12
3.2	Tracés	13
3.2.1	Lot n°1: Bousalem (Origine projet sur l'autoroute existante) - Bulla Regia	15
3.2.2	Lot n°2: Bulla Regia – Jendouba _ Variante Nord.....	16
3.2.3	Lot n°2: Bulla Regia – Jendouba _ Variante Sud	18
3.2.4	Lot n°3: Jendouba – Ain El Baya _ Variante Nord.....	19
3.2.5	Lot n°3: Jendouba – Ain El Baya _ Variante Sud	21
3.2.6	Lot n°4: Ain El Baya – frontière Algérienne _ Variante Tunnel 1.....	22
3.2.7	Lot n°4: Ain El Baya – frontière Algérienne _ Variante Tunnel 2.....	24
3.2.8	Lot n°4: Ain El Baya – frontière Algérienne _ Variante Surface	26
3.2.9	Récapitulatif des principales caractéristiques des variantes élaborées	28
3.3	Echangeurs	28
3.4	Rétablissement de communications	29
4	Etude hydrologique et hydraulique sommaire	30
4.1	Données météorologiques	30
4.1.1	Pluviométrie	30
4.1.2	Intensité des pluies	32
4.2	Etude hydrologique	32
4.2.1	Caractéristiques morphologiques des bassins versants	32
4.2.2	Choix de la période de retour	33
4.2.3	Méthodes de calcul des débits des crues.....	33
4.2.4	Résultats du calcul.....	34
4.3	Etude hydraulique	34
4.3.1	Objet de l'étude hydraulique	34
4.3.2	Dimensionnement des ouvrages de franchissement.....	35
4.3.3	Calcul des cotes PHE des ouvrages d'art (GOH).....	35
4.3.4	Drainage longitudinal	36
5	Etude géologique et géotechnique sommaire.....	38
5.1	Conditions géologiques.....	38

5.1.1	Formations géologiques traversées.....	38
5.1.2	Levé géologique.....	40
5.1.3	Analyse structurale et commentaires des cartes et des coupes	40
5.1.4	Prospections géophysique.....	40
5.2	Conditions géotechniques et exploitation des résultats.....	42
5.2.1	Sol support.....	42
5.2.2	Matériaux de viabilité	42
5.2.3	Hauts déblais	43
5.2.4	Hauts remblais	44
5.3	Fondation des ouvrages.....	45
5.4	Dimensionnement de la structure de chaussée.....	48
5.4.1	Introduction	48
5.4.2	Trafic.....	48
5.4.3	Matériaux de chaussée.....	48
5.4.4	Dimensionnement de la chaussée.....	49
5.4.5	Conclusion	49
6	Etude sommaire de stabilité des talus	51
6.1	Introduction	51
6.2	Etude de stabilité des Grands déblais	51
6.2.1	cas du Profil n°79 (Lot 4 - variante surface)	51
6.2.2	Conclusions et recommandations sur les hauts déblais.....	51
6.3	Etude de stabilité des Hauts remblais.....	52
6.3.1	Profil n°105 (Lot 4 - variante tunnel 1).....	52
6.3.2	Profil n°109 (Lot 2 - variante nord).....	52
6.3.3	Profil n°207 (Lot 4 - variante surface).....	52
6.3.4	Profil n°263 (Lot 3 - variante sud).....	53
6.3.5	Conclusions et recommandations sur les hauts remblais	53
7	Etude sommaire des ouvrages d'art.....	57
7.1	Ouvrages de rétablissement de communications (PS/PI)	57
7.1.1	Passages supérieurs	57
7.1.2	Passages inférieurs	58
7.2	Grands Ouvrages Hydrauliques (GOH)	59
7.2.1	Inventaire des GOH.....	59
7.2.2	Profil en travers type sur GOH.....	59
7.2.3	Conception des GOH.....	59
7.3	Viaducs.....	60
7.3.1	Inventaire des viaducs	60
7.3.2	Profils en travers type sur viaduc.....	61
7.3.3	Conception structurelles des variantes.....	62

7.3.4	Etude sommaire des appuis	63
7.4	Conclusions et orientations des études APD des ouvrages d'art.....	64
8	Etude sommaire des tunnels	65
8.1	Rappel du contexte géologique et géotechnique du site des tunnels	65
8.1.1	Sondages réalisés au droit des tunnels.....	65
8.1.2	Campagne géophysique	66
8.1.3	Campagne géophysique	66
8.2	Caractéristiques géométriques générales	67
8.2.1	Tracé en plan et profil en long	67
8.2.2	Profil en travers	67
8.3	Evaluation de la stabilité des tunnels.....	67
8.4	Modes de construction	68
8.4.1	La Méthode ADECO-RS	68
8.4.2	Creusement au tunnelier	68
8.5	Aménagements du génie civil liés à l'exploitation et à la sécurité	69
8.5.1	Aménagements pour l'évacuation et la protection des usagers et l'accès des secours .	69
8.5.2	Niches de sécurité	69
8.6	Les équipements d'exploitation et de sécurité	69
8.6.1	Ventilation	69
8.6.2	Eclairage	69
8.6.3	Alimentation électrique	70
8.7	Recommandations pour les reconnaissances géologiques et géotechniques d'APD.....	70
9	Aménagements et équipements annexes	71
9.1	Signalisation horizontale et verticale.....	71
9.1.1	Signalisation horizontale	71
9.1.2	Signalisation Verticale	71
9.2	Equipements de sécurité.....	72
9.2.1	Dispositifs de retenues	72
9.2.2	PAU et refuges.....	73
9.2.3	Lits d'arrêts	73
9.3	Gares de péage	73
9.3.1	Description général du système de péage	73
9.3.2	Dimensionnement du nombre de couloir	75
9.3.3	Description des aménagements des gares	75
9.4	Aires annexes	76
10	ETUDE DE TRAFIC.....	77
10.1	Evaluation du trafic futur.....	77
10.1.1	Situation 1 « sans tronçon autoroutier »	77
10.1.2	Situation 2 « avec tronçon autoroutier »	78

10.1.3	Impact du dédoublement en 2X2 voies de la RN6 et la RN17 en 2035	88
10.1.4	Conclusion.....	90
11	Mesures environnementales d'atténuation et de bonification.....	92
11.1	Mesures à mettre en œuvre en phase chantier	92
11.1.1	Mesures générales d'exécution	92
11.1.2	Mesures de préservation de l'environnement naturel	93
11.1.3	Mesures de protection de l'environnement humain	95
11.2	Mesures à mettre en œuvre en phase exploitation.....	96
11.2.1	Mesures de préservation de l'environnement naturel	96
11.2.2	Mesures de préservation de l'environnement humain	96
11.3	Mesures en phase d'entretien	96
12	Analyse multicritères et choix de la variante optimale	98
12.1	Définition des variantes	98
12.2	Méthode de comparaison multicritères	99
12.2.1	Critères de comparaison	99
12.2.2	Pondération accordée aux critères	103
12.2.3	Tests de sensibilité pour la variante optimale	103
12.3	Analyse et notation des variantes	104
12.3.1	Section 2	104
12.3.2	Section 3	105
13	Conclusion	107

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Vue générale des variantes	9
Figure 2 bis: Nouveau tracé du lot 1	15
Figure 2: Variantes de tracés.....	15
Figure 3: Profil en travers type proposé – Section courante.....	16
Figure 4: Profil en travers type - Section de l'autoroute avec VSVL	18
Figure 5: Profil en travers type proposé en relief difficile – Section courante.....	24
Figure 6: Profil en travers type proposé en relief difficile – Section courante.....	24
Figure 7: Position des échangeurs proposés.....	29
Figure 8 : Organigramme des méthodes hydrologiques généralement applicables en Tunisie	34
Figure 9: localisation des levés géologiques au 1/5000 ^{ème}	40
Figure 10: Situation géographique des prospections géophysiques	41
Figure 11: Schéma synoptique du système de péage pour la variante sud.....	74
Figure 12: Schéma synoptique du système de péage pour la variante Nord	75
Figure 13. Tracés des variantes Nord et Sud de l'autoroute Bousalem frontière Algérienne avec les intersections retenus (Scénario A).....	79
Figure 14. Trafic (VL, PL) les deux sens de circulation confondus par section en 2045 - Variante Nord de l'autoroute (Scénario A)	80
Figure 15. Trafic (VL, PL) les deux sens de circulation confondus par section en 2045 - Variante Sud de l'autoroute (Scénario A)	81
Figure 16. Nœuds d'intersection de la variante Nord de l'autoroute avec le réseau existant (scénario A)	82
Figure 17. Nœuds d'intersection de la variante Sud de l'autoroute avec le réseau existant (scénario A)	83
Figure 18. Tracés des variantes Nord et Sud de l'autoroute Bousalem frontière Algérienne avec les intersections retenus (Scénario B).....	84
Figure 19. Trafic (VL, PL) les deux sens de circulation confondus par section en 2045 - Variante Nord de l'autoroute (Scénario B)	85
Figure 20. Trafic (VL, PL) les deux sens de circulation confondus par section en 2045 - Variante Sud de l'autoroute (Scénario B)	86
Figure 21. Nœuds d'intersection de la variante Nord de l'autoroute avec le réseau existant (scénario B).....	87
Figure 22. Nœuds d'intersection de la variante Sud de l'autoroute avec le réseau existant (scénario B).....	87
Figure 23. Test 1 - Dédoulement en 2X2 voies de certains tronçons routiers de la RN6 et la RN17 à partir de 2035	88
Figure 24. Test 1. Trafic (VL, PL) les deux sens de circulation confondus par section en 2045 - Variante Nord de l'autoroute (Scénario B)	89
Figure 25. Test 1. Trafic (VL, PL) les deux sens de circulation confondus par section en 2045 - Variante Sud de l'autoroute (Scénario B)	90

LISTE DES GRAPHES

Graphe 3: Répartition des pentes longitudinales – lot n°2 Variante Nord	17
Graphe 2 : Répartition des rayons en plan – Lot n°2 Variante Nord	17
Graphe 4: Répartition des pentes longitudinales – lot n°2 Variante Sud	19
Graphe 5: Répartition des rayons en plan – Lot n°3 Variante Nord.....	20
Graphe 6: Répartition des pentes longitudinales – lot n°3 Variante Nord	20
Graphe 8: Répartition des rayons en plan – Lot n°3 Variante Sud.....	21
Graphe 9: Répartition des pentes longitudinales – lot n°3 Variante Sud	22
Graphe 10: Répartition des rayons en plan – Lot n°4 Variante Tunnel 1.....	23
Graphe 11: Répartition des pentes longitudinales – lot n°4 Variante Tunnel 1	23
Graphe 12: Répartition des rayons en plan – Lot n°4 Variante Tunnel 2.....	25
Graphe 13: Répartition des pentes longitudinales – Lot n°4 Variante Tunnel 2	26
Graphe 14: Répartition des rayons en plan - Lot n°4 Variante Surface	27
Graphe 15: Répartition des pentes longitudinales – Lot n°4 Variante Surface	27

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Référentiels proposés par type d'aménagement	12
Tableau 2: Catégories proposées pour l'autoroute	13
Tableau 3: Principales caractéristiques par catégorie de l'ICTAAL 2015	13
Tableau 4: : Principales caractéristiques des variantes.....	28
Tableau 5 : Pluviométrie annuelle.....	30
Tableau 6: Pluviométrie saisonnière	31
Tableau 7: Pluviométrie mensuelle	31
Tableau 8: Pluies extrêmes.....	31
Tableau 9: : valeurs « a » et « b » de Montana (T=10 ans)	32
Tableau 10: Classification du relief des bassins versants.....	32
Tableau 11 : Choix de la période de retour T	33
Tableau 12: Côtes PHE au droit des ouvrages d'art	36
Tableau 13: Résultats des essais sur les carrières prospectées	43
Tableau 14: Codification et limites d'utilisation.....	43
Tableau 15: Consistance de la campagne géotechnique – Déblais.....	43
Tableau 16: Résultats des investigations	44
Tableau 17 Consistance de la campagne géotechnique – Déblais / remblais	44
Tableau 18: Résultats des investigations	45
Tableau 19: Tableau récapitulatif des résultats pressiométriques	45
Tableau 23: Les passages supérieurs / Fondations	46
Tableau 24: Les grands ouvrages hydrauliques / Fondations	46
Tableau 25: Les Viaducs / Fondations	47
Tableau 26: Hypothèses de calcul / Données d'entrée du trafic.....	48
Tableau 27: Valeurs du trafic cumulé	48
Tableau 28: Les Déformations et contraintes admissibles	49
Tableau 29: Structure de chaussée	50
Tableau 30: Classement des matériaux	54
Tableau 31: Inventaire des passages supérieurs	57
Tableau 32: Inventaire des passages inférieurs	58
Tableau 33: Inventaire des GOH.....	59
Tableau 34: Inventaire des viaducs	60
Tableau 8-1.	65
Tableau 36: Projection du trafic (uvp.j) sans projet sur certains axes structurants du réseau routier de Jendouba (2020 – 2045).....	77
Tableau 37. Evolution du temps de parcours (mn) sur le réseau routier de référence – Situation 1 (sans projet, 2020 – 2045)	77
Tableau 38. TJMA en UVP.jour par sens de circulation sur les couloirs Nord et Sud - Scénario B - Test 1 (2045)	88
Tableau 40: Echelle de notation des variantes	101

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

Le développement d'un réseau de transport Trans-Maghrébin est considéré comme un élément essentiel à la réalisation des objectifs d'intégration de l'UMA et le renforcement de la cohésion économique et sociale entre les pays membres. Tout projet "d'intégration économique" ne peut en effet se concrétiser qu'au moyen d'une "intégration physique", support matériel de circulation des « biens » et des "personnes", prélude et accompagnement des autres formes de circulation, de services, de capitaux, etc.

La construction de l'autoroute Trans-Maghrébine entre dans ce cadre, avec pour objectifs stratégiques:

- La consolidation de la croissance des économies des pays membres de l'UMA ;
- La diversification du partenariat régional et à une échelle plus large, continentale ;
- L'élargissement du marché des cinq pays traversés par l'infrastructure ;
- Le renforcement de la compétitivité des économies ;
- La contribution à la cohésion sociale ;
- Etc.

Du côté Algérien, les travaux de construction de l'Autoroute Est/Ouest, arrivant au niveau de la frontière Tunisienne ont démarré depuis l'année 2005 et sont sur le point d'être d'achevés.

Du côté Tunisien, avec la mise en service du tronçon « Tunis – Oued Zarga » et l'achèvement des travaux de la section « Oued Zarga – Bousalem », le tronçon « Bousalem/Frontière Algérienne », objet de cette étude, représente le chaînon manquant à concrétiser.

Parallèlement au renforcement de l'intégration régionale, l'autoroute jouera aussi un important rôle de dynamisation économique des régions traversées par l'infrastructure.

En effet, l'ensemble du tronçon à réaliser se situe dans le gouvernorat de Jendouba à 150 km de la région du Grand Tunis. Le gouvernorat est délimité de côté nord par la mer méditerranéenne, sur une longueur de 25 km, au sud par les gouvernorats de Siliana et le Kef, à l'Est par le gouvernorat de Béja et à l'ouest par l'Algérie, sur 135 km. Ainsi il est caractérisé par une situation géographique stratégique, qui peut assurer des relations importantes avec son environnement régional, national et international.

La zone du projet se caractérise notamment par :

- Un milieu naturel presque exclusivement forestier (chêne liège, chêne zen, maquis) au niveau des zones à relief escarpé ;
- Un milieu artificiel composé d'agriculture et de forêts de reboisement à base d'Eucalyptus et d'acacias, en relief plat, notamment au niveau de la vallée Medjerda.

Bien que les altitudes dans cette partie du Nord-Ouest sont modestes (comprises entre 200m et 800m), le relief de cette région est considéré comme l'un des plus difficiles du pays, en raison des fortes pentes ainsi que les nombreuses vallées qui découpent les versants leur conférant un aspect parfois très accidenté.

La région recèle d'importantes ressources naturelles et se caractérise par la fertilité de ses plaines.

Ses ressources hydriques représentent environ le quart des ressources hydriques nationales et trois grands équipements hydrauliques y ont été aménagés. Il s'agit des barrages de Béni M'tir, de Barbara et de Bouhertma.

1.1 CONSISTANCE DE LA MISSION DU BUREAU STUDI

Conformément aux Termes de Référence, les études confiées au bureau STUDI seront menées selon le phasage suivant :

- Phase 1 : Etude d'Avant-projet détaillé, comprenant trois étapes :
 - Etape 1 : Examen du rapport d'Avant - Projet Sommaire établi depuis Juillet 1998 et propositions de variantes pour un délai de cinq (05) mois ;
 - Etape 1 bis : Etudes d'Avant - Projet Sommaires pour un délai de six (06) mois.
 - Etape 2: Réalisation des études d'Avant - Projet Détaillé sur la base du tracé retenu pour un délai de cinq (05) mois.

- Phase 2 : Projet d'exécution et préparation des dossiers d'appel d'offres pour un délai de six (06) mois.

Ces délais ne tiennent pas compte des périodes de neutralisation (examen et approbation des dossiers par l'Administration, cas de force majeure notamment pour la réalisation des investigations de terrain durant les pluies).

1.2 CONSISTANCE DE LA MISSION D'ASSISTANCE DE SCET-TUNISIE

La consistance de la mission d'assistance de SCET-TUNISIE est définie par les termes de référence de la convention liant SCET-TUNISIE à l'Administration, elle comprend essentiellement les deux thèmes suivants :

- Contrôle, suivi et assistance technique des études, notamment :
 - ✓ L'examen et le contrôle de tous les documents et dossiers établis par STUDI dans le cadre de sa mission de l'étude du tronçon autoroutier ci-dessus indiqué dans ses différentes phases (Preliminaire, APS, APD et DAO)
 - ✓ Accompagnement et Assistance à l'Administration dans les réunions en relation avec le projet
 - ✓ Préparation des documents et présentations nécessaires à la consultation publique du projet pendant les phases d'étude
- Préparation des études financières pour la mise en œuvre du projet, contenant :
 - ✓ La préparation d'un plan de financement avec analyse des différents scénarios et mécanismes possibles de financement des travaux, PPP, concession, BOT, etc.)
 - ✓ L'analyse multicritères et notamment financière de façon à fournir à l'Administration les outils d'aides à la décision concernant le choix du mécanisme de financement du projet
 - ✓ Préparation et accompagnement de l'Administration dans l'élaboration des cahiers de charges de manifestation d'intérêt, de contrat et de dépouillement des offres en cas où l'option de PPP est retenue

1.3 RAPPEL DES ETUDES PRELIMINAIRES

L'analyse des contraintes dans la zone d'étude a conduit à la pré-identification de quelques couloirs pouvant convenir pour y inscrire le projet de tronçon autoroutier, et a été suivie d'une comparaison multicritères en vue de choisir les couloirs les mieux appropriés. L'ensemble des couloirs est structuré en un faisceau comprenant quatre fuseaux, et schématisé comme suit :

- Deux fuseaux, l'un Nord et l'autre Sud, joignant le point A au niveau de Bousalem correspondant à la jonction à la partie réalisée de l'autoroute, au nœud D correspondant au village de Aïn El Baya ;
- Un fuseau joignant le nœud D au nœud E vers la fin du barrage de Barbara ;
- Un dernier fuseau enfin joignant le nœud E au point F situé au niveau de la frontière algérienne, et correspondant à la connexion au tronçon réalisé.



Figure 1: Vue générale des variantes

Si les données disponibles ont permis d'élaborer une analyse multicritères pour la section AD, elles ne le permettent pas pour la section DF qui traverse un relief difficile, la précision des cartes topographiques ($1/25\,000^{\text{ème}}$ et $1/50\,000^{\text{ème}}$) pouvant engendrer d'importantes marges d'erreur, en plus de l'existence de risques liés aux spécificités géologiques de la zone.

De ce fait, la nécessité de mener des études du niveau APS complémentaires, et de procéder pour ce faire, aux études de base utiles (investigations géotechniques et prises de vue aérienne avec restitution) sur des bandes de largeur appropriée, variant de 500m à 1km pour les fuseaux de la section 1 (fuseaux AD) et de la section 3 (fuseau EF), et de 1 km à 2kms pour la section 2 (fuseau DE).

1.4 OBJET DU PRESENT DOCUMENT

Le présent document constitue un résumé du rapport de synthèse des études d'Avant Projet Sommaire élaboré par le bureau STUDI et réajusté au droit du lot 1 à l'issue de la consultation publique effectuée le 06 octobre 2016. En effet, la variante de tracé initiale du lot 1 du présent projet autoroutier a fait l'objet d'une grande opposition de la part de plusieurs établissements locaux et centraux et de la société civile: Ministère de l'Agriculture, des Ressources en eau et de la Pêche, Agence Nationale de Protection de l'Environnement, Commissariat Régional de Développement Agricole de Jendouba, Commission de Protection des Périmètres Irrigués de Bousalem, Gouvernorat de Jendouba, société civile et agriculteurs des régions de Jendouba et Bousalem dans la mesure où ce tracé passe au coeur du périmètre irrigué (de Bouhertma 1 et Bouhertma 2) ce qui engendre de grandes pertes et une perturbation pour le secteur agricole qui est le plus important dans la zone. Cette question a aussi fait l'objet des courriers transmis par le Ministère de l'Agriculture, des Ressources en eau et de la Pêche et où celui-ci réaffirme sa ferme opposition au tracé initial du lot 1 qui traversait le périmètre irrigué de Bouhertma 1 et Bouhertma 2.

Compte tenu des considérations précédentes et notamment des résultats de la première consultation publique au stade de l'avant projet sommaire, le bureau d'études STUDI a examiné une solution pertinente qui tient compte à la fois des exigences techniques et des préoccupations des autorités locales. Cette solution consiste à éviter la totalité du périmètre irrigué de Bousalem (Bouhertma 1 et Bouhertma 2) en le contournant. Cette solution aura un linéaire plus important que celui du tracé initial, elle traverse un relief difficile ce qui engendre un surcoût assez important en matière d'investissement.

Ce document rappelle principalement les grandes lignes de :

- L'étude économique et de trafic ;
- L'étude environnementale et sociale ;
- La collecte des données et investigations sommaires du terrain ;
- La présentation des normes techniques d'aménagement ;
- La présentation des diverses variantes de tracés pour les divers lots du projet ;
- La proposition des options de base et des variantes d'aménagement ;
- La proposition des profils en travers types correspondants aux différentes variantes ;
- L'étude géologique et géotechnique sommaire ;
- Les études hydrologiques, hydrauliques sommaires ;
- Les études sommaires des ouvrages d'art ;
- L'évaluation Sommaire des travaux ;
- L'analyse multicritères et le choix de la variante optimale de tracé pour les divers lots du projet.

2 CONTRAINTES D'OCCUPATION DU SOL

Afin d'affiner le tracé des variantes proposées par les études préliminaires, le Consultant STUDI a procédé à l'actualisation et le report sur les plans topographiques (restitution des plans à l'échelle 1/5000^{ème}) des principales contraintes actualisés à l'issue de la mission de reconnaissance et de collecte des données réalisées à l'occasion des études d'Avant Projet Sommaire. Il s'agit de :

- Les ressources en eaux superficielles :
 - Les barrages et les lacs collinaires ;
 - Les barrages ;
 - Les zones de protection de barrage.

- Les occupations agricoles et forestières :
 - Les périmètres publics irrigués ;
 - Les zones de potentialité agricole très élevée ;
 - Les zones forestières et les aires protégées.

- Les réseaux et l'occupation urbaine :
 - Les zones urbaines et urbanisables ;
 - Le réseau routier classé (RN, RR et RL) ;
 - Les réseaux des concessionnaires disponibles.

- Les sites patrimoniaux :
 - Les sites majeurs ;
 - Les sites mineurs.

3 ETUDE GEOMETRIQUE SOMMAIRE

3.1 NORMES TECHNIQUES D'AMENAGEMENT

Le tableau suivant récapitule les normes proposées pour chacune des sections à aménager :

Tableau 1: Référentiels proposés par type d'aménagement

Désignation	ICTAAL	ICTA VRU	ARP	CG
Sections courantes	X			
Bretelles et échangeurs	X	X		
Rétablissement de communication		X	X	X

- ICTAAL (2015) : Instructions sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison ;
- ICTAVRU (2009) : Instructions sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Voies Rapides Urbaines – CETUR ;
- ARP : Aménagement des Routes Principales – Recommandations techniques pour la conception générale et la géométrie de la route – SETRA – Août 1994 ;
- CG : Carrefours Giratoires – Les Carrefours Plans sur Routes Interurbaines – SETRA.

Catégorie d'autoroutes

On distingue :

- La catégorie L1, appropriée en région de plaine ou vallonnée où les contraintes de relief sont modérées.
- La catégorie L2, mieux adaptée aux sites de relief plus difficile, compte tenu des impacts économiques et environnementaux qu'il implique.

Vu les différents types de reliefs traversés par l'autoroute, les catégories proposées sont les suivantes:

Tableau 2: Catégories proposées pour l'autoroute

Catégorie	Type de relief	Vitesse maximale autorisée
L1	Région de plaine ou vallonnée où les contraintes de relief sont modérées	130 km/h
L2	Sites de relief plus difficile, compte tenu des impacts économiques et environnementaux qu'il implique	110 km/h

Caractéristiques géométriques de la section courante de l'autoroute

Le tableau ci-après rappelle les principales caractéristiques géométriques pour chaque catégorie d'autoroute :

Tableau 3: Principales caractéristiques par catégorie de l'ICTAAL 2015

	Caractéristiques du tracé	Catégorie L1	Catégorie L2
Tracé en plan	Rayon minimal R_m	600 m	400 m
	Rayon minimal au dévers normal R_{dn}	1 000 m	650 m
	Rayon minimal souhaité : $1,5 R_{dn}$	1 500 m	975 m
Profil en long	Déclivité maximale	5 %	6%
	Rayon minimal en angle saillant	12 500 m	6 000 m
	Rayon minimal en angle rentrant	4 200 m	3 000 m
Profil en travers	Largeur de voie	3,50 m	
	Bande d'arrêt d'urgence (BAU)	2,50 ^(*) m	
	Bande dérasée de gauche (BDG)	1,00 m	
	Berme	1,00 m	

(*) 3,00 m lorsque le trafic poids lourd excède 2000 véh./jour (deux sens confondus)

3.2 TRACES

A l'issue des couloirs retenus lors de l'étude préliminaire déjà réalisée précédemment, le Bureau d'Etudes STUDI chargé de l'étude du tronçon autoroutier Bousalem - Frontière Algérienne a procédé à étudier les variantes de tracés sur la base des éléments suivants :

- Les photos aériennes à l'échelle 1/8 000ème ;
- Les plans de restitution à l'échelle 1/5 000ème ;
- Le plan d'occupation du sol.

Ainsi, les variantes de tracés proposées sont les suivantes :

- **Lot n°1** - Entre la ville de Bousalem et la ville de Bulla Regia :
 - Une seule nouvelle variante de tracé de longueur 28 Km, contournant les Périmètres Publics Irrigués de Bousalem, en lieu et place du tracé initial, et ce compte tenu des considérations d'avis des divers intervenants avec une grande opposition de la part de plusieurs établissements locaux et centraux et de la société civile: Ministère de l'Agriculture, des Ressources en eau et de la Pêche , Agence Nationale de Protection de l'Environnement, Commissariat Régional de Développement Agricole de Jendouba, Commission de Protection des Périmètres Irrigués de Bousalem, Gouvernorat de Jendouba, société civile et agriculteurs des régions de Jendouba et Bousalem dans la mesure où ce tracé passe au coeur du périmètre irrigué (Bouhertma 1 et Bouhertma 2) ce qui engendre de grandes pertes et une perturbation pour le secteur agricole qui est le plus important dans la zone. Ainsi, le bureau d'études a examiné une solution pertinente qui tient compte à la fois des exigences techniques et des préoccupations des autorités locales. Cette solution consiste donc à éviter la totalité du périmètre irrigué de Bousalem (Bouhertma 1 et Bouhertma 2) qui comporte plusieurs cultures d'arbres fruitiers et possède des rendements agricoles très significatifs allant jusqu'à être considéré comme zone agricole ayant une des fertilités les plus élevées en Tunisie. De même, un passage du tracé autoroutier à travers ces périmètres irrigués aurait eu d'incidences notables quand aux installations d'irrigation existantes, sans compter les rétablissements à envisager des deux côtés du projet dans sa configuration initiale. Ceci a été aussi confirmé lors de la réunion tenue au siège de la Direction Générale des Ponts et Chaussées en date du 04 octobre 2017 en présence des deux bureaux d'Etudes STUDI (chargé de l'étude du projet) et SCET-TUNISIE (chargé de la mission de contrôle, suivi et assistance technique de l'étude).
 - Ce lot fait environ 28 Km et prend origine à 5 Km environ avant la fin de l'autoroute existante Oued Zarga - Bousalem.

- **Lot n°2** – Entre la ville de Bulla Regia et la ville de Jendouba :
 - Une variante Nord de longueur 16,50 Km ;
 - Une variante Sud de longueur 25,80 Km ;

- **Lot n°3** – Entre la ville de Jendouba et la localité Ain El Baya
 - Une variante Nord de longueur 9,50 Km
 - Une variante Sud de longueur 9,90 Km;

- **Lot n°4** – Entre Ain El Baya et la frontière Algérienne
 - Deux variantes avec passage en tunnel (T1 et T2) de longueurs entre 20,50 Km à 21,40 Km ;
 - Une variante avec passage en surface de longueur 25 Km.

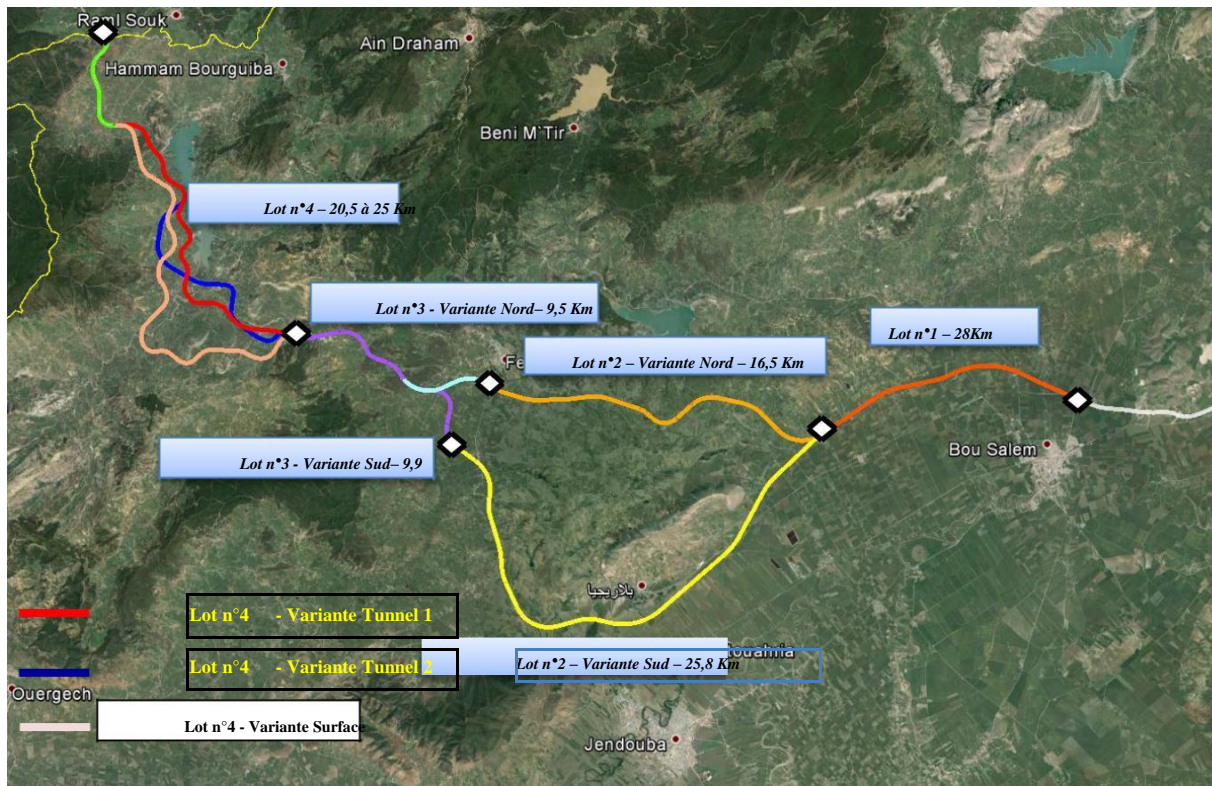


Figure 2: Variantes de tracés

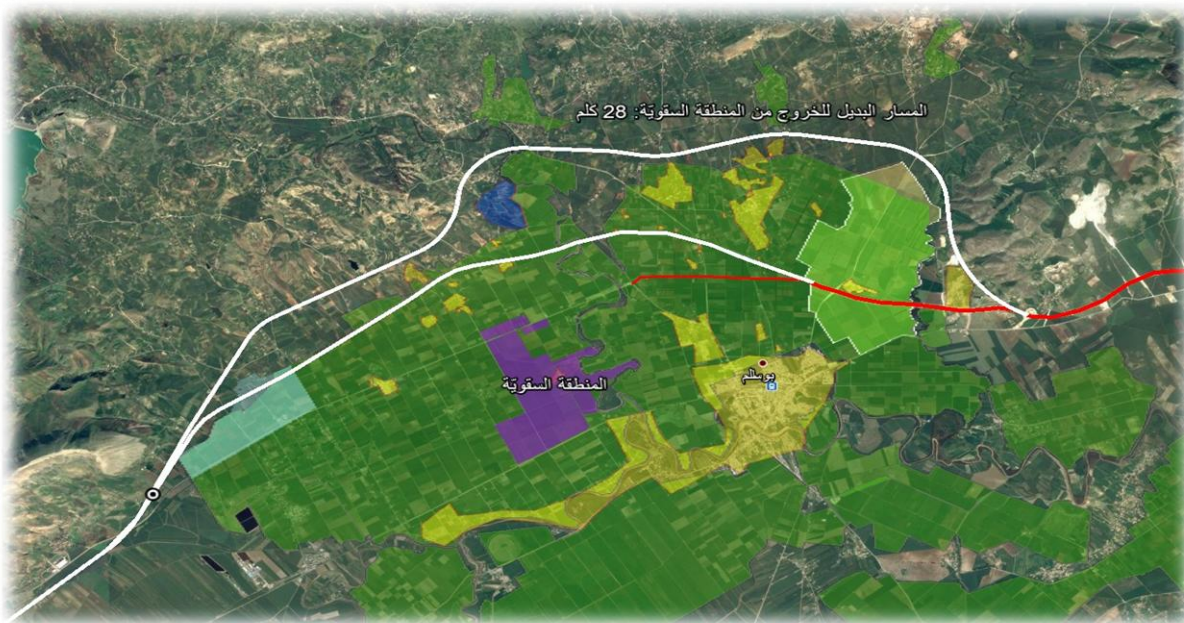


Figure 3 bis: Nouveau tracé du lot 1

3.2.1 Lot n°1: Bousalem (Origine projet sur l'autoroute existante) - Bulla Regia

Profil en travers

Le profil en travers type, adopté est en 2x2 voies avec un TPC de 12m permettant l'élargissement de l'autoroute à long terme en 2x3 voies, en procédant à l'acquisition de terrains et en réalisant les travaux préparatoires (terrassements, passages supérieurs...) sur le TPC.

Ainsi le profil en travers type proposé par le Bureau d'Etudes en section courante est comme suit :

- Deux chaussées de largeur 7,00 m chacune ;
- Un TPC de largeur 12,00 m y compris les bandes dérasées de gauche de largeur 1,00 m chacune ;
- Deux bandes d'arrêt d'urgence de largeur 3,00 m ;
- Une berme de largeur 1,50 m (y compris l'arrondi de talus de 0,50 m) côté remblai et 1,00 m côté déblai.

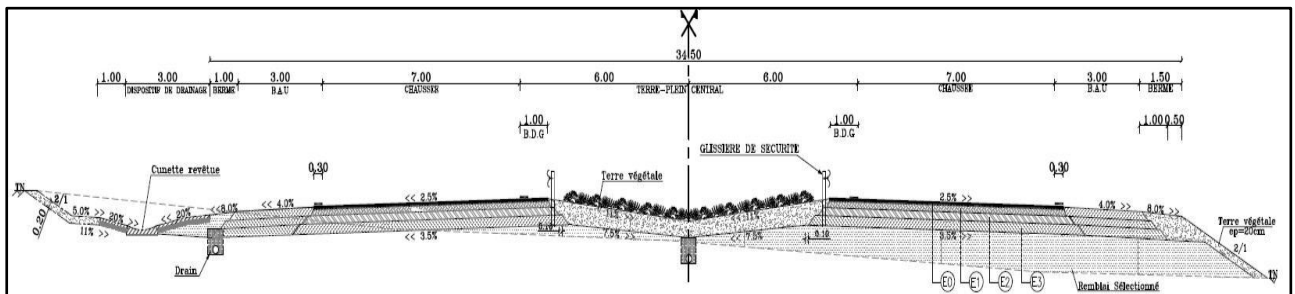


Figure 4: Profil en travers type proposé – Section courante

3.2.2 Lot n°2: Bulla Regia – Jendouba _ Variante Nord

De longueur **16,50** Km, cette variante de tracé évolue à travers un relief vallonné. Elle prend naissance au niveau du village « Douar Laarab » et se termine au niveau de la RN17 à environ 1 km de la ville de Fernana.

Tracé en plan

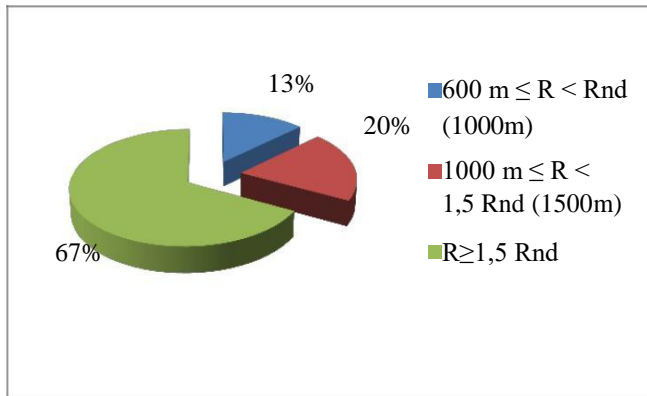
Le tracé en plan dans cette section est conforme aux normes de construction d'une autoroute de la catégorie L1.

Les valeurs des rayons sont comprises entre 800m et 5 000m tout en respectant les règles d'enchaînement.

Des clothôides ont été introduits lorsque le rayon est inférieur à 1,5 Rdn.

Le linéaire en alignement droit dans cette section est de 6,9 Km, soit 42% du tracé, alors que le linéaire en courbe est de 9,6 Km, soit 58% du tracé.

Le graphique ci-dessous résume la répartition des rayons en plan pour cette variante de tracé :



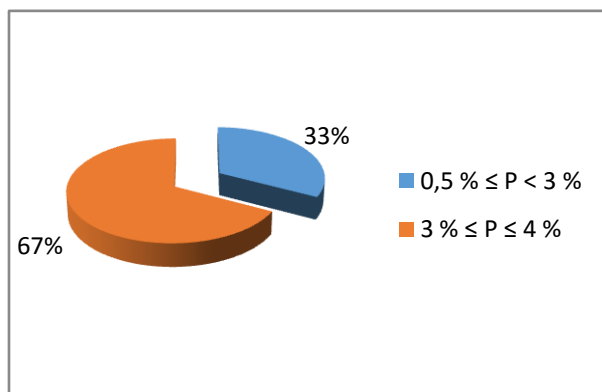
Graph 1 : Répartition des rayons en plan – Lot n°2 Variante Nord

Profil en long

Les caractéristiques en profil en long proposées dans cette section, correspondent à la catégorie L1 :

- Des déclivités comprises entre 0,8% et 4% ;
- Des rayons en angles saillants de 35 000 m ;
- Des rayons en angles rentrants compris entre 9 000m et 25 000m.

Le graphique ci-dessous résume la répartition des pentes longitudinales pour cette variante de tracé :



Graph 2: Répartition des pentes longitudinales – lot n°2 Variante Nord

Profil en travers

Le profil en travers type de la section courante du lot1 sera reconduit.

Pour les sections de fortes déclivités, le consultant propose le profil en travers suivant :

- Deux chaussées de largeur 7,00 m chacune ;
- Une Voie Supplémentaire pour Véhicule Lent (VSVL) de largeur 3,50 m ;

- Un TPC de largeur 6,00 m y compris les bandes dérasées de gauche de largeur 1,00 m chacune ;
- Deux bandes d'arrêt d'urgence de largeur 3,00 m ;
- Une berme de largeur 1,50 m (y compris l'arrondi de talus de 0,50 m) côté remblai et 1,00 m côté déblai.

Les zones concernées par l'aménagement des VSVL sont les suivantes :

- La section allant du PK 1+465 au PK 7+000 de part et d'autre ;
- La section allant du PK 9+080 au PK 12+640 d'un seul côté (à droite).

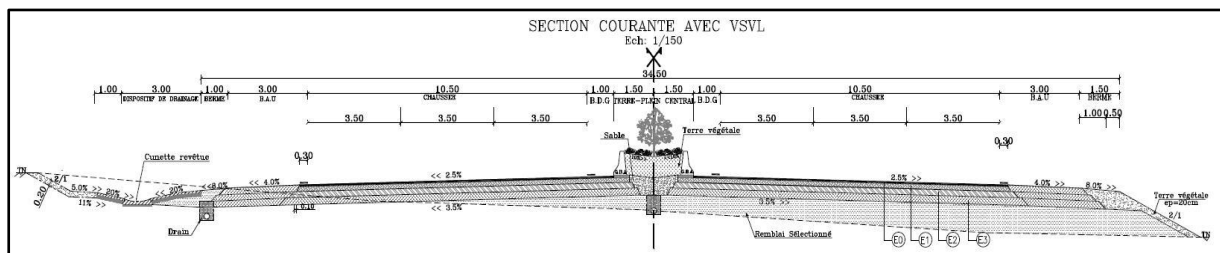


Figure 5: Profil en travers type - Section de l'autoroute avec VSVL

3.2.3 Lot n°2: Bulla Regia – Jendouba _ Variante Sud

De longueur **25,80 Km**, cette variante de tracé évolue à travers un relief plat à légèrement vallonné. La zone de tracé est caractérisée également par :

- La présence d'un grand nombre de sites patrimoniaux principalement mineurs selon la classification de l'INP ;
- La présence des périmètres publics irrigués et par une potentialité agricole très élevée.

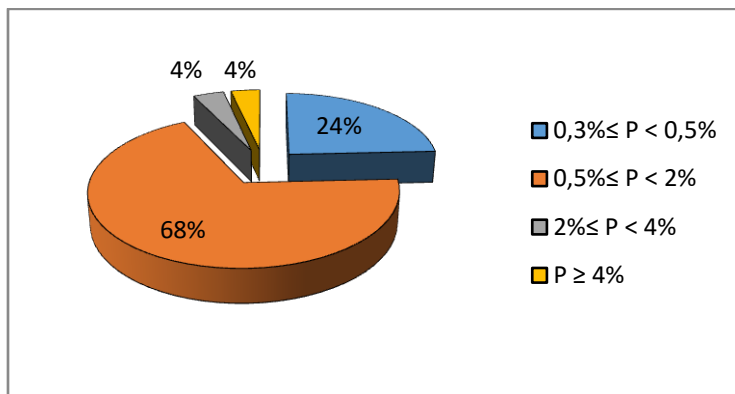
Tracé en plan

Le tracé en plan dans cette section présente de bonnes caractéristiques géométriques répondant aux normes de construction d'une autoroute de la catégorie L1. En effet, le plus petit rayon en plan utilisé dans cette section est de 1 550 m.

Le linéaire en alignement droit est de 14 Km, soit 54% du tracé, alors que le linéaire en courbe est de 11,80 Km, soit 46% du tracé.

Le profil en long présente également de bonnes caractéristiques géométriques. Les pentes varient généralement entre 0,3% et 3,5% mise à part la section allant du PK 23+200 au Pk 23+900 où la pente longitudinale est de 5%.

Le graphique ci-dessous résume la répartition des pentes longitudinales pour cette variante de tracé :



Graph 3: Répartition des pentes longitudinales – lot n°2 Variante Sud

On note que pour cette section de l'autoroute, le plus petit rayon en angle saillant adopté est de 12 000 m et le plus petit rayon en angle rentrant est de 10 000 m.

Profil en travers

Le profil en travers type en section courante est celui du lot1.

Le choix s'est porté sur la variante Sud telle que préconisée dans l'APS et ceci a été confirmée également lors de la réunion tenue au siège de la Direction Générale des Ponts et Chaussées en date du 04 octobre 2017 en présence des 2 bureaux d'Etudes STUDI et SCET-TUNISIE.

3.2.4 Lot n°3: Jendouba – Ain El Baya _ Variante Nord

De longueur 9,50 Km, ce tronçon de l'autoroute évolue à travers un relief vallonné. Le tracé débute au niveau du croisement avec la RN17 (à environ 1 km de la ville de Fernana) et se termine au niveau du village « Aîn El Baya ».

Vu la difficulté du relief traversé, la catégorie L2 a été retenue pour cette section de l'autoroute.

Par ailleurs, cette variante de tracé est caractérisée par la présence :

- ❑ d'une zone forestière au niveau de Mejen Eddamouss à l'Ouest de Fernana
- ❑ de terrains de potentialité agricole très élevée.

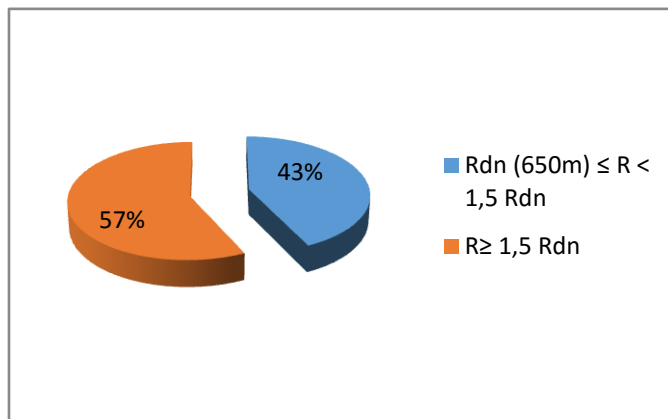
Tracé en plan

Le tracé en plan dans cette section est conforme aux normes de construction d'une autoroute de la catégorie L2.

Les valeurs des rayons sont comprises entre 700 m et 1 500m tout en respectant les règles d'enchaînement.

Le linéaire en alignement droit dans cette section est de 2,9 Km, soit 30% du tracé, alors que le linéaire en courbe est de 6,6 Km, soit 70% du tracé.

Le graphique ci-dessous résume la répartition des rayons en plan pour cette variante de tracé :



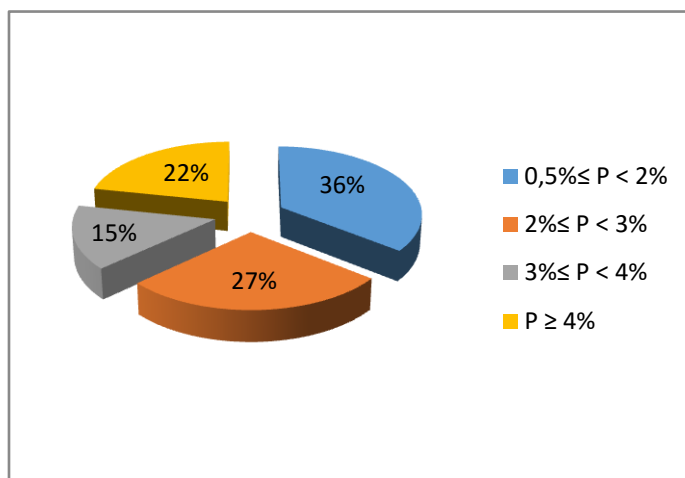
Graph 4: Répartition des rayons en plan – Lot n°3 Variante Nord

Profil en long

Les caractéristiques en profil en long proposées dans cette section, correspondent également à la catégorie L 2 :

- ❑ Des déclivités comprises entre 0,4% et 4,5%;
- ❑ Des rayons en angles saillants compris entre 9 000 m et 12 000 m;
- ❑ Des rayons en angles rentrants compris entre 6 000 m et 30 000 m.

Le graphique ci-dessous résume la répartition des pentes longitudinales pour cette variante de tracé :



Graph 5: Répartition des pentes longitudinales – lot n°3 Variante Nord

Profil en travers

Le profil en travers type en section courante du lot1 est reconduit.

Faisant suite à la consultation publique réalisée en octobre 2016 au siège du Gouvernorat de Jendouba, les divers présents ont adopté la variante Sud comme variante de tracé à retenir pour la suite de l'étude autoroutière. Ceci a été confirmée lors de la réunion tenue au siège de la Direction Générale des Ponts et Chaussées en date du 04 octobre 2017 en présence des 2 bureaux d'Etudes STUDI et SCET-TUNISIE.

3.2.5 Lot n°3: Jendouba – Ain El Baya _ Variante Sud

De longueur 9,90 Km, le tracé évolue à travers un relief accidenté. Ainsi, la catégorie L2 est proposée pour cette section de l'autoroute.

Comme pour la variante Nord, le tracé traverse une zone forestière au niveau de Mejen Eddamouss, des périmètres publics irrigués sur environ 3 Km ainsi que des terrains de potentialité agricole très élevée.

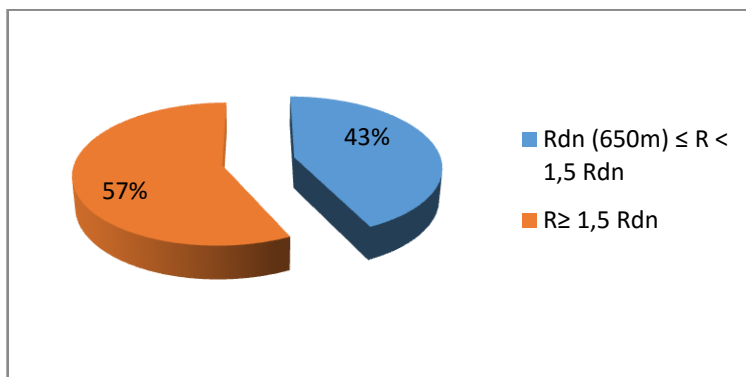
Tracé en plan

Le tracé en plan dans cette section répond aux normes de construction d'une autoroute de la catégorie L2.

Les valeurs des rayons sont comprises entre 700 m et 1 000m tout en respectant les règles d'enchaînement.

Le linéaire en alignement droit dans cette section est de 3,85 Km, soit 39% du tracé, alors que le linéaire en courbe est de 6,05 Km, soit 61% du tracé.

Le graphique ci-dessous résume la répartition des rayons en plan pour cette variante de tracé :



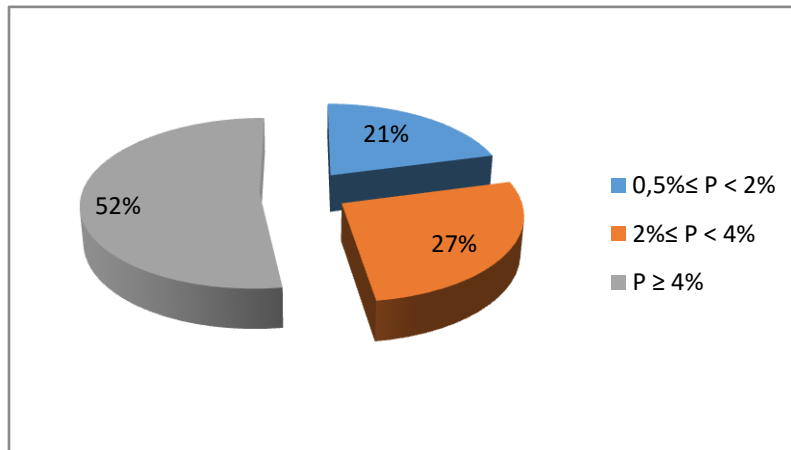
Graph 6: Répartition des rayons en plan – Lot n°3 Variante Sud

Profil en long

Les caractéristiques en profil en long proposées dans cette section, correspondent également à la catégorie L 2 :

- ❑ Des déclivités comprises entre 0,6% et 5%;
- ❑ Des rayons en angles saillants compris entre 7 000 m et 10 000 m;
- ❑ Des rayons en angles rentrants compris entre 6 000 m et 15 000 m.

Le graphique ci-dessous résume la répartition des pentes longitudinales pour cette variante de tracé :



Graph 7: Répartition des pentes longitudinales – lot n°3 Variante Sud

Profil en travers

Le profil en travers type en section courante du lot1 est reconduit.

3.2.6 Lot n°4: Ain El Baya – frontière Algérienne _ Variante Tunnel 1

De longueur 20,51 Km, le tracé prend origine au niveau de la localité Aïn El Baya et se termine au niveau de l'autoroute Est/Ouest à la frontière Algérienne. Il traverse des zones de potentialité agricole très élevée sur environ 5 km ainsi que quelques périmètres publics irrigués.

On note aussi l'existence d'une ligne électrique Haute Tension du Pk0 au PK9, PK12, PK14.5, PK15.5 et PK16.5.

Cette zone est caractérisée également par son relief très accidenté avec des pentes très élevées. Ainsi la catégorie L2 a été adoptée dans cette section.

Par ailleurs, la succession de zones de déblai et de remblai très importants impose la mise en place d'un tunnel de longueur 1 600 m ainsi que six grands ouvrages de type viaduc de longueur totale de 3 218 m.

Tracé en plan

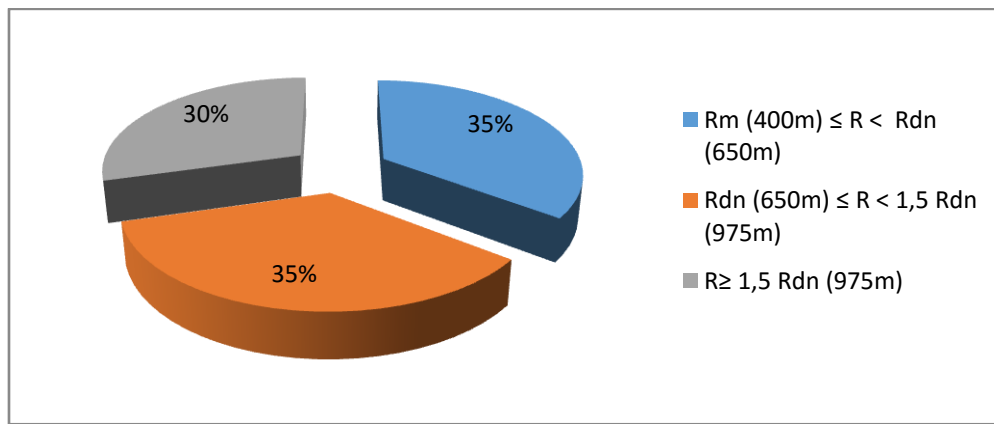
Le tracé en plan dans cette section répond aux normes de construction d'une autoroute de la catégorie L2.

Les valeurs des rayons sont comprises entre 400 m et 5 500 m tout en respectant les règles d'enchaînement.

Des clothôides ont été introduits lorsque le rayon est inférieur à 1,5 Rdn.

Le linéaire en alignement droit dans cette section est de 6,06 Km, soit 30% du tracé, alors que le linéaire en courbe est de 14,45 Km, soit 70% du tracé.

Le graphique ci-dessous résume la répartition des rayons en plan pour cette variante de tracé :



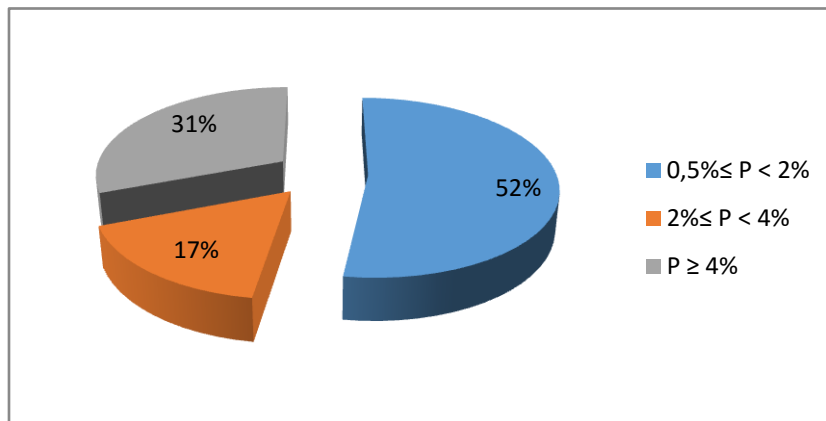
Graph 8: Répartition des rayons en plan – Lot n°4 Variante Tunnel 1

Profil en long

Les caractéristiques en profil en long proposées dans cette section, correspondent également à la catégorie L 2 :

- ❑ Des déclivités comprises entre 0,5% et 5%;
- ❑ Des rayons en angles saillants compris entre 12 000 m et 30 000 m;
- ❑ Des rayons en angles rentrants compris entre 13 000 m et 22 000 m.

Le graphique ci-dessous résume la répartition des pentes longitudinales pour cette variante de tracé :



Graph 9: Répartition des pentes longitudinales – lot n°4 Variante Tunnel 1

Profil en travers

Vu les difficultés du relief traversé, le consultant propose le profil en travers type suivant en section courante :

- Deux chaussées de largeur 7,00 m chacune ;
- Un TPC de largeur 8,10 m muni de dispositifs de retenue en béton type GBA ainsi que deux bandes dérasées de gauche de largeur 1,00 m chacune ;
- Deux bandes d'arrêt d'urgence de largeur 3,00 m ;
- Une berme de largeur 1,50 m (y compris l'arrondi de talus de 0,50 m) côté remblai et 1,00 m côté déblai.

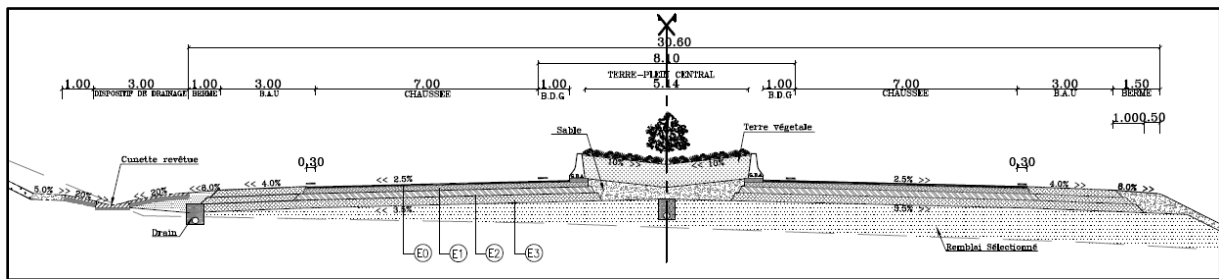


Figure 6: Profil en travers type proposé en relief difficile – Section courante

Ce profil en travers type a été adopté afin d'assurer à la fois :

- ❑ Un aménagement d'une VSVL en cas de fortes déclivités et ;
- ❑ Un élargissement futur de l'autoroute en 2x3 voies définitives.

Ainsi, le profil en travers type proposé dans ce cas, est le suivant :

- Deux chaussées de largeur 7,00 m chacune ;
- Une Voie Supplémentaire pour Véhicule Lent (VSVL) de largeur 3,50 m ;
- Un TPC de largeur 2,10 m muni d'un dispositif de retenue en béton type DBA et de deux bandes dérasées de gauche de largeur 0,75 m chacune ;
- Deux bandes d'arrêt d'urgence de largeur 2,50 m ;
- Une berme de largeur 1,50 m (y compris l'arrondi de talus de 0,50 m) côté remblai et 1,00 m côté déblai.

Notons que cette variante de tracé nécessite l'aménagement des VSVL sur une longueur de 2,50 Km.

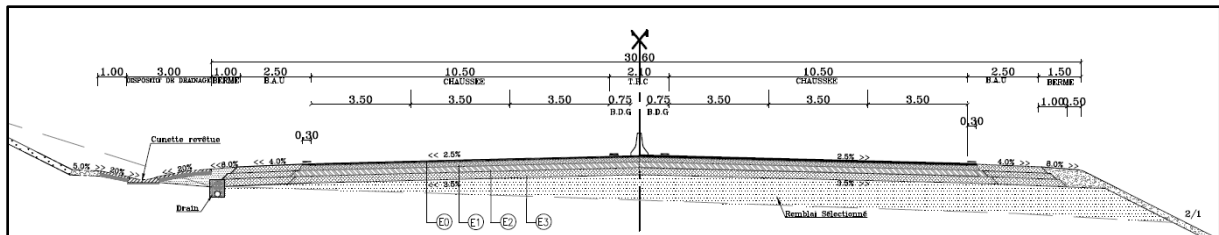


Figure 7: Profil en travers type proposé en relief difficile – Section courante

3.2.7 Lot n°4: Ain El Baya – frontière Algérienne _ Variante Tunnel 2

Traversant un relief très accidenté, cette variante de tracé est de longueur 21,43 Km. Elle prend origine au niveau de la localité Aïn El Baya, traverse ensuite Oued Barbara pour prendre une direction Nord contournant les reliefs de Djebel Tegma. Enfin, le tracé redescend vers la vallée d'oued Barbara à l'aval du barrage, pour joindre la frontière Algérienne au niveau du point de jonction.

La succession de zones de déblai et de remblai très importants au niveau de cette variante impose la mise en place d'un tunnel de longueur 1 400 m ainsi que six grands ouvrages de type viaduc de longueur totale de 4 040m.

Comme pour la variante Tunnel 1, cette variante de tracé traverse des zones de potentialité agricole très élevée ainsi que quelques périmètres publics irrigués.

Tracé en plan

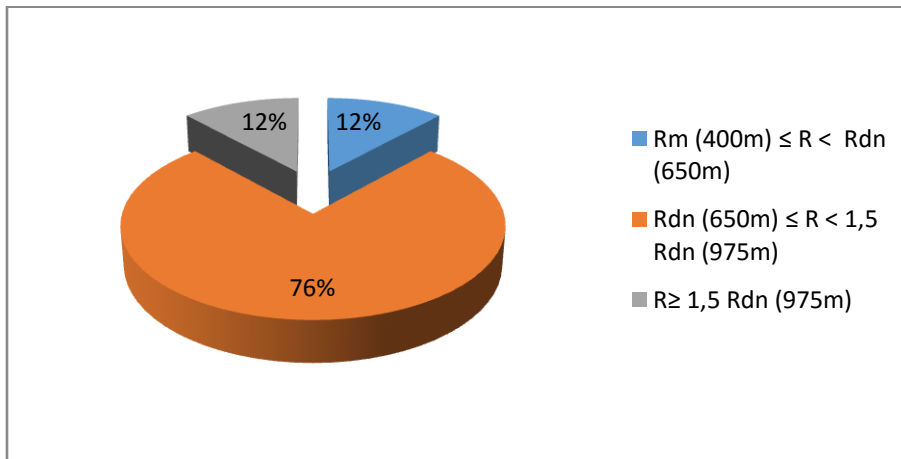
Le tracé en plan dans cette section répond aux normes de construction d'une autoroute de la catégorie L2.

Les valeurs des rayons sont comprises entre 400 m et 5 000 m tout en respectant les règles d'enchaînement.

Des clothôides ont été introduits lorsque le rayon est inférieur à 1,5 Rdn.

Le linéaire en alignement droit dans cette section est de 7,57 Km, soit 35% du tracé, alors que le linéaire en courbe est de 13,86 Km, soit 65% du tracé.

Le graphique ci-dessous résume la répartition des rayons en plan pour cette variante de tracé :



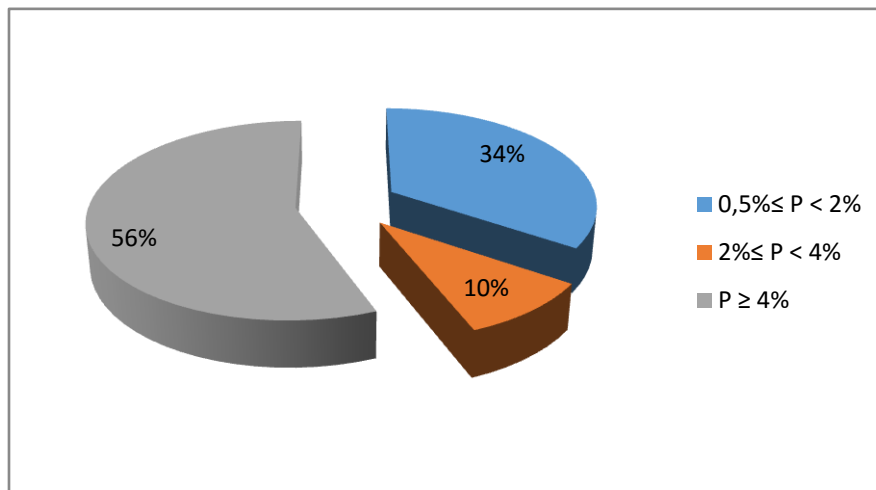
Graph 10: Répartition des rayons en plan – Lot n°4 Variante Tunnel 2

Profil en long

Les caractéristiques en profil en long proposées dans cette section, correspondent également à la catégorie L 2 :

- ❑ Des déclivités comprises entre 0,3% et 5%;
- ❑ Des rayons en angles saillants compris entre 12 500 m et 28 000 m;
- ❑ Des rayons en angles rentrants compris entre 13 000 m et 22 000 m.

Le graphique ci-dessous résume la répartition des pentes longitudinales pour cette variante de tracé :



Graphique 11: Répartition des pentes longitudinales – Lot n°4 Variante Tunnel 2

Profil en travers

Le profil en travers type proposé, en section courante, est le même que celui de la variante tunnel1.

Cette variante de tracé nécessite également l'aménagement des VSVL sur une longueur de 8,50 Km.

3.2.8 Lot n°4: Ain El Baya – frontière Algérienne _ Variante Surface

De longueur 25 Km, le tracé évolue à travers un relief très accidenté. Ainsi, la catégorie L2 est proposée pour cette section de l'autoroute.

Comme pour les variantes en Tunnel, le tracé traverse une zone caractérisée par une potentialité agricole très élevée et par la présence des périmètres publics irrigués. On note aussi la présence d'une ligne Haute tension et d'une zone forestière au Pk17,5.

Les contraintes topographiques rencontrées, impose la mise en place six grands ouvrages de type viaduc de longueur totale de 3 500 m.

Tracé en plan

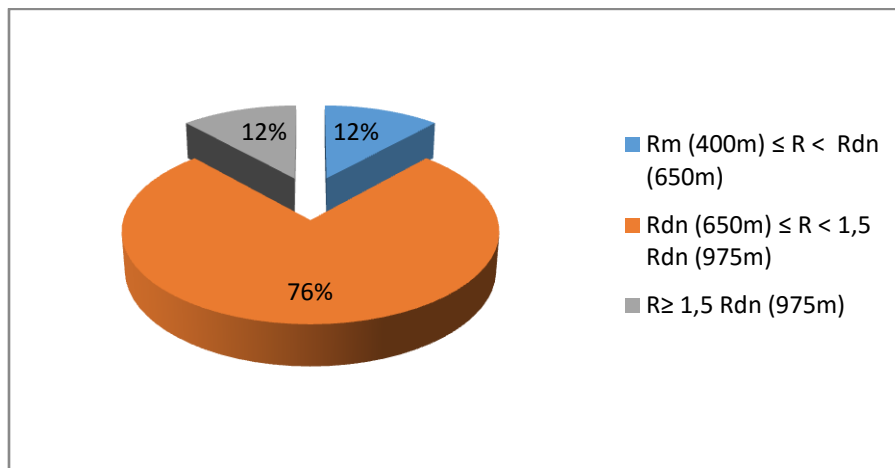
Le tracé en plan dans cette section répond aux normes de construction d'une autoroute de la catégorie L2.

Les valeurs des rayons sont comprises entre 600 m et 1 000 m tout en respectant les règles d'enchaînement.

Des clothôides ont été introduits lorsque le rayon est inférieur à 1,5 Rdn.

Le linéaire en alignement droit dans cette section est de 7,25 Km, soit 29% du tracé, alors que le linéaire en courbe est de 17,78 Km, soit 71% du tracé.

Le graphique ci-dessous résume la répartition des rayons en plan pour cette variante de tracé :



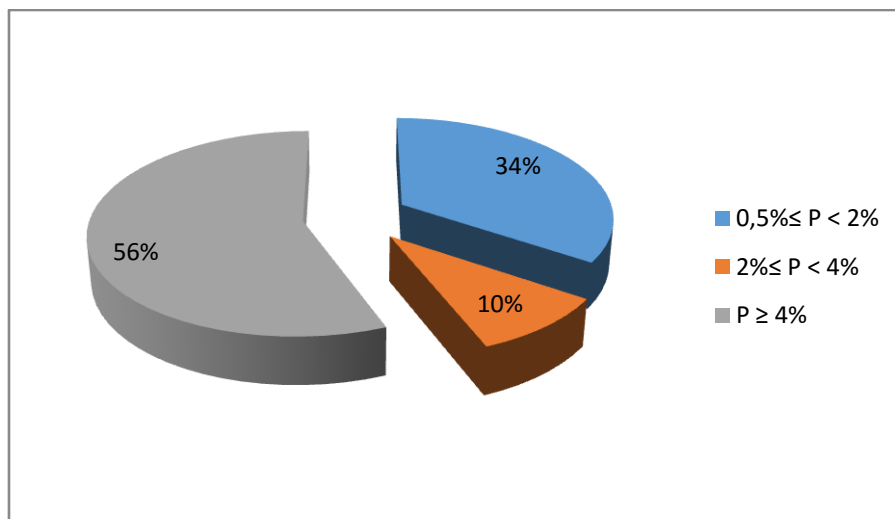
Graph 12: Répartition des rayons en plan - Lot n°4 Variante Surface

Profil en long

Les caractéristiques en profil en long proposées dans cette section, correspondent également à la catégorie L 2 :

- ❑ Des déclivités comprises entre 0,5% et 4,5%;
- ❑ Des rayons en angles saillants compris entre 12 500 m et 26 000 m;
- ❑ Des rayons en angles rentrants compris entre 13 000 m et 40 000 m.

Le graphique ci-dessous résume la répartition des pentes longitudinales pour cette variante de tracé :



Graph 13: Répartition des pentes longitudinales – Lot n°4 Variante Surface

Profil en travers

Le profil en travers type proposé, en section courante, est le même que celui de la variante tunnel.

Cette variante de tracé nécessite également l'aménagement des VSVL sur une longueur de 3,50 Km.

Le choix s'est porté sur la variante surface telle que préconisée dans l'APS et ceci a été confirmée également lors de la réunion tenue au siège de la Direction Générale des Ponts et Chaussées en date du 04 octobre 2017 en présence des 2 bureaux d'Etudes STUDI et SCET-TUNISIE.

3.2.9 Récapitulatif des principales caractéristiques des variantes élaborées

Les principales caractéristiques des différentes variantes élaborées, sont données dans le tableau suivant :

Tableau 4: : Principales caractéristiques des variantes

Variantes	Lot 1	Lot 2		Lot 3		Lot 4		
		Nord	Sud	Nord	Sud	Variante T1	Variante T2	Variante Surface
Longueur (Km)	28	16,50	25,80	9,49	9,90	20,51	21,43	25,03
Nombre de Viaducs	-	3	-	-	-	6	6	6
Longueur totale des viaducs (ml)	-	1090	-	-	-	3 218	4 040	3 430
Longueur des tunnels (ml)	-	-	-	-	-	3200	2800	0
Longueur des VSVL	-	8164	-	-	-	2434	8322	7 977
Quantité de déblais (m ³)	A établir	5 180 000	1 620 000	1 240 000	1 920 000	10 430 000	11 560 000	22 710 000
Quantité de remblais (m ³)	A établir	1 180 000	1 740 000	1 500 000	1 260 000	3 900 000	4 950 000	6 900 000

3.3 ECHANGEURS

Pour assurer la fluidité des échanges entre le tronçon autoroutier et le réseau routier structurant, le Bureau d'Etudes propose l'aménagement des échangeurs de type trompète, répondant aux normes de l'ICTAAL 2015, qui sont les mieux adaptés au système de péage fermé.

Le tracé Nord comportera trois (03) échangeurs:

- Une connexion avec une bretelle en liaison avec la RR59 ;
- Une intersection avec la RN17 à 1 km au sud de la ville de Fernana ;
- Une intersection avec la RL414 à 3 km de la frontière algérienne.

Quant au tracé Sud, il comportera également trois (03) échangeurs :

- Une intersection avec la RN17 (Jendouba, section sud) ;
- Une connexion avec une bretelle en liaison avec la RN17 (Fernana, section nord) ;
- Une intersection avec la RL414 (Hammam Bourguiba).

Tous ces échangeurs seront reliés à la route existante par une bretelle de liaison équipée d'une gare de péage.

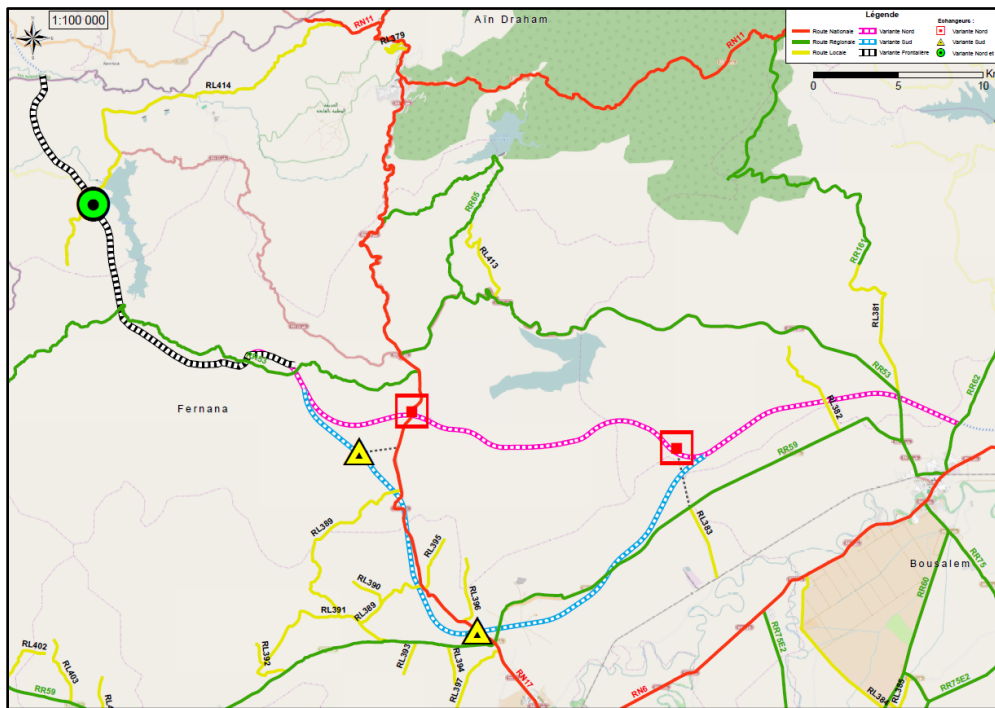


Figure 8: Position des échangeurs proposés

3.4 RETABLISSEMENT DE COMMUNICATIONS

L'ensemble des rétablissements a été conçu selon le guide technique d'« Aménagement des Routes Principales » du SETRA (Août 1994).

Le choix de ces rétablissements a été établi sur la base des critères suivants :

- Toutes les routes classées sont à rétablir en profil en travers type 1 (2 voies de 3,5m) ;
- Les pistes revêtues sont aussi à rétablir en profil en travers type 2 (2 voies de 3m);
- Les pistes non revêtues mais assurant la desserte d'agglomérations ou d'exploitations agricoles sont aussi à rétablir en profil en travers type 2 ;
- Les pistes non rétablies seront rabattues sur des pistes rétablies.

Par ailleurs, l'étude de prévision du trafic a montré la nécessité du dédoublement en 2x2 voies de la RN17 à partir de 2035. Ainsi, le profil en travers type proposé pour le rétablissement de la RN17 est 2x2 voies.

4 ETUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE SOMMAIRE

4.1 DONNEES METEOROLOGIQUES

4.1.1 Pluviométrie

□ La pluviométrie annuelle

Les données suivantes ont été collectées pour la majorité des stations disponibles dans la zone du projet :

Tableau 5 : Pluviométrie annuelle

Stations	Période	Moyenn e	Ecart type	Maximu m	Minimu m	médian e	Coefficient de variation
Ain Draham	98/99- 95/96	1563	308	2248	854	1552	0,20
Hammam Bourguiba	67/68- 91/92	962	228	1391	474	909	0,24
Ain Hamraya	70/71- 05/06	908	216	1414	579	878	0,24
Oued Barbara	82/83- 10/11	790	204	1196	438	728	0,30
Bou Heurtma	62/63- 05/06	695	167	1050	335	707	0,24
Bou Salem	00/01- 05/06	458	115	829	229	453	0,25
Jendouba	11/12- 05/06	456	103	729	249	434	0,23

On note l'abondance des pluies et leur relative régularité spatiale et temporelle, avec un gradient altimétrique remarquable entre Jendouba et Ain Drahem.

□ La pluviométrie saisonnière

La répartition moyenne saisonnière (%) aux principales stations est résumée dans le tableau suivant :

Tableau 6: Pluviométrie saisonnière

STATIONS	Automne	Hiver	Printemps	Eté
AIN DRAHEM	27%	46%	24%	3%
HAMMAM BOURGUIBA	25%	47%	25%	3%
AIN HAMRAYA	26%	46%	25%	3%
OUED BARBARA	25%	47%	25%	3%
BOU HEURTMA	27%	47%	22%	4%
BOU SALEM	30%	38%	26%	6%
JENDOUBA	26%	39%	29%	7%

□ **La pluviométrie mensuelle**

Les apports mensuels sont encore plus irréguliers, toutefois on enregistre en moyenne les valeurs suivantes :

Tableau 7: Pluviométrie mensuelle

Stations	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
Ain Drahem	66	150	199	268	257	193	171	135	77	28	7	14
Hammam Bourguiba	52	74	116	161	171	120	104	94	46	13	2	7
Ain Hamraya	50	70	109	152	161	113	98	89	44	13	2	7
Oued Barbara	43	61	95	132	140	98	85	77	38	11	2	6
Bou Heurtma	31	72	87	127	96	102	60	65	31	16	4	4
Bou Salem	38	51	47	59	58	57	52	43	25	16	1	10
Jendouba	30	45	42	64	61	52	52	46	34	16	4	10

□ **Les pluies extrêmes**

Dans la zone du projet, la statistique des pluies maximales journalières annuelles aux principales stations représentatives du secteur pluviométrique donne les valeurs récurrentielles suivantes :

Tableau 8: Pluies extrêmes

STATIONS	P2	P5	P10	P20	P50	P100	Gradex
AIN DRAHEM	98,2	127,8	147,4	166,2	190,5	208,7	26,09
HAMMAM BOURGUIBA	65,1	85,3	98,7	111,6	128,2	140,6	17,83
AIN HAMRAYA	71,9	95,9	111,8	127,1	146,8	161,6	21,19
OUED BARBARA	64,3	85,4	99,5	112,9	130,3	143,3	18,66
BOU HEURTMA	50,9	68,2	79,6	90,6	104,8	115,5	15,24
BOU SALEM	34,1	43,9	50,4	56,7	64,7	70,8	8,66
JENDOUBA	36,2	47,2	54,6	61,5	70,6	77,4	9,74

Il ressort que les pluies extrêmes journalières sont très violentes, En effet, ces pluies peuvent atteindre 50 à 100 mm/jour une fois tous les deux ans. Il est également utile de souligner que le maximum journalier est souvent dû à un maximum horaire, et les intensités pluviométriques sont souvent fortes, tout particulièrement en altitude.

4.1.2 Intensité des pluies

Les intensités – durées pour différentes périodes de retour suivent la loi de pluviosité de Montana :

$$I_{(mm/h)} = a \cdot t^{-b}$$

Ci-dessous les valeurs de « a » et « b » de la loi de pluviosité de Montana (T=10 ans), aux deux stations disponibles dans la région :

Tableau 9: : valeurs « a » et « b » de Montana (T=10 ans)

STATIONS	a	b
JENDOUBA (INM)	849,3	-0,82
AIN DRAHAM (DGRE)	1822,1	-0,75

4.2 ETUDE HYDROLOGIQUE

4.2.1 Caractéristiques morphologiques des bassins versants

La détermination des caractéristiques morphologiques des bassins versants et des conditions d'écoulement est réalisée à partir des documents cartographiques, des informations bibliographiques et des données disponibles sur la région. Les cartes d'Etat-major à l'échelle 1/50 000ème sont utilisées pour délimiter les bassins versants.

L'étude morphologique a pour objectifs essentiels de caractériser les données physiques des bassins versants. Elles consistent en :

- La superficie S du bassin versant,
- Le périmètre P du bassin versant,
- L'indice de compacité du bassin versant (Kc), $Kc = 0.282 P S^{-0.5}$ cet indice est égal à 1 pour un disque, et s'éloigne de la valeur de 1 d'autant plus que le bassin versant est de forme allongée.
- La longueur « L » et la largeur « l » du rectangle équivalent, en assimilant le bassin versant à un rectangle dont on connaît le périmètre P et la surface S.
- L'altitude maximale H_{max} et minimale H_{min} du bassin versant.
- L'altitude médiane à 50% de la surface du bassin versant.
- L'indice global de pente qui est retenu est : $I_g = (H_{max} - H_{min})/L$.
- La dénivelée spécifique D_s est égal à : $D_s = I_g S^{-0.5}$, la valeur obtenue permet de classer comme suit le relief du bassin versant :

Tableau 10: Classification du relief des bassins versants

Ds (m)	<10	10 - 25	25 - 50	50 – 100	100 – 250	250 – 500	>500
Classe	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇
Relief	Très faible	Faible	Assez faible	Modéré	Assez fort	Fort	Très fort

4.2.2 Choix de la période de retour

On admet généralement les valeurs suivantes des débits de crues de projet :

Tableau 11 : Choix de la période de retour T

	Période de retour T
Routes de faibles importances	10 – 20 ans
Routes de grande importance	30 – 50 ans
Autoroutes	100 ans

Donc, sauf prescriptions contraires, nous adopterons vraisemblablement le seuil de récurrence suivant : le débit centennal pour les ouvrages de drainage de la digue autoroutière (buses et dalots) et pour les ouvrages de traversée (ponts et viaducs).

4.2.3 Méthodes de calcul des débits des crues

Les méthodes pour l'estimation des débits de crues sont exploitables concurremment pour estimer les débits de crues des bassins versants interceptés par l'autoroute, et les débits de projet à adopter pour les ouvrages de franchissement.

Il existe une panoplie assez large de méthodes hydrologiques pour l'estimation d'un débit de crue pour un bassin versant donné.

Un organigramme des méthodes applicables a été établi par STUDI. Il permet de mettre au point une démarche d'évaluation des débits de pointe des crues exceptionnelles sur des bassins versants interceptés par un tracé routier ou autoroutier, et ceci afin de proposer des éléments de calculs hydrologiques croisés pour la détermination des débits de projet.

- ❑ Pour les bassins versants dont la superficie (S) est comprise entre quelques hectares à quelques km² : l'estimation des débits est basée sur le croisement de la méthode rationnelle « CIA » et de la méthode déterministe « SCS » ;
- ❑ Pour les bassins versants dont la superficie (S) est comprise entre quelques km² et quelques dizaines de km², l'estimation des débits est basée sur le croisement de la méthode conceptuelle « IRD », et de la méthode régionale « DGRE » ;
- ❑ Pour les bassins versants dont la superficie (S) est comprise entre quelques dizaines et quelques centaines de km², l'estimation des débits est basée sur le croisement de la méthode probabiliste « SPEED », de la méthode universelle « ORSTOM » ;

Pour la présente étude, les méthodes sont appliquées et croisées selon l'organigramme suivant, sans prétendre pour autant synthétiser la démarche pour toutes les études routières et dans toutes les régions du pays :

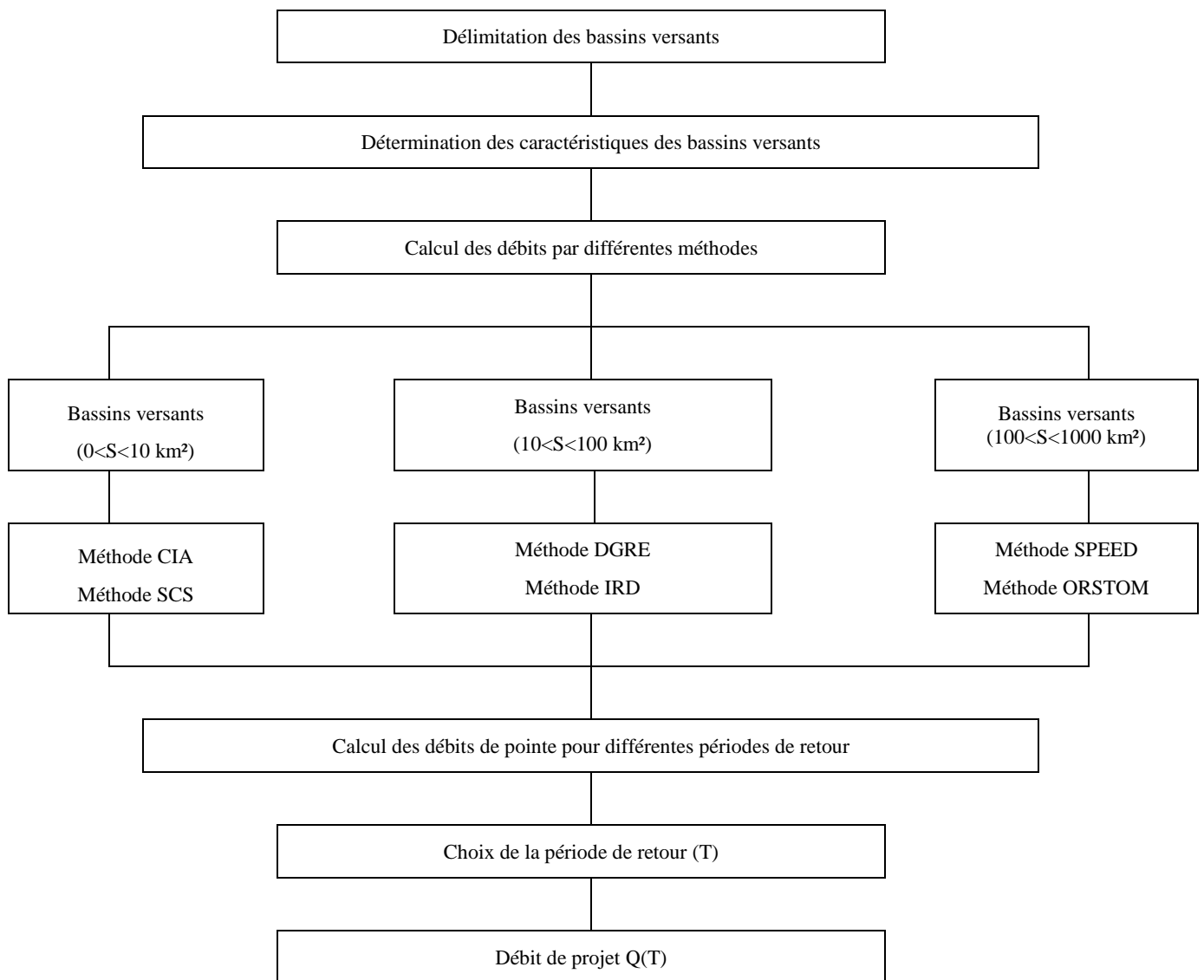


Figure 9 : Organigramme des méthodes hydrologiques généralement applicables en Tunisie

4.2.4 Résultats du calcul

Les débits de projet des bassins versants incluant des barrages, sont estimés pour une hypothèse sécuritaire : La retenue du barrage est pleine à la cote normale quand la crue de projet (Q_{100}) se produit (la crue passe sans amortissement).

Les écoulements des bassins versants n°1 et 2 du lot 1 sont interceptés, avant d'atteindre l'autoroute, par le canal en terre existant longeant l'autoroute jusqu'à Oued Kasseb (OA en cours de construction dans le cadre de l'autoroute Oued Zarga Bousalem). Le dimensionnement des ouvrages de traversée des deux bassins sera estimé en tenant compte du débit capable de transit du canal.

4.3 ETUDE HYDRAULIQUE

4.3.1 Objet de l'étude hydraulique

L'autoroute peut constituer un obstacle à l'écoulement naturel en cas de crue, et réciproquement, l'écoulement peut générer des dommages à l'autoroute.

Les ouvrages hydrauliques de rétablissement des écoulements doivent donc être correctement dimensionnés pour limiter les risques de :

- ❑ Submersion et donc de coupure de la circulation,
- ❑ L'inondation à l'amont de la voie,
- ❑ Rupture de l'ouvrage routier.

Le choix du niveau d'aménagement est un compromis à rechercher entre le coût d'investissement de l'infrastructure et les conséquences et risques d'une perturbation locale et temporaire de la circulation.

Pour l'autoroute, la gêne causée aux utilisateurs par une coupure de la circulation, même temporaire, n'est pas tolérable. En conséquence les ouvrages de franchissement seront dimensionnés pour les crues centennales.

Le franchissement des cours d'eau par l'Autoroute nécessite l'implantation d'un certain nombre d'ouvrages hydrauliques capables d'évacuer les débits de crues aux différents exutoires.

La conception de ces ouvrages dépend de nombreux facteurs :

- ❑ Débit de crue,
- ❑ Morphologie du lit et fonctionnement hydraulique,
- ❑ Profil en long de l'Autoroute au droit du franchissement.

Ainsi, pour un même débit de crue, l'ouverture et le type de structure pourront être très différents selon que le lit soit marqué ou non, qu'il y ait possibilité ou non de stockage des pointes de crue, que la plate-forme de l'Autoroute soit proche du terrain naturel ou en grand remblai.

Les aménagements proposés consistent en :

- ❑ La construction d'ouvrages d'art (GOH) au droit des franchissements des écoulements importants ;
- ❑ La Construction d'ouvrages hydrauliques de type dalots simples ou multiples au droit des franchissements des moyens et petits écoulements.

4.3.2 Dimensionnement des ouvrages de franchissement

Pour assurer une bonne évacuation des débits et empêcher le dépôt des particules solides et réduire les risques d'obstruction par le charriage solide (branches d'arbres, détritiques, déchets divers...), les ouvrages hydrauliques projetés sont généralement dimensionnés en régime torrentiel.

Les paramètres et les résultats de la méthode proposée ci-après, proviennent de nombreux travaux de recherches et de mesures sur le terrain et dont la récapitulation est donnée dans le document intitulé « Hydraulic chart for the selection of highway culverts » du « department of Transportation » des Etats-Unis.

Une synthèse complète de ces résultats est également présentée sous formes de variables adimensionnelles et d'abaques dans le document intitulé « hydraulique routière » du BCEOM.

4.3.3 Calcul des cotes PHE des ouvrages d'art (GOH)

Au niveau des traversées de grands d'écoulement, des profils en travers sommaires des oueds ont été réalisés.

Pour différentes hauteurs d'eau dans l'oued, les débits correspondants sont calculés par la formule Manning-Strickler. Un graphique hauteur-débit est dressé.

$$Q = k S_m R_h^{2/3} i^{1/2}$$

La cote des plus hautes eaux (PHE) correspondant au débit de projet (Q_{100}) au droit de l'ouvrage est déterminée à partir du graphique hauteur-débit.

Le calage du pont par rapport à la cote PHE (cote inférieure du tablier) doit prendre en considération :

- Un tirant d'air qui permet de protéger le pont contre le charriage et sert aussi comme tranche de sécurité contre le risque de passage des crues plus importantes que celle du projet,
- La surélévation de la cote naturelle de l'eau due à l'étranglement de l'oued au niveau de l'implantation du pont.

Le tableau qui suit récapitule les hauteurs PHE des oueds au droit des différents ouvrages d'art.

Tableau 12: Côtes PHE au droit des ouvrages d'art

Variante	PK OA	Q_{100} (m ³ /s)	Hauteur PHE (m)	Hauteur minimale de l'OA (m)
Lot 2 - Variante nord	12+200	100	0,68	4,18
	15+240	152	1,56	5,06
Lot 2 - Variante sud	2+440	166	0,82	4,32
	21+000	125	0,65	4,15
	25+418	107	0,65	4,15
Lot 3 - Variante nord	2+880	275	2	5,5
Lot 3 - Variante sud	29+120	275	2	5,5
Lot 4 - Variante Tunnel 1	5+540	385	3,3	6,8
	7+160	108	0,7	4,2
Lot 4 Lot 4 - Variante Tunnel 2	6+300	391	1,6	5,1
	7+500	103	2,1	5,6
Lot 4 – Variante surface	5+800	95	1,8	5,3
	8+360	339	3,2	6,7
	11+800	119	1,8	5,3
Lot 4 – Tronçon commun	0+900	499	3,5	7

4.3.4 Drainage longitudinal

Pour se prévenir contre les effets néfastes de l'eau et assurer la stabilité et la longévité de l'autoroute, il est nécessaire de l'équiper par un système de drainage bien adapté convenablement conçu et soigneusement dimensionné.

Le drainage longitudinal consiste à faire évacuer les eaux de ruissellement en provenance de l'emprise de l'autoroute, des talus et des bassins versants extérieurs environnants par l'intermédiaire d'un réseau de collecte et de décharge vers des exutoires à l'extérieure de l'emprise de l'autoroute.

Fossé de crête de talus en zone de déblai

Son rôle est d'éviter l'érosion des talus. Il intercepte les eaux de ruissellement du bassin versant extérieur.

Fossé en pied de talus en zone de déblai

Son rôle est de collecter les ruissellements en provenance des talus de déblai, de la chaussée, de la bande d'arrêt d'urgence et de la berme.

Caniveau de terre-plein central (TPC)

Le caniveau TPC a pour fonction de collecter et d'évacuer les eaux de ruissellement issues du TPC et de la voie, ou demi voie déversée.

Aménagement de crête de talus de remblai

L'aménagement est constitué par des bordures bétonnées longitudinales et des décentes d'eau espacées de 30 m pour décharger l'eau vers le fossé de pied de talus.

Fossé de pied de talus en zone de remblai

Il se situe au pied du remblai au niveau du terrain naturel. Son rôle est de collecter les ruissellements issus de la chaussée et du talus de remblai et éventuellement des bassins versants extérieurs, vers des exutoires (ouvrages de traversée). Il assure aussi la protection du remblai routier contre l'érosion.

Ces fossés peuvent être en terre ou revêtus s'il y'a un risque d'érosion.

Ouvrages de décharge

Le rejet des fossés latéraux se fera au niveau des ouvrages de traversée ou de décharges.

5 ETUDE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE SOMMAIRE

5.1 CONDITIONS GEOLOGIQUES

5.1.1 Formations géologiques traversées

Lot 1 : Bousalem - Bulla Regia

Ce lot fera l'objet d'une étude géologique en phase APD.

Lot 2: Bulla Regia - Jendouba _ Variante Nord

Le tracé du lot 2 Bulla Regia-Jendouba d'une longueur de 16,133 km emprunte le couloir nord pour traverser un terrain très accidenté. Les terrains traversés sont :

- a/eQ sur 3,5 km : il s'agit de formations tendres formées par des argiles sableuses brunes avec granules calcaires ou non sur des sables argileux parfois graveleux brun jaunâtres ; il faut noter la présence d'encroûtement calcaire par endroit ;
- km3 sur 12,6 km ; affleurements de séries mollassiques composées d'argiles, de marnes et d'intercalations gréseuses ; l'ensemble est relativement tendre

Lot 2: Bulla Regia - Jendouba _ Variante Sud

Le tracé du lot 2 Bulla Regia- Jendouba d'une longueur de 25,840 km emprunte le couloir sud pour traverser un terrain relativement assez plat dans les hautes terrasses de la Medjerda. Les terrains traversés sont :

- a/eQ sur 17,840 km ; il s'agit de formations tendres formées par des argiles sableuses brunes avec granules calcaires ou non sur des sables argileux parfois graveleux brun jaunâtres ; il faut noter la présence d'encroûtement calcaire par endroit.
- a /Pl sur 8,0 km : alluvions récentes sur des formations du pliocène continental constitué essentiellement de conglomérat polygénique, de sables rouge à galets et d'argilites

Lot 3 : Jendouba – Ain El Baya _ Variante Nord

Le tracé du lot 3 Jendouba-Ain el Beya d'une longueur de 9.188 km emprunte le couloir nord pour traverser un terrain relativement assez plat jusqu'au Pk 5.68 pour finir dans un relief peu accidenté.

Les terrains traversés sont :

- a/eQ sur 5,680 km ; ce tronçon traverse des argiles sableuses brunes avec granules calcaires ou non sur des sables argileux parfois graveleux brun jaunâtres ; il faut noter la présence d'encroûtement calcaire par endroits.
- Trias sur 3,140 km : Cette formation triasique est composée d'argiles bariolées avec quelques bancs centimétriques de grès, de calcaires à calcaires dolomitiques durs noirs, de gros blocs de cargneules et des corps métriques à décimétriques de gypse massif. Cette formation peut contenir des cavités plus au moins discontinues.
- Cm-p sur 0,360 km : il s'agit de marnes et argilites à concrétions dolomitiques à boules jaunes.

Lot 3 : Jendouba – Ain El Baya _ Variante Sud

Le tracé du lot 3 Jendouba-Ain el Beya d'une longueur de 9.890 km emprunte le couloir sud pour traverser un terrain relativement vallonné à assez plat jusqu'au Pk 7.560 pour finir dans un relief peu accidenté.

Les terrains traversés sont :

- a/eQ sur 6.22 km ; ce tronçon traverse des argiles sableuses brunes avec granules calcaires ou non sur des sables argileux parfois graveleux brun jaunâtres; il faut noter la présence d'encroûtement calcaire par endroits.
- Trias 3,140 sur km : Cette formation triasique est composée d'argiles bariolées avec quelques bancs centimétriques de grès, de calcaires à calcaires dolomitiques durs noirs, de gros blocs de cargneules et des corps métriques à décimétriques de gypse massif. Cette formation peut contenir des cavités plus au moins discontinues.
- Cm-p sur 0,530 km : il s'agit de marnes et argilites à concrétions dolomitiques à boules jaunes
- Au- delà, plus au Nord-Ouest, présente un relief plus accentué marqué par la présence de calcaires massifs au sommet et d'importants affleurements d'argiles et des marnes sombres compactes. Ces séries argileuses sont d'un cortège minéralogique riche en smectite. Il s'agit d'une argile gonflante et très plastique couverte dans les vallées d'Oued par les alluvions de même nature.

Lot 4 : Ain El Baya – Frontière Algérienne _ Variante tunnel 1

Le tracé de la variante tunnel 1 du lot 4 d'une longueur de 15.420 km emprunte le couloir nord pour traverser un terrain relativement vallonné à assez accidenté nécessitant le percement d'un tunnel et de nombreux grands déblais et hauts remblais.

Les terrains traversés sont :

- Cm- p sur 6.200 km : il s'agit de marnes et argilites à concrétions dolomitiques à boules jaunes
- El b sur 5.160 km : il s'agit de marnes et d'argilites à boules jaunes
- eQ sur 4.06km : il s'agit de formations de pentes et recouvrements divers

Lot 4 : Ain El Baya – Frontière Algérienne _ Variante tunnel 2

Le tracé du lot 4 variante tunnel 2 d'une longueur de 16.346 km traverse un terrain assez accidenté à travers la région connue sous l'appellation Gloub el Thiren nécessitant une traversée en tunnel de et de nombreux grands déblais et hauts remblais.

Les terrains traversés sont :

- Cm- p sur 5.00 km : il s'agit de marnes et argilites à concrétions dolomitiques à boules jaunes
- O 1 sur 11,346 km : alternance d'argilites, de grès et de glauconites et recouvrements divers

Lot 4 : Ain El Baya – Frontière Algérienne _ Variante Surface

Le tracé du lot 4 variante surface emprunte le couloir sud pour traverser un terrain assez accidenté nécessitant et de nombreux grands déblais et hauts remblais

Les terrains traversés sont :

- Cm- p sur 6.160 km : marnes et argilites à concrétions dolomitiques à boules jaunes
- O1 sur 6.150 km : alternance d'argilites, de grès et de glauconites et recouvrements divers
- El sur 1,900 km : marnes et argilites à concrétions dolomitiques à boules jaunes
- eQ sur 2,140 km : formations de pentes et recouvrements divers

Sur les derniers 5 km, le tracé traverse un terrain moyennement accidenté nécessitant quelques grands déblais et de hauts remblais.

Les terrains traversés sont les eQ sur 5.088 km. Il s'agit des formations de pentes et recouvrements divers.

5.1.2 Levé géologique

Le levé géologique a été réalisé sur les 25 derniers kilomètres.

Cette zone est située dans des nappes de charriage. Elle est caractérisée par l'empilement tectonique d'unités allochtones .

Les coupes géologiques suivantes présentent les structures de la région et leur style tectonique. Dans le cadre de l'étude des variantes de la mise en place de tunnels, il a été décidé d'effectuer une cartographie géologique détaillée à l'Est du village d'Aïn El Beya et sur la rive droite du barrage de l'oued Barbara.



Figure 10: localisation des levés géologiques au 1/5000^{ème}

5.1.3 Analyse structurale et commentaires des cartes et des coupes

Trois cartes géologiques détaillées au 1/5000^{ème} ont été levées intéressant les zones des tunnels au début du lot 4 dernier tronçon du projet autoroutier Bou Salem-Frontière algérienne. Quatre (04) coupes géologiques longeant les tracés des 4 tunnels proposés lors des études préliminaires ont été dressées.

5.1.4 Prospections géophysique

La zone des variantes T1, T2 et T3 situées dans la région dite « Gloub Eth Thiren » se trouve à 3 km à l'Ouest du village de Aïn El Beya et la zone de la variante T4 est située sur la rive droite de la retenue du barrage de l'Oued Barbra ont fait l'objet d'une prospection géophysique par électromagnétisme et tomographie électrique.



Figure 11: Situation géographique des prospections géophysiques

Sondages électromagnétiques

Les objectifs de la prospection TDEM (Time Domain Electromagnétisme) sont :

- La distinction des différentes formations géologiques ainsi que la caractérisation de leurs résistivités électriques sur une profondeur de 150m à l'aplomb des tracés des tunnels.
- La détection d'un éventuel niveau aquifère au sein ou au-dessous de la formation marneuse qui affleure dans la zone des tunnels.

□ **Conclusions pratiques sur la méthode TDEM**

Compte tenu de ce qui précède, on peut retenir les points suivants :

- La profondeur d'investigation des sondages électromagnétiques a largement dépassé les 150m et ce pour toutes mesures effectuées.
- La méthode TDEM a pu mettre en évidence la succession des formations géologiques qui existent sur une profondeur qui dépasse 150m le long des tracés des tunnels 1, 2, 3 (Les marnes noires à boules jaunes et les calcaires crayeux) et le long du tracé du tunnel 4 (les marnes noires à boules jaunes ; les argiles et les marnes noires à grises ; les grès, argiles et conglomérats ; les marnes sableuses)
- La méthode TDEM a pu caractériser les différentes formations géologiques par des plages de résistivités caractéristiques :
 - Les marnes noires à boules jaunes : (1 – 25 ohm.m) ;
 - Les calcaires crayeux : (70 — 290 ohm.m) ;
 - Les grès, argiles et conglomérats : (14 — 130 ohm.m) ;
 - Les marnes sableuses : (1 — 32 ohm.m).
- La méthode TDEM a confirmé l'absence d'un niveau aquifère dans la zone des tunnels 1, 2 et 3.
- Pour le tunnel 4, un niveau aquifère pourrait être contenu dans la formation argilo-grés-conglomératique, entre l'abscisse 470m et 1425m, et ce pour les profondeurs comprises entre 50 et 200m.

Tomographie électrique 2D

□ **Principe de la tomographie électrique 2D**

Les prospections électriques étudient la répartition du potentiel électrique dans le sol. Certaines d'entre elles, comme celles utilisées ici, sont basées sur la mesure de la résistivité électrique des terrains. Elles permettent de fournir des résultats 'quantitatifs', en déterminant une coupe uni ou bidimensionnelle (sondage électrique ou panneau électrique) ou 'qualitatifs', en visualisant les variations de résistivité suivant un axe de progression donné (traîné électrique).

□ **Conclusions pratiques sur la méthode de la tomographie électrique :**

Compte tenu de ce qui précède, on peut retenir les conclusions suivantes :

- La méthode de la tomographie électrique a pu caractériser avec précision les variations de la résistivité électrique tout au long des tracés des 4 tunnels sur une profondeur de 100m ;
- Cette méthode a distingué au sein de la formation des marnes noires des petites zones résistantes qui correspondraient à des zones d'accumulation ou d'abondance des boules jaunes dolomitiques.

5.2 CONDITIONS GEOTECHNIQUES ET EXPLOITATION DES RESULTATS

5.2.1 Sol support

Les sols principalement rencontrés sur tout le linéaire du projet sont des sols fins de Classe A qui se caractérise par :

- Un pourcentage des fines ($\% < 80\mu\text{m}$) supérieur à 35%
- Le diamètre du plus gros élément (D_{max}) reste inférieur à 50 mm

Cette classe de sol admet une sous-classe soit de 2 ou de 3 selon la valeur de l'indice de plasticité.

Il est à signaler que sur certaines sections des sols de classe F ont été rencontrés avec des teneurs en matière organique entre 3% et 10%. Ces sols feront l'objet d'une purge sur 1m de profondeur.

Une arase de classe AR2 (PST n°3) est prévue pour le dimensionnement de la chaussée. Avec cette classe d'arase, un module de 50 MPa est attribué au sol support.

5.2.2 Matériaux de viabilité

Gîtes:

Les gîtes ont été classifiés moyennant la classification du Guide de Terrassement Routier (GTR - Septembre 1992).

Les gîtes principalement prospectées pour ce projet sont généralement des sols de Classe A qui se caractérise par :

- Un pourcentage des fines ($\% < 80\mu\text{m}$) supérieur à 35% ;
- Le diamètre du plus gros élément (D_{max}) reste inférieur à 50 mm.

L'état hydrique du sol rencontré en place est varié. Ainsi leurs utilisation en couche de remblai doit faire l'objet d'un traitement spécifique conformément au Guide GTR.

Carrières :

Les résultats des essais réalisés sur les carrières prospectées lors de la réalisation de la campagne géotechnique sont récapitulés dans le tableau suivant.

Tableau 13: Résultats des essais sur les carrières prospectées

<i>Provenance</i>	<i>Carrière Tunorca</i>	<i>Carrière Sicno</i>	<i>Carrière Hbib Khemiri</i>	<i>Carrière Socabs</i>	<i>Carrière Essra Sidi Askra</i>
<i>Classe</i>	12/20	8/14	4/12	4/15	4/15
<i>Adhésivité</i>	6	5	14	10	15
<i>Adhésivité au bitume (%)</i>	99	98	89	79	89
<i>MDE</i>	19	19	26	23	33
<i>LA</i>	20	22	21	22	25
<i>LA+MDE</i>	39	41	47	45	58

Conformément à la norme NF P 18-545 (Mars 2008), le tableau suivant récapitule la codification des granulats prospectés.

Tableau 14: Codification et limites d'utilisation

<i>Provenance</i>	<i>Carrière Tunorca</i>	<i>Carrière Sicno</i>	<i>Carrière Hbib Khemiri</i>	<i>Carrière Socabs</i>	<i>Carrière Essra Sidi Askra</i>
<i>Classe</i>	12/20	8/14	4/12	4/15	4/15
<i>Code (sans compensation)</i>	C _{nc}	C _{nc}	E _{nc}	D _{nc}	E _{nc}
<i>Code (avec compensation)</i>	C	C	D	C	E

5.2.3 Hauts déblais

La consistance de la campagne géotechnique pour cette partie est récapitulée dans le tableau suivant.

Tableau 15: Consistance de la campagne géotechnique – Déblais

<i>Zone</i>	<i>Prof. du sondage carotté</i>	<i>Prof. du sondage pressiométrique</i>	<i>Nb. d'échantillons</i>
<i>Zone de déblai</i>			
RD1	25m	-	6
RD2	25m	-	5
RD3	25m	-	7
RD4	25m	-	6
RD5	25m	-	8
RD6	25m	-	6
RD7	25m	-	7

Les résultats de la reconnaissance réalisée pour les zones de déblais sont récapitulés dans le tableau suivant.

Tableau 16: Résultats des investigations

<i>Déblai / Remblai</i>	<i>Description des sols rencontrés</i>
Déblai n°1	Le sondage carotté réalisé à ce niveau, sur 25 m de profondeur, a révélé la dominance d'argile limoneuse sur toute la colonne. Un essai œdométrique a été réalisé sur l'échantillon prélevé entre 5.5 et 6.1 m de profondeur, donnant un indice de vide $e_v=0,81$ et un indice de compression $C_c=0,24$ caractérisant un sol assez fortement compressible.
Déblai n°2	L'investigation effectuée sur une profondeur de 25 m a permis d'identifier un sol à alternance d'argile et de sable. Les horizons traversés sont répartie comme suit : <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> De 0 m à 1 m de profondeur : Une couche de limon argilo-sableux plus ou moins oxydé ; <input type="checkbox"/> De 1 m à 5 m de profondeur : Sable limono-argileux avec un lit de 40 cm à la base formé de galets et de grès avec une matrice limoneuse ; <input type="checkbox"/> De 5 m à 10.2 m de profondeur : Une couche variant entre des limons sablo-argileux au sommet et des sables argileux à la base ; <input type="checkbox"/> De 10.2 m à 14.5 m de profondeur : Un horizon de sable limoneux à granulométrie hétérogène avec la présence d'un lit de galets et graviers à la base ; <input type="checkbox"/> De 14.5 m à 25 m de profondeur : Une formation d'alternance entre des limons sablo-argileux et des sables limoneux avec un passage de galets et de blocs de grès dans une matrice sableuse entre 23 m et 24 m de profondeur.
Déblai n°3	La reconnaissance effectuée sur une profondeur de 25 m a permis d'identifier la présence de d'une formation supérieure d'argile limoneuse et une inférieure essentiellement marneuse. Les horizons traversés sont répartie comme suit : <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> De 0 m à 2.4 m de profondeur : Une couche d'argile limoneuse de couleur marron surmontée par 30 cm de terre végétale ; <input type="checkbox"/> De 2.4 m à 8.3 m de profondeur : Un horizon d'argile sableuse plus ou moins graveleuse de couleur beige ; <input type="checkbox"/> De 8.3 m à 25 m de profondeur : Une formation marneuse de couleur grise à noirâtre avec la présence des joints en calcites.
Déblai n°4	Le sondage carotté réalisé à ce niveau, sur 25 m de profondeur, a révélé la présence d'une formation supérieure essentiellement argileuse de 5 m d'épaisseur avec un horizon de terre végétale de 40 cm au sommet et une formation inférieure de 20 m formée de marne feuilletée et marne calcaire.
Déblai n°5	La reconnaissance effectuée sur une profondeur de 25 m a permis d'identifier une formation essentiellement argileuse avec un passage de galets et de blocs de grès à matrice argileuse d'un mètre d'épaisseur et au niveau de 3 m de profondeur.
Déblai n°6	L'investigation effectuée sur une profondeur de 25 m a permis de révéler l'existence d'une formation supérieure essentiellement argileuse et une formation inférieure marneuse. Les horizons traversés sont répartie comme suit : <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> De 0 m à 17.3 m de profondeur : Une couche d'argile plus ou moins sableuse avec 30 cm de terre végétale au sommet ; <input type="checkbox"/> De 17.3 m à 19 m de profondeur : Un passage de transition entre les deux formations constitué d'argile marneuse de couleur grisâtre ; <input type="checkbox"/> De 19 m à 25 m de profondeur : Une formation de marne feuilletée et marne calcaire avec des joints en calcites.
Déblai n°7	Le sondage carotté réalisé à ce niveau, sur 25 m de profondeur, a montré la présence d'une formation essentiellement marneuse avec une couche supérieure d'argile limoneuse à argile marneuse de 3.4 m d'épaisseur.

5.2.4 Hauts remblais

La consistance de la campagne géotechnique pour cette partie est récapitulée dans le tableau suivant.

Tableau 17 Consistance de la campagne géotechnique – Déblais / remblais

<i>Zone</i>	<i>Prof. du sondage carotté</i>	<i>Prof. du sondage pressiométrique</i>	<i>Nb. d'échantillons</i>
<i>Zone de remblai</i>			
RR1	25m	25m	7
RR2	25m	25m	6
RR3	25m	25m	6

Les résultats de la reconnaissance réalisée pour les zones de remblai sont récapitulés dans le tableau suivant.

Tableau 18: Résultats des investigations

<u>Déblai / Remblai</u>	<u>Description des sols rencontrés</u>
Remblai n°1	Les sondages réalisés sur 25 m de profondeur ont révélé la présence de deux unités, une première dans la partie supérieure formée essentiellement de limon sableux et une deuxième argileuse, constituée comme suit : <input type="checkbox"/> De 0 m à 1.2 m de profondeur : Terre végétale formée d'argile limoneuse altérée ; <input type="checkbox"/> De 1.2 m à 12.5 m de profondeur : limon sableux. De 12.5 m à 25 m de profondeur : Une formation argileuse
Remblai n°2	L'investigation effectuée sur une profondeur de 25 m a permis d'identifier un sol marneux surmonté par une couche d'argile limoneuse de deux mètres d'épaisseur. Les horizons traversés sont répartie comme suit : <input type="checkbox"/> De 0 m à 0.6 m de profondeur : Terre végétale formée d'argile limoneuse altérée ; <input type="checkbox"/> De 0.6 m à 2.4 m de profondeur : Argile limoneuse De 2.4 m à 25 m de profondeur : Une formation marneuse
Remblai n°3	Les sondages réalisés sur 25 m de profondeur ont révélé la présence de deux unités, une première dans la partie supérieure formée essentiellement d'argile limoneux et une deuxième argileuse, constituée comme suit : <input type="checkbox"/> De 0 m à 5 m de profondeur : Argile limoneuse De 5 m à 25 m de profondeur : Une formation argileuse.

Le récapitulatif des résultats des essais pressiométriques réalisés dans les zones de remblai est donné dans le tableau suivant.

Tableau 19: Tableau récapitulatif des résultats pressiométriques

Sondage	Profondeur (m)	Niveau de la nappe (m)	Lithologie	Données pressiométriques	
				Pl _{moyenne} (Bars)	Ep _{moyen} (Bars)
Remblai n°1	25	2,3	Terre végétale (0 - 1,2 m)	5,3	27
			Argile sableuse jaunâtre (1,2 - 12,5 m)	9,15	76,39
			Argile rougeâtre (12,5 - 25 m)	21,78	271,11
Remblai n°2	25	Néant	Terre végétale (0 - 0,6 m)	-	-
			Argile limoneuse (0,6 - 2,4 m)	10,65	93,29
			Marne feuilletée (2,4 - 25 m)	24,40	269
Remblai n°3	25	Néant	Argile jaunâtre (0 - 5 m)	6,34	50,33
			Argilite grisâtre (5 - 25 m)	23,70	334,87

5.3 FONDATION DES OUVRAGES

Cette partie consiste à donner l'orientation des fondations des ouvrages d'art prévus dans le cadre des études APS. Le choix du principe de fondation est basé sur les résultats des investigations géotechniques sommaires et principalement sur les sondages les plus proches.

Les ouvrages étudiés comprennent :

- Les passages supérieurs PS ;
- Les grands ouvrages hydrauliques GOH ;
- Les viaducs.

Passages Supérieurs

Ces ouvrages et les sondages les plus proches sont donnés dans le tableau suivant. Au vu des conditions géotechniques, le système de fondation sera orienté vers des pieux de 20 à 25 m de profondeur. Ces profondeurs sont figées par la résistance intrinsèque du pieu ($\sigma = 50$ bars soit 3900 kN).

Tableau 20: Les passages supérieurs / Fondations

Lot/Variante	Désignation	PK	Hauteur moyenne Remblai au droit des culées	Hauteur moyenne des piles	Type de pont	Prof. des pieux m	Point de reconnaissance géotechnique
2/Nord	PS 2.1-1	0+970	7m	6m	PSIDA	20-25	ROA3
	PS 2.1-2	7+238	7m	6m	PSIDA	15-20	ROA4
	PS 2.1-3	14+720	7m	6m	PSIDA	25-30	ROA6
	PS 2.1-4	16+117	7m	6m	PSIDA	25-30	
2/Sud	PS 2.2-1	2+864	7m	6m	PSIDA	25-30	ROA3
	PS 2.2-2	6+520	7m	6m	PSIDA		Pas de reconnaissances réalisées dans cette section.
	PS 2.2-3	13+160	7m	6m	PSIDA		
	PS 2.2-4	14+430	7m	6m	PSIDA		
	PS 2.2-5	15+440	7m	6m	PSIDA		
	PS 2.2-6	17+200	7m	6m	PSIDA	25-30*	RR1
	PS 2.2-7	21+880	7m	6m	PSIDA	25-30*	
	PS 2.2-8	24+240	7m	6m	PSIDA	20-25	ROA7
3 Nord et Sud	PS 3.1-1	3+160	7m	6m	PSIDA	25-30	ROA8
	PS 3.1-2	6+295	7m	6m	PSIDA	25-30*	RD2, ROA8
	PS 3.1-3	8+238	7m	6m	PSIDA	15-20	RD2, ROA9

Grands Ouvrages Hydrauliques

Ces ouvrages et les sondages les plus proches sont donnés dans le tableau suivant. Au vu des conditions géotechniques, le système de fondation sera orienté vers des pieux de 20 à 25 m battus ou forés suivant les conditions locales. Ces profondeurs sont pour le moment figées par la résistance intrinsèque du pieu $\sigma = 50$ bars soit 3900 kN.

Tableau 21: Les grands ouvrages hydrauliques / Fondations

Désignation	Lot	PK	Longueur (m)	Nombre de travées	Longueur Des pieux m	Point de reconnaissance géotechnique
GOH 1-2S : O.EL LEBEN	2-Sud	2+410	60	03 (20 m)	25-30	ROA2, ROA3
GOH 2-2S : O.EL MELAH	2-Sud	21+048	40	02 (20 m)	25-30*	RR1
GOH 3-2S : O.REHIB	2-Sud	25+333	40	02 (20 m)	20-25	ROA7
GOH1-3S : O. GHEZALA	3- Sud	2+940	100	05 (20 m)	25-30*	ROA8

Le calcul de la capacité portante des pieux est annexé au présent rapport

Les Viaducs

Ces ouvrages et les sondages les plus proches ainsi que l'orientation des fondations sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 22: Les Viaducs / Fondations

Lot/Variante	Désignation	PK	Hauteur maximale des appuis	Fondations	reconnaissance géotechnique
2/Nord	Viaduc 2.1-1	4+200	34,09m	Pieux \geq 30 m *	ROA3 – ROA4
	Viaduc 2.1-2	12+200	36,24m	Pieux 30-35 m	ROA5 – ROA6
4/Tunnel 1	Viaduc 4.1-1	5+460	49,09 m	12 à 15 m	ROA13
	Viaduc 4.1-2	7+220	39,50 m	10 à 15 m	ROA16
	Viaduc 4.1-3	10+322	19,83 m	20 à 25 m	ROA19
	Viaduc 4.1-4	11+040	20,10 m	20 à 25 m	ROA19
	Viaduc 4.1-5	13+480	23,63m	20 à 25 m	ROA20
	Viaduc 4.1-6	16+180	16,28 m	12-15 m	ROA22
4/Tunnel 2	Viaduc 4.2-1	6+220	56,73 m	12 à 15 m	ROA14
	Viaduc 4.2-2	7+580	57,76 m	15 à 20 m	ROA16
	Viaduc 4.2-3	11+240	35,88 m	20 à 25 m	ROA19
	Viaduc 4.2-4	11+880	26,09 m	20 à 25 m	ROA19
	Viaduc 4.2-5	14+380	24,85 m	20 à 25 m	ROA20
	Viaduc 4.2-6	17+106	16,28 m	12 à 15 m	ROA22
4/Surface	Viaduc 4.3-1	2+010	50,40 m	12 à 15 m	RT1 et ROA10
	Viaduc 4.3-2	5+840	36,18 m	15 à 20 m	ROA11
	Viaduc 4.3-3	8+350	24,20 m	15 à 20 m	ROA12
	Viaduc 4.3-4	11+685	25,77 m	Pieux > 30 m	ROA15
	Viaduc 4.3-5	14+395	62,32 m	25 à 30 m	ROA17
	Viaduc 4.3-6	20+703	16,28 m	12 à 15 m	ROA22

Remarques

L'attention est être attirée à la nature sableuse du sol au cas où elle sera rencontrée au niveau de la pointe des pieux, ce qui nécessiterait de prévoir l'injection par serrage du sol sur 1 à 1,5 m de profondeur sous la pointe des pieux fichées dans les sables après leur réalisation pour recomprimer le sol décomprimé sous la pointe par le forage et restituer ainsi sa densité initiale.

5.4 DIMENSIONNEMENT DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE

5.4.1 Introduction

Les éléments nécessaires pour le dimensionnement des chaussées sont :

- Le trafic ;
- Les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant la structure de chaussée ;

Il est à noter que le dimensionnement des chaussées est effectué conformément à la norme NF P 98-086 : Dimensionnement Structurel des chaussées routières – Application aux chaussées neuves – Octobre 2011.

5.4.2 Trafic

Données d'entrée du trafic

Les données du trafic utilisées pour le dimensionnement des chaussées sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 23: Hypothèses de calcul / Données d'entrée du trafic

Données	Variante Nord				Variante Sud			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
CRT	90%							
TMJA	760	560	351	92	477	464	334	91
Classe de trafic	T0-	T1+	T1-	T3+	T1-	T1-	T1-	T3+
<small>CRT : Coefficient de répartition transversale TMJA : Trafic Moyen Journalier Annuel à l'année de mise en service</small>								

Trafic cumulé « NPL » :

Tableau 24: Valeurs du trafic cumulé

Données	Variante Nord				Variante Sud			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
N_{PL} (10⁶)	8,984	6,935	5,422	1,220	7,095	9,031	5,167	1,201

5.4.3 Matériaux de chaussée

Les matériaux constituant la structure de chaussée sont présentés ci – dessous.

Sol Support :

Les caractéristiques préconisées pour le sol support sont les suivantes :

- Module d'élasticité : E= 50 MPa ;
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,35$.

Graves non traitées « GNT » :

Les Graves Non Traitées « **GNT** » en présentent les caractéristiques suivantes :

- Module d'élasticité : $E = 3 \times E_{\text{Plateforme}}$ et E_{GNT} est borné par 360 ;
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,35$.

Grave Bitume (EB – GB3) :

Ces matériaux présentent les caractéristiques suivantes :

- Module d'élasticité : $E = 7272 \text{ MPa}$;
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,35$.

Béton bitumineux (EB – BBSG 1) :

Ces matériaux présentent les caractéristiques suivantes :

- Module d'élasticité : $E = 4411 \text{ MPa}$;
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,35$

5.4.4 Dimensionnement de la chaussée

Déformations admissibles :

Tableau 25: Les Déformations et contraintes admissibles

Données	Variante Nord				Variante Sud			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
$\epsilon_{z,ad} (\mu\text{def})$	343,2	363,5	383,9	534,6	361,6	342,8	388	536,3
$\epsilon_{t,ad-GB} (\mu\text{def})$	69,7	79	83	133,1	78,6	74,9	83,8	133,5
$\epsilon_{t,ad-BB} (\mu\text{def})$	68,4	76,9	80,8	127,5	76,6	73	81,6	127,9

Calcul des déformations :

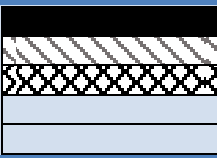


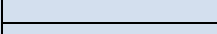




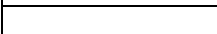



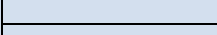




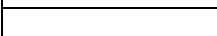


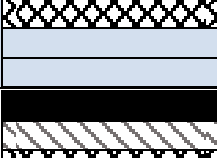
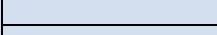




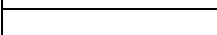



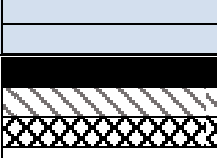




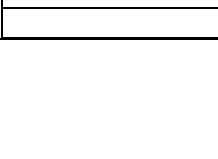
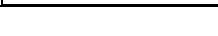



Les calculs de déformations sont réalisés par le biais du module calcul mécanique du logiciel ALIZE.

Les déformations évaluées sont comparées aux valeurs admissibles calculées moyennant les recommandations du guide LCPC/SETRA. Cette approche conduit à un calcul itératif sur les épaisseurs des différentes couches jusqu'à l'obtention d'une déformation inférieure à l'admissible.

5.4.5 Conclusion

Les structures proposées sont présentées dans le tableau suivant par variante et par section du trafic.

Tableau 26: Structure de chaussée

Variante	Section	Structure de chaussée			
Variante Nord¹	Section 1			6 cm BBSG 1	
				23 cm EB – GB3	
				20 cm GNT B (ex GRH)	
				30 cm GNT A	
				Plateforme (PF2)	
Variante Nord¹	Section 2			6 cm BBSG 1	
				21 cm EB – GB3	
				20 cm GNT B (ex GRH)	
				30 cm GNT A	
				Plateforme (PF2)	
Variante Nord¹	Section 3			6 cm BBSG 1	
				20 cm EB – GB3	
				20 cm GNT B (ex GRH)	
				30 cm GNT A	
				Plateforme (PF2)	
Variante Nord¹	Section 4			6 cm BBSG 1	
				10 cm EB – GB3	
				20 cm GNT B (ex GRH)	
				30 cm GNT A	
				Plateforme (PF2)	
Variante Sud²	Section 1			6 cm BBSG 1	
				21 cm EB – GB3	
				20 cm GNT B (ex GRH)	
				30 cm GNT A	
				Plateforme (PF2)	
Variante Sud²	Section 2			6 cm BBSG 1	
				22 cm EB – GB3	
				20 cm GNT B (ex GRH)	
				30 cm GNT A	
				Plateforme (PF2)	
Variante Sud²	Section 3			6 cm BBSG 1	
				19 cm EB – GB3	
				20 cm GNT B (ex GRH)	
				30 cm GNT A	
				Plateforme (PF2)	
Variante Sud²	Section 4			6 cm BBSG 1	
				10 cm EB – GB3	
				20 cm GNT B (ex GRH)	
				30 cm GNT A	
				Plateforme (PF2)	

¹ Section 1 : Lot 1 ; Section 2 : Lot 2 ; Section 3 : Lot 3 + Lot 4 jusqu'à l'échangeur RL414 ; Section 4 : de l'échangeur RL414 à la frontière Algérienne (Fin projet).

² Section 1 : Lot 1 + Lot 2 au niveau de l'échangeur RN17 de Bulla Regia ; Section 2 : de l'échangeur RN17 de Bulla Regia à l'échangeur de Fernana ; Section 3 : Lot 3 + Lot 4 jusqu'à l'échangeur RL414 ; Section 4 : de l'échangeur RL414 à la frontière Algérienne (Fin projet).

6 ETUDE SOMMAIRE DE STABILITE DES TALUS

6.1 INTRODUCTION

Nous nous intéressons dans cette partie à la stabilité vis-à-vis d'une rupture de pente aussi bien des hauts remblais que des grands déblais et au tassement prévisible sous les remblais. Les différents calculs sont basés sur des données géotechniques déduites des sondages les plus proches des profils considérés, les résultats devront être confirmés sur les bases de données géotechniques déduites de reconnaissances à réaliser sur l'emprise de chaque remblai ou déblai. L'objectif étant de donner quelques orientations générales sur la conception générales des hauts remblais et les hauts déblais et des recommandations relatives à la mise en œuvre.

Les calculs de stabilités et de tassements sont conduits en utilisant le logiciel Plaxis et en adoptant un modèle de comportement élastoplastique parfait du type Mohr-Coulomb aussi bien pour le sol naturel que les remblais.

6.2 ETUDE DE STABILITE DES GRANDS DEBLAIS

Dans cette partie, il a été étudié la stabilité de quelques cas déblais de grandes hauteurs. Nous en choisirons le profil PT79 du lot 4 variante surface.

6.2.1 cas du Profil n°79 (Lot 4 - variante surface)

Il s'agit d'un très haut déblai de 50 m. On utilisera les données des sondages SC1 et SP1 de l'ouvrage ROA 10.

Les calculs de stabilité dont un extrait est fourni en annexe montrent que le coefficient de sécurité est de 1,8 dans le cas d'un sol hors eau et inférieur à 1 dans le cas où le sol est saturé et le siège d'un écoulement parallèle à la pente. En rabattant le niveau piézométrique à 2,5 m sous les talus le coefficient de sécurité sera ramené à 1,6.

6.2.2 Conclusions et recommandations sur les hauts déblais

- Les calculs sont basés sur des données de sondages qui se trouvent dans les zones de déblaiement et non exactement dans leur emprise, c'est pourquoi, les résultats et les conclusions de ces calculs sont donnés à titre simplement instructifs.
- Les calculs montrent qu'un coefficient de sécurité acceptable de l'ordre de 2 est obtenu avec une pente des talus de 1V :2H avec la disposition de risberme tous les 3 m de dénivellation.
- Des prévisions devront être faites pour protéger les talus rocheux altérables et facilement érodables par un masque en enrochement ou, de préférence par des murs inclinés. Ces derniers joueront le rôle de protection, ils sont très efficaces et esthétiques.
- Des fossés de crête devront être systématiques à l'amont des flancs déblayés.
- Lorsque les terrains déblayés sont plantés, le sol en surface est généralement meuble et susceptible de perdre une bonne partie voire toute sa résistance en cas d'averses, ce qui provoquerait son écoulement sur les déblais (solifluxion). Une attention particulière est accordée à ces terrains. A cet égard, on peut envisager de réserver une bande plate comme zone tampon en crête des déblais et de soutenir latéralement le sol végétal.

- Il est recommandé que pour les déblais le coefficient de sécurité vis-à-vis d'une rupture de pente devra être supérieur ou égal à 2.
- Suivant la géologie locale, on pourrait être amené à renforcer les déblais par clouage ou par des tirants d'ancrage en cas de risque de chutes de blocs, d'éboulement ou d'éroulement.

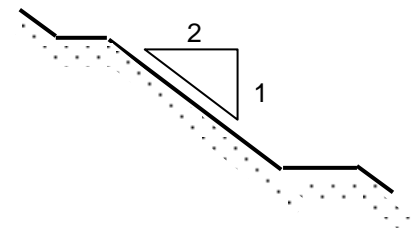
6.3 ETUDE DE STABILITE DES HAUTS REMBLAIS

Il s'agit de remblais de hauteur dépassant les 20 m prévus aux droits de quelques PT: PT 105, PT109, PT207 et PT 263.

6.3.1 Profil n°105 (Lot 4 - variante tunnel 1)

Les calculs montrent qu'avec une pente des talus entre les risbermes de 1,5V :2H le coefficient de sécurité est de 1,45, et il est de 1,9 pour une pente de 1V :2H.

Il s'agit des pentes définies entre le bord extérieur et le bord intérieur de deux risbermes successives en allant vers le bas (figure ci-contre).



Par ailleurs, les talus seront instables en cas d'un écoulement souterrain parallèle à la pente et, que dans ce cas, un rabattement de 3 m serait nécessaire pour amener le coefficient de sécurité à 1,3.

6.3.2 Profil n°109 (Lot 2 - variante nord)

Le remblai est appuyé sur deux versants et atteint une quarantaine de mètres de hauteurs. Nous retiendrons pour les calculs de stabilité et de tassement les mêmes conditions géotechniques du sol pour les deux versants.

Les calculs donnent un coefficient de sécurité vis-à-vis d'une rupture de pente de 2,3 dans le cas d'un sol hors nappe, de 1,14 dans le cas d'un sol saturé et siège d'un écoulement parallèle au talus et de 1,5 en limitant le niveau de l'écoulement à 3 m sous le talus.

Le tassement maximal calculé est de 70 cm sous la crête, dont 40 cm proviendront de la compression propre du remblai.

Nous signalons qu'au droit de l'ouvrage OA4, le sol sur les 2 à 4 premiers mètres de profondeur est compressible dont les 2 mètres supérieurs correspondent à la terre végétale. Cette tranche de sol devra être purgée au cas où elle serait organique.

6.3.3 Profil n°207 (Lot 4 - variante surface)

Le remblai est de 24 m de hauteur, il est prévu sur un versant naturel marneux pentu de 1V :4,2H.

Les calculs sont conduits pour des pentes des talus de 1V :1,5H et 1V :2H

Les résultats de calculs montrent que le coefficient de sécurité est de 1,5 pour une pente des talus de 1V:1,5H avec un état hors eau du sol. La pente est instable dans le cas où le sol devient saturé et le siège d'un écoulement parallèle à la pente ce qui nécessiterait le drainage profond du remblai.

Pour le cas d'une pente de 1V :2H, le coefficient de sécurité sera de 1,8 pour un sol hors eau et instable dans le cas d'un écoulement parallèle à la pente ce qui nécessiterait le drainage du remblai en limitant le niveau maximal de la nappe à 3m au-dessous du talus.

Le tassement prévisible est estimé entre 22 cm du côté haut du versant et 30 cm du côté bas dont 2 à 8 cm correspondent à la compression propre du remblai.

6.3.4 Profil n°263 (Lot 3 - variante sud)

Le remblai étant de 13 à 14 m de hauteur, il est implanté sur un terrain relativement plat.

En retenant les mêmes caractéristiques géotechniques que celles retenues pour les remblais précédents et une pente des talus de 1V :2H, le coefficient de sécurité calculé est de 2 pour un remblai hors nappe et de 1 lorsqu'il est saturé et le siège d'un écoulement parallèle à la pente. Le coefficient de sécurité est de 1,5 en limitant la nappe à 2,5 m au-dessous des talus.

Les tassements sont estimés à 21 cm sous la crête du remblai dont 19 cm proviendront de la compression propre du remblai.

6.3.5 Conclusions et recommandations sur les hauts remblais

Données géotechniques

Les données géotechniques du sol retenues pour les calculs de stabilité et de tassement sont hypothétiques, elles correspondent aux conditions rencontrées dans les sondages réalisés aux droits des ouvrages les plus proches des remblais. De même, les caractéristiques des remblais sont hypothétiques et correspondent en général à des matériaux non plastiques compactés à l'optimum Proctor ($c=10$ kPa $\phi=32^\circ$)

Bien entendu, les paramètres réalistes seront obtenus à partir de reconnaissances adaptées à chaque remblai dans le cadre des études détaillées.

Pentes des talus

Une pente des talus de 1V :1,5H définie entre les bords extérieur et intérieur de deux risbermes successives ce qui correspond à une pente globale de 1V :2H entre le bord extérieur en crête du remblai et le pied de ce dernier donne un coefficient de sécurité vis-à-vis d'une rupture de pente supérieur à 1,5, ce qui est suffisant, avec un mécanisme de rupture totalement inclus dans le corps de remblai. Lorsque l'on imagine un état saturé d'un remblai et que ce dernier est le siège d'un écoulement parallèle à la pente, le coefficient de sécurité devient insuffisant et un drainage limitant le niveau piézométrique à 3 m sous les talus serait nécessaire pour ramener le coefficient de sécurité à une valeur minimale de 1,3.

L'hypothèse d'un état saturé des remblais avec un écoulement parallèle aux talus est certes une hypothèse très pessimiste mais, l'infiltration de l'eau dans les remblais qu'elle soit à partir des talus ou à partir des résurgences qui seraient éventuellement masquées par les remblais pourront donner lieu à une accumulation de la pression interstitielle dans les remblais et menacer, voire compromettre, sa stabilité. Par ailleurs un compactage du côté humide de l'optimum Proctor donnera lieu à une accumulation de la pression interstitielle dans le remblai notamment lorsque ces derniers sont de grande hauteur. C'est pourquoi, il faut absolument envisager un drainage intérieur et un drainage extérieur des remblais.

Les matériaux des remblais

Les matériaux des remblais ne devront pas être très sensibles à l'eau ni facilement érodables. Les matériaux les plus sensibles à l'eau devront être placés à l'intérieur du corps de remblai à une distance supérieure à 3 m de l'extérieur afin de mettre ces matériaux à l'abri des variations saisonnières de l'humidité.

Le classement des matériaux à utiliser par ordre de préférence est comme suit :

Tableau 27: Classement des matériaux

Matériau	Classification USCS
Gravier bien gradué, mélange gravier-sable avec ou sans fines	GW
Sable bien gradué, sable graveleux avec ou sans fines	SW
Gravier mal gradué, mélange sable-gravier avec peu ou sans fines	GP
Gravier limoneux, mélange gravier-sable-limon	GM
Gravier argileux, mélange gravier-sable-argile	GC
Sable mal gradué, sable graveleux avec ou sans fines	SP
Sable argileux, sable mal gradué, mélange sable-argile	SC
Sable limoneux	SM
Argile inorganique de plasticité faible à moyenne, argile graveleuse, argile sableuse, argile limoneuse	CL

Remblais dans les zones inondables

Des mesures spéciales devront être prises pour protéger les matériaux au-dessus du niveau d'eau contre l'action des vagues et l'érosion par l'écoulement des eaux. Dans ce sens, il est recommandé d'utiliser des matériaux grossiers pour le remblai au-dessous du niveau d'eau et d'adopter une pente des talus ne dépassant pas 1:2 (une verticale pour 2 horizontale).

La disposition d'une couche drainante sur toute la largeur du remblai au-dessus du niveau des plus hautes eaux est recommandée pour éviter la saturation par capillarité des matériaux.

Les pentes des talus dans les zones inondables devront être couvertes par une couche d'enrochement intercalée par un filtre naturel ayant une granulométrie obéissant à la règle du filtre. Ces aspects seront traités ultérieurement.

Sols gonflants

Le soulèvement ou le gonflement est l'expansion du sol ou du remblai due à une variation de la teneur en eau. La propriété de ces sols de changer de volume dépend de plusieurs facteurs (granulométrie, minéralogie, teneur en eau initiale etc..).

Dans le cas de présence d'un sol gonflant sur une faible profondeur le dégagement des matériaux gonflants et leur substitution par un matériau inerte à l'eau est envisageable. Au cas où la substitution est partielle, le sol devenu exposé devra être immédiatement couvert pour éviter toute perte d'humidité. Le remblai mis en place réduirait, en vertu de son poids, le gonflement. La réduction estimée est de 30% par mètre de hauteur de remblai.

Dans les zone des sols gonflants, les problèmes sont rencontrés surtout au voisinage des buses et des dalots car, au droits de ces ouvrages, la variation de l'humidité est la plus importante et la contrainte due au poids des terres est minimale. Une attention particulière devra être accordée à la conception et la réalisation de ces ouvrages évitant toute fuite d'eau de ces ouvrages vers le sol support.

Généralement, la teneur en eau sous le centre d'un remblai se stabilise après 5 ans de la construction. Le sol sous les bords subit cependant une variation cyclique d'humidification et de dessiccation. Cette variation accompagnée par une expansion et un retrait cyclique du sol provoque l'apparition de fissures longitudinales. Pour éviter la fissuration de la voie on élargira de 3 m environ de chaque côté le remblai. Pour le cas des remblais de grandes hauteurs, il n'est pas nécessaire d'élargir sur toute la hauteur du remblai mais seulement la base. Les drains latéraux au pied du remblai dans ce cas sont à éviter.

Les talus devront être surveillés notamment les 5 premières années. Les fissures sur les talus devront être suivies et fermées pour éviter toute infiltration directe d'eau dans ces fissures. Des dégâts pourraient survenir en cas de manquement.

Les matériaux gonflants ou très gonflants ne devront pas être utilisés dans le remblaiement.

Tous ces aspects seront étudiés dans le cadre des études techniques détaillées.

Drainage

□ Drainage interne

Même si le remblai est construit sur un sol sec et protégé par un drainage superficiel et les talus sont protégés, une fissuration des talus, un glissement ou une translation pourront se produire suite à :

- une défaillance dans le drainage superficiel ou profond
- infiltration ou/et évaporation saisonnière
- évolution progressive vers une stabilisation de l'humidité dans le sol

Les remblais sont particulièrement concernés par ce type de désordre ou de rupture dans les régions à forte pluviométrie. Dans le cas des remblais de grande hauteur, les matériaux et leur humidité devront être judicieusement choisis et mis en place de façon à minimiser leur variation de volume résultant d'une variation des conditions hydriques.

Par ailleurs, on devra prévoir les dispositions nécessaires supprimant toute humidité excédentaire dans les situations critiques. Dans ce sens on pourra envisager ce qui suit :

- la disposition d'un tapis drainant pour intercepter les eaux capillaires et contribuer au drainage interne
- la disposition d'un enrochement filtré en pied pour dissiper les pressions interstitielles qui pourrait se développer au pied du remblai lors d'un écoulement d'eau qui s'établirait dans le remblai
- la disposition de collecteur en matériau drainant pour drainer l'eau piégée dans le remblai et accélérer sa consolidation en même temps.

La disposition de réseau de drainage interne sera étudiée au cas par cas.

□ Drainage externe

Dans le cas des hauts remblais des risbermes devront être prévues sur les talus. La pente transversale des risbermes devra être vers l'axe longitudinal du remblai pour minimiser l'érosion. Il n'est pas nécessaire que la pente longitudinale de la risberme soit la même que celle des voies mais elle devra être conçue pour une évacuation libre de l'eau et un entretien facile. Les risbermes augmentent par ailleurs le coefficient de sécurité globale des remblais vis-à-vis d'une rupture de pente.

L'accrochage par redans

Pour assurer l'accrochage du remblai sur un sol naturel en pente, des risbermes devront être réalisées. Les risbermes sont recommandées dès que la pente transversale ou longitudinale du sol naturel dépasse 1 :6 (1 verticale pour 6 horizontales). La base du redan devra être légèrement inclinée vers l'axe du remblai. La facette frontale devra être verticale ou légèrement inclinée vers l'axe du remblai pour faciliter le remblaiement et la mise en place d'un drain au cas où on constate une humidité sur cette face

7 ETUDE SOMMAIRE DES OUVRAGES D'ART

7.1 OUVRAGES DE RETABLISSEMENT DE COMMUNICATIONS (PS/PI)

7.1.1 Passages supérieurs

Inventaire des ouvrages d'art

Ci-dessous un tableau récapitulatif des passages supérieurs proposés à cette phase d'APS par lot.

Tableau 28: Inventaire des passages supérieurs

Lot/ Variante	Désignation	PK	Type/Nom du rétablissement	Type de pont	Biais (grad)	Profil en travers
2/Nord	PS 2.1-1	0+970	Piste revêtue	PSIDA	79	Type 2
	PS 2.1-2	7+280	Piste en terre	PSIDA	77	Type 2
	PS 2.1-3	14+720	Piste revêtue	PSIDA	78	Type 2
	PS 2.1-4	16+120	Route nationale/RN17	PSIDA	94	Type 3
2/Sud	PS 2.2-1	2+864	Piste revêtue	PSIDA	123	Type 2
	PS 2.2-2	6+520	Route régionale/RR59	PSIDA	78	Type 1
	PS 2.2-3	13+160	Piste revêtue	PSIDA	71	Type 2
	PS 2.2-4	14+430	Route régionale/RR59	PSIDA	119	Type 1
	PS 2.2-5	15+440	Route nationale/RN17	PSIDA	77	Type 3
	PS 2.2-6	17+200	Route locale/RL389	PSIDA	128	Type 1
	PS 2.2-7	21+880	Route nationale/RN17	PSIDA	128	Type 3
	PS 2.2-8	24+240	Route nationale/RN17	PSIDA	70	Type 3
3/Nord	PS 3.1-1	3+160	Piste en terre	PSIDA	123	Type 2
	PS 3.1-2	6+295	Piste revêtue	PSIDA	92	Type 2
	PS 3.1-3	8+238	Route régionale/RR53	PSIDA	74	Type 1
3/Sud	PS 3.2-1	3+520	Piste en terre	PSIDA	128	Type 2
	PS 3.2-2	6+697	Piste revêtue	PSIDA	94	Type 2
	PS 3.2-3	8+640	Route régionale/RR53	PSIDA	75	Type 1
4/Tunnel 1	PS 4.1-1	12+724	Piste en terre	PSIDA	70	Type 2
4/Tunnel 2	PS 4.2-1	13+720	Piste en terre	PSIDA	82	Type 2
4/Surface	PS 4.3-1	18+002	Piste en terre	PSIDA	70	Type 2

Profils en travers types

Dans le cadre de rétablissement par passage supérieur, trois profils en travers types sont proposés.

❑ **Profil type 1 :**

L'ouvrage porte une chaussée bidirectionnelle dont chacune des voies présente une largeur de 3,50 m et deux trottoirs de 1,25 m de part et d'autre.

❑ **Profil type 2 :**

L'ouvrage porte une chaussée bidirectionnelle dont chacune des voies présente une largeur de 3,00 m et deux trottoirs de 0,75 m de part et d'autre.

❑ **Profil type 3 :**

L'ouvrage est constitué de deux tabliers portant chacun une chaussée constituée de deux voies de 3,50 m et une bande d'arrêt d'urgence (BAU) de 2,50 m avec un terre-plein central de 1,60 constitué de deux bandes dérasées de gauche de 50 cm et d'un DBA de 60 cm.

Le gabarit minimal à respecter est de 5,10 m.

Conception longitudinale et transversale

La prise en compte de l'aspect architectural pour ces types d'ouvrages est primordiale ce qui nécessite des ouvrages à élancement important qui permet de garantir une meilleure visibilité et ouverture pour les usagers de l'autoroute.

La répartition longitudinale des travées dépend du profil en travers courant de l'autoroute, l'ensemble des passages supérieurs sont constitués de 4 travées continues de longueur droite entre axe des appuis extrêmes égale à 55,04 m réparties comme suit $10,32 + 17,20 \times 2 + 10,32$. La longueur de l'ouvrage dépendra du biais géométrique. Il s'agit d'un choix guidé principalement par l'optimisation économique.

Transversalement, la structure couramment utilisée en fonction de la répartition longitudinale proposée est le PSI-DA (Pont dalle en béton armé). Avec un élancement compris entre le 1/25 et le 1/28 et une dalle à encorbellement massif, le rendement géométrique de la section augmente et l'épaisseur apparente de la dalle diminue offrant une ligne visuelle très esthétique.

7.1.2 Passages inférieurs

Inventaire des ouvrages d'art

Ci-dessous un tableau récapitulatif des passages inférieurs proposés à cette phase d'APS par lot.

Tableau 29: Inventaire des passages inférieurs

Lot/Variante	Désignation	PK	Type/Nom du rétablissement	Type de pont	Biais (grad)	Profil en travers
1	PII-1	8+165	Piste revêtue	PIPO	84	Type 2
3/Nord	PI 3.1-1	4+600	Piste revêtue	PIPO	131	Type 2
3/Sud	PI 3.2-1	5+000	Piste revêtue	PIPO	131	Type 2
4/Tunnel 1	PI 4.1-1	0+433	Piste en terre	PIPO	70	Type 2
	PI 4.1-2	20+033	Piste en terre	PIPO	70	Type 2
4/Tunnel 2	PI 4.2-1	0+425	Piste en terre	PIPO	70	Type 2
	PI 4.2-2	20+953	Piste en terre	PIPO	70	Type 2
4/Surface	PI 4.3-1	24+556	Piste en terre	PIPO	70	Type 2

Profils en travers types

Dans le cadre de rétablissement par passage inférieur, deux profils en travers types sont proposés.

□ **Profil type 1 :**

L'ouvrage est constitué d'une chaussée bidirectionnelle constituée de deux voies de 3,50 m et deux accotements de 2,50 m dégageant une ouverture de 12,00 m.

□ **Profil type 2 :**

L'ouvrage est constitué d'une chaussée bidirectionnelle constituée de deux voies de 3,00 m et deux accotements de 2,00 m dégageant une ouverture de 10,00 m.

Le gabarit minimum à dégager est de 4,85 m.

7.2 GRANDS OUVRAGES HYDRAULIQUES (GOH)

7.2.1 Inventaire des GOH

Au terme de l'étude hydrologique et hydraulique d'APS, ci-dessous un tableau récapitulatif des ouvrages proposés par lot et variante. Il s'agit principalement d'ouvrage traversant des écoulements importants.

Tableau 30: Inventaire des GOH

Lot/Variante	Désignation	PK	Longueur (m)	Nombre de travée	Biais (grade)	Structure
2/Sud	GOH 2.2-1 O.EL LEBEN	2+410	60	03 (20 m)	100	PSI-BA
	GOH 2.2-2 O.EL MELAH	21+048	40	02 (20 m)	100	PSI-BA
	GOH 2.2-3 O.REHIB	25+333	40	02 (20 m)	100	PSI-BA
3/Nord	GOH 3.1-1 O.GHEZALA	2+880	100	05 (20 m)	100	PSI-BA
3/Sud	GOH 3.2-1 O.GHEZALA	2+940	100	05 (20 m)	100	PSI-BA

7.2.2 Profil en travers type sur GOH

La section transversale proposée par sens de circulation est constituée d'une chaussée comportant deux voies de circulation de 3,50 m, une bande d'arrêt d'urgence (BAU) de 3,00 m et une bande dérasée de gauche (BDG) de 1,00 m.

A terme, l'ouvrage est extensible et comportera 3 voies de circulation de 3,50, une BAU de 3,00 m et une BDG de 1,00 m.

7.2.3 Conception des GOH

Le choix de la structure du tablier est tributaire de la longueur à franchir ainsi que des considérations économique et fonctionnelle de l'ouvrage. Vu le nombre non important des ouvrages sur l'ensemble du linéaire de l'autoroute et afin de réduire le coût de construction, il est intéressant d'homogénéiser la longueur des travures en adoptant une longueur unitaire de 20 m entre nus extrêmes des poutres.

Transversalement, le tablier en pont à poutres en béton armé (PSI-BA) est le mieux adapté dans le domaine du travelage proposé. Par ailleurs, aucune contrainte d'ordre esthétique n'est exigée compte tenu de la nature des franchissements (grands écoulements) non visibles par les usagers de l'autoroute. L'élanement usuel pour ce type de structure est de 1/15 à 1/17. La hauteur de poutre considérée est 1,15 m soit un élanement de 1/15,5.

7.3 VIADUCS

7.3.1 Inventaire des viaducs

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques de l'ensemble des viaducs proposés pour chaque lot et variante de tracé.

Tableau 31: Inventaire des viaducs

Lot/Variante	Désignation	PK	Caractéristiques géométriques	Longueur (m) (selon variante envisagée ³)	Profil en travers
2/Nord	Viaduc 2.1-1	4+200	- En plan : R=2000m - En long : p=3,5%	240 ou 210	Type 2
	Viaduc 2.1-2	12+200	- En plan : R=2000m puis Droite G=292,339 grad - En long : p=4% puis R=25000 m	690 ou 680	Type 1
	Viaduc 2.1-3	15+220	- En plan : Droite G=318,612 grad - En long : R=35000m	160	Type 2
4/Tunnel 1	Viaduc4.1-1	5+460	- En plan : R=700m - En long : p=7% puis R=18000m	750 ou 790	Type 1
	Viaduc4.1-2	7+220	- En plan : R=550m puis A=221,246 puis Droite G=362,301grad puis A=230,651 puis R=400m - En long : p=1%	510 ou 460	Type 1
	Viaduc4.1-3	10+322	- En plan : A=224,722 puis R=500m - En long : p=0,5%	280 ou 270	Type 1
	Viaduc4.1-4	11+040	- En plan : A=224,722 puis Droite G=335,809 grad - En long : p=0,5%	240	Type 1
	Viaduc4.1-5	13+480	- En plan : R=1200m puis Droite G=374,529 grad - En long : p=4% puis R=20000m	400 ou 390	Type 1
	Viaduc4.1-6	16+180	- En plan : R=600m - En long : R=22000m	480 ou 450	Type 1

³Variante proposées : VIPP, caisson de hauteur constante et caisson de hauteur variable

Lot/Variante	Désignation	PK	Caractéristiques géométriques	Longueur (m) (selon variante envisagée ³)	Profil en travers
4/Tunnel 2	Viaduc4.2-1	6+220	- En plan : R=3500m puis Droite G=303,227 grad puis R=1500m puis Droite G=333,454 grad - En long : p=5% puis R=20000m	1340	Type 1
	Viaduc4.2-2	7+580	- En plan : Droite=333,454 grad puis R=1000m - En long : R=20000m puis p=4%	680	Type 1
	Viaduc4.2-3	11+240	- En plan : R=500m - En long : p=4% puis R=20000m	440 ou 450	Type 1
	Viaduc4.2-4	11+880	- En plan : R=500m puis A=224,722 puis Droite G=335,809 grad - En long : R=20000m puis p=0,3%	480 ou 450	Type 1
	Viaduc4.2-5	14+380	- En plan : R=1200m puis Droite G=374,529 grad - En long : p=4% puis R=20000m	440 ou 390	Type 1
	Viaduc4.2-6	17+106	- En plan : R=600m - En long : R=22000m	480 ou 450	Type 1
4/Surface	Viaduc4.3-1	2+010	- En plan : R=700m - En long : p=4%	400 ou 390	Type 1
	Viaduc4.3-2	5+840	- En plan : R=700m puis A=235,16 puis Droite G=344,836 grad - En long : p=4,5%	900	Type 1
	Viaduc4.3-3	8+350	- En plan : R=700m - En long : p=4,5% puis R=35000m	460	Type 1
	Viaduc4.3-4	11+685	- En plan : R=700m - En long : p=0,5% puis R=40000m	570 ou 570	Type 1
	Viaduc4.3-5	14+395	- En plan : R=700m puis A=414,09 puis A=414,09 - En long : p=0,7%	720 ou 690	Type 1
	Viaduc4.3-6	20+703	- En plan : R=600m - En long : R=22000m	480 ou 450	Type 1

7.3.2 Profils en travers type sur viaduc

Le choix de la section transversale a fait l'objet d'une analyse intégrant le trafic, la nature du relief traversé ainsi que l'aspect fonctionnalité et sécurité de l'utilisateur.

Deux profils types sont proposés pour les viaducs :

□ **Profil type 1 :**

Ce profil sera adopté pour les viaducs longs en relief difficile non extensible, chaque demi-ouvrage est constitué de deux voies de 3,00 et 3,50 de largeur et d'une voie spéciale pour véhicule lourd (VSVL) de 3,50 m avec une bande d'arrêt d'urgence (BAU) de 2,00. Les deux sens de circulation sont séparés

par un terre-plein central (TPC) de 2,10 m constitué d'un DBA de 60 cm et deux bandes dérasées de gauche (BDG) de 75 cm.

□ **Profil type 2 :**

Ce profil sera considéré pour les ouvrages extensibles en 2 x 3 voies, il est constitué sur chaque demi-ouvrage de deux voies de largeur 3,50 m, et d'une bande d'arrêt d'urgence (BAU) de 3,00. Le terre-plein central est de largeur 6,00 m répartie en deux bandes dérasées gauche (BDG) de 1,00 m, deux GBA de 48 cm et un vide de 3,14 m.

A terme, les deux sens de circulation seront constitués de 3 voies de circulation de 10 m ($3 + 3,5 + 3,5$) et d'une BAU de 2,00 m séparés par un terre-plein central (TPC) de 2,10 m constitué d'un DBA de 60 cm et deux bandes dérasées de gauche (BDG) de 75 cm.

7.3.3 Conception structurelles des variantes

Dans un souci de standardisation et d'optimisation, trois types de structure sont proposés :

- Un tablier en VIPP de 40 m ;
- Un caisson de hauteur constante : portée principale 60 m ;
- Un caisson de hauteur variable : portée principale de 110 m.

La variante bi poutres mixte, bien qu'intéressante et présentant des avantages architecturaux et dont la portée principale peut atteindre 80 m, est assez onéreuse en terme de coût de fabrication et d'acheminement surtout dans une zone à relief très difficile voire inaccessible pour des engins exceptionnels. Par ailleurs le coût d'entretien (reprise de la peinture anti corrosion, etc...) constitue un inconvénient auquel il convient de remédier tous les 15 ans environ.

Variante Pont à poutres préfabriquées précontraintes par post-tension

Le domaine d'emploi de cette structure s'étend de 30 à 50 m. La portée économique est comprise entre 30 et 45 m par ailleurs l'élancement usuel est de 1/16 à 1/18. La travure proposée est de 40 m avec une hauteur de la poutre de 2,20 m soit un élancement de 1/17,7.

Cette solution apporte une grande rapidité d'exécution et une garantie de bonne qualité, vu l'industrialisation de la préfabrication des poutres. La mise en place des poutres se fera par des moyens de manutention appropriés (grue, poutre de lancement, etc...).

Variante Pont caisson de hauteur constante

Le domaine d'emploi de cette structure s'étend de 50 à 70 m. Les portées courantes varient de 55 à 60 m.

La portée principale considérée est de 60 m. Les travées d'équilibre (de rive) ont une longueur de 45 m soit un rapport de 0,75. Le tablier a une hauteur constante de 3,00 soit un élancement de 1/20. Les élancements usuels sont de l'ordre de 1/20 au 1/22.

La méthode couramment utilisée pour la construction de ce type de structure est le poussage pour les portées inférieures à 60 m et au-delà la construction par encorbellements successifs.

Variante Pont caisson de hauteur variable

La structure caisson à hauteur variable couvre une gamme de portées comprises entre 80 et 190 m voire exceptionnellement au-delà (260m). Les portées courantes varient de 100 à 130 m. La travure adoptée est de 110 m avec des travées d'équilibre de 65 m soit un rapport de 0,6.

Le tablier étant d'hauteur variable avec une variation parabolique, l'élançement usuel au niveau de la pile est de 1/16 à 1/17 alors qu'à la clef est de l'ordre de 1/30 à 1/35. Les hauteurs de tablier considérées sont respectivement de 6,50 m et 3,20 correspondant à des élançements de 1/16,9 et 1/34,3.

La méthode de construction adoptée pour ce type d'ouvrage est l'encorbellement successif.

Le tableau ci-après, résume le travelage proposé pour chaque viaduc et pour chaque variante structurelle.

Afin d'homogénéiser et d'optimiser le coût de la construction de ces ouvrages, une conception itérative a été conduite pour l'ensemble des viaducs afin d'aboutir à une même portée principale à adopter pour l'ensemble des ouvrages et pour chaque type de structure.

Analyse des variantes

Une analyse sommaire des variantes proposées a été établie afin de statuer sur le choix optimal à adopter. Cette analyse s'est basée principalement sur la faisabilité technique de chacune des variantes compte tenu du relief difficile ainsi que l'aspect architectural et de l'intégration dans le site du projet vu l'importance des ouvrages. Un soin particulier sera apporté à l'harmonie des proportions de l'ouvrage (hauteur/largeur) dans l'espace.

La conception proposée sera affinée en phase d'APD en fonction du tracé retenu.

7.3.4 Etude sommaire des appuis

La conception des appuis de grande hauteur outre l'aspect résistance (flambement), doit faire l'objet d'un traitement architectural afin d'insérer l'ouvrage dans son milieu naturel. Des coupes schématiques ont été proposées (Cf. Plan N°PL 600-305).

Les formes et la qualité des parements à donner aux fûts de piles sont tout autant importants que l'aspect résistance et durabilité.

Les piles sont des éléments très élancés et creux ce qui facilite l'accès pour permettre les visites et inspections détaillées ainsi que toutes interventions d'entretien et de maintenance au niveau des piles elles-mêmes ou des tabliers. Des trappes d'accès devront être prévues à cet effet que ce soit au niveau du tablier ou en bas des piles, ainsi que des échelles à crinolines à l'intérieur des piles.

Il peut également être nécessaire de concevoir au niveau des culées des espaces de tirage permettant l'accès aux différents ancrages actifs au niveau des entretoises pour permettre le changement de la précontrainte extérieure. Il est néanmoins possible de procéder à des renforts de précontrainte s'ils s'avéraient nécessaires en ne disposant pas d'espaces de mise en tension sur culées.

Il est impératif également que les accès à prévoir au niveau de l'ouvrage soient protégés pour empêcher tous risques de vandalisme.

Par ailleurs, une étude spécifique devra être entreprise en phase d'APD/PRO pour la conception des têtes de piles qui devront recevoir un certain nombre d'éléments outre les appareils d'appuis :

- Les fosses de visites et de surveillance nécessaire lors de l'exploitation pour le contrôle des appareils d'appuis à préconiser pour des hauteurs d'appuis dépassant 8 à 10 m ;
- Les plots de vérinage ;
- Les cales de stabilité ou d'appuis provisoires ;
- Les câbles de clouage ;

- Les butées sismiques.

7.4 CONCLUSIONS ET ORIENTATIONS DES ETUDES APD DES OUVRAGES D'ART

L'étude d'avant-projet sommaire des ouvrages d'art a permis de proposer le nombre et la conception générale à prévoir pour les divers types d'ouvrages (Passages Supérieurs/Inférieurs, Grands Ouvrages Hydrauliques et les Viaducs). En effet, les résultats des sondages effectués à cette phase conduisent à un mode de fondation profonde pour l'ensemble des ouvrages. La dite information devra être confirmée en phase postérieure en fonction de la campagne géotechnique d'APD. Quant aux études hydrologiques hydrauliques, elles ont permis de définir le nombre des grands ouvrages hydrauliques traversant les grands écoulements en tenant compte des débits de crues centennales (voir plus au niveau ou à proximité des barrages : Barbara, Bouhertma).

L'objet principal des études techniques d'APD à venir est de figer la conception de chacun des ouvrages (implantation, travures, structure tablier, types de fondations, etc...) en fonction du tracé retenu, des résultats des études hydrologiques hydrauliques détaillées, et principalement géotechniques compte tenu du contexte difficile de la région.

Des études spécifiques devront être également conduites et intéresseront principalement les ouvrages exceptionnels (non courants). Ces études concerneront la nature des appuis de grandes hauteurs et leurs fondations. A cet effet, outre l'étude structurelle, une étude architecturale est utile pour l'insertion de l'ouvrage dans son milieu. La conception détaillée de la structure du tablier et les différents équipements des ouvrages devront être également définis.

8 ETUDE SOMMAIRE DES TUNNELS

8.1 RAPPEL DU CONTEXTE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU SITE DES TUNNELS

Dans le tronçon comportant les variantes de tunnel (T1 et T2), le tracé se développe dans un relief accidenté de collines surmontées par les calcaires durs de l'Yprésien.

La reconnaissance géologique a consisté en un levé géologique de surface, trois sondages carottés profonds pour chaque tunnel et une campagne géophysique de résistivité.

Le tunnel doit être creusé dans une épaisse formation monoclinique de marnes, les marnes à boules jaunes. Le pendage est de 25° à 30° NW. Ces marnes sont une roche argileuse compacte et raide avec une teneur en eau inférieure à 10% très inférieure à la limite de plasticité.

Les données géomécaniques sont quelques mesures de résistance compression simple obtenues sur des échantillons avec une résistance comprise entre 3 et 9 MPa. Ces valeurs ne sont pas représentatives du comportement du massif à l'échelle de l'ouvrage et ne permettent pas d'évaluer la stabilité des ouvrages souterrains.

8.1.1 Sondages réalisés au droit des tunnels

Le récapitulatif des sondages réalisés au niveau des tunnels est donné dans le tableau suivant.

Tableau 8-1.

Ouvrage	Sondage	Description
Tunnel 1	RT1	La reconnaissance effectuée sur une profondeur de 125 m montre la dominance d'une série marneuse avec une épaisseur dépassant 120 m (entre 2.5 et 125m de profondeur).
	RT2	Le sondage carotté réalisé à ce niveau, sur 150 m de profondeur, montre la dominance d'une série marneuse sur la totalité du sondage qui débute à 0.3m de profondeur avec un horizon plus ou moins altéré entre 0.3 et 5.2m de profondeur.
	RT3	La reconnaissance effectuée sur une profondeur de 150 m montre la dominance d'une série marneuse avec une épaisseur dépassant 149 m (entre 1 et 150m de profondeur) présentant des altérations sur 5 premiers mètres.
Tunnel 2	RT4	Le sondage carotté réalisé à ce niveau, sur 120 m de profondeur, montre la dominance d'une série marneuse, plus ou moins fragmentée, avec une épaisseur dépassant 116 m (entre 4 et 120m de profondeur) surmontée par une couche d'argile limoneuse.
	RT5	Le sondage carotté réalisé à ce niveau, sur 150 m de profondeur, montre la dominance d'une série marneuse sur la totalité du sondage qui débute à 1m de profondeur, formée de marne et d'argilite grise à noirâtre feuilletées avec présence de joint subverticaux et incliné à remplissage calcitique, avec un horizon altéré entre 1 et 5.2m de profondeur.
	RT6	Le sondage carotté réalisé à ce niveau, sur 100 m de profondeur, montre la dominance d'une série marneuse formée de marne grise à noirâtre feuilletée à fissures millimétriques à centimétriques avec remplissage calcitique, avec une épaisseur dépassant 95 m (entre 0.8 et 100m de profondeur) avec la présence d'un horizon altéré au niveau du toit entre les profondeurs 0.8 et 3.9m.
Tunnel 3	RT7	La reconnaissance effectuée sur une profondeur de 150 m a permis d'identifier une série marneuse avec une épaisseur dépassant 100 m (entre 5 et 150m de profondeur), surmontée par une couche d'argile beige à jaunâtre plus ou moins altérée de 5m d'épaisseur.
	RT8	La reconnaissance effectuée sur une profondeur de 100 m a permis d'identifier une série marneuse formée des marnes noirâtres à grisâtres plus ou moins fragmentées avec une épaisseur dépassant 94 m (entre 6 et 100m de profondeur) avec une couche d'argile limoneuse brunâtre moyennement plastique de 3m d'épaisseur.
	RT9	Le sondage carotté réalisé à ce niveau, sur 150 m de profondeur, montre la dominance d'une série marneuse, formée de marne noirâtre à grisâtre plus ou moins fragmentée avec des passages marno-calcaires sur une épaisseur dépassant 148m (entre les profondeurs 1.5 et 150m), surmontée par une couche d'argile limoneuse d'un mètre d'épaisseur.

Ouvrage	Sondage	Description
Tunnel 4	RT10	La reconnaissance effectuée sur une profondeur de 150 m a permis d'identifier une série à alternance de marne et de grès conglomératique avec une épaisseur dépassant 100m (entre 4 et 150m de profondeur), surmontée par une couche d'argile tuffeuse rougeâtre de 3m d'épaisseur.
	RT11	Le sondage carotté réalisé à ce niveau, sur 150 m de profondeur montrant une lithologie diversifiée avec une épaisse couche de marne de 23m d'épaisseur (entre 3.6 et 27m de profondeur) surmontant une formation d'argile limoneuse avec quelques passages gréseux de 34m d'épaisseur (entre 27 et 61m de profondeur). A partir de 61m de profondeur on a une formation marneuse avec des alternances argileuses.
	RT12	Le sondage carotté réalisé à ce niveau, sur 120 m de profondeur, montre la dominance d'une série marneuse formée de marne noirâtre à grisâtre plus ou moins fragmentées avec des intercalations métriques de marno-calcaires sur une épaisseur dépassant 97m (entre 23 et 120m de profondeur), surmontée par des alternances d'argile et d'argile limoneuse.

8.1.2 Campagne géophysique

Les sondages électromagnétiques TDEM et les profils en tomographie électrique, réalisés tout au long des tracés proposés des tunnels envisagés, ont permis l'interprétation de la stratification des formations géologiques et l'appréciation du contexte tectonique suivantes :

Tunnels 1,2 et 3 :

- ❑ Les formations géologiques rencontrées sont homogènes (marnes noires à boules jaunes du Paléocène) sur des profondeurs qui dépassent les 150 mètres ;
- ❑ Une faille majeure de direction NE-SO avec un jeu apparent normal traversant la formation marneuse, repérée à partir du décalage constaté au niveau de la formation calcaire d'âge Campanien-Maastrichtien au-dessus de laquelle est superposée la formation marneuse du Paléocène ;
- ❑ Les résistivités faibles (comprises entre 1 et 25 ohm.m) sont liées à une activité tectonique intense qui favorise la formation des poches d'eau.

Tunnel 4 :

- ❑ Une forte hétérogénéité lithologique expliquant la grande variabilité des résistivités électriques (abondance des alternances lithologiques au niveau des sondages carottés RT10, RT11 et RT12) ;
- ❑ Un accident majeur recoupe le tunnel est de direction NE-SO à jeu chevauchant avec présence d'autres failles mineures conjuguées de direction NO-SE ;
- ❑ Les variations de résistivités sont reliées à la présence de certains aquifères.

8.1.3 Campagne géophysique

A l'exception du Tunnel T4, on remarque que les tracés des trois tunnels T1, T2 et T3 recoupent une épaisse formation monoclinique de marnes noires à boules jaunes (concrétions dolomitiques à patine jaune) d'âge Paléocène, admettant une direction NE-SO avec un pendage variant entre 25° et 30° vers le NO. Cette formation affleure sur des grandes étendues et dépasse les 700m d'épaisseur (confirmé par les résultats de la campagne géophysique) et montrant plusieurs loupes de glissement en surface.

Le tracé du Tunnel T4, traverse les marnes à boules jaunes et longe la série argilo-sableuse avec des passées conglomératiques de Miocène puis les alluvions, les éboulis et les recouvrements divers qui reposent sur les marnes à boules jaunes.

Les marnes recoupées par l'ensemble des variantes de tunnel forment une roche argileuse compacte et raide avec une teneur en eau inférieure à 10% très inférieure à la limite de plasticité. La direction et le pendage de la formation marneuse sont favorables à la direction d'excavation des 4 tunnels proposés.

Ces types de roche de qualités mécaniques acceptables et de bonne tenue au moment de l'excavation peuvent être rapidement altérés au contact de l'eau et nécessiter la pose rapide d'un revêtement protecteur pour assurer la stabilité de l'excavation, mais aussi éviter l'apparition de désordres (tassements) en surface.

8.2 CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES GENERALES

8.2.1 Tracé en plan et profil en long

Les variantes en tunnel T1 et T2, de longueurs respectives de l'ordre de 1 600 m et 1 400 m, comprennent chacune deux tubes.

Le tracé en plan du tunnel 1 est en rayons de grands développements (5 500m et 1 500m). Le profil en long est descendant dans le sens Aîn El baya vers la frontière algérienne avec une déclivité constante de 1%.

Quant au tunnel 2, la tête ouest débouche sur un rayon moyen de 400m, rayon qui est très serré et donc potentiellement dangereux. Cela exige une signalisation renforcée pour prévenir les usagers, du danger. Le profil en long est descendant dans le sens Aîn El baya vers la frontière algérienne avec une déclivité constante de 0,5%.

Les têtes de tunnel doivent être implantées avec un recouvrement minimum de l'ordre de 15m au-dessus de la clef de la voûte des tubes et une distance inter axe entre les tubes de l'ordre de 20m. La distance inter axe entre les tubes doit augmenter dans le massif pour atteindre 30m.

8.2.2 Profil en travers

Chaque tube comportera 2 voies de circulation de largeur 3,5 m chacune. Elle est bordée d'une Bande Dérasée de Droite (BDD) de largeur 2,00m et d'une Bande Dérasée de Gauche (BDG) de largeur 1,00m. - soit une largeur roulable de 9,50m. La largeur roulable est bordée de trottoirs comportant une bordure de type T2 de largeur 0,85 m. La hauteur libre proposée est de 4,95 m.

Ce profil est celui qui est le plus satisfaisant sur le plan de circulation, car il permet en cas d'arrêt d'un PL ou d'un VL de conserver 2 voies de circulation à vitesse normale (1 voie PL et 1 voie VL).

Dans de nombreux cas, il peut être admis une certaine diminution de la vitesse au droit d'un véhicule en panne. Ceci est admissible pour les tunnels de longueurs supérieures à 1 Km où la vitesse sera réduite et où des moyens de contrôle de la circulation et de la signalisation seront mis en œuvre.

8.3 EVALUATION DE LA STABILITE DES TUNNELS

Les données sommaires disponibles sur le site ne permettent pas d'évaluer le comportement en souterrain des marnes de ce site sur une base rationnelle à partir de la connaissance de l'état des contraintes naturelles et des caractéristiques géomécaniques des marnes à l'échelle de l'ouvrage. Cet avis est fondé sur le comportement de roches argileuses compactes et fracturées comparables constaté lors du creusement d'ouvrages souterrains en France, Algérie et Italie. On observe dans ces terrains sous un recouvrement de l'ordre de 100m des instabilités du front de taille et des convergences élevées. Ce sont des terrains difficiles à très difficiles.

Des investigations spécifiques seront réalisés lors des études d'APD si la variante tunnel sera retenue.

8.4 MODES DE CONSTRUCTION

Le comportement des terrains anticipé ci-dessus conduit à recommander un mode de construction assurant la stabilité du front de taille au fur et à mesure de l'avancement et la mise en place d'un soutènement rigide à proximité du front de taille de manière à contrôler rapidement les convergences.

8.4.1 La Méthode ADECO-RS

Dans ces conditions, la méthode ADECO-RS développée en Italie par Pietro Lunardi doit être recommandée. Les phases successives de construction sont les suivantes :

1. Soutènement du front de taille par des boulons en fibre de verre. La longueur des boulons est de généralement de 24m. Cette longueur est considérée comme optimale pour l'organisation du chantier de creusement. Les boulons sont mis en place tous les 6m.
2. Creusement en pleine section sur une longueur de 0,80m à 1,20m par une machine à attaque ponctuelle.
3. Projection d'une première couche de béton projeté d'environ 5cm d'épaisseur.
4. Mise en œuvre d'un cintre HEB 200.
5. Projection d'une deuxième couche de béton projeté de 25cm à 35cm d'épaisseur.
6. Excavation, ferrailage et bétonnage du radier incurvé et de la base des piédroits.
7. Bétonnage du revêtement définitif par plots de 5m à 10m.

Cette méthode de creusement réalisée par une entreprise compétente conduit à des avancements de 1m à 1,50m par jour.

8.4.2 Creusement au tunnelier

Le creusement par tunnelier a été a priori écarté à cause des risques de coincement de la jupe dus aux fortes convergences et de la faible longueur du tunnel. Toutefois il convient de signaler qu'en Italie, le Tunnel de Sparvo sur le tronçon Bologne-Florence de l'Autoroute A1 a été creusé dans des terrains argileux considérés comme difficiles à très difficiles par un tunnelier à pression de terre de 15,20m de diamètre. La longueur de chacun des deux tubes est de 2600m. Le recouvrement est de 100m à 120m.

La pression de confinement au front de taille pour assurer sa stabilité était de 0,25 MPa à 0,40 MPa.

Le revêtement est constitué d'anneaux de 9 voussoirs plus une clef en béton armé. La longueur des anneaux est de 2m. L'épaisseur des voussoirs est de 70cm.

Pour faire face aux risques de coincement de la jupe, une poussée maximale de 400 000kN était disponible (57 vérins travaillant à 350 bars).

La construction du tunnelier et son montage sur le site a duré 16 mois. Le creusement des deux tunnels a duré 24 mois.

Avec ces performances le creusement des deux tubes du tunnel par tunnelier à pression de terre pourrait constituer une variante.

8.5 AMENAGEMENTS DU GENIE CIVIL LIES A L'EXPLOITATION ET A LA SECURITE

8.5.1 Aménagements pour l'évacuation et la protection des usagers et l'accès des secours

Des galeries de communication entre tubes, seront implantées. Ces galeries seront accessibles aux piétons et aux véhicules.

8.5.2 Niches de sécurité

Des niches de sécurité seront implantées sur le côté droit de chaque sens de circulation suivant une inter distance de 200 à 250 m.

Ces niches sont destinées à recevoir les équipements de sécurité classiques : poste d'appel d'urgence, extincteurs. Leurs dimensions minimales sont de 1,50m (largeur), 1,00 m (profondeur) et 2,00 m sur toute la surface (hauteur).

8.6 LES EQUIPEMENTS D'EXPLOITATION ET DE SECURITE

8.6.1 Ventilation

Compte tenu de la longueur du tunnel, une ventilation mécanique est nécessaire pour satisfaire à deux exigences fondamentales :

- ❑ En exploitation normale, assurer en toutes circonstances la dilution des polluants émis par les véhicules (monoxyde de carbone, fumées, oxydes d'azote, notamment) selon les taux requis pour garantir la sécurité et le confort des usagers ;
- ❑ En cas d'incendie, désenfumer le tunnel pour protéger les personnes bloquées et faciliter l'accès des secours. Les galeries de communication entre les tubes doivent par ailleurs être équipées d'un dispositif de mise en surpression.

Concernant le choix du système de ventilation pour ce type de tunnel à tubes unidirectionnels, c'est indéniablement le système longitudinal simple (sans extraction massive) qui est le plus adapté.

Le système proposé consiste à disposer dans chaque tube des batteries d'accélérateurs qui soufflent dans le sens de la circulation des véhicules et communiquent leur effet d'impulsion à la masse d'air contenue dans l'ouvrage, créant ainsi un courant d'air longitudinal.

Dans le cas de l'incendie, le courant d'air longitudinal induit par les accélérateurs permet de refouler les fumées vers la tête de sortie afin de protéger les usagers bloqués derrière le foyer ; des mesures particulières sont prévues dans le cas d'un trafic initialement congestionné à l'aval (on vise alors limiter le courant d'air longitudinal pour maintenir la stratification des fumées pendant l'évacuation des usagers).

8.6.2 Eclairage

L'installation comprendra, de manière classique :

- ❑ L'éclairage de base qui s'étend sur toute la longueur de chaque tube ; des régimes intermédiaires seront réalisés, le régime minimal nocturne constituant le régime de sécurité secouru ;
- ❑ l'éclairage de renforcement à l'entrée de chaque tube, qui a pour but de limiter l'effet de « trou noir » ressenti par les usagers pénétrant dans l'ouvrage ; son dimensionnement sera adapté aux conditions photométriques spécifiques de chaque tête du tunnel.

- ❑ Le tunnel est orienté sensiblement E-W, pour éviter l'éblouissement des conducteurs à la sortie, il est nécessaire d'équiper les sorties des tubes avec des paralumes.
- ❑ Le balisage lumineux au moyen de hublots de jalonnement disposés en partie basse de chaque piédroit.

8.6.3 Alimentation électrique

Les conditions de livraison de l'énergie par le concessionnaire seront étudiées ultérieurement.

Le système d'alimentation électrique sera conçu pour pouvoir être maintenu en cas de coupure du réseau, ainsi qu'en cas de défaillance partielle du matériel.

La distribution électrique sera assurée à partir d'un ou deux postes de transformation situés en tête de l'ouvrage.

Les équipements de sécurité bénéficieront d'une alimentation de secours sans coupure.

8.7 RECOMMANDATIONS POUR LES RECONNAISSANCES GEOLOGIQUES ET GEOTECHNIQUES D'APD

Les études d'avant-projet détaillé doivent permettre un dimensionnement des ouvrages, une définition plus précise des méthodes de construction pour déboucher sur une meilleure évaluation des coûts et des délais de construction. Elles impliquent le choix des lois de comportement et des paramètres géomécaniques associés.

Dans le cadre de l'APD et si la variante tunnel était retenue, il aurait été recommandé de réaliser quatre sondages carottés permettant d'établir des logs de teneur en eau, de teneur en carbonate, de fracturation immédiatement après le carottage.

Les têtes de tunnels devraient faire l'objet de reconnaissances détaillées par sondages carottés et géophysiques.

9 AMENAGEMENTS ET EQUIPEMENTS ANNEXES

9.1 SIGNALISATION HORIZONTALE ET VERTICALE

9.1.1 Signalisation horizontale

La signalisation horizontale est un équipement essentiel de l'autoroute qui permet de guider le conducteur et assurer la fluidité du trafic et la sécurité de l'utilisateur.

Le marquage horizontal est prévu sur l'autoroute, sur les échangeurs et sur les rétablissements de communications. Ce marquage comporte les lignes de séparation des voies, les lignes de rives, les hachures, les flèches (directionnelle ou de rabattements), ... etc.

Les lignes horizontales sont caractérisées par une largeur unitaire « u », et une modulation (Plein/Vide) pour les lignes discontinues. La valeur de u pour les autoroutes est de 7.5 cm, 6 cm pour les routes importantes et 5 cm pour toutes les autres routes.

Les détails d'implantation du marquage horizontal sont indiqués dans les plans types de signalisation et équipements.

Le traitement des points singuliers fera l'objet d'une attention particulière pour la variante retenue en phase d'APD.

9.1.2 Signalisation Verticale

La signalisation verticale comprend les panneaux de signalisations fixe (panneaux de police et panneaux d'indication) ou dynamique (PMV) ainsi que les balises et ont pour but d'assurer la sécurité et l'information des usagers.

La signalisation verticale est implantée au niveau des Bernes ou du TPC.

Les panneaux de police sont utilisés au niveau des points singuliers (Gares de péages, VSVL, tunnel, viaducs, échangeurs, virage d'un rayon inférieur à 1,5 Rdn, pente élevées, etc), et des rétablissements de communications et signalent les diverses prescriptions permettant d'organiser le trafic. Il s'agit notamment :

- ❑ Des panneaux de type A, de forme triangulaire, permettant de signaler un danger. Ils ont pour objectif d'appeler de façon toute spéciale l'attention des usagers de la route aux endroits où leur vigilance doit redoubler en raison de la présence d'obstacles ou de points dangereux.
- ❑ Des panneaux de type B, de forme circulaire, de prescription absolue. Ils ont pour objectif de porter à la connaissance des usagers de la route les interdictions et obligations particulières résultants de mesures réglementaires.

Les panneaux de police utilisés sont :

- ❑ De très grande gamme sur l'autoroute (section courante) ;
- ❑ De grande gamme sur les bretelles des échangeurs et sur les routes nationales ;
- ❑ De gamme normale sur les routes régionales, et les autres routes rétablies.

Les panneaux d'indications ont pour objet d'informer les usagers sur les services utiles (panneaux de Type C) ou pour les orienter en fonction de l'itinéraire ou de la destination qu'ils se sont fixés (Panneaux Type D).

Ces panneaux seront notamment implanter à l'approche :

- ❑ Des échangeurs ;
- ❑ Des aires de service et aires de repos ;
- ❑ Des gares de péages ;
- ❑ Etc.

Les panneaux de type D proposés pour le présent projet sont :

- ❑ Des panneaux d'avertissement de type D50 placés à 2000 m de la signalisation avancé et indiquant la destination de sortie et la distance d'implantation. Ces panneaux permettent d'alerter l'utilisateur à l'approche d'une sortie.
- ❑ Des panneaux de pré signalisation de type D40 indiquant pour chacune des voies de l'autoroute les mentions desservies et la distance dont dispose l'utilisateur pour effectuer les changements de file. Ces panneaux sont implantés à une distance de 1000 des panneaux de signalisation avancée.
- ❑ Des panneaux de signalisation avancée de type D30 identique au précédents mais ne comportant pas de distance, marquant la fin de la manœuvre.

Outre les panneaux de signalisations, des balises seront implantées :

- ❑ Tous les kilomètres aux PK correspondants ;
- ❑ Au niveau des musoirs pour les sorties de l'autoroute (J14);
- ❑ Etc ;

Enfin, des panneaux à messages variables seront installés aux abords du tunnel si l'une des variantes tunnels est retenue. Ces panneaux ont pour objet d'informer en temps réel les usagers des conditions de circulation à l'intérieur des tunnels, des risques potentiels, et d'appeler à la vigilance des automobilistes.

9.2 EQUIPEMENTS DE SECURITE

Les équipements de sécurités comprennent les dispositifs de retenues, les postes d'appels d'urgences et les lits d'arrêts.

9.2.1 Dispositifs de retenues

Conformément à l'ICTAAL, des barrières de sécurité équiperont systématiquement le TPC. Le type de barrière à utiliser dépendra de la largeur du TPC, il s'agira notamment de :

- ❑ Glissières métallique de type GS4, pour le cas de la section courante avec TPC de 12 m.
- ❑ Dispositifs de retenue en béton de type GBA pour la section courante avec VSVL et la section en relief difficile sans VSVL ;
- ❑ Dispositifs de retenue en béton de type DBA pour la section en relief difficile avec VSVL

Des Interruptions ponctuelles de TPC (ITPC) seront implantées de part et d'autres des Ouvrages d'Art non courants, des tunnels, des échangeurs et de la barrière de péage pleine voie, et avec un intervalle de 3 à 5 km hors points singuliers. Ces ITPC permettront en cas de besoin de basculer la circulation d'une chaussée vers l'autre.

Outre les barrières sur TPC, des glissières équiperont également les bernes dans les cas suivants :

- ❑ Pour des Hauteurs de remblais supérieurs à 10 m, les bermes seront équipées de Glissières de type GS2.
- ❑ Pour les hauteurs de remblais comprises entre 3 et 10 m, les bermes seront équipées de Glissières de type GS4.
- ❑ En présences de dispositifs agressifs situés dans la zone de sécurité de l'autoroute (8.5 m pour la catégorie L2 et 10 m pour la catégorie L1, et pas au-delà de 3 m de hauteur pour les zones en déblais), et à l'extérieur des courbes de rayon inférieur à 1.5 Rdn, des glissières de type GS4 seront implantées.

Outres les barrières de sécurités, des clôtures seront installées au droits des zones où la hauteur des terrassements (remblai ou déblai) est inférieure à 3m, afin d'éviter les accès indésirables (Animaux, etc).

9.2.2 PAU et refuges

Conformément à l'ICTAAL 2015, des refuges sont aménagés tous les 2 km de part et d'autre de l'autoroute. En outre, un refuge est mis en place de part et d'autre des tunnels et des ouvrages d'arts non courants.

Un poste d'appel d'urgence (PAU) équipera chaque refuge et aire annexe.

Le réseau d'appel d'urgence est constitué d'une artère de transmission reliant chaque poste d'appel d'urgence (PAU) à un poste de centralisation des appels, situé dans les locaux des forces de police.

9.2.3 Lits d'arrêts

Ces dispositifs permettent d'immobiliser, sans dommage pour le chauffeur et le véhicule, un poids lourd dont les freins sont devenus inefficaces.

L'implantation des lits d'arrêts sera réalisé à l'amont des points singuliers (échangeur, aire, viaduc, tunnel, virage d'un rayon inférieur à Rdn...), situés dans une descente et après une dénivelée supérieur à 130m. On cherchera cependant à s'assurer que l'on a une visibilité suffisante à la fois sur le lit d'arrêt et sur le point singulier.

Ils seront signalés à l'aide d'un d'un marquage en damier rouge et blanc et de panneau d'indication de type C26a. Lorsque plusieurs lits d'arrêt existent, et pour que leur utilisation soit rationnelle, on s'interdira d'en signaler le nombre : seul celui à venir doit être signalé.

9.3 GARES DE PEAGE

9.3.1 Description général du système de péage

Sur le réseau autoroutier Tunisien on rencontre aujourd'hui deux principes de gestion des péages :

- **Péage fermé** : L'utilisateur franchit en entrée sur le réseau une gare de péage (Prise de ticket ou équivalent), il en franchit une autre en sortie où il paye en fonction du trajet parcouru ;
- **Péage ouvert** : L'utilisateur ne rencontre pas d'installation de péage lorsqu'il pénètre sur le réseau concédé, il est intercepté au cours de son itinéraire par une barrière pleine voie (BPV) où il paye une somme forfaitaire.

Pour le cas de l'autoroute Bousalem-Frontière Algérienne, et conformément aux termes de référence, le système de péage sera de type fermé.

Sur ce type de système, chaque point d'échange situé entre BPV doit être équipé de gare de péage gérant l'entrée et la sortie des usagers, les voies de contrôles en entrées et en sorties nécessitant des équipements différents (Prise de ticket à l'entrée et paiement à la sortie).

Nous présentons ci-dessous la description du schéma de péage proposé pour les deux variantes nord et sud.

□ Variante sud :

La variante Sud comportera au total quatre stations de péages. Les trois premières seront de type gares sur échangeur, au niveau des sorties de Bellarigia, vers la RN17, Fernana, vers la RN17, et de la dernière sortie avant le passage frontalier algérien, vers la RL414.

Une gare de péage pleine voie sera installé avant le passage frontalier algérien.

Le schéma de principe du système de péage pour la variante sud est présenté ci-dessous :

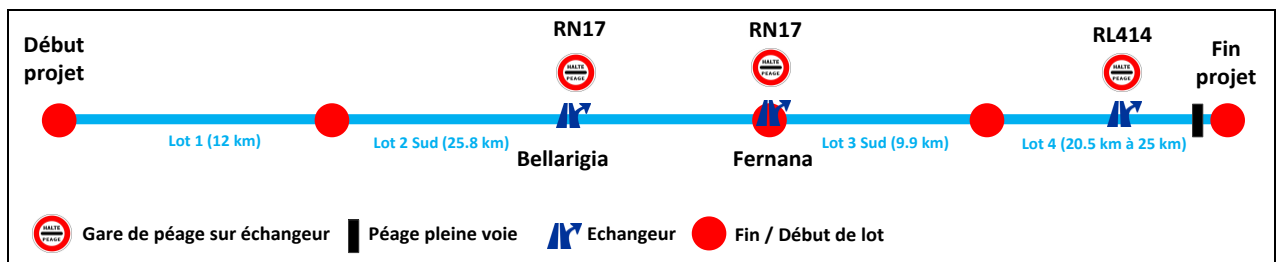


Figure 12: Schéma synoptique du système de péage pour la variante sud

□ Variante Nord :

La variante Nord comportera au total quatre stations de péages. Les trois premières seront de type gares sur échangeur, à la fin du lot 1 et début du lot 2 pour la première sortie vers la RR59, à la sortie de Fernana, vers la RN17, et à la dernière sortie avant le passage frontalier algérien, vers la RL414.

Une gare de péage pleine voie sera installé avant le passage frontalier algérien.

Le schéma de principe du système de péage pour la variante Nord est présenté ci-dessous :

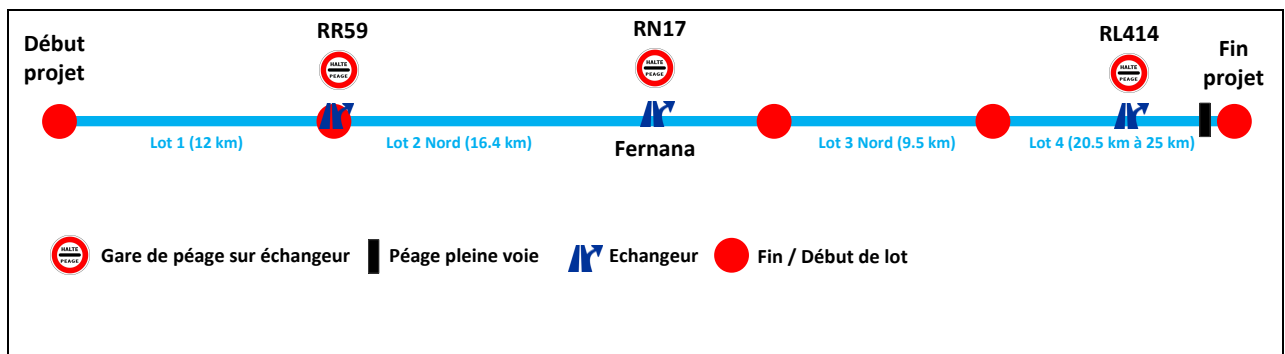


Figure 13: Schéma synoptique du système de péage pour la variante Nord

9.3.2 Dimensionnement du nombre de couloir

Le dimensionnement du nombre de couloir des gares de péage sera réalisé en phase d'APD pour la variante retenue, sur la base du trafic de la trentième heure, et du mode de fonctionnement (Automatique, Manuel, Télépéage), lequel influe sur la capacité théorique de chaque voie.

A ce stade de l'étude, un minimum de deux voies par sens est recommandé en prévision d'une éventuelle panne sur une des voies.

9.3.3 Description des aménagements des gares

Les aménagements à prévoir pour les gares de péage dépendent du type de gare, selon qu'elles soient implantées en pleine voie ou sur échangeur.

❑ Gare Pleine Voie

La gare de péage pleine voie sera constituée des éléments suivants :

- ❑ Une plate-forme de péage regroupant les couloirs de péage et les ilots protégés par un auvent.
- ❑ Un ensemble de bâtiments d'exploitation regroupant :
 - zone ou un bâtiment de surveillance.
 - une zone ou un bâtiment technique.
- ❑ Des parkings pour le personnel.
- ❑ Des sanitaires publics associés aux parkings pour les usagers
- ❑ Une antenne de gendarmerie
- ❑ Une zone technique destinée aux opérateurs privés

❑ Gare sur échangeur

La gare sur échangeur sera constituée des éléments suivants :

- ❑ Une plate-forme de péage regroupant les couloirs de péage protégés par un auvent.
- ❑ Un ensemble de bâtiments d'exploitation regroupant :
 - un bâtiment technique.
 - un local principal ou une maxi cabine implantée sur un ilot élargi.

- ❑ Des parkings pour le personnel.
- ❑ Des sanitaires publics associés aux parkings des usagers ou intégrés au bâtiment technique.

9.4 AIRES ANNEXES

L'Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison (ICTAAL 2015) précise qu'il faut prévoir une aire de services au moins tous les 60 km et une aire de repos au moins tous les 30 km. Les aires de repos sont destinées au repos et à l'agrément des usagers, tandis que les aires de service offrent également un approvisionnement en carburant.

Dans le cadre du présent projet, il est proposé d'implanter une aire de service et une aire de repos pour chacune des variantes (Nord et Sud) avec une inter-distance moyenne de 30 km.

Ces aires seront dimensionnées de manière à fournir un nombre de place de stationnement suffisant pour les PL et VL.

10 ETUDE DE TRAFIC

10.1 EVALUATION DU TRAFIC FUTUR

10.1.1 Situation 1 « sans tronçon autoroutier »

La valeur du trafic sur les sections de route peut alerter sur la localisation de zones de congestion. L'Heure de Pointe journalière (HP) comptabilise généralement 6 % du trafic journalier moyen annuel. La capacité d'une voie d'une route nationale étant de 1 200 UVP par heure, le trafic maximum exprimé en UVP par voie et par jour est de $1200/6\% = 20\ 000$ UVP, ce qui revient à dire que les axes routiers ayant un trafic supérieur à 20 000 UVP devront être élargis ou leur trouver des alternatives parallèles permettant de réduire la congestion.

L'axe de désenclavement par l'Est du gouvernorat de Jendouba (N6 : Jendouba-Bousalem) sera saturé durant la période 2030-2035. La N17 et la N6 entre Jendouba et Ghardimaou ou seront saturées durant la période 2035-2040.

Tableau 2: Projection du trafic (uvp.j) sans projet sur certains axes structurants du réseau routier de Jendouba (2020 – 2045)

Liaison	axe routier	2020	2025	2030	2035	2040	2045	Horizon de saturation
Jendouba - Bousalem	N6	16 894	19 785	22 225	26 094	30 929	36380	2030 - 2035
Jendouba - Tabarka	N17	13 409	17 190	19 980	24 660	29 655	35361	2035 - 2040
Jendouba - Ghardimaou	N6	8 121	9 140	13 242	18 951	26 148	33211	2035 - 2040
Bousalem - Fernana	R53	4 447	6 280	10 778	14 167	16 732	21363	-
Bousalem - Ain Draham	N11	2 242	2 943	4 948	9 462	11 586	13971	-
Nefza - Tabarka	N7	9 901	12 241	15 211	17 239	21 707	25815	2040 - 2045

10.1.1.1 Temps de parcours

Tableau 3. Evolution du temps de parcours (mn) sur le réseau routier de référence – Situation 1 (sans projet, 2020 – 2045)

	veh.km	véh.heure	Nombre de déplacement	Distance (km)	Temps de parcours (mn)
2020	27 217 528	488 721	825 917	33	36
2023	32 067 581	710 912	957 704	33	45
2025	35 722 207	955 873	1 057 084	34	54
2030	47 085 527	2 286 780	1 351 934	35	101
2035	61 784 674	6 127 205	1 718 920	36	214
2040	80 837 397	17 453 050	2 180 521	37	480
2045	100 972 506	41 571 921	2 650 168	38	941

Le réseau routier au niveau des gouvernorats du Nord de la Tunisie sera saturé à partir des horizons 2030 -2035.L'augmentation de la capacité d'un certain nombre d'axes routiers durant cette période est recommandée.

10.1.2 Situation 2 « avec tronçon autoroutier »

Plusieurs scénarios tests ont été réalisés et qui ont conduits à la proposition des scénarios A et B :

- ❑ Scénario A : situation avec le projet du tronçon autoroutier Bousalem - Frontière Algérienne (Nord et Sud) où seules les intersections les plus importantes (en flux) sont retenues.
- ❑ Scénario B : il est confondu avec le scénario A, sans toutefois tenir compte de l'intersection (échangeur) de la future autoroute avec la RR53, afin d'observer sa répercussion sur le trafic.

10.1.2.1 Scénario A : 1^{ère} variante de choix d'intersections

A l'issu de la simulation du trafic des scénarios test et suite à l'analyse des flux directionnels au niveau des intersections des deux variantes d'autoroute avec le réseau actuel, quatre intersections ont été retenues pour chacune des variantes :

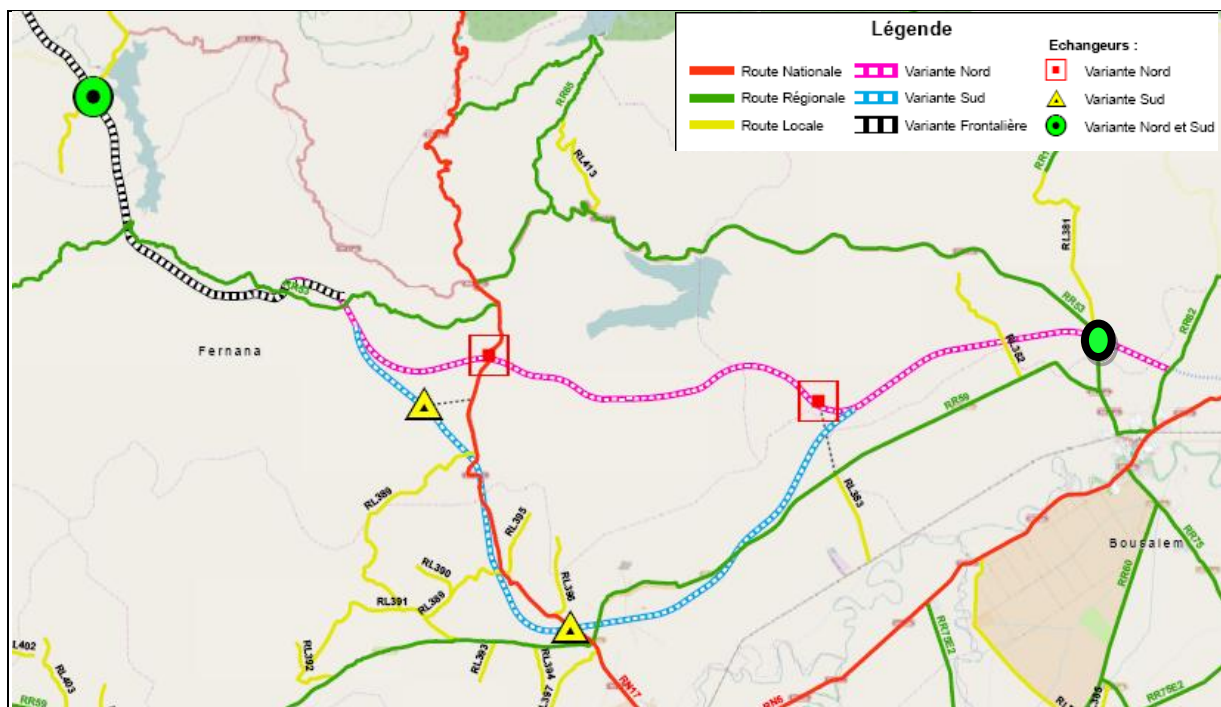
Le tracé Nord compte ainsi quatre (4) intersections avec le réseau existant, réparties de la manière suivante:

- 1 intersection avec la RR 53
- 1 intersection avec une bretelle en liaison avec la RR59
- 1 intersection avec la RN 17
- 1 intersection avec la RL 414

Le tracé Sud compte également quatre (4) intersections avec le réseau existant, réparties de la manière suivante:

- 1 intersection avec la RR 53
- 1 intersection avec la RN 17 (section sud)
- 1 intersection avec une bretelle en liaison avec la RN 17 (section nord)
- 1 intersection avec la RL 414

Figure 14. Tracés des variantes Nord et Sud de l'autoroute Bousalem frontière Algérienne avec les intersections retenus (Scénario A)



10.1.2.1.1 Volumes du trafic au niveau des deux couloirs de tracé autoroutier

Les calculs de la demande de transport routier sur les couloirs Nord et Sud sont évalués sur la période 2023 – 2045. Ces calculs retiennent toujours l'hypothèse que l'ensemble du réseau routier de référence (sans autoroute) n'observera pas dans l'avenir un changement particulier au niveau de sa capacité.

Les projections des trafics entre Bousalem et la frontière Algérienne sur un horizon de 20 ans à partir de l'année de mise en service (2023) du tronçon autoroutier sont réparties par section. Le volume autoroutier en UVP des deux couloirs, représentant la moyenne des sommes des flux par section homogène, pondérée par leurs linéaires respectifs, est fourni par le tableau suivant.

Ci-dessous la projection des trafics par catégorie de véhicule (VL, PL) et par section pour l'année 2045.

Figure 15. Trafic (VL, PL) les deux sens de circulation confondus par section en 2045 - Variante Nord de l'autoroute (Scénario A)

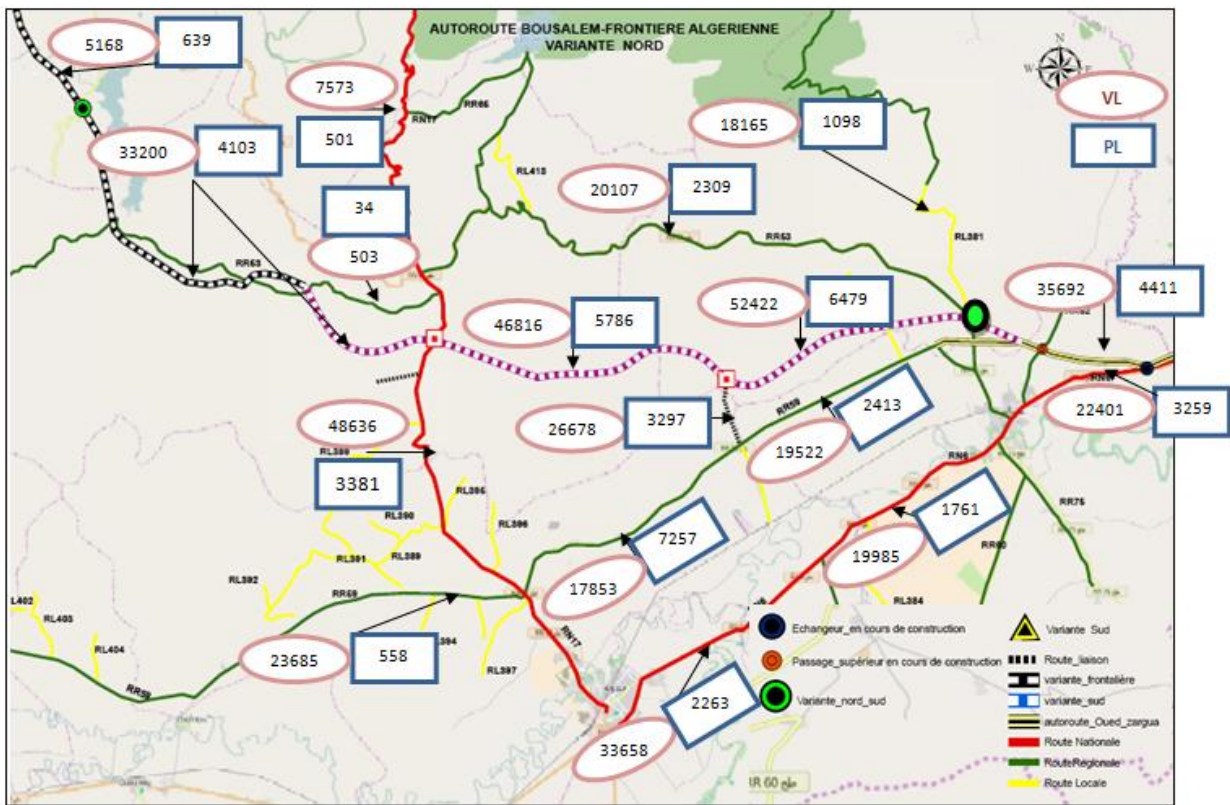
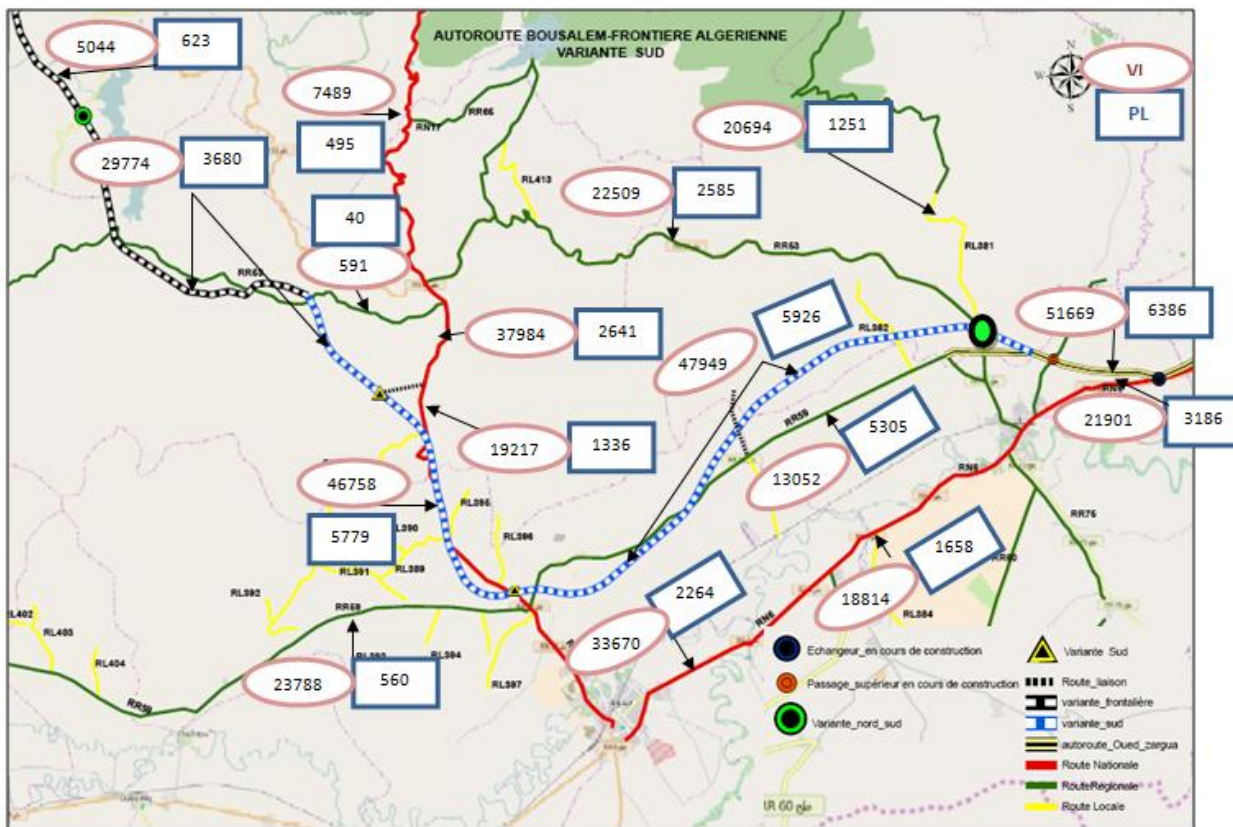


Figure 16. Trafic (VL, PL) les deux sens de circulation confondus par section en 2045 - Variante Sud de l'autoroute (Scénario A)



Trois observations majeures sont dégagées :

- la variante Sud, par son tracé qui évolue parallèlement à la RN 17, soulage le trafic sur cet axe routier important,
- en 2045, la variante Nord devrait être accompagnée par le dédoublement en 2*2 voies de la RN 17, section "Jendouba - Fernana",
- un flux important est observé au niveau de la dernière section commune aux deux tracés autoroutiers. En effet, à partir de 2035 (période caractérisée par la saturation progressive de la RN17 et la RN6), plusieurs véhicules se détournent de la RN 17 pour aller vers les zones Nord via l'autoroute.

10.1.2.1.2 Volumes de trafic au niveau des intersections avec le réseau existant

Les volumes du trafic directionnel, retenues pour ce scénario, au niveau des intersections de l'autoroute avec le réseau existant ont été déterminés pour chaque variante et pour chaque horizon.

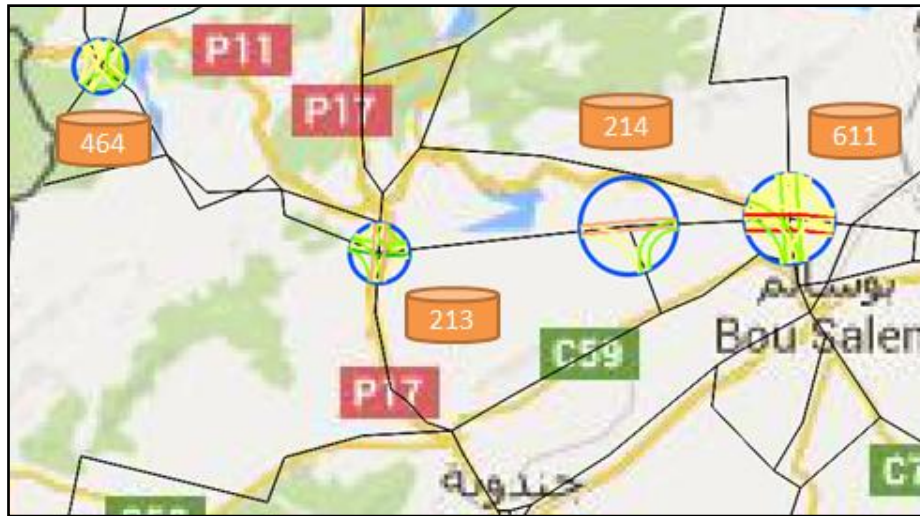
Couloir Nord

Le tracé Nord compte cinq (5) intersections avec le réseau existant, réparties de la manière suivante :

- 1 intersection avec la RR 53 (nœud 611)
- 1 intersection avec une bretelle en liaison avec la RR59 (nœuds 214)
- 1 intersection avec la RN 17 (nœud 213)
- 1 intersection avec la RL 414 (nœud 464)

Les nœuds d'intersection sont notés sur les figures suivantes.

Figure 17. Nœuds d'intersection de la variante Nord de l'autoroute avec le réseau existant (scénario A)



Intersection de RR 53 et RL 381 avec le tronçon autoroutier

Les trafics d'échange entre le réseau structurant et l'autoroute au niveau de ce nœud deviennent très importants, notamment durant la période [2040 -2045], caractérisée par la saturation de plusieurs axes structurants comme la RN 17 et la RN6 de ce fait les flux de trafic se détournent de l'échangeur au niveau de la RN 17 et préfèrent quitter l'autoroute au niveau de cette intersection.

Intersection avec une bretelle en liaison avec la RR59 avec le tronçon autoroutier

Le trafic d'échange entre la bretelle en liaison avec la RR59 et l'autoroute au niveau de ce nœud est important. Ce trafic atteint environ 25 000 uvp.jour en 2045 dans le sens en provenance et en direction de Tunis.

Intersection de RN 17 avec le tronçon autoroutier

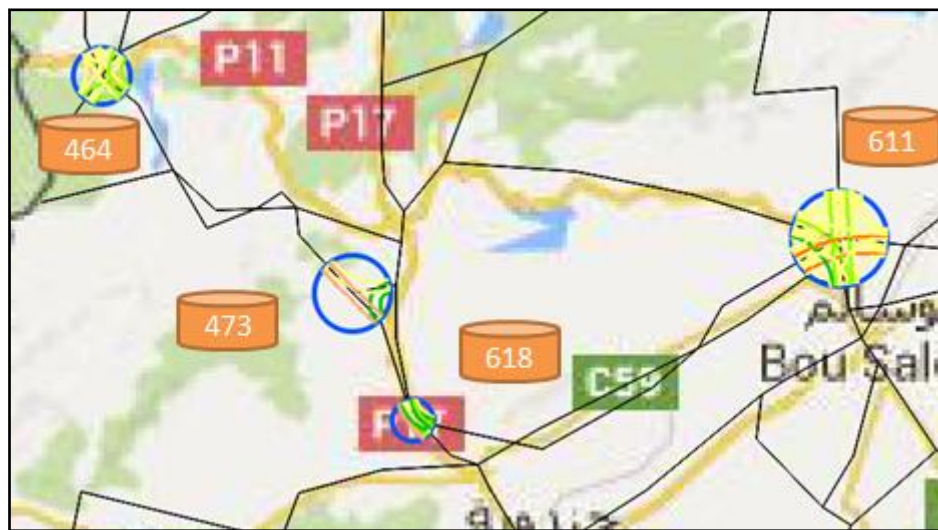
Le trafic d'échange entre l'autoroute et la RL 414 en direction de "Hammam Bourguiba", devient plus important au cours de la période [2035-2045], caractérisée par la saturation progressive du réseau structurant, en particulier la RN6 et la RN17.

Couloir Sud

Le tracé Sud compte quatre (4) intersections avec le réseau existant, réparties de la manière suivante:

- 1 intersection avec la RR 53 (nœuds 611)
- 1 intersection avec la RN 17 (nœud 618) (section sud)
- 1 intersection avec la RN 17 (nœud 473) (section nord)
- 1 intersection avec la RL 414 (nœud 464)

Les nœuds d'intersection sont indiqués sur les figures suivantes.

Figure 18. Nœuds d'intersection de la variante Sud de l'autoroute avec le réseau existant (scénario A)**Intersection de RR 53 et RL 381 avec le tronçon autoroutier**

Le constat est similaire à celui observé pour la variante Nord. Les trafics d'échange entre le réseau structurant et l'autoroute au niveau de ce nœud deviennent très importants uniquement durant la période [2040 -2045]. Cette période est caractérisée par la saturation de plusieurs axes structurant comme la RN 17 et la RN6.

Intersection de RN 17 avec le tronçon autoroutier (section sud)

Au niveau de l'intersection de la variante Sud de l'autoroute avec la RN17, le trafic d'échange en direction de Jendouba est estimé à environ 15 670 uvp./jour en 2045.

Intersection de RN 17 avec le tronçon autoroutier (section nord)

La création d'une deuxième connexion (nœud 473) du couloir Sud avec la section Nord de la RN17 a pour impact de soulager le trafic sur le tronçon de la RN17, parallèle au couloir Sud.

Intersection de RL 414 avec le tronçon autoroutier

De manière similaire pour le couloir nord, le trafic d'échange entre l'autoroute et la RL 414 en direction de "Hammam Bourguiba" devient plus important durant la période [2035-2045], caractérisée par la saturation progressive du réseau structurant, en particulier la RN6 et la RN17.

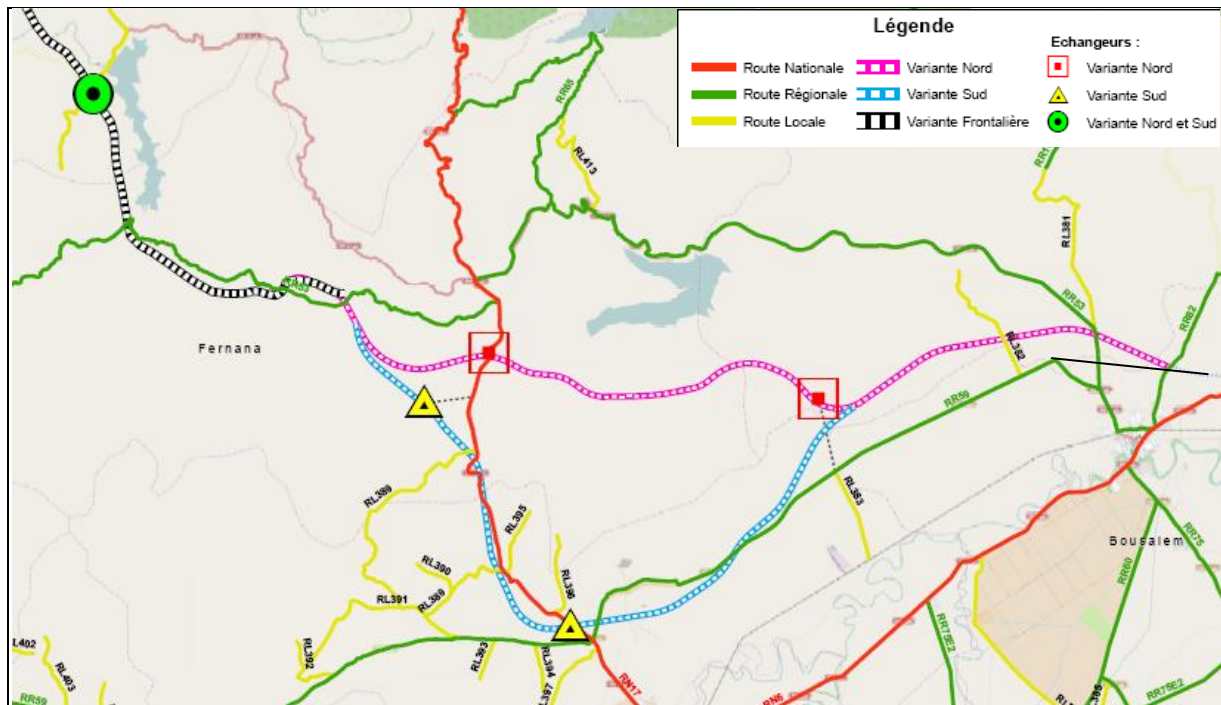
Scénario B : 2^{ème} variante de choix d'intersections

Faisant suite à la simulation de trafic du scénario A, le scénario B est réalisé sans tenir compte de l'intersection de l'autoroute avec la RR59 afin d'observer sa répercussions sur le trafic. La simulation de trafic est réalisée en prenant en compte uniquement les intersections suivantes:

- Le tracé Nord compte trois (3) intersections avec le réseau existant, réparties de la manière suivante:
 - 1 intersection avec une bretelle en liaison avec la RR59
 - 1 intersection avec la RN 17

- 1 intersection avec la RL 414
- Le tracé Sud compte trois (3) intersections avec le réseau existant, réparties de la manière suivante:
 - 1 intersection avec la RN 17 (section sud)
 - 1 intersection avec une bretelle en liaison avec la RN 17 (section nord)
 - 1 intersection avec la RL 414

Figure 19. Tracés des variantes Nord et Sud de l'autoroute Bousalem frontière Algérienne avec les intersections retenus (Scénario B)



10.1.2.1.3 Volumes de trafic au niveau des deux couloirs de tracé autoroutier

Suite au non maintien de l'intersection de l'autoroute avec la RR53 et à la saturation progressive de la RN 17 et la RN6, les véhicules dans le sens Est (Tunis, Bèjja) vers le Nord (Tabarka, Ain Draham) ainsi qu'une partie du trafic reliant Bousalem et les zones sud vers Jendouba et l'Algérie sont détournés sur les routes locales. Le trafic moyen est inférieur à celui observé par le scénario A sur les deux variantes de l'autoroute (12 % de moins en moyenne que le scénario A).

On observe une croissance moyenne du trafic variant de 6,8 % (couloir Nord) à 7,8 % par an (couloir Sud). En 2045, la demande de transport au niveau de la variante Sud dépasse celle au niveau de la variante Nord à partir de 2035 d'environ 5 %, elle atteindra 25 280 uvp.jour pour le couloir Nord et 26 611 uvp.jour pour le couloir Sud par sens de circulation.

Ci-dessous la projection des trafics VL et PL par section pour l'année 2045 :

Figure 20. Trafic (VL, PL) les deux sens de circulation confondus par section en 2045 - Variante Nord de l'autoroute (Scénario B)

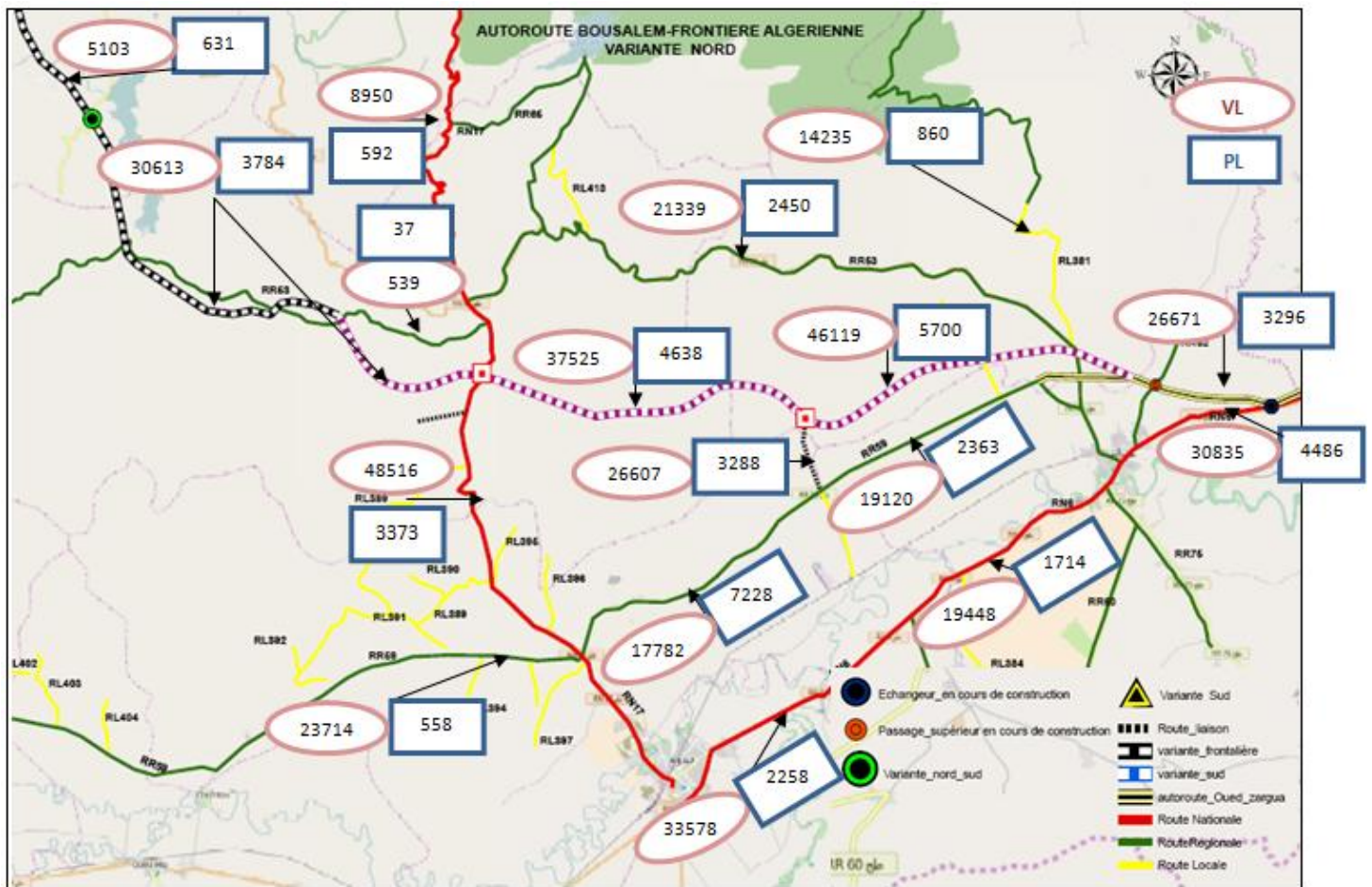
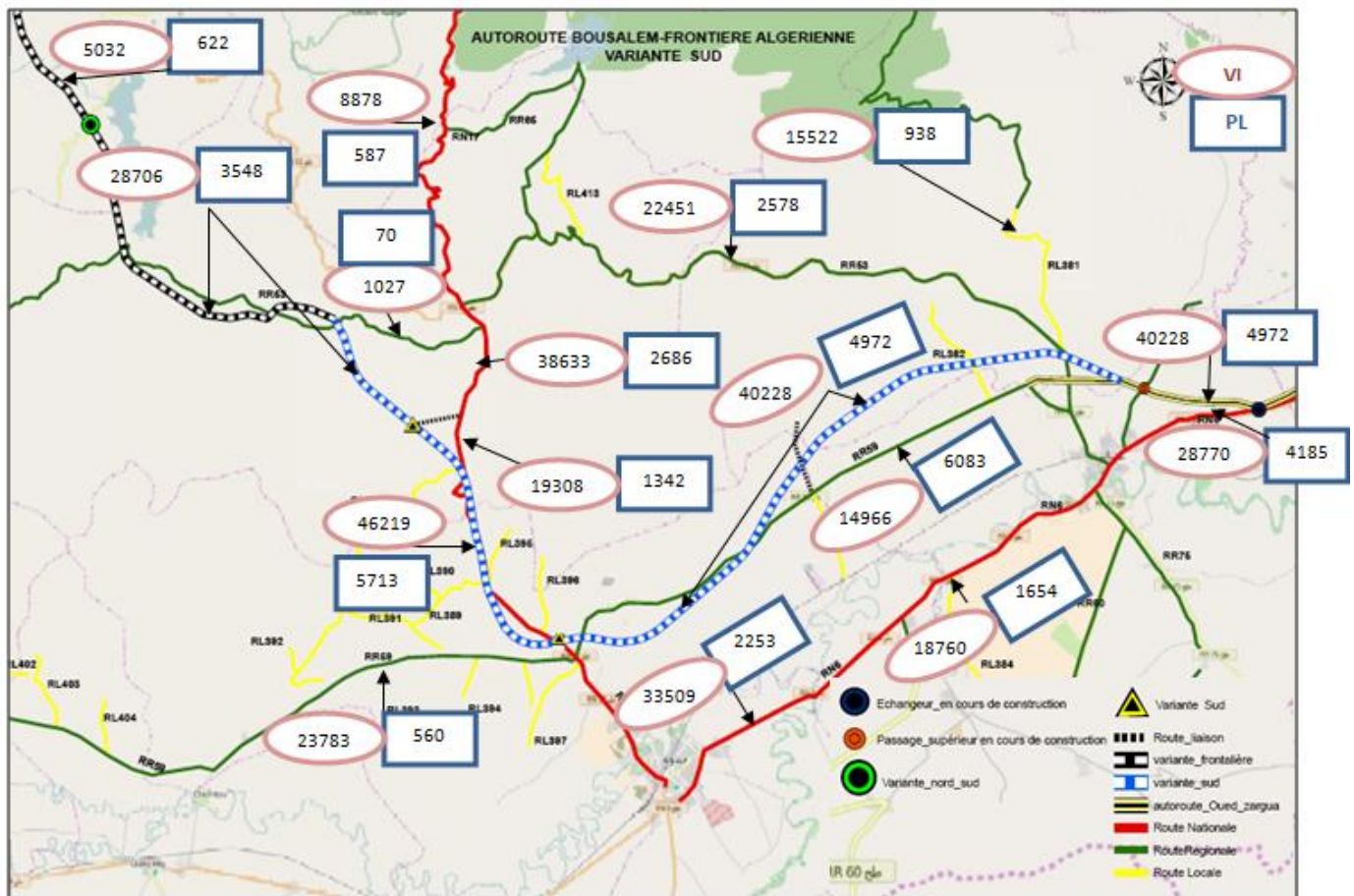


Figure 21. Trafic (VL, PL) les deux sens de circulation confondus par section en 2045 - Variante Sud de l'autoroute (Scénario B)



Le constat est similaire à celui observé pour le scénario A. Il est recommandé de doubler quelques tronçons de la RN6 et la RN17 en vue de garantir un meilleur niveau de service. Il s'agit des sections suivantes :

- Bousalem - Jendouba sur la RN6
- Jendouba - Fernana sur la RN17

10.1.2.1.4 Volumes de trafic au niveau des intersections avec le réseau existant

Les volumes du trafic directionnel, retenues pour ce deuxième scénario, au niveau des intersections de l'autoroute avec le réseau existant ont été déterminés pour chaque variante et pour chaque horizon.

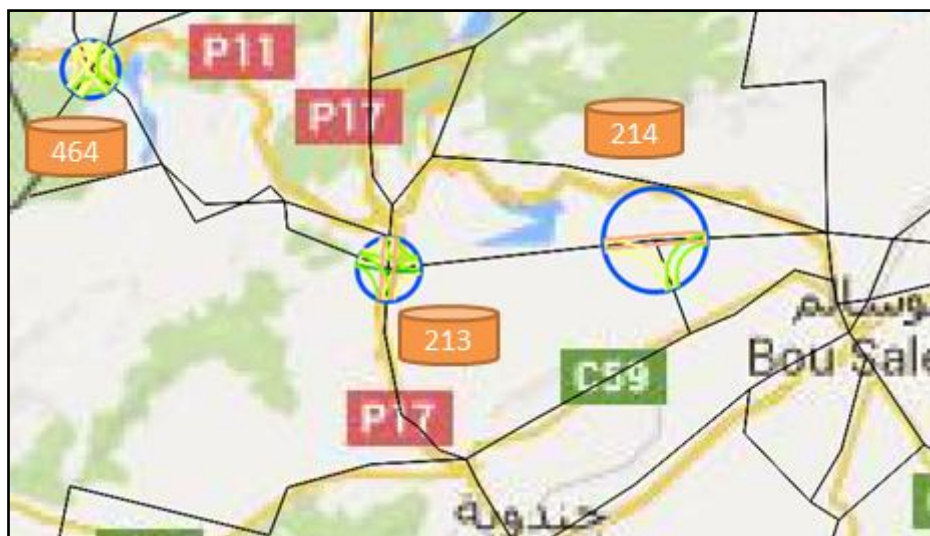
Couloir Nord

Le tracé Nord compte trois (3) intersections avec le réseau existant, réparties de la manière suivante:

- 1 intersection avec une bretelle en liaison avec la RR59 (nœuds 214)
- 1 intersection avec la RN 17 (nœud 213)
- 1 intersection avec la RL 414 (nœud 464)

Les nœuds d'intersection sont indiqués sur les figures suivantes.

Figure 22. Nœuds d'intersection de la variante Nord de l'autoroute avec le réseau existant (scénario B)



De manière similaire que le scénario A, le trafic d'échange entre l'autoroute et la RL 414 en direction de "Hamam Bourguiba" devient plus important durant l'intervalle [2035-2045], période caractérisée par la saturation progressive du réseau structurant en particulier la RN6 et la RN17. Les véhicules se détournent de la RN17 pour aller vers les zones Nord via l'autoroute.

Couloir Sud

Le tracé Sud compte trois (3) intersections avec le réseau existant, réparties de la manière suivante:

- 1 intersection avec la RN 17 (nœud 618) (section sud)
- 1 intersection avec la RN 17 (nœud 473) (section nord)
- 1 intersection avec la RL 414 (nœud 464)

Les nœuds d'intersection sont indiqués sur les figures suivantes.

Figure 23. Nœuds d'intersection de la variante Sud de l'autoroute avec le réseau existant (scénario B)



Intersection de RN 17 avec le tronçon autoroutier (section sud)

Le trafic d'échange est très important entre l'autoroute et Jendouba.

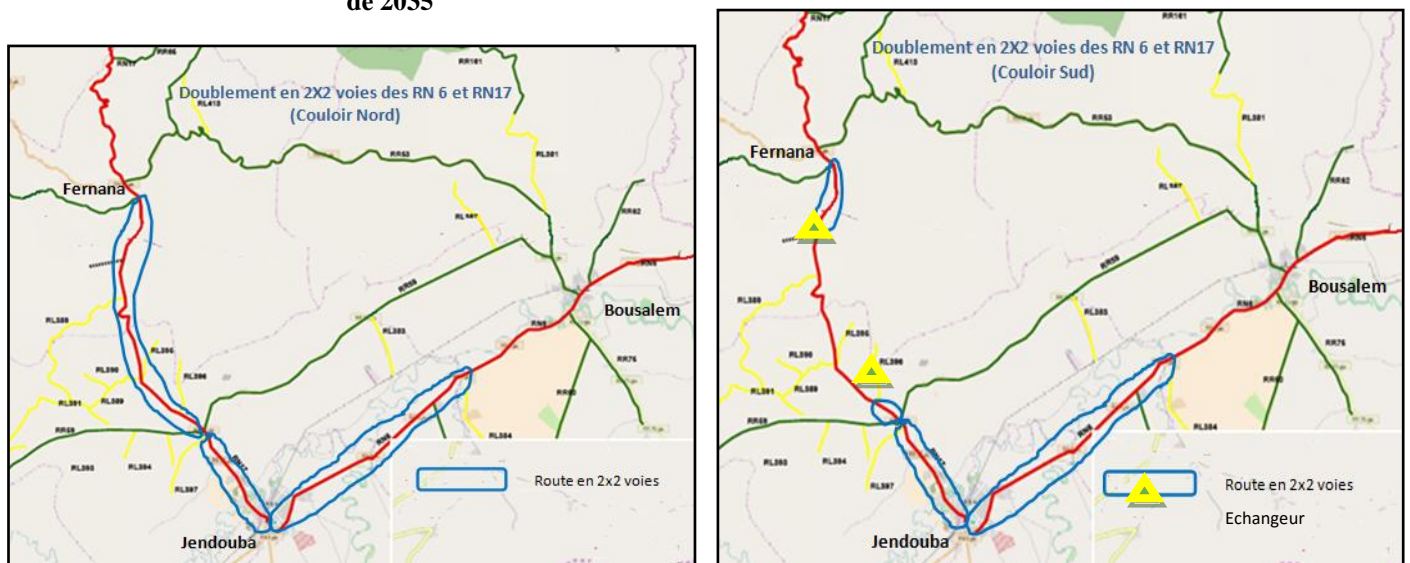
Nœud 473: intersection de RN 17 avec le tronçon autoroutier (section nord)

10.1.3 Impact du dédoublement en 2X2 voies de la RN6 et la RN17 en 2035

Les calculs de la demande de transport sur les couloirs Nord et Sud sont évalués sur la période 2025 – 2045 sur la base de la configuration du scénario B (3 échangeurs pour chaque couloir autoroutier). Ils retiennent l'hypothèse suivante : le dédoublement en 2*2 voies de quelques sections d'axes routiers congestionnées à partir de l'horizon 2035. Il s'agit des tronçons suivants :

- RN 6 : section Embranchement R75E2 - Jendouba : environ 10 km
- RN17 :
 - lorsqu'il s'agit du couloir Nord : Section Jendouba – Fernana (environ 20 km)
 - lorsqu'il s'agit du couloir Sud : environ 10 km cumulés de part et d'autre des deux échangeurs avec la RN17

Figure 24. Test 1 - Dédoublement en 2X2 voies de certains tronçons routiers de la RN6 et la RN17 à partir de 2035



Le volume autoroutier en UVP des deux couloirs, représentant la moyenne des sommes des flux par section homogène, pondérée par leurs linéaires respectifs, est fourni par le tableau suivant

Tableau 4. TJMA en UVP.jour par sens de circulation sur les couloirs Nord et Sud - Scénario B - Test 1 (2045)

Trafic en UVP	Sans dédoublement	Avec dédoublement
Couloir Nord	25 280	19 714
Couloir Sud	26 611	21 294

Suite à la mise en 2*2 voies des axes RN6 et RN17, le trafic est devenu plus fluide au niveau de la zone d'influence directe du projet et les temps de parcours entre Bousalem - Jendouba et Fernana - Jendouba se sont réduits. Une partie des véhicules se détournent de l'autoroute payante à l'avantage du réseau existant.

Les flux VL et PL par section pour l'année 2045 sont présentés dans les deux figures suivantes.

Figure 25. Test 1. Trafic (VL, PL) les deux sens de circulation confondus par section en 2045 - Variante Nord de l'autoroute (Scénario B)

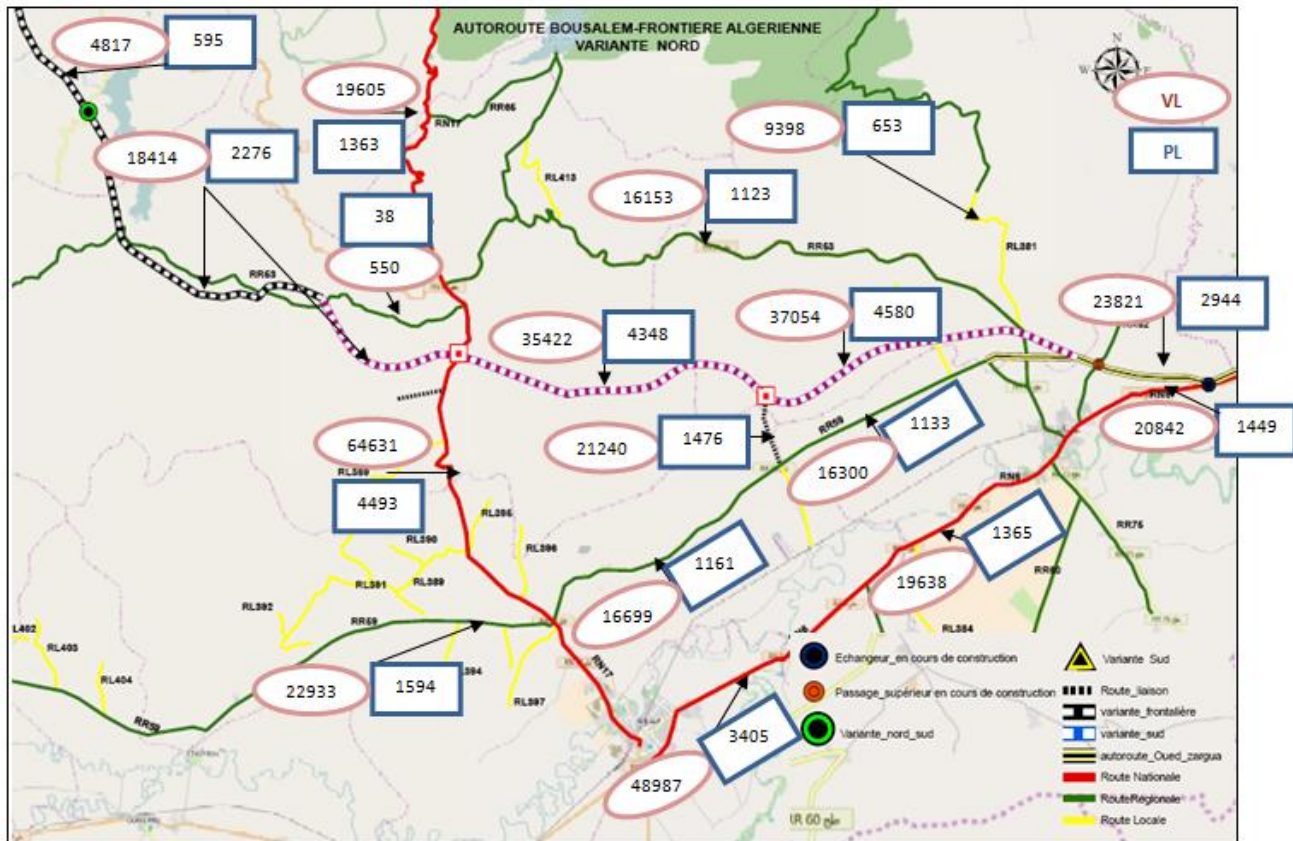
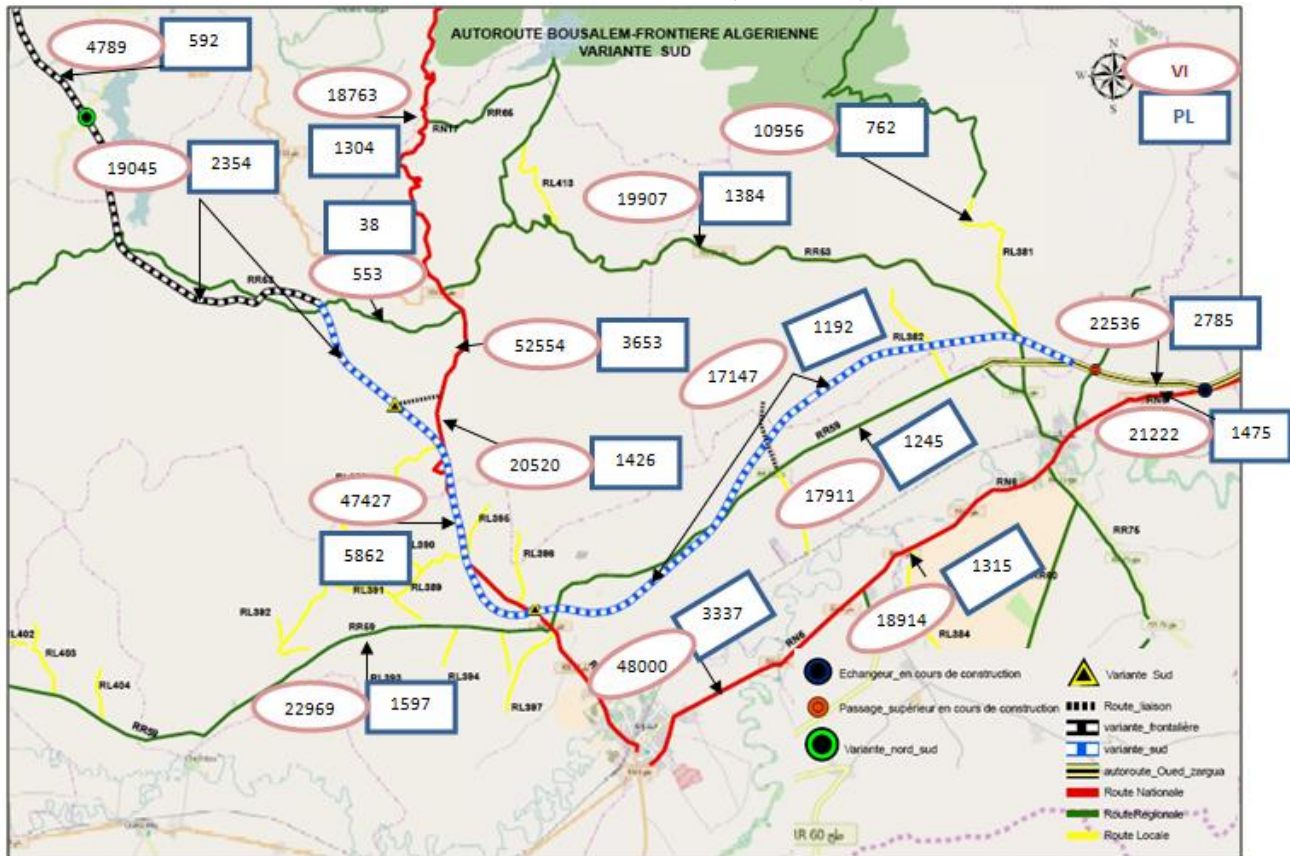


Figure 26. Test 1. Trafic (VL, PL) les deux sens de circulation confondus par section en 2045 - Variante Sud de l'autoroute (Scénario B)



10.1.4 Conclusion

1. Quel que soit le couloir de tracé autoroutier et le scénario de choix d'intersection simulé, il est recommandé le dédoublement en 2*2 voies, à partir de 2035, des tronçons routiers suivants de la RN6 et la RN17 :
 - RN 6 : section Embranchement R75E2 - Jendouba : environ 10 km
 - RN17 :
 - lorsqu'il s'agit du couloir Nord : Section Jendouba – Fernana (environ 20 km)
 - lorsqu'il s'agit du couloir Sud : environ 10 km cumulés de part et d'autre des deux échangeurs avec la RN17
2. Un suivi régulier à partir de 2030 du trafic (sur la RN6 et la RN17) permettra de déterminer l'année du dédoublement relatif à ces deux tronçons.
3. Si cette action est réalisée, la construction d'un échangeur avec la RR53 (scénario A) n'est pas nécessaire.
4. Pour assurer la fluidité des échanges entre le tronçon autoroutier et le réseau routier structurant, le couloir Nord comptera 3 échangeurs : (i) une connexion avec une bretelle en liaison avec la RR59, (ii) une intersection avec la RN17 et une (iii) intersection avec la RL414. Pour le couloir Sud, 3 échangeurs seront également retenus : (i) intersection avec la RN17 (section sud), (ii) connexion avec une bretelle en liaison avec la RN17 (section nord) et (iii) intersection avec la

RL414. Leur date de mise en service est la même que la date de mise en service du tronçon autoroutier.

5. En 2045, le trafic journalier annuel moyen des deux couloirs, les deux sens de circulation confondus, est estimé à :
 - 52 000 uvp.j, avec un réseau structurant similaire à celui de l'année 2012. Le taux de croissance annuel moyen est compris entre 6,8 % et 7,8 %, selon le couloir,
 - 40 000 uvp.j, en cas du dédoublement en 2*2 voies (en 2035) des deux tronçons précédents de la RN6 et la RN17. Le taux de croissance annuel moyen est compris entre 5,6 % et 6,7 %, selon le couloir.
 - 14 000 uvp.j avec des paramètres d'évolution socio-économiques pessimistes. Le taux de croissance annuel moyen est compris entre 3,1 % et 4,3 %, selon le couloir.
6. A la mise en service de l'aménagement et jusqu'à l'horizon 2045, le nombre de voies à retenir est de 2 par sens, en liaison avec la spécificité du niveau de service requis pour un axe autoroutier, en termes de réduction de temps de parcours, de confort et de sécurité. il est recommandé d'adopter un profil en travers adapté aux conditions de circulation en 2 x 3 voies, en procédant à l'acquisition de terrains et en réalisant les travaux préparatoires sur le TPC.

11 MESURES ENVIRONNEMENTALES D'ATTENUATION ET DE BONIFICATION

Dans ce chapitre, on tâchera de définir de manière opérationnelle les mesures environnementales et sociales à mettre en œuvre pour prévenir, atténuer, réparer ou compenser les conséquences dommageables du projet sur l'environnement humain et naturel.

11.1 MESURES A METTRE EN ŒUVRE EN PHASE CHANTIER

L'expérience montre que d'une façon générale, la prise en compte de l'environnement lors de la phase chantier d'un projet, par quelques dispositions, parfois simples, concernant la conduite et l'ordonnancement des travaux, permet de réduire considérablement les nuisances.

En général, les moyens à mettre en place pour limiter les impacts négatifs de travaux sur l'environnement consistent :

- à mieux gérer le chantier et ses impacts sur l'environnement (eau, sol, déchets, sécurité, etc.);
- à faire preuve de rigueur dans la rédaction des cahiers des charges et la réalisation des travaux ;
- à s'assurer les services d'un responsable sensibilisé aux problèmes d'environnement et aux contraintes de chantier,
- A mettre en œuvre les mesures prescrites dans le Plan de Gestion Environnementale et Sociale (PGES).

11.1.1 Mesures générales d'exécution

11.1.1.1 Choix et engagement des entrepreneurs

Lors du choix des entrepreneurs, le Maître d'Ouvrage est tenu d'imposer des critères sélectifs en faveur de ceux qui fourniront les prestations les plus respectueuses de l'environnement. Ainsi, le Dossiers d'Appel d'Offres pour l'exécution des travaux de construction et d'aménagement doit contenir des clauses environnementales permettant de garantir l'engagement de l'entrepreneur au respect et la protection de l'environnement durant la phase des travaux jusqu'à la réception définitive. Ces clauses devront être contractuelles et devront faire l'objet d'un suivi rigoureux.

Les entrepreneurs soumissionnaires seront appelés à:

- Présenter dans leurs offres une proposition du programme de mise en œuvre du PGES et des travaux de remise en état des lieux une fois les travaux sont achevés ;
- Intégrer le budget alloué à la mise en œuvre des mesures environnementales dans le budget global des travaux ;
- Intégrer dans l'équipe de chantier, un responsable environnementaliste chargé de l'application du Plan de Gestion Environnementale et Sociale (PGES) ;
- S'engager à effectuer l'entretien courant des ouvrages réalisés et de remédier aux impacts négatifs qui seraient constatés ;

- Etablir un plan d'organisation du chantier, notamment en matière de sécurité, d'hygiène et gestion des déchets.

Il est utile de préciser que ces recommandations ne sont pas limitatives et que toutes les initiatives sont à considérer en vue d'éviter le moindre problème qui ne pourrait qu'avoir des conséquences négatives sur la bonne marche du chantier.

11.1.1.2 Mesures relatives à l'organisation et à la conduite des travaux

La bonne gestion des travaux et une organisation de la circulation des engins du chantier peuvent limiter les incidences sur l'environnement. Les aires d'installation retenues par l'entrepreneur devront être aménagées, délimitées et interdites d'accès au public. De même, les aires destinées au stockage ou à la manipulation de produits dangereux ou polluants et les aires de devront être aménagées de manière à répondre aux conditions de sécurité tout en assurant une protection efficace au milieu avoisinant.

L'Entreprise élaborera un plan de gestion de la circulation et de gestion des déchets solides et liquides qui seront soumis au Maître d'Ouvrage pour approbation. Par ailleurs, il s'engage à assurer sur le site du chantier :

- Le suivi médical du personnel de chantier ;
- La sensibilisation des ouvriers des chantiers sur le danger des MST/SIDA ;
- La dotation de la main d'œuvre d'équipement individuel de protection: masque anti-poussière, anti-gaz, gants, bottes, casques, etc.
- Le règlement régissant la vie à l'intérieur du campement doit prévoir des mesures destinées à protéger l'environnement (interdiction de brûler, interdiction de rejet des eaux usées etc.). Ce règlement devra être affiché à des endroits visibles.

11.1.2 Mesures de préservation de l'environnement naturel

11.1.2.1 Mesures de conservation des eaux et du sol

Il s'agit principalement des mesures relatives à la protection des sols, des eaux de surface et des nappes aquifères ainsi que celles relatives à la protection des besoins des populations locales en eaux potables. D'une façon générale, ces mesures impliquent que les entreprises doivent :

- Prendre toutes les précautions possibles lors du ravitaillement des engins du chantier et lors de la manipulation des produits nocifs pour éviter tout déversement accidentelle
- Ne pas ravitailler les véhicules ou la machinerie à proximité des écoulements naturels.
- Aménager des aires imperméables pour l'entretien des engins équipées de rigoles pour la récupération des éventuelles fuites et de bac à sable (comme absorbant).
- Prévoir des mesures correctives immédiates en cas de contamination accidentelle telles que l'utilisation des produits absorbants, limitation de la zone atteinte ou le décapage de la couche du sol touchée.

- Stabiliser le sol mécaniquement pour réduire le potentiel d'érosion.
- Optimiser les tracés d'accès pour éviter le maximum possible les abattages d'arbres
- Réglementer de façon stricte la circulation de machinerie lourde, restreindre le nombre de voies de circulation et limiter le déplacement de la machinerie aux aires de travail et aux accès balisés.

De plus, l'entrepreneur doit veiller aux vidanges périodiques des fosses septiques du chantier. Les eaux usées doivent impérativement être acheminé vers la Step la plus proche. En cas où l'entreprise décide de faire appel au service d'un sous-traitant, elle doit stipuler clairement dans le contrat la zone de dépôt des eaux usées.

11.1.2.2 Mesures de préservation de la qualité de l'air et l'ambiance sonore

Les équipements du chantier doivent être entretenus et maintenus en bon état de fonctionnement, en vue d'éviter toute émission exagérée de polluants atmosphériques. Toute émission anormale de gaz d'échappement constatée par la population ou la cellule de coordination doit être notifiée à l'entrepreneur, qui sera alors tenu de réparer ou de remplacer dans les meilleurs délais l'équipement source de nuisance.

Par ailleurs, Les entrepreneurs devront, en période sèche et en fonction des disponibilités en eau, arroser régulièrement les pistes empruntées par leurs engins lors de l'aménagement des pistes d'accès pour éviter la propagation des poussières, plus particulièrement dans les traversées de villages. Les bennes des camions de transports des matériaux meubles comme le sable, devront, par ailleurs, être couvertes par une bâche.

Pour atténuer les impacts de la poussière, des gaz d'échappement des engins, des bruits et des vibrations, les mesures à mettre en place seront :

- Limitation de vitesse à 40km/h :
- Contrôle et la visite technique régulière des moteurs et leur entretien régulier;
- Procéder au changement régulier et systématique de tous les éléments filtrants des engins et véhicules utilisés suivant les règles des constructeurs ;
- Eteindre systématiquement les moteurs des engins, camions et véhicules lorsqu'ils sont à l'arrêt.
- Respect des normes de travail sur les chantiers;
- Choix raisonné des lieux de stockage des déchets de débroussaillage,
- Interdiction de l'utilisation des avertisseurs.

11.1.2.3 Remise en état des lieux à la fin des travaux

Durant la phase de construction, l'entrepreneur est tenue de remettre un plan de gestion des déchets qui définit les modalités à mettre en œuvre pour la collecte, la relève et l'entreposage des déchets et ce par nature de déchets produit. Le plan devra faire apparaître clairement les actions de minimisation et de valorisation des déchets que l'entreprise compte mettre en œuvre.

L'entrepreneur devra, sous le contrôle du Maître d'œuvre, nettoyer et éliminer à ses frais toute forme de pollution due à ses activités.

11.1.3 Mesures de protection de l'environnement humain

11.1.3.1 Contrôle sanitaire

Les chantiers sont également des vecteurs privilégiés de la sensibilisation et de la prévention contre les maladies transmissibles sexuellement (MST). Il convient comme mesure additive de mettre un programme de lutte contre les IST/SIDA.

Les principales actions de ce programme sont de:

- Tenir des campagnes de dépistage
- Organiser des ateliers et des réunions de sensibilisations
- Actualiser et émettre des pancartes et des dépliants explicatifs
- Mettre en place un réseau de distribution de préservatifs

Le Maître d'Ouvrage pourrait recruter une ONG pour renforcer les campagnes de sensibilisation aux populations riveraines afin de limiter les incidences du projet sur la santé.

En ce qui concerne la prévention des maladies d'origine hydrique, le suivi des règles d'hygiène et de salubrité est nécessaire. Les exigences suivantes doivent être respectées :

- Installation et suivi des règles d'hygiène et de salubrité au niveau du chantier
- Mettre en place une infirmerie:
- Contrôle régulier de l'état de santé des ouvriers et des conditions d'hygiène,
- Dépistage des maladies épidémiologiques.
- Fournir les outils des premiers secours pour les ouvriers blessés ou malades.

11.1.3.2 Sécurité humaine

L'entrepreneur est tenu de fournir un plan de gestion de la circulation dans le chantier et de l'actualiser au fur et à mesure de l'avancement des travaux. Il est recommandé de :

- Implanter des signalisations de danger dans la zone des travaux, les aires de stockage des matériaux et les équipements du chantier (chute de matériaux, zones de ravins, etc.)
- Interdire l'accès du public aux aires du chantier
- Clôturer la zone de travaux et les sites de stockage
- Contrôler l'accès aux lieux de stockage des produits dangereux (hydrocarbures, additifs, produits chimiques, etc.),
- Munir les personnes autorisées à accéder au chantier et surtout les aires potentiellement dangereuses par des badges d'accès de manière à contrôler les accès.
- Mener une campagne de communication et de sensibilisation avant les travaux

Afin de garantir la sécurité des ouvriers, l'entrepreneur est tenu d'équiper tous les ouvriers d'EPI. Le port des Equipements de Protection Individuelle (EPI) est un impératif. Dans le cas où il est nécessaire de programmer les travaux pendant la nuit, des gilets de haute visibilité doivent être également fournis en plus de l'éclairage adéquat des zones de travaux.

11.2 MESURES A METTRE EN ŒUVRE EN PHASE EXPLOITATION

11.2.1 Mesures de préservation de l'environnement naturel

Dans le but de préserver les ressources en eau et le sol, il est nécessaire d'assurer un contrôle continu de système d'évacuation et de rejet des polluants liquides et solides. Afin de pallier à ces risques, un système de monitoring de la qualité des eaux doit être mis en place et rigoureusement suivi afin de déceler les moindres dépassements et agir en conséquent.

Dans le cadre de préservation du sol et les ressources en eau, le Maître d'Ouvrage doit se conformer à :

- Entretien des canalisations d'évacuation des eaux usées pour éviter tout déversement ou débordement
- Optimiser les moyens humains et matériels de collecte et de gestion de déchets
- Mettre en place un mécanisme de suivi participatif de la performance des services de collecte et de transfert des déchets
- Informer et former la population sur la gestion des risques des maladies hydriques
- Sensibiliser la population pour une bonne gestion et utilisation des eaux
- S'assurer que les déchets collectés seront acheminés vers une décharge contrôlée conformément à la réglementation
- Activer la législation nationale et son application, en termes de gestion des déchets solides et liquides et déterminer les seuils de tolérance.
- Assurer un suivi périodique du processus de traitement des eaux usées avec le contrôle continu des paramètres physicochimiques
- Réaliser des campagnes de mesure des effluents

11.2.2 Mesures de préservation de l'environnement humain

Dès la conception technique du projet, plusieurs actions ont été conçues dans le but de renforcer la salubrité et la sécurité humaine :

- Eliminer les raccordements indésirables
- S'assurer de l'entretien des exutoires des caniveaux pour minimiser la prolifération de vecteurs de maladies
- Prévoir des dispositifs de déviation pour maintenir la circulation des biens et des personnes
- Prendre des précautions nécessaires pour éviter les déversements accidentels
- Prévoir un budget d'entretien
- Sensibiliser-former la population sur les bonnes pratiques/comportements de salubrité et d'hygiène
- Suivre, évaluer et contrôler l'impact sanitaire et environnemental

11.3 MESURES EN PHASE D'ENTRETIEN

Pour assurer le bon fonctionnement et la durabilité des ouvrages, la mise en place d'un périmètre de protection des points d'eau est inéluctable. Ce périmètre de protection est destiné à éviter la contamination des forages.

On distingue un périmètre rapproché et un périmètre éloigné :

- Le périmètre rapproché est destiné à éviter toute contamination directe des eaux, dans un espace de 100 m autour du point d'eau. Il fera l'objet de mesures de surveillance pour éviter les mauvaises pratiques par la population (lavage de linge, nettoyage de véhicules, déversement d'eaux usées...)

- Le périmètre éloigné concerne les activités interdites ou réglementée dans un espace suffisant autour du point d'eau, fixé à 300 m, notamment les activités humaines polluantes (rejets industriels, etc.) ;
- Des actions de sensibilisation des Communautés et comités de suivi et gestion des points d'eau seront assurées pour les impliquer dans la surveillance des périmètres et dans l'application éventuelle des mesures d'expulsion, en cas d'infraction.

12 ANALYSE MULTICRITERES ET CHOIX DE LA VARIANTE OPTIMALE

12.1 DEFINITION DES VARIANTES

L'analyse et la configuration des couloirs pré-identifiés lors de la précédente phase préliminaire, sur la base des données cartographiques d'analyse et de hiérarchisation des contraintes, a fait ressortir quatre points de "passage obligé" :

- Un point A correspondant à l'origine du projet (à 5 Km environ avant la fin de l'autoroute Oued Zarga - Bousalem) ;
- Un point D correspondant au village Ain El Baya ;
- Un point E situé vers la fin du Barrage Barbara ;
- Et un point F correspondant à la fin du projet au niveau de l'autoroute Est/Ouest Algérienne.

Ceci nous a amené à distinguer trois principales sections à l'intérieur desquelles des variantes de tracé plausibles peuvent s'inscrire. Ces sections se présentent comme suit :

- Une Section 1 localisée entre l'origine du projet situé à 5 Km environ avant la fin de l'autoroute actuelle Oued Zarga - Bousalem et le village Ain El Baya (noeud D) et dans laquelle, deux couloirs principaux ont été mis en évidence : un couloir Nord et un couloir Sud.
- Une Section 2 allant du village Ain El Baya (noeud D) jusqu'à la fin du Barrage Barbara (noeud E) caractérisée par un relief très difficile et comprenant un seul couloir assez large.
- Et une Section 3 allant de la fin du barrage Barbara (noeud E) jusqu'à la fin du projet au niveau de l'autoroute Est/Ouest Algérienne (noeud F) comprenant également un « couloir » relativement étroit.

Les prises de vues aériennes, la restitution des plans à l'échelle 1/5000ème, les investigations géologiques, géotechniques et géophysiques, réalisées pendant cette phase d'APS, ont permis au Consultant d'actualiser les principales contraintes et d'affiner les variantes de tracé proposées par les études préliminaires.

Pour les besoins de l'analyse multicritères de cette phase d'APS, le Consultant a considéré trois sections principales à l'intérieur desquelles des sous-variantes de tracé sont inscrites :

- Section n°1 : comprenant une seule variante de tracé prenant origine à 5 Km environ avant la fin de l'autoroute Oued Zarga - Bousalem. Il s'agit du Lot n°1: Bousalem – Bulla Regia (28 Km).
- Section n°2 : localisée entre Bulla Regia (noeud B) et Ain El Baya (noeud D) et dans laquelle, deux tracés principaux ont été mis en évidence qui seront analysés et comparés pour dégager la variante optimale :
 - Un tracé Nord d'un linéaire de 26,5 Km constitué par : (i) le Lot n°2 nord : Bulla Regia – Jendouba (16,5 Km) et (ii) le Lot n°3 nord Jendouba – Ain El Baya (10 Km) ;
 - Un tracé Sud d'un linéaire de 36 Km constitué par : (i) le Lot n°2 sud : Bulla Regia – Jendouba (26 Km) et (ii) le Lot n°3 sud Jendouba – Ain El Baya (10 Km).
- Section n°3 : localisée entre Ain El Baya (noeud D) et la Frontière Algérienne (Noeud F) et dans laquelle, deux sous-sections ont été mises en évidence :

- Sous-section 3.1 : localisée entre Ain El Baya (nœud D) et le point de rencontre (nœud E) des deux variantes Tunnel avec la variante de surface qui seront analysés et comparés pour dégager la variante optimale ;
- Sous-section 3.2 : localisée entre le nœud E et la frontière Algérienne (nœud F) et comprenant une seule variante de tracé.

12.2 METHODE DE COMPARAISON MULTICRITERES

12.2.1 Critères de comparaison

La comparaison des variantes ci-avant est menée selon trois critères globaux choisis, décomposés en sous-critères comme suit :

- Le premier critère global se rapporte aux coûts de réalisation des différentes variantes intégrant :
 - Les coûts des travaux de terrassement et d'aménagement, des équipements de protection (ouvrages de soutènement, glissières de sécurité...), des installations et équipements d'éclairage et de signalisation, ainsi que les viaducs et tunnels, et qui traduisent directement la qualité technique du projet supposé atteindre un niveau de sécurité acceptable ; ces coûts incluent les surcoûts d'atténuation des risques et contraintes notamment ceux liés aux caractéristiques géologiques ou aux écoulements des eaux de pluie ;
 - Les coûts de libération des emprises nécessaires à la réalisation du projet, notamment en ce qui concerne l'expropriation et l'indemnisation des occupants et exploitants ;
- Le deuxième critère global se rapporte aux effets engendrés par chaque variante au niveau de l'économie nationale, et ce à travers :
 - L'économie pour les usagers directement liée, d'une part, au temps de parcours et à sa fréquentation toutes catégories de transports confondues, et d'autre part, au niveau de confort et de sécurité traduisant les caractéristiques de chaque variante ;
 - Les coûts d'exploitation et de maintenance des différents ouvrages et équipements ;
 - Et les éventuelles moins-values (tel la perte du potentiel agricole ou autres valeurs).

Il est à préciser que la contribution à la dynamisation des échanges avec l'Algérie, qui pourra être formulée à travers le trafic international induit par l'autoroute constituera un facteur commun à toutes les variantes, et ne sera par conséquent pas considérée comme critère de comparaison. Il en sera d'ailleurs de même pour ce qui concerne la dynamisation de l'économie régionale, choix qui devra se traduire par la volonté de développer les connexions avec le réseau régional ;

- Le troisième critère global, concerne les effets d'ordre environnemental et social, et englobe les sous-critères suivants :
 - Les effets permanents de dégradation des ressources naturelles (notamment des nappes phréatiques, des sols et de la biodiversité) ;
 - Les effets sur le patrimoine culturel et historique.
 - Et les nuisances durables engendrées pour les localités environnantes (pollutions sonore et hydrique, pollution de l'air, sécurité) ;

La prise en compte de ces seuls sous-critères suppose que certaines préoccupations habituelles d'ordre environnemental et qui n'ont pas été retenues, feront l'objet de mesures appropriées

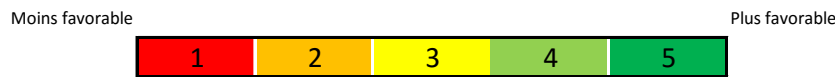
d'atténuation des impacts négatifs prévisibles, et que ces impacts seront réduits pour toutes les variantes à leurs stricts minima acceptables.

De ce fait, et bien que ces effets seront traités dans les études d'impact, nous ne les avons pas retenus comme critères de comparaison parce qu'elles ne permettront pas de départager les variantes. Il s'agit notamment :

- Des impacts négatifs temporaires tels que ceux liés à la période de réalisation des travaux ;
- Ainsi que des effets paysagers, à la fois en ce qui concerne la qualité esthétique des ouvrages divers (tunnels, ponts et ouvrages divers) et de leur intégration dans le paysage naturel de la région traversée.

Les critères et sous-critères sont présentés sous la forme d'un tableau récapitulatif l'analyse qualitative des différentes variantes.

Le résultat de l'analyse qualitative des sous-critères est ensuite traduit sur une échelle de couleur de cinq niveaux, du meilleur en vert (5), au moins bon en rouge (1).



Les notes correspondantes sont ensuite reportées dans le tableau.

Tableau 5: Echelle de notation des variantes

Critères	Moins favorable				Plus favorable
Sous-critères (S/C)	1	2	3	4	5
Coûts					
Coûts des travaux	Coût de base +31% ou plus	Coût de base +21% à +30%	Coût de base +11% à +20%	Coût de base +1% à +10%	Le moins cher (coût de base ou de référence)
Coûts de libération des sols	Coût de base +31% ou plus	Coût de base +21% à +30%	Coût de base +11% à +20%	Coût de base +1% à +10%	Le moins cher (coût de base ou de référence)
Effets économiques					
Economie pour les usagers (temps de parcours, confort et sécurité)	Rallongement important du parcours sans amélioration importante des niveaux de confort et de sécurité	Rallongement important du parcours sans amélioration importante du niveau de confort ou de sécurité	Rallongement important du parcours avec amélioration du niveau de confort et de sécurité	Parcours court mais présentant un niveau de confort et/ou sécurité moyen	Le parcours le plus court et présentant un bon niveau de confort et de sécurité
Coûts d'exploitation et d'entretien	Surface de base +61% ou plus	Surface de base +41% à +60%	Surface de base +21% à +40%	Surface de base +1% à +20%	Le moins cher (coût de base ou de référence)
Effet sur le potentiel agricole	Surface de base +61% ou plus	Surface de base +41% à +60%	Surface de base +21% à +40%	Surface de base +1% à +20%	Surface de terres agricoles perdues la moins importante (surface de base ou de référence)
Effets environnementaux					
Effets sur les ressources naturelles	<u>Pollution hydrique directe</u> : Proximité immédiate d'une retenue de barrage ou lac collinaire ou zone d'alimentation et de recharge d'une nappe	<u>Pollution hydrique diffuse</u> : Traversée des périmètres de protection définis dans l'article 121 du code des eaux, coupe partielle de la forêt	Risque de dégradation du potentiel édaphique par érosion et/ou inondation.	Dommmages limitée au couvert végétal dégradé et clairsemé et au réseau hydrographique en raison de sa faible densité	effet insignifiant à cause de la rareté du couvert végétal, absence de réseau hydrographique

Critères	Moins favorable				Plus favorable
Sous-critères (S/C)	1	2	3	4	5
	phréatique, atteinte à la biodiversité: défrichage et traversée d'une forêt, parc ou réserve naturels				
Effets sur le patrimoine culturel et historique	Traversée de sites archéologiques	Traversée de sites archéologiques mineurs	Passage à moins de 300 m d'un monument ou d'un site	Passage à environ 500 m d'un monument ou d'un site	Absence de sites ou monuments
Nuisances pour les établissements humains	Traversée d'agglomérations de plus 2000 hab.	Traversée de localités et groupements	Habitat entre 100 et 300 m	Absence d'habitat à moins de 300 m	Absence d'habitat

12.2.2 Pondération accordée aux critères

Désignons par p_1 , p_2 , p_3 les coefficients de pondération à attribuer respectivement aux trois critères globaux ci-avant. Pour les fixer, nous opérerons de la façon suivante :

- ❑ Nous conviendrons d'abord qu'il faut donner aux effets économiques la plus grande importance, disons environ le double de celle accordée au critère « Coûts de réalisation » ;
- ❑ Nous conviendrons également que le critère « Effets sur l'environnement » sera prépondérant par rapport aux coûts et comparable aux effets sur l'économie ;
- ❑ A l'intérieur du critère « Coûts », le sous-critère « Coûts de libération des sols » aura une moindre importance compte tenu de son poids naturel par rapport à l'ensemble des coûts de réalisation, ceci d'autant plus que la qualité des terres sur le plan agricole est déjà prise en compte au niveau du critère « Economie » ;
- ❑ Au niveau du critère « Economie », c'est le gain pour les usagers qui est considéré comme le plus important pour prendre en compte à la fois les temps de parcours que le confort et la sécurité ;
- ❑ Enfin, pour le critère « Environnement » une plus grande importance est accordée à la fois, à la préservation des ressources naturelles et celle du patrimoine culturel.

Ces différentes considérations concernant les importances relatives des différents critères permettent de dresser le tableau récapitulatif ci-contre :

Critères et sous-critères	Poids accordés aux sous-critères	Poids accordés aux critères globaux
Coûts	100%	20%
<i>Coûts des travaux</i>	90%	18%
<i>Coûts de libération des sols</i>	10%	2%
Effets économiques	100%	44%
<i>Economie pour les usagers</i>	50%	22.5%
<i>Coûts d'exploitation et d'entretien</i>	30%	13.5%
<i>Effet sur le potentiel agricole</i>	20%	9%
Effets environnementaux	100%	35%
<i>Effets sur les ressources naturelles</i>	40%	14%
<i>Effets sur le patrimoine culturel et historique</i>	20%	7%
<i>Nuisances pour les établissements humains</i>	40%	14%
TOTAL		100%

12.2.3 Tests de sensibilité pour la variante optimale

Nous avons testé la sensibilité de ces comparaisons multicritères pour se faire une idée de la stabilité des variantes les mieux classées au cas où on changerait la pondération entre les différents critères. Les hypothèses retenues pour ces tests sont les suivantes :

- Le premier test est basé sur une augmentation de 30% du poids du critère « Coûts » ;
- Le deuxième sur une augmentation de 30% du poids du critère « Effets économiques » ;
- Et le troisième sur une augmentation de 30% du poids du critère « Effets environnementaux ».

La pondération des sous critères pour chaque test de sensibilité est récapitulée par le tableau suivant :

Comparaison multicritères des variantes - Scénario de base et tests de sensibilité					
Critères/Sous-critères	Poids	Base	Test 1	Test 2	Test 3
Coûts	100%	20%	26,0%	15,4%	16,8%
Coûts des travaux	90%	18,0%	23%	14%	15%
Coûts de libération des sols	10%	2,0%	3%	2%	2%
Effets économiques	100%	45%	41,6%	58,5%	37,7%
Economie pour les usagers	50%	22,5%	21%	29%	19%
Coûts d'exploitation et d'entretien	30%	13,5%	12%	18%	11%
Effet sur le potentiel agricole	20%	9,0%	8%	12%	8%
Effets environnementaux	100%	35%	32,4%	26,4%	45,5%
Effets sur les ressources naturelles	40%	14,0%	13%	11%	18%
Effets sur le patrimoine culturel et historique	20%	7,0%	6%	5%	9%
Nuisances pour les établissements humains	40%	14,0%	13%	11%	18%
TOTAL		100%	100%	100%	100%

12.3 ANALYSE ET NOTATION DES VARIANTES

12.3.1 Section 2

Le tableau ci-après récapitule la notation des variantes Nord et Sud de la Section 2, ainsi que le classement qui en résulte, et ce pour les coefficients de pondération considérés comme Option de base. **Ce classement avantage la variante Sud.**

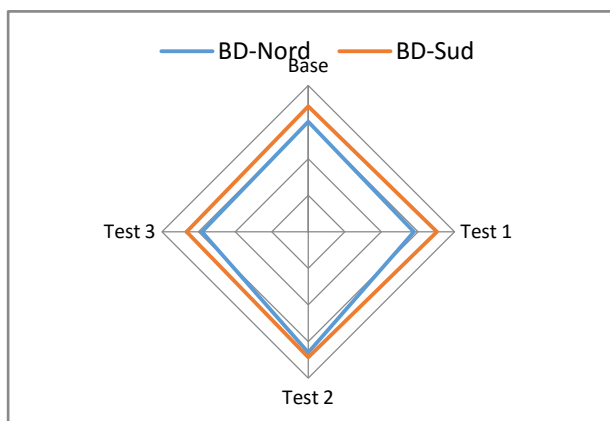
Notation des variantes	Section 2	
Critères / Sous-critères	(B-D)	
	BD-Nord	BD-Sud
Longueur (Km)	25,9	35,7
Coûts		
Coûts des travaux	1	5
Coûts de libération des sols	5	1
Effets économiques		
Economie pour les usagers	4	3
Coûts d'exploitation et d'entretien	4	5
Effet sur le potentiel agricole	5	2

Effets environnementaux

Effets sur les ressources naturelles	3	3
Effets sur le patrimoine culturel et historique	2	2
Nuisances pour les établissements humains	2	3

NOTE TOTALE	58,2292	66,5646
RANG	2	1

Les différents tests de sensibilité confirment le classement obtenu pour les variantes Nord et Sud de la section 2, aussi bien dans la comparaison selon l'option de base que pour les différents tests, comme le montre le diagramme synthétique ci-après.



12.3.2 Section 3

Le tableau ci-après récapitule la notation des variantes Tunnel 1, Tunnel 2 et Surface de la Section 3, ainsi que le classement qui en résulte, et ce pour les coefficients de pondération considérés comme Option de base. **Ce classement avantage la variante Surface.**

Notation des variantes	Section 3		
Critères / Sous-critères	(D-F)		
	T1	T2	Surface
Longueur (Km)	20,5	21,4	25,0
Coûts			
Coûts des travaux	3	1	5
Coûts de libération des sols	5	4	2
Effets économiques			
Economie pour les usagers	4	3	3

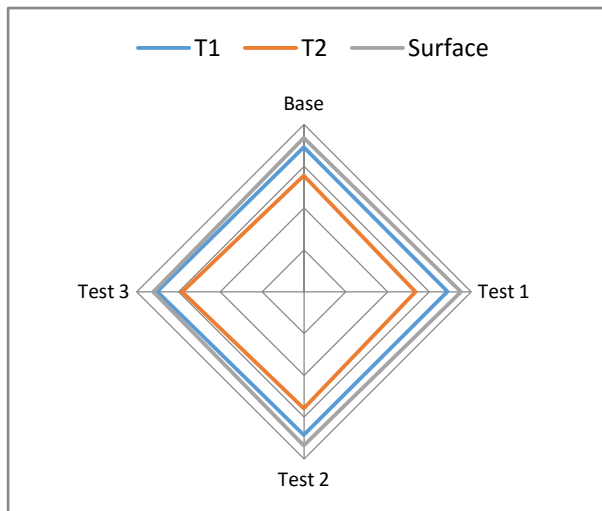
Coûts d'exploitation et d'entretien	1	1	5
Effet sur le potentiel agricole	5	5	3

Effets environnementaux

Effets sur les ressources naturelles	4	4	3
Effets sur le patrimoine culturel et historique	3	2	4
Nuisances pour les établissements humains	4	4	3

NOTE TOTALE	70,2146	58,2492	72,0492
RANG	2	3	1

Les différents tests de sensibilité confirment le classement obtenu pour les variantes Tunnels et Surface de la section 3, aussi bien dans la comparaison selon l'option de base que pour les différents tests. La variante Surface reste classée première comme le montre le diagramme synthétique ci-après.



Il y a lieu de noter que les trois variantes se rapprochent dans la zone limitrophe au barrage de Barbara. Une analyse plus fine pourrait être conduite pour une éventuelle amélioration du tracé retenu.

13 CONCLUSION

L'intégration régionale fait partie des premières priorités du pays. En vue de renforcer les liens économiques et sociaux entre les trois pays du Maghreb, il est recommandé de construire la section autoroutière Bousalem Frontière Algérienne, qui constitue le seul maillon manquant de la Trans-maghrébine en Tunisie.

Les deux effets essentiels attendus de l'autoroute trans-maghrébine concernent :

- La dynamisation des échanges commerciaux entre la Tunisie et l'Algérie ;
- Et la dynamisation du développement de l'ensemble de la région du Nord-Ouest.

Le développement de la région du Nord-Ouest en particulier ne pourra pas se faire par la réalisation du seul projet d'autoroute, et restera tributaire d'un ensemble de mesures dont les plus importantes concernent :

- La création d'un axe rapide voire autoroutier Nord-Sud ;
- Le renforcement du réseau de desserte régional et la réalisation d'une bonne connexion à ce réseau ;
- Et le développement de l'armature urbaine indispensable pour assurer un bon rayonnement sur l'économie de la région.

Ces options s'intègrent parfaitement dans la planification du développement de la région, et plus particulièrement dans :

- La stratégie nationale préconisée par le schéma national d'aménagement du territoire ;
- Et les stratégies régionales à travers, plus particulièrement le schéma d'aménagement du territoire de la région du Nord-Ouest et le schéma d'aménagement des zones frontalières.