

Dédicaces

En terme de reconnaissance de leurs sacrifices et amour, je dédie ce travail à :

Ma maman chérie :

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement que j'ai pour toi, tu avais prédit si tôt que je serai ingénieure génie civil, oui maman, la voici ta prédiction.

Mon cher père :

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail n'est qu'un fruit des sacrifices que vous avez consentis pour m'élever.

Mes sœurs Hiba et Nisrine :

Pour leur amour et leur soutien continu, leur réconfort et encouragement.

Mes amis :

Pour les beaux moments que nous avons partagés depuis le début de notre parcours à l'ENSAA, pour votre aide et support durant les moments difficiles.

Tous ceux et celles qui ont de l'affection et considération à mon égard

Remerciements

Ce mémoire est l'aboutissement d'un travail acharné et un fruit d'un enthousiasme et passion ainsi qu'un véritable engagement professionnel et ce grâce à dieu qui m'a donnée le courage, la force d'y croire et la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et de mener ce travail à son terme. Néanmoins, j'ai l'entière conviction qu'il n'aurait pu voir le jour sans la contribution de plusieurs personnes. Qu'elles puissent être ici chaleureusement remerciées :

- Mes vifs remerciements vont à mon encadrant externe **Monsieur Najib Adouane**, expert consultant en géomatique et documentation 3D & BIM, chez **EngiMA**, pour son aide inestimable et son encadrement exceptionnel et son suivi incontestable tout au long de ce stage.
- Mes sincères remerciements vont à mon encadrant interne **Monsieur Abella Boaddi**, Directeur Adjoint chargé des affaires pédagogiques à **l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir**, pour sa serviabilité et sa disponibilité durant ces temps difficiles.
- Je remercie chaleureusement **Mme Siham RAOUI**, ingénieur ouvrages d'art chez **Team Maroc, groupe JESA** d'avoir accepté de m'encadrer et m'accueillir au sein de son équipe avec tant d'amabilité et de dévouement, et de m'avoir fourni les données et documents nécessaires pour la réalisation de ce projet.
- J'exprime ma gratitude envers **Monsieur Abdelali Lakhdar**, ingénieur routes chez **Team Maroc, groupe JESA** de m'avoir guidé pour atteindre les objectifs de ce projet. Il m'a encadré et m'a soutenu avec beaucoup de sagesse et savoir-faire.
- Mes remerciements s'adressent à **Monsieur Antonio Varela Romero**, architecte et BIM Office Manager chez **JESA**, pour l'intérêt qu'il a porté à ce projet, ainsi que pour le temps qu'il a consacré pour me guider et me conseiller.
- Je remercie tout particulièrement **Monsieur Morad Benjabrou**, professeur à **l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir**, pour son aide et soutien, sans oublier sa participation précieuse au cheminement de ce rapport.
- J'exprime mes remerciements également à **Mme Nourhene Jomaa**, ingénieure génie civil chez **Autodesk**, pour le temps qu'elle m'a accordé, et pour toutes ses réponses claires et pertinentes à mes nombreuses interrogations.
- Je tiens à remercier **Monsieur Sam Hill**, ingénieur génie civil spécialiste en routes et autoroutes, chez **JACOBS**, pour sa disponibilité et pour ne pas avoir hésité à me fournir toutes informations demandées.
- Mes remerciements vont à **toute l'équipe BIM AEC d'EngiMA**, dirigée par **Monsieur Mohamed Lamghari**, pour leur accueil chaleureux, leur partage de savoir-faire, et conseils pertinents qu'ils m'ont prodigué.
- Mes sincères gratitudes envers tout le staff académique de **l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir**, et en particulier **le département Génie Civil** qui a assuré ma formation dans les meilleures conditions.
- Je remercie chaleureusement **les membres du jury** d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Table des matières

Dédicaces	2
Remerciements	3
Table des matières	4
Table des figures	12
Liste des tableaux.....	15
Résumé.....	17
Abstract	19
Introduction générale	21
Chapitre 1 : présentation générale	23
I. Présentation de l'organisme d'accueil	23
1.1. Introduction.....	23
1.2. Présentation générale	23
1.3. Atouts de l'organisme d'accueil	23
1.4. Secteurs d'activité	24
1.5. Compétences et prestations.....	25
1.6. Conclusion	26
II. Cahier de charge du PFE.....	26
2.1. Cadre général du PFE.....	26
2.2. Objectifs du PFE.....	26
a- Objectifs généraux.....	26
b- Objectifs spécifiques.....	27
2.3. Méthodologie de l'étude	27
2.3.1. La création d'un modèle des conditions existantes.....	28
2.3.2. La conception préliminaire	28
2.3.3. La conception détaillée	29
2.4. Conclusion	30
III. Building Information Modeling.....	30
3.1. Introduction.....	30
3.2. Définition de BIM.....	30
3.3. Le BIM et la maquette numérique.....	31
3.4. Les niveaux de maturité du BIM	31
3.5. Les dimensions du BIM	32
3.6. Niveaux de détail (LOD, level of details).....	32
3.7. Intérêt du BIM	33
3.8. Lien entre le BIM et le SIG	34

3.9.	L'interopérabilité du BIM.....	34
3.9.1.	L'open BIM.....	35
3.9.2.	Le format IFC.....	35
3.10.	Les Outils du BIM.....	35
3.10.1.	Outils de modélisation.....	35
3.10.2.	Visionneuses BIM.....	36
3.10.3.	Les plateformes collaboratives.....	36
3.11.	BIM et pratiques contractuelles.....	37
3.11.1.	La convention BIM.....	37
3.11.2.	Le cahier de charge BIM.....	37
3.11.3.	La charte BIM.....	37
3.12.	Utilisation du BIM au Monde.....	38
3.13.	Quelques projets BIM.....	39
IV.	BIM au service des infrastructures.....	40
4.1.	Introduction.....	40
4.2.	Enjeux du BIM dans le domaine d'infrastructure.....	40
4.3.	Utilisation du BIM dans le domaine d'infrastructure.....	40
4.4.	Conclusion.....	41
V.	Echangeurs.....	42
5.1.	Introduction.....	42
5.2.	Description d'un échangeur.....	42
5.3.	Rôle des échangeurs.....	43
5.4.	Type des échangeurs.....	43
5.5.	Critères de conception d'un échangeur.....	44
5.6.	Les éléments de justification de l'aménagement d'un échangeur.....	45
5.7.	Emplacement des échangeurs.....	45
5.8.	Éléments qui constituent un échangeur.....	46
5.8.1.	Bretelles.....	46
5.8.2.	Ouvrages d'art de franchissement.....	47
5.9.	Conclusion.....	50
	Conclusion.....	50
	Chapitre 2 : Etude d'avant-projet.....	51
I.	Description du projet.....	51
1.1.	Introduction.....	51
1.2.	Contexte du projet.....	51
1.3.	Reconnaissance du site du projet.....	51

1.4.	Réseau routier dans la zone d'étude	52
1.4.1.	Le réseau autoroutier d'une longueur de 214 km	52
1.4.2.	Le réseau routier classé (hors autoroutes)	52
1.4.3.	Le réseau routier non classé : routes communales et pistes rurales	53
1.5.	Perspectives de développement	53
1.6.	Conclusion	54
II.	Modélisation du site du projet	55
2.1.	Introduction	55
2.2.	Aperçu sur le logiciel INFRAWORKS	55
2.3.	Création de la zone du projet	55
2.4.	Intégration du levé topographique du site	56
2.5.	La modélisation des lignes électriques	57
2.6.	La modélisation des réseaux souterrains	59
2.7.	La modélisation des réseaux routiers existants	59
2.7.1.	Tracé en plan	60
2.7.2.	Calage du profil en long	60
2.7.3.	Modification du profil en travers	60
2.8.	La modélisation des ouvrages hydrauliques	61
2.9.	Conclusion	62
III.	Conception préliminaire de l'échangeur	63
3.1.	Introduction	63
3.2.	Catégories des routes	63
3.3.	Normes de conception	63
3.4.	Nombre des voies des bretelles	63
3.5.	Contraintes du projet	63
3.6.	Analyses des Variantes de la conception	65
3.6.1.	Première variante	65
3.6.2.	Deuxième variante	70
3.7.	Variante retenue	71
3.8.	Conclusion	71
IV.	Analyse de visibilité	72
4.1.	Introduction	72
4.2.	Principe de l'analyse de visibilité	72
4.3.	Analyse des résultats	72
4.3.1.	Bretelle Rabat-gare de péage Tanger Centre	73
4.3.2.	Bretelle gare de péage Tanger centre-Rabat	74

4.3.3.	Bretelle port Tanger MED- gare de péage Tanger centre	74
4.3.4.	Bretelle Rabat- Gare de péage Tanger Centre	75
4.3.5.	Bretelle gare de péage Tanger Centre- Port Tanger Med	75
4.4.	Conclusion	75
V.	Etude hydrologique	76
5.1.	Délimitation des Bassins versants	76
5.1.1.	Méthodologie de l'étude	76
5.1.2.	Analyse des résultats	77
5.2.	Calcul des débits des bassins versants.....	77
5.2.1.	Méthode rationnelle	78
5.3.	Conclusion	81
VI.	Etude hydraulique.....	82
6.1.	Ajout des ouvrages hydrauliques	82
6.2.	La modification des ouvrages hydrauliques	84
6.3.	Conclusion	85
VII.	Analyse des variantes du pont.....	85
7.1.	Introduction.....	85
7.2.	Données fonctionnelles	85
7.2.1.	Tracé en plan.....	85
7.2.2.	Profil en long.....	85
7.2.3.	Profil en travers.....	86
7.3.	Contraintes du projet	86
7.4.	Variantes de conception.....	86
7.4.1.	Pont à poutres en béton armé (PSI-BA).....	86
7.4.2.	Pont à poutres en béton précontraint (VI-PP)	87
7.5.	Conclusion	89
VIII.	Conception et pré dimensionnement des variantes du pont	89
8.1.	Introduction.....	89
8.2.	Largeur roulable et largeur chargeable	89
8.3.	Classe du pont	89
8.4.	Pré dimensionnement du tablier.....	89
	Variante 1 : pont à poutres en Béton armé (PSI-BA)	89
8.4.1.	Pré dimensionnement des poutres.....	90
8.4.2.	Pré dimensionnement des hourdis.....	92
8.4.3.	Pré dimensionnement des entretoises.....	92
	Variante 2 : Pont à poutres en béton précontraint (VI-PP).....	93

8.4.4.	Pré dimensionnement des poutres.....	94
8.4.5.	Pré dimensionnement des pré dalles :	96
8.4.6.	Pré dimensionnement des hourdis.....	97
8.4.7.	Pré dimensionnement des entretoises	98
8.5.	Pré dimensionnement des appuis	98
8.5.1.	Evaluation des efforts dus au tablier	99
a-	Estimation des réactions d'appui	99
b-	Exploitations des résultats.....	101
c-	Estimation des efforts horizontaux	104
8.5.2.	Choix et conception des piles	105
a-	Nombre et espacement des colonnes	106
b-	Dimensions des colonnes	106
c-	Hauteurs des colonnes	106
d-	Dimensions du chevêtre	107
8.6.	Choix et conception des appareils d'appui.....	107
8.7.	Choix et conception des piles culées.....	107
8.7.1.	Différents Types des culées	107
8.7.2.	Type de culée à adopter	108
8.7.3.	Pré dimensionnement des piles culées.....	109
a-	Sommier d'appui	109
b-	Mur de garde grève	109
c-	Mur en retour	109
d-	Dalle de transition	109
e-	Corbeau	110
f-	La partie intermédiaire	110
8.8.	Choix et conception des fondations	110
8.8.1.	Pré dimensionnement des pieux	111
8.8.2.	Pré dimensionnement de la semelle de liaison	112
8.9.	Conclusion	112
IX.	Equipements du pont.....	113
9.1.	Dispositif de retenue	113
9.2.	Corniche.....	113
9.3.	Système de drainage des eaux pluviales	114
9.4.	Joints de chaussée	114
9.5.	Revêtements.....	114
9.5.1.	Couche d'étanchéité	114

9.5.2.	Couche de roulement	114
9.6.	Conclusion	114
X.	Présentation de la variante retenue.....	115
10.1.	Introduction.....	115
10.2.	Facteurs de choix de la variante retenue	115
10.3.	Modélisation de la variante retenue	115
	Conclusion	116
	Chapitre 3 : Conception détaillée du projet.....	117
	Introduction	117
I.	Etude topographique	117
1.1.	Données de base	117
1.2.	Méthodologie de l'étude	118
1.3.	Conclusion	119
II.	Tracé en plan	120
2.1.	Vitesse de base	120
2.2.	Eléments du tracé en plan	120
2.2.1.	Alignements droits.....	120
2.2.2.	Arcs de cercle.....	121
2.2.3.	Courbes de raccordement	121
2.3.	Combinaison des éléments du tracé en plan.....	122
2.4.	Enchaînement des éléments du tracé en plan	123
2.5.	Zone de décélération.....	123
2.6.	Zone d'accélération	124
2.7.	Application au projet	125
2.7.1.	Bretelle 1.....	126
2.7.2.	Bretelle 2.....	128
2.7.3.	Bretelle 3.....	129
2.7.4.	Bretelle 4.....	130
2.7.5.	Bretelle 5.....	131
2.8.	Conclusion	132
III.	Profil en long.....	133
3.1.	Règles d'implantation du profil en long	133
3.2.	Eléments du profil en long.....	133
3.3.	Coordination du tracé en plan et du profil en long	133
3.4.	Déclivités du profil en long	134
3.4.1.	Déclivités minimales	134

3.4.2.	Déclivités maximales.....	134
3.5.	Raccordements en profil en long.....	134
3.5.1.	Raccordements convexes	134
3.5.2.	Raccordements concaves.....	135
3.6.	Application au projet	135
3.6.1.	Bretelle 1.....	136
3.6.2.	Bretelle 2.....	136
3.6.3.	Bretelle 3.....	136
3.6.4.	Bretelle 4.....	136
3.6.5.	Bretelle 5.....	137
3.7.	Conclusion	137
IV.	Profil en travers.....	137
4.1.	Eléments du profil en travers type	137
4.2.	Application au projet	138
4.3.	Pente transversale	139
4.4.	Zone de sécurité	139
4.5.	Conclusion	140
V.	Dispositifs de sortie	140
5.1.	Introduction.....	140
5.2.	Sortie en déboitement.....	141
5.3.	Implantation de la signalisation directionnelle	141
VI.	Dispositifs d'entrée	142
6.1.	Introduction.....	142
6.2.	Entrée en insertion	143
VII.	Géométrie des divergents et des convergents	143
7.1.	Définitions	143
7.2.	Construction des divergents.....	144
7.3.	Construction des convergents	144
7.4.	Pente transversale des divergents et convergents.....	145
7.4.1.	En sortie	145
7.4.2.	En Entrée.....	145
VIII.	Etude hydrologique.....	146
8.1.	Délimitation des bassins versants	146
8.2.	Calcul des débits des bassins versants.....	147
8.3.	Conclusion	147
IX.	Etude hydraulique.....	147

9.1.	Introduction	147
9.2.	Conception des ouvrages hydrauliques.....	148
9.3.	Dimensionnement des ouvrages hydrauliques	148
9.3.1.	Méthode de DELORME	149
9.3.2.	Méthode de contrôle amont et aval	150
9.4.	Conclusion	152
X.	Stimulation des inondations.....	152
10.1.	Introduction	152
10.2.	Méthodologie de l'étude	153
10.2.1.	Sections transversales.....	153
10.2.2.	Débit et conditions aux limites	154
10.3.	Résultats de la stimulation	155
10.4.	Conclusion	156
XI.	Modélisation de la gare de péage.....	157
11.1.	Description de la gare de péage	157
11.2.	Modèle 3D de la gare de péage.....	157
11.3.	Conclusion	158
XII.	Détail quantitatif.....	158
12.1.	Introduction :.....	158
12.2.	Cubatures de terrassement :.....	158
12.3.	Coefficients de foisonnement et de tassement.....	159
12.4.	Résultats	159
12.5.	Conclusion	159
	Conclusion générale :.....	160
	Annexe 1 : Exemple du rapport de calcul hydraulique issu du logiciel INFRAWORKS	161
	Annexe 2 : modèle 3D les pylônes d'alignement et pylônes d'ancrage.....	162
	Annexe 3 : Calage des ouvrages hydrauliques	163
	Annexe 4 : Plan et profil en long de la bretelle 4 (Rabat – Gare de péage Tanger Centre)	166
	Annexe 5 : Plan et profil en long de la bretelle 5 (Gare de péage Tanger Centre – Port Tanger MED)	167
	Annexe 6 : Plan et profil en long de la bretelle 3 (Gare de péage Tanger centre– Rabat).....	168
	Annexe 7 : Plan et profil en long de la bretelle 3 (Port Tanger MED – gare de péage Tanger centre)	169
	Annexe 8 : Vue en plan du projet de l'échangeur Ain Dalia.....	170
	Annexe 9 : Exemple des profils en travers de la bretelle 4 (Rabat – Gare de péage Tanger Centre)	171
	Annexe 10 : Détails quantitatifs du projet	172
	Bibliographie	175

Table des figures

Figure 1 : logo de l'organisme d'accueil	23
Figure 2 : gare de péage Agadir -Amskroud	24
Figure 3 : projet de bâtiments verts	24
Figure 4 : Projet d'assainissement.....	25
Figure 5 : énergie éolienne.....	25
Figure 6: modèle réaliste sur INFRAWORKS.....	28
Figure 7 : conception préliminaire d'un projet d'infrastructure sur INFRAWORKS	28
Figure 8 : conception détaillée d'un projet d'infrastructure sur INFRAWORKS	29
Figure 9 : structure de pont sur REVIT	29
Figure 10 : maquette numérique	31
Figure 11 : Niveaux de maturité du BIM	31
Figure 12 : Les dimensions du BIM.....	32
Figure 13 : Niveaux de détail.....	33
Figure 14 : Les acteurs du BIM	34
Figure 15 : Lien entre le BIM et le SIG	34
Figure 16 : Classe d'objets IFC.....	35
Figure 17 : exemple d'une visionneuse BIM	36
Figure 18 : éléments d'une plateforme de collaboration	37
Figure 19 : utilisation du BIM au monde	38
Figure 20 : Aéroport international d'Abou Dhabi	39
Figure 21 : Passerelle Isoisänsilta en Finlande	39
Figure 22 : Tour CFC. Casablanca, Maroc.....	39
Figure 23 : Grand théâtre de Rabat, Maroc	39
Figure 24 : échangeurs autoroutiers	42
Figure 25 : échangeur en trèfle	43
Figure 26 : échangeurs en turbine	43
Figure 27 : échangeur Turcot	44
Figure 28 : échangeur à 4 niveaux	44
Figure 29 : échangeur à 5 niveaux.....	44
Figure 30 : échangeur trompette	44
Figure 31 : éléments constituant une bretelle	46
Figure 32 : passage inférieur	47
Figure 33 : passage supérieur	47
Figure 34 : poutre multiple	48
Figure 35 : poutre caisson multiples	48
Figure 36 : poutres caisson multicellulaires	48
Figure 37 : Sections transversales des ponts dalles	48
Figure 38 : composants des piles de pont.....	49
Figure 39 : culée du pont	50
Figure 40 : réseau routier dans la zone du projet	53
Figure 41 : perspective de développement dans la zone du projet	54
Figure 42 : zone du projet issue du modèle Builder.....	56
Figure 43 : intégration de la topographie dans le modèle	56
Figure 44 : gestion des calques de surface sur INFRAWORKS.....	57
Figure 45 : ligne électrique en 3D	57
Figure 46 : ligne électrique sur le plan DWG.....	58
Figure 47 : pylône du réseau THT.....	58
Figure 48 : modèle 3D des canalisations.....	59

Figure 49 : conduite EP en 2D	59
Figure 50 : calage du profil en long sur INFRAWORKS	60
Figure 51 : profils en travers sur INFRAWORKS	60
Figure 52 : levé topographique en 2D	61
Figure 53 : modèle 3D du projet	61
Figure 54 : fenêtre ouvrages hydrauliques sur INFRAWORKS.....	61
Figure 55 : dalot triple sous autoroute en 2D	62
Figure 56 : dalot triple sous autoroute en 3D	62
Figure 57 : emprise du sol dans la zone du projet	64
Figure 58 : relief dans la zone gauche du projet	64
Figure 59 : route provincial RP4602	65
Figure 60 : échangeur en trompette	65
Figure 61 : planification de route sur INFRAWORKS	66
Figure 62 : profils en travers du Country Kit France	66
Figure 63 : détails de conception du tracé en plan	67
Figure 64 : tracé en plan de la première variante de l'échangeur	68
Figure 65 : profil en long d'une bretelle de l'échangeur	68
Figure 66 : outil de calage du profil en long sur INFRAWOIRKS	69
Figure 67 : profil en travers d'une bretelle	69
Figure 68 : dynamisme entre profil en long, axe en plan et profil en travers	70
Figure 69 : variante proposée par l'organisme d'accueil	71
Figure 70 : résultats de l'analyse de visibilité de la bretelle 1.....	73
Figure 71 : résultats de l'analyse de visibilité de la bretelle 1 après modification.....	73
Figure 72 : analyse de visibilité de la bretelle 2	74
Figure 73 : résultat de l'analyse de visibilité de la bretelle 3	74
Figure 74 : analyse de la visibilité de la bretelle 4.....	75
Figure 75 : analyse de la visibilité bretelle 5	75
Figure 76 : thème de terrain par intervalle d'élévation	76
Figure 77 : délimitation des bassins versants sur INFRAWORKS.....	77
Figure 78 : méthode de calcul hydrologique sur INFRAWORKS.....	78
Figure 79 : fenêtre de gestion des ouvrages hydrauliques	82
Figure 80 : profil en travers de l'autoroute.....	86
Figure 81 : pont à poutres en béton armé	87
Figure 82 : poutre en béton précontraint	88
Figure 83 : Coupe longitudinale de la variante 1 (PSI-BA).....	90
Figure 84 : Coupe longitudinale d'une poutre du tablier de la variante 1	90
Figure 85 : Dimensions d'une poutre en BA du tablier de la variante 1	91
Figure 86 : Coupe transversale d'une poutre en BA du tablier de la variante 1	92
Figure 87 : Coupe transversale du tablier de la variante 1	93
Figure 88 : Conception longitudinale de la variante 2 (VIPP).....	93
Figure 89 : Dimensions du talon d'une poutre en BP du tablier de la variante 2	96
Figure 90 : prédalle en BA	96
Figure 91 : Coupe Transversale sur appuis d'une poutre du tablier	97
Figure 92 : Coupe transversale en travée d'une poutre du tablier	97
Figure 93 : Coupe transversale en travée du tablier VIPP.....	98
Figure 94 : Coupe transversale en appuis du tablier VIPP	98
Figure 95: Composants des piles de pont	106
Figure 96 : piles culées apparentes	108
Figure 97 : pile culée enterrés.....	108
Figure 98 : Coupe transversale de la culée	110
Figure 99 : Sondages pressiométriques sous les appuis du pont.....	111

Figure 100 : Coupe de la semelle de fondation.....	112
Figure 101 : Barrière BN4.....	113
Figure 102 : Corniche préfabriquée.....	113
Figure 103 : modélisation 3D de la variante retenue VIPP.....	116
Figure 104 : levé topographique du projet.....	118
Figure 105 : Modèle numérique du terrain.....	118
Figure 106 : Surface TN du projet.....	119
Figure 107 : Eléments du tracé en plan.....	120
Figure 108 : Courbe en S.....	122
Figure 109 : Courbe à sommet.....	123
Figure 110 : Courbe en C.....	123
Figure 111 : Zone de décélération.....	124
Figure 112 : zone d'accélération.....	124
Figure 113 : Définition de la norme de conception sur Autodesk Civil 3D.....	125
Figure 114 : Différents types des bretelles.....	126
Figure 115 : éléments du profil en long.....	133
Figure 116 : bandes figurant dans un dessin de profil en long.....	135
Figure 117 : Eléments du profil en travers.....	137
Figure 118 : Eléments du profil en travers type.....	138
Figure 119 : profil en travers type de la bretelle unidirectionnelle.....	139
Figure 120 : profil en travers type des bretelles bidirectionnelles.....	139
Figure 121 : zone de sécurité.....	140
Figure 122 : sortie en déboitement.....	141
Figure 123 : Exemple de panneau de signalisation avancée.....	142
Figure 124 ; exemple de panneau de signalisation d'avertissement.....	142
Figure 125 : entrée en insertion.....	143
Figure 126 : Exigences techniques du TPL.....	143
Figure 127 : Construction des divergents.....	144
Figure 128 : Construction des convergents.....	145
Figure 129 : pente transversale des divergents.....	145
Figure 130 : pente transversale des convergents.....	146
Figure 131 : Délimitation des bassins versants sur le logiciel Civil 3D.....	146
Figure 132: Coupe schématique sur dalot 3m x 3m.....	149
Figure 133 : Résultat de la simulation sur la section transversale N 11 d'Oued Sghir.....	155
Figure 134 : Carte de la plaine inondable.....	156
Figure 135 : Modèle 3D de la gare de péage.....	158
Figure 136 : pylône d'ancrage et d'alignement.....	162
Figure 137 : calage hydraulique de l'ouvrage OH-BR1-01.....	163
Figure 138 : calage hydraulique de l'ouvrage OH-BR1-02.....	163
Figure 139 : calage hydraulique de l'ouvrage OH-BR1-03.....	164
Figure 140 : calage hydraulique de l'ouvrage OH-BR2-01.....	164
Figure 141: calage hydraulique de l'ouvrage OH-BR4-01.....	165

Liste des tableaux

Tableau 1 : résultats de l'étude hydrologique.....	77
Tableau 2 : intensité pluviométrique en fonction des périodes de retour	79
Tableau 3 : données des bassins versants.....	80
Tableau 4 : intensités des bassins versants.....	80
Tableau 5 : coefficient de ruissellement Cr en fonction de la nature et la morphologie du terrain	80
Tableau 6 : résultats du calcul des débits	81
Tableau 7 : résultats du calage des ouvrages hydrauliques	83
Tableau 8 : Dimensions du talon d'une poutre en BA de la variante 1	91
Tableau 9 : Réactions aux appuis d'extrémité pour les cas de charge de la variante 1 PSI BA	99
Tableau 10 : Réactions aux appuis d'extrémité pour les cas de charge de la variante VIPP.....	100
Tableau 11: Réactions aux appuis intermédiaires pour les cas de charge de la variante 1 PSI BA	100
Tableau 12 : Réactions aux appuis intermédiaires pour les cas de charge de la variante 2 VIPP	100
Tableau 13 : aire de la section transversale du tablier PSI BA	101
Tableau 14 : Poids total par surface utile du tablier PSI BA	101
Tableau 15 : Poids total par surface utile du tablier de l'ouvrage moyen correspondant à la variante 1	102
Tableau 16 : aire de la section transversale du tablier VIPP	102
Tableau 17 : Poids total par surface utile du tablier VIPP	102
Tableau 18 : Poids total par surface utile du tablier de l'ouvrage moyen correspondant à la variante 2	102
Tableau 19 : Coefficient KA et KB du pont	103
Tableau 20 : Coefficient KSEMB et KSEMC et KSEM du pont.....	103
Tableau 21 : Réaction maximale d'appuis 1 et 5 de la variante PSI BA.....	103
Tableau 22 : Réaction maximale de l'appui 3 de la variante PSI BA.....	104
Tableau 23 : Réaction maximale des appuis 2 et 4 de la variante PSI BA	104
Tableau 24 : Réaction maximale des appuis de rive de la variante VIPP	104
Tableau 25 : Réaction maximale des appuis intermédiaires de la variante VIPP.....	104
Tableau 26 : Efforts dues au tablier PSI BA	105
Tableau 27 : Efforts dues au tablier VIPP	105
Tableau 28 : Dimensions de la semelle	112
Tableau 29 : Statistiques de la surface TN	119
Tableau 30 : Calcul des dévers en fonction des rayons selon la norme ICTAAL.....	122
Tableau 31: Rayons en plan des différents types des bretelles	125
Tableau 32 : Caractéristiques en plan de l'arc de cercle 1 de la bretelle 1	126
Tableau 33 : Caractéristiques en plan de la clothoïde extérieure de l'arc de cercle 1 de la bretelle 1.....	126
Tableau 34 : Caractéristiques en plan de la tangente 1 de la bretelle 1	126
Tableau 35 : Caractéristiques en plan de la clothoïde intérieure de l'arc de cercle 2 de la bretelle 1	127
Tableau 36 : Caractéristiques en plan de l'arc de cercle 2 de la bretelle 1	127
Tableau 37 : Caractéristiques en plan de l'arc de cercle 2 de la bretelle 1	127
Tableau 38 : Caractéristiques en plan de la tangente 2 de la bretelle 1	127
Tableau 39 : Caractéristiques en plan de l'arc de cercle 3 de la bretelle 1	127
Tableau 40 : Caractéristiques en plan de la tangente 3 de la bretelle 1	128
Tableau 41 : Caractéristiques en plan de la clothoïde intérieure de l'arc du cercle 1 de la bretelle 2	128
Tableau 42 : Caractéristiques en plan de l'arc du cercle 1 de la bretelle 2	128
Tableau 43 : Caractéristiques en plan de la clothoïde extérieure de l'arc de cercle 1 de la bretelle 2.....	128
Tableau 44 : Caractéristiques en plan de la tangente de la bretelle 2	128
Tableau 45 : Caractéristiques en plan de la clothoïde intérieure de la bretelle 3	129
Tableau 46 : Caractéristiques en plan de la tangente de la bretelle 3	129
Tableau 47 : Caractéristiques en plan de la clothoïde intérieure de l'arc de cercle 1 de la bretelle 3	129
Tableau 48: Caractéristiques en plan de l'arc de cercle 1 de la bretelle 3	129

Tableau 49 : Caractéristiques en plan de la clothoïde extérieure de l'arc de cercle 1 de la bretelle 3	130
Tableau 50 : Caractéristiques en plan de la tangente de la bretelle 3	130
Tableau 51 : Caractéristiques en plan de la tangente 1 de la bretelle 4	130
Tableau 52 : Caractéristiques en plan de la clothoïde intérieure de l'arc de cercle 1 de la bretelle 4	130
Tableau 53 : Caractéristiques en plan de l'arc de cercle 1 de la bretelle 4	131
Tableau 54 : Caractéristiques en plan de la clothoïde extérieure de l'arc de cercle de la bretelle 4	131
Tableau 55 : Caractéristiques en plan de la clothoïde de la bretelle 4	131
Tableau 56 : Caractéristiques en plan l'arc de cercle 1 de la bretelle 5	132
Tableau 57: Caractéristiques en plan de la clothoïde intérieure de l'arc de cercle 1 de la bretelle 5	132
Tableau 58 : Caractéristiques en plan de la tangente de la bretelle 5	132
Tableau 59 : Caractéristiques fonctionnelles de l'ouvrage du franchissement	136
Tableau 60 : Caractéristiques des bassins versants	147
Tableau 61 : Résultats de la méthode DELORME	149
Tableau 62 : Coefficients c, m,k et y pour une buse en BA	151
Tableau 63: Coefficients c, m,k et y pour un dalot avec murs en aile d'angle entre 30° et 75°	151
Tableau 64 : Coefficients c, m,k et y pour un dalot avec murs en aile d'angle entre 90° et 15°	151
Tableau 65 : Résultats de la méthode de contrôle en amont et en aval des ouvrages hydrauliques	152
Tableau 66 : Vue en plan des sections transversales du lit d'Oued Sghir	154
Tableau 67 : Section transversale N11 d'Oued Sghir	154
Tableau 68: Résultats de la simulation des inondations pour les sections transversales d'Oued Sghir	156

Résumé

L'adoption des nouvelles technologies et des outils numériques améliore les rendus des projets, renforce la collaboration, et permet d'éviter les erreurs liées à la conception avant la réalisation.

Dans cette perspective, le présent document consiste en l'étude d'un échangeur sur l'autoroute en service N 5 Rabat-Port Tanger Med en adoptant un flux de travail BIM (Building Information Modeling). Cette méthode présente le cœur de la transformation digitale du secteur du BTP.

La concrétisation de ce concept est faite à travers un projet pilote en infrastructure qui combine le domaine des routes et des ouvrages d'art. Le projet sujet de l'étude est l'échangeur Ain Dalia sur l'autoroute n°5 dans le but d'améliorer les conditions d'accès aux différents projets urbanistiques, industriels et touristiques qui sont lancés ou programmés dans la zone, à partir de l'autoroute n°5. Il permettra également de décongestionner l'accès à Tanger par la RN1 qui connaît un trafic important.

Ce travail est subdivisé en trois grandes parties, qui correspondent au flux de travail adopté dans tout projet d'infrastructure, qui commence par la modélisation de l'environnement du projet, et la bonne compréhension des contraintes naturelles, techniques et fonctionnelles. Ensuite, la mise au point sur les différents choix de conception qui répondent aux particularités du projet dans la phase de la conception préliminaire, et parmi ces choix figure la variante la plus optimale qui fera l'objet de la conception détaillée.

La modélisation du site du projet a été faite sur le logiciel Infracore, qui permet d'intégrer le projet dans son contexte naturel, en représentant les éléments qui figurent dans son environnement (réseaux et canalisations, lignes électriques, ouvrages hydrauliques, autoroute existante...) et qui orientent le choix de la conception.

En tenant compte des différentes spécifications liées au projet, nous choisissons d'adopter un échangeur de type trompette qui se développe dans le cadran Ouest-Nord formé par la RP 4608 et l'autoroute. Il se raccorde sur la RP 4602 et la RP 4608 par un carrefour type giratoire. La RP4602 est déviée sur un linéaire de 800m. L'échangeur est constitué de quatre bretelles autoroutières qui se dirigent vers une gare de péage, et d'un pont qui enjambe l'autoroute.

Au cours de la conception préliminaire, et pour valider le choix de la variante, plusieurs analyses ont été faites notamment l'étude hydrologique qui consiste à estimer le débit des bassins versants qui intersectent le projet. Cette étude hydrologique est la base de l'étude hydraulique préliminaire qui permet d'évaluer la grandeur des ouvrages hydrauliques à mettre en place pour éviter la submersion du projet lors des crues en laissant l'eau franchir la route sans entraîner de remous incontrôlable.

Pour la partie pont, l'étude d'avant-projet aboutit au choix de deux structures qui s'adaptent au mieux au projet, il s'agit d'un pont à poutres en béton armé et d'un pont à poutre en béton précontraint. Il s'est avéré ultérieurement dans la phase de la conception préliminaire que la variante du pont à poutres en béton précontraint est la plus appropriée, compte tenu des avantages qu'elle présente, notamment le recours à la préfabrication, puis la manutention et le poussage du tablier du pont, ce qui permet de ne pas interrompre ou même ralentir notablement la circulation de l'autoroute, cette variante offre également la possibilité d'utiliser des grandes portées sans avoir recours à un appui centrale au niveau du TPC.

Ces études sont validées et développées davantage lors de la phase de la conception détaillée, qui consiste à établir les plans d'exécution du tracé routier, des profils en long et profils en travers en respectant les normes en vigueur, qui sont dans ce cas la norme ICTAAL (Instructions sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison) version corrigée 2015, et son complément (Les échangeurs sur routes de type Autoroute) qui prédefinisent les règles à suivre pour assurer le confort et la sécurité des usagers.

Comme pour la phase de la conception préliminaire, il est nécessaire d'établir un nombre d'analyses mais cette fois ci plus approfondies, notamment l'analyse hydrologique qui renvoi au fait que le projet s'intersecte avec cinq bassins versants dont les débits oscillent entre $4.43 \text{ m}^3/\text{s}$ et $12.75 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces débits ont été estimés par la méthode rationnelle pour une période de retour de 100 ans et en estimant le temps de concentration par la formule de Kirpich recommandé par le maître d'ouvrage. Pour l'implantation des ouvrages hydrauliques, il est important de tenir en compte les dispositifs de drainages existants, et en faire sorte d'assurer la continuité du ruissellement des eaux vers l'exutoire sans perturber le fonctionnement de l'infrastructure. Cette analyse est basée sur la méthode de DELORME qui permet le pré dimensionnement des ouvrages suivie par la méthode de contrôle amont et aval pour valider les choix préétablis.

L'analyse hydraulique a abouti à l'implantation de cinq ouvrages de franchissement : une triple buse d'un diamètre de 1500 mm, trois buses simples de diamètre 1000 mm et un dalot double de dimension 2m x 2m.

Le projet s'implante dans la partie Est de Oued Sghir, d'où l'intérêt d'une simulation des inondations, en se basant sur un débit de $250 \text{ m}^3/\text{s}$ et une côte PHE de 12.5 m à l'intersection avec Oued Mehrar, ces données sont mises à disposition par le maître d'ouvrage. Il ressort de cette étude que le niveau de l'eau du projet atteint 13.5 m au droit d'une bretelle, d'où la nécessité de protéger la chaussée par des enrochements jusqu'à cette côte.

L'échangeur est contrôlé par une barrière à péage, avec 5 voies en sortie et 3 voies en entrée muni d'un ensemble d'équipements nécessaires pour le bon fonctionnement de la gare, et pour garantir la sécurité des opérateurs et des utilisateurs.

Pour parachever l'étude, nous avons établi des plans d'exécution annotées en 2D qui détaillent les résultats obtenus, ainsi qu'un modèle 3D complet qui intègre les différents aspects cités dans un environnement réaliste, pour donner de la valeur ajoutée à la proposition technique.

Au bout du compte, l'élaboration d'un détail quantitatif avec un total de 102470.5 m^3 de remblais, qui sera la base de l'étude budgétaire du projet.

Abstract

This document summarizes the study of an interchange on the N 5 Rabat-Port Tanger Med highway by adopting the BIM (Building Information Modeling) workflow, this method is at the heart of the digital transformation of the Construction.

The adoption of new technologies and digital tools improves project renderings, strengthens collaboration, and makes it possible to avoid unexpected events during implementation soon enough during design.

The development of this concept is made through a pilot project in infrastructure which combines the field of roads and large-scale infrastructure. The project is Ain Dalia interchange on the highway N°5 in order to improve access to the various urban, industrial and tourist projects which are launched or programmed in the area, from highway N° 5. It will also help decongest access to Tangier by the RN1, which has significant traffic.

The study is divided into three main parts, which correspond to the workflow adopted in any infrastructure project, it begins with modeling the project environment, and the good understanding of the natural, technical and functional constraints. Then, focusing on the different design choices that meet the specifics of the project in the preliminary design phase. Among these choices, we find the most optimal proposition that will be the subject of detailed design.

The modeling of the project site was done on Infracore software, which allows the integration of the project into its natural context, by representing the elements that appear in its environment (networks and pipes, power lines, hydraulic structures, existing highway, etc.) which guide the choice of design.

Taking into account the different specifications related to the project, we choose to adopt a trumpet type exchanger which develops in the West-North formed by the PR 4608 and the highway. It is connected to the PR 4602 and the PR 4608 by a roundabout. The RP4602 is deviated on a linear of 800m. The interchange is made up of four highway ramps that go to a toll station, and a bridge that spans the highway.

During the preliminary design, and to validate the choice of certain variant, several analyzes were made including the hydrological study which consists of estimating the flow of the watersheds that intersect the project. This hydrological study is the basis of the preliminary hydraulic study which makes it possible to assess the size of the hydraulic structures to be installed to avoid submersion of the project during floods by letting water cross the road without causing uncontrollable rising of water.

Concerning the bridge, the study leads to the choice of two structures which best suit the project, it is a reinforced concrete beam bridge and a concrete beam bridge prestressed. It turned out later in the preliminary design phase that the variant of the prestressed concrete girder bridge is the most appropriate, given its advantages, notably the use of prefabrication, then handling and pushing. the bridge deck, will not interrupt or even significantly slow down traffic on the highway, this variant also offers the possibility of using larger spans without invoking a central support.

These studies are validated and further developed during the detailed design phase, which consists on establishing the plans for the execution of the alignments, the profiles and the assemblies

in accordance with the standards applied which, in this case, are the ICTAAL standard (Instructions on Technical Conditions for the Development of Linking highways) corrected version 2015, and its supplement (Highway interchanges) which predefine the rules to be followed to ensure the comfort and safety of users.

As for the preliminary design phase, it is necessary to establish a number of analyzes but this time with much details, in particular the hydrological analysis which refers to the fact that the project intersects with five watersheds whose rates oscillate between 4.43 cbs and 12.75 cbs. These flows were estimated by the rational method for a return period of 100 years and by estimating the concentration time by the Kirpich formula recommended by the client. For the installation of hydraulic structures, it is important to take into account the existing drainage devices, and to make sure to ensure the continuity of the runoff of water towards the outlet without disturbing the infrastructure. This analysis is based on the DELORME method which allows the pre-sizing of structures followed by the upstream and downstream control method to validate the pre-established choices.

The hydraulic analysis led to the installation of five culverts : a triple 1500 circular culvert, three 1000 culverts and a box with two barrels of 2m x 2m.

The project is located in the eastern part of Oued Sghir, hence the interest in simulating floods, based on a flow of 250 cbs and a level of high water of 12.5 m at the intersection with Oued Mehrar, these data were given by the client. It emerges from this study that the water of the project reaches 13.5 m at the right of a ramp, hence the need to protect the roadway with riprap to this level.

The interchange is controlled by a toolstation, with 5 exit lanes and 3 entry lanes fitted with a set of equipment necessary for the functioning of the station, and to guarantee the safety of operators and users.

To complete the study, we established 2D annotated execution plans which detail the results obtained, as well as a complete 3D model which integrates the various aspects mentioned in a realistic environment, to give added value to the technical proposal.

Ultimately, the development of a quantitative detail with a total of 102470.5 m³ of embankments, which will be the basis of the financial study of the project.

Introduction générale

Le monde change rapidement et constamment ; une demande accrue de ressources, une croissance de la population, une urbanisation forte et un besoin croissant des infrastructures, font que le secteur AEC (architecture, Ingénierie, Construction) traverse une période de mutation numérique.

En outre, la crise du COVID19 que nous vivons actuellement nous démontre clairement à quel point notre secteur du BTP doit évoluer, se digitaliser et se transformer.

La digitalisation de ce secteur est étroitement liée aux méthodes de production, d'approbation, de collaboration et de réalisation, c'est dans ce sens qu'on induit l'utilisation de la technologie et des processus BIM (Building Information Modeling) .

Le BIM est un processus intelligent basé sur un modèle 3D, donnant aux professionnels de la construction des informations et des outils pour planifier, concevoir, et gérer plus efficacement les bâtiments et les infrastructures.

Pour profiter des avantages du BIM, et suivre le développement du marché mondial de la numérisation du domaine du BTP, les architectes, les ingénieurs, les géomètres, les maîtres d'œuvre et les maîtres d'ouvrage déploient le processus de la modélisation numérique de la construction et adoptent ses pratiques. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce projet fin d'études.

L'objectif de ce projet est de développer principalement le flux de travail BIM infrastructure chez l'organisme d'accueil, de développer un processus métier en utilisant des supports logiciels adéquats, à travers un projet pilote d'infrastructure, qui combine la conception géométrique des routes et des ouvrages d'art.

Ce mémoire est un récapitulatif de l'étude réalisée, qui porte sur l'échangeur d'Ain Dalia, situé au point kilométrique 38 de l'axe autoroutier Rabat- Port Tanger Med dans le but d'améliorer les conditions d'accès à la ville de Tanger.

Le travail est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre comporte une présentation de Team Maroc, groupe JESA qui est mon lieu de stage, ses différents départements, et plus particulièrement le pôle que j'ai eu le plaisir de rejoindre durant cette période. Il comporte également un descriptif du cahier de charge du PFE, et une présentation de la méthodologie du travail adoptée. Ce chapitre se clôture par une initiation au monde du BIM, en définissant les règles de base de cette méthode de travail, ainsi qu'une introduction aux échangeurs, cette partie de la route qui permet chaque jour le déplacement des millions d'usagers de par le monde.

Le deuxième chapitre décrit le projet étudié sur plusieurs volets et concrétise la méthodologie préétablie. Chaque processus BIM commence par une modélisation du site existant pour bien comprendre l'environnement du projet, et pour réussir les choix de la conception. Ensuite, la phase de la conception préliminaire qui consiste à mettre le point sur les variantes de conception qui riment avec les spécifications du projet et son site d'implantation. Au cours de cette étape, l'adoption d'une variante préliminaire de conception donne place aux différents types d'analyse notamment les études

hydrologiques et hydrauliques. Pour la partie pont, la conception préliminaire consiste à concevoir et pré dimensionner les différentes structures du pont pouvant faire l'objet de la conception détaillée.

Après avoir validé la conception préliminaire, le troisième chapitre traite de manière détaillée la prochaine phase de la conception qui consiste à définir les différents éléments du tracé, son profil en long et en travers, tout en respectant les normes routières qui s'appliquent au projet. L'étude s'achève par l'établissement des plans d'exécution et la budgétisation du projet en se basant sur les avants métrés préétablis.

La particularité du projet consiste à créer un modèle 3D complet qui englobe tous les éléments de la conception dans un contexte réaliste, pour rendre la proposition plus pertinente avec plus de valeur ajoutée.

Pour conclure, l'établissement de ce flux de travail sera bénéfique pour toute structure qui souhaite migrer vers le monde numérique dans le domaine du BTP et plus particulièrement le domaine de l'infrastructure, mais il est à noter que ce processus nécessite l'implication de tous les collaborateurs au cours des diverses étapes du cycle de vie du projet, de l'étude préliminaire à la maintenance, en passant par l'étude détaillée et la réalisation pour tirer profit des avantages incontournables de cette méthode pour le secteur.

Chapitre 1 : présentation générale

I. Présentation de l'organisme d'accueil

1.1. Introduction

Combinant le savoir faire de ces équipes pluridisciplinaires du haut niveau professionnel, et son expertise de management de projet, TEAM-Maroc, est un leader des bureaux privés et indépendants d'ingénierie dans le domaine du BTP.

Cette partie est une présentation de l'organisme, de son domaine d'activité et de ses missions.

1.2. Présentation générale

TEAM-Maroc, filiale du Groupe JESA depuis le 1er Aout 2012, est une Société d'ingénierie fondée en 1981. Basé à Rabat, la société fait partie d'un réseau international couvrant plusieurs pays à travers le monde.

Fiche de présentation

Acronyme : Transportation Engineering and Management (TEAM MAROC)

Forme juridique : Société Anonyme

Date de création : 1981

Adresse : Imm D, Zénith Rabat, Angle Rocade de Rabat et Rue Ait Malek Souissi MAROC

Téléphone : 00 212 5 37 66-44-44

Téléfax : 00 212 5 37 66-43-43

E-mail : info@jacobs-esa.com

Capital social : 6.100.000 DH

Directeur général : ABDELILAH BOUZIAN



Figure 1 : logo de l'organisme d'accueil

1.3. Atouts de l'organisme d'accueil

Actuellement, environ 200 ingénieurs, cadres et techniciens pluridisciplinaires collaborent au sein de Team-Maroc. Un réseau interne diversifié ayant un haut niveau de compétences et une meilleure connaissance du terrain, qui bénéficie en outre, des compétences d'un vaste réseau international d'experts. L'organisme profite de plusieurs atouts considérables notamment :

- Une notoriété dans le métier depuis plus de 30 ans.
- Une croissance interne et externe offrant de réelles perspectives d'évolution.
- L'accès à un vaste réseau mondial de compétences tout en conservant et développant l'expertise locale.

- Un modèle orienté Relation Client et un engagement de la Direction à fournir les moyens (humains, outils, méthodes) pour atteindre les objectifs.
- Un Groupe indépendant et financièrement sain.
- Un système Qualité (ISO 9001) éprouvé et certifié depuis 2008.
- Un objectif sécurité ambitieux avec la mise en place d'une politique « zéro accident » et de l'initiative « Beyond Zero » visant à intégrer la sécurité dans le comportement quotidien de chacun
- Une expertise de management de projet : la société s'organise par projet pour la réalisation de ses missions, ce qui donne des équipes composée d'ingénieurs spécialistes, animés et coordonnés par un Responsable de Projet.

1.4. Secteurs d'activité

Team Maroc intervient dans une large gamme des métiers de l'ingénierie :

- Infrastructures des transports : autoroutes, routes, voies ferrées, ouvrages d'art, ouvrage portuaire et aéroportuaires, aménagements urbains



Figure 2 : gare de péage Agadir -Amskroud

- Bâtiment tout corps d'état : complexes touristiques, ensembles résidentiels, équipement sportifs et culturels



Figure 3 : projet de bâtiments verts

- Eau et environnement : assainissement, eau potable, aménagements hydro agricoles, VRD, stations d'épurations



Figure 4 : Projet d'assainissement

- Etudes sectorielles : transport, études économiques, énergies renouvelables.



Figure 5 : énergie éolienne

1.5. Compétences et prestations

Les Départements Techniques, et les Consultants spécialisés, assurent la maîtrise des compétences dans chacune des disciplines nécessaires à la réalisation des prestations d'ingénierie :

- **Pôle ingénierie bâtiment** : Le Pôle "bâtiment" effectue des études pour des grands projets d'équipement de terrains, de complexes touristiques, de projets socio-éducatifs et sportifs ainsi que des programmes de logements.
- **Pôle infrastructures de transport et ouvrages d'art** : Le Pôle "Infrastructures de transport " propose un large éventail de prestations d'ingénierie au sein d'une équipe structurée et pluridisciplinaire. Il assure à sa clientèle (organismes gouvernementaux, communes, communautés urbaines et entreprise de BTP) un service global couvrant le projet depuis sa conception jusqu'à son aboutissement.
- **Pôle eau et environnement** : Le Pôle "Eau & Environnement" réunit une équipe polyvalente maîtrisant les technologies les plus modernes et assurant un service de qualité et des prestations

de haut niveau. Ce pôle offre à sa clientèle publique et privée des prestations d'études et de suivi complètes.

- **Pôle étude sectorielle** : Pôle "Etudes Sectorielles et Conseil" réunit une équipe dynamique d'ingénieurs et d'économistes possédant des compétences solides dans les domaines de l'économie, la finance, l'organisation et les ressources humaines, ainsi que l'analyse de projets.

1.6. Conclusion

J'ai eu le plaisir de rejoindre le pôle infrastructure de transport et Ouvrages d'art durant la période de mon stage projet fin d'études. Une équipe dynamique, bien structurée et créative avec laquelle j'ai beaucoup appris sur le plan technique et relationnel.

Après avoir présenté l'organisme de stage, la prochaine partie de ce chapitre sera consacrée à une description détaillée du cahier de charge du PFE.

II. Cahier de charge du PFE

2.1. Cadre général du PFE

Ce PFE s'inscrit dans le développement du flux de travail BIM (Building Information Modeling) dans le domaine d'infrastructure à travers l'étude d'un échangeur sur l'autoroute en service N°5 Rabat-Port Tanger Med. Et ce dans le but de tirer profit de cette méthode de travail et suivre la transition numérique du secteur du BTP.

Le lieu de stage est la société Team Maroc, groupe JESA, qui est un bureau d'études techniques polydisciplinaire. Durant ma période de stage, j'aurai à collaborer avec le pôle «Transport et ouvrages d'art».

Cette étude est organisée selon trois grandes parties :

- Modélisation de l'environnement du projet et la compréhension des contraintes naturelles, techniques et fonctionnelles
- La conception préliminaire qui consiste à présenter les différentes propositions de la conception
- La conception détaillée qui élabore en détail l'étude effectuée sur la variante de conception la plus optimale, et qui aboutit à l'établissement des plans d'exécution.

2.2. Objectifs du PFE

Comme le Projet fin d'étude marque la fin du cursus en école d'ingénieur, et un tremplin vers la vie professionnelle, il doit satisfaire à plusieurs objectifs généraux et spécifiques.

a- Objectifs généraux

Parmi les objectifs généraux du projet fin d'études, on cite :

- La mise en œuvre des connaissances acquises au cours du parcours scolaire dans la résolution des problématiques concrètes dans le domaine du travail des entreprises.

- L'acquisition et l'approfondissement des connaissances dans un domaine du Génie Civil, en particulier le domaine d'infrastructure
- L'adoption d'une analyse scientifique pour répondre aux exigences liées au sujet
- La familiarisation avec l'environnement et les activités de l'entreprise
- La compréhension des tâches et des méthodes utilisées au sein de l'organisme d'accueil.
- La combinaison des outils techniques et du management de temps pour atteindre les objectifs spécifiques du projet
- Le développement des savoirs faire et savoirs être essentiels pour l'avenir professionnel
- L'apprentissage des outils de gestion et de management
- La pratique des techniques d'ingénierie dans le domaine du génie civil
- L'analyse des résultats obtenus et la prise de décision
- La rédaction d'un document clair et synthétique, exploitable par les professionnels

b- Objectifs spécifiques

L'objectif ultime de ce projet est le développement du processus BIM au sein du département infrastructure de l'organisme d'accueil.

Le projet sujet de l'étude, sera une démonstration concrète de l'application de cette technologie dans le domaine de l'infrastructure, en combinant les outils et les règles du métier, et ce en satisfaisant plusieurs objectifs intermédiaires, parmi lesquels on cite :

- L'élaboration des analyses nécessaires pour un projet d'infrastructure routière
- Le respect des normes et des critères de la conception
- L'optimisation du processus durant toutes les phases de l'étude
- Le choix d'une variante adéquate qui répond à toutes les exigences du projet et aux contraintes de son environnement
- La maîtrise des quantités du projet
- La génération des plans d'exécution
- L'élaboration d'une maquette numérique du projet

2.3. Méthodologie de l'étude

Pour bien mener cette étude, il faut suivre un processus complet et efficace dont le but est l'optimisation de la conception et de la documentation, pour éviter les pertes des données, et identifier rapidement les défis liés aux projets pour trouver des solutions efficaces.

Cependant, il faut mettre en place des workflows intelligents et connectés afin d'optimiser la durabilité, la productivité et la rentabilité des projets d'infrastructure en transférant les informations du projet d'une étape à l'autre.

La méthodologie adoptée pour cette étude est la suivante :

2.3.1. La création d'un modèle des conditions existantes

Pour démarrer un projet d'infrastructure, il faut commencer par créer un modèle intelligent à partir de sources de données existantes qui contribuera dans l'accélération du rythme de la conception.

Le but de cette étape est de transformer la capture de données en conditions existantes établies dans le contexte de l'environnement réel du projet.

A cette étape, sur la base des données SIG, il faut importer les données topographiques à l'aide du logiciel INFRAWORKS ainsi que la modélisation des différents éléments qui constituent l'environnement du projet pour avoir un modèle 3D riche en information.



Figure 6: modèle réaliste sur INFRAWORKS

2.3.2. La conception préliminaire

Lors de la phase de la conception préliminaire, il faut Créer, évaluer et communiquer les variantes de la conception. On doit donc ajouter des éléments de conception et proposer différentes variantes dans le modèle préalablement créé.

Le but de cette étape est d'intégrer les propositions techniques au modèle 3D, pour permettre la prise de décision de manière plus efficace, et d'effectuer des choix plus éclairés.



Figure 7 : conception préliminaire d'un projet d'infrastructure sur INFRAWORKS

2.3.3. La conception détaillée

Une fois la conception préliminaire est validée, le projet est importé sur le logiciel Autodesk Civil3D, qui reconnaît les objets de conception préétablis et permet une interaction dynamique avec le modèle d'Infraworks. Civil 3D met à jour toutes les informations lors d'un changement de conception ce qui permet d'éliminer les retouches, d'augmenter l'efficacité et la qualité des livrables du projet.

Autocad Civil 3D permet d'appliquer les normes de conception prédéfinies ou importées et d'ajouter des détails et des données intelligentes au modèle.

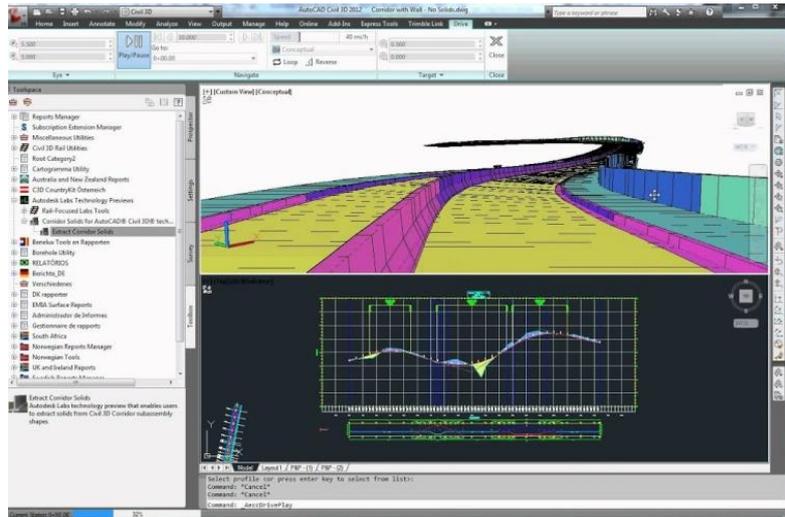


Figure 8 : conception détaillée d'un projet d'infrastructure sur INFRAWORKS

Pour les ponts conceptuels, ils peuvent être importés directement d'InfraWorks vers Revit pour le développement d'une conception détaillée, l'élaboration des plans de coffrages, et les détails quantitatifs.

InfraWorks et Revit utilisent une communication bidirectionnelle. Les modifications apportées dans InfraWorks s'affichent automatiquement dans Revit et vice versa.

Et éventuellement, Robot Structural Analysis ou Structural Bridge Design pour effectuer des analyses structurelles.

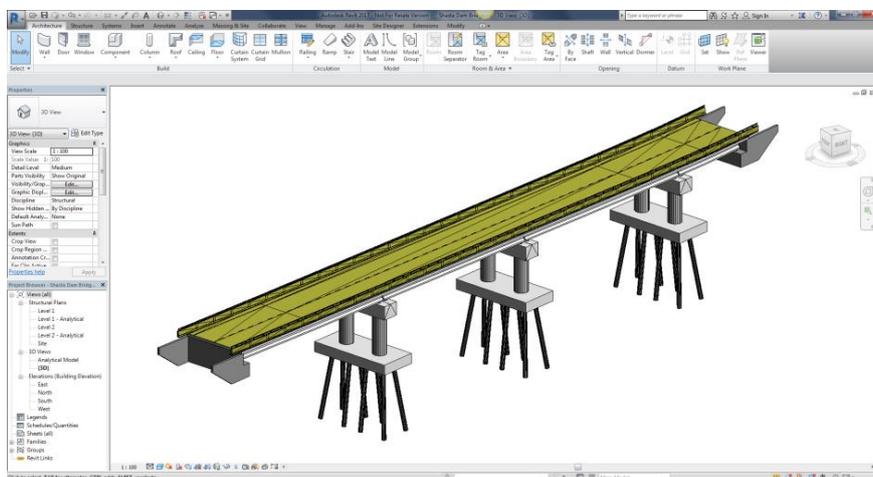


Figure 9 : structure de pont sur REVIT

En raison de la complexité croissante des projets d'infrastructure, l'efficacité opérationnelle et la maîtrise des coûts sont de plus en plus essentielles à la réussite des projets. L'outil Navisworks permettra de passer en revue les données et modèles intégrés avec les intervenants pour mieux comprendre le projet et en contrôler le résultat. Navisworks permet de détecter les conflits entre les modèles de différentes disciplines du projet et d'effectuer des simulations de planification (BIM 4D) et d'estimation de coûts (BIM 5D)

2.4. Conclusion

Le présent PFE s'inscrit dans une démarche de déploiement du BIM, et la maîtrise du flux de travail BIM infrastructure. La rédaction d'un cahier de charge permet de mettre le point sur la démarche et les étapes de progression du projet, afin d'atteindre les objectifs fixés.

La prochaine partie décortique de manière générale les notions de base du BIM.

III. Building Information Modeling

3.1. Introduction

Le BIM vient de l'acronyme anglais « Building Information Modeling » et signifie « Modélisation des Informations de la Construction ». Celui-ci s'applique aux projets de bâtiments comme aux projets d'infrastructures.

Cette partie traite les différentes définitions liées au BIM (Building Information Information) ce qui permettra la familiarisation avec le jargon de cette technologie, ainsi que l'application du BIM dans le domaine d'infrastructure.

3.2. Définition de BIM

Le BIM est une méthode de travail permettant de partager des informations fiables via une approche collaborative tout au long des phases d'un projet (conception, réalisation, exploitation, démolition). Ce processus de travail collaboratif se fait autour de la maquette numérique paramétrique 3D qui contient des données précises, accessibles et exploitables permettant de prendre des décisions optimales.

Le BIM est donc une alliance de méthodes de travail plus collaboratives et d'une maquette numérique 3D se composant d'une multitude d'objets 3D (en bâtiment ces objets sont par exemple un mur, une fenêtre, une conduite, etc.) complétés par leurs données propres de conception (dimensions, matériaux, et toute autre information utile). Il s'appuie sur un partage de données rapide et simultané entre tous les acteurs d'un projet, ainsi que leur contrôle et leur capitalisation tout au long du cycle de vie d'un bâtiment ou d'une infrastructure, incluant entre autres leurs phases de conception, de construction et d'exploitation. Il nécessite une organisation de travail adaptée et des outils informatiques compatibles avec cette démarche (logiciels de conception, matériel adapté, formats d'échange de données particuliers, etc).

3.3. Le BIM et la maquette numérique

Bien que souvent confondus, la Maquette Numérique et le BIM ne désignent pas la même chose.

Bien que le BIM soit une méthode de travail qui s'appuie sur la collaboration et le partage des données, la maquette numérique est une représentation numérique de ces données comme étant les caractéristiques physiques et fonctionnelles des bâtiments ou d'infrastructures.

Dans l'objectif ultime du BIM, on peut dire que la maquette numérique est intégrée au centre du processus du travail collaboratif.



Figure 10 : maquette numérique

3.4. Les niveaux de maturité du BIM

Le BIM a plusieurs niveaux de maturité. Ils sont les étapes pour aller vers le BIM collaboratif. Il s'articule donc autour de plusieurs niveaux d'organisation allant de 0 à 3 selon son utilisation lors du projet, allant d'utilisations très ponctuelles à l'intégration totale de l'ensemble des éléments et phases du projet au processus.

- Niveau 0 : Conception en 2D sans gestion collective ni structuration des données imposée.
- Niveau 1 : « BIM en isolation », il s'agit d'un mélange 2D et 3D avec des données structurées selon certaines normes (numérotation de plans, géolocalisation, présentation, etc..). Chaque acteur travaille sur ses propres parties du projet séparément.
- Niveau 2 : Chaque acteur crée sa maquette 3D, dans un format compatible BIM tel que l'IFC, et celles-ci sont regroupées en une maquette générale. Une organisation du travail collaborative devient obligatoire tout comme une structuration normalisée des données.
- Niveau 3 : Un modèle unique accessible à tous les acteurs durant toute la durée de vie du projet, permettant des évolutions permanentes, accessibles par tous les intervenants.

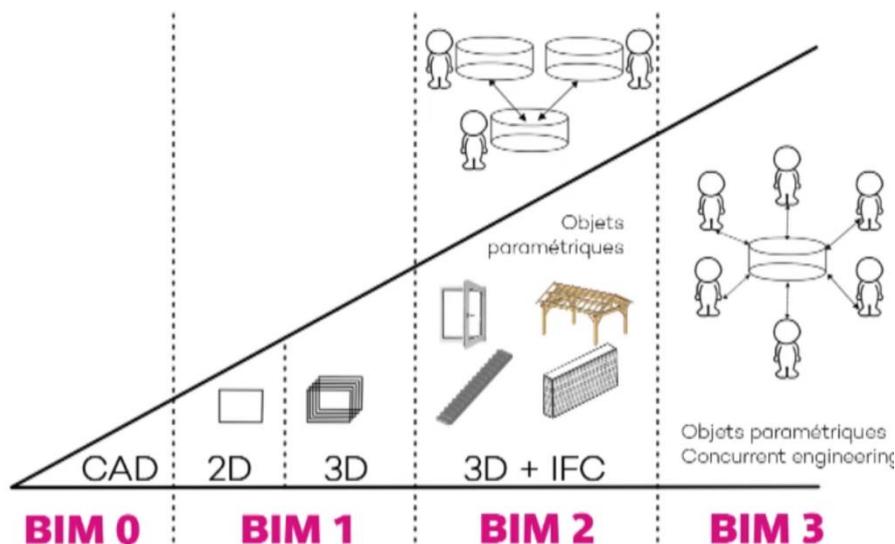


Figure 11 : Niveaux de maturité du BIM

3.5. Les dimensions du BIM

A ces niveaux d'organisation s'ajoutent des dimensions de BIM qui dépendent des thématiques traitées :

- 3D : BIM classique concentré autour d'un modèle objet 3D paramétriques avec de l'information embarquée.

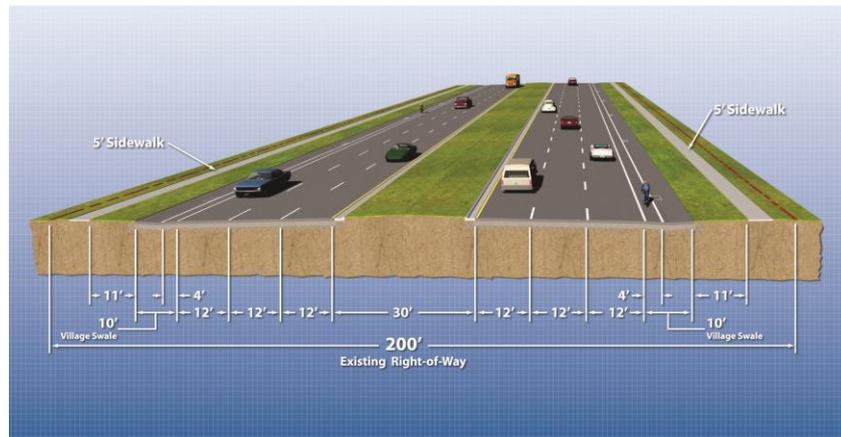


Figure 12 : Les dimensions du BIM

- 4D : Ajout de la notion de temps et de planification (travaux, logistique, facturation...)
- 5D : Ajout de la notion de coût (estimation actualisée en temps réel, simulations de coût selon les variantes choisies...)
- 6D : Ajout des notions de développement durable et environnement (analyses des émissions carbone...)
- 7D : Ajout de l'exploitation du projet (capitalisation et partage de données du projet pour la maintenance et l'exploitation)

Un nombre presque infini de dimensions peut être ajouté au modèle de construction, selon le besoin et le type de données insérées.

3.6. Niveaux de détail (LOD, level of details)

Ils définissent le niveau de renseignement attendu pour les éléments constituant la maquette numérique selon l'avancement du projet. Les LOD les plus utilisés sont issus de la définition du LOD dans l'AIA G202-2013 développée par l'institut américain des architectes.

Ils sont caractérisés par les centaines de 100 à 500 :

- **LOD 100** : stade d'esquisse (volume, orientation, cout général...)
- **LOD 200** : Stade schématique correspond à la phase de l'avant-projet sommaire APS (quantités, taille, analyses préliminaires)
- **LOD 300** : les éléments du modèle sont prêts pour l'établissement des quantités et l'estimation financière ainsi que la présentation détaillée de l'ensemble des prestations. Il correspond à la phase d'avant-projet détaillé APD

- **LOD 350:** Les éléments du modèle sont représentés graphiquement d'une manière spécifique en tant qu'objet ou assemblage. Les dimensions, quantités, formes, positions et orientations sont spécifiques aux éléments. Les éléments interagissent avec les autres éléments
- **LOD 400 :** Ce niveau contient les détails et les désignations de tous les éléments, c'est le niveau le plus proche du DOE (dossier d'ouvrage exécuté)
- **LOD 500 :** Ce niveau est désigné à l'exploitation et l'entretien de la structure



Figure 13 : Niveaux de détail

3.7. Intérêt du BIM

L'adoption de processus BIM doit apporter de nombreux avantages :

- La capacité de contrôle manuel et automatique accrue et la détection automatique des conflits plus tôt dans le projet lors de l'intégration des différents éléments de la maquette, et la possibilité de modification plus rapide.
- Les coûts peuvent être mieux gérés et les écarts entre les coûts envisagés initialement et les coûts finaux sont limités. Cela est rendu possible par la détection et une correction plus précoce des erreurs et des points de conflits entre portions du projet et la possibilité d'anticiper le déroulement des phases de construction. Le coût peut être calculé et adapté en temps réel selon le type de BIM choisi.
- Les délais annoncés sont plus précis grâce à un calendrier de travaux et une logistique optimisés (fixation possible de l'évolution de la construction au fil du temps et des matériaux nécessaires à chaque phase de projet pour optimiser la logistique)
- Les échanges accrus et permanents entre les différents acteurs du projet aux différentes étapes de celui-ci, grâce à la disponibilité permanente d'un modèle 3D paramétrique qui constitue le cœur du processus.
- La capitalisation et l'enrichissement des données à chaque étape permettant de disposer de celles-ci à tout moment pour tous les acteurs concernés et de limiter les doublons lors des études. Ces données peuvent ensuite être remises au propriétaire pour faciliter l'entretien/exploitation.



Figure 14 : Les acteurs du BIM

3.8. Lien entre le BIM et le SIG

le SIG tout comme le BIM traitent des données spatialisées, localisées dans l'espace qui possèdent des relations entre-elles et sont interrogeables car elles contiennent des informations.

Cependant, bien que des similitudes puissent être soulignées, le BIM et le SIG sont utilisés à des échelles différentes. En effet, le BIM sert à la modélisation des structures et des éléments qui les composent pour les différentes phases du projet de la conception à l'exploitation et permet donc un niveau très détaillé des objets comme les prises électriques. Le SIG quant à lui, a vocation à être utilisé pour une vision plus globale du territoire. Il y a donc une complémentarité entre le BIM et le SIG notamment à l'échelle du quartier où il y aura un chevauchement des deux modèles qui permet la compréhension globale de l'environnement avec le SIG et la vision précise des bâtiments avec le BIM. (Exemple : interfaçage entre les réseaux urbains et les réseaux contenus à l'intérieur d'un bâtiment).



Figure 15 : Lien entre le BIM et le SIG

3.9. L'interopérabilité du BIM

Dans le domaine de la construction, l'interopérabilité est la capacité des logiciels à pouvoir échanger des informations entre eux. Ainsi chaque acteur d'un projet pourra lire et exploiter un fichier provenant d'un collaborateur n'utilisant pas forcément la même suite logicielle.

Pour cela, le World Economic Forum et l'EU BIM Task Group ont publié des textes fondateurs soutenant les formats numériques ouverts: l'openBIM.

3.9.1. L'open BIM

L'openBIM n'est pas un logiciel, ni une marque commerciale. C'est la manière de travailler en BIM avec des processus et outils informatiques interopérables s'appuyant sur des normes internationales ou européennes ou des standards ouverts.

Les travaux de normalisation portent sur les échanges grâce à l'utilisation des formats de fichiers standards entre ordinateurs, applications, logiciels notamment IFC, COBie et BCF (BIM Collaboration Format).

3.9.2. Le format IFC

Le format IFC est le format d'échange standard utilisé par les logiciels BIM. Il a été développé par BuildingSmart, anciennement IAI (International Alliance for Interoperability) et est devenu une norme en 2013. Le format IFC contient pour chaque objet sa géométrie et les informations qui y sont rattachées. C'est un modèle orienté objet qui définit des classes associées à tous les objets liés au domaine de la construction. Il y a actuellement plus de 800 classes d'objets comme par exemple :

- IfcWindow : classe d'objets correspondant aux fenêtres
- IfcWall : classe d'objets correspondant aux murs
- IfcSlab : classe d'objets correspondant aux dalles
- IfcBeam : classe d'objets correspondant aux poutres

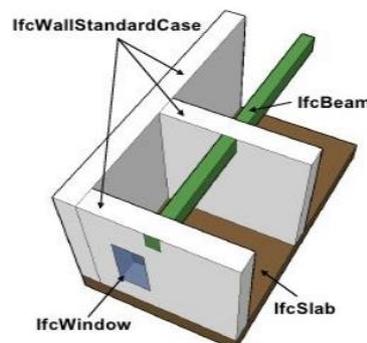


Figure 16 : Classe d'objets IFC

3.10. Les Outils du BIM

On distingue 3 types d'outils BIM :

- Outils de modélisation
- Les visionneuses BIM
- Les plateformes collaboratives BIM

3.10.1. Outils de modélisation

Les outils de modélisation sont principalement utilisés lors des phases de conception et construction par l'équipe de maîtrise d'œuvre (architecte et bureaux d'études) et les entreprises de construction. Il

existe une panoplie des éditeurs de logiciels BIM et fournisseurs de services de modélisation pour la filière BTP numérique dont les plus célèbres sont Autodesk, Bentley, ArchiCAD ou encore Tekla.

Les outils de modélisations se partagent en trois grandes familles :

- Outils de modélisation généralistes : ils peuvent être utilisés dès la phase de l'esquisse, ils permettent la modélisation de tout corps d'état, parmi lesquelles on cite : Autodesk Revit, Graphisoft ArchiCAD, SketchUp...
- Outils de modélisation techniques : ils sont plus spécialisés et permettent des calculs et des analyses, parmi lesquelles on cite : Autodesk Robot Structural Analysis, Tekla Structure...
- Outils liés aux métiers de l'économie de la construction, parmi lesquelles on cite : Devisoc, ATTIC

3.10.2. Visionneuses BIM

Les visionneuses BIM permettent aux intervenants de visualiser le projet durant ses différentes étapes. Il existe actuellement des visionneuses BIM gratuites telles que Solibri, TeklaBIMsight ou encore BIM Vision. Celles-ci possèdent parfois des fonctionnalités supplémentaires comme la sélection des objets par corps de métiers ou par classes d'objets, des outils de mesures de volumes, de surface ou de longueur, et différents paramètres de modes de vues.



Figure 17 : exemple d'une visionneuse BIM

3.10.3. Les plateformes collaboratives

La principale démarche du BIM est la collaboration. Il est donc nécessaire d'utiliser un outil accessible par tous les intervenants permettant le partage, le stockage et l'interaction autour des différentes données (modèle 3D, plans, documents écrits, notices techniques) ainsi que les différentes mises à jour effectuées sur les données.

Parmi les plateformes de la collaboration les plus célèbres, on cite AUTODESK BIM360, TrimbleConnect, BIM+.

ÉLÉMENTS DU DISPOSITIF BIM PLATEFORME DE COLLABORATION

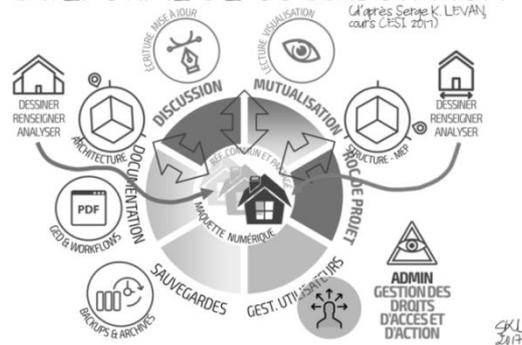


Figure 18 : éléments d'une plateforme de collaboration

3.11. BIM et pratiques contractuelles

La réalisation d'un projet en démarche BIM nécessite une évolution des pratiques des professionnels de l'acte de concevoir, de construire, d'exploiter et de maintenir l'ouvrage livré. Compte tenu des spécificités du processus BIM, il est nécessaire de « manager » l'ensemble des acteurs, en s'appuyant sur trois documents contractuels :

- La convention BIM
- Le cahier de charge BIM
- La charte BIM

3.11.1. La convention BIM

Afin de fixer les règles et de donner une référence commune aux acteurs, le BIM Management s'appuie sur une convention BIM. La convention BIM doit inventorier les spécificités du projet, ses acteurs, les rôles et responsabilités de chacun, mais fixer aussi les exigences pour « bien » dessiner, « bien » produire et « bien » échanger. Ce document décrit le processus opérationnel et technique d'exécution BIM du projet durant les différentes phases.

Il s'agit ainsi de mettre en place les processus ou usages BIM liés à la réalisation des objectifs BIM du projet. Bien évidemment, cette convention pourra – et même devra – évoluer au gré de l'avancement de l'opération, de la modification des acteurs, mais aussi des objectifs BIM du projet, tout en restant le document de référence de la réalisation de la démarche BIM.

3.11.2. Le cahier de charge BIM

Document du maître d'ouvrage (MO) précisant pour le projet les exigences et objectifs des intervenants successifs du projet, ainsi que ses attentes liées au BIM.

3.11.3. La charte BIM

La charte BIM définit les règles communes applicables par les intervenants et les principes généraux de modélisation et de nomenclatures. L'objectif est d'harmoniser les pratiques pour l'obtention d'une maquette cohérente.

3.12. Utilisation du BIM au Monde

Le BIM connaît un essor mondial et une adoption massive dans certains pays depuis plusieurs années. Voici un tour de monde du BIM :

- Royaume uni : En 2016, le gouvernement britannique a obligé l'utilisation du Niveau 2 du BIM, pour tous les marchés publics, et il a déclaré la volonté de la Grande Bretagne de se transformer en un leader mondial du BIM et ses technologies Connexes.
- Pays Bas : En 2012, le ministre Néerlandais d'intérieur a rendu le BIM une obligation pour tous les travaux publics.
- Espagne : En 2015, l'Espagne a mis en place une Commission pour le déploiement d'une méthodologie BIM, qui intègre tout l'écosystème de la construction y compris l'enseignement académique.
- Etats unis : En 2003, le programme 3D-4D-BIM a été lancé par les services généraux d'administration (GSA), pour rendre le BIM une obligation pour toute candidature dans les marchés publics.
- France : Le déploiement du BIM en France a été accompagné par une série d'encouragements menés par différentes structures publiques. La république française n'a pas rendu obligatoire le BIM préférant le faire rentrer « modestement » dans le Code des marchés publics, pour qu'il soit le Marché qui l'impose.

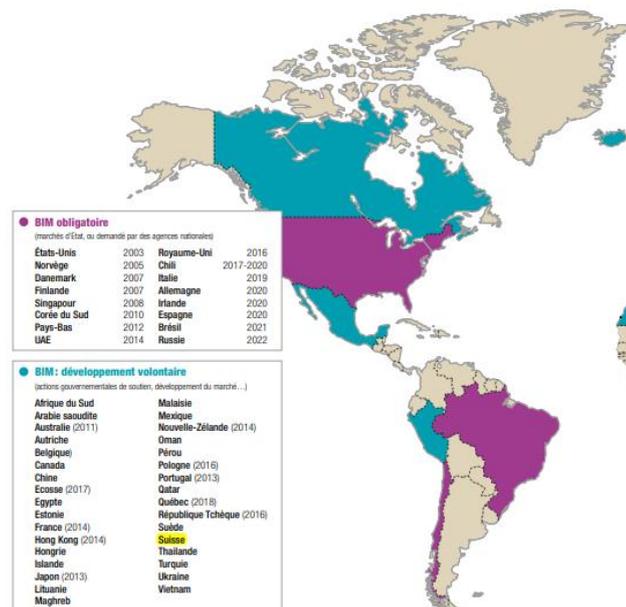


Figure 19 : utilisation du BIM au monde

3.13. Quelques projets BIM

Le BIM connaît un essor mondial et une adoption massive dans certains pays et ce depuis plusieurs années. Parmi les projets BIM réalisés au monde, on cite :

- Le Terminal Midfield de l'aéroport international d'Abou Dhabi : construit par China State Construction Engineering Corporation. Ce bâtiment de 180 mètres comprend 18 voûtes d'acier indépendantes. La maquette numérique BIM a permis de réduire la durée et d'améliorer la productivité du projet.



Figure 20 : Aéroport international d'Abou Dhabi

- La passerelle Isoisänsilta en Finlande est un passage est de 152 mètres, reliant le quartier Kalasatama, Mustikkamaa et les îles Korkeasaari à Helsinki. L'équipe a su optimiser l'utilisation des données BIM, en réduisant l'impression des documents pour la construction.



Figure 21 : Passerelle Isoisänsilta en Finlande

- Tour CFC, réalisée par BYMARO , la filiale marocaine de Bouygues Bâtiment International est une tour de 122 mètres de haut à Casablanca (Maroc) qui s'étend sur 320 Hectares sur le site de Casa Anfa. Le BIM a été exploité dans toutes les étapes de ce projet.



Figure 22 : Tour CFC. Casablanca, Maroc

- Le grand théâtre de Rabat est parmi les monuments culturels les plus célèbres à travers le monde, l'utilisation du BIM a facilité la réalisation de cette structure complexe

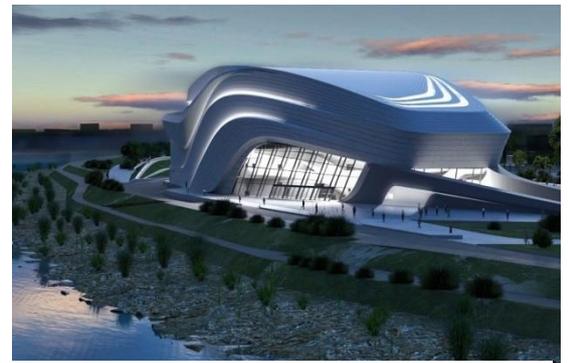


Figure 23 : Grand théâtre de Rabat, Maroc

IV. BIM au service des infrastructures

4.1. Introduction

L'utilisation du BIM pour l'infrastructure permet de mieux exploiter les informations et les données afin d'optimiser les conceptions et d'accélérer le processus de validation pour construire des infrastructures plus efficaces et durables.

Le BIM rationalise la planification et la conception grâce à la mise en place des flux de travail intelligents et connectés ce qui permet d'optimiser la durabilité, la productivité et la rentabilité des ouvrages et projets d'infrastructure.

4.2. Enjeux du BIM dans le domaine d'infrastructure

Dans le domaine des infrastructures, le BIM est encore peu utilisé et reste à organiser, les méthodes de travail étant différentes à celles utilisées pour le domaine des bâtiments, et les éléments de conception moins adaptés à un traitement sous forme d'objets liés à des données (par exemple un axe en plan ou un profil en travers ne sont pas reconnus en tant qu'objets échangeables au format IFC, ceux-ci étant conçus comme surfaces et non comme objets 3D).

En 2014, la France a lancé un projet national de recherche collaborative MINnd « Modélisation des informations interopérables pour les infrastructures durables » qui traite la structuration des informations utilisées pour modéliser les infrastructures dans leurs phases de conception, de construction et d'exploitation, en partenariat avec buildingSMART France, et qu'il est un contributeur reconnu et apprécié dans les instances internationales de normalisation. Ce travail n'est pas terminé, une deuxième saison du programme est lancée entre 2019 et 2021.

Au niveau mondial, BuildingSmart a mobilisé ces partenaires pour l'élaboration de la version 5 IFC (IFC5) pour la normalisation du domaine d'infrastructure.

4.3. Utilisation du BIM dans le domaine d'infrastructure

Le BIM a démontré plusieurs avantages dans le domaine d'infrastructure du transport et les différents secteurs associés, notamment le secteur ferroviaire, aéroportuaire et les routes intelligentes. Le taux d'utilisation du BIM diffère en fonction de ces secteurs, dans ce sujet, une enquête internationale a été menée par Dodge Data & Analytics en 2017, un organisme mondial des statistiques et analyses sectorielles.

L'étude a pour but d'analyser l'utilisation et le degré de mise en œuvre du BIM dans le secteur de l'infrastructure des transports dans plusieurs pays au monde.

Selon de rapport de cette étude, on trouve que le BIM est utilisé en France, en Allemagne, au Royaume-Uni et aux Etats-Unis dans les secteurs des :

- Ouvrages d'art (ponts et tunnels) avec un taux de 75 %
- Routes et autoroutes avec un taux de 62 %
- Infrastructures aéroportuaires avec un taux de 49 %
- Voies ferres et transport en commun avec un taux de 45 %
- Autres infrastructures avec un taux de 49 %

4.4. Conclusion

La présente partie permet la familiarisation avec le monde du BIM, et concrétise les avantages de cette solution sur les méthodes de travail courantes.

Par conséquent, ce projet fin d'études énonce d'une façon détaillée la mise en place du BIM dans le domaine d'infrastructure à travers un cas d'étude concret qui combinera l'efficacité du BIM et la maîtrise de l'ingénierie.

Sur ce, la prochaine partie de ce chapitre concerne plus spécifiquement des généralités sur le projet étudié, il nous permettra de décortiquer les notions de base des échangeurs, et les différentes parties qui les constituent, en abordant leurs types, leurs avantages et domaines d'adoption, ainsi que comment ils peuvent résoudre les problèmes de connexion entre les différents réseaux routiers.

V. Echangeurs

5.1. Introduction

L'homme de par sa nature a toujours cherché à se simplifier sa vie ou à rechercher des solutions aux problématiques auxquels il fait face. Dans le domaine routier, domaine s'occupant du transport et de l'évacuation des personnes et marchandises de tout ordre, l'homme a inventé plusieurs moyens pour résoudre les problèmes de déplacement. Donc, pour faciliter la circulation, éviter les collisions et congestions aux carrefours situés dans le même plan, il a été créé les échangeurs autoroutiers. Ces derniers avec leurs formes architecturales souvent spectaculaires, jouent des rôles non moins importants dans les trafics routiers.

Le but de cette partie est de mieux saisir cet élément de la route qui permet chaque jour le déplacement des millions d'usagers de par le monde.

5.2. Description d'un échangeur

Un échangeur est un croisement dénivelé sur lequel les transferts de trafic sont séparés les uns des autres. Il permet de s'engager sur une voie rapide ou sur une autoroute en prévenance d'une route ordinaire ou une autre autoroute.

Les échangeurs se trouvent donc aux intersections entre autoroutes, ou entre une autoroute et un autre type de route.

On distingue **les bifurcations ou nœuds** qui assurent les liaisons entre autoroutes et **les diffuseurs** qui relient celles-ci à des voiries ordinaires. On distingue aussi **les branches**, présentes sur les nœuds, et **les bretelles** présentes sur les diffuseurs.

Un échangeur autoroutier est donc un dispositif de raccordement entre plusieurs routes et autoroutes sans croisement à niveau.



Figure 24 : échangeurs autoroutiers

Un échangeur autoroutier compte au minimum un passage inférieur ou supérieur permettant à une route d'enjamber l'autre et d'un système de bretelles ou de branches. Dans les cas les plus complexes, les chaussées peuvent s'étager sur des niveaux différents.

Un échangeur peut être complet (bidirectionnel) ou partiel (donnant accès à une seule direction de l'autoroute).

5.3. Rôle des échangeurs

Un échangeur permet l'échange entre deux routes, dans des conditions de circulation libres et sécuritaires, sans qu'elles se croisent en plan, ce qui limite le ralentissement dans les routes à grand niveau de trafic.

Ils présentent des ouvrages d'art modernes qui riment parfaitement avec leurs environnements d'implantation, en offrant un meilleur cadre de vie aux citoyens et des meilleures conditions de conduite aux usagers de la route.

Les échangeurs sont parmi les facteurs de développement économique et urbain.

5.4. Type des échangeurs

Pour réussir le choix du type de l'échangeur, il faut tout d'abord savoir la nature des routes qui se croisent. On distingue les diffuseurs, un système de bretelles routières, qui relient les autoroutes à des voies ordinaires, et les nœuds à trois ou quatre branches qui relient des autoroutes.

Sur ce, on trouve plusieurs types d'échangeurs :

- **Echangeurs en trèfles** : ils sont souvent utilisés en Allemagne et aux Etats unis depuis 1930. Ils se composent généralement de deux niveaux, ils sont adaptés aux grands flux de trafic et ils demandent une grande emprise de sol.

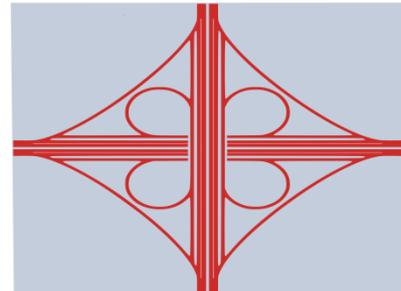


Figure 25 : échangeur en trèfle

- **Echangeurs en turbine** : Ils occupent la même emprise de sol que les échangeurs en trèfles mais ils sont caractérisés par des rayons plus grands ce qui améliorent le confort des conducteurs et augmentent leur sécurité. On distingue trois exemples courants de ce genre d'échangeurs : échangeurs en turbine complète, échangeurs en turbine annulaire et en turbine simplifiée

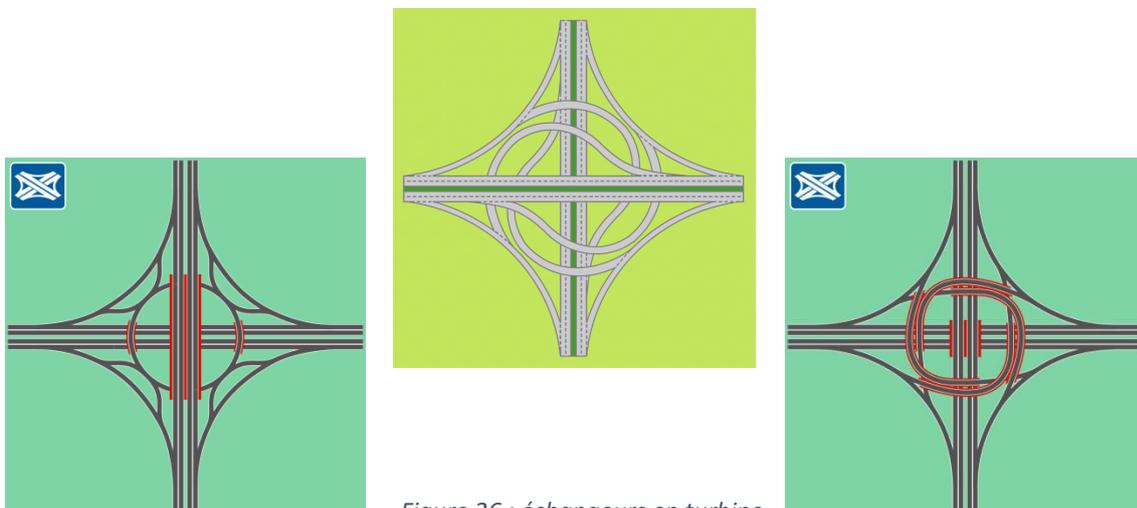


Figure 26 : échangeurs en turbine

- **Echangeurs Turcot** : Ils se composent de trois niveaux, apparus en 1966 à Québec et ils sont nommés en l'honneur du marchand Philippe Turcot (1791-1861).



Figure 27 : échangeur Turcot

- **Echangeurs à 4 niveaux** : Ils sont construits, comme leur nom l'indique, sur quatre niveaux : deux niveaux sont dédiés aux croisements des axes autoroutiers et deux autres, généralement situés au-dessus des deux premiers, sont utilisés par les bretelles entre autoroutes. Certains échangeurs aux États-Unis, de par l'empilement des niveaux, atteignent ainsi les 25 mètres de hauteur.

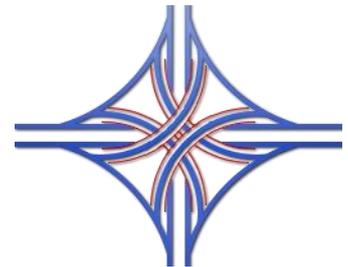


Figure 28 : échangeur à 4 niveaux

- **Echangeurs à 5 niveaux** : Ils sont construits sur cinq niveaux, le plus célèbre est «High five Interchange » à Dallas.



Figure 29 : échangeur à 5 niveaux

- **Echangeur trompette** : C'est un diffuseur correspondant au raccordement de deux voies (la voie rapide, une autre voie)



Figure 30 : échangeur trompette

5.5. Critères de conception d'un échangeur

Le principal objectif d'un échangeur est de servir aux intérêts des usagers. Donc lors de sa conception, on tient compte des paramètres tels que :

- La sécurité
- La classification des routes qui se croisent
- La vitesse de base
- Le débit et la composition du trafic

- Le nombre de branches de l'échangeur
- Les dispositifs de régulation de la circulation
- Le relief
- Les besoins d'emprise et de terrain
- Les aspects reliés aux réseaux et la cohérence de l'aménagement
- L'environnement
- Les aspects économiques.

Ces éléments favorisent la compréhension des concepteurs et celle des conducteurs qui empruntent ces ouvrages. Pour s'assurer du bon fonctionnement de la route lors de la conception, il faut donc considérer l'autoroute et les échangeurs comme un seul système. La construction d'un échangeur est une solution intéressante à de nombreux problèmes reliés aux carrefours plans.

5.6. Les éléments de justification de l'aménagement d'un échangeur

Les critères qui suivent donneront les lignes directrices à prendre en considération lors de la justification et de la décision du choix d'aménagement d'un échangeur :

- **Circulation** : il faut évaluer le débit de circulation par rapport à la capacité de la route existante. Ce critère est le plus concret pour justifier l'aménagement d'un échangeur
- **Sécurité** : certains carrefours plans ont un taux de collision élevé et il est impossible de modifier la configuration. Il peut être approprié de prévoir l'aménagement d'un échangeur comme mesure de sécurité.
- **Relief** : les échangeurs peuvent être prévus à l'endroit où un carrefour plan ne peut être envisagé à cause du relief.

5.7. Emplacement des échangeurs

Il s'agit d'identifier les zones susceptibles de nécessiter l'implantation d'un échangeur au regard des principales fonctionnalités de l'infrastructure. Compte tenu de la configuration de l'aire d'études et des besoins en desserte du territoire.

La présence d'un bassin de vie, d'une infrastructure de transport importante, d'une zone d'activités significative dans un secteur sont d'autant d'atouts pour justifier l'étude de l'implantation d'un échangeur.

Sur les autoroutes urbaines, les conditions de la circulation et le comportement des conducteurs influent sur l'espacement des échangeurs. La distance à parcourir est plus courte et les débits de circulation plus élevés. Pour assurer une bonne desserte du milieu, il faut prévoir des échangeurs rapprochés, l'exploitation de l'autoroute peut en souffrir et perdre sa capacité d'absorption et de distribution de la circulation.

L'espacement des échangeurs en milieu urbain varie normalement de 2 à 3 km. Les échangeurs devraient être situés sur les artères principales qui font partie du réseau de l'agglomération urbaine. En milieu rural, l'emplacement des échangeurs est lié au besoin de desserte d'une population compte tenu de son activité économique et ses indicateurs démographiques.

Il est à noter que plus les échangeurs sont rapprochés, plus les risques de collision sont élevés, un aspect indispensable pour établir l'espacement et l'emplacement des échangeurs.

5.8. Éléments qui constituent un échangeur

Comme déjà mentionnée, les échangeurs sont souvent composés d'un ouvrage d'art de franchissement (les ponts) et des bretelles qui relie l'échangeur à une autoroute ou à une route de réseau ordinaire.

5.8.1. Bretelles

Une bretelle d'échangeur est une chaussée de raccordement à sens unique ou à deux sens qui relie deux routes. Elle est composée d'un raccordement de sortie et un raccordement d'entrée. Les bretelles assurent l'écoulement de la circulation soit en direction ou en provenance d'une autoroute.

Sa configuration est déterminée lors du choix du type d'échangeur et ses caractéristiques géométriques définis selon plusieurs critères :

- Débit et composition de la circulation
- Caractéristiques géométriques et d'exploitation des routes adjacentes
- Relief
- Dispositifs de régulation de la circulation
- Sécurité et confort des usagers

Fonctionnement d'une bretelle

Les bretelles des échangeurs jouent plusieurs rôles d'où ils doivent satisfaire à une succession des zones pour garantir la sécurité des usagers et satisfaire la transition entre deux réseaux routiers différents :

- **Zone 1** : Le dispositif de déboitement ou d'insertion, où la manœuvre doit pouvoir s'effectuer
- **Zone 2** : Une zone de décélération ou d'accélération, permettant la transition entre Vitesse de sortie et la vitesse admissible en fonction des caractéristiques de la bretelle (et inversement)
- **Zone 3** : Une zone de raccordement, constitué par une succession de rayons en plan, qui doit être parcourue à $V(R)$, vitesse admissible en fonction de la valeur du rayon R
- **Zone 4** : Une zone de transition permettant le raccordement de la section courbe à l'autoroute ou à une autre voie rapide ou ordinaire.

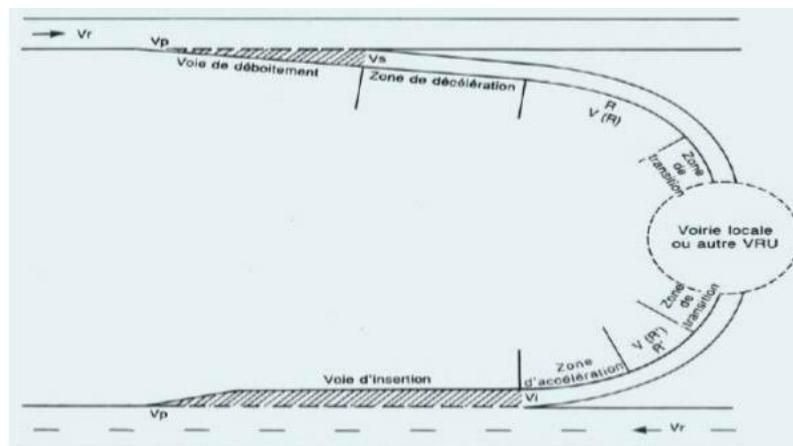


Figure 31 : éléments constituant une bretelle

5.8.2. Ouvrages d'art de franchissement

Pour franchir l'autoroute, les ouvrages peuvent être des passages supérieurs ou inférieurs. Le franchissement en passage inférieur est plus compliqué lorsqu'il s'agit d'une autoroute déjà construite.



Figure 32 : passage inférieur



Figure 33 : passage supérieur

D'une façon générale les ponts, sont des ouvrages en élévation, permettant à une voie de circulation de franchir un obstacle ou une voie de circulation, Mais particulièrement, au cas des échangeurs, c'est un ouvrage permettant à une autoroute de franchir l'autre en deçà. Ils sont souvent constitués de piles, des piles culées, des poutres multiples ou d'une dalle, des garde corps et des appareils d'appui etc.

a- Tablier

Le pont peut être un pont à poutres, un pont dalle ou un pont métallique. La configuration du tablier varie en fonction du type de pont choisi.

Pont à poutres

Quand il s'agit d'un pont à poutres, le tablier est constitué par des poutres en béton précontraint ou en béton armé ou elles peuvent être métalliques. Les poutres prennent plusieurs formes, ils peuvent être en I, des poutres-caissons, des poutres multiples, des poutres caissons multicellulaires, etc.

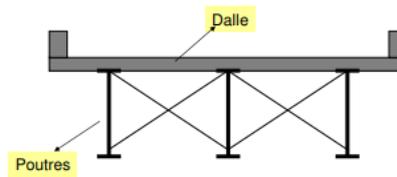


Figure 34 : poutre multiple

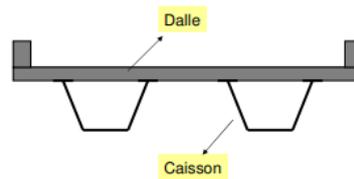


Figure 35 : poutre caisson multiples

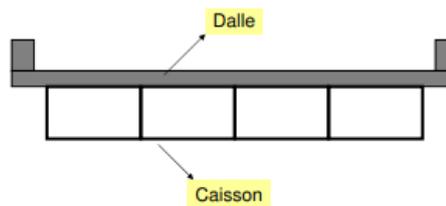


Figure 36 : poutres caisson multicellulaires

Ils sont généralement couvertes par d'une dalle d'une petite épaisseur surmontée d'une couche d'étanchéité puis d'une couche de roulement en béton bitumineux

Pont dalle

Quand il s'agit d'un pont dalle, comme son nom l'indique, le tablier est constitué d'une dalle qui peut être quant à elle armée, précontrainte, élégie, ou nervurée. Après la dalle est elle aussi surmontée des deux couches (couche d'étanchéité et couche de roulement).



Figure 37 : Sections transversales des ponts dalles

Il est indispensable de prévoir un système d'évacuation des eaux pluviales pour éviter l'inondation de la chaussée. Celui-ci est généralement constitué de gargouilles disposées tous les 20 m environ. Elles recueillent l'eau de surface et l'évacuent par des chéneaux vers les descentes d'eau situées au niveau des piles.

b- Les appuis

Ils constituent les éléments verticaux du franchissement qui transmettent les charges au sol. Le choix du type des fondations des appuis est strictement lié aux données géotechniques du sol.

Les piles

Elles comportent généralement deux parties :

- La superstructure ou le fut : la partie vue des piles, elle comporte des éléments verticaux qui peuvent être des voiles, des poteaux ou des colonnes
Les voiles sont des éléments longs, de section allongée, ils comportent au minimum 2 points d'appui pour supporter le tablier : pile de type voile
Les poteaux ou les colonnes sont des éléments courts, de faible sections, ils peuvent comprendre chacun un point d'appui, ou ils peuvent être reliés au sommet par un chevêtre : piles de type poteau

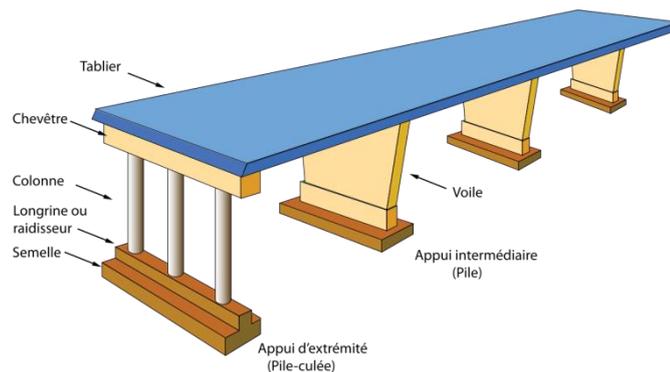


Figure 38 : composants des piles de pont

- La fondation : la partie enterrée de la pile, qui permet de transmettre les charges au sol, ils peuvent être superficielle ou profondes

Les piles sont généralement en béton armé, ou en béton précontraint et rarement en acier.

Les culées

Appui d'extrémité, elles assurent le soutènement du remblai d'accès à l'ouvrage.

Les culées comportent 4 parties :

- Une fondation
- Un mur de front, sur lequel s'appuie le tablier et qui assure la stabilité du remblai d'accès
- Un mur de tête, qui assure le soutènement des remblais latéralement.
- Une partie supérieure (chevêtre) sur laquelle s'appuie le tablier.

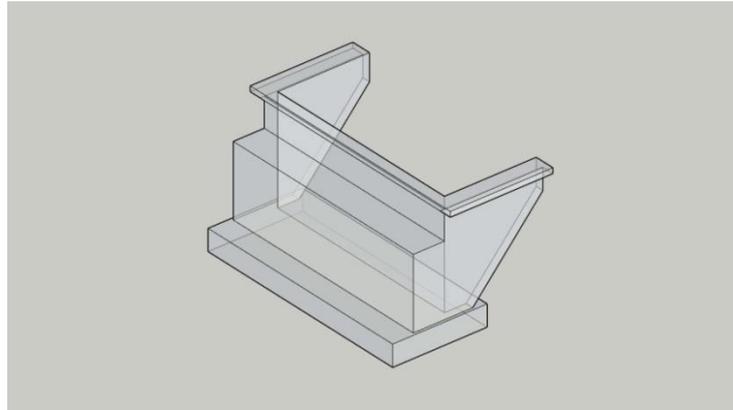


Figure 39 : culée du pont

5.9. Conclusion

Les échangeurs sont une solution efficace pour améliorer les connexions et mieux desservir la population. Ils permettent une circulation fluide contrairement aux carrefours plans.

Mais ils sont des zones critiques où le concepteur doit garantir un grand niveau de sécurité, et le conducteur doit adapter sa vitesse et son comportement.

Conclusion

Ce projet fin d'études effectué au sein des équipes de Team Maroc est une véritable occasion pour l'apprentissage, la recherche et le développement pour l'atteinte de ses objectifs généraux et spécifiques, en suivant la méthodologie prédéfinie dans ce chapitre.

Après avoir fait un tour d'horizon sur les notions de base du BIM, ainsi qu'une introduction au monde des échangeurs, le chapitre suivant concrétise l'étude du projet, à travers différentes phases de la conception commençant par la modélisation de l'existant jusqu'à la validation du choix de la variante la plus optimale.

Chapitre 2 : Etude d'avant-projet

I. Description du projet

1.1. Introduction

La société nationale des Autoroutes du Maroc (ADM) a confié au Bureau d'études TEAM MAROC, filiale de JESA, la réalisation de l'étude d'un échangeur au niveau d'Ain Dahlia du PK38 de l'autoroute en service n°5 Rabat-Port Tanger Med, au tronçon Tanger-Port Tanger Med, qui assurera l'accès au centre de la ville de Tanger en se raccordant à la RP4602.

Selon les termes de référence du CPS, cette étude a été subdivisée en quatre Phases :

- Phase 1 : Esquisse d'Aménagement.
- Phase 2 : Etude de la géométrie préliminaire.
- Phase 3 : Etude d'exécution.
- Phase 4 : Etude des lots annexes.

Dans le cadre de cette étude, nous nous contenterons de traiter les trois phases de la conception, de l'esquisse à l'étude d'exécution.

1.2. Contexte du projet

L'échangeur sujet de l'étude sera implanté au droit du passage supérieur rétablissant la RP4608 au niveau du PK 38 de l'autoroute n°5. Il se raccorde sur la RP 4602 qui permet l'accès à la ville de Tanger via l'Avenue Al Qods.

Le but d'implantation de cette infrastructure est d'assurer un bon accès aux différents projets urbanistiques, industriels et touristiques qui sont lancés ou programmés dans la zone, à partir de l'autoroute n°5. Il permettra également de décongestionner l'accès à Tanger par la RN1 qui connaît un trafic important.

Dans le même contexte, La Direction Régionale de l'équipement de Tanger a également programmé l'aménagement de la RP4602 en 2x2 du PK 0+00 au PK 7+000 et son élargissement à 7m de chaussée et 2x2.5m d'accotement sur le reste du tracé, pour permettre d'accueillir le trafic en provenance du futur échangeur.

Cet échangeur a été déjà prévu dans le cadre de l'étude de l'autoroute Tanger-Port Tanger Med mais sa réalisation a été différée. Actuellement le site qui a été retenu pour l'aménagement de cet échangeur se trouve occupé par des logements militaires, d'où la nécessité d'étudier un nouveau emplacement. La société des autoroutes du Maroc a déjà réalisé une étude de faisabilité pour l'aménagement de cet échangeur en tenant compte des contraintes et de l'occupation du sol actuel.

1.3. Reconnaissance du site du projet

Une bonne reconnaissance du site de projet permet d'identifier les différentes contraintes existantes du site d'implantation du futur échangeur qui conditionneront les solutions d'aménagement à proposer.

Les contraintes du projet soulevé sont les suivantes :

- Lotissement militaire
- Constructions de bonne qualité au niveau de la RP4602
- Une Ligne électrique THT
- Une Ligne électrique HT
- Ligne BT le long de la RP4602
- Une conduite Ø1800 le long de la RP4602, pour le renforcement du réseau d'eau potable de la ville de Tanger
- Une conduite d'eau potable le long de l'autoroute

1.4. Réseau routier dans la zone d'étude

Le réseau routier de la région de Tanger-Tétouan se compose de plusieurs réseaux de niveau hiérarchique différent :

1.4.1. Le réseau autoroutier d'une longueur de 214 km

Le réseau autoroutier se limite à l'autoroute du Nord, qui relie Tanger au Sud du Royaume (Kenitra, Rabat, Casablanca, etc.), le long de la côte Atlantique. A l'intérieur de la région, cette infrastructure compte 2 voies de circulations par sens, séparées par un terre-plein central et munies de bandes d'arrêt d'urgence. Quatre diffuseurs relient l'autoroute avec le réseau local : Larache, Sidi Lyamani, Assilah et Gueznaya. Réalisée progressivement depuis le Sud, atteignant Gueznaya (en périphérie de Tanger, à 10 km du centre-ville), c'est une infrastructure payante, exploitée par ADM. Cette autoroute se prolonge par l'autoroute A 4 également payante pour se connecter au port Tanger Med est d'une longueur de 56 km, subdivisée en trois section : la section Tanger - Tanger Est (N2), la section Tanger Est – Melloussa et la section Melloussa – port.

1.4.2. Le réseau routier classé (hors autoroutes)

Dans la région de la DPE de Tanger, la longueur totale du réseau classé est de 377 km qui se répartissent en 138.5 km pour les routes nationales, 24 km pour les routes régionales et 215.5 km pour les routes provinciales.

Selon le dernier relevé visuel (ISU), l'état du réseau routier revêtu de la zone d'étude est qualifié à 56 % de "Bon à Assez Bon" contre 66% à l'échelle nationale.

La structure du réseau routier classé selon la catégorie de route dans la zone immédiate de l'étude est la suivante :

- **Le réseau routier national** comprend les routes N1 (Rabat – Tanger), N2 (Tanger – Al Hoceima, via Tétouan et Chefchaouen), et N16 (Tanger – Al Hoceima sur la côte méditerranéenne)
- **Le réseau routier régional** comprend la R417 (Sidi Lyamani – RN2, entre Tanger et Tétouan). Elle présente des profils courants à une voie par sens de circulation et ont toutes été récemment aménagées pour une meilleure sécurité.
- **Le réseau routier provincial** structure l'accès aux zones rurales. Sur les 216 km de linéaire, seuls 10 km ne sont pas encore revêtus. Avec un profil en travers de l'ordre de 5 mètres, ce sont des routes théoriquement réservées à un trafic d'accessibilité locale.

1.4.3. Le réseau routier non classé : routes communales et pistes rurales

Le 2e Programme national de routes rurales (PNRR2), a prévu, au niveau de la région de Tanger-Tétouan, la réalisation de 1.020 km de routes rurales équipées.

Le programme vise à désenclaver 67% de la population rurale dans la région, à travers la réalisation de 145 km de routes par année.

Infrastructures du transport

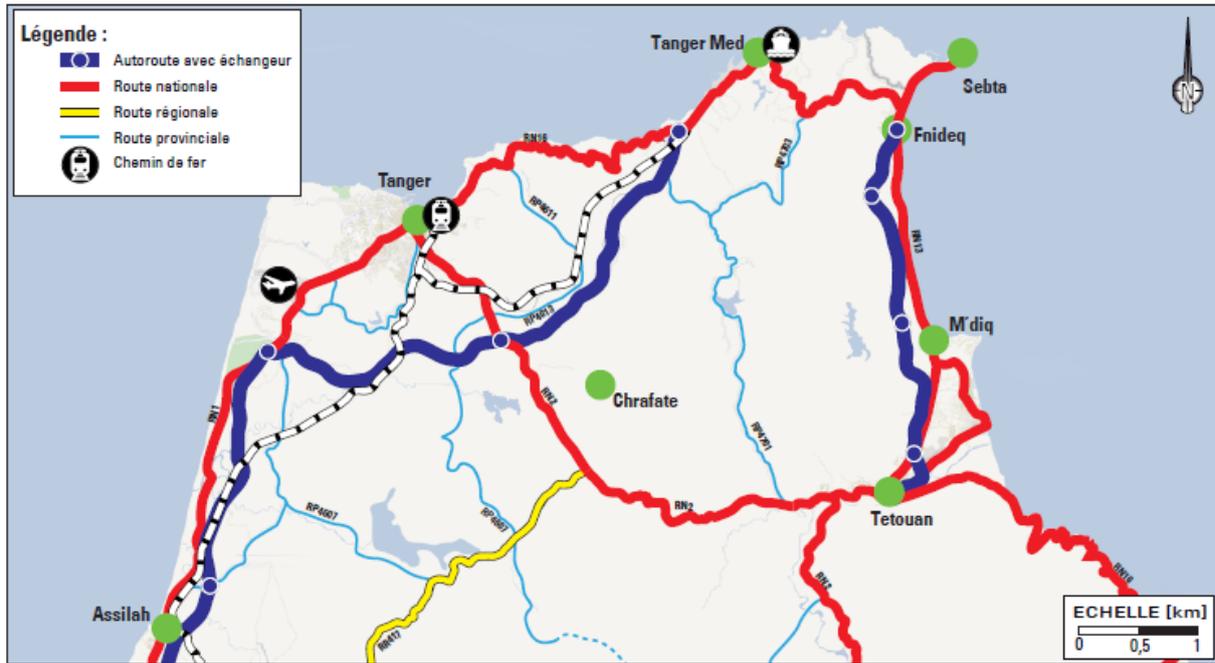


Figure 40 : réseau routier dans la zone du projet

1.5. Perspectives de développement

La zone d'étude comprend les vastes zones industrielles de Renault, Melloussa 1B et Jouamâa 1B, mais aussi d'importantes zones de lotissement et les douars proches dont la ville nouvelle de Chrafate jouera le rôle de chef-lieu.

A l'horizon 2030, la population de l'agglomération et de la ville nouvelle atteindra approximativement 245 000 habitants dont 95 000 habitants générés par l'agglomération. Les fortes augmentations seront enregistrées au niveau de Douar Brarak, Jouamaa, Arzib Boulaich, Dar Homran, El Borj et douar Rhdird Defla.

Perspective de développement démographique à terme

JUILLET 2011

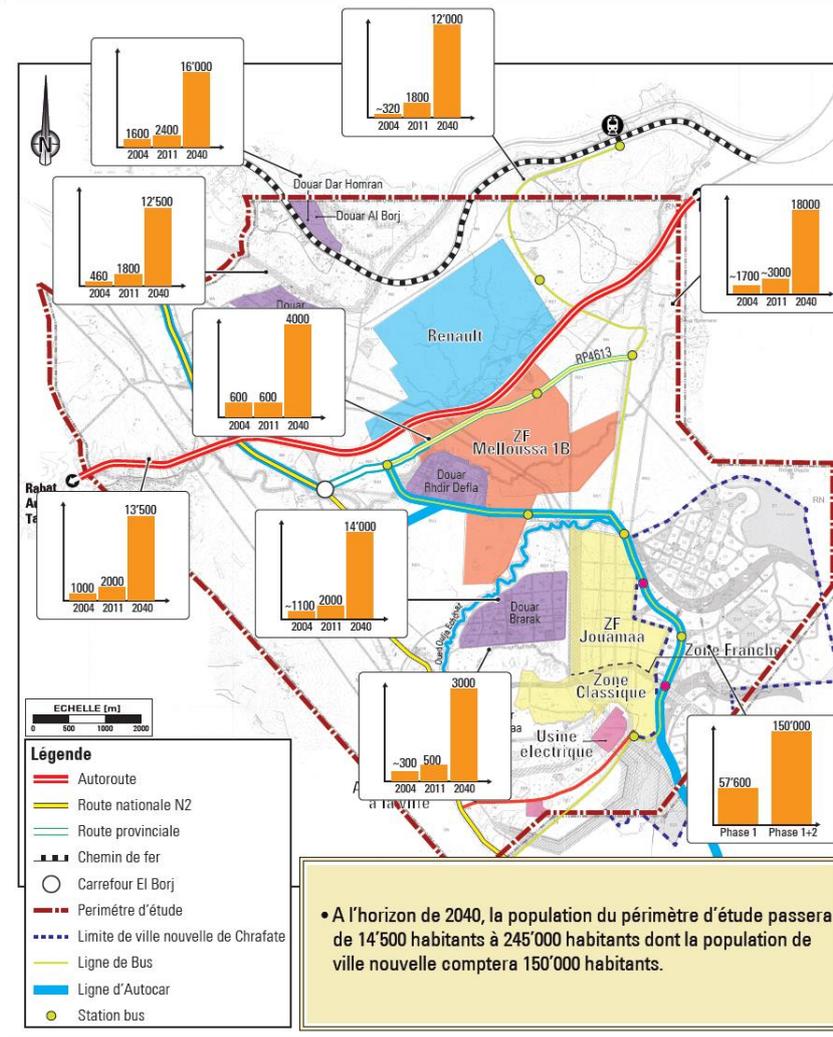


Figure 41 : perspective de développement dans la zone du projet

Les emplois générés à terme sont approximativement 63000 emplois dont 33000 emplois par l'agglomération et 30000 emplois par les zones d'activités (Renault, Melloussa 1B, Jouamaà 1B et zones industrielles classiques)

En conséquence, l'infrastructure interceptera des flux de trafic des résidents, des employés et des visiteurs.

1.6. Conclusion

Le projet sujet de l'étude répond aux perspectives de développement de la zone. Il va permettre de décongestionner le trafic au niveau de la route nationale N1, améliorer l'accès à la ville de Tanger et aux projets urbanistiques, industriels et touristiques ainsi qu'à la nouvelle ville, chef du lieu, de Chrafate.

Nous développerons, par la suite, l'étude préliminaire et détaillée correspondantes à chaque phase du projet

II. Modélisation du site du projet

2.1. Introduction

La modélisation de l'existant est un élément nécessaire pour la compréhension de l'environnement du projet, et pour réussir les choix de la conception.

La modélisation du site inclut tous les éléments qui constituent l'environnement du projet.

L'outil de la modélisation dans le workflow à développer est le logiciel Infracore360.

2.2. Aperçu sur le logiciel INFRAWORKS

Pour démarrer l'utilisation du BIM pour un projet d'infrastructure, il faut commencer par créer un modèle intelligent à partir de différentes sources de données, qui aidera à accélérer le rythme de tout le projet.

Dans un processus BIM, un modèle de l'environnement existant est en 3D, fiable sur le plan spatial et riche en données.

La création de ce modèle est effectuée dans le logiciel Autodesk InfraWorks 360, un outil d'ingénierie et de conception préliminaire qui prend en charge les processus BIM. Il permet d'agrémenter le modèle par des données spatiales de sources diverses sans nécessiter leur conversion.

La conception préliminaire dans le logiciel Infracore 360 diffère d'une conception préliminaire basée sur la CAO classique ; Il permet d'ajouter des éléments de modèle plus rapidement, de créer et évaluer plusieurs alternatives, et présenter différentes options de façon plus efficace dans le contexte de l'environnement existant aux décideurs du projet.

2.3. Création de la zone du projet

Le modèle intelligent du projet commence par intégrer l'environnement existant du site à partir de l'outil Model Builder d'Infracore. Il permet de créer un modèle réaliste afin de l'exploiter dans la conception ; Les données acquises et intégrées sont de différentes sources notamment :

- **Données topographiques** sont générées de la base de donnée fournies par la NASA / NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) pour l'Amérique, et de la base de données [SRTM GL1 Global 30m](#) pour L'Europe, le Moyen Orient et l'Afrique. La précision de ces données est de l'ordre d'un maillage de 20 m / 30 m en planimétrie, et de l'ordre de +/- 10 cm en plaine à +/- 1 à 2 m voire plus en zone à forte déclivité, en altimétrie.
- **Les objets routes, rails, bâtiments** sont modélisés depuis OpenStreetMap, qui est la plus grande base libre de données géographiques au Monde, avec la précision des attributs propres à chaque objet.
- **L'image aérienne** est un flux Bing Maps. La résolution au sol est réglable à tout moment depuis Infracore sur une plage de 78 000 m/pixel à 0,29 m/pixel.

Pour notre projet, la zone d'intérêt a une étendue de 20 Km². Il s'agit d'une délimitation rectangulaire qui englobe la zone d'implantation du projet, et son environnement annexe.

Il est indispensable également de préciser le système de coordonnées du projet, dans ce cas, il s'agit Merchich.Nord Maroc.

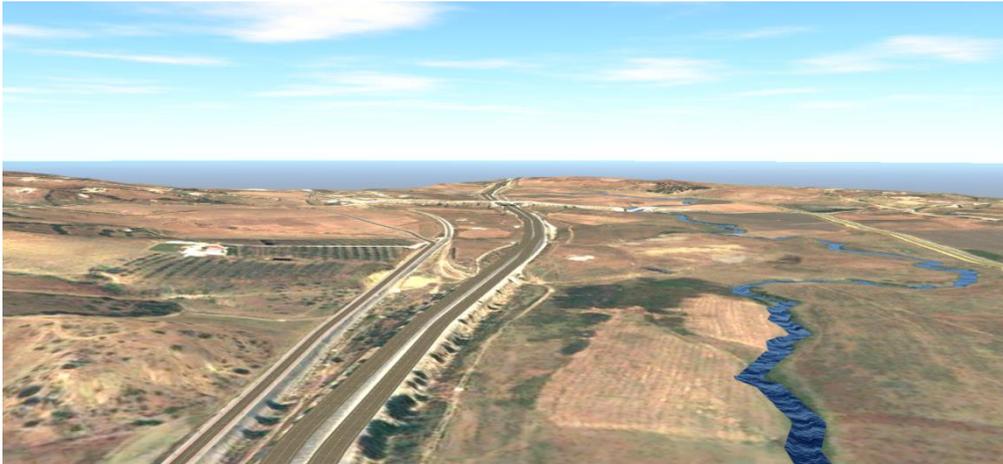


Figure 42 : zone du projet issue du modèle Builder

2.4. Intégration du levé topographique du site

Les données topographiques de module Builder sont exploitables et utiles pour une première approche, néanmoins, elles peuvent ne pas être à jour, d'où l'intérêt d'intégrer un levé topographique établi par un mode conventionnel (station totale, GPS), ou par des solutions innovantes telles que les drones et les scan3D (photogrammétrie, LIDAR).

Dans ce cas, il faut utiliser le levé topographique dans le site du projet, et compléter la topographie de l'entendu du projet par les données issues de Model Builder. Ce principe permet des imbrications des données topographiques très facilement, et des rendues plus réalistes.

Donc le terrain est modélisé en priorité avec les données en tête de la liste surface de sol comme indiqué ci-dessous.



Figure 43 : intégration de la topographie dans le modèle

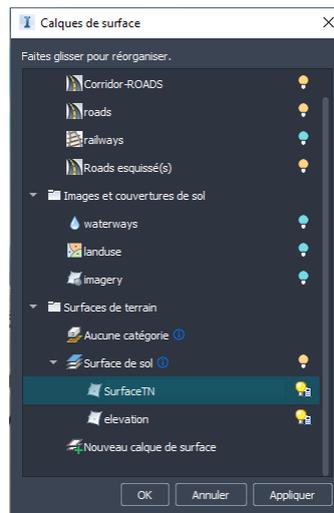


Figure 44 : gestion des calques de surface sur INFRAWORKS

2.5. La modélisation des lignes électriques

La zone du projet comprend trois types de réseaux électriques :

- La ligne basse tension BT
- La ligne moyenne tension MT
- La ligne très haute tension THT

Pour des raisons évidentes de sécurité, il doit avoir une distance minimale entre la ligne du profil en long du projet et les éléments du réseau électrique, afin d'éviter tout contact ou amorçage d'un engin du chantier avec les fils des réseaux électriques.

La prise de considération de ces contraintes tôt dans le projet, permet d'éviter les pertes de temps lors des validations des propositions et les couts imprévus lors de la construction.

Il existe plusieurs formats de fichiers pris en charge par le logiciel Infracworks, et puisque la donnée d'entrée est un levé topographique en DWG, l'intégration des lignes électriques se fait en important les polygones qui les désignent en tant que SHP file dans le modèle Infracworks.



Figure 45 : ligne électrique en 3D

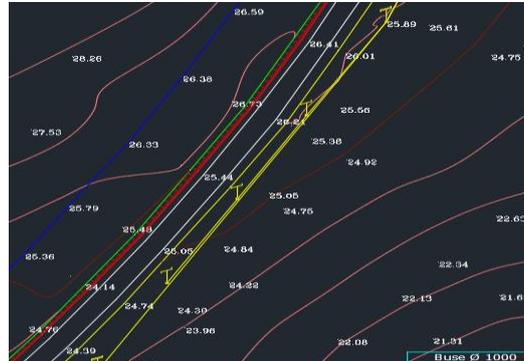


Figure 46 : ligne électrique sur le plan DWG

Il est recommandé que le levé soit effectué par la technologie de la photogrammétrie qui fournit une modélisation précise de l'allure des fils électrique, et de leurs flèches, ce qui permet d'avoir un modèle plus réaliste et des variantes de conception plus maîtrisées.

Concernant des pylônes du réseau THT, compte tenu de leur spécificité, ils ne figurent pas dans la bibliothèque des objets 3D du logiciel INFRAWORKS, pour y remédier, j'ai demandé des modèles 3D de ces pylônes auprès de société CEGELEC active dans le domaine d'énergie et électricité.

Ces modèles ont été modélisé dans le logiciel REVIT, puis importés dans le modèle du projet sur INFRAWORKS.



Figure 47 : pylône du réseau THT

2.6. La modélisation des réseaux souterrains

Les canalisations souterraines de l'eau potable qui sont implantées à proximité du projet doivent être également modélisées, pour les prendre en compte lors des terrassements.

Ces réseaux qui approvisionnent les riverains au projet en eau potable doivent être protégés contre tout endommagement lors des travaux.

Pareil que les lignes électriques, les réseaux d'eau potable sont importés sous le format SHP.

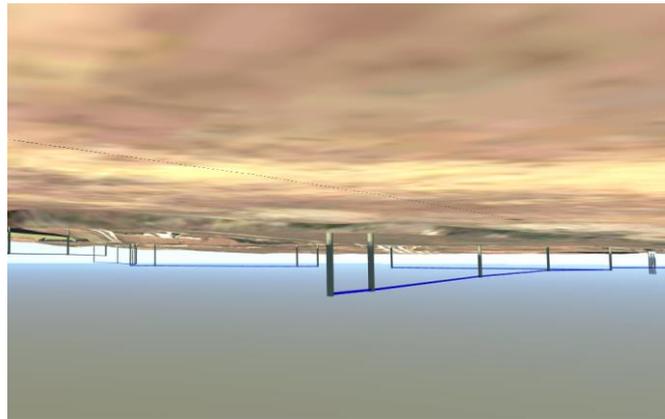


Figure 48 : modèle 3D des canalisations

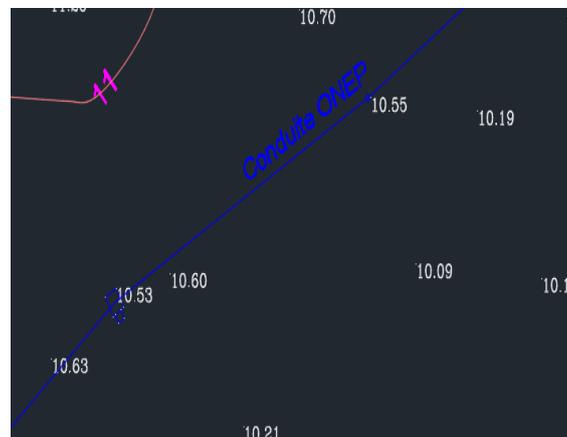


Figure 49 : conduite EP en 2D

2.7. La modélisation des réseaux routiers existants

L'échangeur sujet de l'étude relie l'axe autoroutier A4 à la route provinciale RP4602 de direction Tanger Centre. Donc, la modélisation précise du réseau routier est indispensable, pour que la proposition de la conception soit pertinente et prenne de la valeur ajoutée.

Il existe deux types d'objets routes sur le logiciel Infracore, Dans l'ordre croissant des capacités de calages géométriques et des fonctionnalités associées, ce sont :

- **Les routes de planification ou les routes locales** : rapidement créées pour proposer un principe d'aménagement. C'est le type de route à utiliser lorsque l'on souhaite créer une proposition de tracé comme on donnerait un coup de feutre sur un plan
- **Les routes à composants** : objets routiers plus précis qui reprennent toutes les caractéristiques des routes de conception mais qui sont les seuls à supporter les fonctionnalités les plus avancées comme les dévers, les cubatures détaillées ou les éditions séparées de chaque composants de la route.

L'autoroute est modélisée par l'objet route à composantes vu qu'il ne s'agit pas d'une nouvelle conception mais une modélisation autant précise que possible de l'état existant.

L'objet route à composante permet une meilleure gestion de la conception en plan, l'adaptation du profil en travers semblablement au levé topographique et le calage géométrique du profil en long.

2.7.1. Tracé en plan

L'axe et les lignes caractéristiques de l'autoroute sont importés depuis le levé topographique, comme un fond de plan DWG en 2D dans le modèle Infracworks, sur la base duquel le tracé en plan de l'autoroute est modélisé.

2.7.2. Calage du profil en long

Comme il s'agit d'une route existante, son profil en long doit correspondre à la surface du terrain levé, c'est le principe du calage du profil en long



Figure 50 : calage du profil en long sur INFRAWORKS

2.7.3. Modification du profil en travers

Selon le levé topographique, l'autoroute est bidirectionnelle, la largeur de voie dans chaque sens est 7 m, soit deux voies de 3.5 m, équipée de glissières de sécurité au niveau de la ligne médiane, et des accotements dans chaque côté de 2.5 m de largeur.

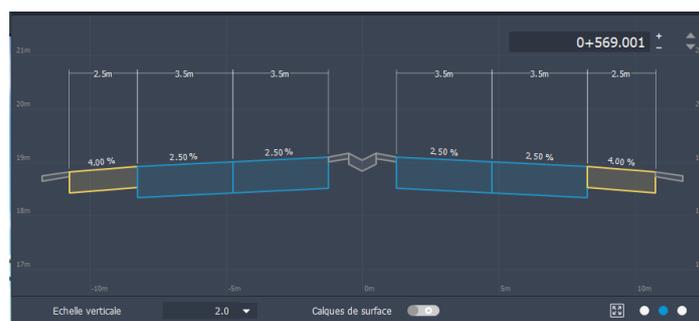


Figure 51 : profils en travers sur INFRAWORKS

La combinaison des éléments précités permet une modélisation plus réaliste de l'autoroute



Figure 52 : levé topographique en 2D



Figure 53 : modèle 3D du projet

2.8. La modélisation des ouvrages hydrauliques

Pour compléter la modélisation, il est important d'ajouter à l'autoroute, les ouvrages hydrauliques qui permettent le franchissement de l'eau. L'emplacement est à prendre en compte lors de l'implantation des fondations du pont, et pour avoir une idée préalable sur l'emplacement des bassins versants.

Pour ce faire, il faut sélectionner l'autoroute, puis accéder au menu suivant via le clic droit, puis ajouter des ouvrages hydrauliques

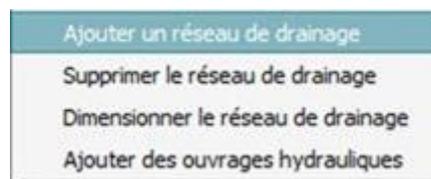


Figure 54 : fenêtre ouvrages hydrauliques sur INFRAWORKS

L'emplacement, le type et les caractéristiques des ouvrages sont renseignés au niveau du levé topographique. Il s'agit des buses et dalots simples, doubles ou triples

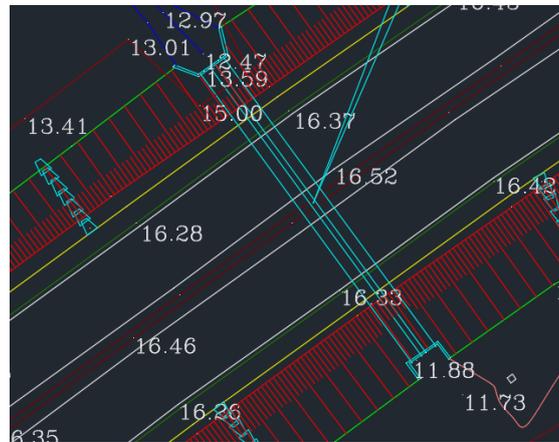


Figure 55 : dalot triple sous autoroute en 2D

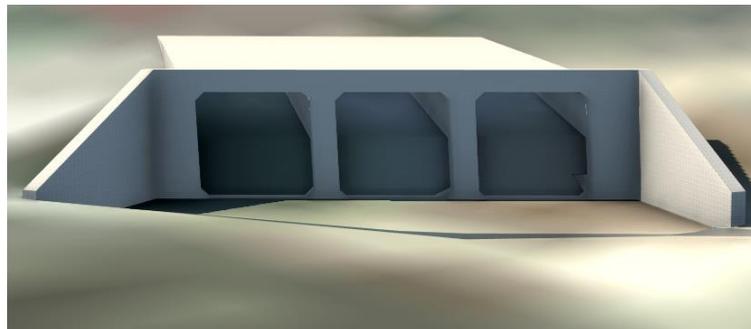


Figure 56 : dalot triple sous autoroute en 3D

2.9. Conclusion

La modélisation des conditions du site d'implantation du projet est indispensable pour la compréhension de l'environnement, la maîtrise des contraintes et par conséquent la réussite de choix de la conception. Elle repose sur le principe que plus le niveau de détail du site est élevé, plus la proposition est pertinente et prend de la valeur ajoutée.

La prochaine phase de la conception est la conception préliminaire du projet, qui consiste à faire les choix de la conception les plus adaptés.

III. Conception préliminaire de l'échangeur

3.1. Introduction

La première étape de la conception est le choix des caractéristiques générales principalement le type de l'échangeur, qui se détermine en fonction de la catégorie des routes, l'emprise du terrain, la topographie, l'aspect économique et l'impact qu'aura la construction de cette infrastructure sur le trafic existant, sur les riverains et sur l'environnement.

Le type de l'échangeur définit également les instructions à appliquer, et les principales caractéristiques géométriques du tracé en plan et du profil en long.

Pour ce faire, il est indispensable de déterminer plusieurs critères notamment les catégories des routes, les normes de la conception, le nombre des bretelles de l'échangeur, etc..

3.2. Catégories des routes

L'échangeur étudié se situe à Ain Dalia, il croise l'autoroute N 5, qui relie Rabat et le port TangerMed et la route provincial RP4602, qui se dirige vers le centre de la ville de Tanger. Il est donc un échangeur de type **diffuseur**. Il se constitue de quatre bretelles autoroutières qui se dirigent vers une gare de péage, et d'un pont qui enjambe l'autoroute.

3.3. Normes de conception

Comme il s'agit d'un échangeur sur autoroute, sa conception géométrique est basée sur un certain nombre de normes notamment :

- **La norme ICTAAL** (Instructions sur les **C**onditions **T**echniques d'**A**ménagement des **A**utoroutes de **L**iaison) version corrigée 2015
- **Le complément de la norme ICTAAL** : Les échangeurs sur routes de type « Autoroute »

Ces normes qui définissent les caractéristiques géométriques des bretelles, et ont le but d'offrir aux usagers les meilleures conditions de confort et de sécurité.

3.4. Nombre des voies des bretelles

Le dimensionnement d'un échangeur requiert d'analyser les trafics sur le courant sortant/entrant, ainsi que sur les voies de la chaussée émettrice/réceptrice.

Le trafic dimensionnant est alors celui de la 30ème heure, exprimé en uvp, et déterminé à la mise en service ainsi qu'à l'horizon de 20 ans.

L'analyse de ces trafics permet de déterminer le nombre de voies à aménager sur les bretelles sortantes /entrantes.

L'échangeur sujet de l'étude est un diffuseur, vu le nombre des véhicules susceptibles à emprunter ne dépasse pas 1200 uvp/h et 1550 uvp/h à l'horizon de 20 ans, il possède des bretelles à une voie de circulation.

3.5. Contraintes du projet

Il s'agit d'un échangeur de type diffuseur, il est constitué de quatre bretelles entrée/sortie à une voie. Il existe plusieurs facteurs à prendre en compte lors du choix de sa conception :

- **Emprise du sol** : Le projet est situé dans la rive droite d'Oued Sghir, ce qui présente un risque d'inondation.



Figure 57 : emprise du sol dans la zone du projet

- **Le relief** : La zone du projet présente un relief du côté de l'implantation de la gare de péage.

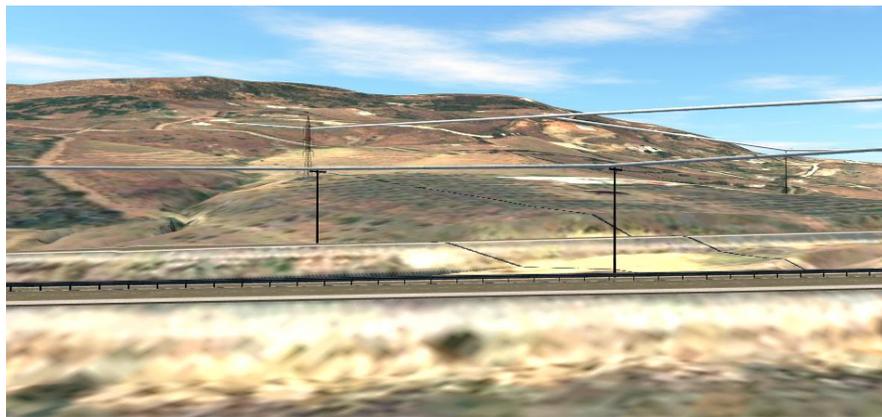


Figure 58 : relief dans la zone gauche du projet

- **Ligne électrique très haute tension** : Il s'agit de la ligne de connexion du Maroc au réseau européen à travers l'Espagne. Elle a une capacité de 400.000 volts et elle est prolongée sur plus de 230 km entre le nord du Maroc et les environs de Rabat. Ce réseau présente une vraie menace pour le projet, il est donc indispensable de prendre en compte les distances de sécurité lors du calage du profil en long.
- **La route provinciale RP4602** : il est nécessaire de faire dévier ce réseau routier parallèle à l'autoroute dans la zone d'implantation de l'échangeur



Figure 59 : route provincial RP4602

- **Les considérations budgétaires**
- **L'aspect esthétique** : les échangeurs ont généralement des formes architecturales spectaculaires, qui leur permettent de s'intégrer dans leurs environnements d'implantation.

3.6. Analyses des Variantes de la conception

3.6.1. Première variante

En se basant sur les contraintes précitées, la première variante est un diffuseur de type trompette, il correspond au raccordement de l'autoroute à la route PR4602 qui se dirige vers le centre-ville de Tanger et qui permet l'accès à la gare de péage.

Il est doté particulièrement par un système de boucle en entrée, une configuration assez utilisée pour le cas des échangeurs sur autoroute. Ce système nécessite de prendre un soin particulier au traitement de la zone située à l'amont de la boucle, zone sur laquelle l'usager doit adapter son comportement et sa vitesse.

Les bretelles de sortie sur l'autoroute sont situées en amont de l'ouvrage de franchissement, dans le but de les rendre plus visibles aux conducteurs et, par conséquent, leur permettre d'ajuster leur vitesse et d'effectuer des manœuvres sans collision ni versement.

La signalisation est un élément indispensable pour aider les automobilistes à prendre les bonnes décisions aux moments propices.

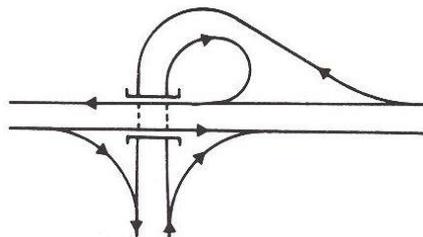


Figure 60 : échangeur en trompette

Modélisation de la variante

Cette première variante est modélisée dans le même modèle créé préalablement dans le logiciel Infracworks.

Comme mentionné, différentes natures d'objets "routes" coexistent dans InfraWorks 360. Il est donc question de choisir le bon mode selon les phases de la conception.

a- Phase esquisse

Il est utile de se servir du type d'objet route de planification, il permet de proposer un principe d'aménagement, et créer une proposition de tracé comme si on donne un coup de feutre dans un plan.

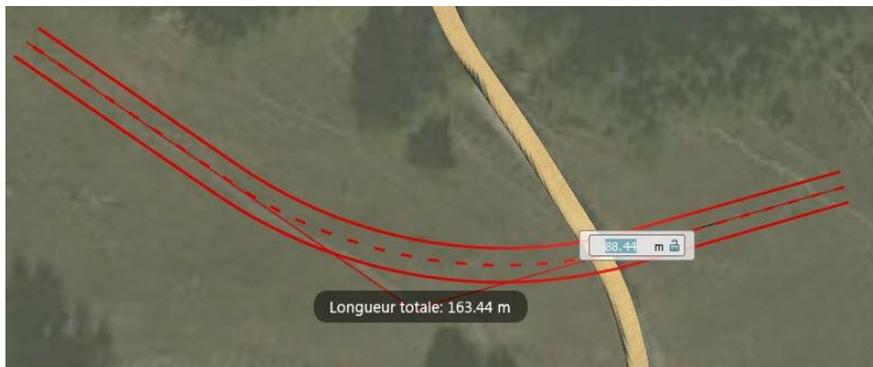


Figure 61 : planification de route sur INFRAWORKS

Ce type d'objet permet de lui appliquer directement un style de la bibliothèque d'Infracworks. Les styles peuvent être créés manuellement ou importés depuis les Kits régionaux, des bibliothèques de contenus des modèles 3D qui sont automatiquement intégrés aux palettes d'Infracworks.

Il existe pour l'instant 6 kits régionaux (Allemagne, Autriche, France, Norvège, Royaume-Uni et Suède), il reste de sélectionner l'un des contenus pour chaque modèle d'Infracworks.

Dans notre cas, c'est le kit français qui est le plus approprié. Il contient des objets de route avec les profils en travers les plus utilisés dans la région francophone, applicables directement aux objets routes de planification.

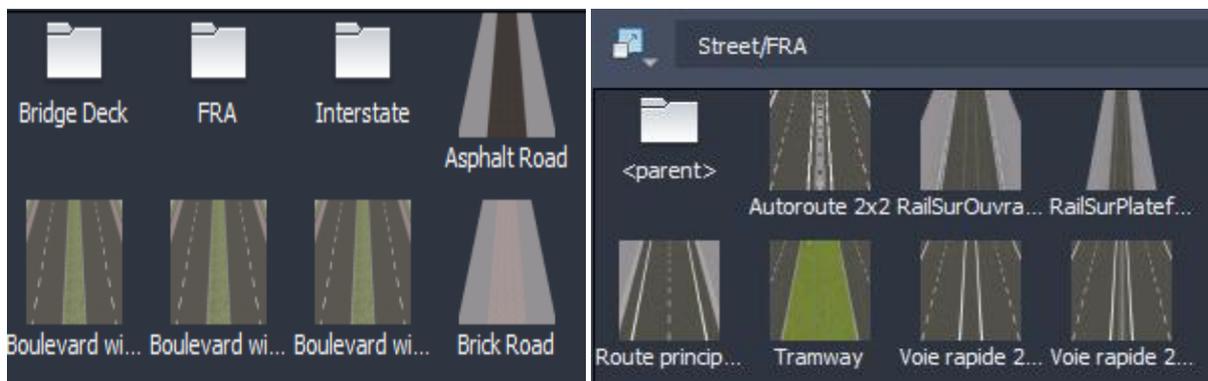


Figure 62 : profils en travers du Country Kit France

b- Détails de la conception

Pour affiner la proposition et valider le principe du tracé, les objets routes de planification doivent se convertir en des objets routes à composantes. Ce type de routes offre des fonctionnalités métiers plus avancées, permet les calages précis en plan et en profil en long.

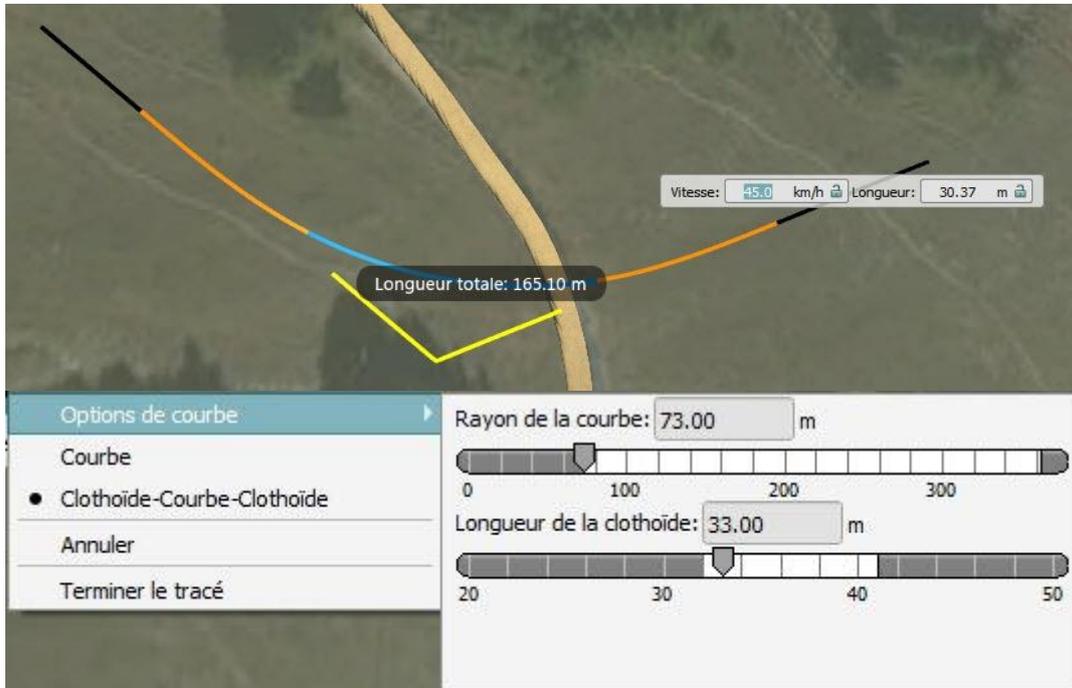


Figure 63 : détails de conception du tracé en plan

Dans ce cas d'étude, puisque les profils en travers des bretelles ne figurent pas dans le kit régional français, nous les avons créés manuellement, puis les intégrés dans la bibliothèque d'Infraworks pour toute prochaine utilisation.

Tracé en plan

La première variante s'agit d'un échangeur de type trompette, composé de quatre bretelles autoroutières et un ouvrage de franchissement supérieur. Mené d'un système de boucle en entrée, et des sorties qui se situe en amont du pont.





Figure 64 : tracé en plan de la première variante de l'échangeur

Calage du profil en long

Le calage du profil en long consiste à ajuster les pentes et les rayons de raccordement longitudinal, en se référant à la norme ICTAAL, qui détermine les valeurs limites de ces éléments, partie qui sera détaillée dans la phase de la conception détaillée.

Pour ce faire, on se sert du groupe de fonctions Dessin de profil en long du logiciel Infracore qui permet d'examiner et de modifier la géométrie verticale d'une route composée par rapport à la surface de terrain existante, dans la vue de profil en long.

Cette vue est gérée par les calques de données notamment :

- Géométrie horizontale : affiche les abscisses curvilignes horizontales le long du dessin du profil en long
- Sol existant : fait référence au terrain naturel
- Drainage : affiche les ouvrages hydrauliques, les bouches d'égout et les avaloirs et canalisations alignés sur la ligne d'axe de la route.
- Jonctions : les intersections et les carrefours giratoires sont affichés
- Structures : pont et tunnel

Dans cette vue, la géométrie horizontale est modifiée en agissant sur les altitudes des PVI et le type de raccordement :

- Courbe parabolique symétrique
- Courbe parabolique asymétrique
- Courbe circulaire



Figure 65 : profil en long d'une bretelle de l'échangeur

Une modification plus rapide du Profil en long, peut être faite dans la vue horizontale du modèle dont laquelle apparait des gizmos bleus qui contrôlent l'altitude.



Figure 66 : outil de calage du profil en long sur INFRAWOIRKS

Profils en travers

Dans cette étape, il faudra ajuster le profil en travers de la route au profil type préconisé par le maître d'ouvrage du projet. Il s'agit d'une voie unidirectionnelle de 4 m de largeur, et un accotement 2 m avec des entrées en terre.

La visualisation des profils en travers du projet est accompagnée par les mêmes calques de données que dans la vue du profil en long.

Ces calques sont gérés autant que sub-surfaces avec la surface topographique principale.



Figure 67 : profil en travers d'une bretelle

Il existe un dynamisme entre le modèle et la vue de profil en long ainsi que les vues de profil en travers à travers une ligne jaune de repérage qui permet de localiser les abscisses curvilignes dans les trois vues à la fois, pour une visualisation dynamique dans le cas des modifications.



Figure 68 : dynamisme entre profil en long, axe en plan et profil en travers

3.6.2. Deuxième variante

Il s'agit de la variante proposée par le département tracé de l'organisme d'accueil, c'est un échangeur de type trompette qui se développe dans le Cadran Ouest-Nord formé par la RP4608 et l'autoroute. Il se raccorde sur la RP 4602 et la RP 4608 par un carrefour type giratoire. Pr conséquence, la RP4602 est déviée sur un linéaire de 800m.

A partir des plans DWG fournis, une modélisation du modèle 3D a été faite dans le logiciel Infraworks, suivant les mêmes étapes que lors de la modélisation de la première variante.

Dans le même modèle, la deuxième variante a été sauvegardée comme étant une 2ème proposition de conception.



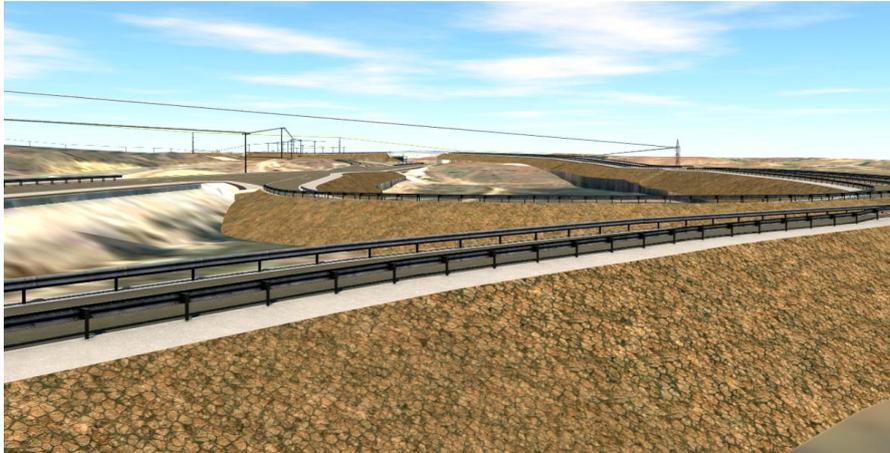


Figure 69 : variante proposée par l'organisme d'accueil

3.7. Variante retenue

Le choix du type de l'échangeur dépend de plusieurs critères, à savoir l'emprise du sol disponible, les contraintes topographiques, les considérations budgétaires, l'aspect esthétique ainsi que l'intégration de la structure dans son environnement.

La modélisation préliminaire de plusieurs propositions de conception dans le même modèle, sert réussir le choix de la conception.

En se basant sur l'étude de faisabilité, la variante de la conception retenue pour la conception détaillée est la première variante.

3.8. Conclusion

Par conséquent, l'adoption d'une variante préliminaire de conception donne place aux différents types d'analyse nécessaires dans un projet d'infrastructure, notamment, analyse de visibilité, étude hydrologique et hydraulique.

IV. Analyse de visibilité

4.1. Introduction

La visibilité est un critère primordial dans la conception routière, dans la mesure où elle permet à l'utilisateur d'acquérir des informations sur l'environnement routier et de réaliser des anticipations.

Compte tenu de la nature du projet, les pertes de visibilité constituent un facteur accidentogène, donc son analyse en tout point du tracé est nécessaire.

4.2. Principe de l'analyse de visibilité

Cette analyse sera effectuée dans le logiciel Infracore 360, en se basant sur la méthode de la distance d'arrêt, qui s'appuie sur le respect de la distance minimale d'arrêt dans chaque point du tracé.

La distance d'arrêt se définit comme étant la somme de :

- **la distance de freinage** : distance conventionnelle nécessaire à un véhicule pour passer de sa vitesse initiale à la vitesse nulle. Elle se définit par la relation : $d_f = \frac{V^2}{254 \times f}$ où f est le coefficient d'adhérence, qui dépend de l'état de la chaussée.

Sur route sèche, $f = 0,8$ Sur route mouillée, $f = 0,4$

- **la distance de perception-réaction** : distance parcourue par un véhicule à vitesse constante pendant le temps de perception-réaction du conducteur qui est généralement de 1 seconde. Elle se définit par la relation : $d_r = \frac{V}{3.6}$ avec V la vitesse en km/h

Sur ce, l'analyse de visibilité permet d'identifier les zones d'échec de visibilité où la visibilité est compromise par des obstructions.

4.3. Analyse des résultats

Cette analyse renvoie sur le dessin des couleurs qui désignent :

- Bleu clair : Les zones de bonne visibilité
- Jaune : Les zones d'échec de visibilité
- Orange : Les zones où des problèmes de visibilité risquent de provoquer des accidents

On appliquant cette analyse sur les bretelles de l'échangeur, on obtient :

4.3.1. Bretelle Rabat-gare de péage Tanger Centre



Figure 70 : résultats de l'analyse de visibilité de la bretelle 1

Sur le tracé de la bretelle du pont, il existe respectivement deux zones d'échec d'obscurité de longueur 85.65 m et 76.62 m.

Pour remédier à ce problème, il faut agir sur les rayons de courbure en plan et leurs raccordements progressifs ainsi que les pentes et les courbes du profil en long du tracé routier.



Figure 71 : résultats de l'analyse de visibilité de la bretelle 1 après modification

Ce type d'analyse met le point sur un des critères de base de la conception géométrique des routes.

4.3.2. Bretelle gare de péage Tanger centre-Rabat



Figure 72 : analyse de visibilité de la bretelle 2

Pour satisfaire les conditions de visibilité de cette bretelle, il paraît nécessaire de modifier l'angle du rayon de courbure, à proximité de son intersection avec l'autoroute.

4.3.3. Bretelle port Tanger MED- gare de péage Tanger centre

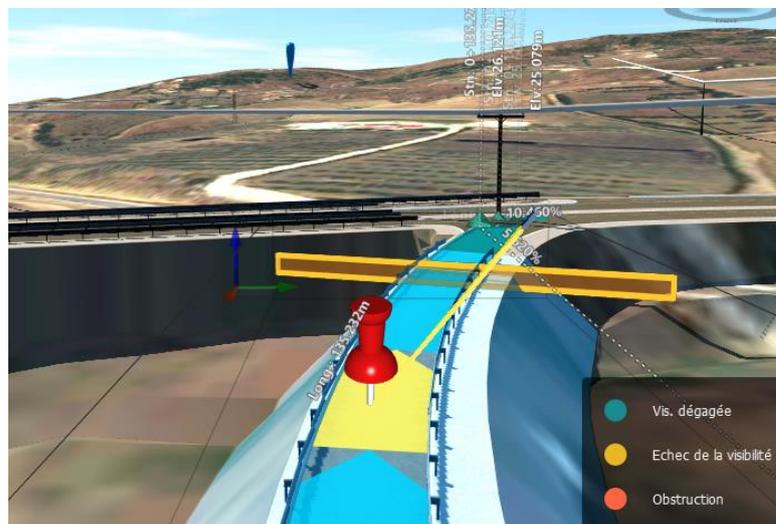


Figure 73 : résultat de l'analyse de visibilité de la bretelle 3

Le problème de visibilité qu'illustre la capture est causé par le pylône de la ligne basse tension (BT), situé entre les deux bretelles, d'où la nécessité de déplacer ce réseau.

4.3.4. Bretelle Rabat- Gare de péage Tanger Centre

Cette bretelle ne présente aucune zone d'échec d'obstruction, donc la condition de la visibilité est satisfaite.

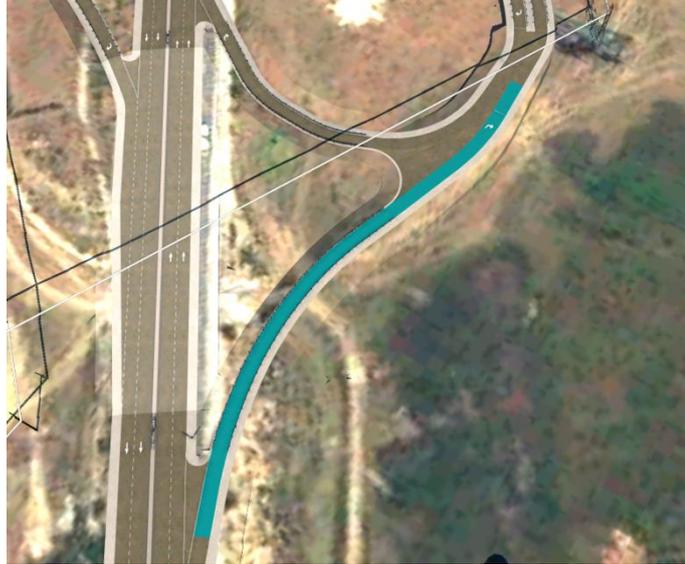


Figure 74 : analyse de la visibilité de la bretelle 4

4.3.5. Bretelle gare de péage Tanger Centre- Port Tanger Med

Le système de la boucle requiert un grand niveau de sécurité, à cause de l'angle du rayon qui est généralement serré, une zone dans laquelle le conducteur doit adapter sa vitesse et son comportement.

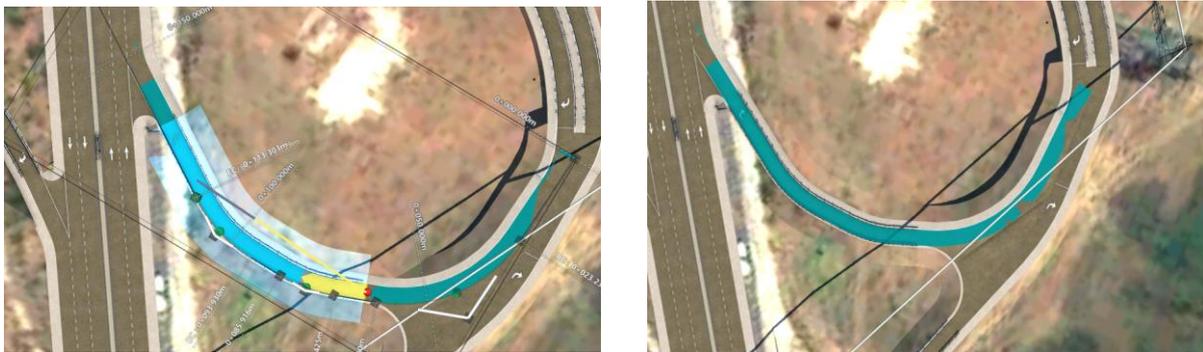


Figure 75 : analyse de la visibilité bretelle 5

4.4. Conclusion

Après avoir vérifié les critères de visibilité dans l'ensemble des bretelles, la prochaine partie détaillera une des analyses indispensables dans la conception géométrique des routes qui est l'analyse hydrologique.

V. Etude hydrologique

L'étude hydrologique consiste à identifier, analyser les caractéristiques des bassins versants qui croisent la route, afin de dimensionner les ouvrages de franchissement nécessaires dans le cadre de l'analyse hydrologique.

5.1. Délimitation des Bassins versants

La première étape pour effectuer l'analyse hydrologique est la délimitation précise des bassins versants. Pour ce faire, on se sert de l'outil Drainage design d'Infraworks, qui permet d'identifier plusieurs bassins versants, en s'appuyant sur la topographie du terrain existant.

Les bassins versants sont des objets sélectionnables contenant plusieurs propriétés notamment :

- La surface
- L'emplacement des flux d'écoulement
- La longueur du flux de l'écoulement
- La pente du canal
- Le débit à l'aide de l'une des méthodes intégrées

En s'appuyant sur la topographie du terrain existant avant de procéder au nivellement de la ligne du profil en long, les endroits où les flux d'écoulement croisent des routes sont désignés à l'aide des repères.

5.1.1. Méthodologie de l'étude

L'analyse des bassins versants sur le logiciel Infraworks se fait généralement par deux manières :

- ✓ En sélectionnant une route à composantes afin d'identifier tous les bassins versants qui croisent cette route
- ✓ En sélectionnant un point de sortie d'eau d'élévation inférieure de telle sorte que les zones de haute terre contribuent au bassin versant.

Avant d'effectuer cette analyse, il est préférable d'identifier les intervalles d'altitude dans le terrain du projet, afin de localiser les élévations basses où un flux d'écoulement est susceptible de se produire.

Pour ce faire, on se réfère à la palette thème de terrain par élévation, qui permet d'appliquer au terrain un intervalle d'altitudes.

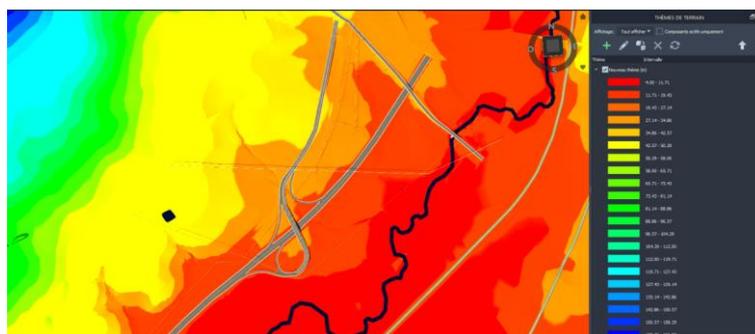


Figure 76 : thème de terrain par intervalle d'élévation

5.1.2. Analyse des résultats

Après avoir sélectionné la route à composantes qui correspond à l'échangeur étudié, on obtient :



Figure 77 : délimitation des bassins versants sur INFRAWORKS

Le tracé de l'échangeur proposé s'intersecte avec quatre bassins versants, dont les propriétés sont les suivantes :

Tableau 1 : résultats de l'étude hydrologique

ID bassin versant	aire (km2)	longueur du canal (m)	Pente du canal %
BV 1	398.137	744.4	4.313
BV 2	462.937	238.5	1.584
BV 3	397.912	51.2	2.476
BV 4	495.112	606.8	1.937

En se basant sur les caractéristiques physiques des bassins versants citées dans le tableau ci-dessus, on estime le débit de ruissellement propre à chaque bassin.

5.2. Calcul des débits des bassins versants

Il existe plusieurs méthodes pour estimer les débits des bassins versants qui s'appuient sur des données pluviométriques à savoir :

- Formule rationnelle
- Formule de BURKLI – ZIEGLER
- Formule de Mallet – Gauthier
- Formule de Fuller II

Le choix de ces méthodes correspond aux caractéristiques physiques des bassins.

5.2.1. Méthode rationnelle

Dans le cadre de ce projet, nous avons opté pour le choix de la méthode rationnelle pour l'estimation des débits des bassins versants, et ce pour plusieurs raisons :

- Elle est simple d'application
- Elle permet une bonne approche des débits pour les petits bassins versants car cette méthode utilise la pluviométrie maximale en 1 heure, et bien souvent le temps de concentration est de l'ordre de l'heure pour ces bassins versants
- Elle calcule le débit d'apport d'un bassin versant en tenant compte de la couverture végétale, la forme, la pente et de la nature du terrain, selon la relation :

$$Q_{(T)} = \frac{C_T \times i(T) \times S_{BVN}}{3.6}$$

Avec :

Q : Débit en m³/s correspondant à la période de retour T

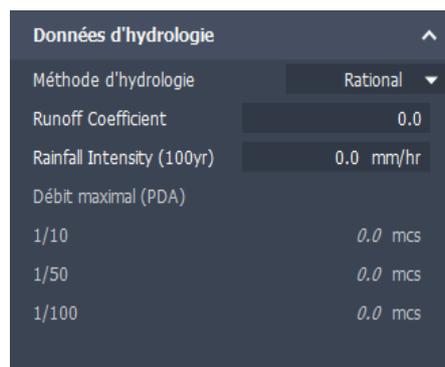
T : Période de retour pour laquelle le débit est calculé

Cr : Coefficient de ruissellement

IT : Intensité de pluie correspondant à la période de retour T (en mm/h)

A : Surface du bassin versant en km²

La méthode rationnelle est intégrée dans le logiciel Infracworks, pour le calcul du débit, il faut saisir le coefficient de ruissellement et l'intensité pluviométrique.



Données d'hydrologie	
Méthode d'hydrologie	Rational
Runoff Coefficient	0.0
Rainfall Intensity (100yr)	0.0 mm/hr
Débit maximal (PDA)	
1/10	0.0 mcs
1/50	0.0 mcs
1/100	0.0 mcs

Figure 78 : méthode de calcul hydrologique sur INFRAWORKS

a- Calcul d'intensité

La formule de Montana est utilisée pour calculer les intensités de pluie pour le temps de retour considéré.

$$i(t) = a(t) \times t_c^{-b(t)}$$

Avec : $i(t)$ = Intensité de pluie pour un temps de concentration

t_c = Temps de concentration en mn.

Les valeurs de a et b ont été confirmées par les recommandations du rapport d'expertise hydrologique de l'étude préliminaire effectuée par le bureau d'études.

Le tableau suivant récapitule les valeurs de ces coefficients :

Tableau 2 : intensité pluviométrique en fonction des périodes de retour

Coefficients de la formule de Montana	Période de retour				
	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
a	285,2	316,7	350,6	396,8	432,4
b	0,53	0,5	0,48	0,47	0,46

Période de retour

La période de retour à prendre en compte doit faire l'objet d'une analyse mettant en regard le coût d'investissement de l'infrastructure et les conséquences de débordement pour l'utilisateur, les riverains, les ouvrages routiers et enfin l'impact sur le milieu naturel.

Nous allons adopter une période de retour de 100 ans selon les recommandations du guide technique de l'assainissement routier de SETRA (Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements)

Calcul de temps de concentration

Suite aux recommandations du maître d'ouvrage, on estime le temps de concentration à l'aide de la formule de Kirpich.

$$t_c = \frac{1}{52} \left(\frac{L}{\sqrt{P}} \right)^{0.77}$$

Avec :

T_c : temps de concentration en min

L : longueur du drain en m

P : Pente en m/m

On trouve :

Tableau 3 : données des bassins versants

ID bassin versant	longueur du canal (m)	Pente du canal %	temps de concentration (min)
BV 1	744.4	4.313	10.62
BV 2	238.5	1.584	6.5
BV 3	51.2	2.476	1.67
BV 4	606.8	1.937	12.35

Résultats :

En appliquant la formule de l'intensité pour une période de retour de 100 ans aux bassins versants prédéfinis, on trouve :

Tableau 4 : intensités des bassins versants

ID Bassins versant	Intensité (mm/h)
BV1	145.8372303
BV2	182.7870994
BV3	341.5357018
BV4	136.0563716

b- Estimation du coefficient de ruissellement

L'estimation du coefficient de ruissellement CR est une approximation du fait que la surface d'un bassin versant n'est pas homogène sur sa totalité. Cependant, les valeurs de ces coefficients ont été vérifiées lors de l'enquête terrain et entérinées par les conclusions de l'expertise.

Les coefficients de ruissellement adoptés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 5 : coefficient de ruissellement Cr en fonction de la nature et la morphologie du terrain

Couverture végétale	Morphologie	Pente (%)	Terrain argileux ou limoneux
Culture	Presque plat	0-5	0,50
	Ondulé	5-10	0,60
	Montagneux	>10	0,72
		>30	0,80

c- Calcul des débits

A l'aide du logiciel Infracore, en rentrant l'intensité pluviométrique et les coefficients de ruissellement on obtient :

Tableau 6 : résultats du calcul des débits

ID bassin	Débit (m ³ /s)
BV 1	8.046
BV 2	11.752
BV 3	18.875
BV 4	9.356

Le tableau récapitule les débits calculés pour chaque bassin versant et qui varient entre 8.046 m³/s et 18.875 m³/s ; il est à noter que ces débits concernent la totalité des bassins versants non seulement la partie susceptible de passer sous la route. Ils sont donc majorés.

5.3. Conclusion

La délimitation des bassins versants est une étape primordiale lors de l'étude d'avant-projet, pour avoir une estimation du projet.

Les résultats de cette étude seront la base de l'étude hydraulique, qui concerne le dimensionnement des ouvrages hydrauliques, sujet de la partie suivante.

VI. Etude hydraulique

L'étude hydraulique routière permet, sur la base des résultats de l'étude hydrologique, de dimensionner les ouvrages pour le rétablissement des écoulements naturels, c'est-à-dire ceux qui sont susceptibles d'être rompus par le projet routier.

L'étude hydraulique consiste à implanter les ouvrages hydrauliques là où la route croise des cours d'eau ou lorsque c'est nécessaire ; Ils sont dimensionnés de telle sorte que la crue considérée puisse les franchir sans entraîner de remous incontrôlable à l'amont.

6.1. Ajout des ouvrages hydrauliques

Comme l'analyse des bassins versants permet d'identifier les endroits où des flux d'écoulement traversent la route, ces endroits sont exploités directement pour placer des ouvrages hydrauliques et les dimensionner selon les débits calculés.

Le dimensionnement est effectué pour le débit centennal. Celui-ci étant évalué pour le bassin versant concerné dans l'étude hydrologique.

En cliquant avec le bouton droit de la souris sur la route sélectionnée, et en choisissant « ajouter des ouvrages hydrauliques », on ajoute un ouvrage hydraulique à chaque croisement de flux d'écoulement de la façon suivante :

- les ouvrages hydrauliques sont placés à l'intersection du pied de talus de la route
- En prenant en compte du flux de l'écoulement du bassin versant (Q100) et l'élévation de la route à l'intersection
- En considérant un rapport maximum Profondeur de la ligne d'eau en amont/Diamètre (HW/D) de 1.5:1 pour déterminer la taille de l'ouvrage hydraulique

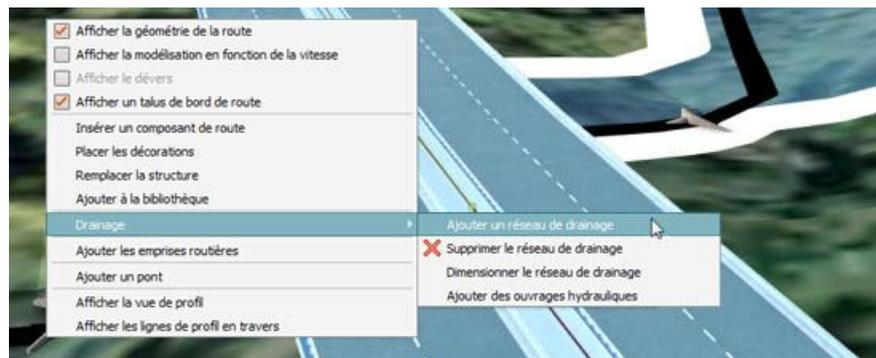


Figure 79 : fenêtre de gestion des ouvrages hydrauliques

Lorsque l'analyse de bassin versant n'identifie pas de bassin versant pour une portion de route, il est possible d'ajouter manuellement les ouvrages hydrauliques si nécessaire.

Résultats :

On obtient pour chaque bassin les propriétés de l'ouvrage hydraulique correspondant :

Tableau 7 : résultats du calage des ouvrages hydrauliques

ID bassin	type	Longueur(m)	altitude entrée (m)	altitude sortie (m)	pente %	angle oblique (deg)
BV 1	Buse simple 1800 mm	18.504	23.365	22.073	6.997	2.17
BV 2	Buse simple 2250 mm	35.721	21.858	21.609	0.699	56.12
BV 3	Buse simple 2100 mm	6.642	20.371	19.728	9.28	21.06
BV 4	Buse simple 1950 mm	7.709	13.343	11.875	19.413	1.29

Il en résulte également la hauteur d'eau en aval et en amont ainsi que les vitesses d'entrée et de sortie de l'ouvrage et le type de contrôle.

- Pour l'ouvrage 1 :

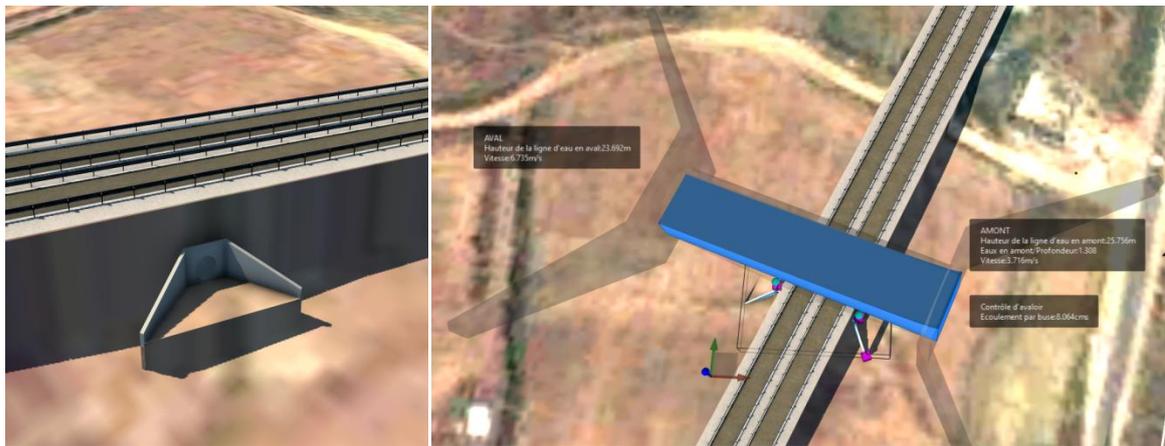


Figure 80 : Ouvrage hydraulique N°1

- Pour l'ouvrage 2 :



Figure 81 : Ouvrage hydraulique N°2

- Pour l'ouvrage 3 :

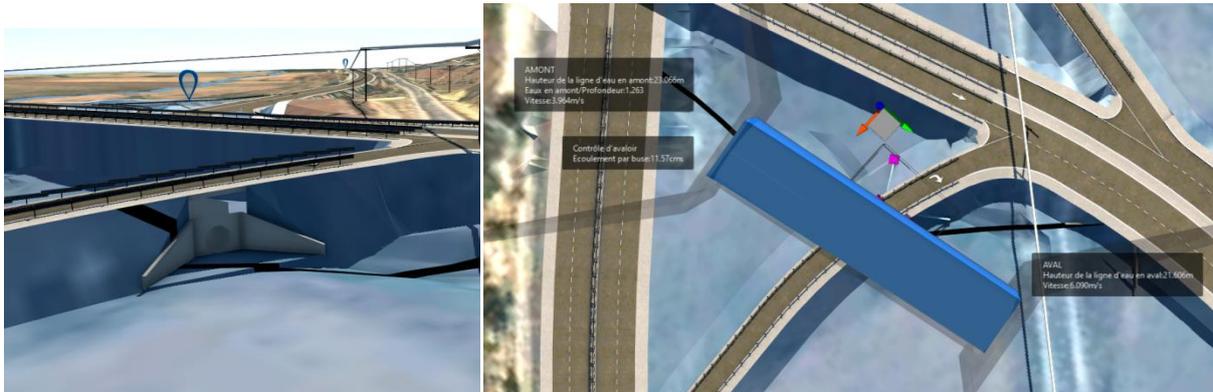


Figure 82 : Ouvrage hydraulique N°3

- Pour l'ouvrage 4 :

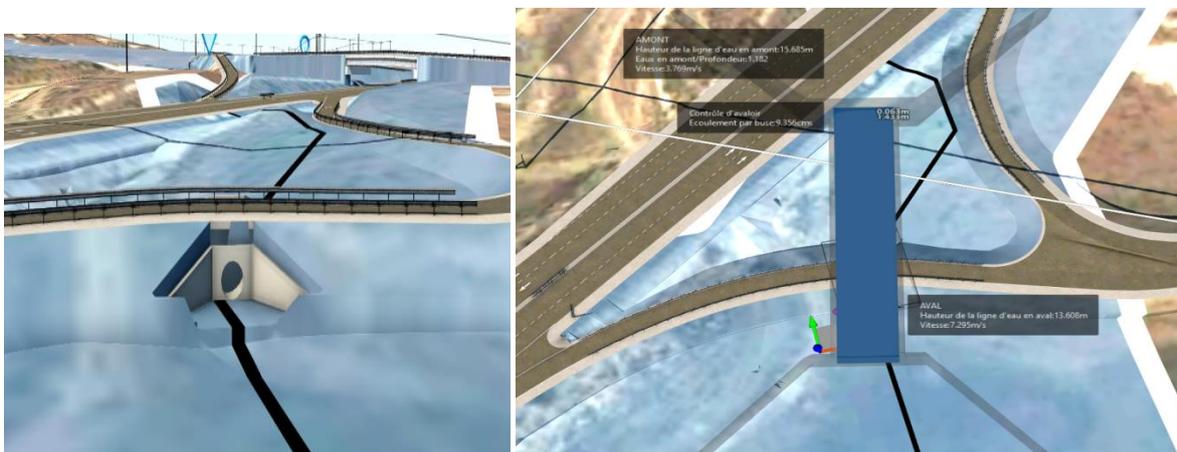


Figure 83 : Ouvrage hydraulique N°4

Le logiciel Infracore renvoie également un rapport détaillé pour le calcul et le calage de chacun des ouvrages hydrauliques. Ce rapport est annexé à la fin de ce document.

6.2. La modification des ouvrages hydrauliques

Il est possible de modifier la taille, la longueur ou le positionnement de l'ouvrage hydraulique à l'aide des gizmos et des poignées directement dans le modèle.

On peut même changer la solution de l'ouvrage à savoir le nombre des ouvertures, la forme ou le matériau, dans la palette d'édition.

Dans cette phase de conception, on se contentera des résultats fournis, jusqu'à la phase de la conception détaillée.

6.3. Conclusion

Cette partie permet d'achever la conception préliminaire du tracé routier de l'échangeur étudié.

Par conséquent, la prochaine partie concerne la conception et le pré dimensionnement de l'ouvrage de franchissement.

VII. Analyse des variantes du pont

7.1. Introduction

D'une façon générale, on appelle pont tout ouvrage d'art permettant à une voie de circulation de franchir un obstacle naturel ou une autre voie de circulation.

De tels ouvrages sont qualifiés « d'art » parce que dans leur conception l'importance de l'aspect esthétique et architectural est majeure. En plus, leur réalisation fait intervenir des connaissances où l'expérience joue un rôle aussi important que la théorie. Cet ensemble de connaissances constitue d'ailleurs ce que l'on appelle l'art de l'ingénieur.

Dans cette partie, nous présenterons les différentes variantes correspondantes aux contraintes fonctionnelles et naturelles du projet.

7.2. Données fonctionnelles

La conception d'un pont doit satisfaire à un certain nombre d'exigences puisqu'il est destiné à offrir un service à des usagers. On distingue les exigences fonctionnelles (ou données fonctionnelles) qui sont l'ensemble des caractéristiques permettant au pont d'assurer sa fonction d'ouvrage de franchissement.

7.2.1. Tracé en plan

Le tracé en plan est la ligne définissant la géométrie de l'axe de la voie portée, dessinée sur un plan de situation et repérée par les coordonnées de ses points caractéristiques.

La position en plan définit la direction des appuis par rapport à celle du tablier.

La structure géométrique de l'ouvrage est biaisée de 70 g d'une longueur de 88m.

7.2.2. Profil en long

Le profil en long est la ligne située sur l'extrados de l'ouvrage (couche de roulement mise en œuvre) définissant, en élévation, le tracé en plan. Il doit être défini en tenant compte de nombreux paramètres liés aux contraintes fonctionnelles de l'obstacle franchi ou aux contraintes naturelles, et en fonction du type prévisible de l'ouvrage de franchissement.

Dans ce cas, le profil en long doit correspondre à un gabarit de 5.1 m de hauteur vue, exigé par le maître d'ouvrage, pour satisfaire aux exigences fonctionnelles de l'autoroute franchie.

7.2.3. Profil en travers

Afin d'assurer son fonctionnement, le pont doit être conçu pour épouser le profil en travers de la voie portée, qui est de 12.3 m de largeur, selon les recommandations du maître d'ouvrage.

7.3. Contraintes du projet

Il faut donc fixer l'ensemble des contraintes à respecter pour savoir les types des ouvrages à envisager afin de les comparer. Cette comparaison nous mènera à retenir la meilleure solution.

La contrainte majeure de ce projet est l'autoroute franchie.

Il s'agit de l'autoroute N 5 dont le profil en travers est composé comme suit :

- Un terre plein central de 3 m
- Une voie bidirectionnelle de 7 m dans les deux sens
- Un accotement de 2.5 m du chaque côté
- Un élargissement futur de 3.5 m de chaque côté ç prendre en compte

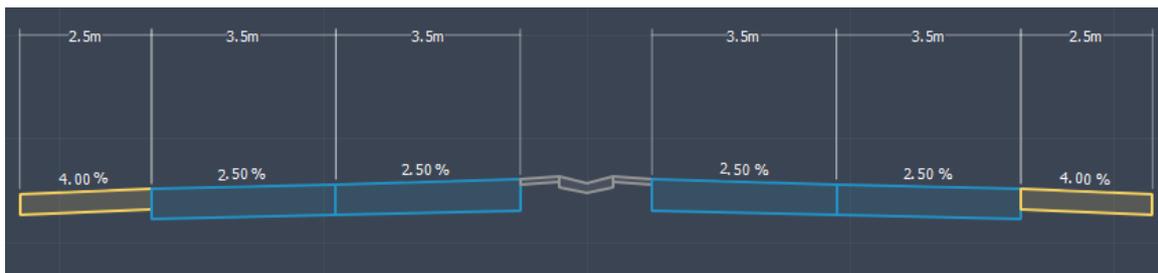


Figure 84 : profil en travers de l'autoroute

7.4. Variantes de conception

L'objectif est de déterminer le type d'ouvrage le capable à la fois de satisfaire les contraintes fonctionnelles et naturelles.

Dans ce qui suit, on va énumérer toutes les variantes possibles pour ce projet, mentionner leurs avantages et inconvénients pour tirer la conception la plus adéquate.

Vu l'immensité du domaine des ouvrages d'art, il y a un grand nombre de solutions à adopter. Pour ce projet, on va se limiter à optimiser seulement deux variantes couramment utilisées pour les projets de pont à savoir :

- Pont à poutres en béton armé
- Pont à poutres en béton précontraint

7.4.1. Pont à poutres en béton armé (PSI-BA)

Selon SETRA (Service des Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), ce type de ponts est nommé Passage Supérieur ou Inférieur à poutres de Béton Armé (PSI-BA), le tablier de cette variante est composé d'une série de poutres continues ou indépendantes associées à une dalle de couverture, et

reliées entre elles par des entretoises au niveau des appuis et par des entretoises intermédiaires, ces derniers ne sont plus utilisés.

Domaine d'emploi :

Le domaine d'emploi de ce type d'ouvrage est celui des portées moyennes allant de 10 m à 25 m

Avantages et inconvénients :

Les ponts à poutres en béton armé ont plusieurs avantages à savoir :

- **Economique** : en terme de matière du béton grâce à la forme en T de leurs poutres porteuses, ainsi du fait que le béton armé est moins couteux que d'autres matériaux de construction.
- **Exécution facile** : la réalisation de ce genre de pont est aisée et moins dispendieuse, et ne nécessite pas une haute qualification de la main d'œuvre.

Cependant les ponts à poutre en béton armé présentent quelques inconvénients, notamment :

- **Main d'œuvre** : nécessitent beaucoup de main d'œuvre ce qui rend la gestion et la logistique plus compliquée.
- **Esthétique** : leurs grands élancements donnent naissance à des épaisseurs importantes du tablier, ce qui rend le pont esthétiquement moins apprécié.

Conclusion :

Le tablier à poutre en béton armé peut être envisagé dans ce cas d'étude, vu que la situation géographique du projet ne nécessite pas un tablier esthétique, et il est intéressant de prévoir des travées indépendantes afin de simplifier l'exécution.



Figure 85 : pont à poutres en béton armé

7.4.2. Pont à poutres en béton précontraint (VI-PP)

Le tablier en poutre précontraintes, nommé Viaduc à travées Indépendantes en Poutres Précontraintes (VI-PP), est composé de travées indépendantes constituées des poutres à talon préfabriquées, précontraintes par post tension, ils peuvent être entretoisés ou non, solidarisés entre eux par un hourdis coulé sur place en béton armé ou précontraint.

Domaine d'emploi :

Selon le guide SETRA, ce type d'ouvrage est conçu pour franchir des obstacles nécessitant des portées pouvant aller jusqu'à 45 m, voire 50 m dans cas exceptionnel.

Avantages et inconvénients :

Le tablier VI-PP permet :

- **Le franchissement des portées plus importantes :** ce qui permet de supprimer un appui intermédiaire, et ceci rend ce type d'ouvrage très économique pour des portées de 30 à 45 mètre.
- **Préfabrication :** dans le cas où les travées sont indépendantes, les poutres peuvent être préfabriquées, ce qui permet de couler le béton en atelier ou sur le chantier à poste fixe, et il est en général de meilleure qualité que celui qui est mis en place sur échafaudage, les conditions de contrôle sont beaucoup plus faciles. Dans le cas exceptionnel où la valeur souhaitée de la résistance de béton à 28 jours n'est pas atteinte, il est facile de rejeter l'élément préfabriqué, alors qu'une structure coulée en place exigerait une démolition ou renforcement coûteux
- **Optimisation des délais :** parallèlement à la construction des poutres, l'entreprise de construction peut s'occuper de la réalisation des fondations et des appuis de l'ouvrage, ce qui offre un gain dans le délai d'exécution pouvant aller jusqu'à 20% de la durée totale du projet.

Pourtant, les ponts à poutres en béton précontraint ont des inconvénients notamment :

- **Une complexité au niveau d'exécution,** qui nécessite une main d'œuvre très qualifiée et un matériel très performant,
- **l'élancement économique** de ces poutres donne des hauteurs relativement importantes, ce qui peut générer une hausse non négligeable sur le coût des remblais d'accès

Conclusion :

La variante VI-PP présente de nombreux avantages d'ordre technique, bien que des avantages de la préfabrication qui permettra de maintenir l'autoroute franchie en service, ce qui la met parmi les solutions à envisager dans notre projet.



Figure 86 : poutre en béton précontraint

7.5. Conclusion

L'étude d'avant-projet sommaire consiste à concevoir et pré dimensionner les variantes qui riment avec les spécifications du projet. Dans ce sens, la partie suivante concerne la conception et le pré dimensionnement des différents éléments constituant les deux structures proposées.

VIII. Conception et pré dimensionnement des variantes du pont

8.1. Introduction

Après avoir sélectionné les variantes qui s'adapte à notre projet, la présente partie s'appuiera sur les guides de conception de chaque variante, ainsi que le PP73 (Piles et Palées) du SETRA afin d'effectuer un pré-dimensionnement permettant d'estimer le coût de chaque variante, pour constituer un autre critère du choix définitif du type d'ouvrage.

8.2. Largeur roulable et largeur chargeable

La largeur roulable est égale à 11 m, elle est définie comme la largeur comprise entre dispositifs de retenue ou bordures de trottoir.

La largeur chargeable se déduit de la largeur roulable en enlevant une bande de 0,50 m le long de chaque dispositif de sécurité.

Par conséquent, la largeur chargeable est 10 m.

8.3. Classe du pont

La largeur de la chaussée du pont est de 9 m, selon le fascicule 61, le pont est de 1 ère classe.

Le nombre des voies chargeables égale à 3.

$$E \left(\frac{\text{largeur chargeable}}{3} \right) = 3$$

8.4. Pré dimensionnement du tablier

Nous procédons au pré dimensionnement des composantes du tablier des deux variantes prédéfinies.

Variante 1 : pont à poutres en Béton armé (PSI-BA)

Conception longitudinale :

Pour cette variante, le pont conçu est à 4 travées isostatiques, égales, de longueur 22 m chacune, avec un appui central implanté au TPC de l'autoroute.



Figure 87 : Coupe longitudinale de la variante 1 (PSI-BA)

Conception transversale :

Ce pont entre dans le projet de l'échangeur Ain Dalia sur l'autoroute A4. On aura donc à respecter le profil en travers de la voie portée en plus des équipements nécessaires au bon fonctionnement du pont.

Le profil transversal comportera deux voies de largeur 4 m, un terre plein centrale de 2 m, et il faudra laisser une bande trottoir de 0.5 m des deux cotées et une barrière de sécurité occupant avec la corniche une largeur de 0,65 m. Cela veut dire que la largeur transversale totale est de 12.3 m.

8.4.1. Pré dimensionnement des poutres

Longitudinalement :

Les poutres du tablier sont des poutres préfabriquées indépendantes en béton armé.

Chacune a une longueur totale de travée $L_p = 22$ m. Un about d'appui doit être pris aux deux extrémités de la poutre, dans le cas de poutres en BA, l'about est généralement compris entre 0,3 et 0,4 m.

On choisit $d = 0,35$ m.

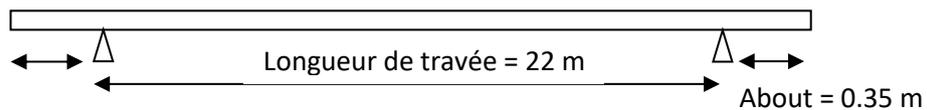


Figure 88 : Coupe longitudinale d'une poutre du tablier de la variante 1

Transversalement

Pour des raisons économiques, les poutres principales n'ont une section rectangulaire que sur appuis. Leur section est en fait variable et à mi-travée on la trouve en T ayant à la fois un volume de béton moins important et un rendement assez suffisant.

Hauteur des poutres :

La hauteur des poutres h_p doit vérifier la condition d'élançement qui se définit par le rapport de la hauteur des poutres h_p à la portée L_p d'une travée.

Selon le guide « Ponts type de SETRA », l'élançement économique pour les ponts à poutres en béton armé est compris entre 1/15 et 1/17.

Comme $L = 22m$, on aura $1.29 m \leq h_p \leq 1.46 m$

On prend donc : $h_p = 1.3 m$

Dimensions des poutres :

Les poutres principales, auront une section en T avec talon permettant le logement des armatures, et des goussets supérieurs renforçant le plan de la jonction verticale de l'hourdis et de l'âme de poutre.

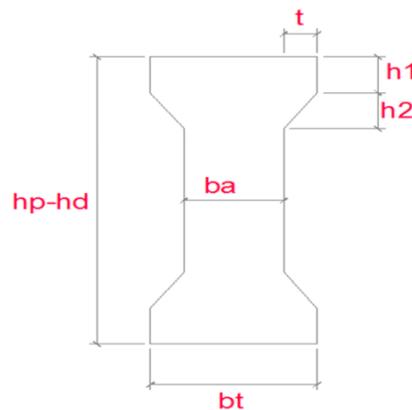


Figure 89 : Dimensions d'une poutre en BA du tablier de la variante 1

Epaisseur de l'âme

Sachant que $\frac{h_p}{3} \leq ba \leq \frac{h_p}{5}$

On trouve $0.26 m \leq ba \leq 0.43 m$

On prend $ba = 0.3 m$

Dimensions de la table de compression

La largeur de la table de compression doit être comprise entre $0.5 h_p$ et $0.7 h_p$.

On prend une largeur de $1m$

Son épaisseur est pris égale à $0.1 m$

Dimensions du talon

Les dimensions du talon sont prises de manière à laisser la place au minimum de deux nappes d'armatures.

On prend donc :

Tableau 8 : Dimensions du talon d'une poutre en BA de la variante 1

t	0.1 m
bt	0.5 m
h1	0.15 m
h2	0.15 m

On aura donc :

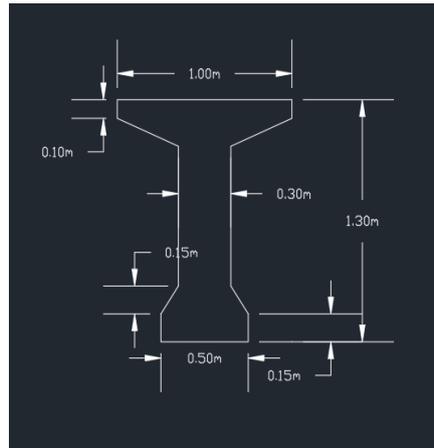


Figure 90 : Coupe transversale d'une poutre en BA du tablier de la variante 1

Entre-axe des poutres :

Il est souvent conseillé de prendre un encorbellement nul pour éviter l'emploi d'un coffrage en porte à faux d'une partie du hourdis.

Par conséquent, les poutres de rives sont positionnées d'une façon où il n'y a pas de longueur d'encorbellement.

Selon les recommandations de SETRA, l'entraxe des poutres est compris entre 1 et 2.5m.

On choisit de mettre en place 6 poutres dans le sens transversal, ce qui donne un espacement de 2.26m.

8.4.2. Pré dimensionnement des hourdis

L'hourdis ou la dalle de couverture joue plusieurs rôles :

- La transmission des charges routières vers les poutres principale
- Un rigidifiant des poutres, vu que les entretoises ne sont utilisées que dans les abouts, il est soumis en plus de la flexion générale à une flexion locale (poinçonnement) due aux charges locales.
- Une table de compression des poutres
- Un support de l'étanchéité ainsi que le revêtement de chaussée.

Le hourdis est construit en béton armé et il est coulé sur place avec des coffrages appuyés ou suspendus aux poutres.

Différents matériaux sont utilisés pour réaliser les coffrages perdus, chacun ayant sa propre limite d'emploi liée à sa résistance. Il y a des coffrages perdus en fibrociment de faible épaisseur ou des pré-dalles en béton armé, assez épaisses pour les grandes portées.

Afin de pouvoir assurer son fonctionnement, l'hourdis doit avoir une épaisseur entre 16 et 20 cm ; on opte pour une épaisseur de 20 cm.

8.4.3. Pré dimensionnement des entretoises

Les entretoises sont des éléments transversaux en béton armé coulés sur place qui servent à :

- Rigidifier et solidariser la structure des poutres.
- Soulever le tablier lors du changement des appareils d'appui.

La hauteur des entretoises d'about est voisine à celle des poutres. Cependant, il est préférable de laisser un espace en réduisant légèrement leur hauteur pour les rendre moins visible par rapport aux poutres.

On prend alors une hauteur de 1 m, et une épaisseur de 0.3 m.

Pour la largeur, en prenant en compte l'entraxe des poutres, on trouve $L = 1.04$ m.

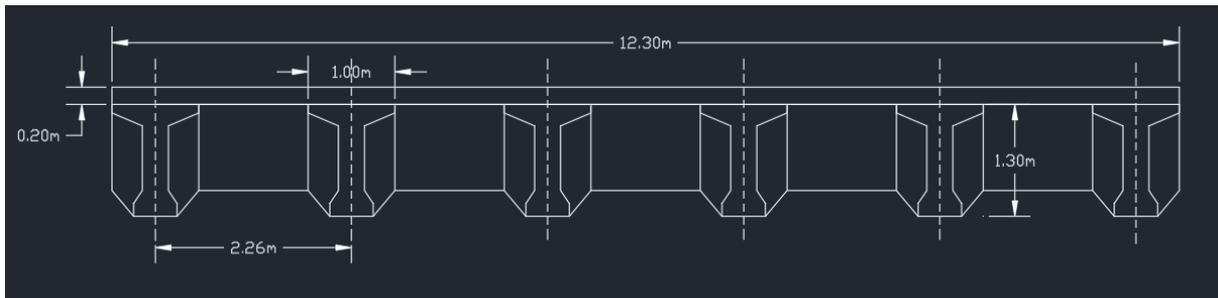


Figure 91 : Coupe transversale du tablier de la variante 1

Variante 2 : Pont à poutres en béton précontraint (VIPP)

Conception longitudinale :

Le pont comporte trois travées indépendantes dont la travée centrale est de 40 m et les travées de rive de 24 m, ce qui justifie le choix de ce type de pont.

Cette variante permet de profiter des grandes portées offertes par le béton précontraint afin d'éviter l'implantation d'un appui centrale au niveau du TPC de l'autoroute franchie.



Figure 92 : Conception longitudinale de la variante 2 (VIPP)

Conception transversale :

La conception transversale de cette variante sera la même que celle définie pour la première variante.

8.4.4. Pré dimensionnement des poutres

Longitudinalement

L'ouvrage en question se compose longitudinalement de 3 travées isostatiques, comme indiqué ci-dessus. Les poutres du tablier sont des poutres préfabriquées indépendantes en béton précontraint.

En plus de la longueur de la portée, s'ajoute un débordement de chaque côté de 0.5m

Ce débordement est appelé zone d'about, entre l'axe de l'appareil d'appui et l'extrémité de la poutre. Dans ce type de tablier, cette zone doit avoir une largeur suffisante pour permettre l'arrosage de l'appareil d'appui c'est-à-dire la diffusion jusqu'à la fibre inférieure de la poutre de l'effort de précontrainte du câble le plus bas.

Transversalement

Comme nous aurons recours à la préfabrication, ça permet d'envisager des formes de poutres assez élaborées, plus délicates à coffrer, mais permettant de faire travailler au mieux la matière.

La forme des poutres est généralement en double T, section de caractéristiques mécaniques bien adaptées à la gamme de portées de ce type d'ouvrage. La matière est concentrée dans les deux fibres extrêmes qui constituent la table de compression supérieure, d'une part, et le talon inférieur d'autre part.

Hauteur des poutres

Ce type de tablier a une caractéristique particulière qui est liée à leur élancement relativement faible, le rapport de la hauteur du tablier à la portée est généralement compris entre 1/22 et 1/16.

On adoptant une hauteur des poutres de 2 m, et en multipliant par la longueur de la travée centrale, on aura un élancement de 1/20, ce qui satisfait aux recommandations de SETRA.

Entraxe des poutres

Comme dans le cas du tablier en poutres en béton armé, il est préférable d'éviter les encorbellements des hourdis.

Donc, en tenant compte de la largeur de la table de compression et la largeur total du tablier, le tablier conçu est constitué de quatre poutres espacées de 3.63 m.

Dimensions des poutres :

Table de compression :

La table de compression est généralement de faible épaisseur, ce qui permet d'excentrer au maximum la matière vers la fibre supérieure. On opte pour une épaisseur de 0.1 m.

Elle est relativement large, donc sa largeur devrait être comprise entre 0.5 et 0.7 fois la hauteur des poutres.

On choisit une largeur de 1.4 m

$$0.7 \times h_p = 1.4 \text{ m}$$

Epaisseur de l'âme :

L'âme relie la table de compression et le talon, son épaisseur est généralement faible, et elle est épaissie au voisinage des appuis en fonction de l'importance des cisaillements.

A mi travée, son épaisseur est de 0.26 m et de 0.4 m au droit des appuis.

Dimensions du gousset supérieur :

La jonction de l'âme et de la table de compression est assurée par un gousset supérieur qui joue un triple rôle :

- Il facilite, de par sa forme, la mise en œuvre du béton,
- Il assure l'encastrement physique du hourdis dans l'âme,
- Il permet de loger les ancrages des câbles relevés en travée dans de bonnes conditions.

A mi travée, ses dimensions sont voisines de 0,1 m x 0,1 m avec une inclinaison sensiblement égale à 45°.

Au niveau des appuis, ses dimensions sont de 0.05 m x 0.05 m avec la même inclinaison.

Dimensions du talon

Le talon est plus massif puisqu'il doit permettre de loger les câbles de précontrainte dans de bonnes conditions d'enrobage.

a- La largeur du talon

Selon le guide de conception des ponts à poutres préfabriquées précontraintes par post-tension (VIPP) de SETRA, on pourra déterminer la largeur totale du talon par la formule empirique suivante :

$$b_{ta} = \frac{b_o Lp^2}{h_t^2 K}$$

Avec :

b_o : Entraxe des poutres en m

Lp : La portée de la travée en m

h_t : Hauteur totale du tablier en m

K : Coefficient compris entre 1100 et 1300

En appliquant la formule ci-dessus, on trouve que la largeur du talon doit être comprise entre 0.88 m et 1.04 m.

On choisit une largeur de 0.88 m.

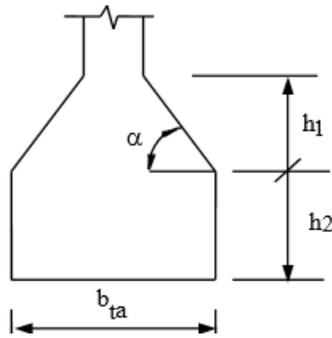


Figure 93 : Dimensions du talon d'une poutre en BP du tablier de la variante 2

b- Le pied du talon

La partie verticale du talon ou pied de talon est généralement comprise entre 0,10 m et 0,20 m pour des largeurs de talons variant de 0,60 m à 0,90 m

On choisit une hauteur h_2 de 0.2 m

c- Le pan incliné du talon

Le pan incliné du talon doit être relativement pentu, ce qui est favorable à une bonne mise en œuvre du béton et conduit à faciliter le relevage des câbles de précontrainte. Ainsi, dans le schéma ci-dessus, la tangente de l'angle α est normalement comprise entre 1 et 1,5.

On choisit $\alpha = 1$, et on aura $h_1 = 0.31$ m.

Cette dimension se rétrécit au niveau des appuis vers 0.25 m.

8.4.5. Pré dimensionnement des pré dalles :

Lorsque la portée libre des coffrages perdus dépasse un mètre, comme dans ce cas (2.24 m), il devient indispensable d'utiliser des pré dalles en béton armé. L'épaisseur strictement minimale à lui donner est de l'ordre de 6 cm, de manière à assurer un enrobage satisfaisant de ses armatures.

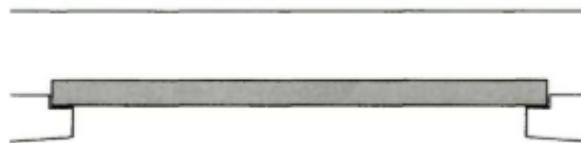


Figure 94 : prédalle en BA

On obtient alors la coupe transversale suivante :

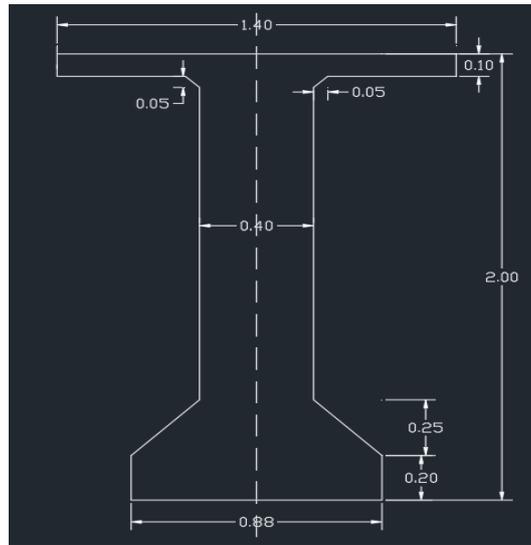


Figure 95 : Coupe Transversale sur appuis d'une poutre du tablier

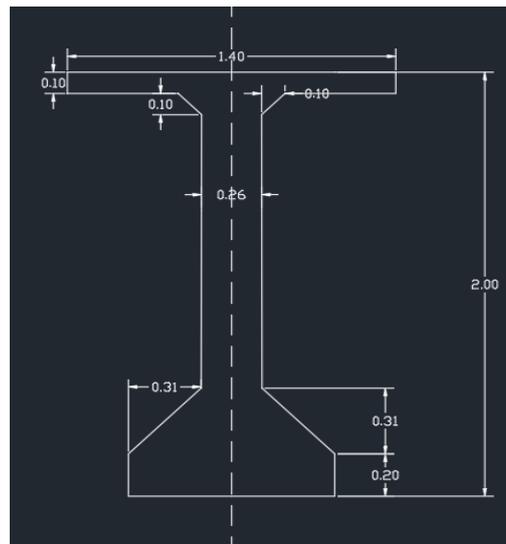


Figure 96 : Coupe transversale en travée d'une poutre du tablier

8.4.6. Pré dimensionnement des hourdis

Il existe deux types d'hourdis :

- Hourdis général coulé par-dessus les poutres.
- Hourdis intermédiaires coulé entre les poutres

Dans ce cas, on a recours à des hourdis généraux réalisés au-dessus des poutres sur toute la largeur du tablier, qui s'appuient sur des prédalles en béton armé.

Leur épaisseur est voisine de 1/16 fois l'entraxe des poutres, on prend 0.25m.

8.4.7. Pré dimensionnement des entretoises

Les entretoises, faisant fonction de poutraison transversale, sont en général réalisées en deux phases.

Une première partie, réalisée de part et d'autre des poutres, constitue une amorce d'entretoise ; elle est bétonnée en même temps que les poutres et est donc préfabriquée.

La seconde partie relie les amorces des poutres adjacentes et constitue la partie coulée en place de l'entretoise

Selon les recommandations de SETRA, l'épaisseur des entretoises doit être comprise entre 25 cm et 30 cm.

On prend donc une épaisseur de 0.3 m.

Comme pour le cas de la première variante, la hauteur des entretoises est voisine de celles des poutres, on opte pour une hauteur de 1.5m

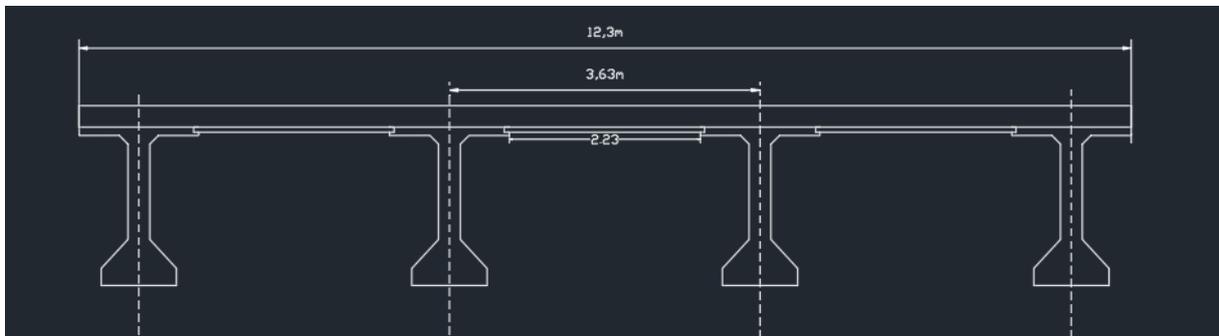


Figure 97 : Coupe transversale en travée du tablier VIPP

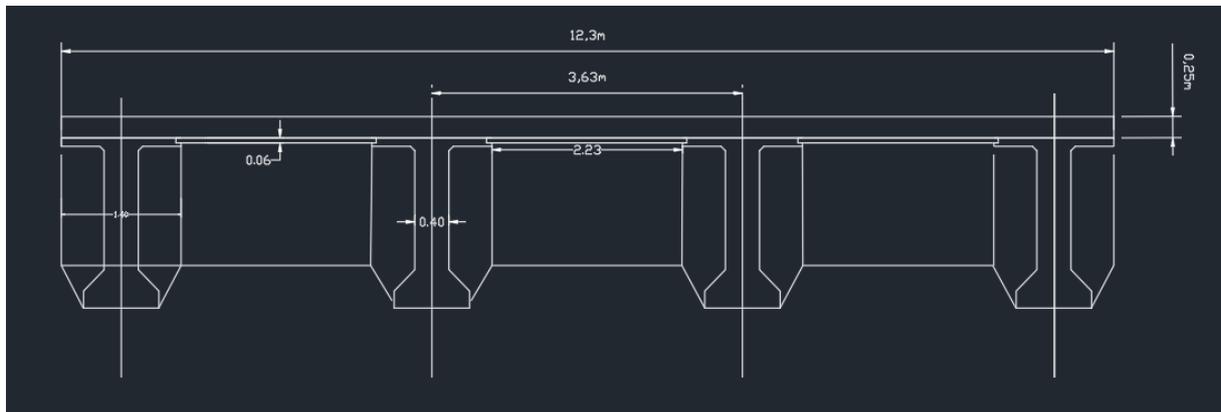


Figure 98 : Coupe transversale en appuis du tablier VIPP

8.5. Pré dimensionnement des appuis

Introduction :

Les appuis ont pour rôle de transmettre les efforts dus au tablier jusqu'à le sol de fondation. On distingue deux types d'appuis :

- Appuis transmettant uniquement les réactions verticales (Charges routières transmises par le tablier, poids du tablier, leur poids propre, ...)
- Appuis transmettant les réactions verticales et horizontales (efforts de freinages, poussée des terres, efforts sismiques, forces hydrodynamique, ...) qu'on appelle des culées.

8.5.1. Evaluation des efforts dus au tablier

Il est important de déterminer les valeurs de réactions d'appui maximal dû au tablier sous la charge permanente et les différentes charges routières normales, dès la phase d'avant-projet.

A ce propos, on se servira de la pièce 1.3.1- Pré-dimensionnement géométrique coûts et quantités-, du PP 73, établie par SETRA, qui fournit des abaques pour déduire les réactions d'appui maximales pouvant se produire.

a- Estimation des réactions d'appui

Les abaques ont été établis pour des tabliers d'inertie constante à des travées symétriques, mais leur utilisation peut être étendue de façon à satisfaire à des tabliers comportant un nombre de travées symétriques ou non, dans des conditions précises.

Les abaques sur lesquels les portées sont en abscisse, et les réactions d'appui en ordonnée, se composent d'une série de courbes donnant les réactions dues à :

- Ro(CP) : La charge permanente (y compris les superstructures)
- Charges de chaussée :
 - ✓ Ro(AI) : charge A(I)
 - ✓ Ro(Trot) : charges de trottoirs
 - ✓ Ro(Bc) : Camions Bc
 - ✓ Ro(Mc 120) : Convoi militaire Mc 120

Appuis d'extrémité :

Variante 1 : Tablier en poutres en béton armé (PSI BA)

Le tablier conçu est constitué de 4 travée symétriques, donc la donnée d'entrée est la portée de la travée de rive ($L = 22$ m), on obtient pour les différents cas de charge :

Tableau 9 : Réactions aux appuis d'extrémité pour les cas de charge de la variante 1 PSI BA

	$\theta L = 22$ m				
	Charge Permanente	Trottoir	A(I)	Bc	Mc 120
Réactions aux appuis (t/m)	18.5	2	16.5	47.5	95

Variante 2 : Tablier en poutres indépendantes en béton précontraint (BP)

Pour cette variante, le tablier est constitué par 3 travées non symétriques, dont la travée de rive est de 24 m, On trouve :

Tableau 10 : Réactions aux appuis d'extrémité pour les cas de charge de la variante VIPP

	θ L = 24 m				
	charge permanente CP	Trottoir	A(l)	Bc	Mc 120
Réactions aux appuis (t/m)	16.5	2	16.5	49.5	96.5

Appuis intermédiaires :

Contrairement au cas des appuis de rive, on entre par la valeur de la portée centrale.

Variante 1 : Tablier en poutres en béton armé (PSI BA)

Les réactions des appuis 2 et 4 sont obtenues directement à partir des abaques. Pour l'appui 3, il est nécessaire de multiplier par le coefficient de corrélation (C 2-3) entre appuis 2 et 3.

Tableau 11: Réactions aux appuis intermédiaires pour les cas de charge de la variante 1 PSI BA

	L = 22 m				
	charge permanente CP	Trottoir	A(l)	Bc	Mc 120
Réactions aux appuis 2 et 4(t/m)	50.5	4.5	27.5	64	109.75
Coefficient C 2-3	0.81	0.935	0.96		
Réactions à l'appui 3 (t/m)	40.905	4.2075	26.4	64	109.75

Variante 2 : Tablier en poutres indépendantes en béton précontraint (BP)

Dans ce cas, puisqu'il s'agit de trois travées non symétriques, il est nécessaire de multiplier par des coefficients de rattachement C (3 tr)

Tableau 12 : Réactions aux appuis intermédiaires pour les cas de charge de la variante 2 VIPP

	L = 40 m				
	charge permanente CP	Trottoir	A(l)	Bc	Mc 120
Réactions aux appuis (t/m) (4tr)	82.8125	8	33.9	63.5	108.5
Coefficient de rattachement Ctr	0.875	0.855	0.975		
Réactions aux appuis (t/m) (3tr)	72.4609375	6.84	33.0525		

b- Exploitations des résultats

Pour adapter les résultats obtenus, on les multiplie par des coefficients qui dépendent de la géométrie du tablier, et de l'excentrement des charges appliquées, ensuite, on les combine pour obtenir la réaction maximale à prendre en compte pour le pré dimensionnement, en appliquant la relation :

$$R = R_0(CP) KCP LU + R(trot)LT + \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} R_0(AI) KA \\ R_0(BC)KB KSEMB \\ R_0(MC120)KSEM \end{array} \right\}$$

Avec :

- LU : Largeur utile du tablier (12.3m)
- LT : largeur totale des trottoirs (1.3m)
- KCP, KA, KB, KSEMB, KSEM : coefficients qui vont être explicités dans les paragraphes suivants.
 - Coefficient KCP :

Il est le rapport des densités au mètre carré de surface utiles des charges permanentes (ossature + superstructures) de l'ouvrage étudié et de l'ouvrage moyen.

$$KCP = \frac{\text{Poids (Tablier + superstructures)}}{\text{Poids (Tablier + superstructures) ouvrage moyen}}$$

Pour ce faire, il faut calculer la section transversale, puis la densité par surface utile (t/m²)

Variante 1 : Tablier en poutres en béton armé (PSI BA)

Tableau 13 : aire de la section transversale du tablier PSI BA

	poutre +entretoise amorce	entretoise	hourdis	total
Section (m2)	7.41	6.552	2.46	16.422

On calcule le poids total par surface utile, en adoptant que le poids de la superstructure est 0.35 t/m², selon le PP73.

Tableau 14 : Poids total par surface utile du tablier PSI BA

Densité béton armé (t/m ³)	largeur utile (m)	section transversale (m ²)	poids du tablier (t/m ²)	poids de la superstructure (t/m ²)	Poids total (t/m ²)
2.5	12.3	16.422	3.337	0.35	3.687

Pour l'ouvrage moyen :

Il s'agit d'un ouvrage courant de type PSI DP à dalle parfaitement rectangulaire dont l'épaisseur est donnée par le rapport d'élancement E qui dépend du nombre des travées et du rapport de portée.

Etant donné que :

- $\theta = \frac{\text{portée de rive}}{\text{portée centrale}} = 1$
- le nombre de travée = 4

On trouve $E = 1/28 \times$ portée de rive

Sur ce, on a que :

Tableau 15 : Poids total par surface utile du tablier de l'ouvrage moyen correspondant à la variante 1

E (m)	poids du tablier (t/m2)	poids de la superstructure (t/m3)	P (t/m2)
0.78	1.964	0.35	2.314

On trouve donc que le coefficient KPC est égal **1.53**.

Variante 2 : Tablier en poutres indépendantes en béton précontraint (BP)

La surface transversale de la deuxième variante est :

Tableau 16 : aire de la section transversale du tablier VIPP

	poutre +entretoise	Entretoise	hourdis	total
Section (m2)	10.72	10.017	3.075	23.812

De la même manière que la première variante, on a :

Tableau 17 : Poids total par surface utile du tablier VIPP

densité béton t/m3	largeur utile (m)	section transversale (m)	poids du tablier (t/m2)	poids de la superstructure (t/m3)	P (t/m2)
2.5	12.3	23.812	4.839	0.35	5.189

Pour l'ouvrage moyen :

Le pont conçu comporte 3 travées, et θ est égale à 0.6

Tableau 18 : Poids total par surface utile du tablier de l'ouvrage moyen correspondant à la variante 2

E (m)	poids du tablier (t/m2)	poids de la superstructure (t/m3)	P (t/m2)
1.212	3.030	0.35	3.380

On trouve donc que le coefficient KPC est égal à **1.535**.

➤ Coefficient KA et KB

Ils dépendent étroitement de la classe du pont et du nombre de voies, prédéfinis dans le paragraphe 2.2. On a donc :

Tableau 19 : Coefficient KA et KB du pont

classe du pont	NBR de voies	KA	KB
1	3	9.45	2.85

➤ Coefficient KSEMB et KSEMC :

Ces coefficients prennent en charge l'excentricité e des charges Bc et MC 120 par rapport à la longueur de la semelle de fondation (LSEM), selon la relation :

$$KSEM = 1 + \frac{3 e}{LSEM}$$

Dans ce cas, on a que le profil en travers de la voie portée est symétrique, donc les valeurs d'excentrement sont particulièrement égales à :

$$e(Bc) = \frac{ESURCH - 2.5 NV}{2} \quad \text{et} \quad e(MC 120) = \frac{ESURCH - 4.3}{2}$$

Avec :

- ESURCH : la largeur de la chaussée chargeable, elle est égale, selon le paragraphe 2.3, à 10 m
- Nv : Nombre des voies

On obtient pour les deux variantes :

Tableau 20 : Coefficient KSEMB et KSEMC et KSEM du pont

ESURCH	10
LSEM	13.2
NV	3
e (BC)	1.25
e(MC100)	2.85
KSEMB	1.28
KSEMC	1.64
KSEM	1.64

En combinant les résultats trouvés, on obtient la réaction maximale sur appui pour :

Variante 1 : Tablier en poutres en béton armé (PSI BA)

- Pour les appuis de rive :

Tableau 21 : Réaction maximale d'appuis 1 et 5 de la variante PSI BA

Ro (AL) x KA (t)	155.925
Ro (BC) x KB x KSEMB (t)	173.833
Ro(MC120) x KSEMC (t)	156.534
Appuis 1 et 5 (t)	539.033

- Pour l'appui 3 :

Tableau 22 : Réaction maximale de l'appui 3 de la variante PSI BA

Ro (AL) x KA (t)	249.48
Ro (BC) x KB x KSEMB (t)	234.2182
Ro(MC120) x KSEMC (t)	180.8381
Appui 3(t)	1041.426

Pour les appuis intermédiaires :

Tableau 23 : Réaction maximale des appuis 2 et 4 de la variante PSI BA

Ro (AL) x KA (t)	259.875
Ro (BC) x KB x KSEMB (t)	234.218182
Ro(MC120) x KSEMC (t)	180.838068
Appuis 2 et 4 (t)	1229.86818

Variante 2 : Tablier en poutres indépendantes en béton précontraint (BP)

- Pour les appuis de rive :

Tableau 24 : Réaction maximale des appuis de rive de la variante VIPP

Ro (AL) * KA (t)	155.925
Ro (BC) * KB* KSEMB (t)	181.153
Ro(MC120) *KSEMC (t)	159.005
Appuis de rive (t)	495.345

- Pour les appuis intermédiaires :

Tableau 25 : Réaction maximale des appuis intermédiaires de la variante VIPP

Ro (AL) * KA (t)	312.346125
Ro (BC) * KB* KSEMB (t)	232.388352
Ro(MC120) *KSEMC (t)	178.778409
Appuis intermédiaires (t)	1689.61957

c- Estimation des efforts horizontaux

Les efforts horizontaux appliqués sur les piles peuvent avoir différents origines :

- Ceux dus aux freinages d'un camion Bc ou de la charge A(l)
- Ceux dus à la variation de longueur du tablier
- Ceux dus à la charge centrifuge dans le cas des ponts courbes

➤ Efforts de freinage

Le tableau (Page 19, pièce 1.3.1, PP73) donne l'estimation des efforts de freinages dus à une force latérale de 30t. Les valeurs du tableau sont des valeurs minimales qui correspondent à des appuis ayant des rigidités très voisines, donc il est plus approprié de les majorer de 50 % pour les calculs de pré dimensionnement.

Variante 1 : Tablier en poutres en béton armé (PSI BA)

Pour ce tablier constitué de 4 travées, et d'une dalle de transition.

Tableau 26 : Efforts dues au tablier PSI BA

piles		piles culées	
Effort de freinage (t)	Effort de freinage majoré de 50 % (t)	Effort de freinage (t)	Effort de freinage majoré de 50 % (t)
4.5	6.75	8.25	12.375

Variante 2 : Tablier en poutres indépendantes en béton précontraint (BP)

Le tablier est composé de 3 travées, et une dalle de transition.

Tableau 27 : Efforts dues au tablier VIPP

piles		piles culées	
Effort de freinage (t)	Effort de freinage majoré de 50 % (t)	Effort de freinage (t)	Effort de freinage majoré de 50 % (t)
6	9	9	13.5

➤ Efforts de variation de longueur de tablier

La prise en compte d'un effort de freinage majoré de 50% permet de négliger ces effets au stade du pré dimensionnement.

Remarque :

Les valeurs des efforts horizontaux peuvent être très différentes des valeurs réelles, mais elles restent valables au stade de l'avant-projet, pour définir les dimensions des coffrages.

8.5.2. Choix et conception des piles

Il existe un large choix de modèles des piles, qui se partagent en trois catégories :

- Appuis constitués par des éléments longs ou **voiles**
- Appuis constitués par les éléments courts : **colonnes** si leur section est ronde ou **poteaux** si leur section est carré
- Appuis spéciaux : de forme composite

Une pile est constituée essentiellement par :

- Une superstructure ou fut : la partie visible de la pile, elle reçoit directement les appareils d'appui, et transmet les charges à la fondation

- Une fondation : la partie enterrée de la pile, elle transmet les charges au sol

Dans ce cas, et pour les deux variantes du pont, on propose une superstructure composée par une file de colonnes, reliées entre eux par un chevêtre, pour assurer la rigidité suffisante dans le sens transversale.

Ce type d'appuis est mieux adapté au projet, vu l'indépendance des travées, ce qui nécessite une largeur d'appuis importante permettant la mise en place de deux files d'appareils d'appui, cette largeur sera assurée par le chevêtre qui transmettra les efforts verticaux aux colonnes.

a- Nombre et espacement des colonnes

Il est recommandé de prévoir autant de colonnes que d'appareils d'appui.

Concernant le tablier PSI BA, on opte pour 6 colonnes espacées de 2.3.

Pour la deuxième variante, on choisit 4 colonnes espacées de 3.83 m.

b- Dimensions des colonnes

Compte tenu des recommandations du PP73, le diamètre minimal à prendre en compte dans le cas des colonnes circulaires de 0.6 m.

On prend alors un diamètre de 0.8 m.

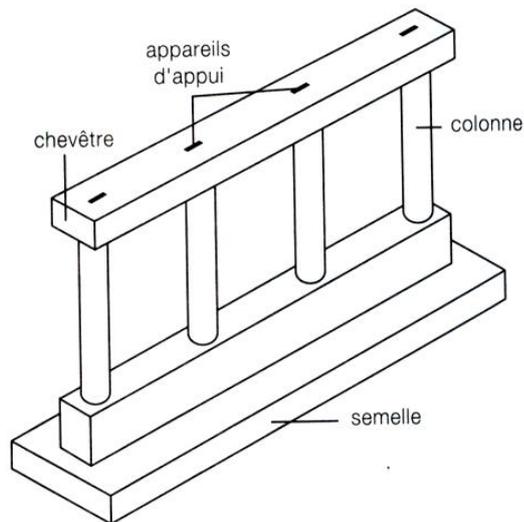


Figure 99: Composants des piles de pont

c- Hauteurs des colonnes

La hauteur des colonnes se définit comme étant la différence entre la cote intrados du tablier et la hauteur du chevêtre

Il dépend étroitement du profil en long de l'ouvrage

d- Dimensions du chevêtre

Le tablier repose sur le chevêtre par l'intermédiaire des appareils d'appui, donc ses dimensions doivent permettre l'implantation des lignes d'appareil d'appui.

- Largeur : elle dépend de la zone d'about des poutres, ainsi que de la section horizontale de la pile, on prend 2 m
- Longueur : elle dépend de la largeur du tablier, on opte pour 12.3 m
- Hauteur : on prend une valeur de 1 m

Et conformément aux dispositions parasismiques, le chevêtre sera muni de butés parasismiques empêchant le tablier de s'échapper en cas d'un séisme horizontal.

8.6. Choix et conception des appareils d'appui

Un appareil d'appui de pont est un élément de l'ouvrage placé entre le tablier et les appuis, dont le rôle est de transmettre les actions verticales dues à la charge permanente et aux charges d'exploitation et de permettre des mouvements de rotation ou de translation.

Le type d'appareils d'appui le plus courant et qu'on va utiliser dans ce projet est celui en élastomère fretté. Il s'agit d'un bloc d'élastomère vulcanisé (rendu moins plastique et plus élastique) et renforcé à l'intérieur par des frettes en acier.

Chaque appareil d'appui est de 40 cm x 50 cm.

8.7. Choix et conception des piles culées

8.7.1. Différents Types des culées

Les piles culées sont des appuis d'extrémité enterrées totalement ou partiellement. Elles sont menées à supporter en plus des charges du tablier, le poids des terres qui les surmontent, dépendamment du niveau de la fondation, il existe donc deux types de piles culées :

- **Piles culées apparentes (remblayées)** : qui comportent une partie supérieure largement apparente après avoir terminé les terrassements. Elles sont constituées par un ensemble de voiles et murs en béton armé. Pour les remblais d'accès, ils se terminent en quart de cône dont le sommet doit être placé à une distance supérieure à 50 cm de l'extrémité du mur en retour. Ce type de culées est muni par des fondations superficielles, ce qui exige que le sol soit de bonne qualité

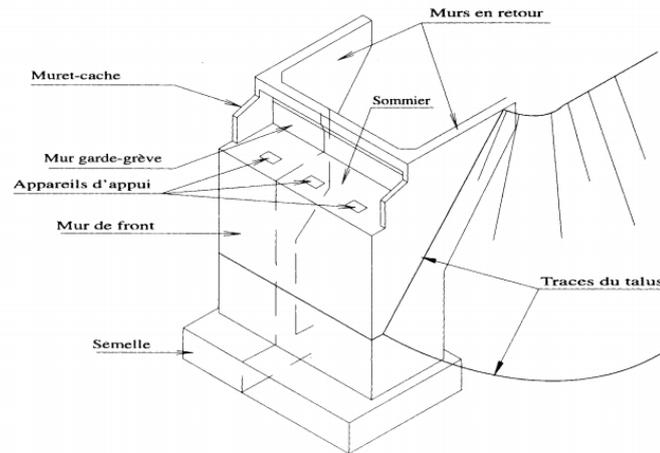


Figure 100 : piles culées apparentes

- **Piles culées enterrés** : dont la structure porteuse est noyée dans le remblai d'accès à l'ouvrage qui est généralement taluté à 3H/2V . Elles s'adaptent à tous types de fondations sur semelles superficielles et sur pieux ou puits.

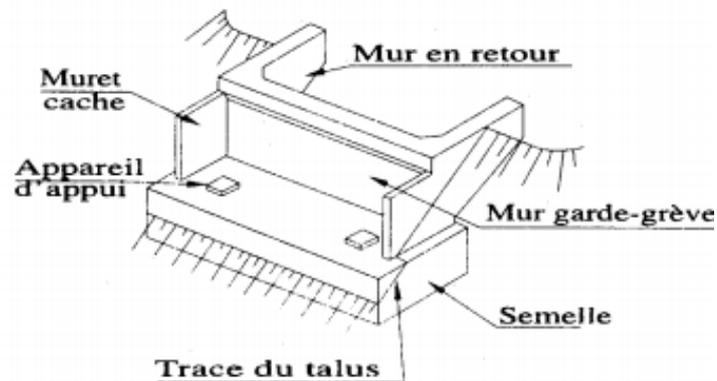


Figure 101 : pile culée enterrés

8.7.2. Type de culée à adopter

Pour ce projet, nous adoptons une culée enterrée, un choix qui se justifie par le fait que la zone du projet se caractérise par un mauvais sol, et donc on aura recours à des fondations profondes.

La culée enterrée sera supportée par des voiles en béton armé reposés par sur une semelle de liaison transmettant les charges vers les pieux.

Le choix de ce type de culée se justifie aussi par sa facilité d'exécution, et il sera adopté pour les deux variantes du pont.

8.7.3. Pré dimensionnement des piles culées

Ce type de culée se compose des murs et voiles en béton armé notamment le sommier, murs en retour, mur garde grève, voile de superstructure.

a- Sommier d'appui

Il se définit comme le chevêtre de la culée, il est l'élément sur lequel repose les poutres principales. Sa surface doit donc être aménagée à l'implantation d'une seule ligne d'appareils d'appuis et à la mise en place des vérins en phase de soulèvement du tablier.

Les dimensions prises pour les deux chevêtres des culées sont :

- Longueur : 13 m
- Largeur : 1.6 m
- Hauteur : 0.8 m

b- Mur de garde grève

Le mur garde grève a pour fonction de séparer physiquement le remblai de l'ouvrage. Il s'agit d'une voile en béton armé. Il permet d'établir les joints de chaussée entre la chaussée du pont et celle de la rampe d'accès.

On opte pour les dimensions suivantes :

- Longueur : 13 m
- Hauteur : 2.45 m, il se définit comme la somme de la hauteur totale du tablier et la hauteur des appareils d'appui et leurs bossages.
- Epaisseur : 0.3 m

c- Mur en retour

Ce sont des voiles en béton armé, encastrés avec le sommier et le mur garde-grève, ils permettent de retenir latéralement les poussées des terres dus aux remblais d'accès.

Sa longueur varie linéairement en fonction de son épaisseur selon la relation :

$$E = \frac{L + 2}{20}$$

On fixant une longueur du mur de 3.5 m, on trouve une épaisseur de 0.275 m

On choisit une épaisseur de 0.3m

Sa hauteur varie linéairement d'une hauteur à compter du bas du sommier au niveau du terrain naturel, vers une hauteur de 0.6 m au-dessous du terrain naturel.

d- Dalle de transition

Elle sert à prolonger le tablier, et elle s'appuie directement sur la partie supérieure des piles culées. Elle a pour rôle d'empêcher la formation d'une dénivellation entre l'ouvrage et la chaussée.

Sa longueur est donnée par la formule suivante :

$$L \geq \text{Min} (6\text{m}, \text{Max} (3; 0.6 \text{Ht}))$$

Avec Ht est la hauteur du tablier

On obtient ainsi : $L = 3\text{m}$ et on opte pour une épaisseur de 0.3 m , et elle occupe une largeur de 13 m .

Elle sera posée sur une couche de gros béton de 10 cm , avec une inclinaison de 5% permettant le drainage des écoulements souterrains.

e- Corbeau

Il joue le rôle de l'appui linéaire de la dalle de transition. Il a une forme trapézoïdale, avec une petite base de 0.3 m et une grande base de 0.6 m avec une hauteur de 0.3 m .

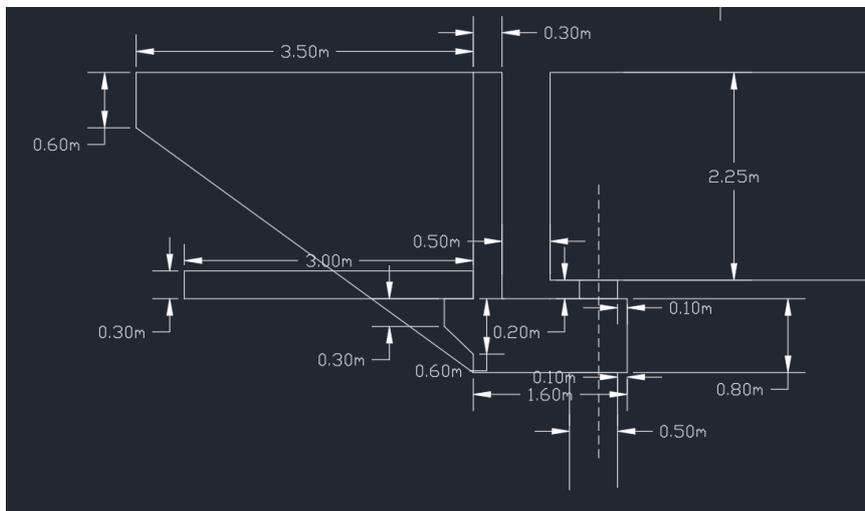


Figure 102 : Coupe transversale de la culée

f- La partie intermédiaire

Elle est constituée d'un voile en béton armé, qui va permettre la transmission des charges du sommier vers le système de fondation.

On opte pour un voile de 0.5 m d'épaisseur, dont la hauteur se définit comme la différence entre la coté d'extrados et la cote de la fondation.

8.8. Choix et conception des fondations

Le choix de système de fondation s'appuie majoritairement sur l'étude géotechnique qui définit la nature du sol et sa capacité portante.

La mission de cette étude a été confiée au Laboratoire Public d'Essais & d'Etudes (LPEE), qui a effectué des essais pressiométriques au niveau de chaque appui.

Le laboratoire a mis à notre disposition un rapport détaillé qui résume l'ensemble des essais effectués, en déterminant pour chaque sondage :

- Pression de fluage (MPa)

- Pression limite (MPa)
- Module pressiométrique (MPa)

Ces données permettent de déterminer la capacité portante du sol, plus tard au cours du dimensionnement des fondations.

Pour bien saisir l'emplacement de ces sondages, nous allons intégrer les résultats de l'étude géotechnique à l'aide du module géotechnique du logiciel Autodesk Civil 3D. Ce module permet en plus de la visualisation des sondages, l'interpolation entre eux pour créer les couches géologiques qui constitue la zone.

Dans le cadre de ce projet, puisque le but des sondages est l'implantation des appuis du pont, nous allons nous contenter de l'intégration des sondages sur Civil3D et leur visualisation.

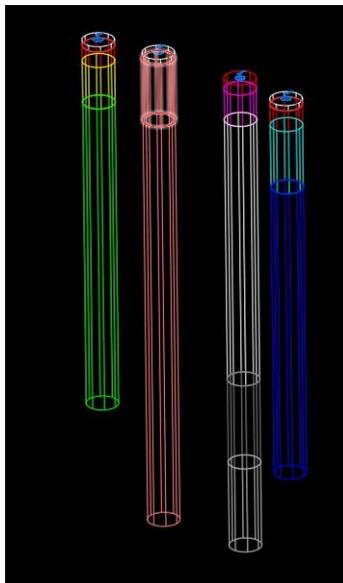


Figure 103 : Sondages pressiométriques sous les appuis du pont

Chaque couleur indique une couche de sol différente, et en y cliquant nous obtenons les données lithologiques issus du rapport géotechnique.

Ces sondages montrent que le bon sol se situe au-delà de 30 mètres de profondeur, ce qui conduit à choisir un système de fondation profonde du type pieux forés exécutés sur place.

On adopte le même système de fondation pour les deux variantes.

8.8.1. Pré dimensionnement des pieux

On choisit deux files parallèles et quatre rangées perpendiculaires aux lignes d'appui, ce qui donne un total de 8 pieux, et ce pour bien répartir les efforts transmis par les futs vers le sol.

Ayant les dimensions suivantes :

- Diamètre : est voisin de 1/30 fois la longueur de pieux, on choisit donc un diamètre de 1.2 m. Il s'agit donc des puits en béton armé
- Espacement entre files : il se définit par le triple du diamètre des pieux, on opte pour 3.6 m

- Espacement entre rangées : il est égal à l'espacement dans le sens transversal, il est égal donc à 3.6 m

8.8.2. Pré dimensionnement de la semelle de liaison

Pour des puits de diamètre 1.2 m, on opte pour une semelle de liaison avec les dimensions suivantes :

Tableau 28 : Dimensions de la semelle

Largeur de la semelle (m)	6
Longueur de la semelle (m)	13.2
hauteur de la semelle (m)	1.64

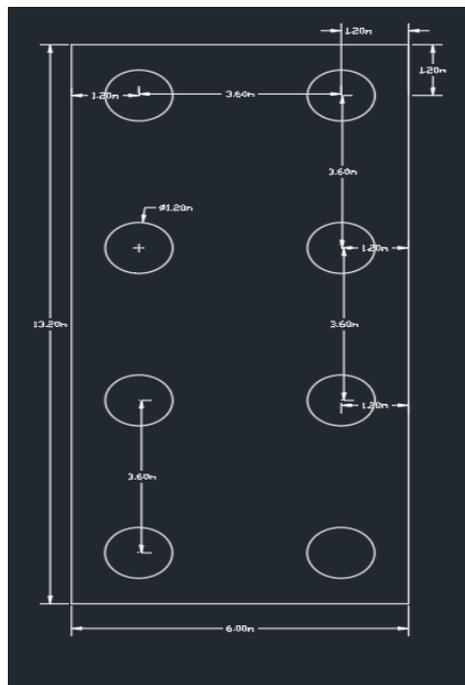


Figure 104 : Coupe de la semelle de fondation

8.9. Conclusion

La conception et le pré dimensionnement des variantes du pont permettent de donner une proposition concrète dans la phase d'avant-projet. Les dimensions préétablies servent à dimensionner les coffrages, et elles sont modifiables dans la phase de la conception détaillée.

En plus de la structure porteuse, le tablier du pont est équipé par des différents dispositifs pour assurer son bon fonctionnement.

Le choix de ces équipements fera l'objet de la partie suivante.

IX. Equipements du pont

Ce sont tous les accessoires du tablier de pont qui n'ont pas un rôle d'élément porteur mais qui assurent d'autres fonctions :

- La sécurité et le confort des usagers
- La protection des éléments structuraux
- L'esthétique de l'ouvrage
- La pérennité de l'ouvrage

9.1. Dispositif de retenue

Il a une forte incidence sur l'aspect de l'ouvrage, il doit donc satisfaire à la fois à des conditions de sécurité et d'esthétique. En fonction de la catégorie des véhicules à retenir dans le cas du choc, se définit le type de ce dispositif.

Dans ce cas, on opte pour une barrière BN4, qui reprend le choc des véhicules légers.

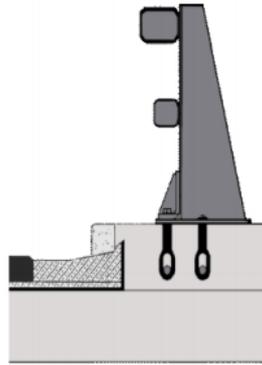


Figure 105 : Barrière BN4

9.2. Corniche

Un des rôles essentiels des corniches est la protection des extrémités latérales du tablier contre les intempéries, elle évite le ruissellement de l'eau de pluie sur les parements de la structure porteuse.

Il s'agit une corniche préfabriquée à base de béton fixée par une liaison de type béton armé, réglée par un mortier de pose, et fixée par une contre corniche solitaire au tablier.

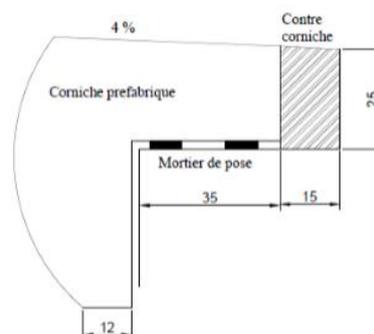


Figure 106 : Corniche préfabriquée

9.3. Système de drainage des eaux pluviales

Il permet d'évacuer les eaux sur le tablier, sans pouvoir s'infiltrer dans la couche de roulement, pour éviter les inondations de la chaussée.

On opte pour des caniveaux préfabriqués en béton armé associés à des bordures de trottoir, disposés de part et d'autre de la couche de roulement.

La présence d'une pente transversale ou dévers aidera à circuler les eaux jusqu'aux caniveaux.

9.4. Joints de chaussée

Les joints de la chaussée assurent la continuité entre l'ouvrage et la chaussée, pour assurer la transition dans des conditions élevées de confort et de sécurité.

Suite aux mouvements longitudinaux du tablier, notamment la dilatation due à la variation de la température, le déplacement du aux charges d'exploitation, le retrait ou le fluage, la présence d'un joint de chaussée est indispensable pour assurer la liberté du mouvement du pont.

9.5. Revêtements

9.5.1. Couche d'étanchéité

L'application de l'étanchéité sur le tablier empêche la pénétration de l'eau à la structure, ce qui conduira à la corrosion des aciers passifs et actifs et par la suite à la dégradation de l'ouvrage.

Elle est mise en place sur la totalité de la surface du tablier, en assurant des recouvrements suffisants et en réalisant des relevés d'étanchéité.

Dans ce projet, on opte pour le système d'étanchéité usuel à la base d'asphalte coulé en deux couches : une en asphalte pur de 8 à 12 mm et une en asphalte porphyre de 22 à 27 mm d'épaisseur.

9.5.2. Couche de roulement

Cette couche se coule au-dessus de la chape d'étanchéité, il s'agit d'un tapis de béton bitumineux d'une épaisseur de 6 cm, mené d'une pente transversale pour éviter la stagnation de l'eau.

Cette couche doit être exécutée soigneusement pour assurer un confort et sécurité aux usagers.

9.6. Conclusion

La détermination des équipements permet de parachever l'étude de conception de l'ouvrage. En combinant les différents paramètres préétablis, nous choisissons la variante du pont la plus appropriée.

En conséquence, la partie suivante détaillera les facteurs de choix de la variante retenue.

X. Présentation de la variante retenue

10.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons récapituler l'ensemble des caractéristiques de la variante choisie afin de l'intégrer dans le modèle 3D du projet.

Cette variante fera l'objet de l'étude avant-projet détaillée et l'étude de projet d'exécution.

10.2. Facteurs de choix de la variante retenue

Compte tenu de l'analyse comparative effectuée au stade de l'étude d'avant-projet, basée sur des critères techniques et économiques, nous choisissons d'adopter un pont à poutre en béton précontraint (VIPP).

Cette variante présente l'avantage de la préfabrication, en maintenant l'autoroute en service (sans interrompre, ni même ralentir notablement la circulation), en plus le béton précontraint permet des travées plus importantes ce qui évitera l'implantation d'un appui centrale au niveau du TPC, qui présente un risque de choc et nuit à la visibilité des conducteurs.

Sur le plan organisationnel, le recours à la préfabrication rend indépendante la fabrication des poutres du reste du chantier, ce qui réduit le délai d'exécution.

Sur le côté esthétique, la préfabrication améliore la qualité des parements et les tolérances dimensionnelles, ce qui rend la structure plus appréciée.

Les poutres seront préfabriquées sur une aire de préfabrication selon le mode de construction suivant :

- Mise en tension sur les poutres de quelques câbles de précontrainte longitudinale, le plus tôt possible, pour permettre de libérer les coffrages.
- Mise en attente des poutres sur une aire de stockage
- Mise en place des poutres sur appuis définitifs par des moyens de levage et de manutention adaptés
- Réalisation en place d'entretoises reliant les poutres
- Mise en précontrainte éventuelle des entretoises
- Coffrage, ferrailage et bétonnage en place de l'hourdi
- Mise en tension d'une deuxième famille de câbles de précontrainte longitudinale et dans certains cas d'une précontrainte transversale lorsque le hourdis a acquis une résistance suffisante

Après la préfabrication des poutres, le tablier est progressivement déplacé par poussage en se glissant sur ses piles, jusqu'à sa position définitive.

10.3. Modélisation de la variante retenue

En exploitant des options de conception préliminaire du logiciel InfraWorks 360, nous avons modélisé la variante du pont choisie dans le même modèle du projet, dans le but de visualiser la structure réaliste dans le contexte naturel du site préalablement préparé.

La modélisation de la structure permet d'enrichir la proposition et augmenter l'efficacité du flux de travail, et créer des présentations.



Figure 107 : modélisation 3D de la variante retenue VIPP

Conclusion

Une fois la conception préliminaire achevée, on procède à la conception détaillée, qui permet d'augmenter le niveau de détail et permet d'illustrer sur les plans tous les éléments de conception nécessaires à la réalisation du projet. Le chapitre suivant présente un descriptif de la phase de la conception détaillée.

Chapitre 3 : Conception détaillée du projet

Introduction

Ce chapitre détaille le processus de conception détaillée de l'échangeur sujet de l'étude sur le logiciel Civil3D, en se basant sur les résultats de la conception préliminaire.

Le modèle créé au préalable dans le logiciel INFRAWORKS est importé et il est la base de la conception détaillée, tous les éléments sont reconnus dans la base de données de Civil 3D grâce à l'interopérabilité entre les deux logiciels.

Il est à noter qu'il est possible d'effectuer l'étude directement sur Civil3D en phase APS, en se basant sur les données topographiques mis à disposition.

Dans le cadre de ce PFE, et afin de maîtriser les techniques et le processus de la conception sur Civil 3D, sans passer par la conception préliminaire sur INFRAWORKS, nous détaillerons ci-après ce flux de travail.

Sur ce, comme le traitement des données topographiques constitue un préambule pour cette phase de la conception. Le processus de la conception du projet comprendra, entre autres, les éléments suivants :

- La création du tracé en plan, qui fournit les informations 2D nécessaires pour déterminer le chemin emprunté par la route.
- La conception d'un profil en long, qui nous donnera la 3ème dimension, les informations d'élévation en chaque point de l'alignement.
- La conception d'un profil en travers type, qui nous indiquera les différentes sous-entités, telles que la chaussée, les trottoirs et les bordures, qui composent la route.

Ces éléments doivent répondre aux normes de conception prédéfinies par « Les échangeurs sur route de type Autoroute, Complément à l'ICTAAL » de SETRA .

I. Etude topographique

1.1. Données de base

Nous disposons comme donnée d'entrée, un levé topographique de la zone du projet délivré par un géomètre topographe. Il est recommandée que le levé soit effectué par la technologie Lidar et la photogrammétrie qui facilitent la collecte des données d'arpentages, et fournit une modélisation précise du terrain.

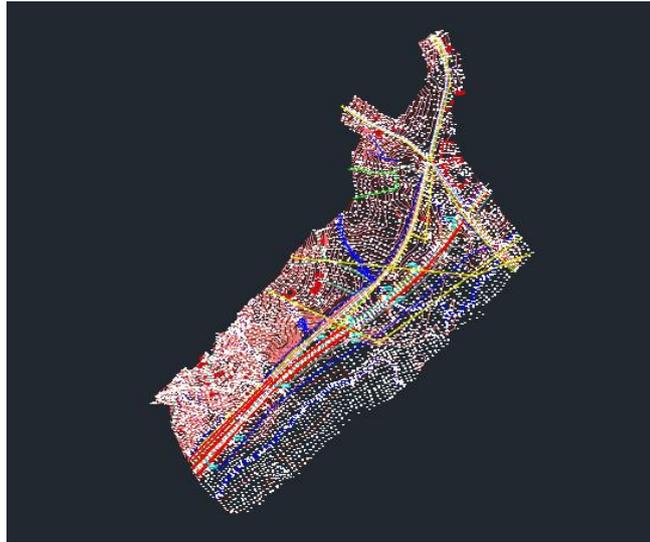


Figure 108 : levé topographique du projet

1.2. Méthodologie de l'étude

La première étape de la conception des infrastructures est de créer un modèle numérique du terrain (MNT) sur la base du levé topographique.

Par conséquent, cette étape a plusieurs avantages notamment :

- Combler les lacunes de l'arpentage sur le terrain.
- Offrir la possibilité d'obtenir des informations par approximation en un point non relevé au terrain
- Faciliter l'implantation de la conception sur le terrain.

Autocad Civil 3D comporte un ensemble d'outils permettant d'utiliser des objets de dessin de base (points, polyligne, polyfaces, DEM fichiers, etc.) pour créer des surfaces.

En fonction des données disponibles, la surface est définie à l'aide de points, et des lignes de rupture qui donnent plus de précision et qui améliorent la triangulation.

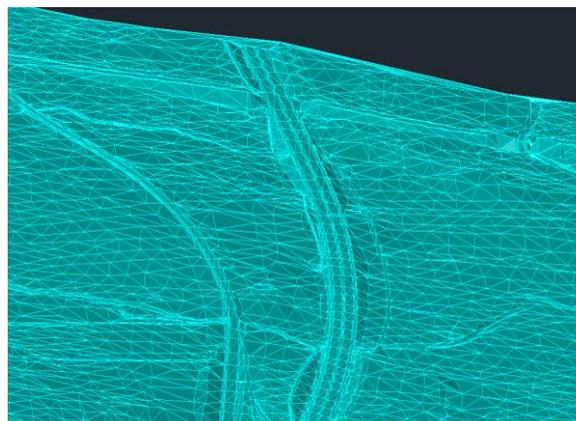


Figure 109 : Modèle numérique du terrain

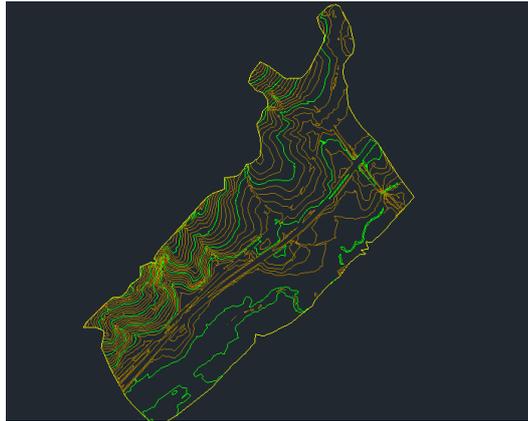


Figure 110 : Surface TN du projet

Le contrôle de la surface est indispensable puisque elle constituera la base de la conception géométrique.

Tableau 29 : Statistiques de la surface TN

Général	
Coordonnée X minimale	460513.372m
Coordonnée Y minimale	561852.971m
Coordonnée X maximale	462242.883m
Coordonnée Y maximale	564054.290m
Altitude minimale	7.800m
Altitude maximale	68.360m
Altitude moyenne	22.383m
Etendue	
Aire de la surface 2D	1502133.66m ²
Aire de la surface 3D	1519123.25m ²
Talus/pente minimum	0.00%
Talus/pente maximum	11681.04%
Talus/pente moyen(ne)	10.05%
Triangulation	
Nombre de triangles	19271
Surface maximale du triangle	2155.41m ²
Surface minimale du triangle	0.00m ²
Longueur minimale du triangle	0.000m
Longueur maximale du triangle	234.248m

1.3. Conclusion

Les résultats préliminaires obtenus semblent satisfaisants. Les élévations semblent être dans la plage des données, les coordonnées sont raisonnables et le nombre de points est comme prévu.

Sur ce, la prochaine partie concerne la définition des caractéristiques en plan du tracé routier sujet de l'étude.

II. Tracé en plan

Le tracé en plan est une projection de l'axe de la chaussée sur un plan horizontal, il doit être conçu pour assurer de bonnes conditions de sécurité et de confort tout en s'intégrant au mieux dans la topographie du site.

Le tracé en plan d'une route est caractérisé par une vitesse de base à partir de laquelle on pourra déterminer les paramètres géométriques de la route

2.1. Vitesse de base

C'est la vitesse la plus élevée à laquelle un véhicule peut circuler, de façon continue, en toute sécurité, lorsque les conditions météorologiques sont les plus favorables, et que la densité de la circulation est très peu élevée.

Comme il s'agit d'un échangeur avec des bretelles à une voie, elles doivent respecter les caractéristiques de conception adaptées à une vitesse de 90 km/h ou celles adaptées à une vitesse de 70 km/h ou moins.

Ce choix de la vitesse de base s'effectue en tenant compte des contraintes topographiques, foncières et des implications financières.

Dans ce projet, comme il s'agit d'un raccordement d'un axe autoroutier à une route ordinaire se dirigeant vers la gare de péage et compte tenu de l'étude de trafic, les bretelles de l'échangeur sont des bretelles à une voie, circulable à 70 km/h ou moins.

2.2. Éléments du tracé en plan

Le tracé en plan de l'échangeur est constitué de 4 bretelles. Leurs tracés en plan sont constitués d'une succession d'alignements droits, de courbes circulaires séparés ou pas par des raccordements progressifs.

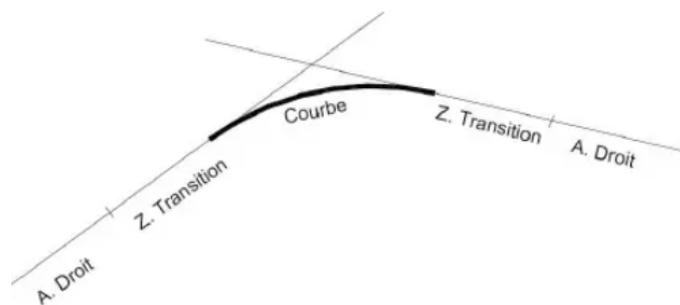


Figure 111 : Éléments du tracé en plan

2.2.1. Alignements droits

Ce sont les sections droites du tracé routier, cette approche suppose qu'on deux points la ligne droite est le plus court chemin et par conséquent le moins terrain possible

Bien qu'en principe la droite soit l'élément géométrique le plus simple, son emploi dans les routes est restreint pour des raisons de sécurité, et en particulier pour éviter la monotonie source d'accidents et

l'éblouissement par les phares la nuit, il est recommandé d'alterner alignements droits et courbes circulaires.

2.2.2. Arcs de cercle

Deux alignements droits de direction différentes sont reliées par une courbe, afin d'assurer une transition confortable et sécurisée d'un passager passant d'un alignement droit à un autre.

Le choix des rayons du tracé en plan et des dévers correspondant est lié :

- La stabilité des véhicules en courbe
- Visibilité en courbe
- Inscription des véhicules longs dans les courbes de rayon faible

a. Stabilité en courbe

Pour assurer la stabilité en courbe, Il est donc préconisé de ne pas utiliser des rayons inférieurs au rayon minimal, qui assure la stabilité des véhicules à la vitesse de référence lorsqu'il est associé au dévers maximal (7%).

Dans le cas des bretelles à une voie circulaire à 70 km/h ou moins, le rayon minimal déversé à 7% est 40 m.

Cette même stabilité peut être assurée en absence du dévers, pour des rayons supérieurs au rayon minimal au dévers normal Rdn. Dans ce cas, ce rayon est de 300 m.

b. Visibilité en courbe

c. Inscription des véhicules longs dans les courbes de rayon faible

Lorsque le trafic des poids lourds atteint une certaine importance, il est nécessaire de prévoir des surlargeurs de virage pour les rayons faibles, pour permettre aux poids lourds de type semi-remorque de ne pas déborder de leur voie.

Ce principe est applicable aux bretelles des diffuseurs, lorsque le rayon de courbure en plan est inférieur à 100m. La surlargeur introduite est de 50/R. Son introduction se fait linéairement le long des clothoïdes.

2.2.3. Courbes de raccordement

Comme le tracé comporte des alignements et des arcs de cercle, entre ces deux éléments, il est nécessaire d'introduire des tronçons de raccordement de courbure progressive, passant de la courbure 0 (R = infini) à l'extrémité de l'alignement, à la courbure 1/R au début du cercle du virage.

En effet, le raccordement direct d'une droite à un cercle de rayon R nécessite de faire tourner le volant rapidement, donc les passagers sont soumis brutalement à l'accélération radiale (V^2 / R), ce qui nuit à leur confort et à leur sécurité.

D'où la nécessité, d'un raccordement progressif qui encadre les courbes circulaires de rayon inférieur à 1.5 du rayon minimal au dévers normal Rdn, la longueur des arcs de clothoïde, pour le cas des bretelles ou branches à une voie, est égale à

$$\text{Max}(6R^{0.4}, 7|\Delta\delta|)$$

Avec :

R : Le rayon de courbure en m

$|\Delta\delta|$: La différence des pentes transversales des éléments du tracé raccordés.

Cette expression permet à la clothoïde de satisfaire à la condition du gauchissement, qui permet d'assurer à la voie une variation adjacente du dévers dans les conditions de sécurité sur une longueur de $7|\Delta\delta|$, qu'on appelle la longueur du gauchissement.

Le tableau ci-dessous donne les longueurs des arcs de clothoïdes pour les bretelles, circulables à 70 km/h ou moins, pour les rayons de courbure 125m, 150m, 200m et 300m.

Tableau 30 : Calcul des dévers en fonction des rayons selon la norme ICTAAL

R(m)	$\delta(\%)$	$\delta+2.5$		$\delta+0$		$\delta-2.5$	
		$6R^{0.4}$	$7 \Delta\delta $	$6R^{0.4}$	$7 \Delta\delta $	$6R^{0.4}$	$7 \Delta\delta $
\geq 125	7.00	41.39	66.53	41.39	49.03	41.39	31.53
150	4.75	44.52	50.75	44.52	33.25	44.52	15.75
200	3.63	49.95	42.88	49.95	25.38	49.95	7.88
300	2.50	58.75	35.00	58.75	17.50	58.75	0.00

2.3. Combinaison des éléments du tracé en plan

La combinaison des éléments du tracé en plan, donne lieu à plusieurs types de courbes :

- **Courbe en S (courbe à inflexion)** : elle est constituée de deux arcs de clothoïde de concavité opposée, tangents en leurs points de courbure nulle, et raccordant deux arcs de cercle.

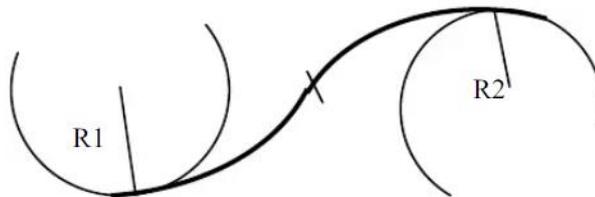


Figure 112 : Courbe en S

- **Courbe à sommet** : elle est constituée de deux arcs de clothoïde de même concavité, tangents en un point de même courbure, et raccordant deux alignements.

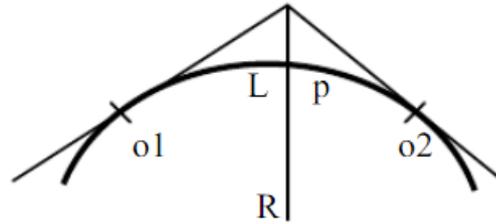


Figure 113 : Courbe à sommet

- **Courbe en C** : elle est constituée de deux arcs de clothoïde de même concavité, tangents en un point de courbure nulle, et raccordant deux arcs de cercle.

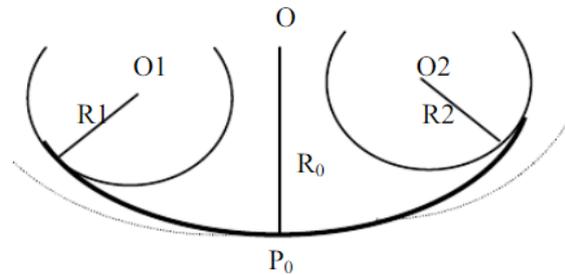


Figure 114 : Courbe en C

- **Courbe en anse de panier** : elle est constituée d'une suite de segments de clothoïde de même sens de courbure mais de paramètres différents.

2.4. Enchaînement des éléments du tracé en plan

La norme ICTAAL préconise des règles d'enchaînement dans le tracé en plan des bretelles, notamment :

- Deux courbes successives dans le sens de circulation, doivent satisfaire la condition $R_1 < 2R_2$ sauf si $R_2 > 1.5 R_{dn}$
- Deux courbes successives dans le même sens et de rayons inférieures à $1.5 R_{dn}$ doivent être séparées par un alignement droit d'au moins 60 m hors clothoïdes sauf si $R_1 < R_2$
- Le premier rayon rencontré en sortie sur une bretelle à une voie doit valoir au moins 100m hors le cas d'une boucle.

2.5. Zone de décélération

Elle permet à l'utilisateur de passer d'une vitesse de 70 km/h au point S. 1,00m la vitesse qui correspond au rayon de la première courbe rencontrée, avec une décélération en palier de 1.5 m/s².

Sa longueur minimale est donnée par la formule :

$$L_d = \frac{V_s^2 - V_g^2}{2(1.5 + 10p)}$$

Avec :

V_s la vitesse conventionnelle au point S.1,00 m en m/s

V_g La vitesse cible qui correspond au premier rayon de courbure

p Déclivité en valeur algébrique

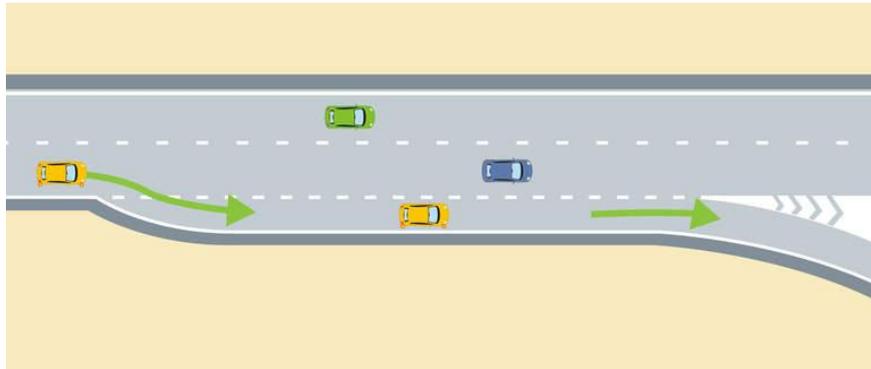


Figure 115 : Zone de décélération

2.6. Zone d'accélération

Elle permet à l'utilisateur de passer de la vitesse associée au rayon de la dernière courbe à la vitesse conventionnelle de 55 km/h au point E.1, 00 m avec une accélération en palier de 1 m/s².

Sa longueur minimale est donnée par la formule :

$$L_a = \frac{V_E^2 - V_R^2}{2(1 - 10p)}$$

Avec :

V_E la vitesse conventionnelle au point E.1,00 m en m/s

V_R La vitesse initiale qui dépend du rayon de courbure

p Déclivité en valeur algébrique

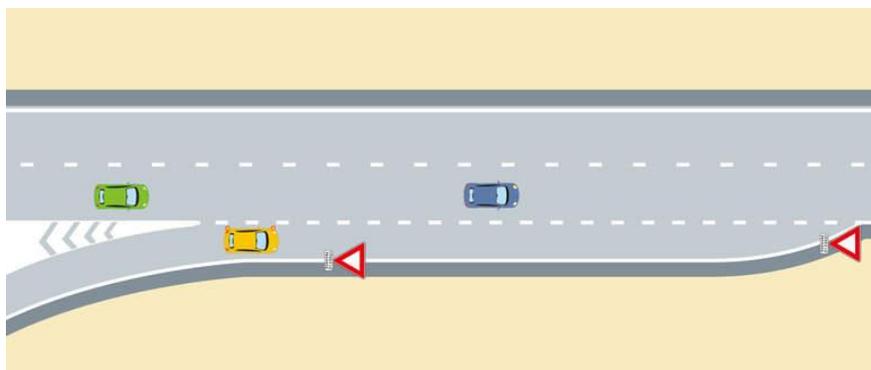


Figure 116 : zone d'accélération

2.7. Application au projet

Autocad Civil3D intègre les normes de conception régionales, selon les country kits installés et offre également la possibilité d'importer les normes non intégrées sous un format XML. Ce qui assure un contrôle par rapport aux normes dans tous les éléments de la conception détaillée.

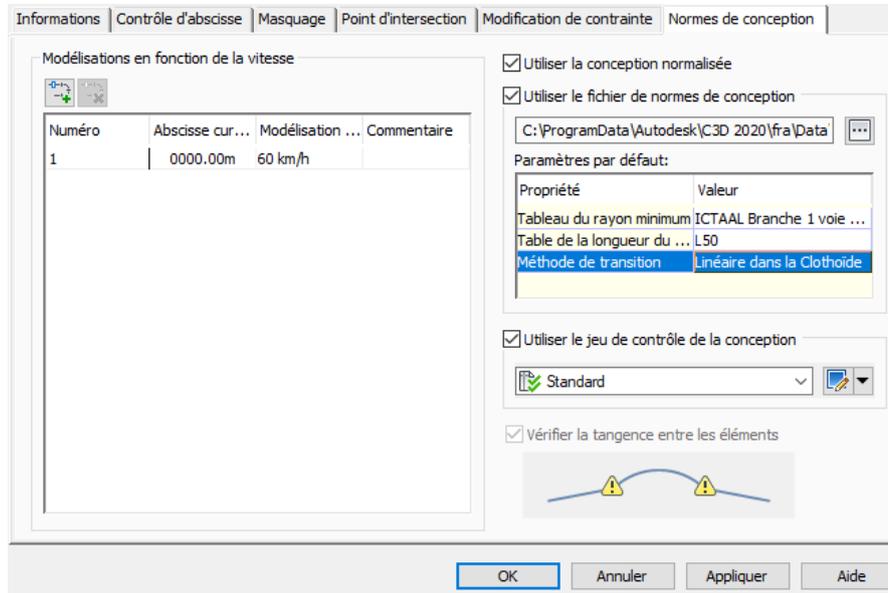


Figure 117 : Définition de la norme de conception sur Autodesk Civil 3D

Les alignements peuvent être créés à partir des entités déjà existantes (principalement des lignes, des arcs ou des polygones) ou à l'aide des outils de création d'alignement de Civil 3D.

Comme l'axe autoroutier existe déjà dans le levé topographique sous forme de polygone, nous avons créé sur sa base un alignement qui constituera un des axes de notre projet.

Pour les axes des bretelles, nous nous sommes servis de l'onglet « outil création d'axe » du logiciel Civil3D qui permet de concevoir des tangentes, des courbes et des clothoïdes avec des exigences spécifiques.

Puisque le projet étudié est un échangeur de type diffuseur, il est constitué de quatre bretelles qui se détachent et se raccordent à l'autoroute principale. On a opté pour trois types de bretelles dont les caractéristiques en plan sont les suivantes :

Tableau 31: Rayons en plan des différents types des bretelles

types de bretelles	Boucle	Diagonale	anse
rayon en plan (m)	40-75	100-175	≥ 120

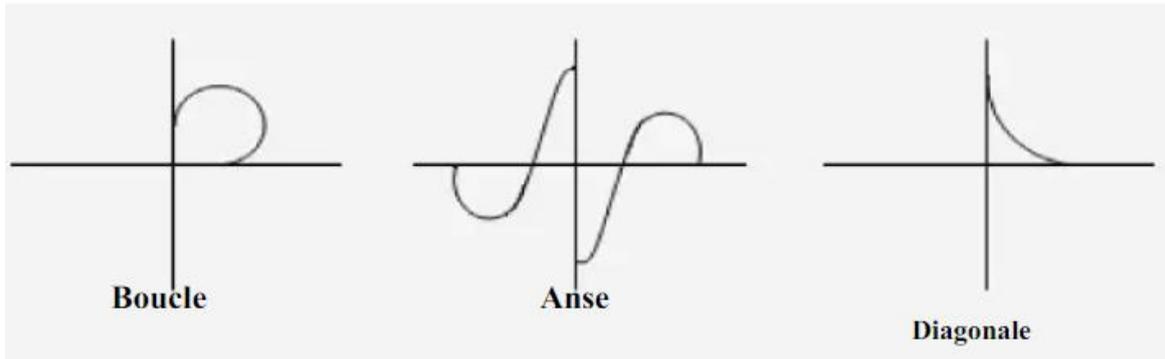


Figure 118 : Différents types des bretelles

2.7.1. Bretelle 1

Il s'agit de la bretelle du pont. Elle est une bretelle bidirectionnelle, se dirigeant vers la gare de péage. Elle est d'une longueur de 877.6 m.

Les caractéristiques en plan des éléments qui la constituent sont :

Arc de cercle :

Tableau 32 : Caractéristiques en plan de l'arc de cercle 1 de la bretelle 1

Type	Clothoïde-Courbe
Longueur	98.648m
Rayon	51.000m
Degré de courbure par arc	037.4482 (g)

Clothoïde extérieure

Tableau 33 : Caractéristiques en plan de la clothoïde extérieure de l'arc de cercle 1 de la bretelle 1

Type	Clothoïde-Courbe
Type de clothoïde	Simple
Longueur	51.000m
A	51.000m
Rayon intérieur	Infinim
Rayon extérieur	51.000m

Tangente :

Tableau 34 : Caractéristiques en plan de la tangente 1 de la bretelle 1

Type	Ligne
Longueur	31.081m
Direction	S23° 48' 55.18"E

Clothoïde intérieure

Tableau 35 : Caractéristiques en plan de la clothoïde intérieure de l'arc de cercle 2 de la bretelle 1

Type	Clothoïde-Courbe-Clothoïde
Type de clothoïde	Simple
Longueur	67.500m
A	90.000m
Rayon intérieur	Infini
Rayon extérieur	120.000m

Arc de cercle :

Tableau 36 : Caractéristiques en plan de l'arc de cercle 2 de la bretelle 1

Type	Clothoïde-Courbe-Clothoïde
Longueur	63.448m
Rayon	120.000m
Degré de courbure par arc	015.9155 (g)

Clothoïde extérieure :

Tableau 37 : Caractéristiques en plan de l'arc de cercle 2 de la bretelle 1

Type	Clothoïde-Courbe-Clothoïde
Type de clothoïde	Simple
Longueur	67.500m
A	90.000m
Rayon intérieur	120.000m
Rayon extérieur	Infini

Tangente :

Tableau 38 : Caractéristiques en plan de la tangente 2 de la bretelle 1

Type	Ligne
Longueur	50.000m
Direction	S38° 42' 33.76"O

Arc de cercle :

Tableau 39 : Caractéristiques en plan de l'arc de cercle 3 de la bretelle 1

Type	Courbe
Longueur	132.962m
Rayon	320.000m
Degré de courbure par arc	005.9683 (g)

Tangente :

Tableau 40 : Caractéristiques en plan de la tangente 3 de la bretelle 1

Type	Ligne
Longueur	342.593m
Direction	S14° 54' 09.45"O

2.7.2. Bretelle 2

Il s'agit d'une rampe de type boucle, en provenance du port Tanger Med vers la gare de péage Tanger Centre, d'une longueur de 264.25m. Elle est constituée d'un arc de cercle de 65 m encadré de part et d'autre par des arcs de clothoïde de longueur de 41.6 m.

Les caractéristiques des éléments qui constituent la bretelle sont les suivants :

Clothoïde intérieure

Tableau 41 : Caractéristiques en plan de la clothoïde intérieure de l'arc du cercle 1 de la bretelle 2

Type	Clothoïde
Type de clothoïde	Simple
Longueur	41.600m
A	52.000m
Rayon intérieur	65.000m
Rayon extérieur	Infini

Arc de cercle

Tableau 42 : Caractéristiques en plan de l'arc du cercle 1 de la bretelle 2

Type	Clothoïde-Courbe
Longueur	151.053m
Rayon	65.000m
Degré de courbure par arc	029.3825 (g)

Clothoïde extérieure

Tableau 43 : Caractéristiques en plan de la clothoïde extérieure de l'arc de cercle 1 de la bretelle 2

Type	Clothoïde-Courbe
Type de clothoïde	Simple
Longueur	41.600m
A	52.000m
Rayon intérieur	Infini
Rayon extérieur	65.000m

Tangente :

Tableau 44 : Caractéristiques en plan de la tangente de la bretelle 2

Type	Ligne
Longueur	30.000m
Direction	S48° 53' 27.71"O

2.7.3. Bretelle 3

Il s'agit d'une rampe de type diagonale, en provenance de la gare de péage Tanger Centre et en direction de Rabat. Elle est raccordée à la bretelle du pont par une clothoïde intérieure de 41 m de longueur. Sa longueur totale est 362.06 m.

Elle est constituée par une courbe de rayon de 120 m, encadré par des arcs de clothoïde de 41 m, créée par l'outil Clothoïde libre – courbe - Clothoïde libre de l'onglet outil de création d'axe d'Autodesk Civil 3D.

Les caractéristiques en plan des éléments qui constituent cette bretelle sont :

Clothoïde intérieure :

Tableau 45 : Caractéristiques en plan de la clothoïde intérieure de la bretelle 3

Type	Clothoïde-Ligne
Type de clothoïde	Simple
Longueur	41.000m
A	71.589m
Rayon intérieur	125.000m
Rayon extérieur	Infini

Tangente :

Tableau 46 : Caractéristiques en plan de la tangente de la bretelle 3

Type	Clothoïde-Ligne
Longueur	51.607m
Direction	S08° 20' 42.37"O

Clothoïde Intérieure :

Tableau 47 : Caractéristiques en plan de la clothoïde intérieure de l'arc de cercle 1 de la bretelle 3

Type	Clothoïde-Courbe-Clothoïde
Type de clothoïde	Simple
Longueur	41.000m
A	70.143m
Rayon intérieur	Infini
Rayon extérieur	120.000m

Arc de cercle :

Tableau 48: Caractéristiques en plan de l'arc de cercle 1 de la bretelle 3

Type	Clothoïde-Courbe-Clothoïde
Longueur	50.984m
Rayon	120.000m
Degré de courbure par arc	015.9155 (g)

Clothoïde extérieure

Tableau 49 : Caractéristiques en plan de la clothoïde extérieure de l'arc de cercle 1 de la bretelle 3

Type	Clothoïde-Courbe-Clothoïde
Type de clothoïde	Simple
Longueur	41.000m
A	70.143m
Rayon intérieur	120.000m
Rayon extérieur	Infini

Tangente

Tableau 50 : Caractéristiques en plan de la tangente de la bretelle 3

Type	Ligne
Longueur	125.884m
Direction	S52° 15' 51.01"O

2.7.4. Bretelle 4

Il s'agit d'une rampe en anse qui se rattache du côté droit de l'autoroute, en provenance de Rabat et en direction de la gare de péage Tanger Centre, d'une longueur de 308.15 m. Elle se compose d'un alignement droit raccordé linéairement à une courbe de 125 m fixée par trois points, encadré de part et d'autres des clothoïdes de 41.7 m, et contient vers sa fin d'un arc de raccordement progressif qui correspond au premier rayon de courbure de la bretelle 1 (50 m).

La longueur de l'arc des clothoïdes intérieurs et extérieurs prennent en compte le dévers de la chaussée.

Les tableaux ci-dessous résument les caractéristiques en plan des éléments de la bretelle :

Tangente :

Tableau 51 : Caractéristiques en plan de la tangente 1 de la bretelle 4

Type	Clothoïde-Ligne
Longueur	40.552m
Direction	S55° 41' 15.36"O

Clothoïde intérieure :

Tableau 52 : Caractéristiques en plan de la clothoïde intérieure de l'arc de cercle 1 de la bretelle 4

Type	Clothoïde-Ligne
Type de clothoïde	Simple
Longueur	40.700m
A	71.234m
Rayon intérieur	125 m
Rayon extérieur	Infini

Arc de cercle :

Tableau 53 : Caractéristiques en plan de l'arc de cercle 1 de la bretelle 4

Type	Courbe
Contrainte de paramètre	Trois points
Longueur	53.914m
Rayon	125 m
Degré de courbure par arc	015.3186 (g)
Centre	(461402.6952m,562524.9809m)
Point de passage 1	(461399.7272m,562649.6215m)
Point de passage 2	(461377.2568m,562647.0340m)
Point de passage 3	(461354.9358m,562640.1465m)

Clothoïde extérieure

Tableau 54 : Caractéristiques en plan de la clothoïde extérieure de l'arc de cercle de la bretelle 4

Type de clothoïde	Simple
Longueur	50.538m
A	79.378m
Rayon intérieur	Infini
Rayon extérieur	125 m

Cette bretelle doit se raccorder à la bretelle 1, par l'intermédiaire d'un arc de clothoïde correspondant au premier rayon rencontré de cette bretelle. Ce raccordement progressif est du type clothoïde-clothoïde avec un rapport $A1/A2$ égal à 1.

Ces caractéristiques sont les suivantes :

Tableau 55 : Caractéristiques en plan de la clothoïde de la bretelle 4

Type de clothoïde	Clothoïde-Clothoïde
Longueur	121.171m
A	79.378m
Rayon intérieur	52.000m
Rayon extérieur	Infini

2.7.5. Bretelle 5

Cette bretelle est en provenance de la gare de péage Tanger Centre et en direction du port Tanger Med, d'une longueur totale de 264.25 m, il s'agit d'une rampe de type boucle d'un rayon de courbure de 50 m, raccordé progressivement à une tangente, par un arc de clothoïde de longueur 41 m, qui s'attache à l'autoroute.

Les caractéristiques en plan des éléments de cette bretelle sont les suivantes :

Arc de cercle :

Tableau 56 : Caractéristiques en plan l'arc de cercle 1 de la bretelle 5

Contrainte de paramètre	Trois points
Longueur	176.390m
Rayon	50.000m
Degré de courbure par arc	038.1972 (g)
Centre	(461521.6244m,562693.4951m)
Point de passage 1	(461571.4460m,562689.2745m)
Point de passage 2	(461506.7709m,562645.7523m)
Point de passage 3	(461478.2021m,562718.2842m)

Clothoïde intérieure :

Tableau 57: Caractéristiques en plan de la clothoïde intérieure de l'arc de cercle 1 de la bretelle 5

Type de clothoïde	Simple
Longueur	41.000m
A	45.277m
Rayon intérieur	50.000m
Rayon extérieur	Infini

Tangente :

Tableau 58 : Caractéristiques en plan de la tangente de la bretelle 5

Type	Clothoïde-Ligne
Longueur	42.810m
Direction	N50° 27' 42.39"E

2.8. Conclusion

L'échangeur sujet de l'étude se situe au niveau d'Ain Dahlia au PK38 de l'autoroute n°5 (tronçon Tanger-Port Tanger Med), il a une longueur totale de 2076.31 m. C'est un échangeur de type trompette qui se développe dans le Cadran Ouest-Nord formé par la RP4608 et l'autoroute. Il se raccorde sur la RP 4602 et la RP 4608 par un carrefour type giratoire. La RP4602 est déviée sur un linéaire de 800m. Cette variante a permis de maintenir la ligne THT dans son emplacement, mais d'autres contraintes réseaux (conduite ONEP, deux lignes MT et BT) sont à rétablir.

Le giratoire est implanté au droit de l'intersection de la RP4602 et la RP4608 au niveau du Souk LARBAA AIN DALYA et un parking de Taxi et de voitures est situé juste à côté du giratoire. Par conséquent, pour permettre aux conducteurs de prévoir l'évolution du tracé en plan, et assurer une continuité dans l'espace de la route, la prochaine étape de la conception géométrique est le calage du profil en long.

III. Profil en long

C'est une coupe longitudinale du terrain suivant un plan vertical passant par l'axe de la route. Il se compose de segments de droite de déclivité en rampe et en pente et des raccordements circulaires, ou paraboliques. Ces pentes et rampes peuvent être raccordées entre elles soit par des angles saillants ou par des angles rentrants.

3.1. Règles d'implantation du profil en long

Comme le tracé du profil en long se lie directement au coût du projet, il existe quelques paramètres régissant celui-ci qui doivent être suivies :

- **Un bon écoulement des eaux pluviales** : Pour ce faire, il faut éviter les angles rentrants en déblai qui peuvent causer la stagnation des eaux et empêcher leur écoulement, il faut également placer les zones des dévers nul dans une pente du profil en long. Par conséquence, Un profil en long en léger remblai est préférable à un profil en long en léger déblai, qui complique l'évacuation des eaux.
- **Une limitation des déclivités** : il faut respecter les valeurs des paramètres géométriques préconisés par les règlements en vigueur.
- **Un rayon de courbure minimum** : pour satisfaire à la condition de confort pour les angles rentrants et la condition de visibilité pour les angles saillants.

3.2. Éléments du profil en long

Le profil en long est composé d'éléments rectilignes par leur déclivité (pente ou rampe), et des raccordements paraboliques caractérisés par leur rayon.

Les types de rayons sont :

- Les rayons en angle rentrant (concaves)
- Les rayons en angle saillant (convexes)

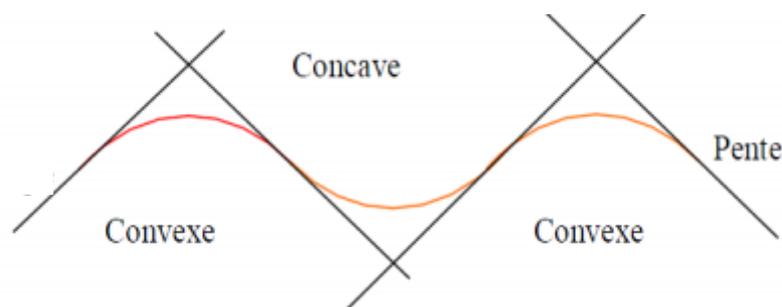


Figure 119 : éléments du profil en long

3.3. Coordination du tracé en plan et du profil en long

Le profil en long doit être coordonné avec les éléments du tracé en plan, pour avoir une vue satisfaisante de la route dans les conditions de visibilité minimale, et pour envisager de loin d'évolution du tracé, et distinguer clairement les dispositions des points singuliers (carrefours, intersection etc.)

Il est donc préférable de :

- Augmenter le ripage du raccordement introduisant une courbe en plan si le profil en long est convexe
- Amorcer la courbe en plan avant un point haut Lorsque le tracé en plan et le profil en long sont simultanément en courbe
- Faire coïncider le plus possible les raccordements du tracé en plan et celle du profil en long (porter les rayons de raccordement vertical à 6 fois au moins le rayon en plan).

3.4. Déclivités du profil en long

La déclivité est la tangente de l'angle que fait le profil en long avec l'horizontal .Elle prend le nom de pente pour les descentes et rampe pour les montées.

Elle doit être limitée pour des raisons de sécurité (freinage en descente) et de confort (puissance des véhicules en rampe).

3.4.1. Déclivités minimales

Les tronçons de route absolument horizontaux, dits « en palier » sont, si possible, à éviter, pour la raison de l'écoulement des eaux pluviales. La pente transversale seule de la chaussée ne suffit pas, il faut encore que l'eau accumulée latéralement s'évacue longitudinalement avec facilité par des fossés ou des canalisations ayant une pente suffisante.

Il est donc recommandé d'éviter les pentes inférieures à 1% et surtout à 0.5 %. Dans les longues sections en déblai, ce minimum se ramène à une valeur de 0.2% pour que les dispositifs longitudinales d'évacuation des eaux ne soient pas profonds.

3.4.2. Déclivités maximales

Il est communément admis de respecter une valeur maximale de déclivité, et ce puisque les fortes pentes peuvent en effet engendrer des problèmes de freinage des poids lourds et donc compromettre la sécurité des usagers. Ainsi que les fortes rampes entraînent des problèmes d'écoulement du trafic (qui peuvent nécessiter de créer des voies spéciales pour véhicules lents) et de surconsommation (au-delà de 2,5% de pente, chaque pourcent supplémentaire entraîne une surconsommation de 12% par rapport à la valeur enregistrée à plat)

Selon les recommandations de l'ICTAAL, il est ne faut dépasser une déclivité maximale de 6 %.

3.5. Raccordements en profil en long

Deux déclivités de sens contraire doivent se raccorder en profil en long par une courbe. Le rayon de raccordement et la courbe choisie doivent assurer le confort des usagers et la visibilité satisfaisante. Et on distingue deux types de raccordements : rayons saillants et rayons rentrants.

3.5.1. Raccordements convexes

Les rayons correspondants doivent être dimensionnés au regard des contraintes de sécurité et de visibilité. En fonction des caractéristiques du tracé en plan, on s'attachera à garantir la visibilité sur obstacle ou pour dépassement.

Par conséquent, leur conception doit satisfaire aux conditions :

- De confort : Lorsque le profil en long comporte une forte courbure de raccordement, les véhicules sont soumis à une accélération verticale insupportable.
- De visibilité : Une considération essentielle pour la détermination du profil en long est l'obtention d'une visibilité satisfaisante. Il faut deux véhicules circulant en sens opposés puissent s'apercevoir à une distance double de la distance d'arrêt au minimum.

Sur ce, le guide SETRA des échangeurs préconise une valeur minimale de rayon en angle saillant de 1500m.

3.5.2. Raccordements concaves

Ces rayons ne posent pas de problèmes de sécurité majeurs mais leur dimensionnement est essentiellement conditionné par des contraintes de confort dynamique, les conditions de visibilité nocturnes et l'évacuation des eaux de ruissellement

Il est donc plus approprié d'utiliser des rayons supérieurs à 800 m, selon l'ICTAAL.

3.6. Application au projet

Dans le cadre de notre projet, chaque tracé en plan doit correspondre à un profil en long qui respecte les recommandations de la norme ICTAAL citées ci-dessus.

Il existe deux types de profils :

- Profil en long de la surface TN, généré à partir des données topographiques
- Profil en long du projet, qu'on appelle la ligne rouge

Les deux profils peuvent être superposés dans un dessin commun, ce qui nous permet d'analyser les conditions existantes et les propositions d'aménagement. Ces profils sont généralement dynamiques, ils s'actualisent automatiquement avec chaque changement des données d'entrée.

Les données relatives aux dessins des profils en long sont les intervalles des abscisses curvilignes, ainsi que la hauteur du dessin qui se base sur la définition d'un plan de comparaison. Nous pouvons spécifier les bandes qu'on désire afficher dans ce dessin et les enregistrer comme un jeu de bandes de données.

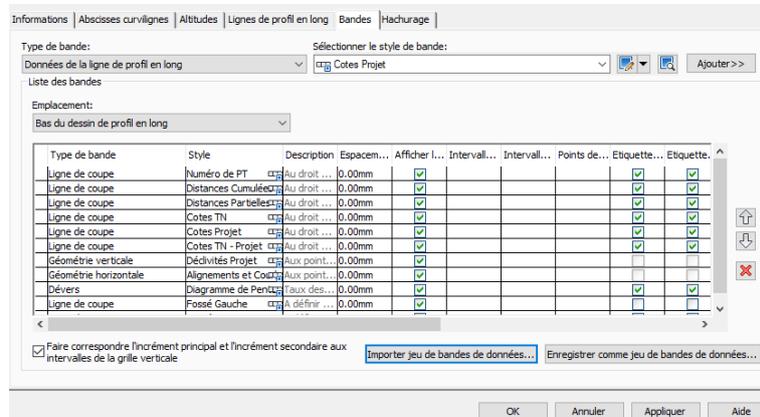


Figure 120 : bandes figurant dans un dessin de profil en long

Dans le cas particulier des axes des bretelles, il est possible de superposer les lignes des profils en long, pour adapter les altitudes dans les zones d'intersection.

3.6.1. Bretelle 1

La ligne rouge de cette bretelle est constituée d'un alignement droit, d'une longueur de 557.296m, et une pente de 1%, sur laquelle sera implantée la gare de péage, et qui raccorde le giratoire au pont à une altitude de 28.680m.

Le point bas est situé en remblai, pour faciliter l'évacuation des eaux pluviales, avec une parabole symétrique de 2000m.

La pente de sortie de la courbe est 3.09% pour permettre le raccordement au pont.

Afin de respecter les caractéristiques fonctionnelles de l'ouvrage, son profil en long du doit respecter le tirant d'air calculé de la façon suivante :

Tableau 59 : Caractéristiques fonctionnelles de l'ouvrage du franchissement

Gabarit (m)	5.1
Hauteur du tablier(m)	2.25
Etanchéité + Revêtement (m)	0.065
Appareil d'appui + Bossage(m)	0.2
Recommandation maitre d'ouvrage(m)	0.5
Somme (m)	8.115

Sur ce, le profil en long du pont est sous forme de parabole d'un rayon de 2000m avec une pente de sortie de -4.26 %.

3.6.2. Bretelle 2

Le profil en long de cette bretelle constitue la continuité de la bretelle 1, et se raccorde avec le côté droit de l'autoroute.

Par conséquent, la pente d'entrée de celle-ci est égale à celle de la sortie de la bretelle 1 (bretelle du pont), raccordée à l'autoroute avec une parabole, de type point bas, de rayon 3000m.

3.6.3. Bretelle 3

Suivant le même principe d'élaboration du profil en long de la bretelle 2, la ligne rouge de la bretelle 3 est constituée de deux alignements de sens différent raccordés par un rayon de 1500 m.

3.6.4. Bretelle 4

Cette bretelle se raccorde à la bretelle 1 par une parabole de 2000 m, et se dirige vers l'autoroute avec une pente de - 0.3 %.

3.6.5. Bretelle 5

Le profil en long de la bretelle 5 est constitué d'une succession d'alignements et de courbes. Dans le sens de la gare de péage, il se raccorde à la bretelle 1 par un alignement d'une pente de 0.39 % tangent à une courbe de type parabole de 1500 m.

Vers le raccordement avec l'autoroute, il existe une courbe de 1000 m encadrée de part et d'autre par des alignements de pentes respectives 4.14 % et -0.61 %.

3.7. Conclusion

Dans le cas des échangeurs, chaque accès s'inscrit, en plan et en profil en long, selon les mêmes paramètres que la chaussée sur laquelle il se raccorde, cette solidarité est de règle, au minimum, jusqu'au point S.1,00 (point de sortie au plus tôt) pour les sorties, et à partir du point E.1,00 (point d'entrée au plus tôt) pour les entrées.

Le raccordement en profil en long entre les différentes bretelles est nécessaire pour satisfaire aux conditions de la continuité, du confort et de la visibilité, en respectant les normes de conception, et en correspondant le terrain existant au profil conçu, dans le but de minimiser les volumes des terrassements.

IV. Profil en travers

Les profils en travers sont des coupes verticales perpendiculaires à l'axe du projet. Ils constituent une base indispensable de toute étude de tracé. C'est à partir des profils en travers que l'on détermine l'assiette, puis l'emprise et enfin les terrains à acquérir. Leur établissement permet également le calcul des mouvements de terres (cubatures).

Un projet routier comporte un grand nombre de profils en travers, pour éviter de rapporter sur chacun de leurs dimensions, on établit tout d'abord un profil unique appelé «profil en travers type».

Le profil en travers type est une coupe transversale du corps de la chaussée, il montre les différents composants de la route (voies de circulation, bordures, accotement, trottoirs...) et leurs caractéristiques correspondantes.

4.1. Éléments du profil en travers type

Selon l'ICTAAL, la chaussée doit être bordée de part et d'autre par une bande dérasée de gauche BDG et une bande d'arrêt d'urgence BAU et par une berme qui peut être intégrée au dispositif d'assainissement.

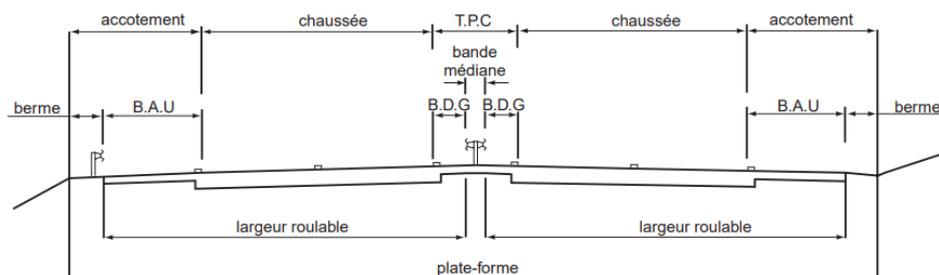


Figure 121 : Éléments du profil en travers

- **BDG** : Elle est destinée à permettre de légers écarts de trajectoire et à éviter un effet de paroi lié aux barrières de sécurité. Elle contribue dans les courbes à gauche au respect des règles de visibilité. Elle est dégagée de tout obstacle, revêtue et se raccorde à la chaussée sans dénivellation. Sa largeur est de 1,00 m, son revêtement est identique à celui de la chaussée.
- **BAU** : Elle facilite l'arrêt d'urgence hors chaussée d'un véhicule, la récupération d'un véhicule déviant de sa trajectoire, l'évitement d'un obstacle sur la chaussée, l'intervention des services de secours, d'entretien et d'exploitation. Elle est constituée à partir du bord géométrique de la chaussée d'une surlargeur de chaussée qui porte le marquage en rive, puis d'une partie dégagée de tout obstacle, revêtue et apte à accueillir un véhicule lourd en stationnement. Aucune dénivellation ne doit exister entre la chaussée et la B.A.U. Sa largeur est de 2,50 m, ou de 3,00 m lorsque le trafic poids lourd excède 2 000 v/j (deux sens confondus).
- **Berme** : Elle participe aux dégagements visuels et supporte des équipements : barrières de sécurité, signalisation verticale... Sa largeur qui dépend surtout de l'espace nécessaire au fonctionnement du type de barrière de sécurité à mettre en place est de 1,00 m minimum.
- **Chaussée** : elle comporte une voie de circulation, généralement large de 3.5 m.

4.2. Application au projet

Le profil en travers type des bretelles unidirectionnelles est composé d'une voie large de 4 m, encadrée de part et d'autre par une BDG de 0.5 m et une BAU de 2 m, avec une berme de 1 m et un dispositif d'assainissement selon la nature de l'entrée en terre (remblai ou déblai).

Pour la bretelle bidirectionnelle, il s'agit d'une chaussée en toit déversé, il est constitué par un terre plein centrale large de 2 m, deux voies de 4 m dans chaque sens avec une éventuelle surlargeur dans les virages serrés, une BAU de 2 m et une berme associée à un dispositif d'assainissement de chaque côté de la route.

Ces éléments du profil type de chaque bretelle sont introduits au logiciel Civil 3D à l'aide de la palette d'outils qui regroupe une panoplie de ces éléments.

Le contenu de ces éléments change en fonction des Country Kits installés, qui s'adaptent aux éléments de base de chaque région.

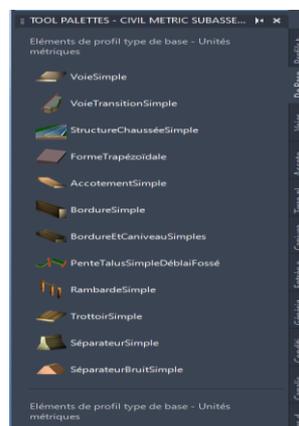


Figure 122 : Eléments du profil en travers type

On obtient donc :

- **Bretelle unidirectionnelle**

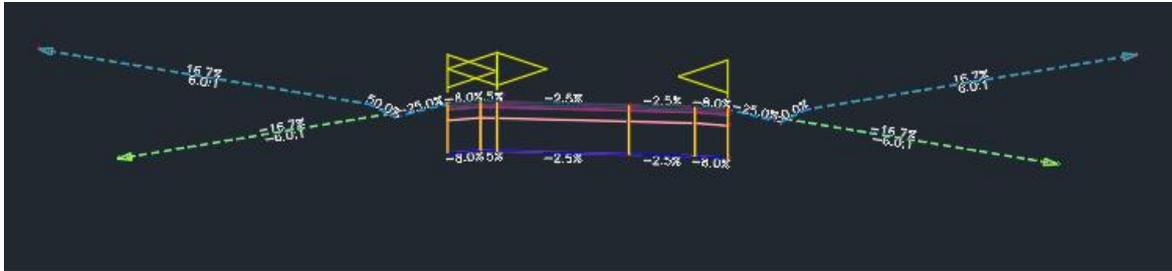


Figure 123 : profil en travers type de la bretelle unidirectionnelle

- **Bretelle bidirectionnelle**

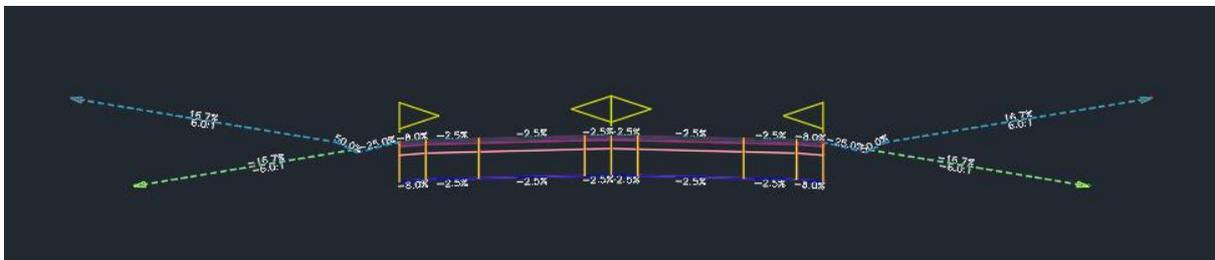


Figure 124 : profil en travers type des bretelles bidirectionnelles

4.3. Pente transversale

Le dévers ou pente transversale permet de favoriser l'évacuation des eaux de surface. Dans les rayons de courbure faible, il contribue à l'équilibre dynamique des véhicules. Toutefois, cette contribution reste limitée et sa valeur est donc plafonnée (généralement à 7%). Au-delà de cette valeur plafond, d'autres problèmes surviennent et notamment des difficultés constructives.

En dehors des rayons déversés, la bretelle directionnelle est composée de deux versants plans raccordés sur l'axe, tandis que la chaussée unidirectionnelle est composée d'un seul versant.

Au sein d'une bretelle circulaire à 70 km/m ou moins, pour les rayons compris entre Rdn (300 m) et 125 m, le dévers varie entre 2.5 % et 7 %, linéairement selon la relation :

- Pour $125\text{ m} < R < 300\text{ m}$: $d = \left(\frac{954}{R}\right) - 0.7$
- Pour $R \leq 125\text{ m}$: $d = 7\%$

4.4. Zone de sécurité

Il s'agit des bandes de terrain bordant la chaussée, revêtues et dégagées de tout obstacle fixe, qui permettent au conducteur de rétablir son véhicule suite à un écart.

La zone de sécurité est composée de :

- **la zone de récupération** : est constituée d'une sur-largeur de chaussée supportant le marquage de rive ainsi que d'une partie de l'accotement ; elle permet la récupération d'un

véhicule déviant de sa trajectoire, l'évitement de collisions en autorisant un déport latéral d'urgence sur l'accotement, la possibilité de circulation hors chaussée pour les véhicules de secours ou d'entretien. La zone de récupération est dépourvue de tout obstacle ou équipement.

- **la zone de gravité limitée** : est une partie de l'accotement et au-delà juxtaposée à la zone de récupération et qui permet de limiter les conséquences corporelles d'une sortie de chaussée. Elle est dépourvue de tout obstacle ou de tout relief dangereux à moins qu'ils ne soient isolés par un dispositif de retenue.

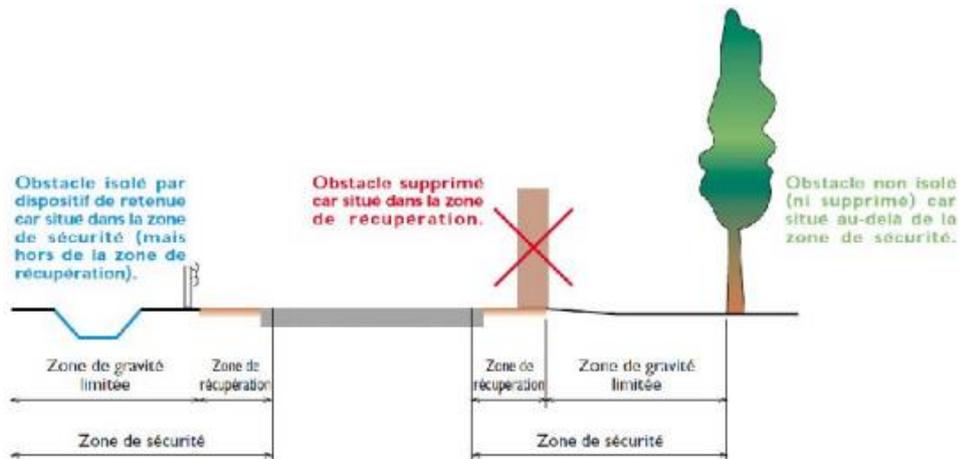


Figure 125 : zone de sécurité

Dans ce cas d'étude, selon l'ICTAAL, la largeur de la zone de sécurité est 4 m.

4.5. Conclusion

La détermination du profil en travers type et ses éléments correspondants constituent une base indispensable pour toute étude de tracé. C'est à partir des profils en travers que l'on détermine l'assiette, puis l'emprise et enfin les terrains à acquérir. Leur établissement permet en général le calcul des mouvements de terres (cubatures).

V. Dispositifs de sortie

5.1. Introduction

Le choix du dispositif de sortie se détermine en combinant différentes données relatives à la chaussée émettrice et aux bretelles du diffuseur, notamment :

- le nombre de voies sur la bretelle
- le trafic sortant, noté S (en uvp/h)
- le trafic circulant sur la chaussée émettrice et non intéressé par la sortie, noté T (en uvp/h)
- le nombre de voies sur la chaussée émettrice en amont de la sortie, noté n
- le nombre de voies nécessaires sur la chaussée émettrice en aval de la sortie, noté n' qui se détermine de la façon suivante :
 - si $1550(n-1) < T \leq 1550n$, alors $n' = n$

- si $1550 (n-2) < T \leq 1550 (n-1)$, alors $n' = \max (2, n-1)$
- si $1550 (n-3) < T \leq 1550 (n-2)$, alors $n' = \max (2, n-2)$

5.2. Sortie en déboitement

Dans le cadre de ce projet, comme le nombre de voies de la chaussée émettrice en amont de l'échangeur est maintenu en aval de celui-ci, et le débit de circulation ne dépasse pas 1500 upv/h, la sortie est à une voie, traitée en déboitement.



Figure 126 : sortie en déboitement

Il se caractérise par un biseau, implanté en dehors de la chaussée principale de longueur de 150 m.

5.3. Implantation de la signalisation directionnelle

Pour signaler les sorties, il existe des principes à adopter selon le type de géométrie choisi. Dans le cas de cette étude, et comme nous avons opté pour une sortie en déboitement dite également en biseau, seuls les usagers concernés par la sortie sont intéressés par la signalisation, il est donc impératif qu'ils :

- Gagnent la voie la plus à droite
- Concentrent leur attention sur la sortie
- Effectuent la manœuvre nécessaire pour quitter la voie de droite et emprunter la voie de sortie

Ainsi, La prise en considération des règles d'implantation de la signalisation directionnelle doit être permanente dans la conception d'une sortie, tout particulièrement :

- La position de **la signalisation avancée**, de type D30 qui est implantée au point S.1, 50 m (sortie au plus tôt) où l'utilisateur doit changer de direction. Ce point d'implantation est impératif car il permet, notamment dans des conditions climatiques difficiles (brouillard, pluie, neige...), d'aider l'utilisateur à effectuer sa manœuvre de sortie au bon moment. C'est pourquoi, dans la séquence, ce panneau est le seul qui comporte une flèche (flèche = manœuvre).



Figure 127 : Exemple de panneau de signalisation avancée

- la position de la **pré-signalisation** de type D 40, qui marque le début de la manœuvre de sortie et notamment incite l'utilisateur à emprunter la voie qui le concerne, qui est implantée à une distance d3 en amont de la signalisation avancée. Elle indique la distance à laquelle elle se trouve la sortie et les mentions qu'elle dessert.
- la position de la **signalisation d'avertissement**, permettant d'attirer l'attention des usagers, elle est de type D50 et implantée d'une distance d2 en amont de la signalisation avancée.



Figure 128 ; exemple de panneau de signalisation d'avertissement

Les distances d'implantation sont calculées de manière à permettre la manœuvre dans des conditions de sécurité optimales.

Dans ce cas d'étude, puisque la vitesse dans la voie émettrice est de 120 km/h, les distances de pré signalisation et d'avertissement sont respectivement 1000 m et 2000 m.

VI. Dispositifs d'entrée

6.1. Introduction

Le choix du dispositif d'entrée se détermine en fonction des données suivantes

- Le nombre de voies sur la branche/bretelle
- Le trafic entrant, noté E (en uvp/h)
- Le trafic circulant sur la chaussée réceptrice, noté T (en uvp/h)
- Le nombre de voies sur la chaussée réceptrice en amont de l'entrée, noté n
- Le nombre de voies nécessaires sur la chaussée réceptrice en aval de l'entrée, noté n', qui se déduit de T, E et n de la façon suivante
 - si $T+E \leq 1550 n$, alors $n' = n$
 - si $1550.n < T+E \leq 1550 (n+1)$, alors $n' = n + 1$
 - si $1550 (n+1) < T+E \leq 1550 (n+2)$, alors $n' = n + 2$

6.2. Entrée en insertion

Dans ce cas, puisque le nombre des voies en amont de l'entrée est maintenu en aval de celle-ci, et puisque la file de circulation peut recevoir jusqu'à 1500 upv/h, l'entrée sera traitée, selon les recommandations de l'ICTAAL, en insertion.

Le dispositif d'insertion d'une voie comprend une section parallèle suivie d'un biseau.

Sa longueur utile de 275 m se définit entre les points (E.1, 00) (point d'entrée au plus tôt)

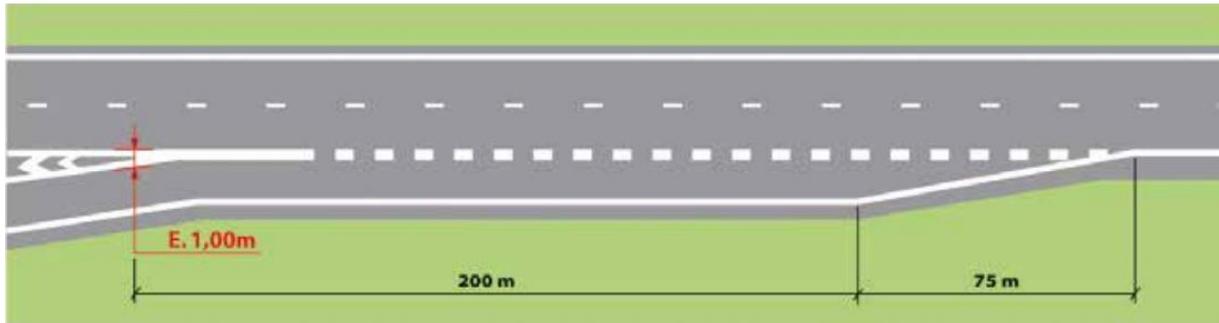


Figure 129 : entrée en insertion

VII. Géométrie des divergents et des convergents

7.1. Définitions

TPL : terre-plein latéral ou de la bande comprise entre le bord droit de la chaussée principale et le bord gauche de la chaussée de collectrice, au droit du musoir physique. Sa largeur est fonction des différents éléments le constituant :

- BAU (ou BDD) de la chaussée émettrice
- BDG de la bretelle/branche
- Balise de divergence

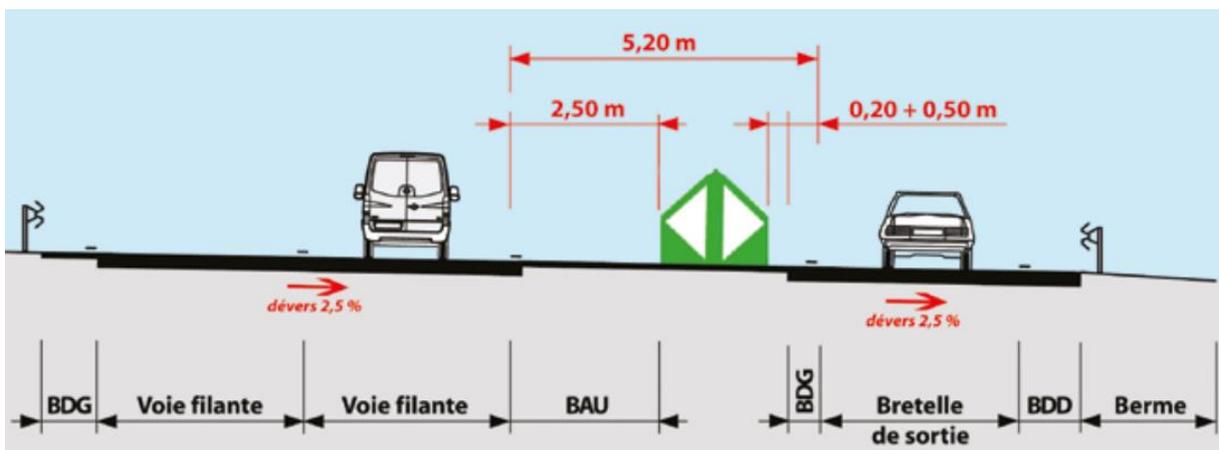


Figure 130 : Exigences techniques du TPL

- **Obliquité** : Il s'agit de l'angle de divergence ou de convergence au droit des points (S.1,00) et (E.1,00) entre le bord droit de la chaussée émettrice et le bord gauche de la bretelle dans le cas d'une sortie, et entre le bord droit de la chaussée réceptrice et le bord gauche de la bretelle pour une entrée. Elle vaut:
 - 3 % ($\rho = 1/33$) en règle générale
 - 4 % ($\rho = 1/25$) dans le cas d'une sortie en relief difficile
 - 5 % ($\rho = 1/20$) dans le cas d'une sortie depuis une bretelle/branche à une voie
 Dans ce cas, puisque il n'existe aucune des particularités mentionnées ci-dessus, on opte pour une obliquité de 1/33.
- L_m : Il s'agit de la longueur sur laquelle se prolonge l'obliquité de la bretelle/branche entre le point S.1,00 m et le tpl, dans le cas d'une sortie, et entre le tpl et le point E.1,00 m, dans le cas d'une entrée.
La longueur L_m est fonction de la largeur du tpl et de l'obliquité ρ : $L_m = tpl - 1,00 \rho$

7.2. Construction des divergents

Dans le cas des diffuseurs, et lorsqu'on a une sortie sur un alignement droit ou sur une courbe de rayon supérieur à 1.5 Rdn, le prolongement de l'obliquité entre le S.1,00 m et le tpl, sur une longueur L_m , n'est pas nécessaire.

A partir du point S.1,00 m, la construction de la bretelle n'est pas corrélée à la chaussée émettrice. Le premier rayon de sortie peut alors être inséré, en étant précédé d'un arc de clothoïde si nécessaire.

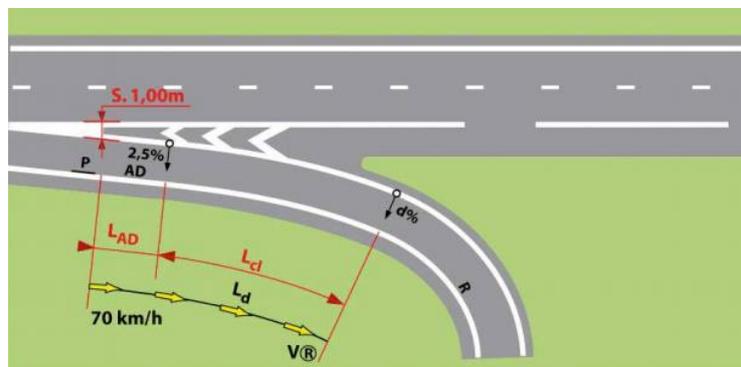


Figure 131 : Construction des divergents

7.3. Construction des convergents

Dans ce cas d'étude, le prolongement de l'obliquité sur une longueur de L_m n'est pas nécessaire lors des entrées en alignement droit, ou en des courbes de rayon supérieur à 1.5 Rdn.

En amont du point E.1,00 m, la construction de la bretelle n'est pas corrélée à la chaussée réceptrice. Le dernier rayon de la bretelle peut alors être inséré par l'intermédiaire d'un arc de clothoïde si nécessaire.

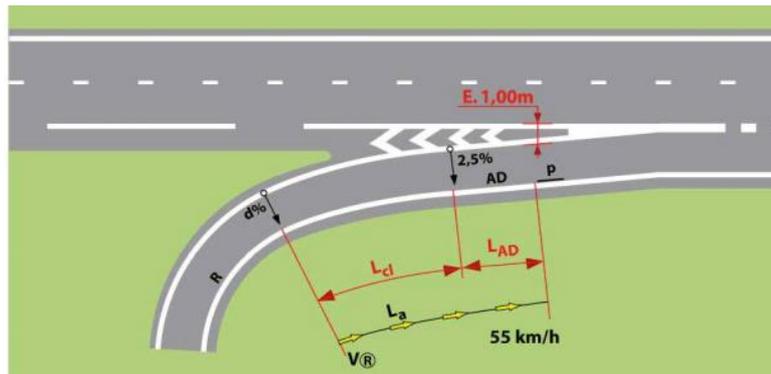


Figure 132 : Construction des convergents

7.4. Pente transversale des divergents et convergents

7.4.1. En sortie

Entre le point S.1,00 m au tpl, la pente transversale du divergent se détermine de la façon suivante :

- Sur la bande juxtaposée à la chaussée émettrice, et de largeur équivalente à celle de la BAU (ou BDD), la pente transversale est identique à celle de la chaussée émettrice
- Sur la bande juxtaposée à la bretelle, et de largeur équivalente à celle de sa BDG, la pente transversale est identique à celle de la bretelle
- Sur la zone comprise entre ces deux bandes, une pente transversale identique à celle de la chaussée émettrice est à rechercher. Lorsque cette recommandation ne peut être respectée, la pente transversale doit satisfaire aux conditions d'implantation du dispositif frontal de retenue et de la balise de divergent, qui est limitée à 5 %

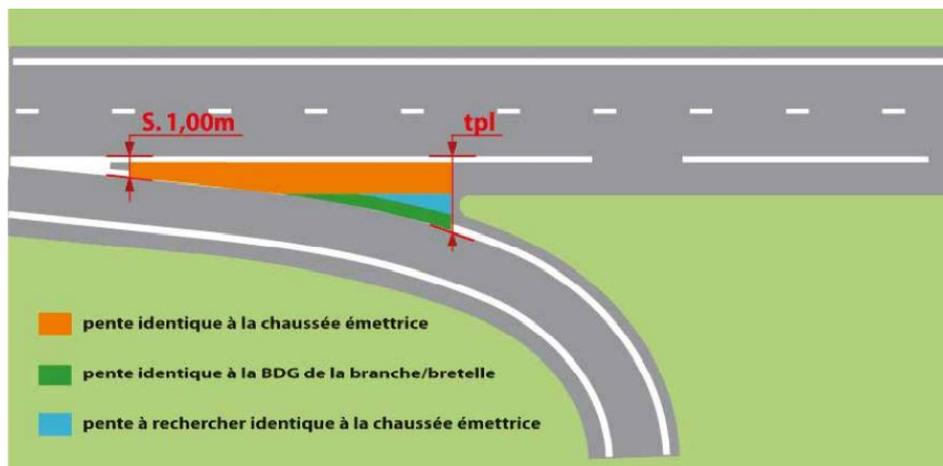


Figure 133 : pente transversale des divergents

7.4.2. En Entrée

Du tpl au point E.1,00 m, la pente transversale du convergent se détermine de la façon suivante :

- Sur la bande contiguë à la chaussée réceptrice, et de largeur équivalente à celle de sa BAU (ou BDD), la pente transversale est identique à celle de la chaussée réceptrice

- Sur une bande contiguë à la bretelle/branche, et de largeur équivalente à celle de sa BDG, la pente transversale est identique à celle de la bretelle/branche
- Sur la zone comprise entre ces deux bandes, une pente transversale identique à celle de la chaussée réceptrice est à rechercher, sans excéder la valeur de 25 %.



Figure 134 : pente transversale des convergents

VIII. Etude hydrologique

8.1. Délimitation des bassins versants

Elle a été faite avec le logiciel Civil 3D, en prenant en compte de l'hydrographie et du topographique du terrain naturel issue du levé fourni et complété par des données topographiques issues par le logiciel INFARWORKS.

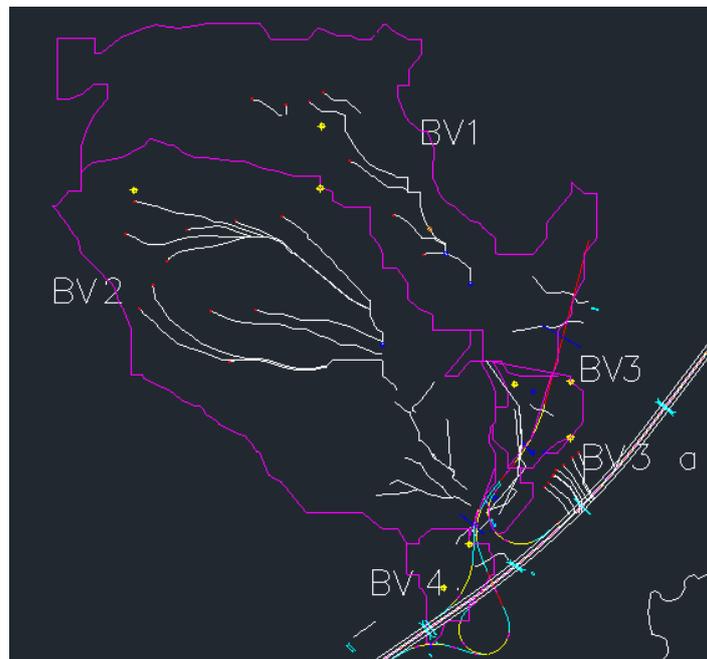


Figure 135 : Délimitation des bassins versants sur le logiciel Civil 3D

Les bassins versants sont représentés en contour en magenta dans le dessin ci-dessus, et les chemins d'écoulement sont représentés avec des polygones blanches.

Ensuite, nous avons déduit les caractéristiques physiques de chacun des bassins versants

ID bassin versant	aire (ha)	longueur du canal (m)	Pente du canal %
BV 1	29.16	495.938	9.96
BV 2	41.14	624.179	17.63
BV 3	1.28	41.556	7.08
BV 3 a	2.78	318.299	3.975
BV 4	2.48	195.977	6.8

8.2. Calcul des débits des bassins versants

En se basant sur les justifications explicitées dans le chapitre 2 paragraphe 5, nous utiliserons la méthode rationnelle pour l'estimation des débits des bassins versants, et la méthode de Kirpich pour le calcul de temps de concentration.

Cette étude est effectuée sur le add-in Storm and Sanitary Analysis (SSA) de Civil 3D pour les analyses hydrologiques et hydrauliques. SSA s'interface avec Civil 3D pour récupérer les données caractéristiques des bassins versants délimités auparavant pour le calcul des débits centennaux.

Tableau 60 : Caractéristiques des bassins versants

ID bassin versant	Coefficient de ruissellement	Intensité (mm/h)	Temps de concentration (min)	Débit (m3/s)
BV 1	0.72	195.277	5.63	11.07
BV 2	0.6	199.230	5.39	12.75
BV 3	0.6	442.723	0.95	4.43
BV 3 a	0.5	194.170	5.7	9.17
BV 4	0.6	253.595	3.19	8.03

8.3. Conclusion

Cette étude implique qu'il est impératif d'implanter cinq ouvrages hydrauliques dans les zones d'intersection des cours d'eau et des bretelles de l'échangeur, pour permettre aux eaux de ruissellement de franchir le projet sans entrainer sa dégradation.

IX. Etude hydraulique

9.1. Introduction

Cette étude exploite les résultats de l'étude hydrologique, à savoir les caractéristiques des bassins versants, et le débit du projet. Ensuite, elle sert à déterminer le choix de l'ouvrage hydraulique pour rétablir les écoulements coupés par la route suivant plusieurs critères. A cette étape, il convient de dimensionner l'ouvrage, de caler son profil en long, de vérifier sa pente et la vitesse à laquelle sera évacué le débit de la crue du projet.

9.2. Conception des ouvrages hydrauliques

La traversée d'un cours d'eau, nécessite un ouvrage hydraulique qui rétablit les écoulements coupés par la route. On distingue généralement 5 familles d'ouvrages : les buses circulaires, les dalots, les buses arches, les ouvrages à voûte cintrée, et les ouvrages d'art.

Facteurs influençant le choix des ouvrages hydrauliques

Le choix des ouvrages est guidé par le souci permanent de la pérennité du projet, de la sécurité des usagers, du coût d'investissement et des modalités d'entretien ultérieur de l'ouvrage. Les facteurs influençant le choix sont :

- l'importance du débit à évacuer qui fixe la section d'écoulement et le type de l'ouvrage
- les caractéristiques hydrauliques de l'ouvrage : coefficient de rugosité (K), coefficient d'entonnement (Ke) créant une perte de charge à l'entrée, forme de la section d'écoulement
- la largeur du lit. Un ouvrage unique adapté au débit à évacuer et à la largeur du lit du cours d'eau est généralement préférable à des ouvrages multiples qui augmentent les pertes de charges et rendent plus difficile le passage des corps flottants
- la hauteur disponible entre la cote du projet et le fond du talweg;
- les charges statiques et dynamiques qui sollicitent l'ouvrage hydraulique ;
- la rapidité et la facilité de mise en œuvre
- la résistance aux agents chimiques
- la résistance au choc : les ouvrages massifs résistent mieux aux chocs et à l'abrasion par le charriage de matériaux solides.

9.3. Dimensionnement des ouvrages hydrauliques

Le dimensionnement consiste à choisir la largeur de l'ouvrage qui est généralement inférieure à la largeur du thalweg, sa pente, à vérifier son débit capable et la hauteur à l'amont qui permettra le calage du profil en long de l'ouvrage ainsi que la vitesse de l'écoulement de l'eau pour s'assurer des conditions limites d'écoulement (une vitesse trop faible provoque un dépôt et donc une accélération du colmatage de l'ouvrage, alors que les fortes vitesses vont contribuer éroder rapidement l'ouvrage). Mais il faut au préalable connaître le régime d'écoulement à l'aval de l'ouvrage ainsi que celui dans l'ouvrage.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques :

- **Méthode de Delorme** : par application d'une formule de pré-dimensionnement qui se base sur le calcul des débits capables des ouvrages hydrauliques. À utiliser, surtout pour la phase étude de définition
- **Méthode de contrôle amont et aval** : développée par le "Bureau Of Public Road", elle se base sur la formule de Manning-Strickler et de l'équation de l'énergie critique.

9.3.1. Méthode de DELORME

Il s'agit d'une méthode simple et elle est la plus utilisée pour le pré-dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

Les débits capables des ouvrages sont donnés par des débits qui correspondent aux débits critiques déterminés par la formule de Delorme (Annales des ponts et chaussées - Novembre 1959).

Pour les buses
$$Q_c = 2.8 \times R \times H^{3/2} \times 0.88$$

Pour les dalots
$$Q_c = 1.5 \times L \times H^{3/2}$$

Avec :

Q_c = débit critique évacué en m³/s

R = rayon des buses en m

L = ouverture droite des dalots en m

H = hauteur des piédroits sous dalles pour les dalots en m, diamètre intérieur pour les buses en m.

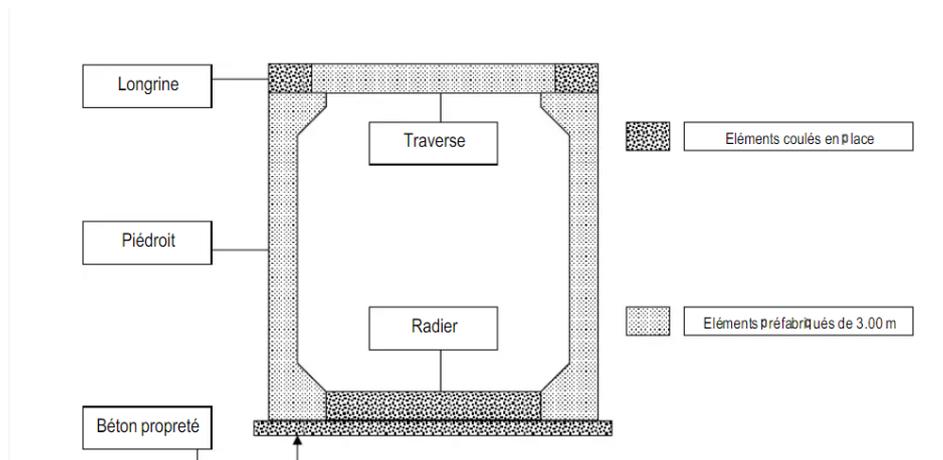


Figure 136: Coupe schématique sur dalot 3m x 3m

Tableau 61 : Résultats de la méthode DELORME

ID bassin versant	Débit du projet (m ³ /s)	ouvrage projeté	débit capable de l'ouvrage (m ³ /s)
BV 1	9.410	buse triple ø 1500	10.185
BV 2	16.260	dalot double 2 * 2	16.971
BV 3	0.470	buse simple 1000	1.232
BV 3 a	0.700	buse simple 1000	1.232
BV 4	1.040	buse simple 1000	1.232

Pour valider le choix des ouvrages, il est nécessaire de recourir à la méthode du contrôle amont et aval.

9.3.2. Méthode de contrôle amont et aval

Elle est basée sur la formule de Manning Strickler et sur l'équation de l'énergie critique. Elle consiste à déterminer les profondeurs d'eau à l'entrée de l'ouvrage hydraulique en fonction du contrôle à l'entrée et du contrôle à la sortie. Ensuite, la plus grande des deux valeurs est choisie ainsi que le type de contrôle correspondant.

a- Contrôle à l'entrée

Pour ce type de contrôle, la capacité hydraulique de l'ouvrage dépend, essentiellement, de la section libre et du type d'écoulement. L'écoulement peut se faire en surface libre ou en charge.

Équations régissant l'écoulement à surface libre :

$$\frac{Q}{A_p H^{0.5}} < 6.37$$

$$\text{Forme (1) : } \frac{H_{am}}{H} = \frac{H_c}{H} + K \left(0.552 \frac{Q}{A_p H^{0.5}} \right)^M - 0.5 S_p$$

$$\text{Forme (2) : } \frac{H_{am}}{H} = K \left(0.552 \frac{Q}{A_p H^{0.5}} \right)^M$$

L'utilisation de l'une des formes ci-dessus dépend de la forme de l'entrée et du matériau de l'ouvrage.

Equations régissant l'écoulement en charge :

$$\frac{Q}{A_p H^{0.5}} > 7.25$$

$$\frac{H_{am}}{H} = c \left(0.552 \frac{Q}{A_p H^{0.5}} \right)^2 + Y - 0.5 S_p$$

Avec :

Ham : la charge à l'amont en m

H : la hauteur interne de l'ouvrage en m ;

Hc : la charge critique en m

Q : le débit en m³/s

Ap : la section de l'ouvrage en m²

Sp : la pente de l'ouvrage en m / m

M, c, Y : constantes qui dépendent du type de l'entrée.

Les coefficients qui figurent dans les équations ci-dessus sont définis comme suit :

- Buse en béton armé avec murs en aile d'angle entre 15° et 90°, et section carrée à l'entrée

Tableau 62 : Coefficients c, m, k et y pour une buse en BA

C	K	M	Y	forme
0.0398	0.0098	2	0.67	(1)

- Section rectangulaire avec murs en aile d'angle entre 30° et 75° :

Tableau 63: Coefficients c, m, k et y pour un dalot avec murs en aile d'angle entre 30° et 75°

C	K	M	Y	forme
0.039	0.026	1	0.81	(1)

- Section rectangulaire avec murs en aile d'angle égal à 90° et 15° :

Tableau 64 : Coefficients c, m, k et y pour un dalot avec murs en aile d'angle entre 90° et 15°

C	K	M	Y	forme
• 0.04	• 0.061	• 0.75	• 0.80	• (1)

b- Contrôle à la sortie

Pour ce type de contrôle, la capacité hydraulique dépend des caractéristiques de l'ouvrage (type, longueur, forme et géométrie de l'entrée), et de la hauteur à l'aval.

L'écoulement à travers l'ouvrage hydraulique peut être à section partiellement ou complètement pleine sur une partie ou sur toute la longueur de l'ouvrage.

Pour un ouvrage hydraulique coulant plein, le calcul se base sur l'équation du bilan d'énergie. Celle-ci s'écrit sous la forme suivante :

$$\Delta H = H_e + H_f + H_s$$

Avec :

- ΔH : Perte de charge totale, qui est équivalente à l'énergie nécessaire pour faire passer une quantité d'eau dans un ouvrage hydraulique coulant plein sur toute sa longueur avec contrôle à la sortie.

- H_e : Perte de charge due à l'entrée $H_e = \frac{K_e V^2}{2g}$

Avec $K_e = 0.5$ (coefficient qui dépend de la géométrie de l'entrée)

- H_f : Perte de charge due au frottement, développée en utilisant la formule de Manning.

$$H_f = \frac{19.6 n^2 L_p V^2}{2 R_h^{1.33} g}$$

- H_s : Perte de charge due à la sortie $H_s = \frac{K_s V^2}{2g}$

Avec $K_s = 1$ (coefficient qui dépend de la géométrie de la sortie)

$$V : \text{Vitesse moyenne dans l'ouvrage coulant plein } V = \frac{Q}{A}$$

c- Résultats du calcul hydraulique :

En appliquant la méthode de contrôle amont et aval, on trouve :

Tableau 65 : Résultats de la méthode de contrôle en amont et en aval des ouvrages hydrauliques

ID bassin versant	N° OH	Q ₁₀₀ m ³ /s	Type OH	Calage OH au 1/1000				
				PK OH	Longueur (m)	Cote amont (m)	Cote aval (m)	Pente %
BV1	OH-BR1-01	9.41	3Ø1500	0+436.56	65.38	22.20	22.00	0.30
BV2	OH-BR1-02	16.26	2 Dalot (2 x 2)	0+ 630.56	63.28	17.87	17.50	0.59
BV3	OH-BR1-03	0.47	1Ø1000	0+ 436.56	37.76	25.01	24.80	0.57
BV3a	OH-BR2-01	0.70	1Ø1000	0+ 148.30	18.91	19.27	18.43	4.45
BV4	OH-BR4-01	1.04	1Ø1000	0+ 111.36	18.28	6.94	6.80	0.76

9.4. Conclusion

Dans le cas des échangeurs, en plus de la prise en compte des débits à évacuer, il faut impérativement que les ouvrages hydrauliques des bretelles permettent une continuité de ceux de l'autoroute déjà construits, pour permettre un transfert fluide des eaux de ruissellement.

Les ouvrages choisis à cette étape sont limités par la dimension standard du marché marocain et la disposition la plus optimale possible en combinant l'ingénierie du concepteur et les exigences techniques et naturelles.

Pour compléter l'étude hydraulique, il faut simuler le comportement des cours d'eau près de la zone du projet afin de la protéger contre les inondations, cette étude est détaillée dans la partie qui suit.

X. Stimulation des inondations

10.1. Introduction

La stimulation des inondations consiste à la modélisation hydraulique des écoulements de l'Oued Sghir au droit de l'échangeur Ain Dahlia, pour prévoir les inondations, et gérer ce cours d'eau.

Cette étude permet d'exploiter la modélisation de écoulement sur le modèle numérique du terrain pour déterminer le niveau de la plus haute eau PHE.

10.2. Méthodologie de l'étude

Pour ce faire, nous avons adopté le module Autodesk River and Flood Analysis qui est un outil avancé de modélisation des cours d'eau et qui prend en charge HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center, River Analysis System) élaboré par l'US Army Corps of Engineers, dans Autodesk AutoCAD Civil 3D.

L'utilisation de ce module permet de tirer parti des capacités de Autocad Civil 3D avec HEC-RAS, puisque ce dernier s'intègre étroitement à Civil 3D et offre beaucoup plus de fonctionnalités, pour un gain considérable de temps en évitant les allers-retours entre les logiciels.

L'étude consiste à stimuler les écoulements à surface libre à partir du modèle du cours d'eau. Ce modèle se constitue d'une succession de sections transversales dans lesquelles on calcule le débit et le PHE, elles correspondent au maillage de la rivière.

Pour avoir un modèle correct, il est nécessaire de paramétrer plusieurs options. Parmi ces options on trouve :

- ✓ Coefficient de Manning Strickler de chaque section
- ✓ Les conditions limites aval ou conditions initiales
- ✓ Choix de type de l'écoulement
- ✓ Longueur d'écoulement
- ✓ Limites gauches et droites du lit principal de la rivière

10.2.1. Sections transversales

Les caractéristiques géométriques nécessaires à cette étape sont les sections transversales à différents endroits de la rivière. Les sections sont définies sur Autocad Civil 3d soit manuellement ou automatiquement en exploitant le modèle numérique du terrain.

Pour augmenter la précision des calculs, il est recommandé d'avoir une distance raisonnable entre deux sections transversales. En assumant que la pente et les propriétés des sections varient de façon linéaire entre deux sections consécutives.

Dans ce projet, les sections sont distantes de 100 m en moyenne et se développent de la voie ferrée à l'axe autoroutier pour pouvoir estimer le niveau de l'eau dans cette zone.

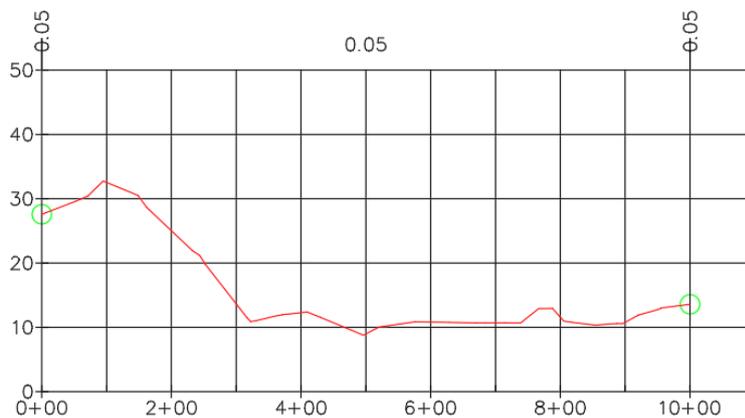
Les sections de la rivière sont placées dans un ordre décroissant de l'amont vers l'aval d'Oued.

Le coefficient de Manning est pris égal à 0.05 dans chaque portion des sections transversales, il caractérise la rugosité du lit d'écoulement.

Tableau 66 : Vue en plan des sections transversales du lit d'Oued Sghir



Tableau 67 : Section transversale N11 d'Oued Sghir



10.2.2. Débit et conditions aux limites

L'étape suivante de la modélisation hydraulique sur Autocad Civil 3D est de spécifier le type d'écoulement dans la rivière. L'écoulement peut être subcritique, supercritique ou mixte :

- ✓ Ecoulement subcritique : régime fluvial qui se caractérise par une vitesse d'écoulement faible et une hauteur d'eau élevée ($F_r < 1$)
- ✓ Ecoulement supercritique : régime torrentiel qui se caractérise par une vitesse d'écoulement forte et une hauteur d'eau faible ($F_r > 1$)

- ✓ Ecoulement mixte : quand l'écoulement est varié

Dans cette étude, l'écoulement est mixte.

Ensuite, il faut spécifier les débits d'écoulement dans les différents profils, et entrer les conditions aux limites caractérisant l'écoulement. Les conditions limites sont nécessaires pour le calcul de la hauteur d'eau aux extrémités de chaque tronçon. Pour un écoulement fluvial, seulement les conditions à l'aval sont nécessaires, tandis que pour un écoulement torrentiel, les conditions à l'amont seulement sont nécessaires. Selon le régime d'écoulement modélisé, une seule des deux conditions limites peut être indiquée.

Le débit d'écoulement d'Oued Sghir est 250 m³/s, avec une hauteur d'eau en aval de 12.5m selon le rapport hydrologie-hydraulique (version Octobre 2003) de l'étude de la « Liaison autoroutière reliant l'Autoroute du Nord à Fnideq via le nouveau port de oued R'mel ».

10.3. Résultats de la stimulation

Après la fin de la stimulation, la hauteur d'eau apparait dans la vue des profils transversaux, ainsi qu'un rapport détaillé est généré automatiquement à partir du logiciel.

Il ressort de la modélisation que la côte PHE au droit de la bretelle 1 et la boucle est comprise entre 12.5 et 12.97 NGM. Nous considérons alors une côte PHE de 13 NGM.

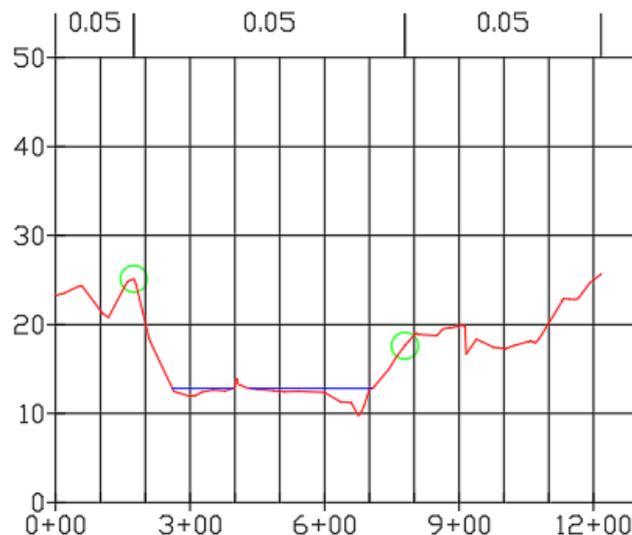


Figure 137 : Résultat de la simulation sur la section transversale N 11 d'Oued Sghir

Tableau 68: Résultats de la simulation des inondations pour les sections transversales d'Oued Sghir

Section	Q Total (m3/s)	hauteur d'eau (m)	pente (m/m)	Vitesse (m/s)
1	250	12.5	0.011416	1.31
2	250	12.892	0.000349	0.4
3	250	12.94	0.000049	0.22
4	250	12.954	0.000016	0.15
5	250	12.957	0.000015	0.14
6	250	12.96	0.000013	0.14
7	250	12.963	0.000013	0.15
8	250	12.964	0.000018	0.16
9	250	12.966	0.000017	0.15
10	250	12.968	0.000018	0.15
11	250	12.972	0.000042	0.2

En se basant sur les résultats de la stimulation, et en interpolant entre les sections transversales, le module River and Flood Analysis génère une carte de la plaine inondable.



Figure 138 : Carte de la plaine inondable

La carte montre clairement (zone blanche) que l'Oued qui se situe près de la zone du projet présente une vraie menace, donc il s'avère nécessaire de protéger les bretelles de l'échangeur contre les inondations.

En se basant sur les résultats du tableau et de la carte ci-dessus des protections en enrochements (LMA 10-60) sont à prévoir jusqu'à la côte 13.5 NGM (côte PHE + 0.5m) afin de protéger le talus de l'autoroute et les bretelles de l'échangeur.

10.4. Conclusion

Cette étude permet de mieux localiser spatialement les zones qui présentent un risque d'inondation pour l'infrastructure lors des fortes crues, afin de mettre en place des dispositifs de protection pour les bretelles de l'échangeur.

XI. Modélisation de la gare de péage

11.1. Description de la gare de péage

L'échangeur sera contrôlé par une barrière à péage, avec 5 voies en sortie et 3 voies en entrée. Chaque entrée et sortie est équipée d'un îlot comportant une cabine pour guichetier, et un « nez » d'îlot arrondi et bordures qui permettent de guider les véhicules à l'approche des barrières.

En outre, le système d'exploitation de la gare de péage sera doté de :

- Barrières levantes équipées de sirène
- Feux de passage
- Capteurs d'essieux
- Lecteurs de cartes magnétiques
- Distributeurs de reçus
- Afficheurs usagers extérieurs

La mise en place de système d'exploitation est impérative pour le bon fonctionnement de la gare et la sécurité des employées et des utilisateurs.

En outre, la gare de péage est équipée par une signalisation horizontale et verticale, ainsi que l'aménagement de zones de services.

La mise en œuvre des réseaux (eau, électricité, téléphone etc...) pour la desserte de la gare de péage nécessite l'aménagement d'une galerie souterraine dont les dimensions sont : 2.58 m × 2.20 m.

Pour le confort des conducteurs, il est nécessaire d'aménager une zone de transition entre la chaussée et la dalle de péage, par la bonne exécution des terrassements dans cette zone et la mise en place d'un radier en béton armé.

La gare de péage est équipée par des ouvrages d'assainissement pour drainer et évacuer les eaux de ruissellement de la plateforme.

La construction de la gare de péage sera accompagnée par l'aménagement des parkings attenants dans les deux sens de la circulation pour l'arrêt des poids lourds et véhicules légers.

11.2. Modèle 3D de la gare de péage

Pour donner vie au projet, la gare de péage décrite ci avant a été modélisée à l'aide du logiciel Revit en se basant sur les plans 2D délivrée par l'organisme de stage.

Cette modélisation permet la visualisation de la structure et de ses composantes en 3D, pour maîtriser davantage la conception, les dimensions et les matériaux de construction utilisés.

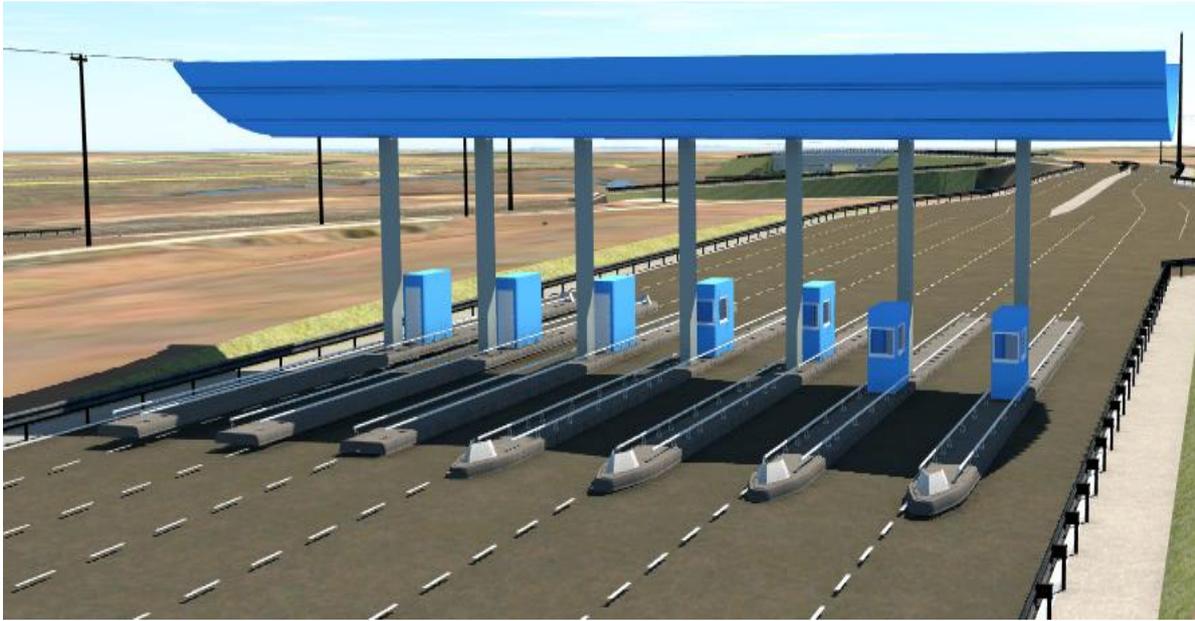


Figure 139 : Modèle 3D de la gare de péage

11.3. Conclusion

Après avoir achevé l'étude détaillée du projet, et compléter le modèle 3D, l'étape suivante consiste à établir un devis estimatif des quantités.

XII. Détail quantitatif

12.1. Introduction :

Les mouvements de terre englobent tous les travaux de terrassement, pour modifier la forme du terrain naturel, afin de recevoir l'infrastructure. Ils consistent en deux actions :

- Remblayer : Ajouter des terres
- Déblayer : Enlever des terres

La détermination de l'action à adopter est étroitement liée au niveau du terrain naturel par rapport aux profils en long et profils en travers du projet.

Le calcul des volumes des déblais et des remblais s'appelle les cubatures de terrassements.

12.2. Cubatures de terrassement :

Les cubatures de terrassement décrivent l'évolution des cubes de déblais et remblais que comporte le projet afin d'obtenir une surface uniforme et parallèlement sous adjacente à la ligne projet.

Les éléments qui permettent cette évolution sont :

- Les profils en long.
- Les profils en travers.
- Les distances entre les profils.

La détermination de ces volumes est réduite aux calculs des intégrales entre les différentes sections en imposant une géométrie descriptive à chaque profil.

La méthode pratique de calcul de ces cubatures consiste à découper les sections qui se présentent en profil en travers en figure géométrique calculable, ensuite calculer les surfaces de ces figures, puis multiplier la somme totale des surfaces par la longueur d'application de chaque profil afin d'avoir le volume. Cette méthode est intégrée dans le logiciel Autodesk Civil 3D.

12.3. Coefficients de foisonnement et de tassement

Le foisonnement est la propriété des sols d'augmenter de volume lorsqu'on les manipule suite à la décompression des matériaux. Le foisonnement est très variable, de 10 à 40% en amplitude, de 15 à 25% en moyenne dépendamment de l'expérience du projeteur et les résultats des essais sur des échantillons de la zone à terrasser.

Dans le cadre de ce projet, puisqu'il s'agit d'un terrain argileux, on adopte un coefficient de 20%.

En outre, les sols fraîchement remués et remis en place diminuent de volume à cause du phénomène de tassement. Il est donc indispensable de prendre en compte, dans ce cas, un coefficient de tassement de 15%.

On doit donc bien différencier les volumes géométriques et les volumes réels avec foisonnements et tassements. De plus la nature et la stratigraphie du sol n'est connu que de façon approximative, enlevant de la précision aux calculs.

12.4. Résultats

Les résultats de calcul de cubatures aboutissent à un excès en remblai de :

- 33179.75 m3 pour la bretelle 1
- 4780.66 m3 pour la bretelle 2
- 9289.16 m3 pour la bretelle 3
- 32856.27 m3 pour la bretelle 4
- 22364.73 m3 pour la bretelle 5

Les détails quantités sont annexés à la fin de ce document.

12.5. Conclusion

Après avoir évalué les quantités, il faut intégrer les postes des travaux (installation de chantier, travaux préparatoires, terrassements généraux, chaussée, revêtement, ouvrages d'assainissement, sécurité, signalisation et éclairage) en les appliquant aux prix unitaires respectifs suivant l'expérience des bureaux d'étude en matière de construction de projets routiers afin d'estimer le coût global du projet.

Conclusion générale :

Dans la politique de suivre la tendance mondiale du secteur du BTP, ce projet fin d'études met le point sur une panoplie d'outils et technologies puissantes qui intègrent le savoir-faire et l'ingénierie fonctionnelle dans le domaine des infrastructures routières, à travers l'étude de l'échangeur situé à Ain Dalia sur l'autoroute en service N°5 Rabat-Port Tanger Med.

Cette étude m'a permis de développer mes compétences acquises dans le cadre de ma formation dans le domaine des travaux publics en les pratiquant dans le cas d'un projet pilote d'infrastructure, et d'acquérir un esprit d'analyse et de prise de décision. Compte tenu que le projet est pluridisciplinaire, j'ai eu à collaborer avec différentes parties ce qui a engagé mon esprit de travail en équipe, facteur indispensable pour l'intégration du milieu professionnel.

L'utilisation de la technologie BIM et les processus associés m'a permis de comprendre au mieux les contraintes de la conception (réseaux et canalisations, constructions existantes, topographie du site, emprise du sol disponible, données géotechniques....) à travers la visualisation de l'environnement du projet dans son contexte réel au sein d'une maquette numérique intelligente. Au cours de cette étude, j'ai également profité de l'interopérabilité entre les différents outils BIM utilisés qui conserve les données sans avoir recours à la conversion des fichiers en optimisant le temps et l'énergie. En outre, à travers le développement de ce flux de travail, j'ai maîtrisé davantage les différentes phases de la conception, ainsi que les livrables et le niveau de détail requis dans chaque étape.

Il est à noter que la modélisation de la maquette numérique n'est qu'un volet de la méthodologie BIM, il est donc recommandé de mener cette étude jusqu'à la phase de la collaboration entre l'équipe projet et entre les parties prenantes via une plateforme collaborative qui permet la gestion numérique des versions des fichiers et des signatures électroniques, ainsi que la centralisation du modèle pour exploitation, selon les droits accordés à chaque partie.

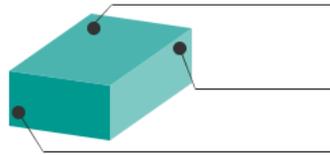
Les niches de développement du projet intègrent le BIM 4D qui associe la notion du temps et de planification au modèle afin de virtualiser la construction du projet, et d'assurer le suivi d'exécution sans dépasser les délais imparties, ainsi que la notion du BIM 5D qui traite la notion coût basée sur l'intégralité de la maquette numérique pour la prise en compte de tous imprévus de dépassement du budget, lors de réalisation tôt dans la conception.

Il est également recommandé de développer la variante du pont choisie (VIPP) au niveau du pré dimensionnement, et procéder à un calcul de charge, puis le ferrailage de la structure, en se basant sur les dimensions préétablies.

En guise de conclusion, ce document est conçu pour fournir une méthodologie aux professionnels de la construction, plus particulièrement dans le domaine des infrastructures, qu'ils peuvent consulter pour déployer le flux de travail BIM infrastructure, tirer profit de ses fonctionnalités et appliquer ses meilleurs pratiques. Ce travail les aidera également à définir les processus clés dans l'ensemble du projet, et à sélectionner des solutions logicielles interopérables basées sur la communication collaborative donnant place à une gestion optimale des projets, il est également à préciser que le déploiement de cette méthode nécessite un engagement de toutes les équipes de l'organisme dans un travail collaboratif, pour changer les habitudes liées à l'utilisation du CAO classique et migrer vers la numérisation.

Annexe 1 : Exemple du rapport de calcul hydraulique issu du logiciel INFRAWORKS

Culvert Report



Size
1950mm

Material Béton

Shape
Circulaire

HW ELEV

14.85 m

HGL UP

13.92 m

HGL DOWN

12.58 m

CULVERT

Culvert Length (m)	7.39	Slope (%)	11.16
Invert Elev Entrance (m)	12.43	Invert Elev Exit (m)	11.61
Size	1950mm	Shape	Circulaire
No. Barrels	1	Manning's n	0.012
Culvert Material	Béton	Inlet Configuration	Arête carrée avec tête de buse

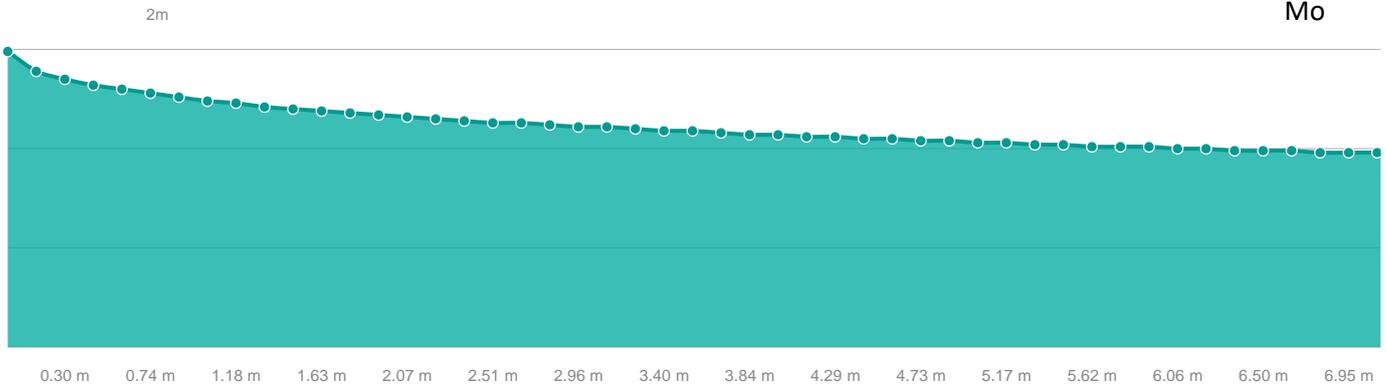
CALCULATION

Design Flow (cms)	9.36	Flow per Barrel (cms)	9.36
Tailwater Condition	(dc+D)/2	Tailwater Elev (m)	13.35
Velocity Up (m/s)	3.77	Velocity Down (m/s)	6.24
HGL Up (m)	13.92	HGL Down (m)	12.58
Headwater Elev (m)	14.85	Hw/D	1.22
Flow Regime	Inlet Control		

EMBANKMENT

Top Elevation (m)	14.85	Top Width (m)	30.00
-------------------	-------	---------------	-------

Water Surface Profile



Annexe 2 : modèle 3D les pylônes d'alignement et pylônes d'ancrage

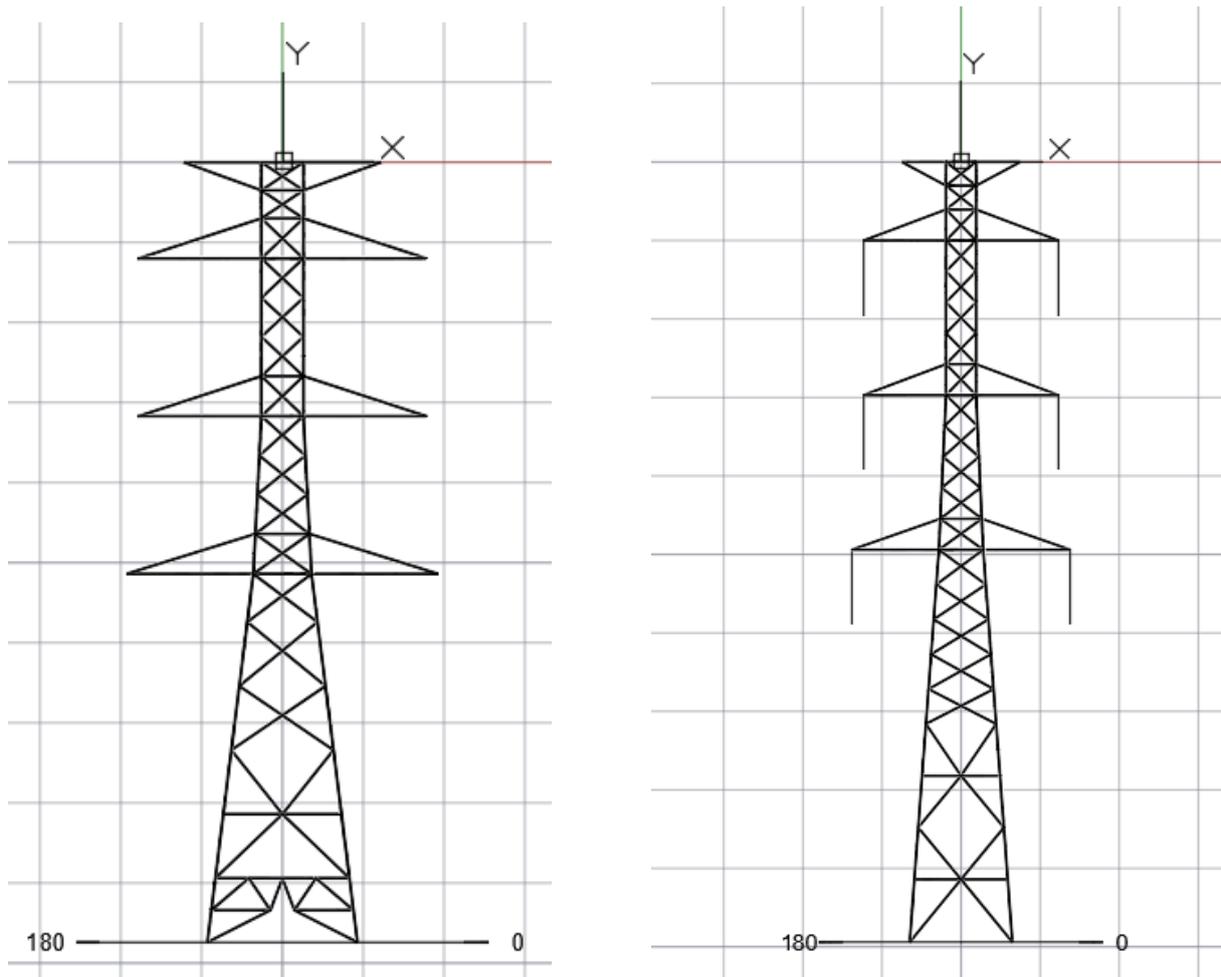


Figure 140 : pylône d'ancrage et d'alignement

Annexe 3 : Calage des ouvrages hydrauliques

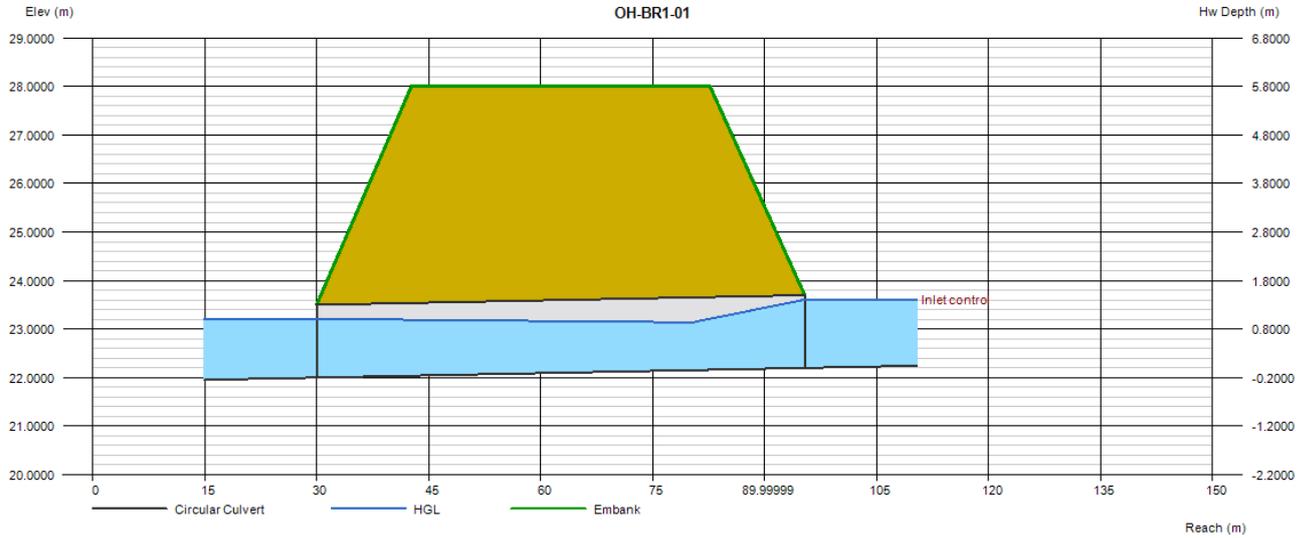


Figure 141 : calage hydraulique de l'ouvrage OH-BR1-01

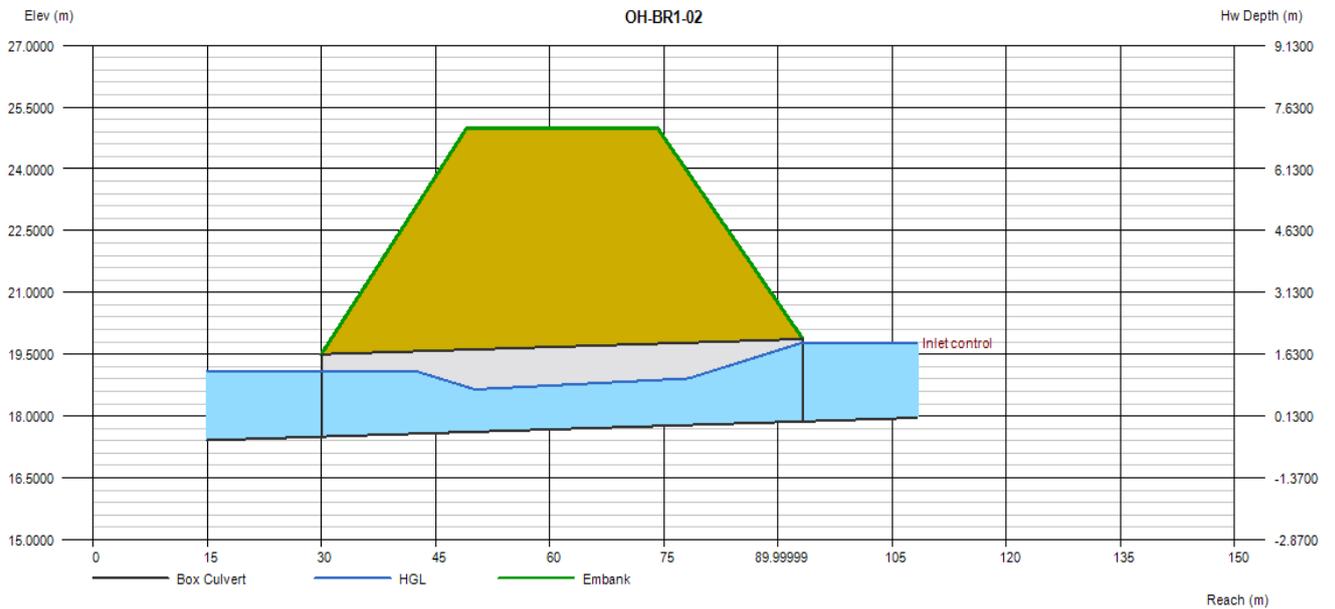


Figure 142 : calage hydraulique de l'ouvrage OH-BR1-02

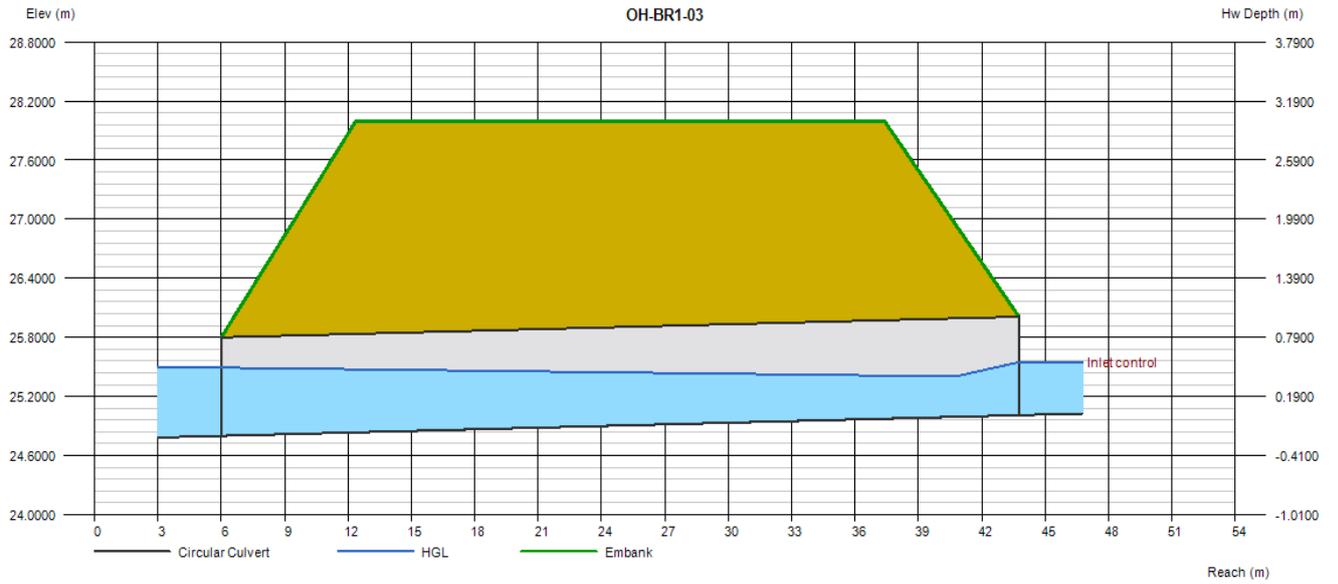


Figure 143 : calage hydraulique de l'ouvrage OH-BR1-03

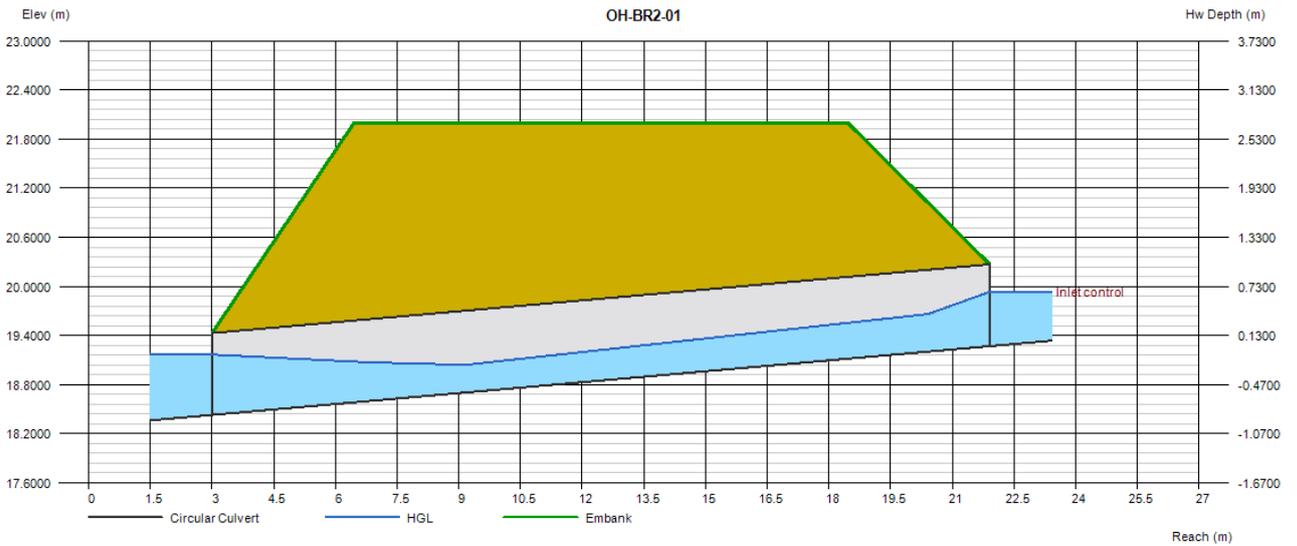


Figure 144 : calage hydraulique de l'ouvrage OH-BR2-01

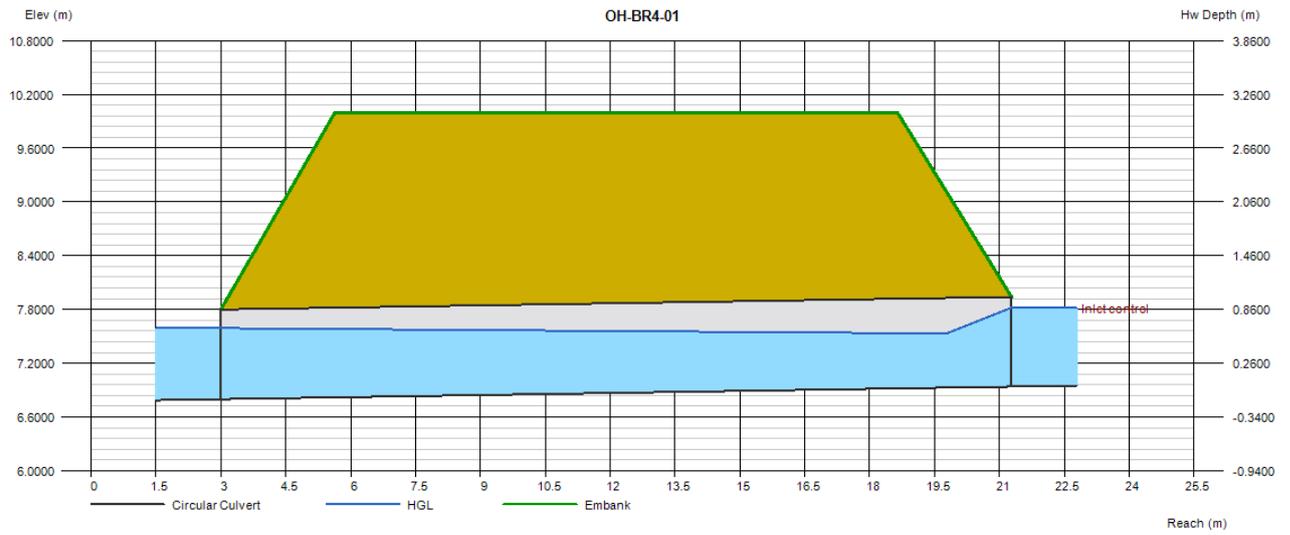
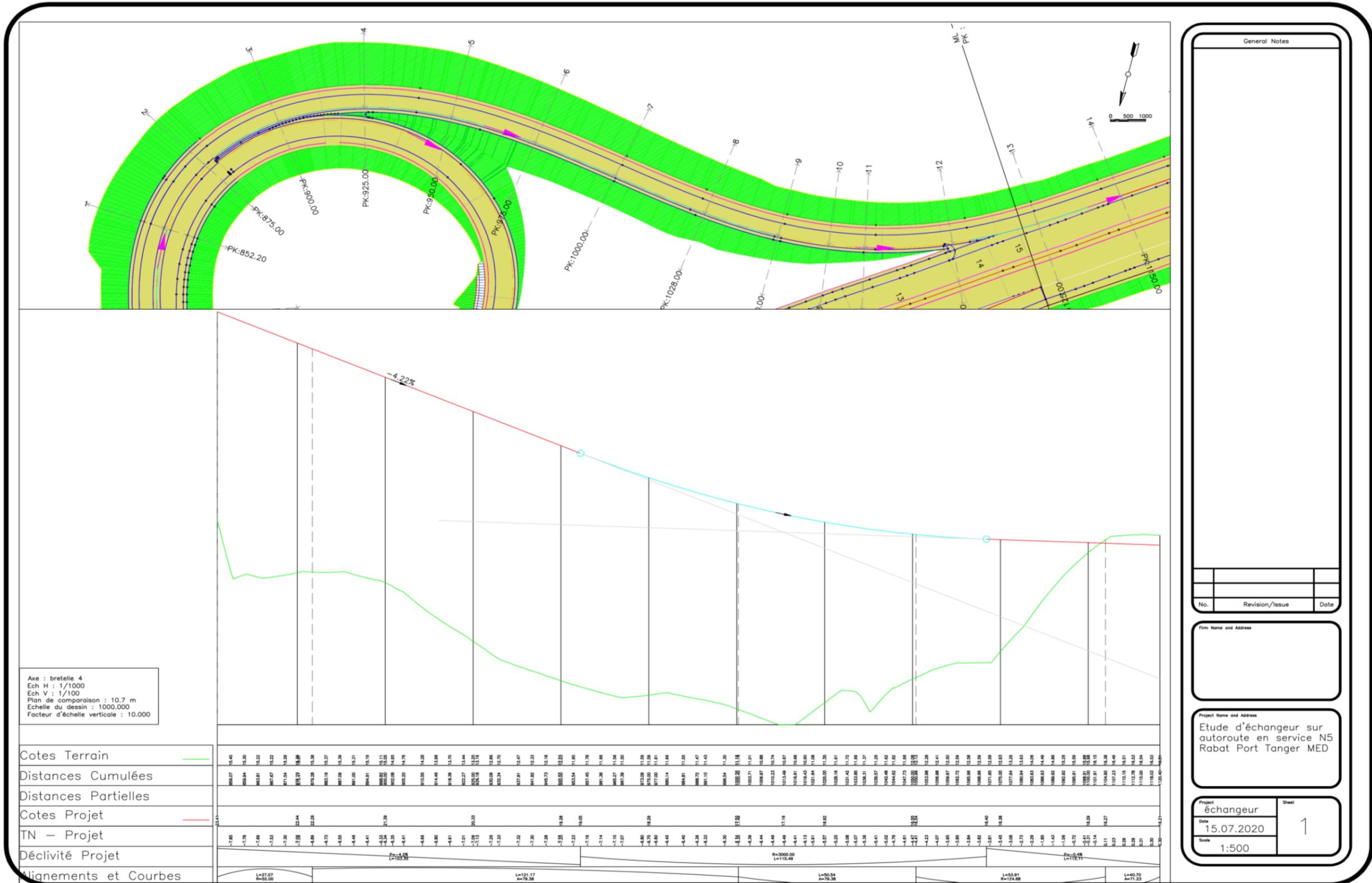


Figure 145: calage hydraulique de l'ouvrage OH-BR4-01

Annexe 4 : Plan et profil en long de la bretelle 4 (Rabat – Gare de péage Tanger Centre)



Axe : bretelle 4
 Ech H : 1/1000
 Ech V : 1/100
 Plan de comparaison : 10.7 m
 Echelle du dessin : 1000.000
 Facteur d'échelle verticale : 10.000

Cotes Terrain	—
Distances Cumulées	—
Distances Partielles	—
Cotes Projet	—
TN - Projet	—
Déclivité Projet	—
Alignements et Courbes	—

General Notes

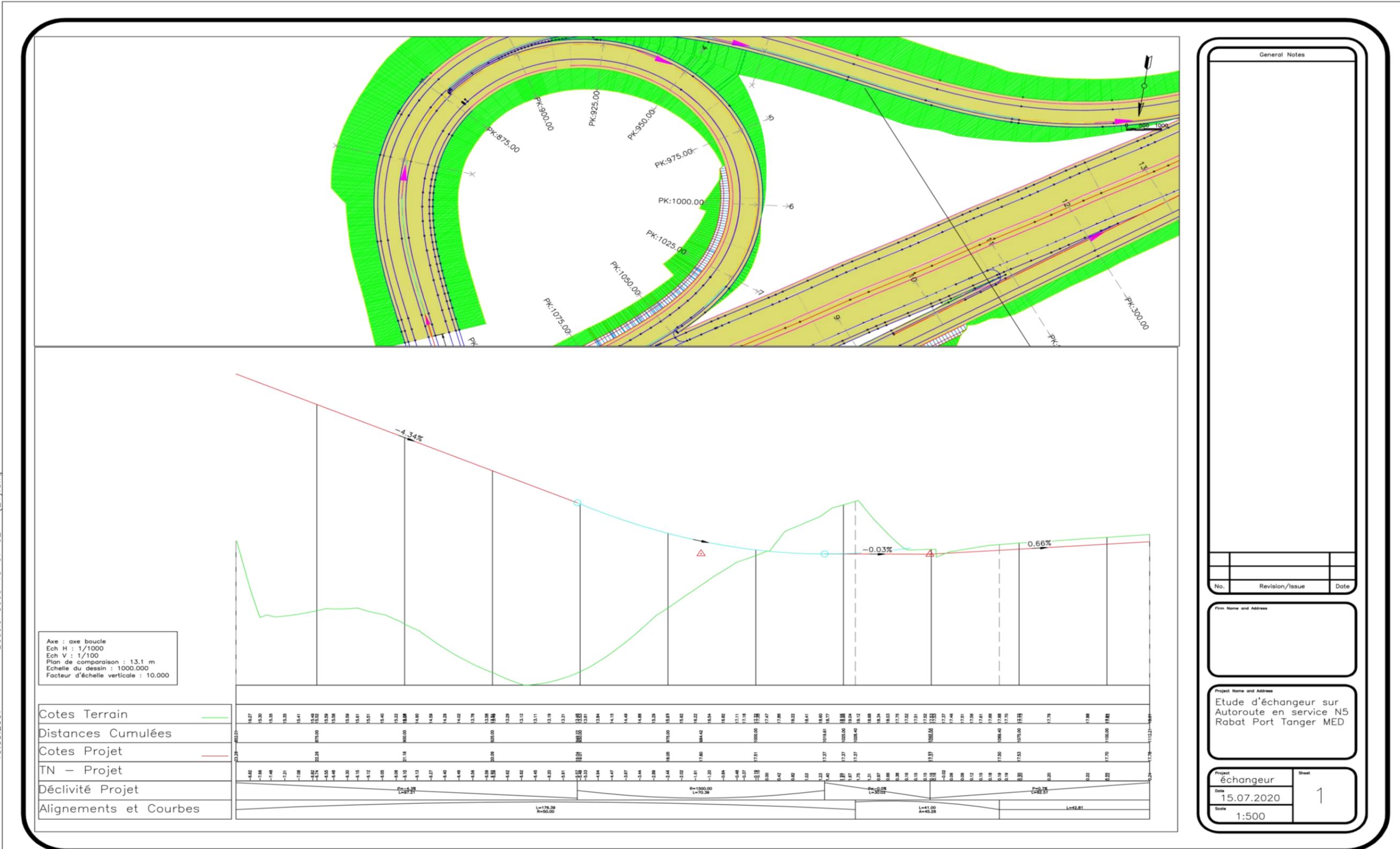
No.	Revision/Issue	Date

Firm Name and Address

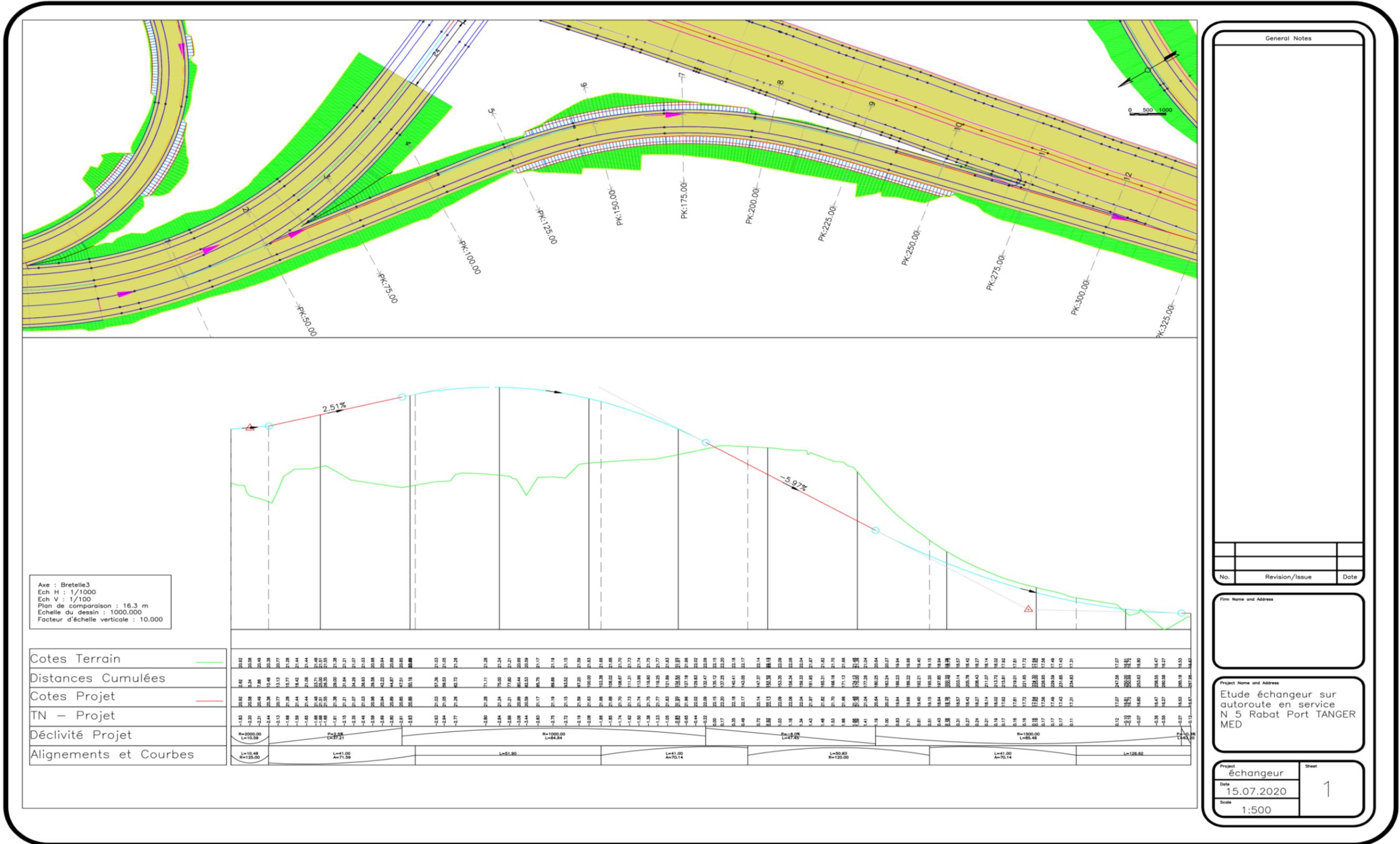
Project Name and Address
 Etude d'échangeur sur autoroute en service N5 Rabat Port Tanger MED

Project échangeur	Sheet 1
Date 15.07.2020	
Scale 1:500	

Annexe 5 : Plan et profil en long de la bretelle 5 (Gare de péage Tanger Centre – Port Tanger MED)



Annexe 6 : Plan et profil en long de la bretelle 3 (Gare de péage Tanger centre– Rabat)



General Notes

No.	Revision/Issue	Date

Firm Name and Address

Project Name and Address
 Etude échangeur sur autoroute en service N 5 Rabat Port TANGER MED

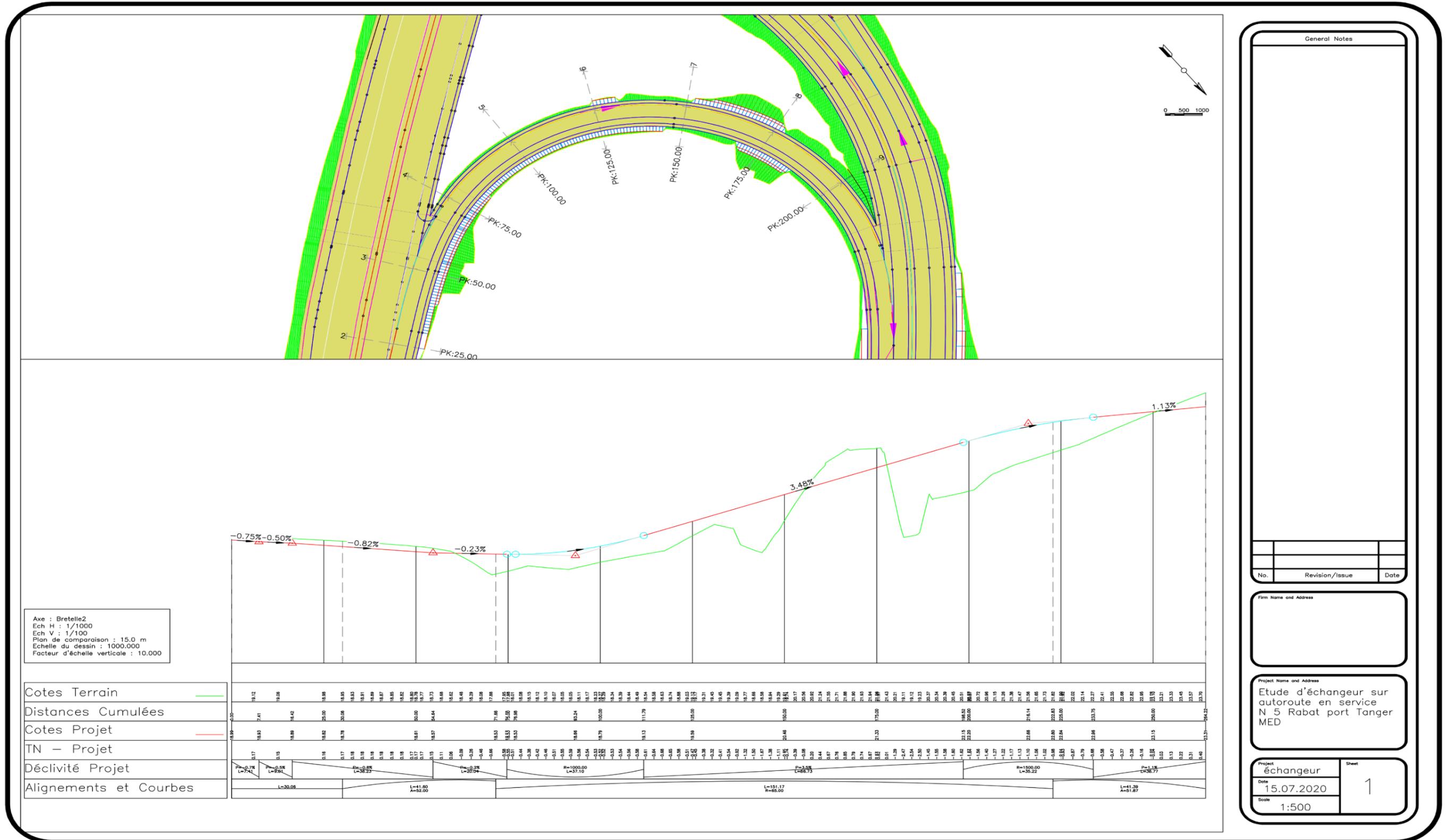
Project
 échangeur

Date
 15.07.2020

Scale
 1:500

Sheet
 1

Annexe 7 : Plan et profil en long de la bretelle 3 (Port Tanger MED – gare de péage Tanger centre)



General Notes

No.	Revision/Issue	Date

Firm Name and Address

Project Name and Address

Etude d'échangeur sur autoroute en service N 5 Rabat port Tanger MED

Project: échangeur

Date: 15.07.2020

Scale: 1:500

Sheet: 1

Annexe 8 : Vue en plan du projet de l'échangeur Ain Dalia



Annexe 10 : Détails quantitatifs du projet

Bretelle 1 :

Abscisse	Surface de déblai (m2)	Volume de déblai (m3)	Surface de remblai (m2)	Volume de remblai (m3)	Vol. déblai Cum. (m3)	Vol. remblai Cum. (m3)	Vol. Net Cum. (m3)
0+000.000	0	0	24.21	0	0	0	0
0+025.000	0	0	44.29	984.77	0	984.77	-984.77
0+050.000	0	0	97.17	2033.6	0	3018.36	-3018.36
0+075.000	0	0	171.13	3856.91	0	6875.27	-6875.27
0+100.000	0	0	189.59	5185.4	0	12060.67	-12060.67
0+125.000	0	0	211.85	5770.74	0	17831.41	-17831.41
0+150.000	0	0	179.9	5631.48	0	23462.89	-23462.89
0+175.000	0	0	185.64	5254.67	0	28717.56	-28717.56
0+200.000	0	0	127.62	4503.06	0	33220.61	-33220.61
0+225.000	0	0	67.08	2798.75	0	36019.36	-36019.36
0+250.000	39.61	594.1	0	964.27	594.1	36983.63	-36389.53
0+275.000	106.76	2195.5	0	0	2789.6	36983.63	-34194.03
0+300.000	150.73	3862.37	0	0	6651.98	36983.63	-30331.65
0+325.000	156.3	4605.48	0	0	11257.46	36983.63	-25726.17
0+350.000	153.26	4639.43	0	0	15896.89	36983.63	-21086.74
0+375.000	157.51	4638.55	0	0	20535.44	36983.63	-16448.19
0+400.000	149.93	4595.39	0	0	25130.83	36983.63	-11852.8
0+425.000	131.15	4206.67	0	0	29337.5	36983.63	-7646.14
0+450.000	118	3729.82	0	0	33067.32	36983.63	-3916.31
0+475.000	89.68	3111.85	0	0	36179.17	36983.63	-804.46
0+500.000	56.2	2188.21	0	0	38367.38	36983.63	1383.75
0+525.000	19.68	1138.25	0	0	39505.63	36983.63	2522
0+550.000	0.46	303.4	8.61	123.76	39809.02	37107.39	2701.64
0+575.000	0	7.26	32.67	588.13	39816.28	37695.52	2120.77
0+600.000	1.39	15.81	71.73	1466.08	39832.09	39161.6	670.49
0+625.000	9.63	124.75	65.02	1908.4	39956.84	41070	-1113.16
0+650.000	0.01	109.63	76.38	2040.19	40066.47	43110.19	-3043.72
0+675.000	0	0.15	121.77	2950.06	40066.62	46060.25	-5993.63
0+700.000	0	0	130.61	3684.55	40066.62	49744.8	-9678.18
0+800.000	0	0	127.99	14873.85	40066.62	64618.66	-24552.03
0+825.000	0	0	123.74	3618.32	40066.62	68236.97	-28170.35
0+853.255	0	0.02	177.79	5009.42	40066.64	73246.39	-33179.75

Bretelle 2 :

Abscisse	Surface de déblai (m2)	Volume de déblai (m3)	Surface de remblai (m2)	Volume de remblai (m3)	Vol. déblai Cum. (m3)	Vol. remblai Cum. (m3)	Vol. Net Cum. (m3)
0+000.000	4.31	0	4.93	0	0	0	0
0+025.000	4.02	124.93	5.4	148.47	124.93	148.47	-23.53
0+050.000	4.83	134.75	6.93	185.59	259.68	334.06	-74.38
0+075.000	2.31	112.45	6.6	239.42	372.13	573.48	-201.35
0+100.000	0.82	57.42	4.21	181.6	429.55	755.08	-325.53
0+125.000	0.14	19.42	3.86	111.93	448.97	867.01	-418.03
0+150.000	0	1.88	24.16	508.19	450.86	1375.2	-924.34
0+175.000	13.9	195.32	63.76	1777.81	646.17	3153	-2506.83
0+200.000	0	195.32	65.57	2469.15	841.49	5622.15	-4780.66

Bretelle 3 :

Abscisse	Surface de déblai (m2)	Volume de déblai (m3)	Surface de remblai (m2)	Volume de remblai (m3)	Vol. déblai Cum. (m3)	Vol. remblai Cum. (m3)	Vol. Net Cum. (m3)
0+025.000	8.98	0	45.24	0	0	0	0
0+050.000	0	122	71.1	1652.45	122	1652.45	-1530.45
0+075.000	0	0	115.02	2675.49	122	4327.94	-4205.94
0+100.000	0	0	149.35	3800.31	122	8128.26	-8006.25
0+125.000	0.03	0.38	6.35	2327.26	122.39	10455.51	-10333.13
0+150.000	21.85	327.1	0	89.99	449.48	10545.51	-10096.02
0+200.000	40.93	1905.89	0.01	0.42	2355.37	10545.93	-8190.56
0+225.000	27.64	1030.27	0.05	0.92	3385.64	10546.85	-7161.21
0+250.000	8.9	548.21	0.17	3.2	3933.85	10550.05	-6616.2
0+275.000	5.07	209.59	15.08	219.34	4143.44	10769.39	-6625.95
0+300.000	4.38	141.74	17.69	471.1	4285.17	11240.48	-6955.31
0+325.000	3.1	112.2	56.85	1071.47	4397.38	12311.96	-7914.58
0+350.000	3.72	102.38	27.52	1212.85	4499.75	13524.8	-9025.05
0+362.063	1.63	38.79	16.15	302.89	4538.54	13827.7	-9289.16

Bretelle 4 :

Abscisse	Surface de déblai (m2)	Volume de déblai (m3)	Surface de remblai (m2)	Volume de remblai (m3)	Vol. déblai Cum. (m3)	Vol. remblai Cum. (m3)	Vol. Net Cum. (m3)
0+875.000	0	0	159.36	0	0	0	0
0+900.000	0	0	167.38	4830.09	0	4830.09	-4830.09
0+925.000	0	0	167.97	4902.09	0	9732.18	-9732.18
0+950.000	0	0	198.49	5257.31	0	14989.49	-14989.49
0+975.000	0	0	164.88	5142.09	0	20131.58	-20131.58
1+000.000	0	0	112.14	3978.18	0	24109.77	-24109.77
1+028.005	0.03	0.46	87.94	3196.84	0.46	27306.6	-27306.14
1+050.000	2.97	47.41	70.48	1961.73	47.88	29268.34	-29220.46
1+064.633	4.51	81.37	58.13	1050.94	129.25	30319.28	-30190.03
1+075.000	4.04	64.1	54.52	654.93	193.35	30974.21	-30780.86
1+100.000	6.71	185.7	24.97	1113.72	379.05	32087.93	-31708.88
1+125.000	3.17	160.59	12.78	535.01	539.64	32622.93	-32083.3
1+150.000	2.75	89.54	14.99	402.96	629.18	33025.89	-32396.71
1+175.000	2.39	77.12	13.54	410.05	706.3	33435.94	-32729.65
1+186.152	1.84	28.3	10.62	154.92	734.6	33590.86	-32856.27

Bretelle 5 :

Abscisse	Surface de déblai (m2)	Volume de déblai (m3)	Surface de remblai (m2)	Volume de remblai (m3)	Vol. déblai Cum. (m3)	Vol. remblai Cum. (m3)	Vol. Net Cum. (m3)
0+875.000	0	0	163.16	0	0	0	0
0+900.000	0	0	167.03	5073.88	0	5073.88	-5073.88
0+925.000	0	0	194.14	5602.57	0	10676.45	-10676.45
0+950.000	0	0	203.03	6658.33	0	17334.78	-17334.78
0+975.000	0	0	81.3	5298.8	0	22633.58	-22633.58
1+000.000	5.75	70.89	0.56	1716.45	70.89	24350.03	-24279.14
1+025.000	34.48	585.22	0	8.12	656.11	24358.15	-23702.04
1+050.000	31.51	1030.01	0	0	1686.12	24358.15	-22672.03
1+075.000	17.71	747.85	0.11	1.55	2433.96	24359.7	-21925.73
1+100.000	13.35	465.91	41.87	603.5	2899.87	24963.2	-22063.33
1+112.208	11.01	178.44	26.48	479.84	3078.31	25443.04	-22364.73

Bibliographie

Livres

Conception des ponts	Anne BERNARD-GÉLY et Jean-Armand CALGARO
Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes	Service d'Etude Technique des Routes et Autoroutes (SETRA)
Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison (ICTAAL) version 2015	Service d'Etude Technique des Routes et Autoroutes (SETRA)
Les échangeurs sur routes de type Autoroutes	Service d'Etude Technique des Routes et Autoroutes (SETRA)
Ponts à poutres préfabriquées précontraintes par post tension	Service d'Etude Technique des Routes et Autoroutes (SETRA)
Autodesk Storm and Sanitary Analysis, user's guide	Autodesk
FDOT Civil 3D Drainage Stormwater & Sewer Analysis (SSA)	Florida Department of Transportation
Autodesk River and Flood analysis, user's guide	Autodesk
Autodesk Civil 3D, 2018	Infratech
Ecoulements à surface libre	Christophe Ancey
Implémentation du BIM pour les infrastructures : guide sur les étapes essentielles	Autodesk
le BIM Manager, qui est-il ?	Quentin Bertrand

Cours académiques

Caractéristiques géométriques des routes	Nehaoua Adel, Département de Génie civil - Faculté : TECHNOLOGIE-U.F.A.S
Cours d'hydraulique routière	Enseignant-Chercheur au laboratoire Eau Dépollution Ecosystème et Santé (LEDES)

Règlements

FASCICULE N° 61 : conception, calcul et épreuves des ouvrages d'art

PP 73 Piles et palées, appuis des tabliers

Sites WEB

<https://knowledge.autodesk.com/>
<https://www.cadlearning.com/>