

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
فرنسيس جانسون

École Nationale Supérieure des Travaux Publics

Francis Jeanson



Mémoire

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Infrastructures de Base

Thème

Analyse de la vulnérabilité (Inondations & Glissements de terrain) de la 2eme rocade sud d'Alger (lot ouest) en utilisant les outils BIM-SIG.

Présenté par :

M. Akram OMARI

Mme. Fedoua Nadia REFIK

Encadré par :

M. Rafik HEBIB

M. Mohand BERSSI

Promotion 2021 /2022

Remerciements

*Au terme de ce travail, nous souhaitons remercier en premier lieu notre encadrant Monsieur **Rafik Hebib** pour son soutien, ses conseils précieux, son encouragement et surtout de nous avoir dirigés vers ce thème de mémoire qui était en totale adéquation avec nos attentes.*

*Nous tenons à remercier particulièrement notre co-encadrant Monsieur **Mohand Berssi** pour toutes explications relatives à la télédétection et la gestion des inondations.*

*Ensuite nous sommes parfaitement reconnaissants envers l'organisme d'accueil l'Algérienne **Des Autoroutes** et à notre maitre de stage **Monsieur Haimen** pour sa disponibilité et sa générosité infinie et de nous avoir fournis tous les documents nécessaires. Nous tenons à le remercier de nous avoir fait bénéficier de son expérience et de ses précieux conseils.*

*Nous ne saurons manquer d'exprimer notre gratitude à Monsieur **Kermiche Abdellatif**, qui nous a introduit au concept Scan To BIM.*

*Nous remercions le professeur **Zohra Derriche**, directrice du laboratoire de recherche de l'ENSTP, pour son aide et ses précieux conseils.*

*Nous remercions Monsieur **Rabah Morsli** pour ses explications et son aide dans les cas pratiques de ce travail.*

*Nous remercions Monsieur **Douadi Rahmani** Pour ses explications sur les méthodes de déviation des oueds.*

*Nous remercions L'Agence Nationale des **Ressources Hydraulique** pour les données relatives aux écoulements dans les zones inondables.*

Nous remercions L'Agence Spatiale Algérienne pour les images satellitaires relatives aux évènements climatiques extrêmes

Et enfin, nous souhaitons adresser nos remerciements à toute personne contribuant de près ou de loin à la perfection de ce mémoire.

Dédicace

A ma mère,

Ma très chère maman, je te dédie ce travail en espérant qu'il soit l'exaucement de tes vœux, je ne saurais te remercier assez pour tout ce que tu as fait et tu continues de faire pour nous. Sache maman que je ferai tout pour te rendre fière et honorer tes sacrifices et je consacrerai ma vie à t'apporter bonheur. Puisse dieu t'accorder santé et longue vie.

A mon père,

Tu as toujours été pour moi un exemple à suivre que ce modeste travail soit le symbole de ma gratitude et mon affection infinie. Que dieu te préserve papa et te procure longue vie et bonheur.

A mes sœurs Ikhlal et Chourouk et mon frère Ahmed,

A mon pote Malek Mehdi qui m'a prêté son Pc lors de ce PFE,

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans toi.

A Monsieur Soufiane Gassis,

Vous avez été un enseignant très cher, et vous êtes un ami encore plus cher. Merci de m'avoir ouvert au concept du BIM et de m'avoir donné la chance de connaître plusieurs experts dans le domaine, ce travail est dédié à vous.

A Monsieur Kamel Hamadi,

Vous avez été un enseignant qui m'a marqué et un grand frère qui a toujours été là pour moi avec vos conseils et votre disponibilité, Merci pour tout.

A Monsieur Rabah Morsli,

Vous êtes un enseignant exceptionnel qui m'a toujours poussé à me donner à fond, je n'aurais jamais été le même si ce n'était pas pour vous.

A mon binôme Fedoua,

Merci de m'avoir supporté le long de ce travail, c'était une expérience exceptionnelle.

A la douce mémoire de ma grand-mère angélique.

Akram.

Dédicace

Je dédie ce travail,

A ma mère, Pour tout ce qu'elle a fait, et continue de faire pour moi, pour son soutien, ses constants encouragements et ses sacrifices, sans lesquels je ne serais jamais devenue la personne qui je suis aujourd'hui.

A mon père, qui n'a jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de m'épauler et de subvenir à tous mes besoins et plus, sans toi je ne serai jamais arrivée là. Que dieu vous garde pour moi.

A ma sœur, Sarah et mes frères, Ibrahim, youcef et Akram, mes compagnons éternels, merci pour le bonheur que vous m'apportez en votre compagnie et de me supporter durant mes moments difficiles.

A toute ma famille qui me comble d'amour et de soutien.

A la mémoire de ma grand-mère paternelle qui est partie avant de me voir devenir ce qu'elle souhaitait le plus pour moi.

Et finalement je voudrais remercier mon binôme Akram Omari infiniment, pour ce travail, que sans lui il n'aurait jamais vu le jour, je te remercie pour tous tes efforts, ton dévouement, ton ouverture d'esprit, ta motivation, ta patience envers moi et pour cette expérience tellement enrichissante et mémorable, je te souhaite un avenir aussi brillant que toi.

Fedoua.

Résumé

Le présent mémoire se porte sur l'analyse de la vulnérabilité de la deuxième rocade sud d'Alger vis-à-vis des inondations et glissements de terrain en utilisant les outils BIM et SIG qui permettront une meilleure gestion des risques induits par ces aléas.

Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel Autodesk INFRAWORKS et CIVIL 3D pour la création d'un jumeau numérique 3D, le logiciel ArcGIS pour la cartographie des aléas et le logiciel HEC-RAS pour la modélisation hydraulique des inondations.

Mots clés : Vulnérabilité, Aléa, Risque, Inondation, Mouvement de terrain, Cartographie, BIM, SIG, Jumeau numérique, Route.

Abstract

The focus of this thesis is the analysis of flood and landslide vulnerability in the second southern ring road of Algiers by using BIM and GIS tools that will allow better management of risks induced by these hazards.

To this end, we have used Autodesk INFRAWORKS and CIVIL 3D software for the creation of a 3D digital twin, ArcGIS software for hazard mapping and HEC-RAS software for hydraulic flood modeling.

Key words: Vulnerability, Hazard, Risk, Flood, Landslide, Cartography, BIM, GIS, Digital Twin, Road.

ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة وتحليل الضعف بالنسبة لمخاطر الفيضانات وانجراف التربة على مستوى الطريق الاجتيابي الثاني للجزائر العاصمة باستعمال تقنيات BIM و GIS التي ستسمح بإدارة أفضل للخطر الناتج عن هاته المخاطر.

من أجل هذا، قمنا باستخدام برامج Autodesk INFRAWORKS و CIVIL 3D لإنشاء توأم رقمي ثلاثي الأبعاد و برنامج ArcGIS لرسم خرائط المخاطر و كذا برنامج HEC-RAS من أجل النمذجة الهيدروليكية للفيضانات . كلمات مفتاحية: الضعف، الخطر، المخاطر، الفيضانات، الانهيارات الأرضية، رسم الخرائط، التوأم الرقمي، الطريق

Liste des figures

Figure 1: Images satellitaires de la zone d'Alger ouest en 2006 (a) et en 2021 (b).	1
Figure 2: Routes inondées dans la wilaya d'Alger 2021, source : Aps.dz.	2
Figure 3: Glissement de terrain CW133 Draria, Alger 2021, source : Echoroukonline.com. ..	3
Figure 4: Glissement de terrain au niveau de la station de transport à Bir Mourad Rais, Alger 2021, source : Algérie-focus.com.	4
Figure I-1: Schéma expliquant la relation entre l'aléa, la vulnérabilité et le risque.	9
Figure I-2: Classification des aléas en fonction de leur répartition spatio-temporelle.	12
Figure I-1: Localisation du tronçon étudié dans le nord algérien.	30
Figure I-2: Carte géologique de la zone d'étude.	32
Figure I-3: Légende de la carte géologique.	32
Figure I-4: Carte des pentes dans la zone d'étude.	33
Figure I-5: Carte des altitudes de la zone d'étude.	34
Figure I-6: Carte hydrologique de la wilaya d'Alger (SETS).	35
Figure I-7: Classification des zones climatiques en Algérie.	37
Figure I-8: Carte pluviométrique de la zone d'étude -ANRH-.	38
Figure I-9: Diagramme ombrothermique de Bagnols et Gaussen.	40
Figure I-10: Climagramme D'EMBERGER.	42
Figure I-11: Les étages bioclimatiques de l'Algérie.	42
Figure I-12: Implantation des sondages.	43
Figure I-13: Classe granulaire des sols de la zone d'étude.	47
Figure III-1: Flux de travail BIM-SIG.	50
Figure III-2: Délimitation de la zone pour créer le modèle.	51
Figure III-3: Maquette numérique préliminaire.	52
Figure III-4: Création du MNT.	53
Figure III-5: Levé topographique.	54
Figure III-6: Création des cours d'eau, vu sur le barrage de Douera.	55
Figure III-7: Le réseau routier existant.	56
Figure III-8: Création des bâtiments, vu sur la ville de Baba-hassen.	57
Figure IV-1: Import des données de la maquette dans Civil 3D.	61
Figure IV-2: Export du tracé en plan.	62

Figure IV-3: Tracé recréé.....	63
Figure IV-4: Exemple illustratif du calcul du profil en long.	64
Figure IV-5: Profil en Long.	65
Figure IV-6: Profil en travers recréé.	66
Figure IV-7: Import des éléments de la route à INFRAWORKS.	67
Figure IV-8: Route importée sur INFRAWORKS.	68
Figure IV-9: Actualisation de la géométrie.....	69
Figure IV-10: Détermination des emplacements des piles de ponts.	70
Figure IV-11: Interface de l'application ArcGIS Collector.	71
Figure IV-12: Création des ouvrages d'art.	72
Figure IV-13: Création des ouvrages d'assainissement transversal.....	73
Figure IV-14: Les fossés et les fossés de crête.	74
Figure IV-15: Collecteur centrale des eaux infiltrées.	74
Figure IV-16: Barrière de sécurité.	75
Figure IV-17: Plaque de signalisation.....	75
Figure IV-18: Vérification du tracé en plan par Civil 3D.....	78
Figure IV-19: Rapport de la vérification du tracé.....	79
Figure IV-20: Détection des anomalies.	80
Figure IV-21: Vérification du profil en long par Civil 3D.	80
Figure IV-22: Vérification de la distance de visibilité au niveau de l'échangeur avec la première rocade sud.	81
Figure IV-23: Simulation du trafic au niveau de l'échangeur avec la première rocade sud...	82
Figure V-1: Susceptibilité aux glissements de terrain selon la lithologie.	87
Figure V-2: Niveau de susceptibilité selon le pendage.	88
Figure V-3: Niveau de susceptibilité selon le degré des pentes.....	89
Figure V-4: Niveau de susceptibilité selon la distance aux cours d'eau.	90
Figure V-5: Niveau de susceptibilité selon le taux de végétation.	91
Figure V-6: Classification de Terzaghi des sols selon le SPT.	91
Figure V-7: Niveau de susceptibilité selon l'état de compacité.....	92
Figure V-8: Niveau de susceptibilité selon la plasticité des sols.	93
Figure V-9: Niveau de susceptibilité aux inondations selon la lithologie.	94
Figure V-10: Niveau de susceptibilité aux inondations selon le degré des pentes.	95
Figure V-11: Niveau de susceptibilité aux inondations selon le TWI.	96
Figure V-12: Niveau de susceptibilité aux inondations selon la distance aux cours d'eau. ...	97

Figure V-13 : Niveau de susceptibilité aux inondations selon le taux de végétation.....	98
Figure V-14: Classification GTR des sols.	98
Figure V-15: Niveau de susceptibilité selon la classe granulaire.	99
Figure V-16: Carte de susceptibilité aux glissements de terrain issue de la méthode AHP.	105
Figure V-17: Carte de susceptibilité aux glissements de terrain issue de la méthode experte.	106
Figure V-18: Carte de susceptibilité aux inondations issue de la méthode AHP.....	110
Figure V-19: Carte de susceptibilité aux inondations issue de la méthode experte.	111
Figure V-20: Niveau de susceptibilité élevé au niveau de l'autoroute.	112
Figure V-21: Visualisation du risque de glissement sur INFRAWORKS.	113
Figure VI-1: Représentation d'un cours d'eau par un modèle monodimensionnel (Roux, 2004).....	117
Figure VI-2: Variables hydrauliques intervenant dans les équations de Saint-Venant 1D. (a) profil en travers, (b) profil en long.	118
Figure VI-3: Lignes médianes du flux.	120
Figure VI-4: Lignes de rive.....	121
Figure VI-5: Ligne du chemin d'écoulement.....	122
Figure VI-6: Lignes de coupe transversales.....	123
Figure VI-7: Coupe transversale sur l'oued.....	124
Figure VI-8: Map Gis-Ras.	125
Figure VI-9: Tableau des rugosités de Manning.....	126
Figure VI-10: Attribution du coefficient de Manning à chaque branche de l'écoulement. ..	127
Figure VI-11: Insertion des débits d'écoulements.	128
Figure VI-12: Carte importée GIS RAS.	128
Figure VI-13: TIN de la surface d'eau.....	129
Figure VI-14: Plaine inondable.....	129
Figure VI-15: Carte des inondations dans la 2ème rocade sud d'Alger.	130
Figure VI-16: Détermination des élévations de la surface d'eau.....	131
Figure VI-17: Import des zones inondables à Civil 3D.	131
Figure VI-18: Image satellitaire prise le 16/11/2021.	133
Figure VI-19: Image satellitaire prise le 06/11/2021.	134
Figure VII-1: Points noirs en termes de glissements de terrain.....	136
Figure VII-2: Localisation de la zone d'instabilité sur la maquette numérique.	137
Figure VII-3: Localisation du talus, mai 2022.....	138

Figure VII-4: Apparition des fissures avec ordre de grandeur, mai 2022.	138
Figure VII-5: Inclinaison des arbres sur talus, mai 2022.....	139
Figure VII-6: Etat actuel du fossé de crête, mai 2022.	140
Figure VII-7: Localisation de la zone d'instabilité -2- sur la maquette numérique.....	141
Figure VII-8: Talus soutenu, mai 2022.....	142
Figure VII-9: Localisation de la zone d'instabilité -3- sur la maquette numérique.....	143
Figure VII-10: Etat du talus en place, mai 2022.....	144
Figure VII-11: Fossé complètement bloqué par les dépôts de solide.	145
Figure VII-12: Ordre de grandeur des fossés de crête.	146
Figure VII-13: Dysfonctionnement des ouvrages d'assainissement longitudinal, mai 2022.	147
Figure VII-14: Bassin de décantation entièrement bouché, mai 2022.....	148
Figure VII-15: Localisation de la cité sur la maquette numérique.	149
Figure VII-16: Inondation de la cité AADL plateau sud le 23 Octobre 2021.	150
Figure VII-17 : Glissement de terrain en périphérie du bloc 07, 2022.	150
Figure VII-18: Indices d'instabilité sur le versant du côté aval de la cité, mai 2022.	151
Figure VII-19: Dépôts solides qui bloquent l'OH 13-3, mai 2022.....	151
Figure VII-20 : Image satellitaire montrant le dérangement d'Oued Zitouni par les nouvelles constructions.....	152
Figure VII-21 : OH 13-3 Coté amont.	153
Figure VII-22 : Vérification de la stabilité du versant en utilisant les données du sondage.	154
Figure VII-23: Résultats de l'analyse inverse.	155
Figure VII-24: Vérification de la stabilité après l'analyse inverse des propriétés.....	156
Figure VII-25 : Calcul des facteurs de sécurité pour les angles de réduction 1°, 2° et 7°..	157
Figure VII-26 : Facteur de sécurité en fonction de l'angle de réduction.....	158
Figure VII-27: Vérification de la stabilité après reprofilage du terrain.....	158
Figure VII-28 : vérification de la stabilité pseudo-statique du versant après reprofilage.....	159

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Outils utilisés dans la réalisation du projet.	6
Tableau I-1: Précipitations moyennes mensuelles entre 1982 et 2012.	38
Tableau I-2: Températures moyennes dans la région d'Alger d'étude pondant 1982/2012....	39
Tableau I-3: Résultats des essais laboratoire des échantillons.	45
Tableau V-1: Facteurs influençant les inondations dans les études précédentes.	85
Tableau V-2: Facteurs influençant les glissements de terrains dans les études précédentes. .	85
Tableau V-3: Interprétation des résultats de l'indice de plasticité.	93
Tableau V-4: Intensité d'importance des facteurs en AHP.....	100
Tableau V-5: Valeurs de l'indice aléatoire en fonction du nombre de critère.	102
Tableau V-6: Matrice de comparaison par paires des facteurs influençant les glissements de terrain.	102
Tableau V-7: Matrice de comparaison normalisée.	103
Tableau V-8: Coefficients de pondération pour les facteurs influençant les glissements de terrain.	104
Tableau V-9: Matrice de comparaison par paires des facteurs influençant les inondations.	107
Tableau V-10: Matrice de comparaison normalisée.	108
Tableau V-11: Coefficients de pondération pour les facteurs influençant les inondations. .	109
Tableau VI-1: Vérification des Zones inondables.	132
Tableau VII-1: Tableau récapitulatif des caractéristiques du sol en place.	153
Tableau VII-2: Analyse inverse des propriétés du sol.....	155
Tableau VII-3 : Tableau récapitulatif des vérifications de stabilité.	160

Nomenclature

BIM	Building Information Modeling
SIG	Système d'information géographique
CIM	City Information Modeling
WSW-ENE	West South West – East North East
GTR	Guide des Terrassements Routiers
AIC	Architecture, Ingénierie, Construction
IFC	Industry Foundation Classes
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
LOD	Levels Of Detail
DOE	Dossier d'Ouvrage Exécuté
APD	Avant-Projet Détaillé
APS	Avant-Projet Sommaire
BTPH	Batiments Travaux Publics Hydraulique
ICTAAL	Instructions sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison.
ARP	Aménagement des Routes Principales
ECM	Méthodes d'Evaluation Multicritères
SPT	Standard Penetration Test
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index

Ip	Indice de Plasticité
TWI	Topography Wetness Index
AHP	Analytic Hierarchy Process
OH	Ouvrage Hydraulique
OA	Ouvrage d'Art
PK	Point Kilométrique
CCT	Centre Canadien de Télédétection
PS	Passage Supérieur

Table des matières

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralités	8
I.1 Risque : aléa et vulnérabilité	9
I.1.1 L'aléa	9
I.1.2 La vulnérabilité	9
I.1.3 Les composantes du risque	10
I.2 Mouvements de terrain	13
I.2.1 Typologie et facteurs d'apparition	13
I.2.2 Les mouvements à évolution lente et continue	15
I.2.3 Les mouvements à évolution rapide et discontinue	17
I.2.4 Les phénomènes induits par les mouvements de terrain.....	19
I.3 Inondations.....	21
I.3.1 Les inondations d'origine non climatique.....	21
I.3.2 Les inondations d'origine pluviale.....	22
I.3.3 Méthodes et sources pour la caractérisation de l'aléa « inondation ».....	23
I.3.4 Typologie des inondations d'origine climatique.....	26
Chapitre II :	29
Présentation de la deuxième rocade sud d'Alger.	29
II.1 Cadre général.....	30
II.2 Contexte géomorphologique.....	31
II.2.1 Géologie.....	31
II.2.2 Pentes et altitudes	33
II.2.3 Hydrographie	35
II.3 Contexte climatique	36
II.3.1 Précipitations	37
II.3.2 Températures	38
II.3.3 Classification climatique	39
II.4 Contexte Géotechnique.....	43
Chapitre III : Création du modèle BIM de la zone d'étude	49

III.1 Flux de travail.....	50
III.2 La création du modèle	51
III.2.1 Acquisition des données	52
III.2.2 Les cours d'eau naturel	55
III.2.3 Le réseau routier	56
III.2.4 Les bâtiments.....	57
III.2.5 Les parcelles	57
III.3 City Information Modeling CIM.....	58
Chapitre IV : Conception détaillée et vérification géométrique de l'infrastructure routière.	59
IV.1 Introduction	60
IV.2 Un facteur clé	60
IV.3 Conception de la géométrie du tronçon	60
IV.3.1 Recréation du tracé en plan	61
IV.4 Import de la route à INFRAWORKS.....	67
IV.5 Création des ouvrages d'art.....	69
IV.6 Assainissement et ouvrages hydrauliques.....	73
IV.6.1 Ouvrages d'assainissement transversal	73
IV.6.2 Ouvrages d'assainissement longitudinal	74
IV.7 Installations et équipements routiers.....	75
IV.8 Vérification géométrique de l'infrastructure routière	76
IV.8.1 Norme applicable au projet	76
IV.8.2 Choix de la catégorie de la route.....	77
IV.8.3 Application au projet.....	78
IV.9 Pourquoi la vérification de la géométrie ?	80
IV.10 Le rôle du BIM dans la modernisation des normes de conception	81
IV.10.1 Vérifications des distances de visibilité	81
IV.10.2 Les simulations du trafic routier	81
IV.11 Conclusion	82
Chapitre V : Analyse multicritère de susceptibilité.	83
V.1 Introduction	84
V.2 Détermination des facteurs objet de l'analyse.....	84
V.2.1 Facteurs déterminés à partir des études précédentes	84
V.2.2 Facteurs que nous avons jugé nécessaire.....	86

V.3 Traitement des facteurs	86
V.3.1 Facteurs influençant les glissements de terrain	86
V.3.2 Facteurs influençant les glissements de terrain	94
V.4 Cartographie des aléas.....	99
V.4.1 Méthodes de prise de décision.....	99
V.5 Expression des résultats.....	102
V.5.1 Cartographie de l'aléa glissements de terrain.....	102
V.5.2 Cartographie de l'aléa inondations	107
V.6 Interprétation des résultats.....	112
V.6.1 Le BIM instrument de mesure de la vulnérabilité	113
V.7 Conclusion.....	114
Chapitre VI : La modélisation hydraulique des inondations dans la zone d'étude. ..	115
VI.1 Introduction	116
VI.2 Le concept de modèle hydraulique	116
VI.2.1 Les modèles monodimensionnels (1D).....	117
VI.3 Modélisation monodimensionnelle des inondations avec HEC-GeoRAS	119
VI.3.1 Tâches principales.....	119
VI.3.2 Processus préliminaire	120
VI.3.3 Analyse hydraulique HEC-RAS	125
VI.3.4 Processus final.....	128
VI.4 Interprétation des résultats	131
VI.5 Conclusion	133
Chapitre VII : Validation des Modèles et vérification des points noirs.	135
VII.1 Introduction.....	136
VII.2 Vérifications des points noirs en termes de glissement de terrain.....	136
VII.2.1 Echangeur Sidi-Abdellah Pk 15+850	137
VII.2.2 Cité Mohamed Bessaiah, Douera	141
VII.2.3 Cité AADL 2 OULED FAYET	143
VII.3 Vérifications des points noirs en termes d'inondations.....	145
VII.4 Problème de la cité AADL plateau sud Ouled Fayet.....	149
VII.4.1 Description des pathologies	150
VII.4.2 Causes probables	152
VII.4.3 Vérification de la stabilité du versant	153

VII.4.4 Solution du traitement.....	156
VII.4.5 Vérification de la stabilité du versant après l'application de la solution.....	157
VII.4.6 Phasage des travaux.....	160
VII.5 Conclusion	160
Conclusion Générale	161
Références Bibliographiques.....	164
ANNEXE 1	168
Tracé en plan et profil en long	168
ANNEXE 2	182
Profil en travers type	182
ANNEXE 3	185
Plan d'assainissement.....	185
ANNEXE 4	195
Généralité sur le BIM pour les infrastructures linéaires.	195

Introduction Générale

Contexte de l'étude et problématique adressée :

Les infrastructures linéaires telles que les routes autoroutes ou lignes de chemins de fer, présentent souvent des difficultés pour les ingénieurs que cela soit dans les stades d'étude et de réalisation ou dans la phase d'exploitation de ces ouvrages. Ces difficultés découlent principalement des vastes espaces qu'occupe ce type d'infrastructures lorsque ces espaces présentent des susceptibilités avérées vis-à-vis des aléas naturels. Les ingénieurs doivent relever le défi de protéger ces infrastructures des catastrophes naturelles dues à la mauvaise insertion de ces infrastructures dans leur environnement.

Les ingénieurs concepteurs se concentrent uniquement sur les conditions présentes dans l'emprise même du projet et considèrent très peu les interactions qui peuvent se produire dans le territoire dans lequel s'inscrit l'infrastructure (son environnement). Au-delà de l'emprise de l'infrastructure, l'environnement est susceptible de changer de caractéristiques en fonction du programme de développement qui va suivre la réalisation de ces infrastructures et ces changements pourraient affecter négativement la stabilité de l'infrastructure en phase d'exploitation.

Pour illustrer le propos, on présente la figure I-1 qui montre l'immense changement environnemental qui s'est opéré dans la zone d'Alger ouest. On peut voir qu'à gauche, avant la réalisation de la deuxième rocade sud d'Alger et à droite treize ans et après que le taux de couverture végétation qui était très élevée a diminué avec les installations des constructions de part et d'autre du tronçon routier. On remarque aussi qu'un nouveau barrage a été construit (le barrage de Douera). Force est de constater que 13 ans après la réalisation de l'infrastructure ces changements vont imposer un environnement différent aux abords de l'infrastructure considérée



Figure 1: Images satellitaires de la zone d'Alger ouest en 2006 (a) et en 2021 (b).

Introduction Générale

La résilience des territoires dépend fortement de la projection future des caractéristiques de l'environnement d'insertion des ouvrages et non seulement de celles présentes lors de la réalisation de ces derniers. La négligence de ces facteurs pourrait donner naissance à plusieurs catastrophes naturelles telles que les inondations et les glissements de terrains

En Algérie, les deux dernières décennies ont connu une augmentation remarquable dans la fréquence des inondations. En novembre dernier, des inondations aux abords des routes et des autoroutes de la Wilaya d'Alger ont marqué les esprits et ont soulevé des questions sur les causes de ces catastrophes naturelles et comment on pourrait les éviter (figure 2).



Figure 2: Routes inondées dans la wilaya d'Alger 2021, source : Aps.dz.

Quelques jours après des mouvements de terrain ont été déclenchés, dont un glissement de terrain remarquable au niveau du chemin de wilaya n°133 au niveau de la circonscription administrative de Draria. La route a été provisoirement fermée en vue du danger qu'il constitue pour les utilisateurs de cette dernière (Figure 3).

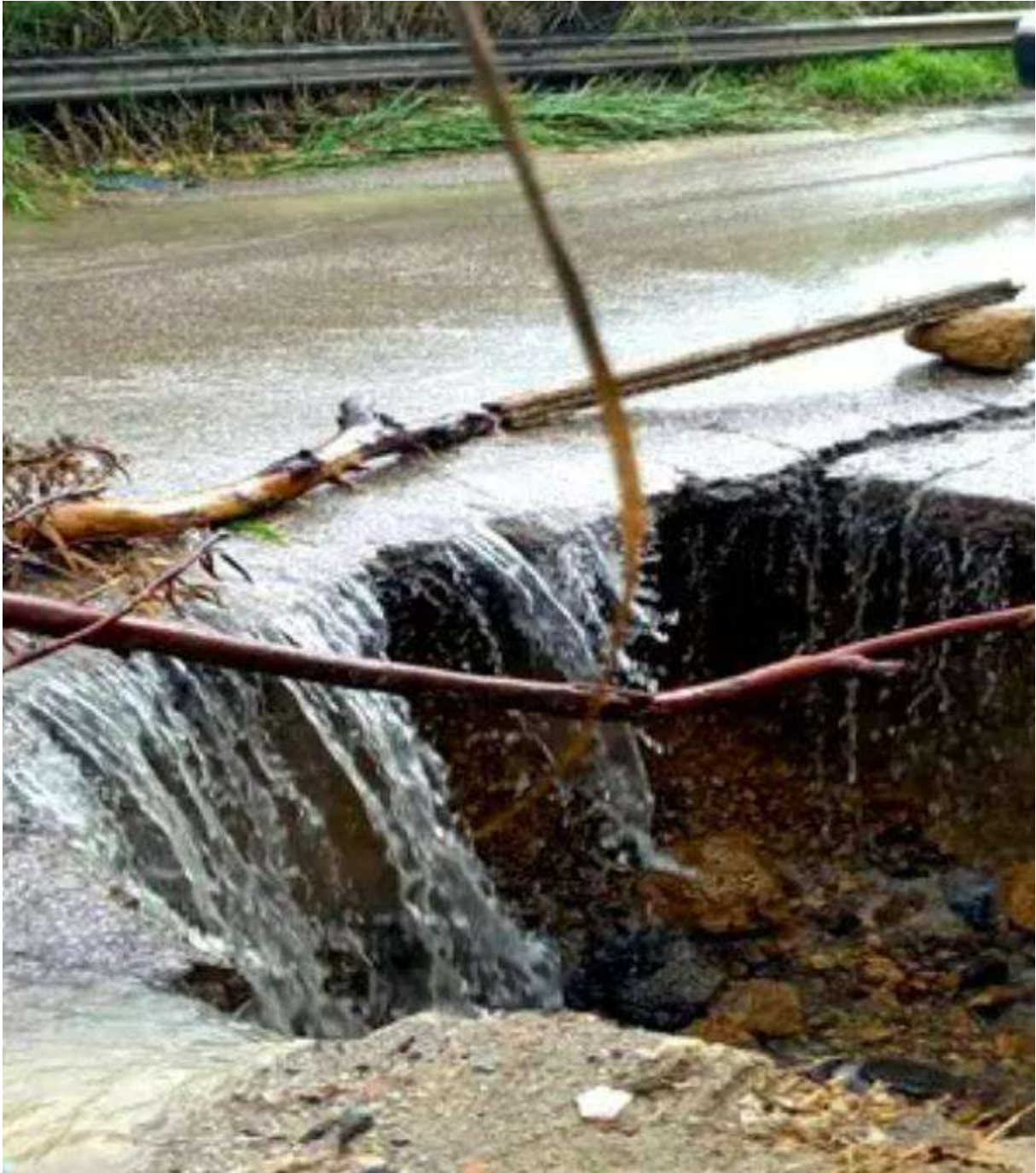


Figure 3: Glissement de terrain CW133 Draria, Alger 2021, source : Echoroukonline.com.

Introduction Générale

Un autre glissement de terrain a induit la fermeture provisoire de la station de transport des voyageurs à Bir Mourad Rais dans la même semaine.



Figure 4: Glissement de terrain au niveau de la station de transport à Bir Mourad Rais, Alger 2021, source : Algérie-focus.com.

Face à la situation décrite ci-dessus, l'ingénieur en Travaux Publics est appelé aujourd'hui à aller au-delà de la conception classique des ouvrages et des infrastructures. Il est appelé à

Introduction Générale

étudier l'infrastructure insérée dans son environnement et à intégrer les plans d'aménagement du territoire de l'infrastructure ainsi que les caractéristiques futures de cet environnement lors des études préliminaires et de conception de ces dernières.

Une des forces du Building Information Modeling se manifeste par la possibilité qu'il offre de faire la planification des ouvrages tout en prenant compte des conséquences de cette dernière sur la phase exploitation. L'intersection des outils du BIM avec ceux du système d'information géographique SIG permettra de faire cette planification en prenant compte de l'environnement d'insertion de ouvrages des infrastructures linéaires.

Travail réalisé :

Dans le cadre de ce mémoire nous avons considéré le cas d'une infrastructure routière : la deuxième rocade sud d'Alger que nous avons analysée pour sa vulnérabilité aux aléas inondations et glissement de terrain tels que imposés l'environnement de l'infrastructure.

Pour faire le travail nous avons utilisé les outils BIM alliés à ceux du SIG. Nous avons d'abord développé une maquette numérique du tronçon de la 2RSA. Cette maquette a pour but de représenter toutes les caractéristiques du milieu de la zone étudiée.

Par la suite nous avons réalisé une analyse multicritère de susceptibilité d'occurrence des aléas étudiés en fonctions des facteurs qui peuvent déclencher ou aggraver l'un des aléas pour enfin parvenir à cartographier les aléas pour pouvoir définir les zones à susceptibilité élevée.

Nous avons ensuite procédé à projeter ces cartes sur la maquette numérique pour pouvoir évaluer les risques en fonction des aléas et de la vulnérabilité.

Par la suite nous nous sommes intéressés à la modélisation hydraulique des zones inondables pour pouvoir mesurer les élévations des niveaux d'eaux lors des événements climatiques extrêmes.

À base de la maquette numérique réalisée nous avons commencé des investigations sur terrain afin de valider les modèles développés et de vérifier les points noirs en termes d'inondations et de glissement de terrain pour pouvoir proposer des solutions à ces problèmes.

Organisation du mémoire

Le travail réalisé a été présenté dans un mémoire est organisé comme suit :

Le chapitre 1 présente des généralités sur les aléas et la vulnérabilité et des caractéristiques des aléas inondations et mouvements de terrain.

Le chapitre 2 est dédié à la présentation de la deuxième rocade sud d'Alger et des principales caractéristiques de son environnement d'insertion.

Introduction Générale

Le chapitre 3 est dédié à la création de la maquette numérique BIM, tout en se basant sur des données SIG.

Le chapitre 4 comporte une conception détaillée pour créer un jumeau numérique du tronçon qui répond aux besoins de la thématique, à la fin de chapitre nous allons vérifier les caractéristiques géométriques de cette infrastructure routière.

Le chapitre 5 traite une analyse multicritère de susceptibilité de l'occurrence des deux aléas, et la mise en carte de ces derniers.

Le chapitre 6 présente une modélisation hydraulique des inondations pour pouvoir déterminer les niveaux d'élévation des eaux dans les zones inondables.

Le chapitre 7 traite la validation des modèles réalisés et la vérification des points noirs en termes d'inondations et des glissements de terrain, pour pouvoir proposer des solutions à ces problèmes.

Outils BIM et SIG utilisés

Les outils utilisés dans ce travail sont résumés dans le tableau 1.

Tableau I-1 : Outils utilisés dans la réalisation du projet.

Outils	Développeur	Taches
Infraworks 2021	Autodesk	- Création de la maquette numérique BIM à base de données SIG.
CIVIL 3D 2021	Autodesk	- La conception détaillée du tronçon étudié pour la création du jumeau numérique.
ArcGIS desktop 10.8.2	ESRI	- La cartographie des facteurs influençant les aléas. - Traitement des facteurs et cartographies de la susceptibilité.
HEC-RAS 6.2 (HEC-GEO-RAS)	- US Corps of engineers. - ESRI	- La modélisation hydraulique des inondations.

ENVI 5.3	Exelis Visual Information Solutions	- Traitement des images satellitaires. - Indice de végétation NDVI. - Indice d'humidité topographique TWI.
Global Mapper V20	Blue Marble Geographics	- Création du modèle numérique de terrain MNT. - Création des cours d'eau naturel.
Slide V6	Rocscience	- Analyse inverse des propriétés des matériaux - Vérification de la stabilité du versant avant et après l'application de la solution.

Chapitre I : Généralités

I.1 Risque : aléa et vulnérabilité

La notion de risque est communément définie comme la combinaison de deux composantes qui sont l'aléa et la vulnérabilité [1], [2], [3]. En effet, d'après [4]:

« Il n'y a pas de risque sans aléa naturel, il n'y en a pas sans élément vulnérable exposé » [5].

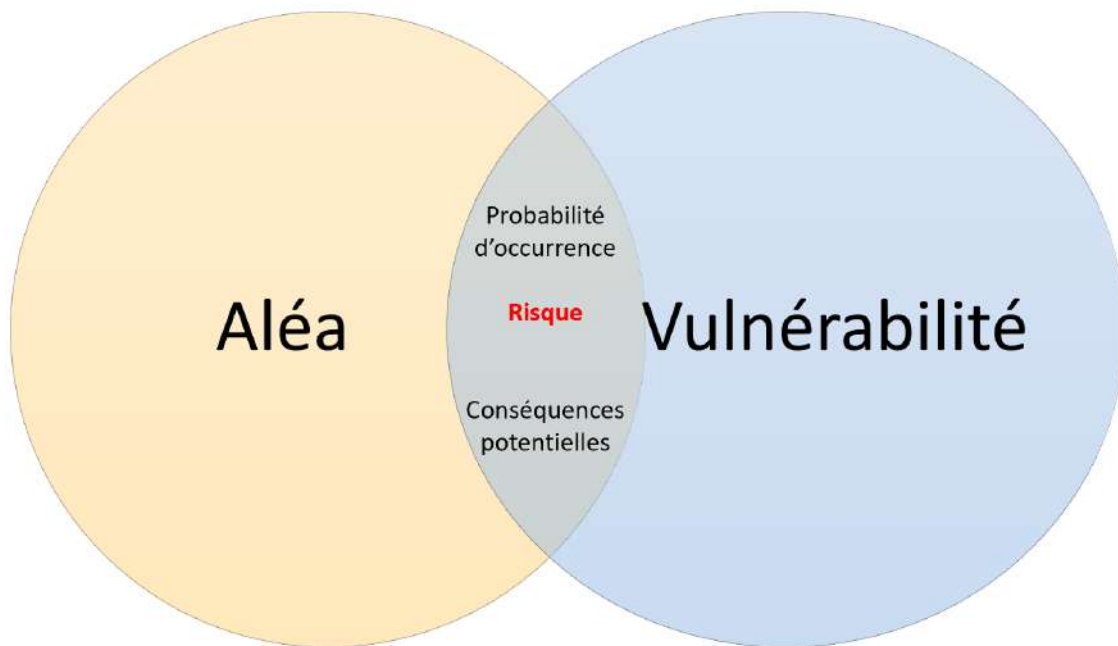


Figure I-1: Schéma expliquant la relation entre l'aléa, la vulnérabilité et le risque.

I.1.1 L'aléa

L'aléa est un phénomène physique, naturel et non maîtrisable, d'occurrence et d'intensité données. Il peut être caractérisé suivant deux composantes, l'une fréquentielle (occurrence), l'autre spatio-temporelle (intensité) [5].

I.1.2 La vulnérabilité

La vulnérabilité exprime l'importance des dommages potentiellement subits par des enjeux soumis à un aléa d'intensité donnée. La notion d'enjeu intègre les personnes, les biens et les activités susceptibles d'être affectés par l'aléa.

Les conséquences de l'aléa sur des enjeux peuvent être bénéfiques (recharge de nappes phréatiques, alimentation des terres agricoles en limon...) ou néfastes (destruction d'habitats, mort de personnes, coupures de voies de communication...). La notion de vulnérabilité concerne les conséquences néfastes, c'est à dire les dommages. Ces derniers peuvent être de plusieurs natures [6]:

- pertes en vies humaines et effets sur la santé des personnes,
- dégâts matériels,
- impacts liés aux difficultés de fonctionnement, d'échange, et de communication (qualifiés d'impacts indirects) [5].

I.1.3 Les composantes du risque

I.1.3.1 Les aléas naturels et leur caractérisation

➤ Des phénomènes aléatoires

Au sens commun on définit par aléa naturel (danger et menace) tout phénomène d'origine naturel potentiellement dommageable. Dans cette partie notre attention se porte sur les phénomènes à cinétiques rapides et aux effets particulièrement catastrophiques en matière de vie humaine, de pertes matérielles et de dysfonctionnements divers. Les principaux aléas connus sur terre ont une origine soit hydro climatique (inondations et cyclones), soit géodynamique externe tels que les glissements de terrain on peut également ajouter ceux d'origine extraterrestre avec les impacts de météorites. [7]

➤ La notion de magnitude

La notion de magnitude permet d'évaluer la puissance du phénomène au moyen de paramètres physiques généralement indépendants et mesurables. Suivant les échelles utilisées et les phénomènes considérés, il s'agit de paramètres énergétiques (énergie libérée), cinématiques (vitesse, accélération) et parfois géométrique (volume, hauteur, ampleur) [7].

➤ L'intensité des dommages

C'est une notion importante qui décrit les effets constatés ou potentiels d'un phénomène sur différentes catégories d'éléments exposés. Le critère le plus souvent utilisé pour construire les échelles d'intensité est le niveau et la description des dommages sur les bâtiments. On recense au moins 24 échelles de ce type pouvant aller jusqu'à 12 degrés. Ces échelles sont plus ou moins élaborées suivant les distinctions apportées au niveau des classes de bâtiments retenues et les modes d'endommagement associés. Les plus aboutis, après des années d'observation sur le terrain, sont sans test les échelles d'intensité macrosismique. À titre d'exemple, l'échelle européenne EMS 98 (european macroseismic scale) comporte 12 degrés définis à partir d'une description des dommages croissants pour 6 classes de bâtiments différents. Des

échelles équivalentes, mais moins connues ou encore expérimental, ça existe aussi pour les tsunamis, les vents forts, les mouvements de terrain ou les éruptions volcaniques [7].

I.1.3.2 L'extension spatiale et les effets induits

La composante spatiale de l'aléa correspond à l'extension des effets associés au phénomène. La figure I-2, permet de distinguer les principaux aléas naturels en fonction de leur extension spatiale maximale connue et de leur durée d'action moyenne. Ces effets peuvent être cantonnés à un lit majeur pour une inondation, ou bien s'étendre bien au-delà de la zone d'action du phénomène principal par le biais des différents dynamiques de déplacements et d'effets en chaînes. Par exemple, l'arrivée en mer d'un écroulement rocheux peut être précédée d'un effet de souffle et suivi d'un tsunami, ce qui accroît considérablement la zone des dommages. Les pires catastrophes connues en termes de superficies touchées ont été déclenchées par des éruptions volcaniques relayées par des tsunamis ou des émissions massives de gaz et de cendres dans la troposphère. Ce fût le cas avec l'explosion du volcan Krakatoa en 1883 dans le détroit de la Sonde (Indonésie), suivie d'un tsunami, ou bien des retombées de cendres et aérosols à des milliers de kilomètres du volcan émetteur lors d'éruptions pliniennes majeures (Tambora en 1815 en Indonésie). L'exemple le plus fameux est celui de la détérioration climatique induite en Grande-Bretagne et en Europe par l'éruption du volcan Laki en 1783 en Islande [7]. Et on oublie pas l'éruption du volcan Eyjafjallajökull en avril 2010 en Islande [8].

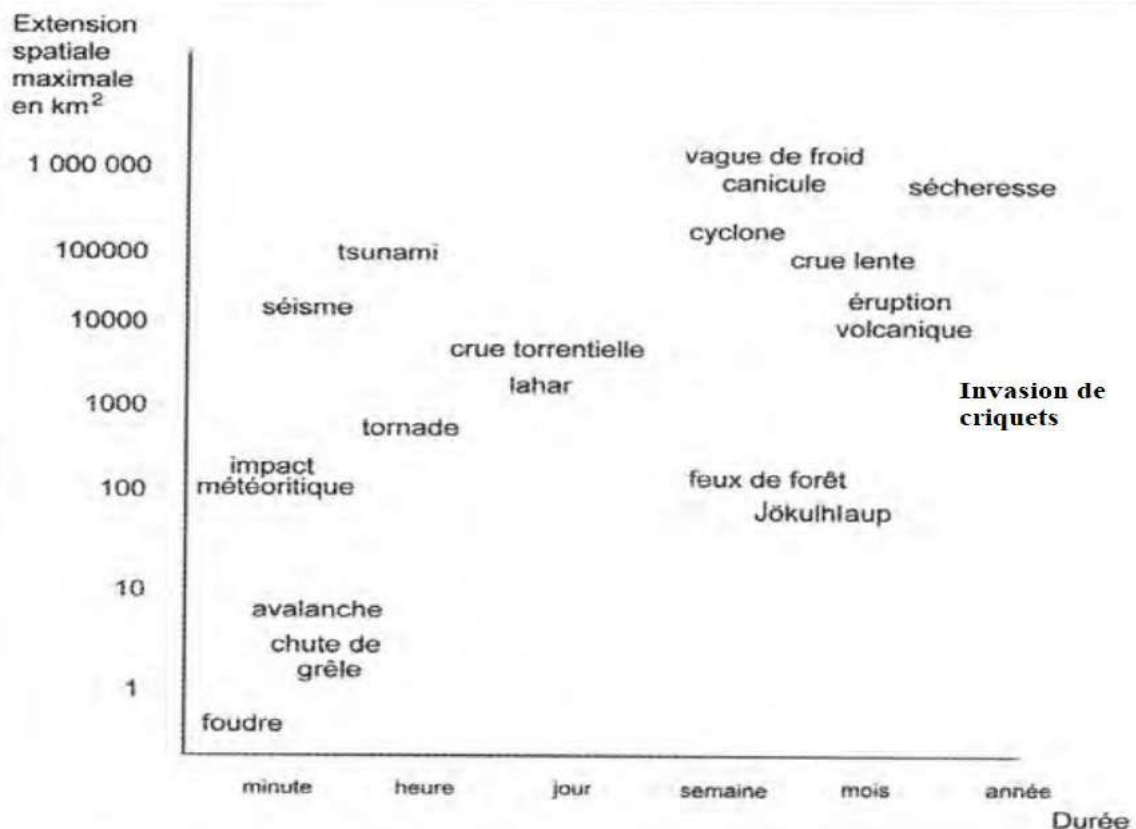


Figure I-2: Classification des aléas en fonction de leur répartition spatio-temporelle.

I.1.3.3 La durée d'action des aleas

La durée de manifestation des aléas est un critère important de leur évaluation dont dépend souvent l'intensité des dommages induits. Au même titre que l'extension spatiale, on peut en faire un critère de classifications.

I.1.3.4 La notion de probabilité d'occurrence

On peut estimer la probabilité de retour d'un événement naturel de référence (par exemple un séisme d'une certaine magnitude) si l'on dispose d'une série statistique suffisamment longue sur l'activité passée. Ceci impose d'entretenir des bases de données sur de longues périodes d'observation. Leur constitution est actuellement facilitée par l'instrumentation automatique mais ne doit pas pour autant négliger le dépouillement des archives et le recueil de toute forme de témoignage. Ainsi, l'analyse historique permet de déterminer une fréquence historique d'occurrence (récurrence) et de classer par exemple les crues par débit théorique (dit de retour décennal, centennal, etc) pour dimensionner en conséquence les ouvrages de protection. On peut assigner une probabilité élevée, moyenne ou faible à un événement de magnitude donnée et caractérisé par une certaine période de retour. Il s'agit donc de la composante temporelle de l'aléa. Elle est essentielle dans le cadre d'une démarche quantitative et prévisionnelle. Suivant les applications recherchées, la définition pour l'aléa peut parfois même se limiter à cette seule dimension probabiliste. L'aléa est dans ce cas défini

comme la probabilité d'occurrence d'un phénomène, par exemple celle de voir une crue de fréquence donnée atteinte ou dépassée au moins une fois sur une période donnée [7].

Précisons que la crue décennale peut ne pas se produire au cours d'un demi-siècle et , au contraire, la crue centennale se produit deux fois dans la même année. Enfin, il est nécessaire de réactualiser régulièrement les calculs statistiques par le simple fait que les échantillons de données pluviométriques et hydrométriques se complètent au fil des années mais également du fait des oscillations climatiques séculaires [7].

Pour certains phénomènes, cette probabilité d'occurrence peut être évaluée sans approche probabiliste en utilisant des analyses multicritères basées sur des combinaisons de facteurs propices au déclenchement de l'aléa considéré. On pense en particulier à l'aléa « glissement de terrain », dont la probabilité d'apparition est synthétisée au moyen de cartes de susceptibilité (faible à forte) obtenues par combinaison de facteurs comme la pente, la lithologie, le type d'occupation du sol, la saturation en eau, la fréquence des pluies, etc. [7].

I.2 Mouvements de terrain

I.2.1 Typologie et facteurs d'apparition

Sous la dénomination commune de « mouvements de terrain » sont regroupés des phénomènes gravitaires extrêmement divers et complexes qui impliquent le plus souvent une rupture et un déplacement simultané de matériaux. Ils mettent en jeu des mécanismes initiateurs et des propagations très variés, eux même liés à la complexité des comportements géotechniques des matériaux sollicités. Ils impliquent des volumes allant de quelques m^3 à plusieurs millions de m^3 (hm^3) et créent des dommages très inégaux. Ce sont des phénomènes fréquents, pouvant être à l'origine d'une évolution discrète ou au contraire provoquer des déplacements en masse. Contrairement à l'opinion reçue, ils s'avèrent souvent meurtriers et les bilans socio-économiques de leurs impacts les placent dans la catégorie des phénomènes naturels les plus redoutés. Compte tenu de l'influence prépondérante de la gravité sur le déclenchement de la majorité de ces phénomènes, on les retrouve préférentiellement dans les zones à fortes pentes (régions montagneuses, littorales à falaises). Une attention particulière doit être réservée aux mouvements de terrain de grande ampleur qui peuvent provoquer des phénomènes induits ou associés catastrophiques. Il peut s'agir d'effets de souffle précédant l'arrivée du mouvement, mais aussi de phénomènes hydrauliques : inondations par embâcle et ondes de submersion (débâcle) consécutives à l'obstruction d'un cours d'eau en fond de vallée. [7]

Compte tenu de la grande diversité des phénomènes de mouvements de terrain, de nombreuses classifications existent à ce jour. Elles ont longtemps été fondées sur des critères morphologiques simples et s'appliquaient le plus souvent à une région donnée. Plus récemment, ces classifications ne sont étendues en essayant de considérer un plus grand nombre de phénomènes, et ce, indépendamment du contexte régional. Elles reposent pour l'essentiel sur des critères, soit cinématiques, soit d'une combinaison de plusieurs d'entre eux. Une classification simple basée sur la vitesse et le rythme des déformations permet de distinguer deux grandes familles de mouvements. [7]

La première est celle des mouvements lents et continus, pour lesquels les déformations sont progressives et accompagnées de ruptures, mais sans accélération brutale. On y englobe :

- Les tassements différentiels, par retrait suivi du gonflement de certains matériaux argileux, en fonction de leur teneur en eau (sécheresse géotechnique), ou bien par surcharge de certains terrains compressibles (vases, tourbes) ;
 - Les affaissements consécutifs à l'évolution de cavités souterraines naturelles ou artificielles. Leur évolution est amortie par le comportement souple des terrains superficiels ;
 - Les phénomènes de fluage de matériaux plastiques sur faible pente (solifluxion, reptation) ;
 - Les glissements lents, qui correspondent au déplacement en masse, le long d'une surface de rupture plane, courbe ou complexe, de sols cohérents (marnes et argiles).
- [7]

La seconde famille est celle des mouvements rapides et discontinus. Ils peuvent être scindés en deux groupes, selon le mode de propagation des matériaux, en masse, ou à l'état remanié.

Le premier groupe (propagation en masse) comprend :

- Les effondrements, qui résultent de la rupture brutale du toit de cavités souterraines naturelles ou artificielles, sans atténuation par les terrains de surface ;
- Les chutes de pierres et de blocs provenant de l'évolution mécanique de falaises ou d'escarpements rocheux très fracturés ou altérés ;
- Les écroulements de pans de falaises ou d'escarpements rocheux selon les plans de discontinuité préexistants.

Le second groupe (propagation en état remanié) comprend :

- Les coulées de terre ou de débris qui résultent du transport de matériaux sous forme visqueuse sur de fortes pentes (torrents de montagne ou vallées de volcans actifs), ou qui proviennent de l'évolution du front des glissements de terrain argileux ;
- Les coulées boueuses plus ou moins fluides, qui sont intimement mélangées à une quantité d'eau plus importante que dans les cas précédents et qui peuvent se propager sur de grandes distances. [7]

Sur un plan géotechnique, le recul du rapport des forces résistances sur les forces motrices régissant l'équilibre d'une masse de terrain (un compartiment rocheux) conduit à la détermination d'un coefficient de sécurité. Pour garantir la stabilité du massif, ce coefficient

doit être égal ou supérieur à 1. Hormis le rôle déterminant de la pesanteur et donc de la pente, certains phénomènes sont largement favorisés par la pression hydrostatique qui peut régner au niveau des surfaces de ruptures souterraines (force motrice). [7]

Selon une démarche adaptée à la cartographie de cet aléa, on distingue trois familles de facteurs de mouvements de terrain.

- **Les facteurs permanents (ou de prédisposition)** : valeur et forme de la pente, nature lithologique, agencement tectonique, morphologie du terrain, type de couvert végétal, fracturation... etc. ;
- **Les facteurs aggravants (ceux pouvant évoluer lentement dans le temps)** : teneur en eau des matériaux, érosion en bas de pente, affouillement de berges, activité et occupation anthropiques, certaines pratiques culturelles, déboisement, etc. ;
- **Les facteurs déclenchants d'origine naturelle** : fortes pluies, fonte des neiges, séisme, effondrement de cavités, cyclone, etc. ou anthropique (surcharge en tête d'un talus ou d'un versant déjà instable, décharge en pied supprimant une butée stabilisatrice, rejets d'eau, explosions, etc.). [7]

Sur un espace donné, ces facteurs peuvent être directement accessibles sous forme de paramètres physiques (pente, résistance mécanique, teneur en eau) ou bien être appréhendés indirectement sous forme d'indicateurs (type d'occupation du sol, distance à une route, indices de mouvements, densité de drainage) ou de résultats de modèles (accélération du sol en cas de séisme, coefficient de sécurité, trajectographie). Souvent, plusieurs causes interfèrent. Mais ce sont généralement les matériaux les plus fins (argiles et limons) qui posent le plus de problèmes de stabilité. Les cristaux lamellaires des argiles s'entourent parfois d'une pellicule d'eau qui leur permet de glisser les uns sur les autres. Ces roches sont dites plastiques et peuvent se déformer et glisser sous l'action de leur propre poids, même sur pente faible. L'augmentation de leur teneur en eau permet le passage vers une consistance plastique puis fluide. Elles se comportent alors comme un liquide et s'épanchent en coulée. [7]

I.2.2 Les mouvements à évolution lente et continue

I.2.2.1 Les tassements de sols argileux par retrait-gonflement

Dans le cas des tassements par retrait, deux processus alternent : un retrait suivi d'un gonflement. Ils sont liés aux changements d'humidité des sols fins argileux et sévissent surtout en périodes de forte sécheresse. D'une façon générale, lorsqu'un sol argileux saturé perd de l'eau par évaporation, il diminue d'abord de volume, de façon sensiblement proportionnelle à la variation de teneur en eau, tout en restant presque saturé. Cette diminution de volume a lieu verticalement (tassement différentiel), mais aussi horizontalement (apparition de fissures de dessiccation). L'amplitude de ce tassement est d'autant plus importante que la couche de sol argileux concernée est épaisse et qu'elle est riche en minéraux gonflants (comme la smectite). Par ailleurs, la présence de drains et surtout d'arbres (dont les racines pompent l'eau du sol jusqu'à 3 voire 5m de profondeur) accentue

l'ampleur du phénomène en augmentant l'épaisseur de sol asséché. Une sécheresse durable, ou simplement la succession de plusieurs années déficitaires en eau, sont nécessaires pour voir apparaître ces phénomènes. [7]

I.2.2.2 Les tassements par compression

Ils sont liés à la diminution de volume de certains sols compressibles (vases, tourbes, marnes et argiles peu consistantes) sous l'effet des charges qui leur sont appliquées. Ces phénomènes peuvent atteindre une extension considérable, en particulier lorsqu'ils sont liés à des pompages de fluides souterrains (surexploitation qu'aquifères, cas de la ville de Mexico) ou à des soutirages de matériaux fins. Le tassement s'accompagne d'une diminution de la porosité et, le cas échéant, d'une expulsion d'eau. Comme pour les retraits-gonflements, ces tassements différentiels se traduisent sur les constructions par des fissurations en façade, souvent obliques et passant par les points de faiblesse que constituent les ouvertures. Les désordres se manifestent aussi par des décollements entre éléments jointifs (garages, perrons, terrasses), ainsi que par une distorsion des portes et fenêtres, une dislocation des dallages et des cloisons et, parfois, la rupture de canalisations enterrées (ce qui vient aggraver les désordres car les fuites d'eau qui en résultent provoquent des gonflements localisés). [7]

I.2.2.3 Les affaissements

Les affaissements résultent de l'évolution lente et progressive de cavités souterraines dont l'effondrement du toit est amorti par le comportement souple des terrains superficiels. L'affaissement se traduit par une dépression topographique sans rupture apparente, parfois en cuvette. Ces cavités peuvent être naturelles ou bien artificielles. La composante verticale du mouvement est prépondérante. Des efforts de flexion, de traction, de cisaillement et des tassements différentiels peuvent se manifester dans les zones de bordure. Dans certains cas, les affaissements peuvent être le signe annonciateur d'effondrement. [7]

I.2.2.4 Les glissements de terrain

Les glissements correspondent à des déplacements de masses de terrain cohérentes le long d'une surface ou de plusieurs surfaces de rupture qui peuvent être circulaires (glissement rotationnels ou circulaire), planes (glissements plans) ou mixtes (glissements complexes). Les profondeurs des surfaces de glissement sont très variables, de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres -voire une centaine de mètres-, ce qui implique parfois de très grands volumes (de plusieurs millions hm^3). [7]

Les glissements rotationnels affectent préférentiellement les formations meubles à forte cohésion, non stratifiées et peu litées, à base d'argiles et de limons. Ils se caractérisent par leur surface de rupture émergeant à l'amont avec une inclinaison proche de la verticale. La conséquence en est souvent la déstabilisation des terrains situés à l'amont, d'où une tendance régressive vers l'amont de ces glissements. Selon un mécanisme rotationnel répétitif. La régression de l'instabilité peut ainsi gagner très rapidement ou progressivement des terrains éloignés de la rupture initiale. Morphologiquement, ces glissements s'identifient par la forme et la raideur de leur niche d'arrachement en tête et latérale, par la zone déprimée

subhorizontale ou en contre-pente qui lui fait suite à l'aval, par les arrachements secondaires, par les crevasses et replats successifs de la zone ventrue de pied. D'autres indices caractéristiques peuvent être observés dans les glissements de terrain actifs : fissures, bourrelets, arbres basculés, zones de rétention d'eau, etc. [7]

Si le mécanisme même du glissement n'engendre pas ou très peu de remaniement a cependant toujours lieu, dans un deuxième temps, dans le pied du glissement, dès que celui-ci déborde en aval la surface de rupture. Le remaniement des matériaux est d'autant plus grand que le transport de ceux-ci est plus important au-delà de la zone de rupture. Dans le cas limite, celle-ci peut être vidée de l'ensemble des matériaux glissés. Ces derniers peuvent se déplacer au-delà de la zone de rupture selon un mécanisme éventuellement autre que celui d'un glissement (coulée de boue, de débris, etc.). [7]

Les glissements plans (ou translationnels) se produisent à la faveur d'une surface plane de discontinuité, de faiblesse ou de rupture préexistante. Cette surface peut être un niveau argileux de la couverture meuble, la surface de contact entre la couverture meuble (altérites) et la roche mère, un joint stratigraphique du massif rocheux orienté selon la pente du versant (glissement couche sur couche), une discontinuité tectonique, une faille ou un système de fractures prédominant. Les cas les plus fréquents sont les glissements couche par couche (banc sur banc) ou ceux se produisant au contact d'un substratum altéré en surface ; un bel exemple est celui du Claps, survenu en 1442 dans la haute vallée de la Drôme. Le rôle de l'eau est très important également pour ce type de glissement : lubrification, effet sur les argiles, sous-pressions, forces de percolation. En zone tropicale, le contraste de perméabilité marqué entre la couverture meuble (épaisse et altérée) de surface et la roche mère sous-jacente favorise les circulations d'eau et la mise en place d'argiles de types smectite qui agissent comme une couche « savon ». [7]

I.2.3 Les mouvements à évolution rapide et discontinue

I.2.3.1 Les effondrements

Ce sont des déplacements verticaux instantanés de la surface du sol qui résultent de la rupture brutale du toit ou des appuis de ces cavités souterraines préexistantes. Contrairement au cas des affaissements progressifs qui procèdent de la même origine, cette rupture se transmet jusqu'en surface sans atténuation par les terrains formant couverture. Elle se manifeste par l'ouverture d'excavations grossièrement cylindriques, dont les dimensions en surface dépendent du volume des vides souterrains effondrés et des caractéristiques géologiques des terrains. On nomme ces ouvertures « dolines » dans les régions Karstiques, et « fontis » dans les zones de manières. [7]

Hormis le cas de cavités d'origine strictement minière, deux causes naturelles peuvent être à l'origine des vides et des mouvements qui en résultent. Il s'agit de la disparition de matière soit par dissolution dans les calcaires et dans les gypses -c'est le phénomène de karstification (ouverture d'avens ...) -, soit par des écoulements souterrains (érosion interne) - c'est le phénomène de suffosion. [7]

I.2.3.2 Les chutes de blocs et les écroulements

Ces phénomènes résultent de l'évolution d'escarpements plus ou moins abruptes, sous l'action de la gravité. On utilise généralement le terme de chute pour des pierres (volumes inférieurs à 1dm^3) ou des blocs (volumes supérieurs à 1dm^3) qui tombent isolément ou en groupe. On lui substitue celui d'écroulement quand il s'agit de la chute soudaine d'une masse rocheuse qui, se détachant d'une paroi ou d'un versant très raide, tombe en se désorganisant. [7]

Les blocs peuvent rouler et rebondir, puis se stabiliser dans une zone dite d'épandage. La trajectoire la plus fréquente suit en général la ligne de plus grande pente, mais on peut observer des trajectoires très obliques résultant notamment de la forme géométrique de certains blocs (plaque roulant sur la tranche) et de petites irrégularités du versant. Les distances parcourues sont fonction de la taille, de la forme et du volume des blocs éboulés, de la pente du versant, de la nature du sol, et de la densité de la végétation. [7]

Tous ces phénomènes se caractérisent par une rupture brusque, de très grandes vitesses de transport et un milieu de transport essentiellement aérien. Le terme d'écroulement peut être réservé à l'accumulation chaotique elle-même, appelée aussi parfois « éboulement ». On peut distinguer l'écroulement d'une masse rocheuse produit par le basculement d'un panneau ou de tout un rebord s'escarpement, de l'écroulement d'une corniche ou falaise en surplomb lié à un sapement mécanique de pied, sur un littoral par exemple. [7]

Certains écroulements de grande ampleur peuvent mobiliser des volumes de matériaux atteignant plusieurs dizaines de millions de m^3 et semblent obéir à des lois de propagation faisant intervenir des mécanismes complexes. Au sein de l'écroulement, la densité des matériaux en mouvement et l'énergie sont telles que les éléments progressent par chocs répétés entre eux et transmission de l'énergie cinétique de bloc à bloc. C'est ce processus qui explique les distances de transport considérables des plus grands écroulements connus tels que celui d'Elm (1881, Suisse), celui du mont Granier (1248, France) et ceux du mont Huascarán (1962 et 1970, Pérou). [7]

I.2.3.3 Les coulées de débris et de boue

On peut regrouper sous appellation tous les phénomènes d'écoulement plus ou moins rapides à forte teneur en eau, accompagnés d'un fort remaniement des matériaux et présentant une consistance plus ou moins visqueuse. Les distinctions entre les différents types de coulées reposent sur la nature des matériaux (notamment la courbe granulométrique et la cohésion) et sur l'importance de la fraction liquide. Ces phénomènes s'amorcent en amont des versants dans une zone de départ par apport de matériaux et d'eau. Ils s'écoulent dans une zone de transit relativement canalisée et se délestent en matériaux dans une zone de dépôt en donnant un cône de déjection. [7]

Les coulées de débris se produisent à partir de formations rocheuses bien stratifiées, en place ou préalablement disloquées. Ce sont des phénomènes se produisant sur des versants à pente assez forte à forte. Le déplacement des matériaux est égal à plusieurs fois, voire plusieurs dizaines de fois, la dimension de la surface de rupture plusieurs fois, voire plusieurs dizaines de fois, la dimension de la surface de rupture. Les vitesses sont généralement comprises entre 0,5 et 1,5 m/s. le volume de matériaux concerné reste relativement limité, en règle générale inférieur au million de m³, encore que certains glissements géants puissent être assimilés à des coulées de débris extrêmement rapides (« sturztrom »), comme à Mayunmarca au Pérou en 1974. [7]

Les bassins torrentiels à fortes pentes des régions montagneuses présentent des phénomènes d'écroulement hyper-concentrés que l'on dénomme en France « laves torrentielles ». Ils se forment par enrichissement subit et considérable du débit d'un torrent en matériaux solides qui accroissent très fortement son pouvoir érosif. Par rapport aux autres coulées, les laves torrentielles se distinguent sur le plan morpho-dynamique par le transport de blocs pouvant atteindre de très grosses tailles (jusqu'à 200 m³), une concentration solide élevée (80 à 90 % du volume), des vitesses fortes (1 à 10 m/s), des débits élevés et des volumes considérables. [7]

Les coulées de boue sont générées par la mise en mouvement de matériaux sans cohésion -ou l'ayant perdue dès la mise en mouvement- et qui sont intimement mélangés à une quantité d'eau (avant ou après la mise en mouvement). Les matériaux constitutifs d'une coulée boueuse peuvent être indifféremment tous ceux susceptibles de perdre leur cohésion. Il peut s'agir d'argiles, d'argiles limoneuses, de limons, de couche superficielle terreuse, d'argiles limoneuses, de limons, de couche superficielle terreuse, de colluvions fines, de moraines diverses, mais aussi de roches argilo-limoneuses ou schisteuses décomposées, voire d'éboulis très fins. L'eau peut être intégrée aux matériaux avant le déclenchement de la coulée (dans le cas d'argiles, de limons), soit apportée au moment de la rupture par une résurgence massive d'eau souterraine (dans le cas notamment des régions à régime karstique et des grands glissements latents) ou par une concentration d'eau de ruissellement. [7]

Il existe deux types particuliers de coulées boueuses, propres aux reliefs volcaniques actifs. Les premières se dénomment lahars (terme d'origine indonésienne). Il s'agit de coulées fluides et rapides (plusieurs dizaines de km/h), empruntant leurs matériaux solides aux formations de cendres volcaniques fraîchement déposées et sans cohésion. Les secondes sont les jokulhlaups (de l'islandais « course de glacier ») ou débâcles glaciaires. Les plus fréquentes se déroulent en Islande mais elles peuvent se produire dès qu'un volcan recouvert d'une calotte glaciaire ou d'un inlandsis entre en activité (c'est le cas en Alaska, Etats-Unis, Antarctique, Andes, etc.) [7]

I.2.4 Les phénomènes induits par les mouvements de terrain

Les mouvements de terrain de volume important (glissement, écroulements) peuvent provoquer des phénomènes induits de nature hydraulique dont les effets vont largement

dépasser l'aire d'impact directe du mouvement. On peut distinguer deux configurations distinctes ayant provoqué dans le passé des catastrophes sans précédent. [7]

I.2.4.1 L'obstruction d'un cours d'eau

Le barrage d'un cours d'eau situé en fond de vallée peut se produire lorsque le mouvement de terrain mobilise un volume important (plusieurs millions de m³). L'eau s'accumule alors en arrière de la retenue et inonde la vallée à l'amont (embâcle). Lorsque le niveau de la retenue atteint le sommet du barrage naturel – ou parfois avant-, il peut se produire une rupture partielle ou totale de celui-ci et une vidange accélérée du lac de retenue. La débâcle qui s'ensuit génère une onde de submersion qui peut alors balayer sur des dizaines de kilomètres la portion de vallée aval en détruisant tout sur son passage. La rupture peut intervenir très rapidement lorsque la masse glissée ou écroulée offre peu de cohésion-, ou au contraire plusieurs mois ou années plus tard. La rupture peut être provoquée par la percolation en cas d'infiltration excessive dans le barrage. Un scénario de ce type est envisagé sur le site Séchilienne dans la vallée de la Romanche au sud de Grenoble en Isère. [7]

D'une façon générale, la rupture des barrages naturels dépend de leur taille, de leur géométrie et de leur composition ainsi que du débit entrant de la rivière et de la présence ou non de contrôles rocheux. Le plus souvent, leur durée de vie est courte. Néanmoins, certains barrages naturels résistent et deviennent permanents, créant un lac de retenue qui persistera jusqu'à son remplissage par des apports alluviaux. Le plus grand glissement des temps historiques, celui d'Usoy au Pamir (2,5 milliards de m³), a créé un lac de retenue permanent de 53km de long et 284 m de profondeur. [7]

I.2.4.2 La pénétration d'une masse de terrain dans un plan d'eau

Un tel phénomène peut produire une vague déferlante (raz de marée ou tsunami) qui vient submerger les rives de ce plan d'eau. C'est par exemple ce qui s'est produit en 1958 dans la baie de Lituya en Alaska, consécutivement à un écroulement rocheux déclenché par un séisme. La lame d'eau générée, d'une hauteur estimée de 600m, est venue tuer deux riverains et détruire de nombreux hectares de forêts. Dans certains cas, cette lame d'eau peut se propager vers l'aval lorsqu'elle affecte par exemple un lac artificiel. Cette configuration est à l'origine de la catastrophe du mont Toc, survenue dans les Alpes italiennes le 9 octobre 1963. Un glissement rocheux rapide (volume de 270 millions de m³ et vitesse maximale de 150 km/h), provoqué par la mise en eau du lac artificiel de Vajont, a produit au contact de ce lac l'éjection d'une lame d'eau de 300M de haut qui s'est propagée vers l'aval, après avoir franchi le barrage-voute (hauteur de 150 m). Celui-ci a résisté mais la vague est venue détruire le bourg de Longarone situé dans la vallée du Piave et tuer 2117 personnes. Sur les littoraux volcaniques des petites Antilles, des parties de flancs de volcans déstabilisés peuvent brutalement glisser vers la mer et générer également des tsunamis catastrophiques. De tels phénomènes se sont produits dans le passé, notamment en Guadeloupe et en Martinique. [7]

I.3 Inondations

Les inondations sont un aléa multiforme : d'une part, toutes les inondations ne sont pas d'origine climatique ; d'autre part, dans les inondations d'origine climatique, le facteur topographique est déterminant dans la caractérisation et dans la localisation de l'inondation. [7]

Il faut tout d'abord distinguer les crues des inondations. La crue se définit comme une montée du niveau et donc du débit d'un cours d'eau. Cette augmentation se caractérise par les paramètres descriptifs de l'aléa exposés dans la première partie (intensité, fréquence, durée, volume...). Ainsi la crue est-elle un phénomène purement hydrologique. En revanche, l'inondation fait référence au débordement d'un cours d'eau hors de son lit habituel. Elle désigne l'invasion par l'eau d'un espace habituellement exondé. [7]

L'aléa hydrologique peut être assimilé à un continuum allant de la simple augmentation de quelques centimètres d'un petit ruisseau à des inondations généralisées durant plusieurs mois dans les grands bassins fluviaux du yang Tsé kiang ou du Mississippi. [9] [10]

La première classification est génétique, distinguant les inondations climatiques. Ces dernières sont liées à des phénomènes aussi divers que les tsunamis, des éruptions volcaniques sous-glaciaires, des ruptures de lac glaciaires ou de barrage. Il existe aussi des inondations d'origine climatique non pluviométrique liées à la fonte des neiges ou aux marées de tempêtes. [7]

Pour les inondations d'origine pluviométrique, la classification habituelle résulte d'une combinaison entre les caractéristiques du bassin versant (pente, taille, lithologie...). [11]

I.3.1 Les inondations d'origine non climatique

Très diverses, elles peuvent être considérées comme des effets induits d'autres phénomènes naturels. Le tsunami est le cas typique d'une inondation sans crue. L'inondation des zones côtières est très brutale et liée à un phénomène géophysique sous-marin (éruption volcanique, séisme, mouvement de terrain ...). Les glissements de terrain sont parfois à l'origine d'inondation, soit par le démantèlement d'un lac de barrage naturel après qu'un glissement de terrain a obstrué une vallée, soit lorsqu'un glissement de terrain se produit dans un lac, comme en Italie le 9 octobre 1963. [7]

Le terme islandais de jokulhlaups s'est généralisé pour désigner les débâcles glaciaires. Celles-ci résultent de la rupture d'un lac de barrage sous glaciaire ou de la vidange d'un lac morainique. L'eau accumulée dans une cavité est libérée soit par débordement du lac, soit par rupture du glacier ou du cordon morainique, soit par recul du glacier. Ce type d'aléa est particulièrement surveillé en montagne tempérée. Les éruptions volcaniques, en faisant fondre une masse importante de neige ou de glace, sont parfois à l'origine d'inondations brutales. Le lieu éponyme des jokulhlaups est le glacier du Vatna au sud de l'Islande. Les éruptions des

volcans présents sous la calotte de glace provoquent la fonte partielle du glacier (1996). Ces inondations sont aggravées par la charge alluviale très importante, les matériaux volcaniques étant facilement transportés par les eaux de fonte. Par leur dynamique, ces inondations sont assimilées aux lahars. On est ainsi à la limite entre la coulée de blocs, coulée de boue et inondation. La limite en termes de cinématique est souvent difficile à déterminer. [7]

I.3.1.1 Les inondations dues à des ruptures d'ouvrage

Les ruptures de barrage ont lieu au moins une fois par an dans le monde. Les barrages sont très hétérogènes dans leur conception, leur taille et leur utilisation. Certains sont en terre comme celui qui s'est rompu en aout 2008 dans le Colorado, entraînant l'évacuation préventive de centaines de touristes dans le grand Canyon. Les « grands barrages » (plus de 15M de hauteur) sont conçu de façon à pouvoir résister à des crues de période de retour millénale à décennelle. [7]

Les causes sont multiples : crue dépassant la crue de projet, glissement de terrain dans le lac réservoir, séisme mais aussi mauvaise conception de l'ouvrage, acte de malveillance, attentat. La vidange brutale d'un lac de réservoir de barrage entraîne une onde de submersion qui se propage très rapidement vers l'aval. Si la rupture est brutale, elle laisse peu de chance de survie aux personnes situées à proximité. Le risque de rupture est gravé dans la mémoire de tous les français après la fameuse rupture du barrage de Malpasset dans la région de Fréjus en 1959 (423 morts). [7]

I.3.2 Les inondations d'origine pluviale

Les hydrologues cherchent d'abord à caractériser les crues. Ces dernières se définissent par une équation de base : $Q=SxV$ où Q représente le débit instantané, S la surface de la section hydraulique et V la vitesse moyenne de l'eau dans cette section mouillée.

Les crues sont mesurées en des points précis du cours d'eau à partir d'échelle de crues en général accompagnées de limnigraphes. Les limnigraphes enregistrent en temps réel la hauteur de l'eau dans le cours d'eau. De temps en temps sont effectués des jaugeages, c'est-à-dire des mesures réelles du débit. La vitesse est mesurée en différents points de la section mouillée à l'aide de différents outils. Ces jaugeages sont longs et difficiles, surtout sur les cours d'eau à écoulement torrentiel. Ils permettent toutefois de construire des courbes de tarage qui lient la hauteur d'eau aux débits à un endroit donné.

La comparaison entre l'abondance des crues dans différentes régions du globe se fait par le débit spécifique exprimé en $m^3/s/km^2$ qui met en rapport le débit du cours d'eau en un point avec la superficie du bassin versant à l'amont de ce point. Le débit spécifique est inversement proportionnel à la taille du bassin versant. Les petits bassins versants des régions montagneuses tropicales peuvent débiter jusqu'à $20 m^3/s/km^2$. Pour la somme (bassin versant : $5530 km^2$), cours d'eau de plaine aux excès fortement atténués par les nappes souterraines, le débit en crue « centennale » est de $110 m^3/s$ soit $20 l/s/km^2$. [7]

Le déroulement d'une crue est reconstitué par un hydrogramme présentant l'évolution du débit au cours de l'épisode pluviométrique. Sa forme permet de distinguer les crues rapides (hydrogramme « pointu ») des crues lentes (hydrogramme plus aplati). Le hyétogramme (évolution des précipitations) montre les relations entre l'épisode pluviométrique et

hydrologique. Le temps de concentration entre le pic pluviométrique et la pointe de crue est d'autant plus réduit que le bassin versant est petit et que la pente est forte. Il dépend aussi des formations superficielles et de leur état de saturation en eau juste avant l'évènement. [7]

La configuration topographique explique la cinématique des crues. Les vallées se caractérisent par des profils en long et des profils en travers variés. Dans les parties amont, le profil en travers est en V. les vallées sont étroites, encadrées par des versants à forte pente. La forte pente des thalwegs induit des crues de types torrentiels : forte vitesse, débit spécifique élevé, forte charge alluviale grossière. Vers l'aval, les vallées s'élargissent. Les lits s'individualisent plus ou moins nettement : lit mineur toujours en eau, lit moyen et lit majeur périodiquement ou rarement inondés. Un troisième type de profil, dit « en toit », se rencontre plutôt dans les basses vallées : le lit mineur est surélevé de quelques mètres par rapport à la plaine alluviale qui s'étend parfois sur plusieurs kilomètres de largeur. Cette disposition s'explique par la progradation due au tri granulométrique décroissant des alluvions au fur et à mesure que l'on s'éloigne du lit mineur. Les rives du fleuve ont tendance à s'exhausser, dominant ainsi de quelques mètres les points bas, situés parfois à plusieurs kilomètres du lit mineur. Ce fonctionnement explique que beaucoup de personnes non averties (nouveaux habitants, étrangers) soient surprises par l'arrivée des eaux en période de crue car les zones les plus fréquemment et durement inondées ne sont pas situées à proximité du cours d'eau.

L'habitat traditionnel s'est implanté sur les sites plus élevés, soit sur des éminences naturelles de la plaine, soit sur le bourrelet de berge derrière les digues ou au contact entre la plaine inondable et les collines encaissantes. Ce type de disposition se rencontre dans la plupart des grandes vallées fluviales (Mississipi aux Etats Unis, Pô en Italie, les grands fleuves chinois), mais aussi sur des cours d'eau riverains de la méditerranée. La fixation du lit mineur par des aménagements aggrave cette différence altitudinale. Sur le Huang He (fleuve jaune en Chine), le lit mineur endigué domine parfois d'une vingtaine de mètres la plaine alentour. Cette situation est à l'origine des défluviations majeures de ce fleuve qui en 2000 ans a changé plus de 26 fois son cours sur des centaines de kilomètres en passant au nord ou au sud de la péninsule du Shandong [12]. On a affaire alors à des crues de volume car ce qui détermine les surfaces inondées ce n'est pas le débit de pointe mais la durée de déplacement de la crue débordante. Dans ces basses plaines, le contrôle anthropique des crues s'exerce par les déversoirs qui répartissent géographiquement les débordements.

I.3.3 Méthodes et sources pour la caractérisation de l'aléa « inondation »

Pour reconstituer les inondations, leur cinématique et leur emprise spatiale, les hydrologues disposent d'outils et de méthodes divers. Il s'agit de modèles qui tentent de reconstituer l'écoulement des cours d'eau à partir de données hydrométriques ou pluviométriques complétées par des données sur l'état de surface du bassin versant. [7]

A l'amont, on utilise des modèles pluie-débit qui déduisent des débits à partir d'une lame précipitée. Les modèles débit-débit sont des modèles de transfert ; ils cherchent à déduire à partir d'un débit donné à l'amont son évolution vers l'aval. Dans les parties inférieures des cours d'eau, les modèles à casiers prennent en compte la complexité des plaines. Compte tenu des nombreux obstacles (routes, digues, canaux) que l'eau rencontre sur ces espaces peu

pentus, l'écoulement de la crue est modélisé comme le remplissage itératif de bassins ou casiers. [7]

Ces modèles ont besoin de supports topographiques les plus fins possibles : profil en long et en travers et si possible modèles numériques de terrain. Les données hydrologiques sont issues des mesures de terrain (limnigraphes, jaugeages effectués par les services gestionnaires des cours d'eau). Mais souvent les séries limnométriques sont trop courtes et lacunaires et les jaugeages trop rares pour les crues majeurs. Afin de caractériser au mieux les périodes de retour des débits, il faut des séries de mesures les plus longues possible ; aussi les hydrologues ont-ils recours aux données historiques pour retrouver les niveaux d'eau atteints par les crues passées. Les archives écrites contiennent des renseignements intéressants qui complètent les repères de crue sur les rives des cours d'eau et les relevés de hauteur des laisses de crue effectués après chaque crue majeure. [7]

Les approches modélisatrices sont complétées par une approche plus naturaliste dite approche hydro-géomorphologique. Elle consiste à identifier les différents lits qui composent la plaine alluviale d'un cours d'eau. Cette identification permet ensuite de déterminer l'importance de l'inondabilité associée à chacun de ces espaces. Elle a été définie par des géographes-géomorphologues d'Aix-en-Provence [13]; [14], et de Toulouse [15]. Cette méthode a été adoptée par le MEEDDAT. Elle complète les méthodes classiques de détermination de l'aléa hydrologique (modélisation hydraulique) en proposant une approche globale du cours d'eau, considéré dans son fonctionnement amont-aval. La mise en œuvre de cette méthode est particulièrement bien adaptée aux secteurs à faible enjeu ou/et lorsque les zones à couvrir sont vastes. [7]

Cette approche applique aux vallées les principes et méthodes de l'analyse géomorphologique pratiquée par les géographes depuis longtemps. L'analyse de photographies aériennes permet un premier zonage fonctionnel de l'espace complété par des levés de terrain (profils transversaux et longitudinaux, étude des dépôts alluviaux ...) le rendu cartographique distingue la zone non inondable (l'encaissant), et la zone considérée comme inondable, qui prend le nom de plaine alluviale fonctionnelle (ensemble des lits fluviaux). On distingue entre deux et quatre lits fluviaux en fonction du régime du cours d'eau : le lit mineur où s'écoulent les eaux pérennes, le lit moyen qui est le lit où se répandent les premiers débordements (inondé tous les 5 à 15ans), le lit majeur ordinaire et le lit majeur exceptionnel qui permet l'évacuation des eaux des crues les plus rares. Chacun de ces lits est séparé par un talus qui marque la transition entre les différentes unités de la plaine alluviale fonctionnelle. D'autres critères peuvent aider à l'identification des formes fluviales, comme la végétation (ripisylve, espèces hygrophiles et pionnières), les paysages et le type de culture. Même si la méthode comporte des limites, notamment dans les zones basses soumises à des défluvations, les cartes produites reconstituent la fonctionnalité de l'hydrosystème : chenaux de crue, ripisylve, rupture de pente, zone d'accumulation ou d'érosion... elles sont appréciées des gestionnaires de bassin versant. [7]

I.3.3.1 Les facteurs déterminant les crues

Ainsi la cinématique des crues dépend des caractéristiques intrinsèques de chaque bassin versant, dont :

- La superficie du bassin versant ;
- L'orographie ;
- L'orientation du bassin versant par rapport aux flux humides ;
- L'état de surface du bassin versant : végétation, imperméabilisation par des constructions ;
- Les formations superficielles, la géologie et les conditions hydrogéologiques : présence de Karst ou, au contraire, roches imperméables, formations superficielles permettant de stocker une part des précipitation... ;
- La morphologie de la vallée fluviale : zones d'expansion des crues naturelles... ;
- Les aménagements (barrages, digues, chenalisation...). [7]

Cette cinématique dépend également de facteurs conjoncturels liés aux précipitations (intensité et cumul, répartition et déplacement, état de saturation initial des formations superficielles et géologiques, présence d'une couche de neige). Enfin peuvent intervenir d'autres facteurs conjoncturels liés aux variations saisonnières de la couverture végétale naturelle ou cultivée et à la gestion des aménagements anthropiques (barrages). [7]

Comme exemple de conditionnement des crues par l'état de surface, on citera le cas des précipitations de printemps dans les zones de grande culture en région parisienne. La période mai-juin est favorable à la formation de crues éclairées car, à cette date, les bassins versants ne sont pas protégés par une couverture végétale continue. De même, en zone tropicale, les premières averses de la saison des pluies sont plus efficaces car, après plusieurs mois de saison sèche, elles tombent sur un sol qui n'est pas protégé par un tapis herbeux. [7]

I.3.3.2 La complexité des scénarios pluvio-hydrologiques

La diversité des facteurs énoncés ci-dessus explique qu'une crue ressemble rarement à une autre. Le cas des deux épisodes de pluies consécutives dans le Gard en septembre 2005 illustre la complexité des scénarios pluvio-hydrologiques. Début septembre 2005, deux événements pluviométriques ont affecté le Languedoc à deux jours d'intervalle. Le bassin versant du Vistre a été affecté par les deux événements. Lors du premier épisode, le 6 septembre, les précipitations ont dépassé 300 mm sur le bassin versant (191 mm au Cailar). Elles ont été à peine supérieures à 200mm lors du second épisode du 8 septembre (145 mm au Cailar). Sur l'hydrogramme du Vistre, la seconde pointe de crue est supérieure à la première. Les pluies du 6 septembre étaient les premières de la saison après un été sec. Une partie a été stockée par les sols et les formations karstiques. En revanche, les pluies du 8 septembre sont tombées sur des sols et des Karsts saturés. Le coefficient d'écoulement a donc été efficace. [7]

Ainsi les crues ne sont-elles pas proportionnelles aux précipitations. L'efficacité hydrologique des précipitations (coefficient d'écoulement) est tributaire de l'état de saturation du bassin versant. [16]

I.3.4 Typologie des inondations d'origine climatique

On distingue couramment les inondations en fonction de la vitesse de montée des eaux. Les trois paramètres essentiels sont l'intensité des précipitations, la pente et la taille du bassin versant. [7]

I.3.4.1 Les inondations lentes

Les inondations lentes sont caractérisées par des débits six à dix fois supérieurs au module et des montées du niveau de l'eau de l'ordre du centimètre à l'heure. Cette lenteur est due à la faible pente du lit, à sa largeur, qui permet l'expansion des eaux, et à la faible intensité des précipitations. Ces inondations sont assez universelles et touchent par exemple les grands bassins versants de l'Europe du nord (Elbe, 2002, crues de la Loire, de la tamise) ou de l'Amérique du nord (Mississippi). Malgré la lente montée des eaux, ce type d'inondation est responsable de très lourds bilans humains liés à l'ampleur des zones touchées et aux dommages aux cultures vivrières. Les défluvations du Hang He firent plus d'un million de victimes en 1887 comme en 1938. [7]

I.3.4.2 Les inondations par remontée de nappe

Les inondations lentes par excellence sont les inondations par remontée de nappe. Le bassin de la somme a connu en 2001 des inondations qui ont sinistré plusieurs milliers d'habitations et coûté 80 millions d'euros de dommages. Le réseau hydrographique de la somme s'écoule sur la nappe de la craie, formation géologique très perméable qui fonctionne comme une véritable éponge. En période d'étiage, la nappe phréatique à son niveau le plus bas alimente le lit mineur de la somme. Après des précipitations abondantes sur plusieurs mois voire plusieurs années, le réseau souterrain ne peut plus évacuer l'eau précipitée ; la nappe se met en charge, son niveau remonte jusqu'à déborder en surface par des sources temporaires. La somme dont la pente est très faible est de plus ralentie dans sa partie inférieure par les marées. Lorsque la marée est haute, les eaux ne peuvent s'évacuer, ce qui aggrave l'inondation. [7]

L'examen du film des précipitations sur le bassin de la somme montre bien qu'il s'agit d'un phénomène cumulatif (et non instantané comme les crues torrentielles). Les crues de la somme ont eu lieu en avril 2001. Or les hivers 2000-2001 lui-même avait connu un cumul de pluie extraordinaire puisque tous les mois d'octobre à avril (sauf février) ont été excédentaires. Enfin, alors que les nappes et les sols étaient gorgés d'eau, le « coup de grâce » est venu d'un mois de mars très pluvieux (330 % des précipitations moyennes à Abbeville). [7]

I.3.4.3 Les inondations de type torrentiel

La vitesse de montée des eaux est beaucoup plus brutale que dans les inondations précédentes. Le niveau de l'eau peut monter de plus d'un mètre à l'heure. La vitesse de l'eau qui peut atteindre 7 m/s ne doit pas être confondue avec la vitesse de propagation de l'onde de crue qui est de l'ordre de 10 à 15 km/h (20km/h dans les gorges de l'Ardèche). Les débits peuvent être plus de 600 fois supérieurs au module. [7]

Les crues torrentielles concernent les petits bassins versants des régions associant fortes pentes et averses de forte intensité liées aux nuages à développement vertical. Elles connaissent une saisonnalité différente selon les zones : saison de pluies ou période cyclonique en région tropicales, automne en régions méditerranéennes, printemps et été en régions à climat continental. [7]

Les dommages sont liés à la brutalité de l'arrivée des eaux mais aussi aux débris transportés qui génèrent des embâcles, c'est-à-dire l'obstruction des ponts par des branchages, troncs d'arbres et autres carcasses de voiture. La charge solide transportée est importante, ce qui contribue à la destruction des cultures par engravement. Les limons déposés altèrent les biens mobiliers et immobiliers. En France, sur les vingt dernières années, les crues méditerranéennes ont entraîné les deux tiers des dommages globaux aux inondations. [7]

I.3.4.4 Les inondations en zone urbaine

Les inondations en zone urbaine ne constituent pas un type d'inondation mais plutôt un risque croissant compte tenu du développement des zones urbaines dans le monde. [7]

Les inondations s'apparentent à des crues torrentielles mais la présence d'une zone urbanisée amplifie le risque (Desbordes et Noyelle,1994). On distingue les inondations périurbaines (pour lesquelles le danger vient des cours d'eau affluents qui convergent vers une agglomération) des inondations urbaines (le réseau d'évacuation des eaux pluviales est pris en défaut et ne peut évacuer l'eau précipitée à l'aplomb de la ville). [7]

Parking, toitures, routes augmentent le taux d'imperméabilisation et donc le coefficient du ruissellement. Lorsque la part du bassin versant ainsi imperméabilisée devient significative, le temps de concentration et le temps de propagation des crues sont raccourcis. [7]

De plus, la géométrie du réseau d'évacuation des eaux pluviales intervient. Sa pente est augmentée et sa longueur réduite afin de réduire le diamètre des buses d'évacuation et limiter l'ensablement. Les zones d'expansion des crues sont réduites ; enfin, l'urbanisation crée des obstacles à l'écoulement. Les obstacles transversaux comme des chaussées surélevées ou des remblais de voie de chemin de fer créent des retenues artificielles à l'amont et aggravent localement le risque d'inondation. Les obstacles parallèles aux flux canalisent les eaux et accroissent localement la vitesse d'écoulement. [7]

Le problème majeur reste l'inadaptation des capacités hydrauliques des cours d'eau urbains. La ville d'Alger a connu une inondation torrentielle meurtrière le 10 novembre 2001. Les précipitations de l'ordre de 200mm ont provoqué des ruissellements très rapides sur le bassin versant d'oued M'Kacel très urbanisé. Faute d'un réseau d'évacuation souterrain efficace, les eaux et la boue se sont répandues dans le quartier de Bab El Oued et la boue causant la mort de 800 personnes. [7]

I.3.4.5 Les submersions marines

Les inondations littorales sont dues à l'invasion d'eau de mer dans les basses terres proches des côtes. Elles sont liées à une augmentation anormale du niveau de la mer due à un vent d'afflux lors des tempêtes et cyclone. [7]

On le voit, l'aléa « inondation » correspond en réalité à des phénomènes très divers dans leurs causes et leurs manifestations : phénomènes brutaux et quasi-instantanés comme les tsunamis ou les crues torrentielles, ou phénomènes lents, les nuisances sont liées à la durée de submersion mais il n'y a en général pas de danger pour la vie humaine. En revanche, les phénomènes brutaux sont beaucoup plus dangereux, bien que certains soient prévisibles. La prévention doit s'adapter au contexte socioéconomique et au type d'aléa. [10]; [17]

Chapitre II :
Présentation de la
deuxième rocade sud
d'Alger.

II.1 Cadre général

Située dans le nord algérien, au sud de la Wilaya d'Alger. La deuxième rocade sud d'Alger dénommée aussi 2^{ème} RSA, est une infrastructure routière de type autoroutier, ayant la configuration 2x3 voies, reliant la banlieue est d'Alger (Boudouaou) à la banlieue ouest Staoueli sur 61 km. Elle a été mise en exploitation en 2009. Le lot ouest qui fait l'objet de notre étude s'étend sur 10 Km (Pk 7+200 : échangeur entre Rocade Sud et 2^e Rocade Sud, au Pk 17+200 : échangeur entre Rocade Ouest et 2^e Rocade Sud Baba Hassen, Douera) en passant par les points suivants :

✕ : Échangeur entre Rocade Sud et 2^e Rocade Sud. Pk 7+200

🏠 : Ville desservies Soudania Pk 11+300

🏠 : Ville desservies Rahmania (Nouvelle ville de Sidi Abdallaha)

✕ : Échangeur entre Rocade Ouest et 2^e Rocade Sud Baba Hassen, Douera

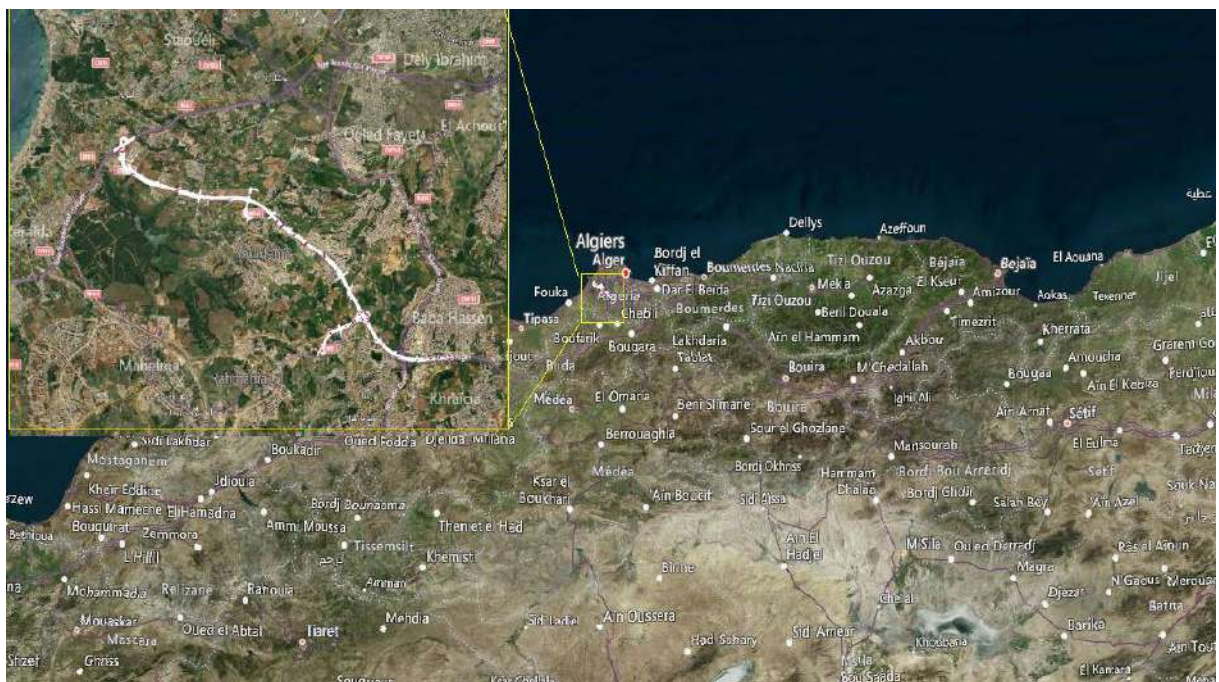


Figure II-1: Localisation du tronçon étudié dans le nord algérien.

Le tronçon étudié (Lot ouest) a été réalisé par le groupement Teixeira-ETRHB entre 2006 et 2009 pour le compte de l'Algérienne des autoroutes. L'étude de réalisation a été faite par le bureau d'étude COBA.

II.2 Contexte géomorphologique

II.2.1 Géologie

La région d'étude est caractérisée par une couverture géologique importante

➤ **Le primaire :**

Correspond au massif Bouzaréah qui s'étend sur une longueur de 20 km et sa largeur maximale est de 6 km selon une direction Est -Ouest. Ce massif est métamorphique, constitué principalement par des schistes cristallophylliens. Il est très tectonisé, boisé et recoupé par un réseau de thalwegs profonds, sa topographie est très accidentée et son sommet qui culmine à 407 m constitue le point le plus haut de la région.

➤ **Le tertiaire :**

Marqué par une lacune de l'Eocène et de l'Oligocène, il recouvre en discordance le substratum métamorphique.

➤ **Le Miocène inférieur (Burdigalien) :**

Formé de grès et poudingues, ils affleurent d'Alger à la commune de Beni Messous, et plongent vers le sud sous les formations plaisanciennes.

Les grès grossiers et peu fissurés, débutent par un poudingue mal cimenté remaniant sur 1 à 2 m des éléments du massif ancien et qui renferment des lits de gravier discontinues.

➤ **Le Pliocène inférieur (Plaisancien) :**

Rencontré dans le sud de la commune de Beni Messous et il affleure aussi dans le Sahel et au Télémly. Il est essentiellement argilo -marneux. Ces faciès verdâtres et bleutés sont dénommés « marnes bleues du Plaisancien »

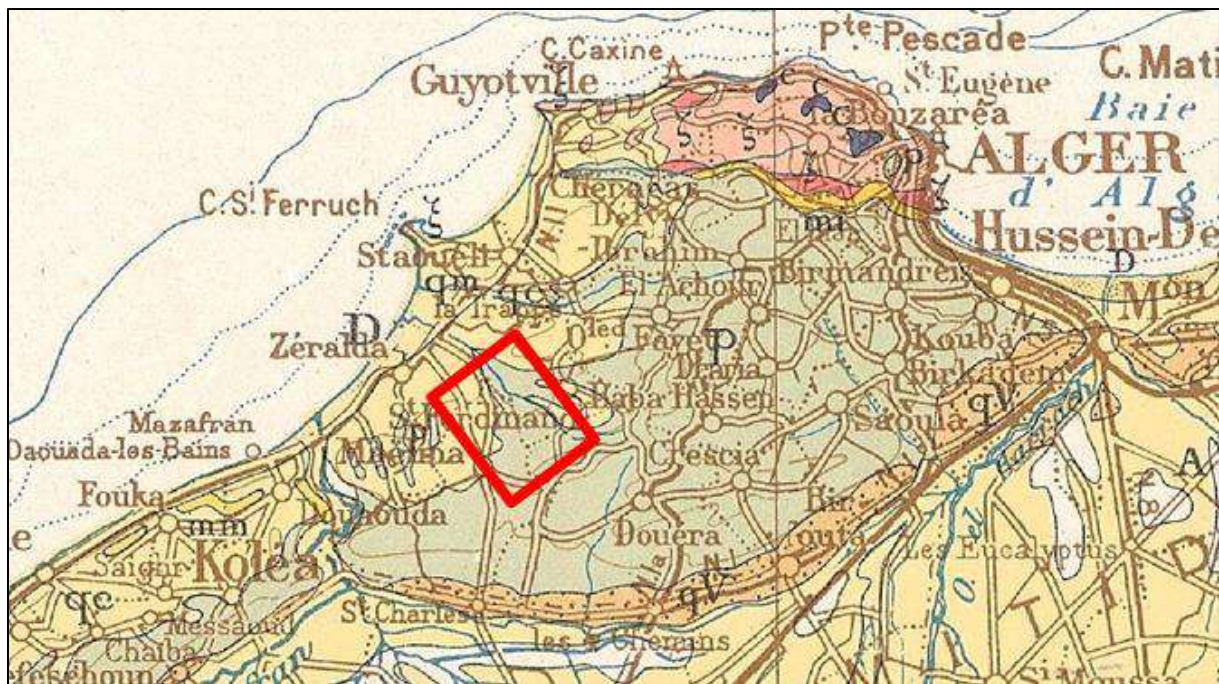


Figure I-2: Carte géologique de la zone d'étude.

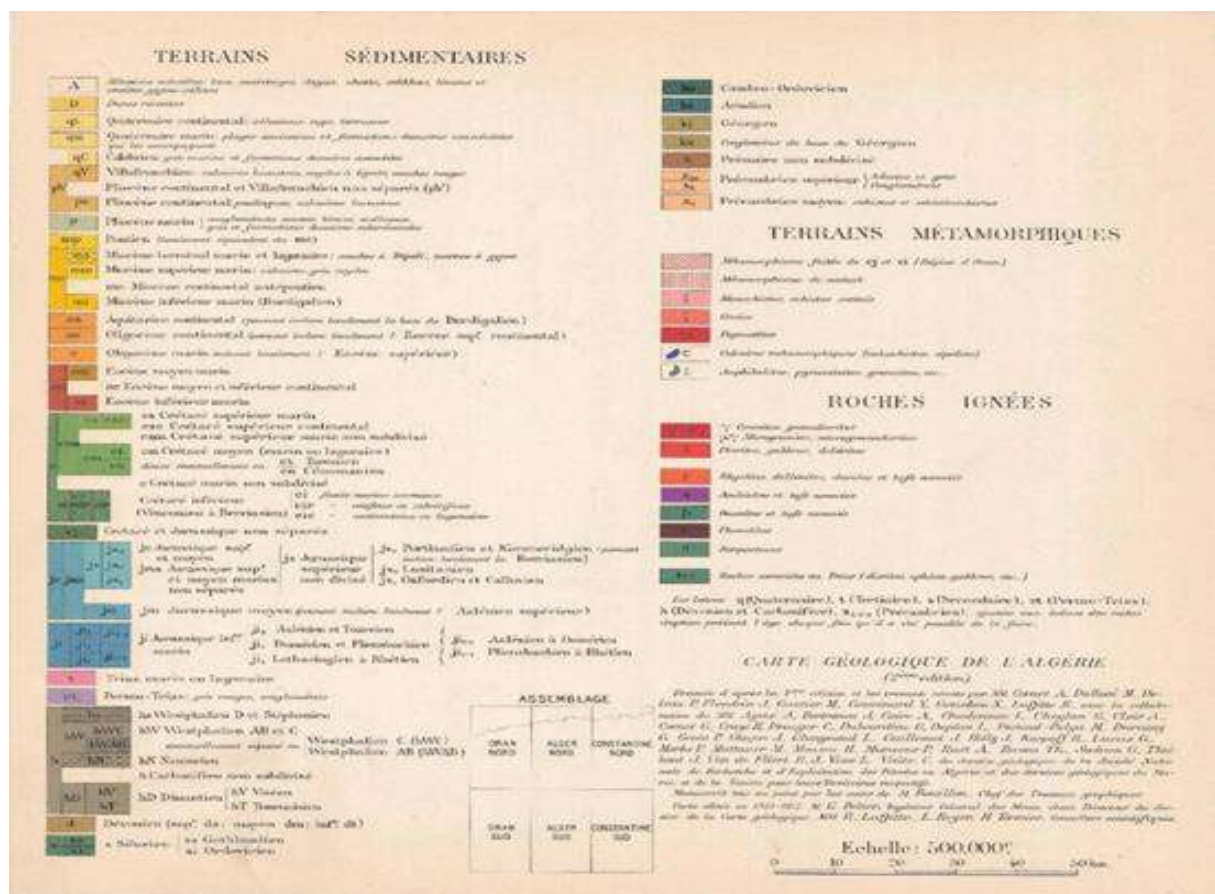


Figure I-3: Légende de la carte géologique.

II.2.2 Pentés et altitudes

Deux cartes topographiques de la zone ont été créées à l'aide du logiciel ArcGIS, la première caractérise les pentes et leurs variations, tandis que la deuxième caractérise les altitudes.

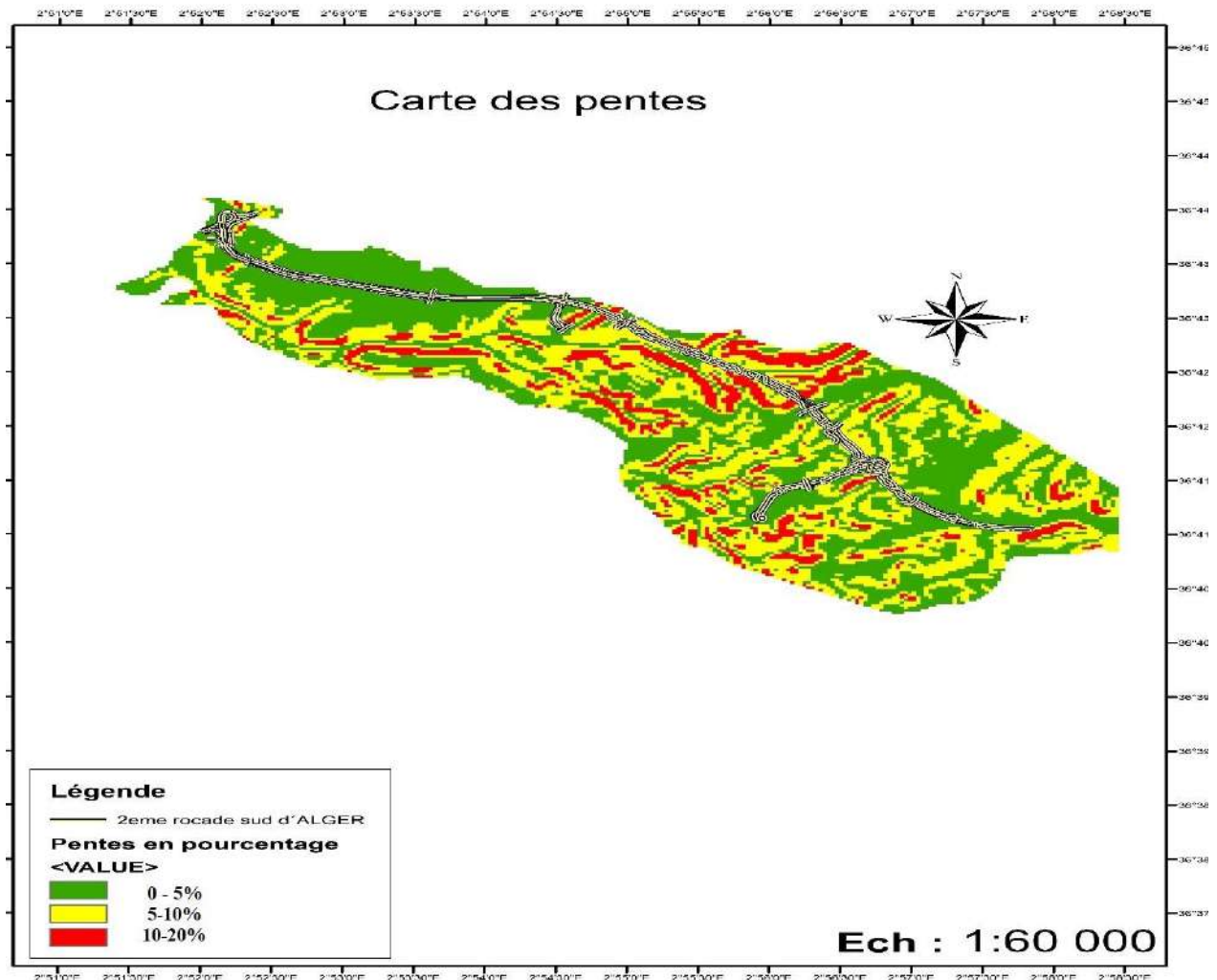


Figure I-4: Carte des pentes dans la zone d'étude.

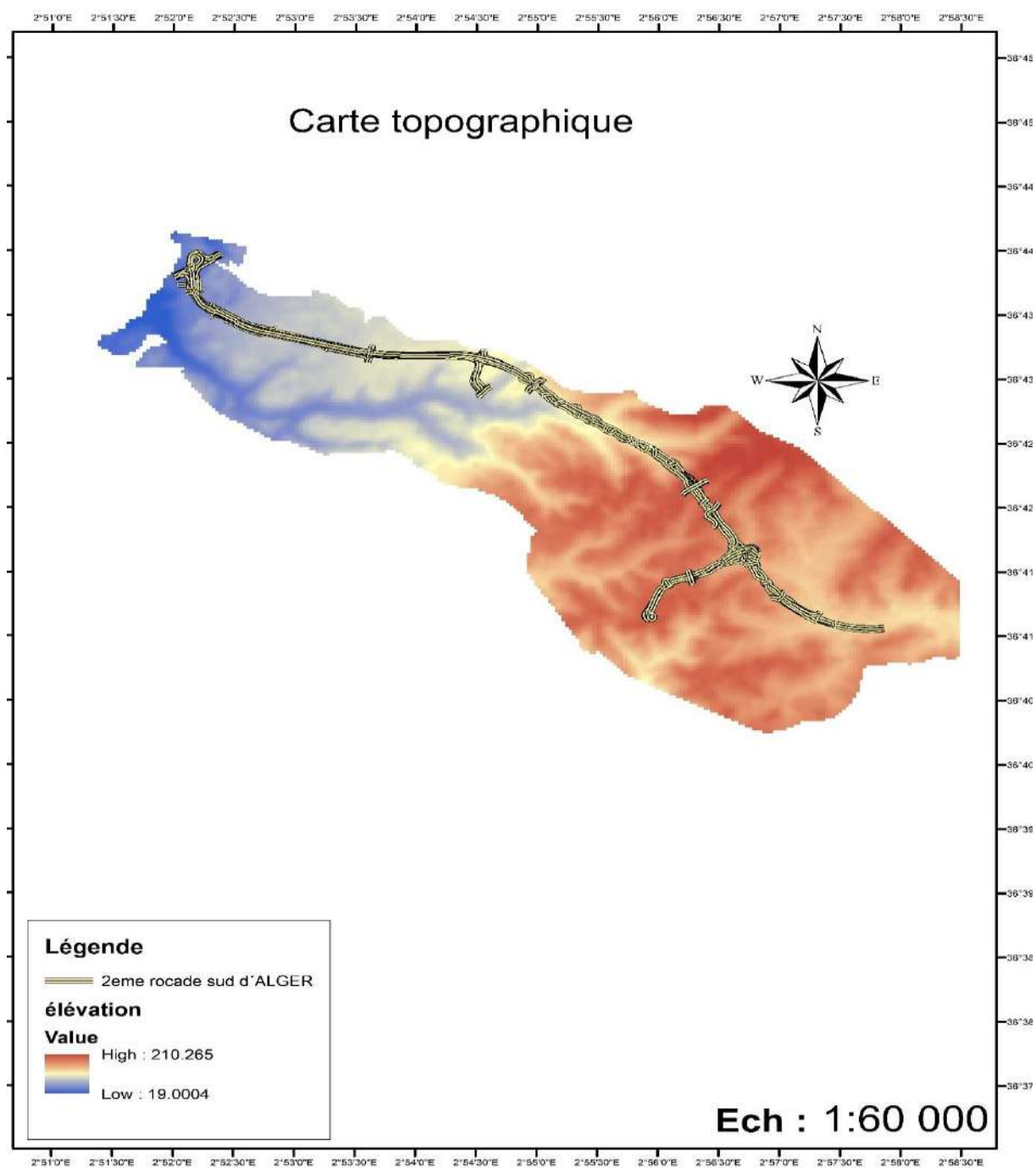


Figure I-5: Carte des altitudes de la zone d'étude.

Chapitre II : Présentation de la 2RSA.

En analysant la carte des altitudes, on remarque qu'en se rapprochant du littoral (vers le nord-ouest) les altitudes ont tendance à diminuer jusqu'à une altitude minimale de 19 m. En revanche, en allant vers le sud-est les altitudes augmentent jusqu'à atteindre une valeur maximale de 210 m. On remarque l'existence d'un réseau hydrographique important, repartie sur toute la zone, ce qui explique les variations des pentes élevées dans la zone.

En ayant toujours dans l'esprit les résultats des essais géotechniques, on peut déjà prévoir que les zones à pente forte dans la région sud-est présenteront une susceptibilité plus élevée aux glissements de terrain, ce constat sera détaillé dans la suite du projet.

II.2.3 Hydrographie

Le réseau hydrographique joue un rôle important dans la réponse hydrologique d'un bassin versant. Il est considéré comme l'élément clé dans l'interprétation sommaire des caractéristiques du sol et du sous-sol.

Par le biais des images Alsat1, il est possible de cartographier le réseau hydrographique. La résolution de 32 mètres des images Alsat1 fournit une échelle de travail au 1/80.000. Ces images rééchantillonnées à 40 mètres nous permettent de produire facilement des cartes hydrographiques actualisées à une échelle de 1/100.000

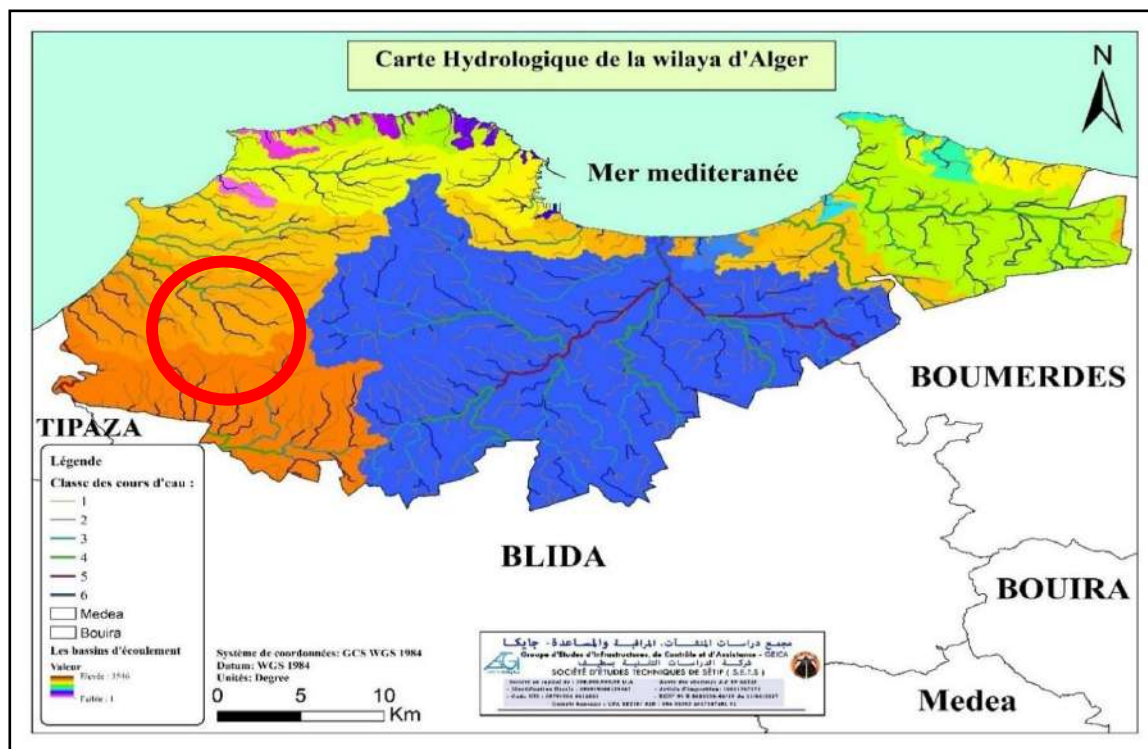


Figure I-6: Carte hydrologique de la wilaya d'Alger (SETS).

➤ Les Principaux Oueds

La wilaya d'Alger possède un réseau hydrographique assez riche en citant quelques-uns :

- Oued El Harrach.- Oued Smar.- Oued Ouchaiah.- Oued Kniss.
- Oued El Kerma.- Oued El Hamiz.- Oued M'kacel.- Oued Reghaia.- Oued Beni Messous.

➤ Ressources hydriques

La wilaya d'Alger est alimentée en eau par trois (03) ressources

- ✓ **Eaux souterraines** : Les eaux souterraines provenant de 251 forages pour un débit de 320.000 m³/jour situés pour la plupart au niveau des :
 - Champs de captage de Mazafran I et II
 - Champs de captage de Baraki
 - Champs de captage des Eucalyptus
 - Champs de captage de Hamiz
 - Champs de captage de Bouzareah
- ✓ **Eaux de surface** :
 - Système SPIK (barrages de Keddara, Hamiz, Béni Amrane et station de traitement de Boudouaou) d'une capacité de 540 000 m³/j
 - Système Taksebt d'une capacité de 613 000 m³/j dont 300.000 m³/j pour Alger.
 - Système SAA (Interconnexion des barrages Bouroumi et Boukerdane) d'une capacité de traitement de 130 000 m³/jour [18].
- ✓ **Eaux dessalées** :
 - Station de Dessalement du Hamma : 200.000 m³/jour.
 - Station de Dessalement de Fouka : 120.000 m³/jour dont 40.000 m³/jour pour Alger.
 - 01 Mini Station Mono Bloc de dessalement Palm Beach : 2.500 m³/jour [18].

II.3 Contexte climatique

La zone d'étude appartient à la zone climatique A (caractérisée par un climat tempéré Subhumide). L'influence régulatrice de la mer y est encore très nette. Cependant, au-dessous de 500 m, les étés sont plus chauds et moins humides, les hivers moins doux et plus longs que sur le littoral. Dans la plaine, la transition avec le littoral se fait sur quelques kilomètres.

Au-dessus de 500 m pour des régions de même altitude, l'hiver est pratiquement le même dans les zones A et B, l'été est plus chaud et un peu moins humide dans la zone B que dans la zone A. L'écart diurne est plus important que sur le littoral. Il est moyen en été (15°) quelle que soit l'altitude et augmente en général un peu les jours de forte chaleur. Le climat, en été, est aussi variable que dans la zone A.

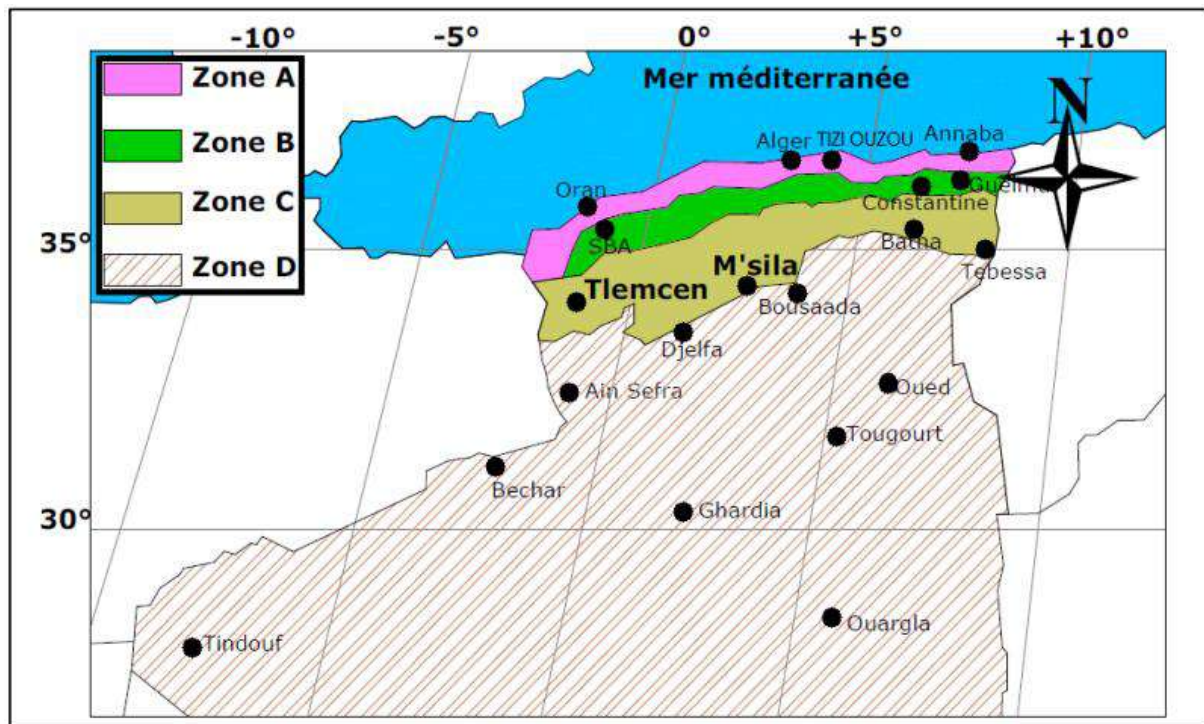


Figure I-7: Classification des zones climatiques en Algérie.

- ✓ **Zone A** : Littoral marin ;
- ✓ **Zone B** : Arrière littoral montagne,
- ✓ **Zone C** : Hauts plateaux ;
- ✓ **Zone D** : Présaharien et saharien.

La zone d'étude est soumise à un climat de type méditerranéen à étage subhumide littoral caractérisant l'ensemble des plaines côtières. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne du littoral, le climat devient de plus en plus continental et l'on enregistre une baisse sensible des températures.

II.3.1 Précipitations

Le tableau ci-dessous représente les précipitations moyennes mensuelles entre 1982 et 2012 enregistrées par la station météorologique de Bouzeréah.

Tableau I-1: Précipitations moyennes mensuelles entre 1982 et 2012.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Pluies (mm) 1982/2012	91	79	7	53	43	16	3	5	35	78	109	121	640

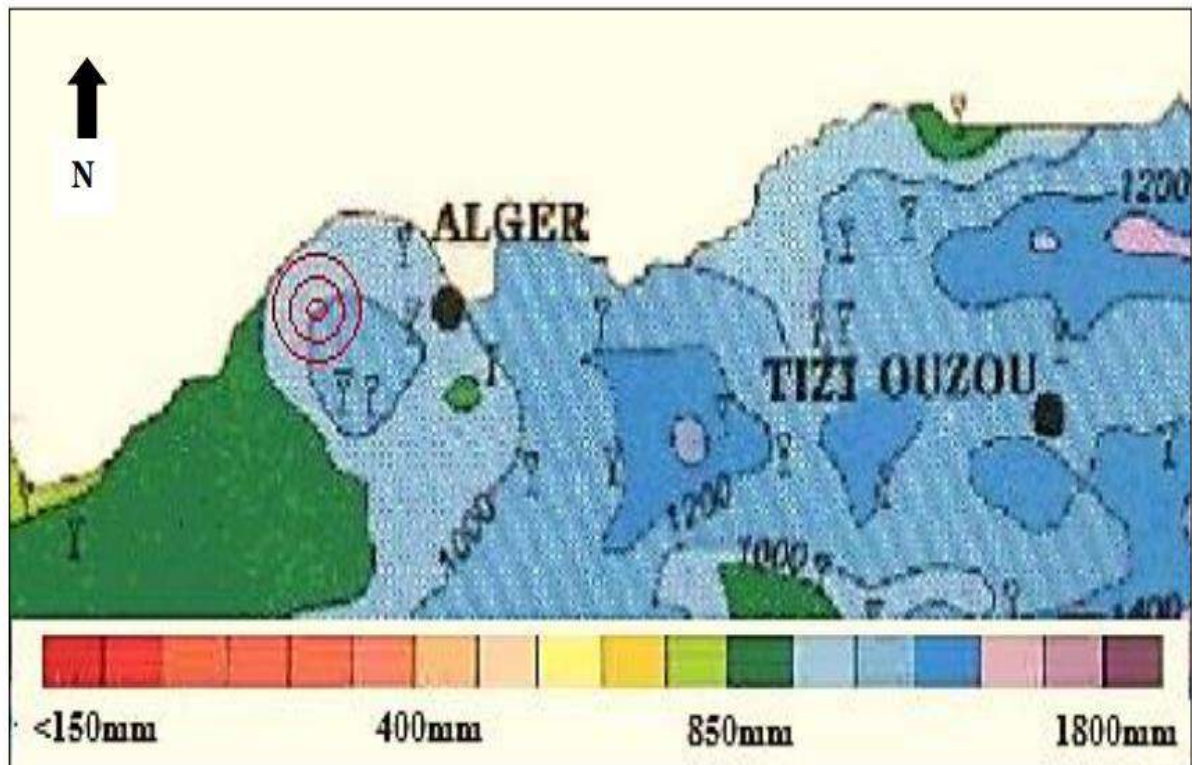


Figure I-8: Carte pluviométrique de la zone d'étude -ANRH-.

II.3.2 Températures

Le mois le plus chaud de l'année est celui d'Aout avec une température moyenne de 25.2 °C. Au mois de Janvier, la température moyenne est de 11.5 °C. Janvier est de ce fait le mois le plus froid de l'année.

Tableau I-2:Températures moyennes dans la région d'étude pendant 1982/2012.

	Jan	Fév	M	Av	Mai	J	JL	Ao	SEP	OCT	NOV	DEC
Température moyenne (°C)	11.5	12.1	13.5	15.5	18.2	21.5	24.3	25.2	23.3	19.4	15.1	12.3
Température minimale moyenne (°C)	8.1	8.3	9.7	11.3	14	17.4	20.2	21	19.6	15.7	11.5	9
Température maximale (°C)	14.9	15.9	17.3	19.7	22.5	25.6	28.5	29.5	27	23.2	18.8	15.6

II.3.3 Classification climatique

➤ Diagramme ombrothermique de Bagnols et Gaussen

En 1957, Gaussen a élaboré une classification du climat méditerranéen basée sur les rythmes des températures et précipitations au cours de l'année (moyennes mensuelles). Gaussen (1953), considère un mois est sec quand le total mensuel des précipitations exprimées en millimètre est égal ou inférieur au double de la température moyenne mensuelle exprimée en °C comme l'indique la relation suivante : $P = 2T$.

D'après le Diagramme ombrothermique de Bagnols et Gaussen, la période sèche s'étale du mi-mois de Mai jusqu'au mi- Septembre.

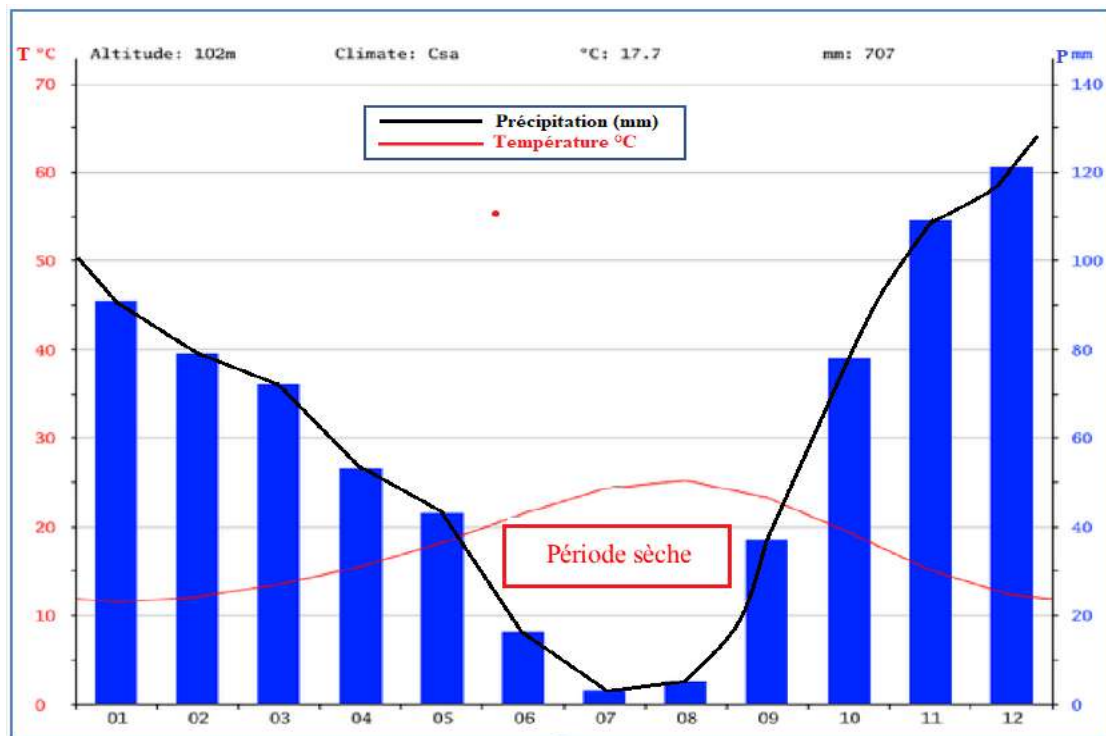


Figure I-9:Diagramme ombrothermique de Bagnols et Gaussen.

➤ Quotient Pluviométrique et Climagramme d'EMBERGER

La région d'étude se situe au Nord algérien appartenant au bassin méditerranéen.

Selon QUEZEL (1978), cette région appartient au domaine méditerranéen, appelé aussi domaine Méditerranéen Nord-Africain.

Pour le bassin méditerranéen, à partir d'un coefficient pluviométrique d'EMBERGER. EMBERGER a classé toutes les stations météorologiques suivant deux coordonnées :

- D'une part, les valeurs de ce coefficient.
- D'autre part, la moyenne des températures du mois le plus froid

EMBERGER (1930,1955), montre que le bassin méditerranéen dans son ensemble peut être subdivisé en cinq étages bioclimatiques : aride, semi-aride, subhumide, humide et per-humide :

Chapitre II : Présentation de la 2RSA.

Aride (P compris entre 100 et 400 mm)

Semi-aride (P entre 400 et 600 mm)

Subhumide (P entre 600 et 800 mm)

Humide (P entre 800 et 1200 mm)

➤ **Per-humide** (P > 1200 mm) (QUEZEL, 2000).

EMBERGER a réalisé un Climagramme où l'on retrouve l'ensemble de ces étages associés chacun à la température moyenne minimale du mois le plus froid et le coefficient pluviothermique correspondant. Ce climagramme permet de caractériser le climat d'une région et de la classer dans un étage bioclimatique.

Selon EMBERGER (1936), l'étage bioclimatique correspond à l'étage de végétation et les diverses structures de végétation qui correspondent à des critères écologiques spécifiques, notamment en fonction des étages altitudinaux de végétation et de types bioclimatiques (QUEZEL et al.1990), peuvent être représentés sur le Climagramme (QUEZEL, 2000).

➤ Calcul du quotient pluviothermique d'EMBERGER

Le calcul du quotient pluviothermique "Q₂" d'EMBERGER est nécessaire pour déterminer l'étage bioclimatique de chaque région. Pour cela nous prenons en considération les paramètres ci-dessous :

- ✓ **P** : Précipitations annuelles en mm ;
- ✓ **M** : Moyenne des maxima du mois le plus chaud ;
- ✓ **m** : Moyenne des minima du mois le plus froid.

La formule utilisée pour le calcul est la suivante :

$$Q_2 = \frac{3,43 \times P}{M - m} \quad (I-1)$$

Q₂ = 102.57.

Ce Quotient a permis de situer la zone d'étude dans le **climat Subhumide** à hiver Chaud comme le montre la figure suivante :

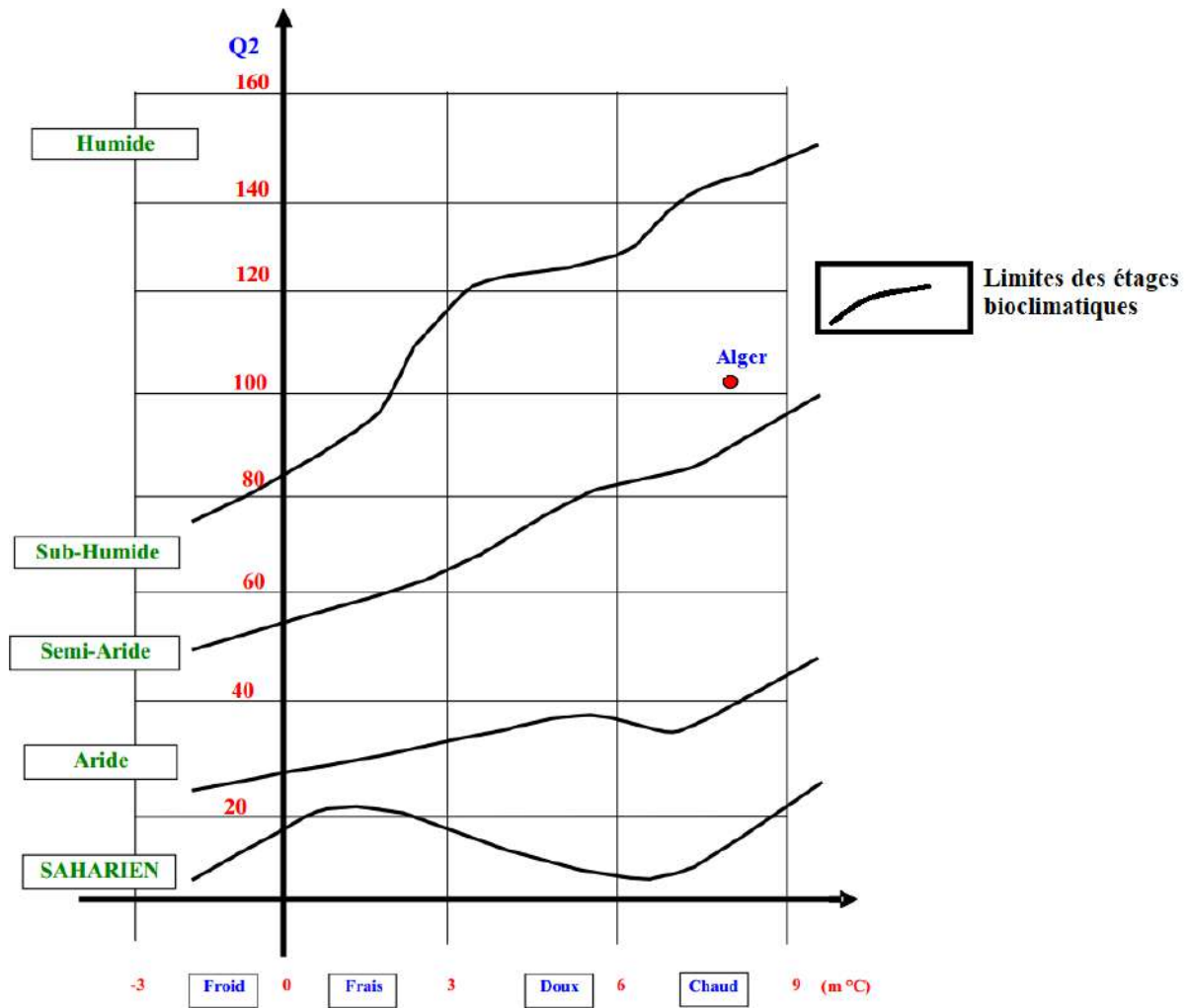


Figure I-10: Climagramme D'EMBERGER.

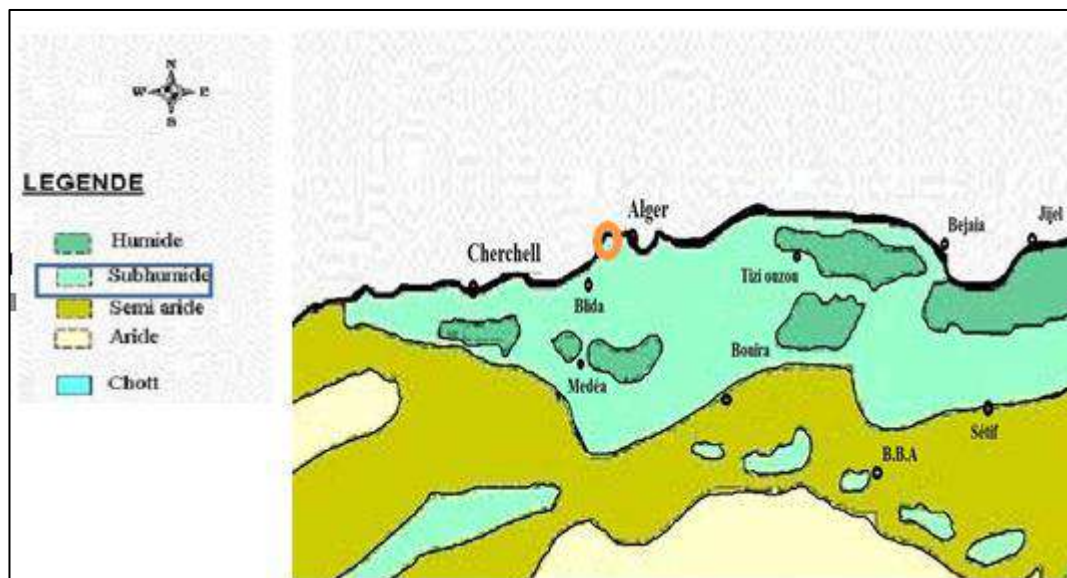


Figure I-11: Les étages bioclimatiques de l'Algérie.

➤ Conclusion

Le climat de la région d'étude est pratiquement du type méditerranéen comme tout le Nord Algérien cette région est caractérisée par :

La concentration de pluies pendant la période froide (maximum de 121 mm en DECEMBRE).

Une sécheresse apparente pendant les mois les plus chauds de JUIN jusqu'à Septembre (minimum de 0,0 mm en mois d'Août).

La durée de la saison sèche est en moyenne de 02 mois (JUILLET ET AOUT).

L'utilisation du quotient **pluviothermique d'EMBERGER** dont l'application est propre aux régions méditerranéennes permet de classer la région d'étude dans l'étage bioclimatique **Subhumide**. Cette classification repose sur une moyenne Annuelle pour une caractérisation fiable du climat de la région.

II.4 Contexte Géotechnique

Lors de l'étude et la réalisation du tronçon autoroutier plusieurs sondages ont été fait le long du tracé (2006-2009) :

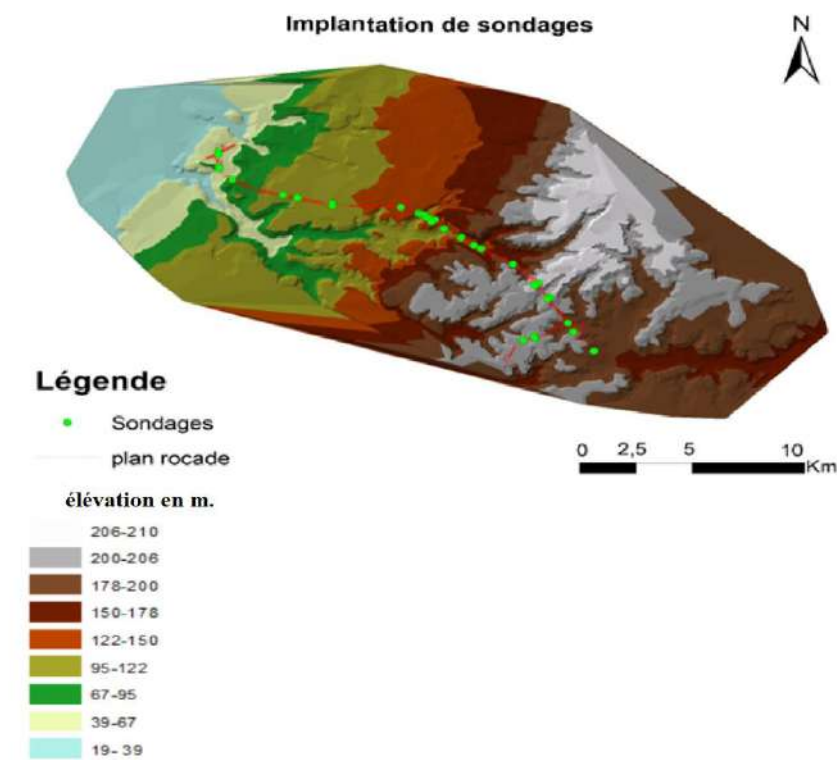


Figure I-12: Implantation des sondages.

Chapitre II : Présentation de la 2RSA.

Les résultats des essais laboratoires réalisés sur les échantillons pris sont résumés dans le tableau suivant :

Chapitre II : Présentation de la 2RSA.

Tableau I-3: Résultats des essais laboratoire des échantillons.

Puits N°	x	Y	Profondeur (m)	Classe du sol selon GT R	Classe du sol selon LCP C	Teneur en eau naturelle : ω (%)			Granulométrie		Limites	ATTERBERG	Valeur de bleu de méthylène (%)	Equivalent de sable : ES (%)
							% des passants à 5 mm	% des passants à 2 mm	% des passants à 0.40 mm	% des passants à 80 μ	Limite de liquidité L_L	Indice de plasticité I_P		
P-200	488341.12	4064794.47	1.00-1.50	B1	SL-Sm	4.93	91.1	83.62	63.39	6.25	Non Mesuré	Non Mesuré		69.32
P-202	488349.88	4064422.23	0.80-1.20	B3	SA-Sm	5.5	70.87	61.29	48.48	8.9	52.3	28.01		42.59
P-204	488613.02	4064117.41	0.80-1.20	B3	SL	10.92	54.8	41.58	39.33	26.31	Non Mesuré	Non Mesuré		23.84
P-205	489590.87	4063746.29	1.00-1.50	B5	SA	12.28	89.82	89.27	75.81	16.53	17.8	7.46		23.56
P-206	489864.84	4063679.47	1.40-1.80	B5	SA	8.36	100	100	90.55	31.08	21	10.4		16.11
P-207	490542.51	4063540.65	1.00-1.40	A2	SA	10.43	97	96.12	74.34	42.62	41	20.83		0.96

Chapitre II : Présentation de la 2RSA.

P-208	490535.83	4063500.32	0.80-1.20	A2	SA	16.35	96.78	94.99	83.24	49.79	45	22.31		1.55
P-209	491858.97	4063451.36	2.00-2.40	B5	SA	9.07	100	99.49	79.72	34.5	20	8.13		46.94
P-210	492209.08	4063324.33	3.00-3.40	A1	SL	6.4	/	/	100	99.54	84.93	20	16.8	5.55
P-213	492271.54	4063288.51	2.00-2.50	A3	SA	27.36	96.5	1.96	100	100	100	100	71.9	37.05
P-214	492289.23	4063256.56	1.80-2.20	A3	SA	29.57	99.69	1.95	100	100	99.5	98.68	74.8	37.63
P-217	492380.86	4063212.89	2.20-2.70	A2	SA	21.1	34.6	1.99	100	100	100	98.1	43	21.83
P-218	492415.89	4063192.31	3.00-3.40	A3	SA	25.5	92.69	1.95	100	99.67	99.6	99.43	58	31.13
P-220	492514.08	4063152.31	3.00-3.40	A3	SA	17.5	68.62	1.88	99.8	99.76	99.7	99.23	59	30.06
P-222	492695.56	4062934.09	2.00-2.50	A2	SA	8	46.13	1.99	100	100	100	100	40	19.94
P-224	493017.89	4062706.56	3.00-3.50	A3	SA	18.5	80.85	1.99	100	100	99.74	98.3	53.1	28.29
P-226	493406.76	4062452.32	2.00-2.50	A3	SA	23.2	83.06	1.9	100	100	100	93.32	71.5	36.96
P-228	494522.73	4061626.41	1.20-2.00	A2	SA	13.3	61.94	1.94	100	97.48	84.73	48.91	34.5	17.04

Chapitre II : Présentation de la 2RSA.

La classification GTR des sols de la zone a montré qu'il existe principalement deux grandes classes des sols, les sols de classe A c'est les sols fins, et les sols de classe B sont des sols sableux et graveleux avec des fines.

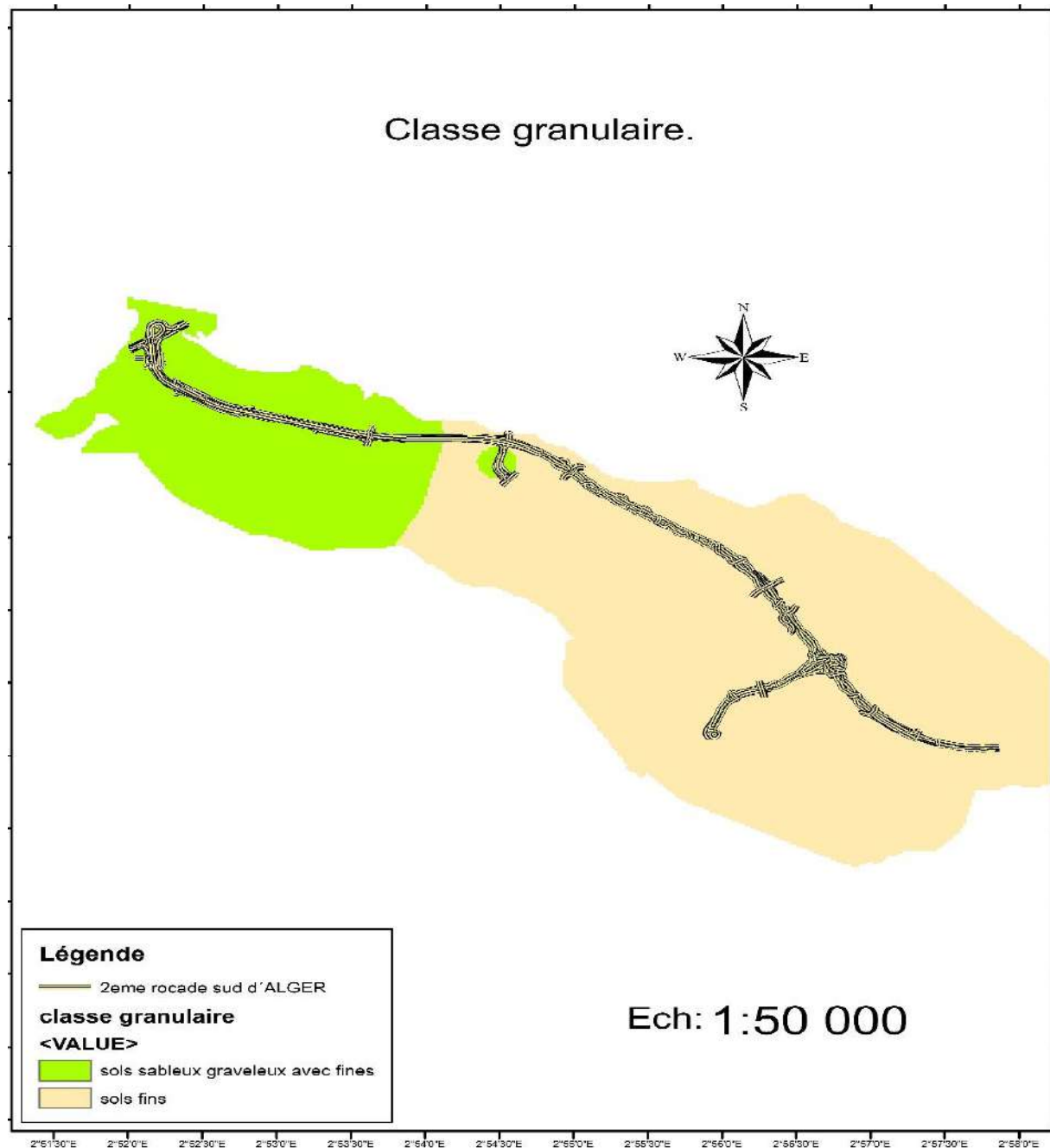


Figure I-13: Typologie des sols superficiels de la zone d'étude.

Chapitre II : Présentation de la 2RSA.

On remarque à travers la carte présentée que les sols fins dominent la partie sud, de la zone, il s'agit principalement de 2 sous classes (selon le guide des terrassements routiers) :

➤ Les Sols A₂

Ce sont les sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques. Ce sont des sols tendres, finement poreux, friables quand ils sont secs, et plastiques lorsqu'ils sont mouillés.

➤ Les sols A₃

Ce sont les argiles et les argiles marneuses, limons très plastiques. Ces sols sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible, et collants ou glissants à l'état humide. Leurs perméabilités est très réduite ce qui rend leurs variations de teneur en eau très lentes, en place.

La partie nord est caractérisée par des sols sableux et graveleux avec fines, il s'agit principalement de 2 sous classes :

➤ Les sols B₃

Ce sont les graves silteuses, ces sols sont graveleux généralement insensibles à l'eau. Mais dans certains cas (extraction dans la nappe...) cette insensibilité devra être confirmée par des études complémentaires.

➤ Les sols B₅

Ce sont les sables et graves très silteux, la proportion des fines et la faible plasticité de ces sols rapproche beaucoup leurs comportements des sols A₁. Il est à noter que les sols A₁ changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau.

Chapitre III : Création du modèle BIM de la zone d'étude

III.1 Flux de travail

Le flux de travail est simple et se repose principalement sur les étapes suivantes :

- La création d'une maquette numérique riche de données sur INFRAWORKS
- L'importation des données de la maquette vers CIVIL 3D.
- Une conception détaillée du tronçon existant, en se basant sur le dossier As-Built.
- L'exportation des données de CIVIL 3D vers INFRAWORKS.
- Mise en exploitation de la maquette.

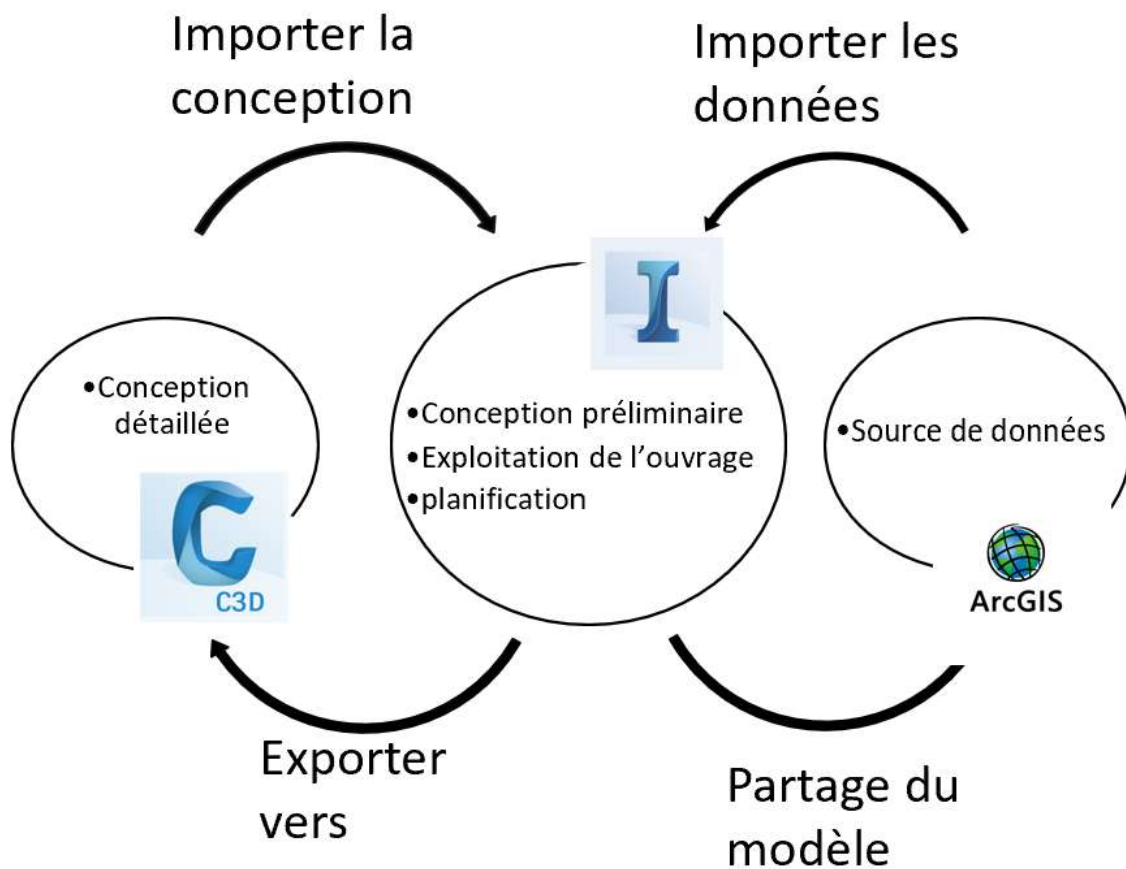


Figure III-1: Flux de travail BIM-SIG.

III.2 La création du modèle

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.

Le logiciel INFRAWORKS propose des modèles créer à partir de la base de données Autodesk, à travers l'outil Model Builder

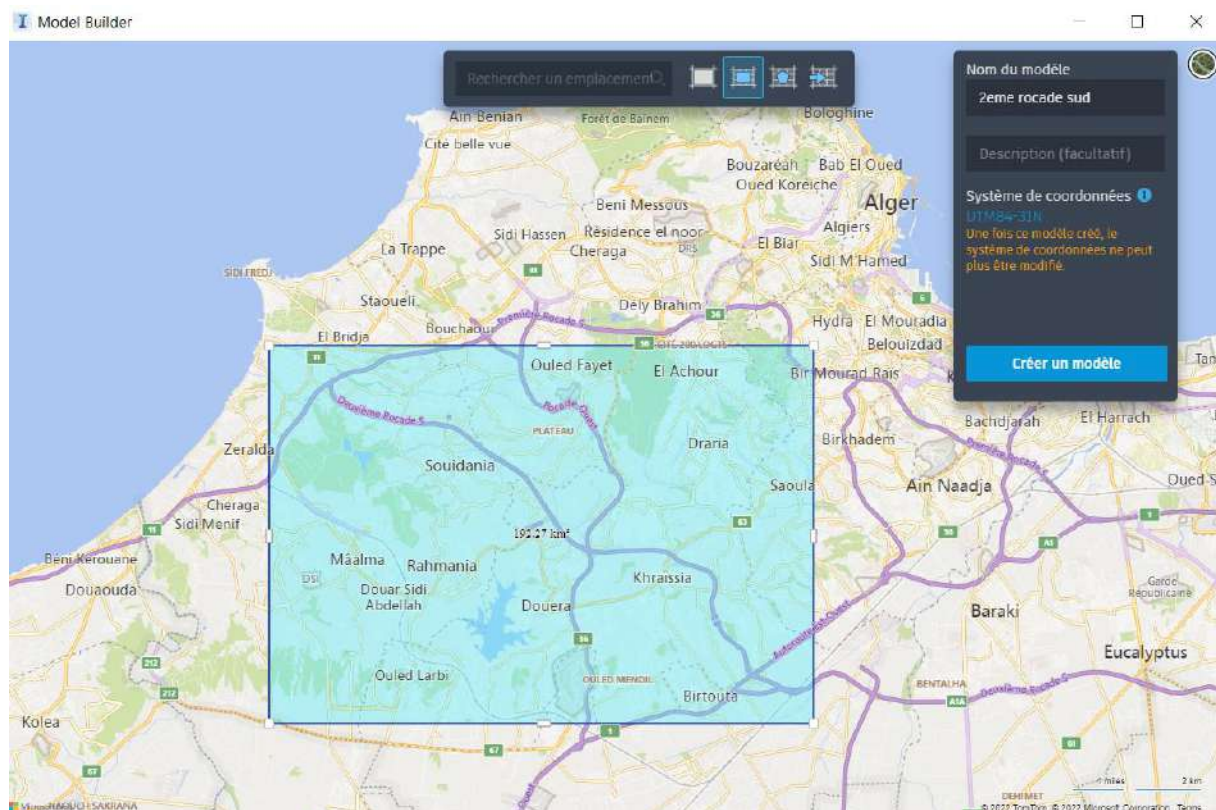


Figure III-2: Délimitation de la zone pour créer le modèle.

Une étape très importante dans la création du model est de spécifier le système de coordonnées du modèle qui va par la suite permettre l'interopérabilité entre les différentes extensions du modèle.

Une fois la demande est faite, Autodesk partage sa base de données avec nous qui va nous permettre d'établir la maquette numérique présentée dans la figure ci-dessous



Figure III-3: Maquette numérique préliminaire.

III.2.1 Acquisition des données

Une fois la maquette préliminaire est créée, il faut lui attribuer les données relatives à l'environnement de notre projet, il s'agit principalement de :

- Le Model Numérique de terrain : pour la création de ce dernier nous avons utilisé le Logiciel Global Mapper qui va nous délivrer une surface DEM (Digital Elevation Model) avec extension .tif qu'on peut exporter à INFRAWORKS

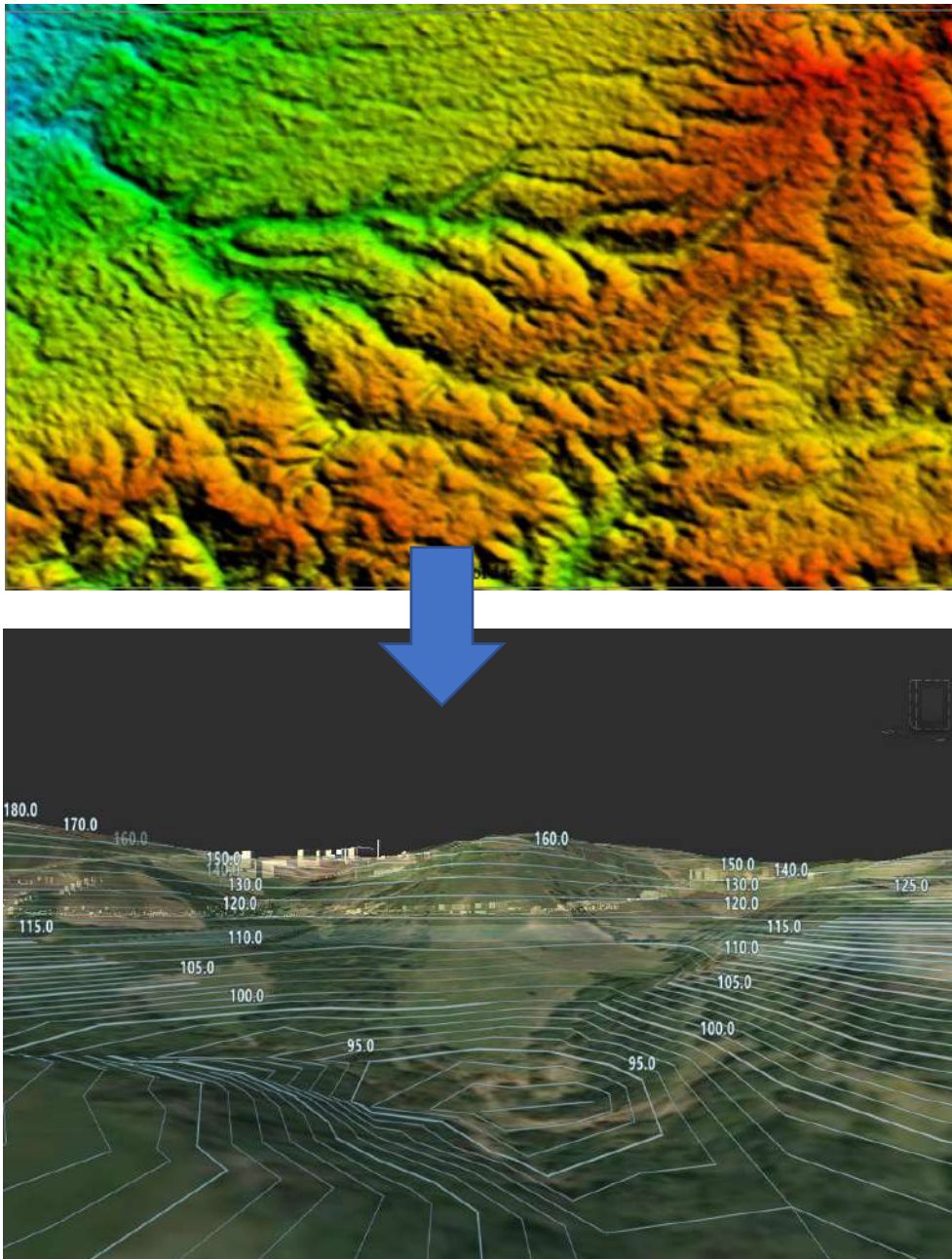


Figure III-4: Création du MNT.

Bien que le MNT importé à travers global mapper ait une résolution satisfaisante, il reste insuffisant pour l'emprise de la route. Il ne permet pas de bien définir les zones remblais/Déblais avec exactitude. Pour cela nous avons procédé à la création d'une surface à travers le levé Topographique initial de la route, que nous avons pu obtenir de chez l'Algérienne Des Autoroutes

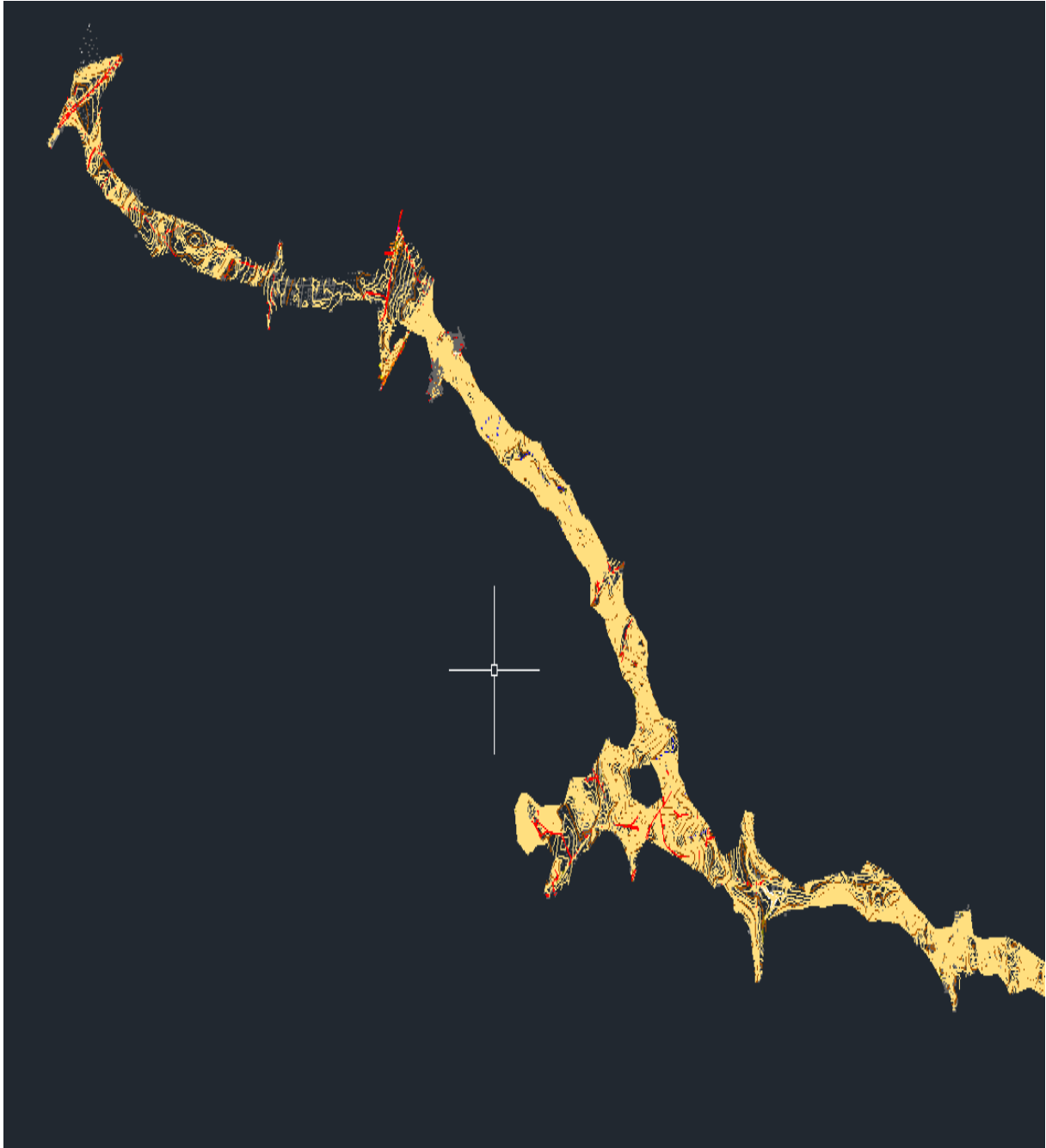


Figure III-5: Levé topographique.

Le premier problème que nous avons rencontré est que les plans obtenus ne sont pas géoréférencés, A cet effet nous avons procédé au géoréférencement des plans.

III.2.2 Les cours d'eau naturel

Pour obtenir ces derniers nous avons utilisé le site de sources de données ouvertes OpenStreetMap qui propose les cours d'eau en format Shapefile reconnu par INFRAWORKS.

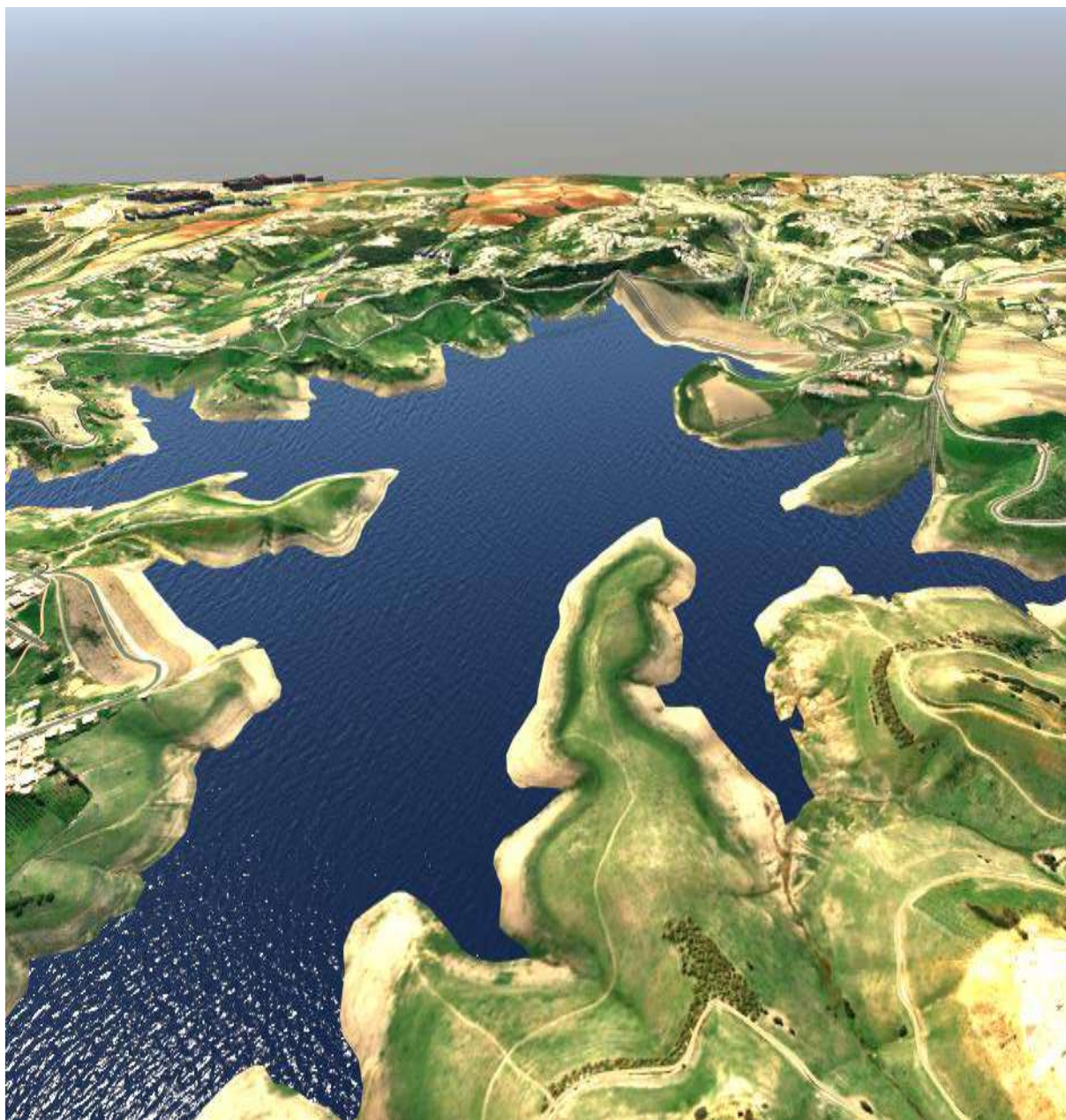


Figure III-6: Création des cours d'eau, vu sur le barrage de Douera.

III.2.3 Le réseau routier

Le réseau routier est créé automatiquement à travers le Model Builder que propose INFRAWORKS, Il s'agit d'un réseau détecté par des images satellitaires, et puis transformé en routes qu'on peut modifier et exploiter, le logiciel INFRAWORKS propose deux types de routes :

- **Les routes de planification** : 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 dans les études préliminaires.
- **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 composant de la route.

Bien que les routes à composants soient plus avancées que les routes de planification ils ne permettent pas de reprendre avec exactitude la réalité de la route, les développeurs du logiciel INFRAWORKS travaillent toujours sur ces routes là pour satisfaire le besoin des études routières, la conception détaillée du tronçon étudié fera l'objet du prochain chapitre.



Figure III-7: Le réseau routier existant.

III.2.4 Les bâtiments

Les bâtiments de la zone sont téléchargés à travers le site OpenStreetMap, en format Shapefile.



Figure III-8: Création des bâtiments, vu sur la ville de Baba-hassen.

Ce que nous avons réalisé jusqu'ici montre bien la souplesse et la force de l'alliance BIM-SIG, Nous avons établi une nouvelle extension du concept BIM qui est le City Information Modeling CIM.

III.2.5 Les parcelles

Les parcelles sont très importantes dans les études préliminaires et détaillées pour pouvoir estimer avec exactitude les montants relatifs aux expropriations des terrains compris dans l'emprise du projet routier.

Les parcelles peuvent être communiquées de la part du Plan d'occupation des sols POS, ou bien directement téléchargées du site OpenStreetMap, les données communiquées par le POS sont plus fiables.

III.3 City Information Modeling CIM

Si le BIM est une technologie récente, les SIG existent depuis les années 1960. Lors de leur création, leur vocation est simple : croiser, à la fois les données géographiques, les données statistiques, et les bases de données. D'une part, nous avons donc le BIM, les maquettes numériques de bâtiment, qui regroupent toutes les informations techniques liées au bâtiment. D'autre part, les SIG, qui permettent de visualiser en toute intelligence le fonctionnement d'un espace (infrastructures, accessibilité, etc). Et si on liait les deux ? [19]

En associant ces deux technologies complémentaires, on peut modéliser des écosystèmes qui vont bien au-delà de l'immeuble et ainsi prévoir des réseaux de raccordement cohérents, des infrastructures véritablement accessibles, ou encore envisager des simulations à l'échelle de la ville (trafic routier, accident, événement naturel, etc..) et comprendre leur impact sur les bâtiments. Lier le BIM et le SIG c'est donc le meilleur moyen de construire les fameuses "smart cities" du futur : ces villes connectées et intelligentes qui analysent et améliorent en permanence leur fonctionnement. [19]

***Chapitre IV : Conception
détaillée et vérification
géométrique de
l'infrastructure routière.***

IV.1 Introduction

Comme nous avons vu dans le chapitre précédent, les routes créées à travers le Model Builder ne présentent pas le détail nécessaire pour créer le jumeau numérique de notre tronçon. La création de ce dernier peut être réalisée à travers les scanners 3D dynamique, ou bien à travers des drones. Dans notre cas, nous n'avons pas eu la chance d'acquérir ces derniers. L'objet de ce chapitre est de proposer une méthode de création d'un jumeau numérique à travers les données du dossier As-Built (tel que construit) communiqué par l'Algérienne Des Autoroutes.

IV.2 Un facteur clé

L'un des avantages du Building Information Modeling, est l'interopérabilité des données entre les différents logiciels, dans le chapitre précédent nous avons démontré en quelques étapes simples, nous sommes arrivés à créer une maquette numérique, qui représente les informations de la ville, à partir de la topographie jusqu'aux bâtiments, nous aurions pu développer encore en adoptant le réseau d'assainissement et une infinité de détail. Tout ça n'aurait jamais pu exister sans les passerelles entre les logiciels, qu'on définit par l'interopérabilité. Les échanges des informations entre les différents acteurs du projet est désormais plus facile grâce à cette caractéristique qui a révolutionné le monde du BTPH. Dans notre étude nous avons exploité cette caractéristique dans la création de notre jumeau numérique en important les données de la maquette créée sur INFRAWORKS vers CIVIL 3D travailler sur le model et par la suite le réimporter vers INFRAWORKS pour le mettre en exploitation, une fois la maquette est prête on pourra l'exporter vers une base de données SIG à travers le ArcGIS connector dans INFRAWORKS.

IV.3 Conception de la géométrie du tronçon

Bien que la géométrie existe déjà dans des plans CAO ANNEXE 1, le non géoréférencement des plans, et les dimensions de ces derniers (2D) ne permettent pas la bonne exploitation de ces derniers. Nous avons donc procédé à la recréation de ces plans, dans un système de coordonnées bien défini.

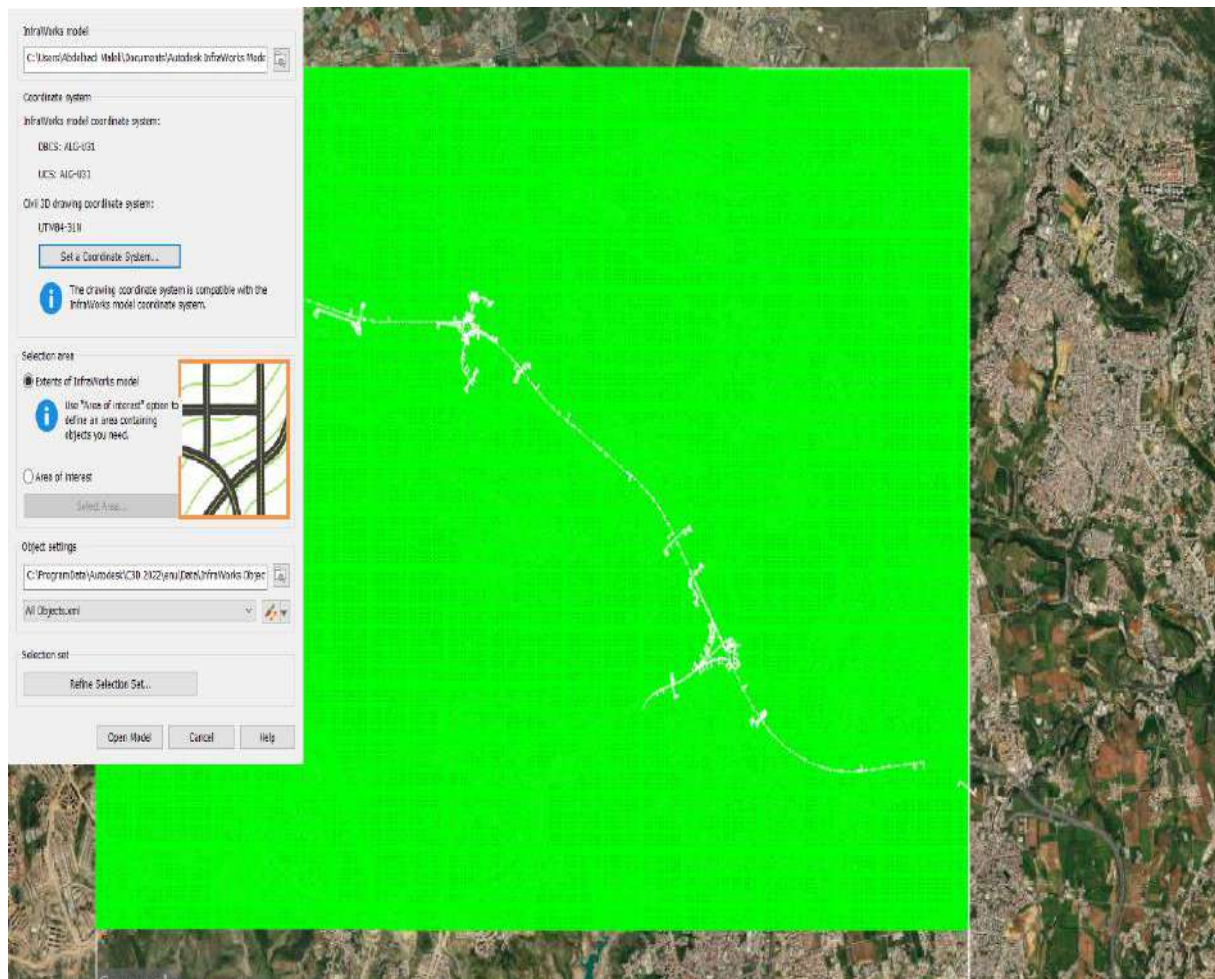


Figure IV-1: Import des données de la maquette dans Civil 3D.

Une fois les données sont importées nous avons procédé à la création du tracé en plan pour obtenir le même tracé présenté dans l'ANNEXE 1. En créant les mêmes éléments que le tracé de la CAO.

IV.3.1 Recréation du tracé en plan

Il met en évidence les longueurs des sections rectilignes et la valeur des rayons de courbure dans les virages [20].

Le tracé en plan est composé de :

- ✓ Alignements droits,
- ✓ Arcs de cercle,
- ✓ Raccordements progressifs

✓ Procédure de recréation

Pour recréer le tracé en plan nous avons procédé de la manière suivante :

- Le Géoréférencement du plan CAO à travers CIVIL 3D.
- Exporter le plan vers le fichier créé à travers INFRAWORKS.

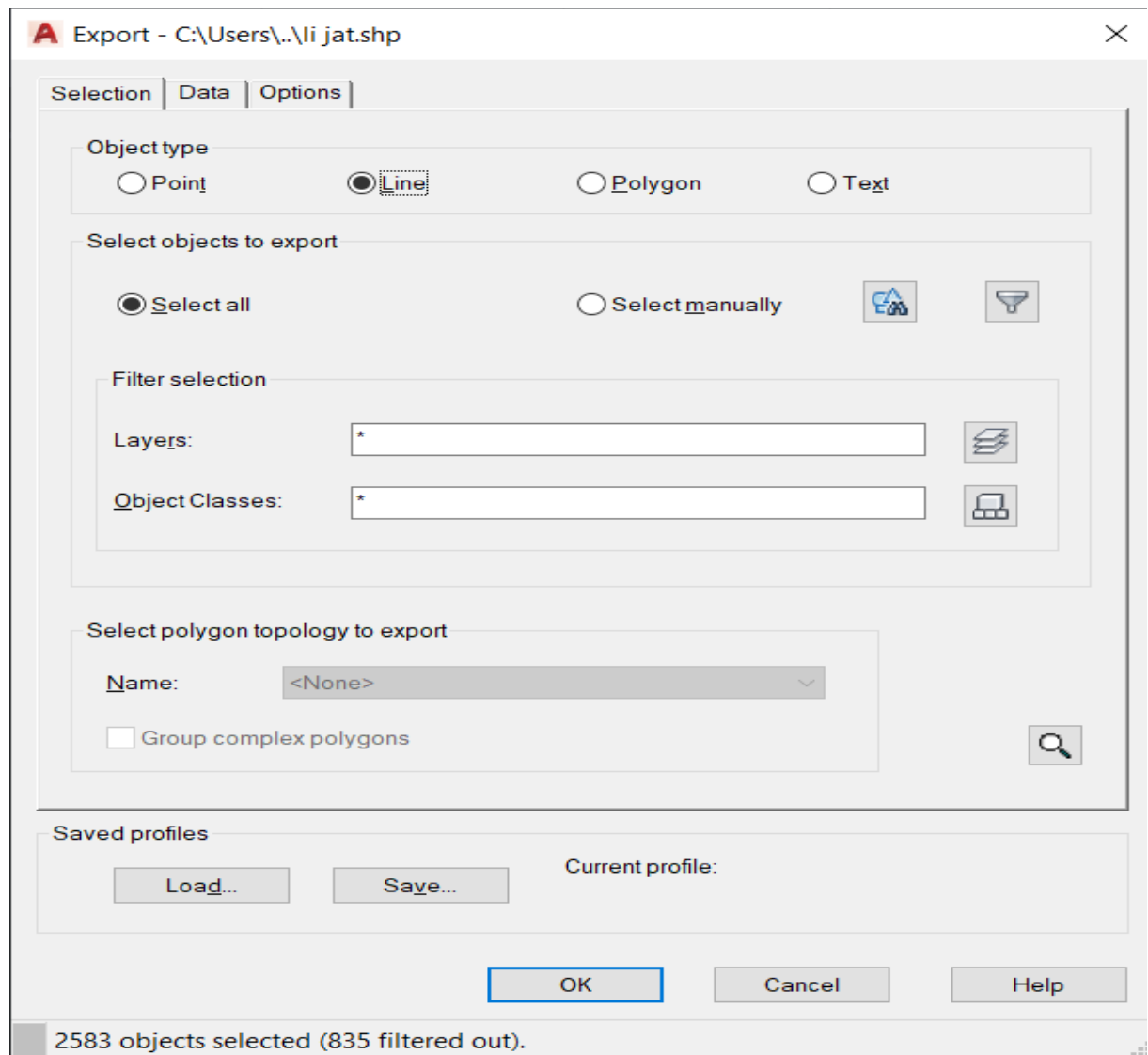


Figure IV-2: Export du tracé en plan.

- Convertir le tracé en format Line/polyline à un tracé format vecteur.

Le résultat obtenu est dans la figure ci-dessous :



Figure IV-3: Tracé recréé.

Note : le tracé recréé automatiquement évite le problème des pertes de données étant donné que le listing de l'axe n'était pas disponible dans le dossier As-Build.

IV.3.1.1 Recréation du profil en long

C'est la projection de l'axe de la route projetée sur un plan vertical, il indique la limite de la couche de roulement et composé par des alignements, des déclivités et des raccordements paraboliques [20].

Le profil en long est composé de :

- ✓ Alignements droits
- ✓ Déclivités

Chapitre IV : Conception détaillée et vérification géométrique de l'IR.

✓ Raccordements paraboliques

➤ Procédure de recreation

Contrairement au tracé en plan, il n'existe pas une méthode pour importer directement le profil en long et le relié au nouveau tracé. À cet effet nous avons dû recalculer quelque paramètre du nouveau profil à travers le profil présenté dans l'ANNEXE 1.

Comme le listing du profil n'est pas disponible nous avons effectué des calculs pour déterminer les paramètres suivants :

- Les points d'intersections des alignements droits avant l'application des raccordements paraboliques.

Un exemple illustratif est présenté ci-dessous :

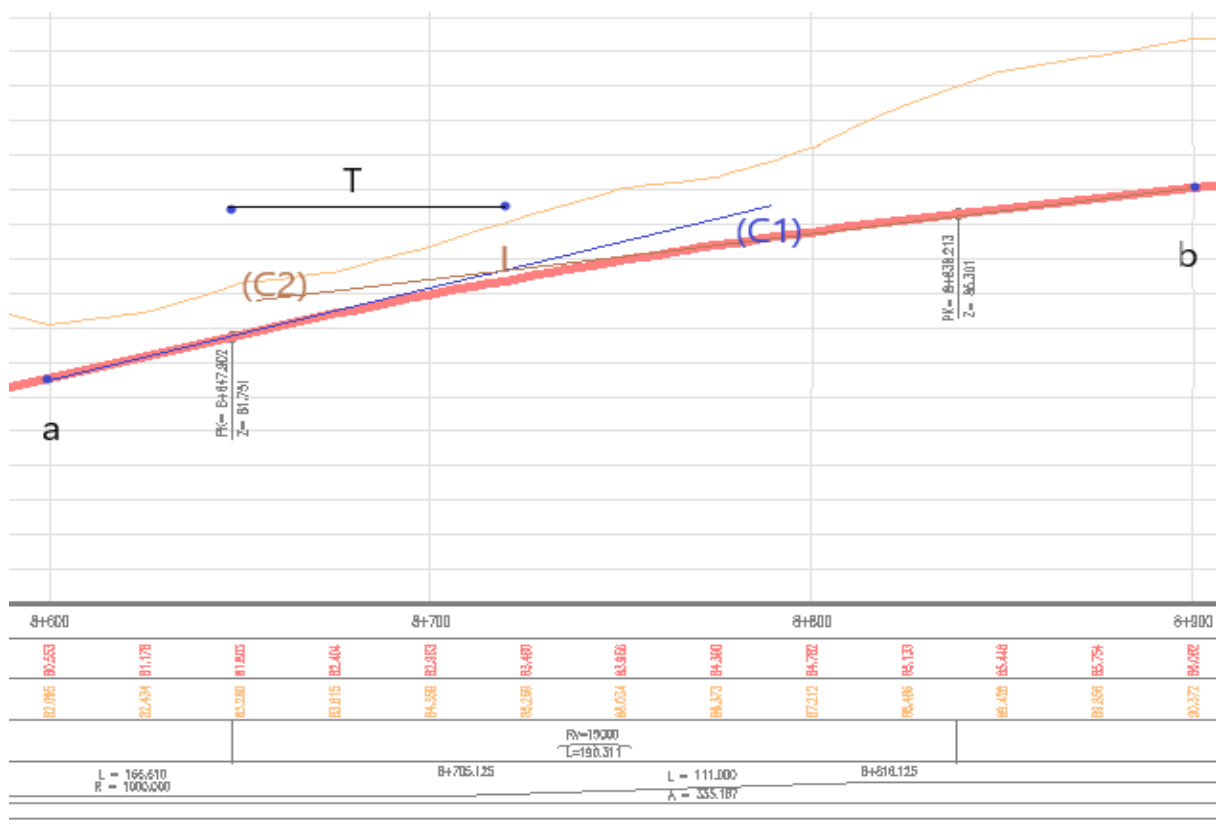


Figure IV-4: Exemple illustratif du calcul du profil en long.

Dans cet exemple nous avons deux droites C1 ($i_1=0.025$) et (C2) ($i_2 = 0.01231$). Le point a de coordonnées (0 ; 80.553) correspond au début de la droite (C1) au Pk 8+600 et le point b (300 ; 86.062) correspond au début de la droite (C2) au Pk 8+900. Le point I correspond à

l'intersection des droites (C1) (C2). Les droites sont raccordées par une parabole de Rayon $R = 15000$ m et de longueur $L = 190.311$.

- Equation de la droite (C1) : $Y_1 = 0.025 X + 80.553$.
- Equation de la droite (C2) : $y_2 = 0.01231 X + 82.369$.

On résout l'équation $Y_1 = Y_2$ pour obtenir les coordonnées du point I :

$X_I = 143.1048$ m. ; $Y_I = 84.13062$ m.

Note : les coordonnées des débuts et fins de raccordement sont mentionné sur les profils en ANNEXE 1.

Nous obtenons alors le Profil en long présenté ci-dessous.

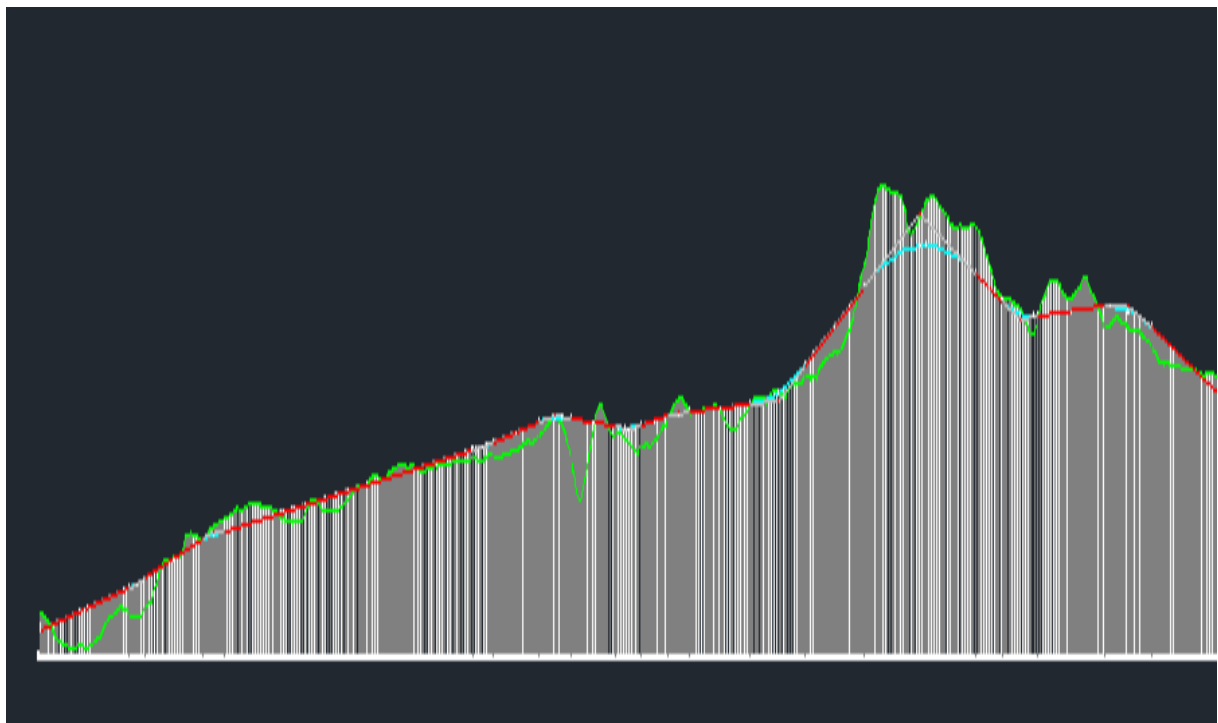


Figure IV-5: Profil en Long.

Note : le profil et le tracé créé ne sont pas présentés en forme Présentation CAO car le but est de présenter la route à travers la maquette numérique et ces plans ne sont que des étapes intermédiaires.

IV.3.1.2 Recréation des profils en travers

C'est la projection de l'axe de la route projetée suivant un plan perpendiculaire, il indique la nature des matériaux, ainsi que les épaisseurs des couches formant le corps de chaussée [20].

Chapitre IV : Conception détaillée et vérification géométrique de l'IR.

Le dessin d'un profil en travers est composé, d'une manière générale par les éléments suivants [20]:

- ✓ Terrain naturel
- ✓ Chaussée
- ✓ Accotements
- ✓ Dévers
- ✓ Corps de chaussée
- ✓ Talus de déblai
- ✓ Talus de remblai
- ✓ Pentes des talus
- ✓ Fossé (ouverture et profondeur)
- ✓ Limite des terrassements (assiette)
- ✓ Distances entre profils
- ✓ Coupe longitudinale d'un ouvrage hydraulique
- ✓ Etc...

Le profil en travers type de la rocade est présenté en **ANNEXE 2**.

➤ Procédure de recréation

Bien comme les profils en long il n'existe pas un moyen d'importer directement le profil en travers, nous avons donc redessiné le profil en travers type, et par la suite le projeter sur l'axe pour avoir les profils en travers courants.

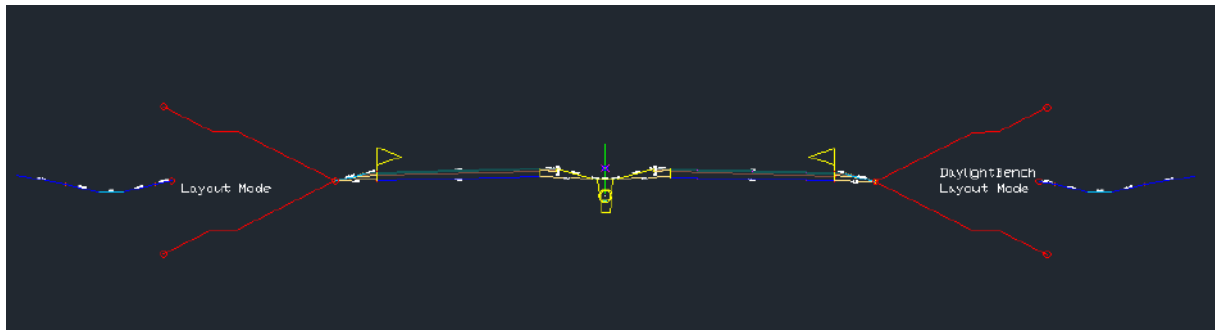


Figure IV-6: Profil en travers recréé.

IV.4 Import de la route à INFRAWORKS

Une fois la conception détaillée est terminée sur le logiciel CIVIL 3D, on l'importe à INFRAWORKS et on spécifie la nature des éléments ainsi que les matériaux de la route composé.

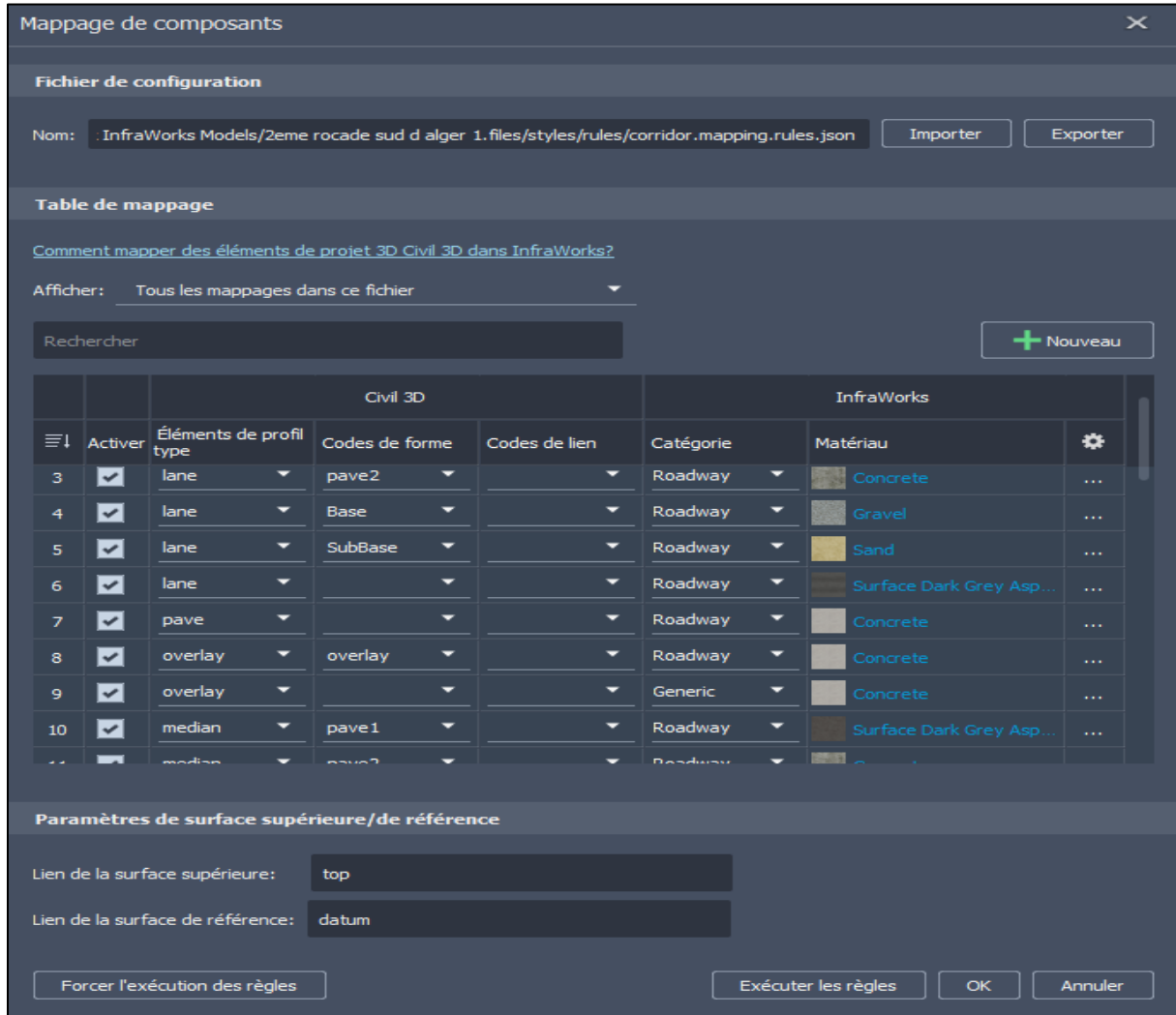


Figure IV-7: Import des éléments de la route à INFRAWORKS.



Figure IV-8: Route importée sur INFRAWORKS.

Note : si on souhaite modifier la géométrie de la route, on procède de la manière suivante :

- Modifier la géométrie sur CIVIL 3D.
- Réimporter les changements seulement sur INRAWORKS en une seule clique.

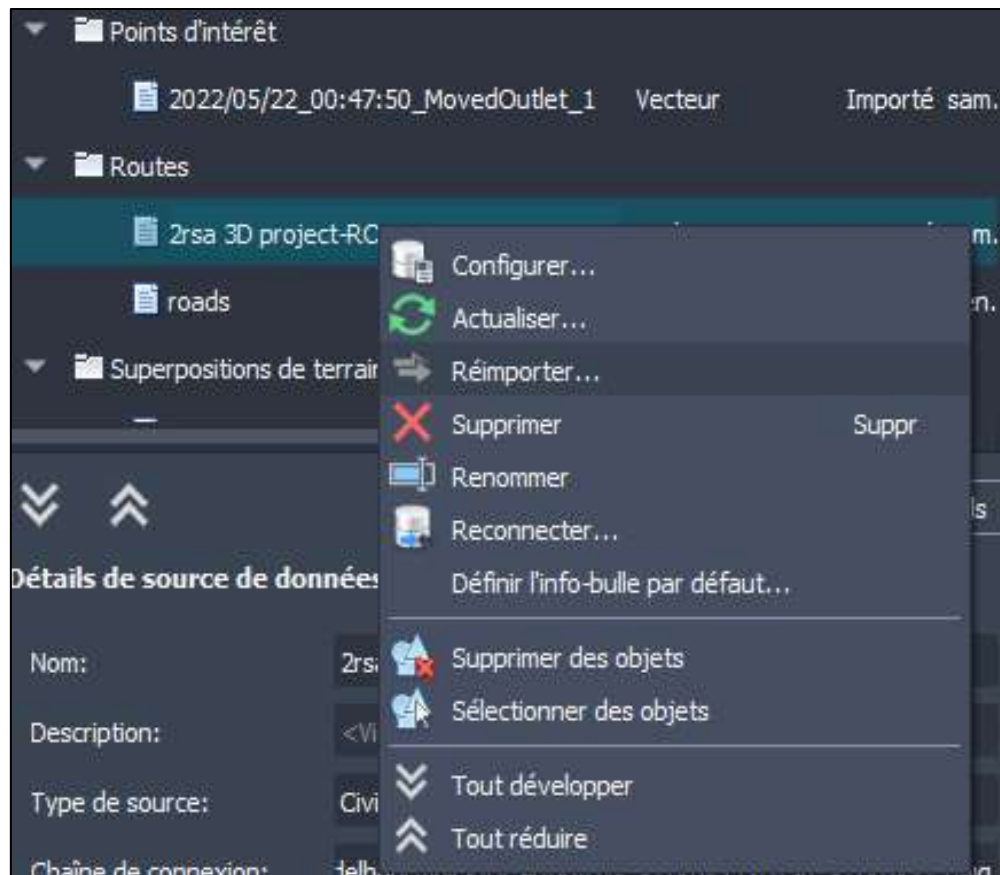


Figure IV-9: Actualisation de la géométrie.

Le logiciel INFRAWORKS effectuera les changements automatiquement une fois actualisé.

IV.5 Création des ouvrages d'art

Après avoir terminé l'import de la route, on procède à créer les ouvrages d'art à travers l'outil créer, ajouter une structure. On précise les points Kilométriques des début et fin de l'ouvrage ainsi que les nombre des piles.

Problème : après la création des ponts on remarque que les piles de pont sont mal placées, le non géoréférencement des plans des ouvrages d'art ne nous a pas permis de les mettre en place d'une manière correcte.

Solution : pour bien rapporter l'emplacement des piles nous avons utilisé l'application ArcGIS Collector. En se déplaçant sur place l'application nous permet de préciser le bon emplacement des piles, en utilisant le ArcGIS connector sur INFRAWORKS, il suffit d'actualiser et les piles sont automatiquement mises en place.

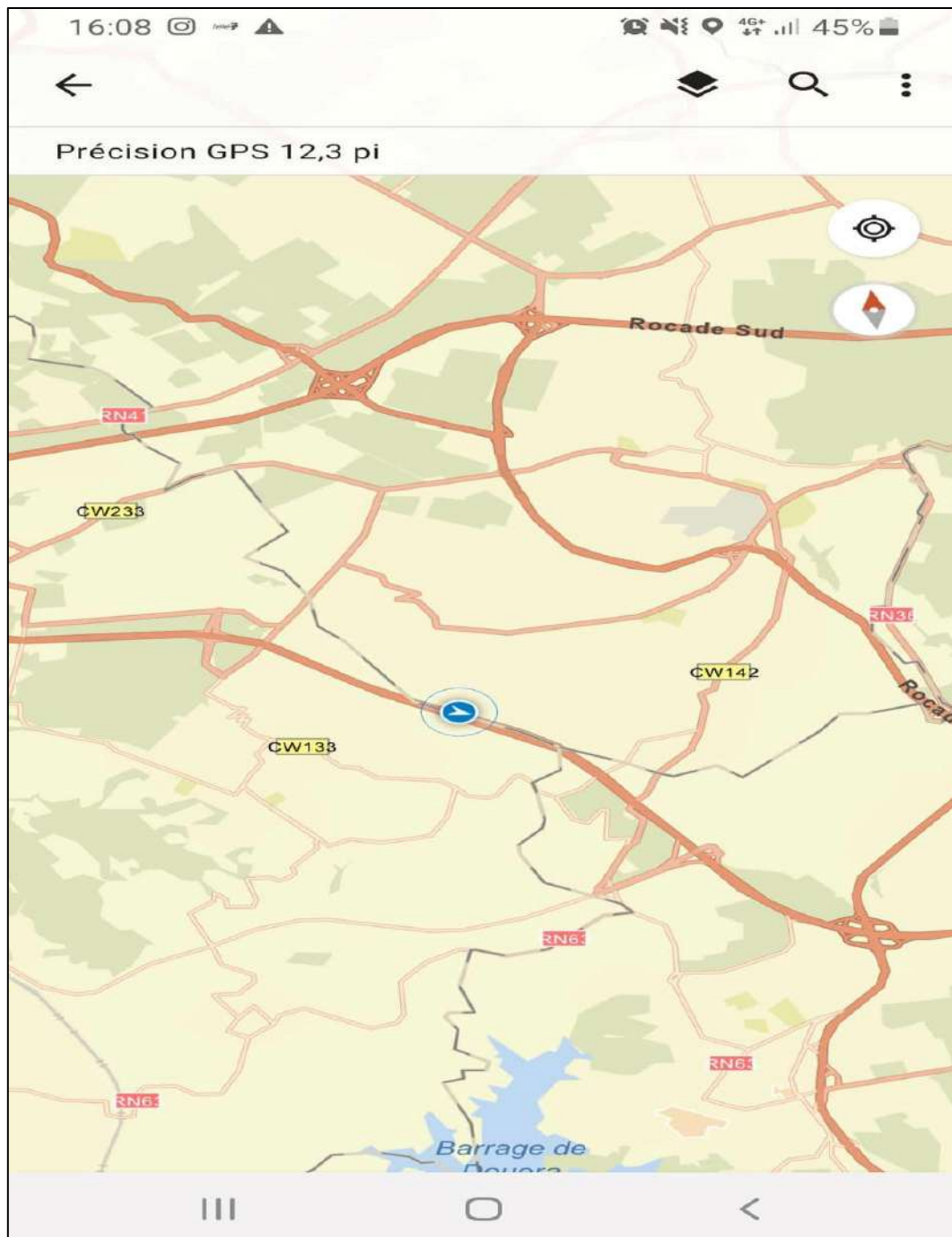


Figure IV-10: Détermination des emplacements des piles de ponts.

L'application permet aussi de placer les réseaux d'assainissement, les parcs, les forêts ainsi que les zones d'endommagement des structures. Cette application illustre la Force du partenariat ESRI-AUTODESK dans le cadre de l'alliance BIM-SIG.

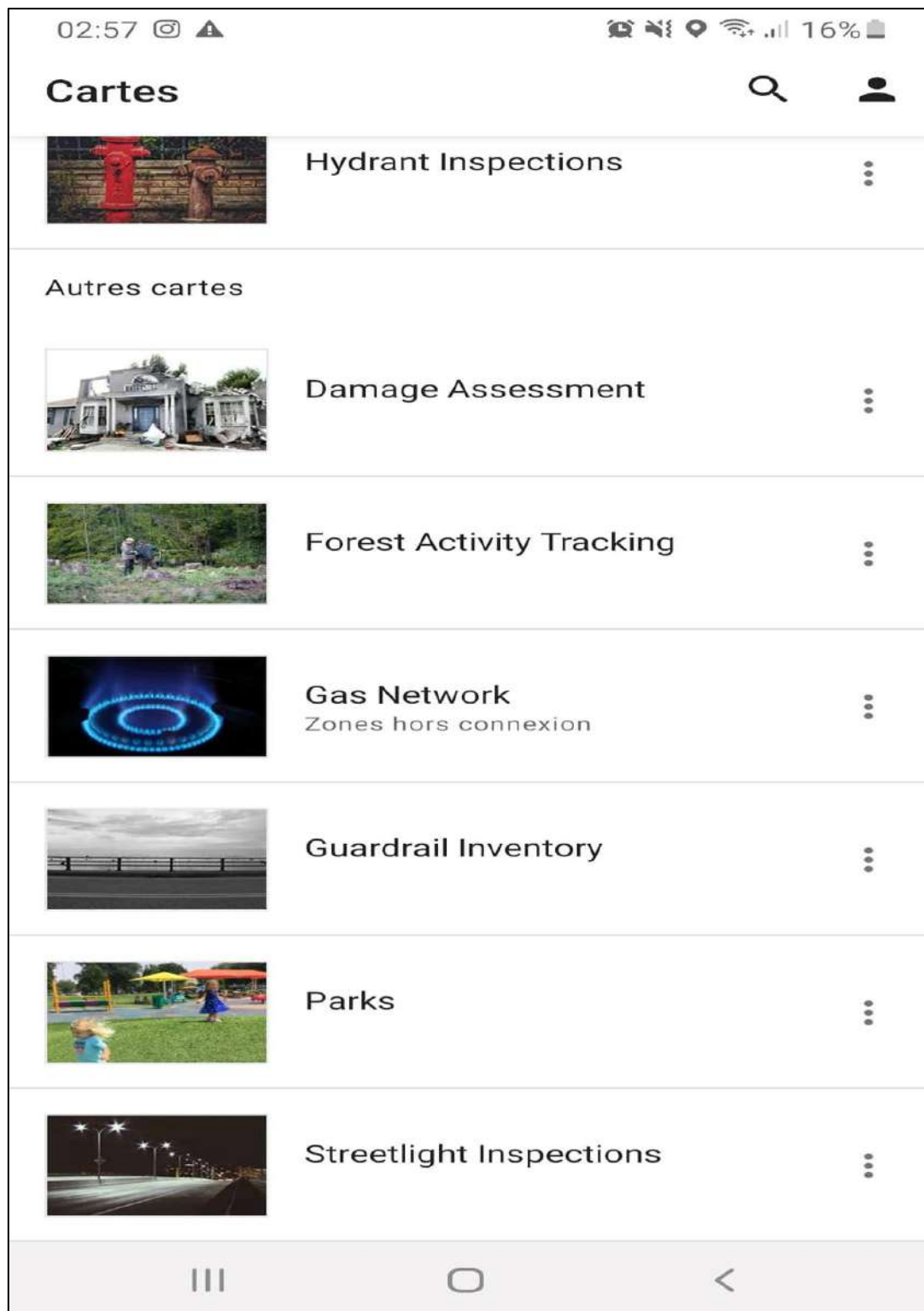


Figure IV-11: Interface de l'application ArcGIS Collector.



Figure IV-12: Création des ouvrages d'art.

IV.6 Assainissement et ouvrages hydrauliques

IV.6.1 Ouvrages d'assainissement transversal

Ils permettent le transit, d'un côté à l'autre de l'assiette de la route, des écoulements des eaux des bassins versants.

Pour créer les ouvrages d'assainissement transversal on a procédé de la manière suivante :

- Géoréférencer les ouvrages présentés dans le plan d'assainissement **Annexe 3**.
- Importer les ouvrages en format Shapefile à INFRAWORKS.
- Spécifier les dimensions des ouvrages ainsi que la direction des écoulements.

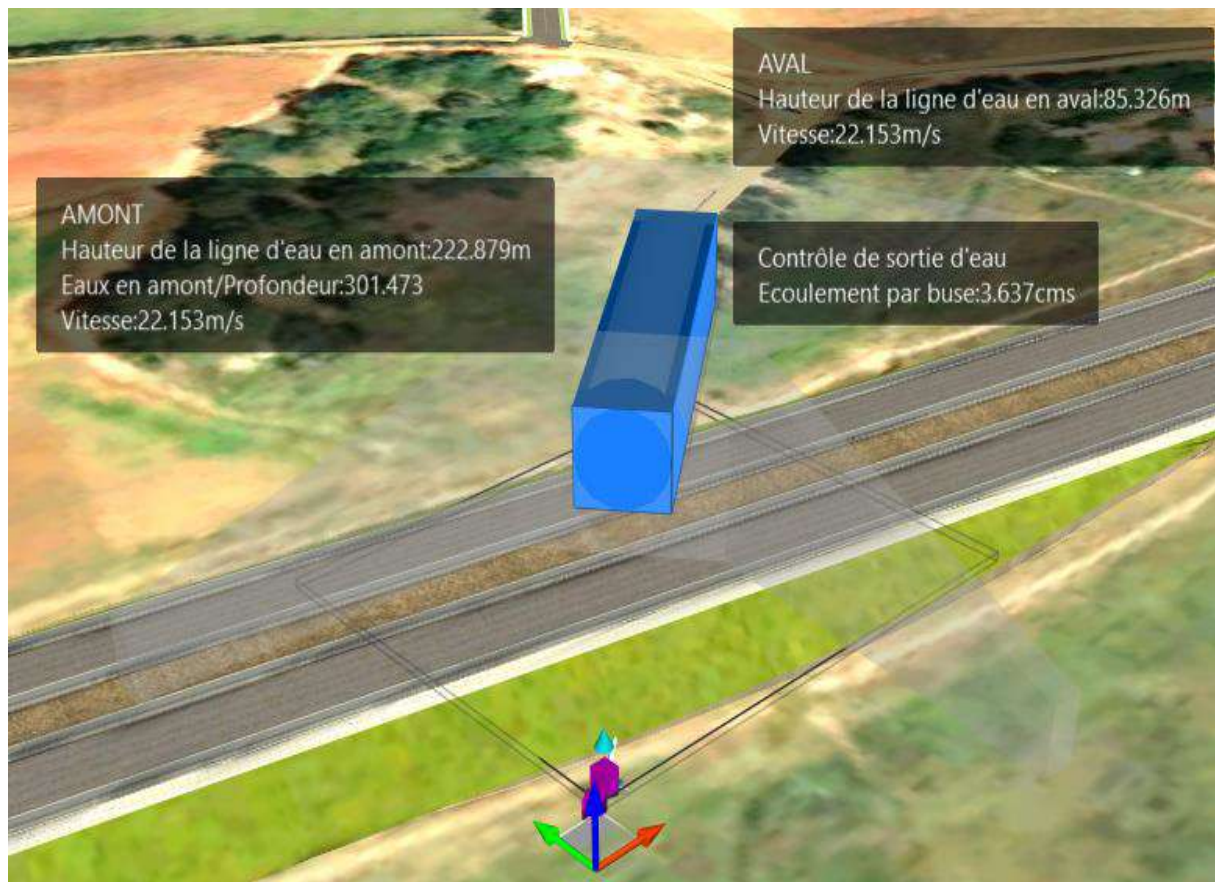


Figure IV-13: Création des ouvrages d'assainissement transversal.

Note : les caractéristiques des ouvrages d'assainissement transversal sont mentionnées dans le tableau **ANNEXE 3**.

IV.6.2 Ouvrages d'assainissement longitudinal

Ils ont pour but de recevoir et de drainer les eaux pluviales qui s'écoulent sur la surface de la route et les talus ainsi que les eaux interne afin de garantir la pérennité de la voie.

Les ouvrages d'assainissement longitudinale ont été importé avec le profil en travers de la route, il faut juste les indiquer au tant qu'ouvrages d'assainissement.



Figure IV-14: Les fossés et les fossés de crête.

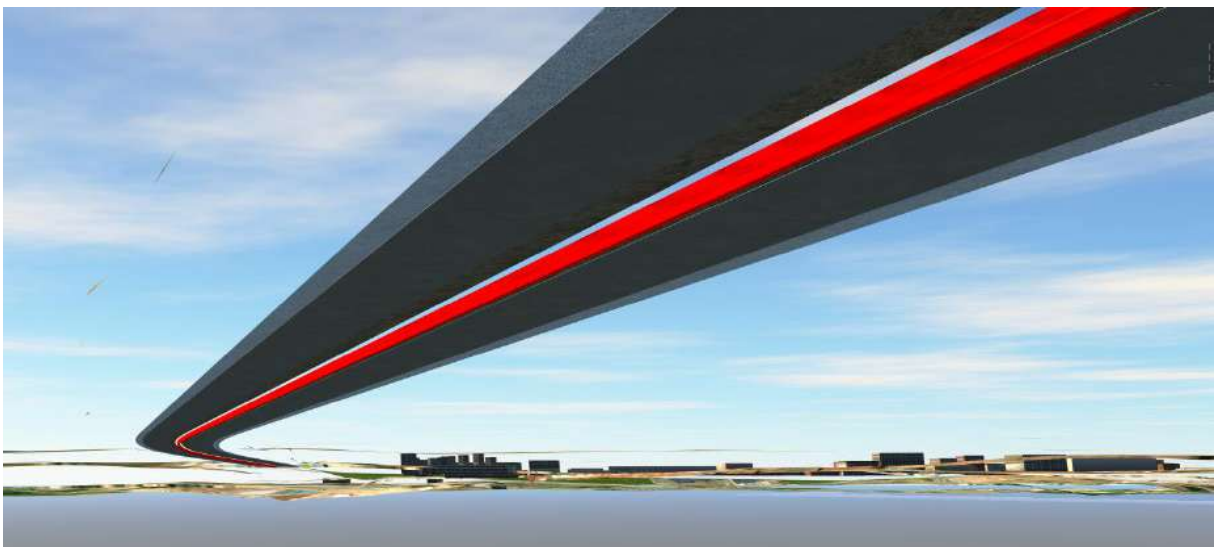


Figure IV-15: Collecteur centrale des eaux infiltrées.

IV.7 Installations et équipements routiers

La bibliothèque des équipements sur INFRAWORKS contient plus de 2000 objet qu'on pourra facilement importer et ajouter à notre autoroute. Pour les besoins de notre étude, nous n'avons pas repris toutes les installations du tronçon. Nous nous sommes limités à ajouter des barrières de sécurité routière et quelques plaques de signalisation verticale seulement.



Figure IV-16: Barrière de sécurité.



Figure IV-17: Plaque de signalisation.

Cette fonctionnalité nous permet d'insérer les équipements de la bibliothèque INFRAWORKS seulement, elle ne permet malheureusement pas la modification de ces derniers. Toutefois, on peut recréer la signalisation existante au tant qu'objet 3D de la CAO, et les importer à INFRAWORKS, le processus sera un peu long, et prend tellement de temps à réaliser.

IV.8 Vérification géométrique de l'infrastructure routière

La modernisation et le développement des infrastructures routières visent à répondre à des enjeux multiples (économiques, de mobilité durable et de sécurité...), évolutifs, et se réalisent dans un champ de contraintes croissant. Cela conduit à faire évoluer périodiquement les référentiels techniques en matière d'aménagement des infrastructures, mais aussi à en élaborer de nouveaux pour répondre aux diverses situations auxquelles sont confrontés les porteurs de projets.

Le tronçon objet de l'étude a été mis en circulation en 2009, conçu en 2006. Aujourd'hui seize ans plus tard, les normes de conception ont évolué et ont été actualisé pour satisfaire les besoins de la bonne circulation dans les routes, et aussi pour corriger des erreurs dans les normes qui ont induit des anomalies dues à l'application de ces dernières. Une vérification de la géométrie du tronçon s'impose alors pour vérifier que la géométrie remplit les conditions des nouvelles versions des réglementations.

IV.8.1 Norme applicable au projet

IV.8.1.1 Les critères de choix des normes de conception routière

L'application d'une norme de conception routière est généralement exigée par les maitres d'ouvrages et précisée dans le cahier de charges dans le cadre d'un contrat ou un marché public. Cependant, l'application de ces normes à une route dépend de plusieurs facteurs dont on cite

- ✓ **La fonction de la route** : interurbaine, urbaine, etc...
- ✓ **Disposition des voies** : routes unidirectionnel, bidirectionnel, etc...
- ✓ **Nombre de voies** : chaussées séparées à deux voies, trois voies, etc...
- ✓ **Nature du projet** : Réalisation d'une infrastructure nouvelle, aménagement du réseau existant, etc...

IV.8.1.2 Application au projet

Le tronçon étudié est une autoroute à chaussées séparées à 2x3 Voies, reliant la ville de boudouaou à la ville de Staoueli en passant par 12 autres villes (voir la présentation de la 2eme Rocade sud d'Alger). La norme qui traite ce Type d'autoroute est **L'instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaisons ICTAAL**.

La dernière édition publiée de ce guide est la version du mai 2015, qui a été Mise à jour en 2021 selon le centre **d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement CEREMA**. [21]

IV.8.1.3 Domaine d'application ICTAAL

L'ICTAAL traite de la conception des autoroutes interurbaines, qu'il s'agisse de la réalisation d'infrastructures nouvelles ou de l'aménagement du réseau existant. Dans cette instruction, le terme autoroute fait référence au type 1 décrit par le catalogue des types de route pour l'aménagement du réseau routier national et désigne une route à chaussées séparées comportant chacune au moins deux voies en section courante, isolée de son environnement et dont les carrefours sont dénivelés.

L'ICTAAL contient les principes généraux et les règles techniques fondamentales sur ces routes, qui sont généralement dotées du statut d'autoroute ou de route express. Les études préalables, les règles et recommandations techniques de détail sont traitées dans les documents spécialisés.

IV.8.2 Choix de la catégorie de la route

IV.8.2.1 Critères de choix de la catégorie

Les normes de conception routière divisent les routes qu'elles traitent en catégorie, chaque catégorie a des particularités et des spécificités à respecter dans les caractéristiques du tracé en plan et du profil en long, les catégories sont classées en fonctions de l'environnement et le relief dans lequel s'inscrit la route, le relief est classé en plusieurs catégories dont on cite :

- ✓ Relief accidenté (ou relief difficile)
- ✓ Relief vallonné
- ✓ Les plaines et les plateaux

IV.8.2.2 Catégories traitées par l'ICTAAL

Les autoroutes ou sections d'autoroute sont classées en deux catégories, on distingue :

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

Ces catégories L1 et L2 sont respectivement appropriées à des vitesses maximales autorisées de 130 et 110 km/h. [21]

Chapitre IV : Conception détaillée et vérification géométrique de l'IR.

Une section d'autoroute franchissant un site de relief particulièrement difficile est à considérer comme « hors catégorie » et bénéficie de règles particulières énoncées au chapitre 8 de l'ICTAAL.

IV.8.3 Application au projet

Le tronçon étudié s'inscrit dans le cadre de la catégorie 1, en vue du relief vallonné qui caractérise la zone d'étude. Ainsi que la vitesse maximale autorisée qui est de 120 Km/h.

Afin de vérifier la géométrie du tronçon nous avons utilisé le logiciel Civil 3D. en important la norme ICTAAL 2015 mise à jour 2021, on peut à travers l'outil « Design check » (vérification de la conception). Vérifier tous les paramètres du tracé en plan et du profil en long.

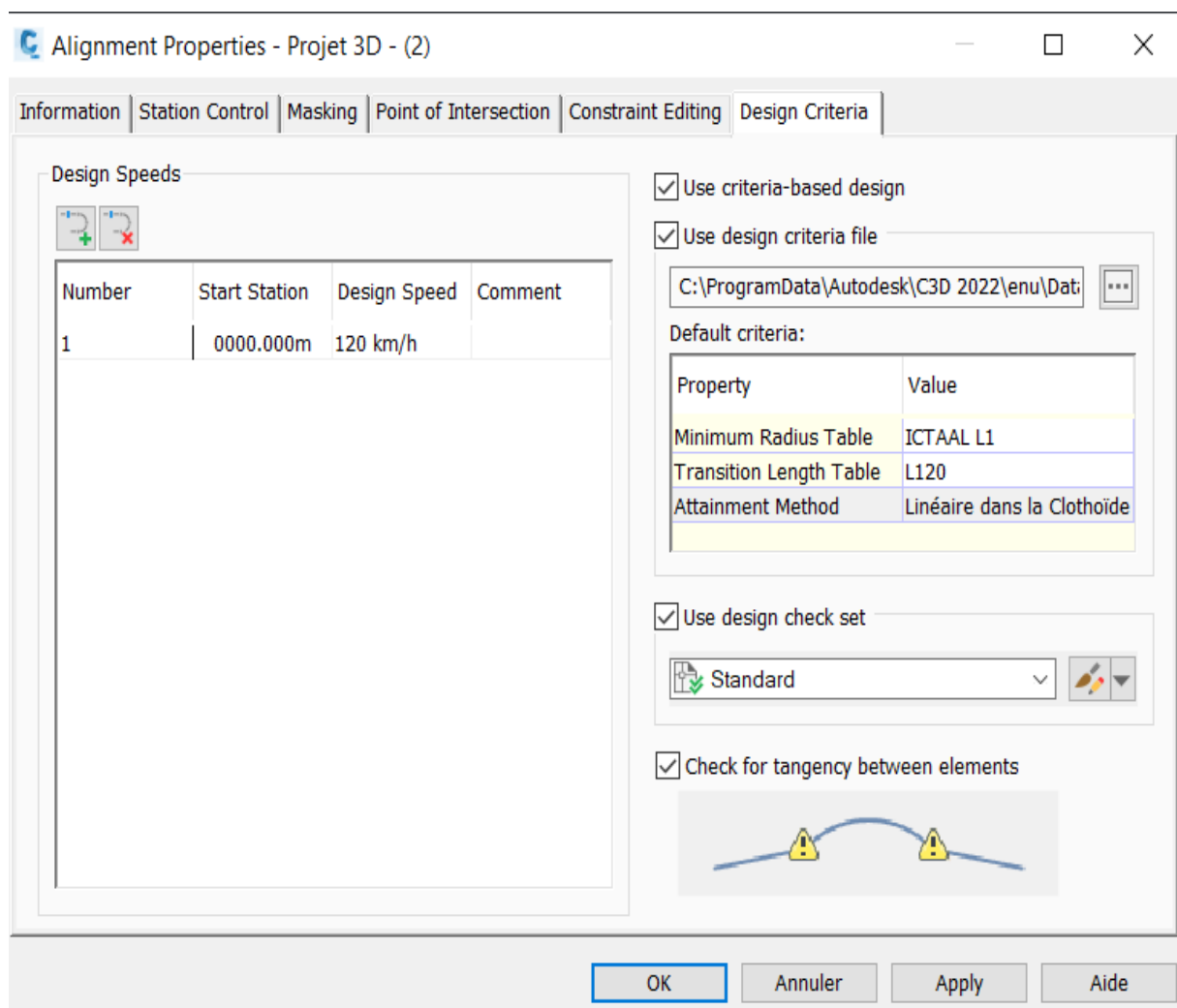


Figure IV-18: Vérification du tracé en plan par Civil 3D.

Chapitre IV : Conception détaillée et vérification géométrique de l'IR.

Le logiciel Civil 3D vérifie automatiquement tous les paramètres du tracé à noter

- Les longueurs maximales et minimales des alignements
- Les rayons minimaux des courbes.
- Les longueurs minimales des raccords progressifs
- La tangence entre les éléments.

Une fois terminée nous avons le rapport des éléments du tracé comme illustré dans la figure ci-dessous :

No.	Type	Tangency Constraint	Parameter Constrai...	Parameter Co...
1	Curve	Constrained by Next (Floating)		Passthrough r...
2	Line	Not Constrained (Fixed)		Two points
3	Curve	Constrained on Both Sides (Free)		Radius
4	Line	Not Constrained (Fixed)		Two points
5	Curve	Constrained on Both Sides (Free)		Radius
6	Line	Not Constrained (Fixed)		Two points
7	Curve	Constrained on Both Sides (Free)		Radius
8	Line	Not Constrained (Fixed)		Two points
9	Curve	Constrained on Both Sides (Free)		Radius
10	Line	Not Constrained (Fixed)		Two points
11	Curve	Constrained on Both Sides (Free)		Radius
12	Line	Not Constrained (Fixed)		Two points
13	Curve	Constrained on Both Sides (Free)		Radius
14	Line	Not Constrained (Fixed)		Two points
15	Curve	Constrained on Both Sides (Free)		Radius
16	Line	Not Constrained (Fixed)		Two points
17	Curve	Constrained on Both Sides (Free)		Radius
18	Line	Not Constrained (Fixed)		Two points
19	Curve	Constrained on Both Sides (Free)		Radius
20	Line	Not Constrained (Fixed)		Two points

Figure IV-19: Rapport de la vérification du tracé.

A titre illustratif nous avons changé des paramètres du tracé pour voir comment les anomalies sont rapportés.



Figure IV-20: Détection des anomalies.

On refait le même travail pour le profil en long et on obtient le rapport suivant

No.	PVI Station	PVI Elevation	Grade In	Grade Out	A (Grade Change)	Profile Curve Type	Profile Curve Length
1	0000.000m	48.663m		1.80%			
2	0867.000m	64.269m	1.80%	2.50%	0.70%	Sag	140.000m
3	1551.290m	81.376m	2.50%	1.23%	1.27%	Crest	190.311m
4	3960.830m	111.037m	1.23%	1.60%	0.37%	Sag	184.370m
5	4610.130m	121.426m	1.60%	-0.70%	2.30%	Crest	287.500m
6	5264.110m	116.848m	-0.70%	1.20%	1.90%	Sag	237.500m
7	5717.010m	122.283m	1.20%	0.50%	0.70%	Crest	199.500m
8	6603.540m	126.716m	0.50%	5.00%	4.50%	Sag	495.000m
9	7876.190m	190.348m	5.00%	-4.00%	9.00%	Crest	1000.000m
10	8769.990m	154.596m	-4.00%	0.50%	4.50%	Sag	308.717m
11	9741.430m	159.434m	0.50%	-3.80%	4.30%	Crest	412.770m
12	11692.820m	85.281m	-3.80%				

Figure IV-21: Vérification du profil en long par Civil 3D.

Les paramètres vérifiés ici sont :

- ✓ Les points bas du tracé
- ✓ Les déclivités maximales et minimales.
- ✓ Les longueurs minimales des alignements
- ✓ Les rayons minimaux des courbes verticales.

IV.9 Pourquoi la vérification de la géométrie ?

La vérification de la géométrie est importante pour notre diagnostic car on peut avoir des inondations qui résultent des erreurs de conception géométrique de la route telles que les points bas en profil en long, ou bien des déclivités qui ne permettent pas les écoulements des eaux superficielles.

On adopte en général les pentes longitudinales minimales suivantes : [22]

- ✓ 0,5 % dans les zones où la pente transversale de la chaussée est inférieure à 0,5 %, s'il y a risque de verglas,
- ✓ Au moins 0,2 % dans les longues sections en déblai : pour que l'ouvrage longitudinal d'évacuation des eaux ne soit pas trop profondément enterré du côté aval ;
- ✓ Au moins 0,2 % dans les sections en remblai prévues avec des descentes d'eau.

IV.10 Le rôle du BIM dans la modernisation des normes de conception

A travers les simulations en temps réel le BIM permet de voir et analyser les anomalies des conceptions quand elles existent et avant qu'elles existent.

IV.10.1 Vérifications des distances de visibilité

On peut maintenant à travers le logiciel INFRAWORKS, vérifier les distances de visibilité des conducteurs dans les sinuosités ou bien dans les intersections et les échangeurs.



Figure IV-22: Vérification de la distance de visibilité au niveau de l'échangeur avec la première rocade sud.

IV.10.2 Les simulations du trafic routier

Le Logiciel INFRAWORKS nous permet aussi de simuler le trafic dans les zones qui présentent des anomalies, et on peut même simuler les accidents qui peuvent avoir lieu à travers le trafic analyste d'INFRAWORKS.



Figure IV-23: Simulation du trafic au niveau de l'échangeur avec la première rocade sud.

IV.11 Conclusion

Les conditions géométriques de la route sont vérifiées et ne posent pas de problèmes qui peuvent être la cause des inondations. Si ces dernières existent au niveau de la route, elles sont dues à d'autres facteurs autres que les paramètres géométriques de la route. A cet effet, une analyse de susceptibilité multicritère doit être faite afin de déterminer les zones à susceptibilité élevée d'occurrence des aléas.

***Chapitre V : Analyse
multicritère de
susceptibilité.***

V.1 Introduction

Comme nous avons démontré dans le précédent chapitre, l'existence des inondations et des glissements terrains dans le tronçon étudié ne dépend pas des défaillances géométriques de la route. Le présent chapitre a pour but d'analyser la susceptibilité de l'occurrence de ces catastrophes naturelles dans la zone, indépendamment du tracé de la route, en se basant sur des facteurs qui peuvent déclencher ou aggraver les deux aléas de référence, qui sont les inondations et les glissements de terrain.

Toutes les catastrophes ont une composante spatiale et, par conséquent, des informations géographiques adéquates sur les aléas et les zones susceptibles aux aléas sont nécessaires pour pouvoir se préparer aux catastrophes. Les méthodes d'évaluation multicritères (ECM) ont été appliquées dans plusieurs études précédentes [23]. Le SIG peut fournir des informations plus nombreuses et de meilleure qualité sur les situations de prise de décision car il permet au décideur d'identifier et de répertorier un ensemble prédéfini de critères avec le processus de superposition. L'analyse décisionnelle multicritères dans le SIG peut être utilisée pour développer et évaluer des plans alternatifs qui peuvent faciliter le compromis entre les parties intéressées [23].

Les méthodes d'analyse multicritères fournissent un cadre qui peut gérer différentes vues sur l'identification des éléments d'un problème de décision complexe, organiser les éléments dans une structure hiérarchique et étudier les relations entre les composants du problème [24].

V.2 Détermination des facteurs objet de l'analyse

Pour la détermination des facteurs nous avons procédé par deux démarches, la première consiste à déterminer les facteurs pris en compte dans les études précédentes ayant le même but de notre analyse. Dans la deuxième nous déterminons des paramètres que nous avons jugé utile dans l'analyse. Ceci revient au fait que les analyses de susceptibilité se font dans le cadre des études de planification ou on ne dispose pas nécessairement de paramètres tel que les paramètres d'état du sol, ou ses caractéristiques mécaniques, déterminé à partir des essais laboratoire ou in situ. [25]

V.2.1 Facteurs déterminés à partir des études précédentes

➤ Facteurs influençant les inondations

Le tableau ci-dessous représente les éléments qui ont été établie dans des études précédentes entre la période 2017-2019 pour les inondations.

Tableau V-1: Facteurs influençant les inondations dans les études précédentes.

Études	TWI	Accumulé de précipitation	Degré des Pentes	Distance par rapport aux cours d'eau	Lithologie	Couvertures végétales
Abebe et Al (2018)	✓	✓	✓	✓		✓
Wu et Al (2019)	✓		✓		✓	✓
Chen et Al (2019)	✓		✓	✓		✓
Lin et Al (2017)	✓		✓		✓	✓
Sharma et Al (2018)	✓		✓	✓		

➤ Facteurs influençant les glissements de terrains

Tableau V-2: Facteurs influençant les glissements de terrains dans les études précédentes.

Études	Degré des pentes	Pendage	Distance par rapport aux cours d'eau	Lithologie	Couvertures végétales
Clerici et al. (2002)	✓	✓	✓	✓	✓
Ercanoglu et al (2004)	✓	✓	✓	✓	✓
Lee et al (2004)	✓		✓	✓	✓

Saha et al (2005)	√			√	
Lee (2005)	√	√	√		

V.2.2 Facteurs que nous avons jugé nécessaire

Plus que les facteurs mentionnés dans les tableaux ci-dessus, il y a des paramètres liés essentiellement au sol, issus des essais laboratoires que nous avons jugé nécessaires dans cette analyse, la paramètres sont les suivants

- **Pour les inondations**
- La classe granulaire.
- **Pour les glissements de terrains**
- L'état de compacité.
- Plasticité du sol.

V.3 Traitement des facteurs

Les facteurs que nous avons cités ont été digitalisé sous forme de carte dans le logiciel ArcGIS, et puis nous avons reclassé ces facteurs selon leurs niveaux de susceptibilité à engendrer l'un des aléas.

V.3.1 Facteurs influençant les glissements de terrain

V.3.1.1 Facteurs géologiques

➤ Lithologie

Le phénomène des glissements de terrain est lié à la lithologie de la terre. Étant donné que différentes unités lithologiques ont des valeurs de susceptibilité aux glissements de terrain différentes, ils sont très importants pour fournir des données pour les études de susceptibilité. Par conséquent, la carte géologique de la zone d'étude a été numérisée en SIG. La zone d'étude est recouverte de différents types d'unités lithologiques qui sont classés selon leurs niveaux de susceptibilité comme montré dans la figure ci-dessous :

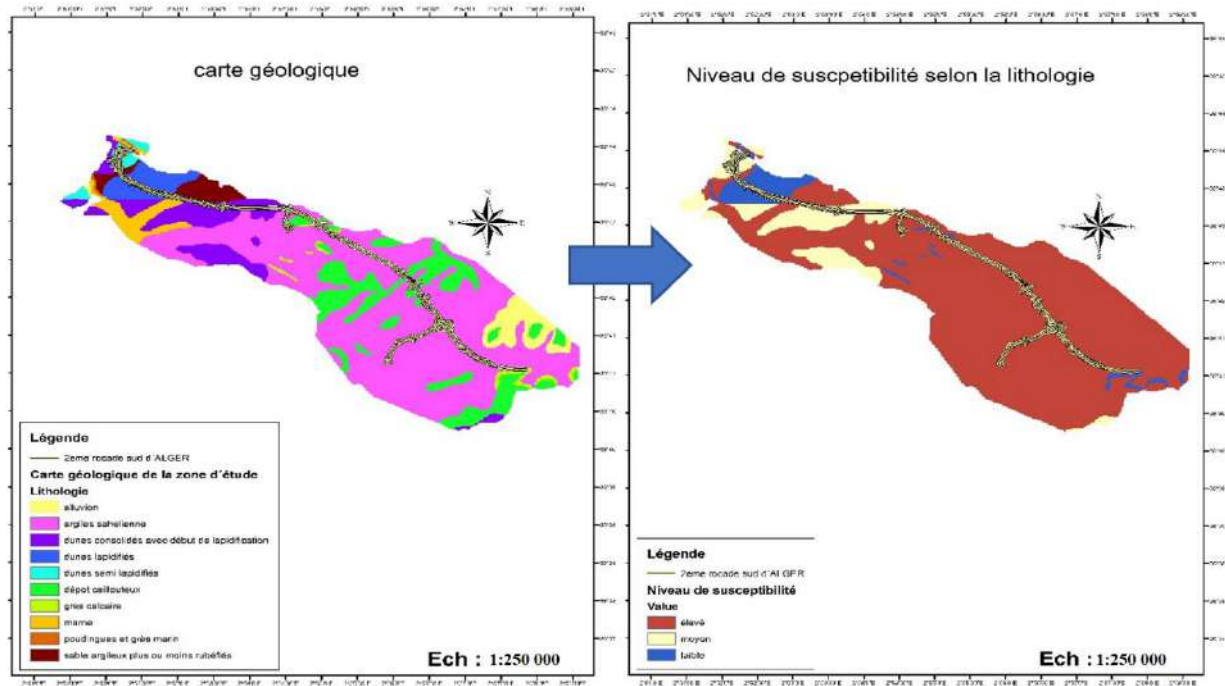


Figure V-1: Susceptibilité aux glissements de terrain selon la lithologie.

V.3.1.2 Facteurs géomorphologiques

➤ Pente

Le pendage est accepté comme facteur principal de conditionnement des glissements de terrain, et ce paramètre est pris en compte dans plusieurs études. Il a été prouvé que les versants orientés vers la mer, sont généralement plus humide que les versants orientés vers les autres directions.

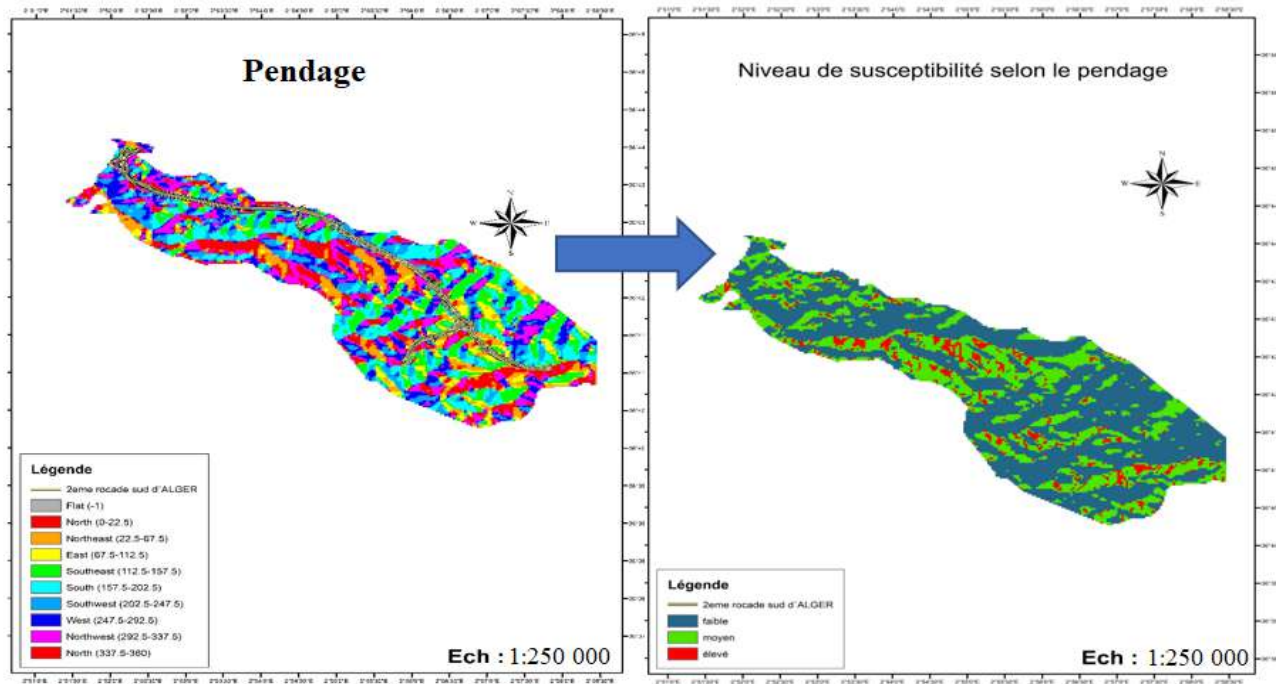


Figure V-2: Niveau de susceptibilité selon le pendage.

➤ Degré des pentes

Le paramètre principal de l'analyse de stabilité des pentes est le degré de la pente, parce que le degré de pente est directement lié aux glissements de terrain, il est fréquemment utilisé dans la préparation cartes de susceptibilité aux glissements de terrain. Pour cette raison, la carte des degrés de pente de la zone d'étude est préparée à partir du modèle numérique de terrain (MNT), et par la suite divisé en trois classes, dont chaque classe a son niveau de susceptibilité. Il paraît presque évident qu'un versant ayant une pente raide est plus susceptible à glisser qu'un versant à pente douce.

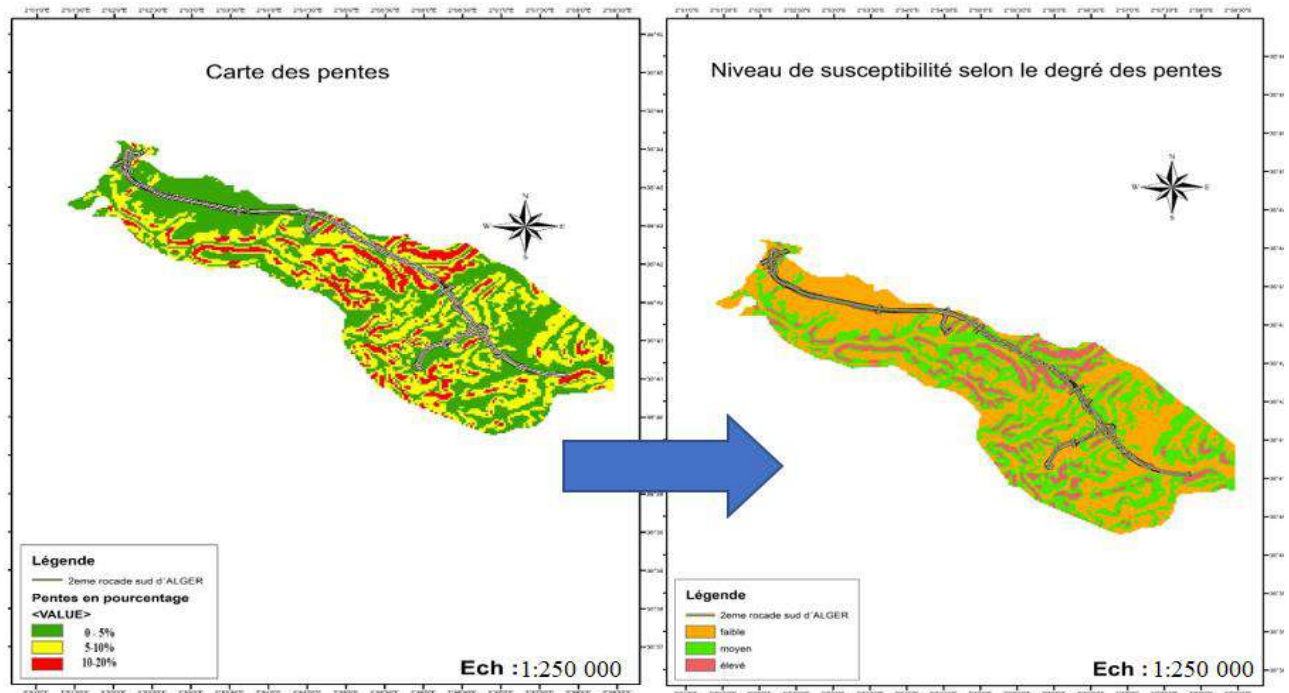


Figure V-3: Niveau de susceptibilité selon le degré des pentes.

V.3.1.3 Facteurs hydrologiques

➤ Distance par rapport aux cours d'eau

Un paramètre important qui contrôle la stabilité d'une pente est le degré de saturation du sol sur la pente, dans une première approche le degré de saturation peut paraître déterminant dans ce cas, mais le degré de saturation est un paramètre qui change avec le temps. La proximité de la pente aux cours d'eau est un autre facteur important en termes de stabilité. Les flux peuvent nuire la stabilité en érodant les pentes ou en saturant la partie inférieure du sol après une augmentation du niveau d'eau. Pour cette raison, nous avons déterminé la distance euclidienne (en mètre) entre les pentes et les cours d'eau dans la zone. Les résultats sont illustrés dans la figure ci-dessous.

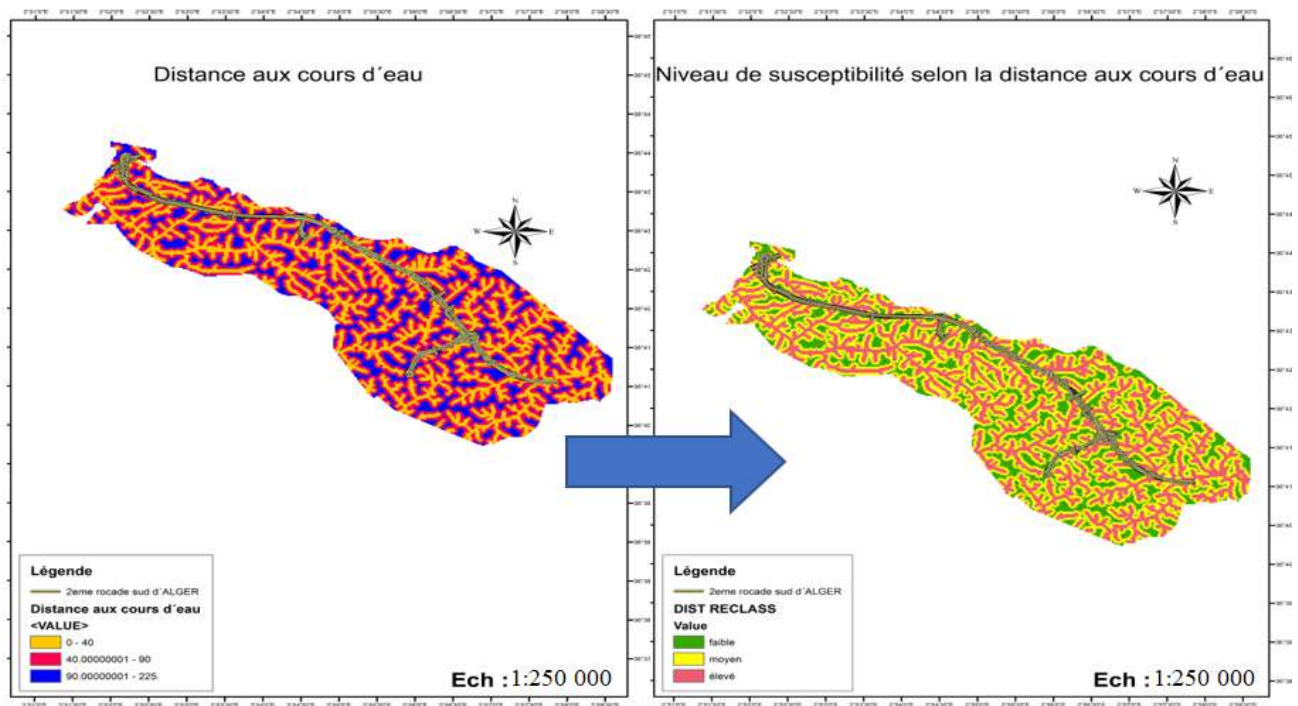


Figure V-4: Niveau de susceptibilité selon la distance aux cours d'eau.

V.3.1.4 Facteurs environnementaux

➤ Couverture végétale

La couverture végétale est appréciée à travers l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) l'indice de végétation par différence normalisé, il permet de mesurer le taux de couverture végétale sur une zone précise par analyses des mesures de télédétection, le NDVI est obtenu à partir du traitement des images aériennes et notamment satellitaires par la mise en orbite des satellites. Les valeurs de cet indice varient de -1 à 1, lorsqu'on a des valeurs négatives, il est fort probable que ce soit de l'eau. D'autre part, si on a une valeur NDVI proche de +1, il y a de fortes chances qu'il s'agisse de feuilles vertes denses. Mais lorsque le NDVI est proche de zéro, il n'y a pas de feuilles vertes et il pourrait même s'agir d'une zone urbanisée [26].

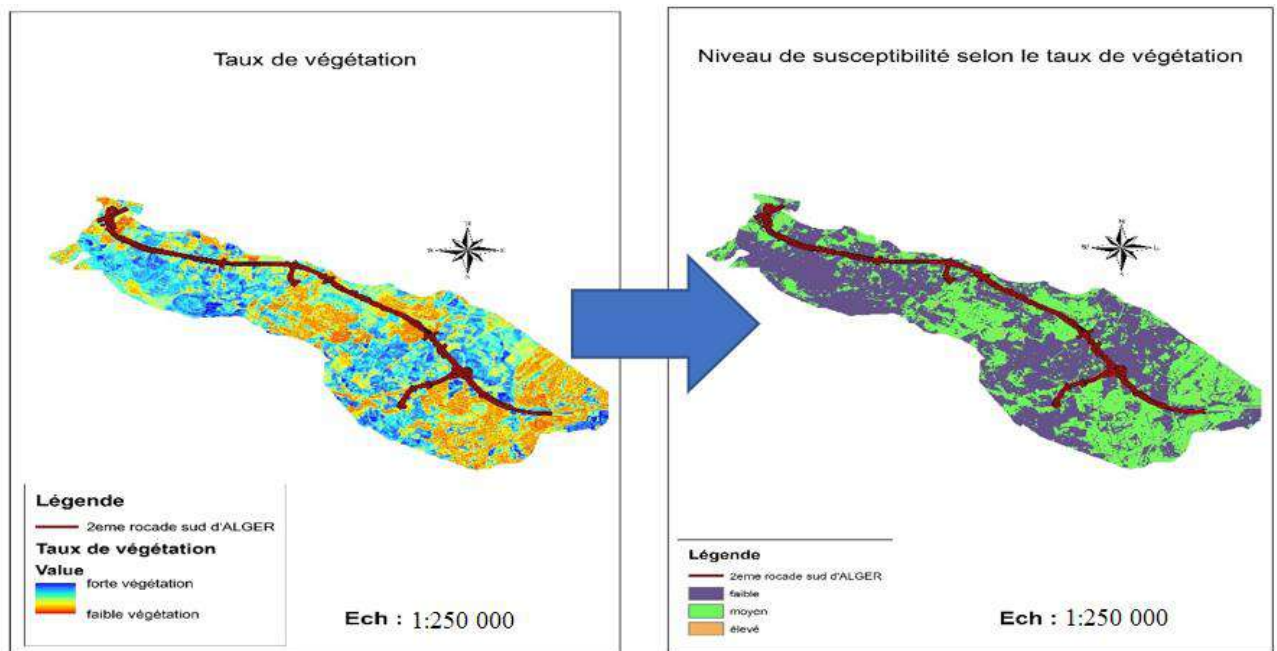


Figure V-5: Niveau de susceptibilité selon le taux de végétation.

V.3.1.5 Facteurs géotechniques

➤ L'état de compacité

L'état de compacité est déterminé au moyen de l'essai SPT (Standard Penetration Test).

L'essai de pénétration standard détermine le type de consolidation du sol, détermine la résistance à la pénétration et la capacité portante du sol étudié, selon Terzaghi l'interprétation de cet essai est traduite sur la figure suivante :

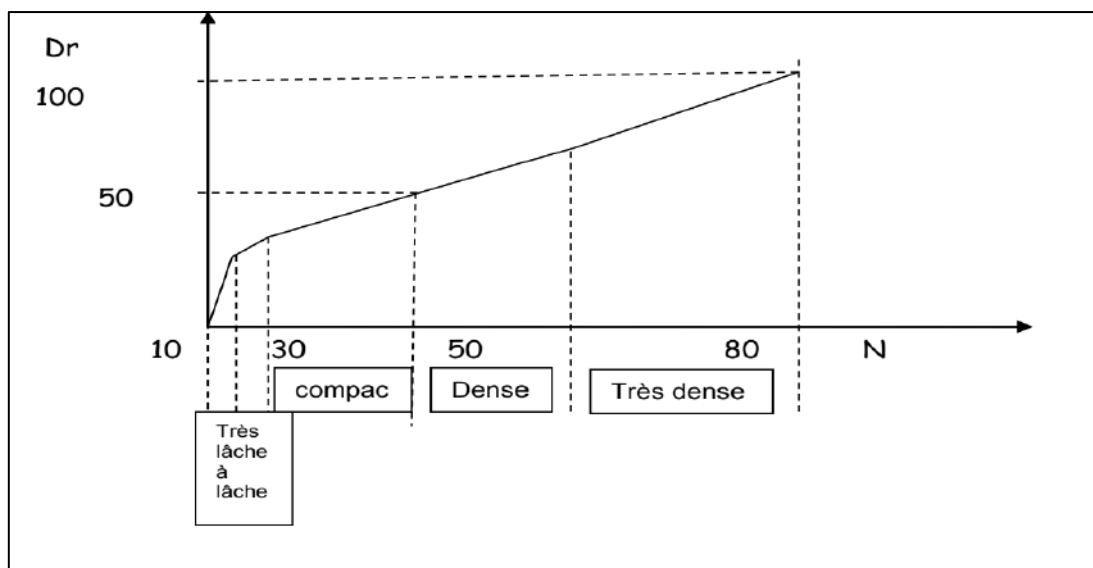


Figure V-6: Classification de Terzaghi des sols selon le SPT.

Chapitre V : Analyse multicritère de susceptibilité.

Avec :

- ✓ **N** désigne le nombre de coups de mouton pour enfoncer le carottier.
- ✓ **Dr** désigne la densité relative $Dr = (e_{max} - e) / (e_{max} - e_{min})$
- ✓ **e** : indice des vides ; e_{max} : indice des vides du sol dans l'état le plus lâche ; e_{min} : indice des vides du sol dans l'état le plus serré.

A partir la classification de terzaghi, nous avons reclassé la zone d'étude en 3 classes, selon leurs niveau de susceptibilité. Un sol lâche est supposé plus susceptible au glissement de terrain qu'un sol compact ou dense. Les résultats sont montrés dans la figure suivante.

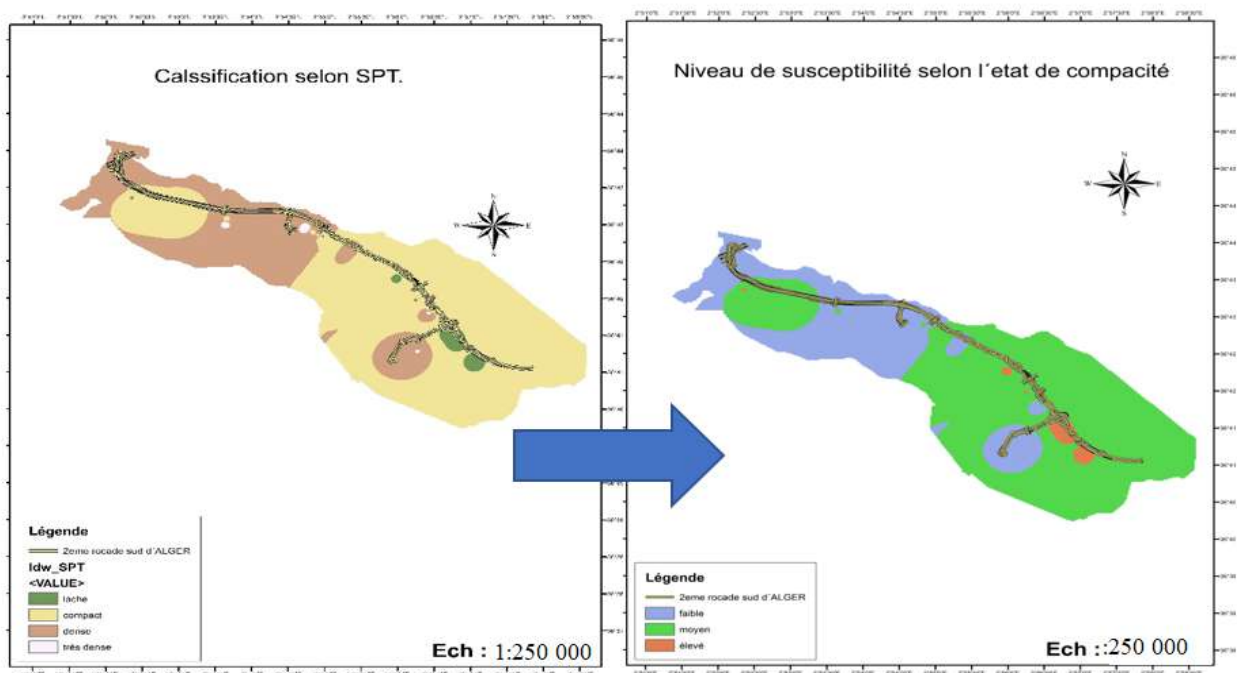


Figure V-7: Niveau de susceptibilité selon l'état de compacité.

➤ Plasticité des sols

La plasticité d'un sol désigne la propriété qu'ont des matériaux du sol lorsqu'ils sont mouillés de pouvoir changer d'une façon continue de forme, mais non de volume, sous l'effet d'une pression constante, et de garder la forme prise quand la pression disparaît. La plasticité du sol est sa capacité à se déformer sans se fissurer. C'est une propriété d'indice importante des sols à grains fins dont l'interprétation est résumée dans le tableau ci-dessous [27].

Chapitre V : Analyse multicritère de susceptibilité.

Tableau V-3: Interprétation des résultats de l'indice de plasticité.

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

Les sols à grains fins, lors des déplacements perdent une fraction notable de leur résistance. Cette perte est appelée sensibilité. Aussi les hautes sensibilités correspondent aux grandes pertes de résistance. Donc les sols à grain fin sont très sensibles au changement de forme, ils exigent par conséquent une attention spéciale. Ils peuvent être la cause d'un glissement de terrain profond.

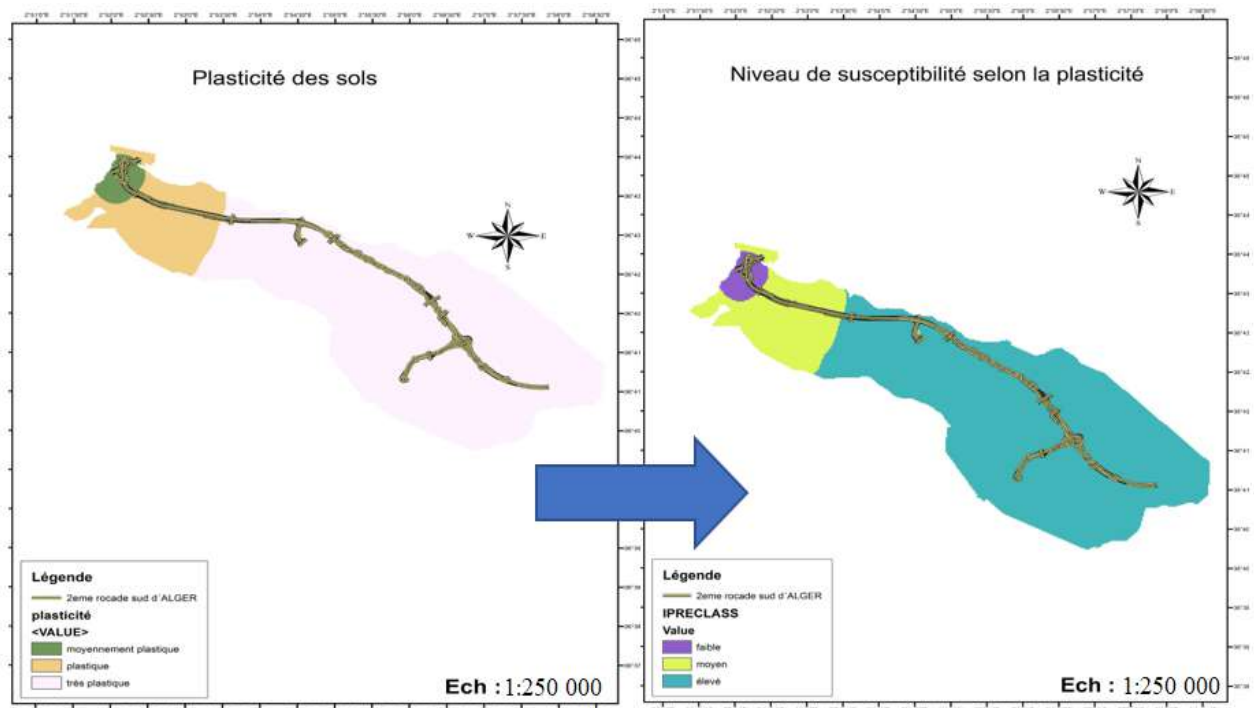


Figure V-8: Niveau de susceptibilité selon la plasticité des sols.

V.3.2 Facteurs influençant les glissements de terrain

V.3.2.1 Facteurs géologiques

➤ Lithologie

La lithologie d'un sol a un grand impact sur les inondations car les sols pulvérulents absorbent rapidement l'eau et permettent peu de ruissellements sur la surface. D'autre part, les sols argileux sont moins poreux et retiennent l'eau plus longtemps que les sols sablonneux. Ceci implique que les zones caractérisées par des sols argileux sont plus touchées par les inondations.

La structure et la capacité d'infiltration des sols auront également un impact important sur l'efficacité du sol pour agir comme une éponge et absorber l'eau. Différents types de sols ont des capacités différentes. Le risque d'inondation augmente avec la diminution de la capacité d'infiltration du sol, ce qui entraîne une augmentation des ruissellements de surface. Lorsque l'eau est fournie à un débit qui dépasse la capacité d'infiltration du sol, elle se déplace en aval de la pente sous forme de ruissellement sur des terres en pente, et peut entraîner des inondations.

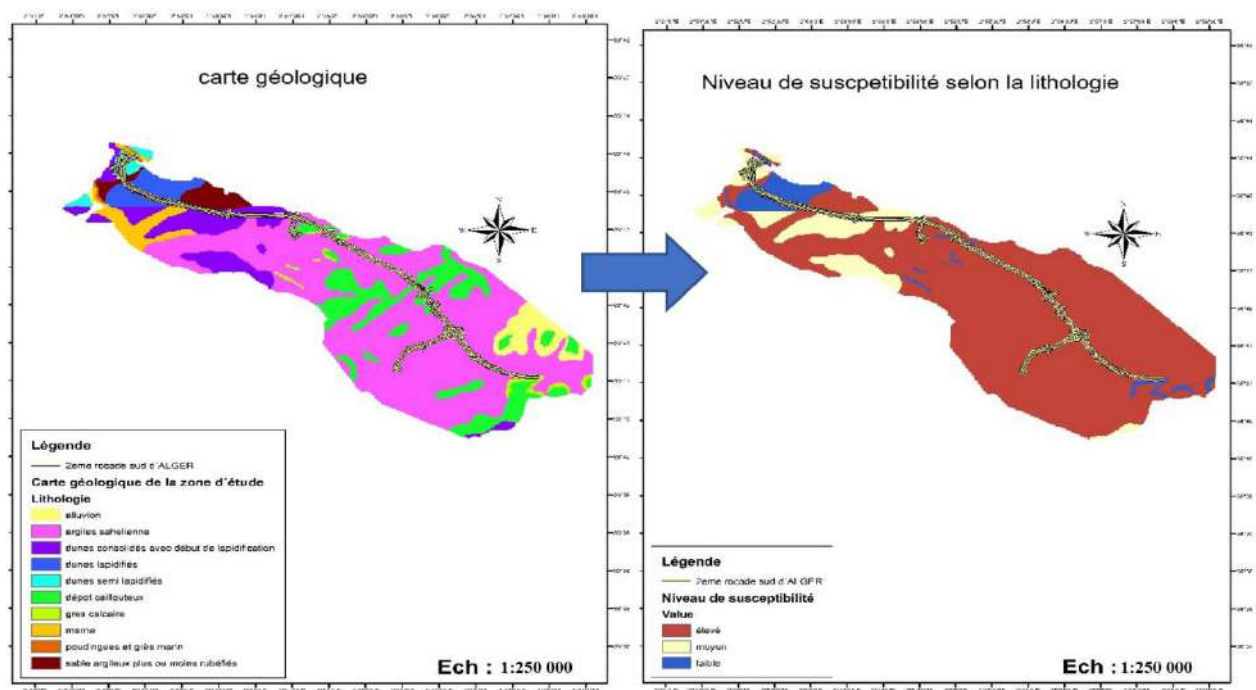


Figure V-9: Niveau de susceptibilité aux inondations selon la lithologie.

V.3.2.2 Facteurs géomorphologiques

➤ Degré des pentes

La pente influence la direction et la quantité de ruissellement de surface ou de drainage souterrain atteignant un site. La combinaison des angles de pente définit essentiellement la forme de la pente et sa relation avec la lithologie, la structure, le type de sol et le drainage. Une surface lisse / plane qui permet à l'eau de s'écouler rapidement est un inconvénient et provoque des inondations, où une rugosité de surface plus élevée peut ralentir la réponse aux inondations. Les pentes plus raides sont plus sensibles au ruissellement de surface, tandis que les terrains plats sont sensibles à l'engorgement de l'eau.

Les pentes à faible pente sont très vulnérables aux inondations par rapport aux pentes à degré élevé. La pluie ou l'excès d'eau de la rivière s'accumule toujours dans une zone où la pente est généralement faible. Les zones à forte pente ne permettent pas à l'eau de s'accumuler et d'entraîner des inondations.

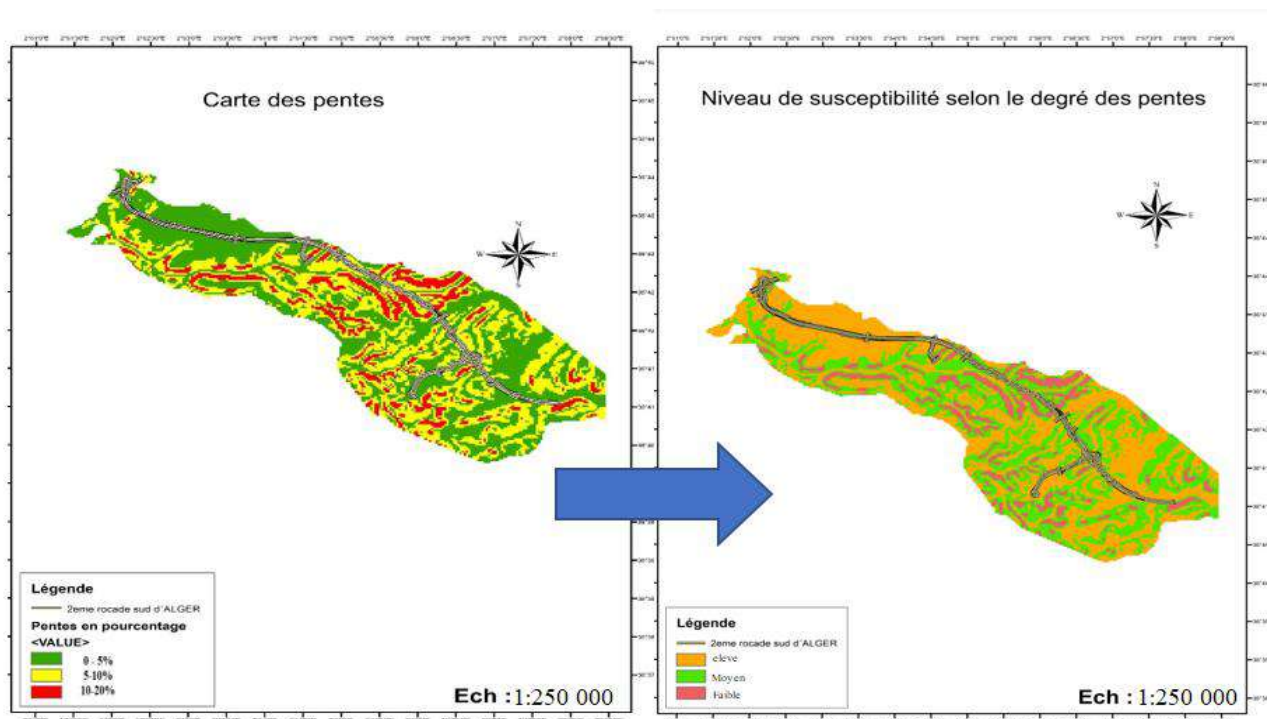


Figure V-10: Niveau de susceptibilité aux inondations selon le degré des pentes.

➤ L'indice d'humidité topographique

TWI (Topography Wetness Index), TWI est définie comme, $TWI = \ln(\alpha / \tan \beta)$, où α est le débit accumulé et β est la pente en radian. Il y a une forte relation entre TWI et la géomorphologie ainsi que la position hydrographique d'une zone. [28]

Chapitre V : Analyse multicritère de susceptibilité.

Cette évaluation de l'indice est capable de prédire des surfaces terrestres saturées qui ont le potentiel de produire un écoulement terrestre. La couche TWI est utile pour démontrer l'inondation des régions inondables en raison du débordement produit au moment d'une forte intensité de précipitations. TWI est calculé par l'outil de création de modèles d'ArcGIS.

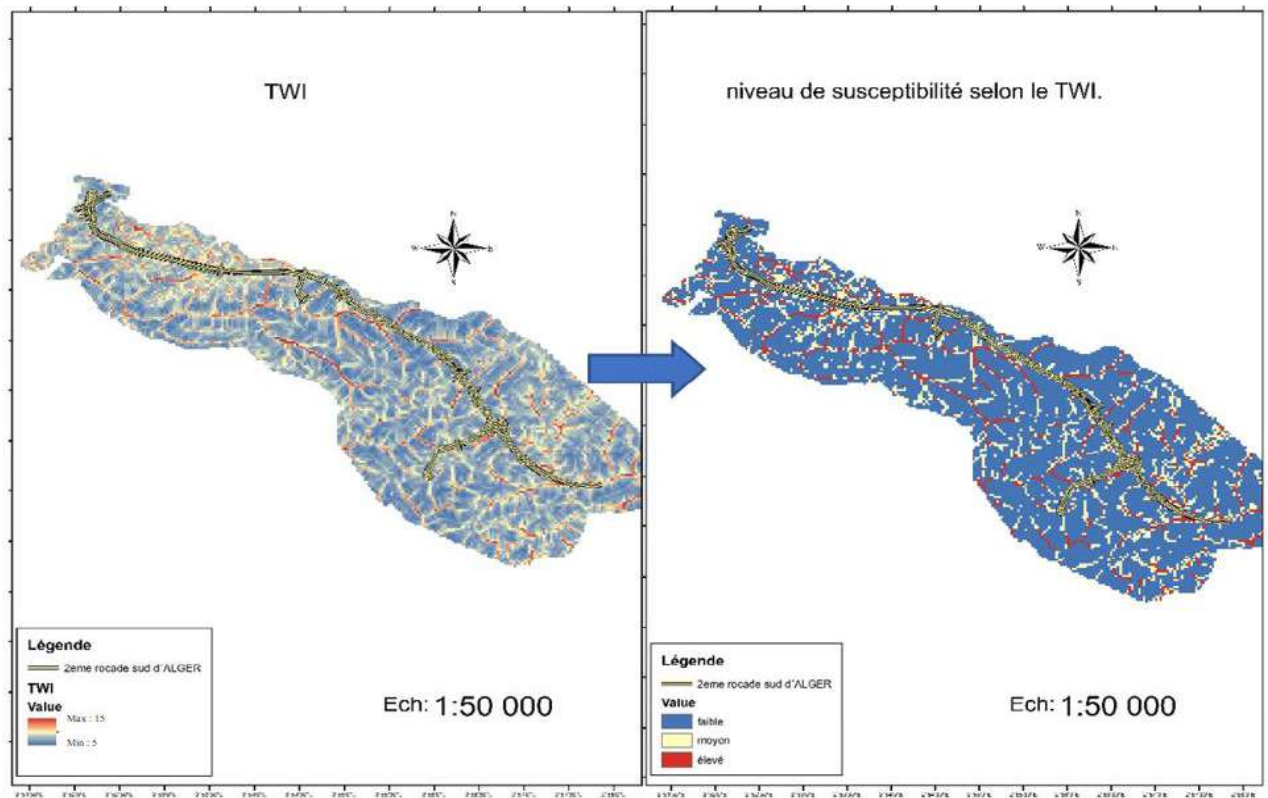


Figure V-11: Niveau de susceptibilité aux inondations selon le TWI.

V.3.2.3 Facteurs hydrologiques

➤ Distances aux cours d'eau

La distance aux cours d'eau est évaluée de la même manière expliquée pour la susceptibilité aux glissements de terrains, une zone proche aux cours d'eau est plus susceptible aux inondations qu'une zone éloignée.

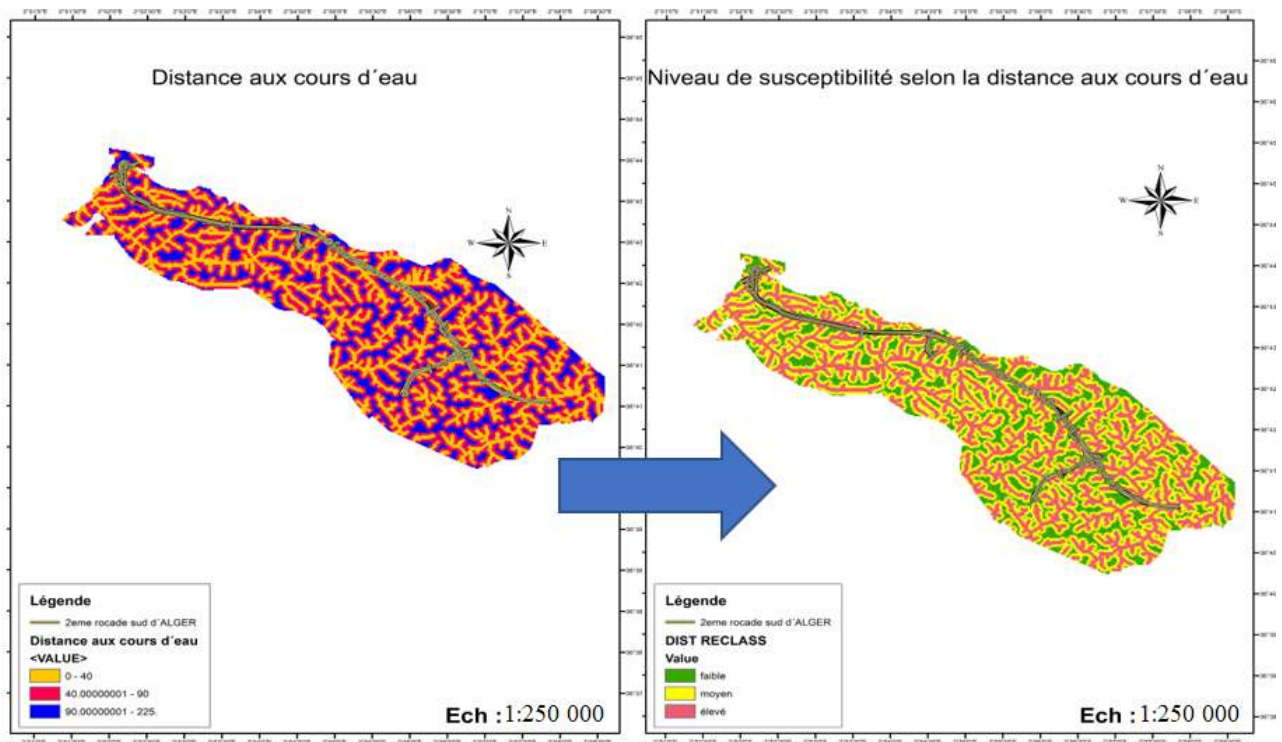


Figure V-12: Niveau de susceptibilité aux inondations selon la distance aux cours d'eau.

V.3.2.4 Facteurs environnementaux

➤ La couverture végétale

La couverture végétale influence la capacité d'un versant à ruisseler. Une forte végétation diminue le coefficient de ruissèlement pour une même hauteur des eaux précipités, ceci dit qu'elle diminue la hauteur des eaux ruisselées. Une forte couverture végétale est donc associée à un niveau de susceptibilité faible des inondations et vice versa.

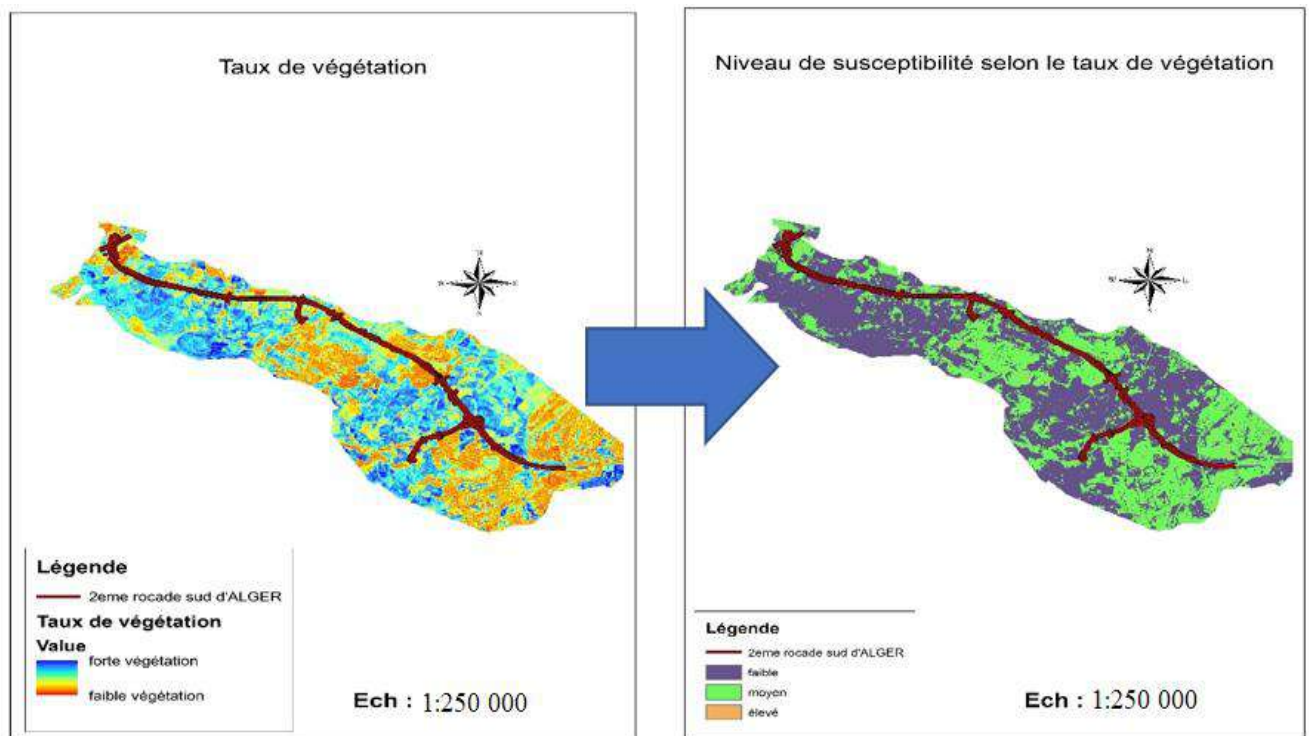


Figure V-13 : Niveau de susceptibilité aux inondations selon le taux de végétation.

V.3.2.5 Facteurs géotechniques

➤ Classe granulaire

Les essais laboratoires élaborés dans la réalisation du projet ont déterminé les passants à 80 μm à partir de l'essai Analyse granulométrique par tamisage. Le document GTR, guide des terrassement routiers, nous a permis de classer les sols, selon le pourcentage des fines dans ce sol en 2 classes.

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{\text{max}} \leq 50 \text{ mm}$ et passant à 80 μm > 35 %	A1 à A4 selon VBS ou Ip
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{\text{max}} \leq 50 \text{ mm}$ et passant à 80 μm $\leq$ 35 %	B1 à B6 selon VBS ou Ip et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{\text{max}} > 50 \text{ mm}$ et passant à 80 μm > 12 % ou passant à 80 μm $\leq$ 12 % + VBS > 0,1	30 sous-classes selon VBS, Ip et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS $\leq$ 0,1 et passant à 80 μm $\leq$ 12%	D1 à D3
R	Matériaux rocheux	voir la norme NF P 11-300	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	voir la norme NF P 11-300	

D_{max} = diamètre pour lequel 95 % des grains du sol ont une dimension inférieure (soit D_{95} si la courbe granulométrique est disponible, sinon appréciation visuelle de la dimension des plus gros éléments).

Figure V-14: Classification GTR des sols.

Chapitre V : Analyse multicritère de susceptibilité.

La première classe est la classe A, Sols fins. La 2^{ème} classe est la classe B, sols sableux et graveleux avec fines. En fonction du pourcentage des fines, on peut apprécier la perméabilité du sol. Un sol comportant beaucoup de fines est supposé moins perméable qu'un sol ayant peu ou pas de fines. Car ces dernières occupent les pores et ne permettent pas les infiltrations de l'eau.

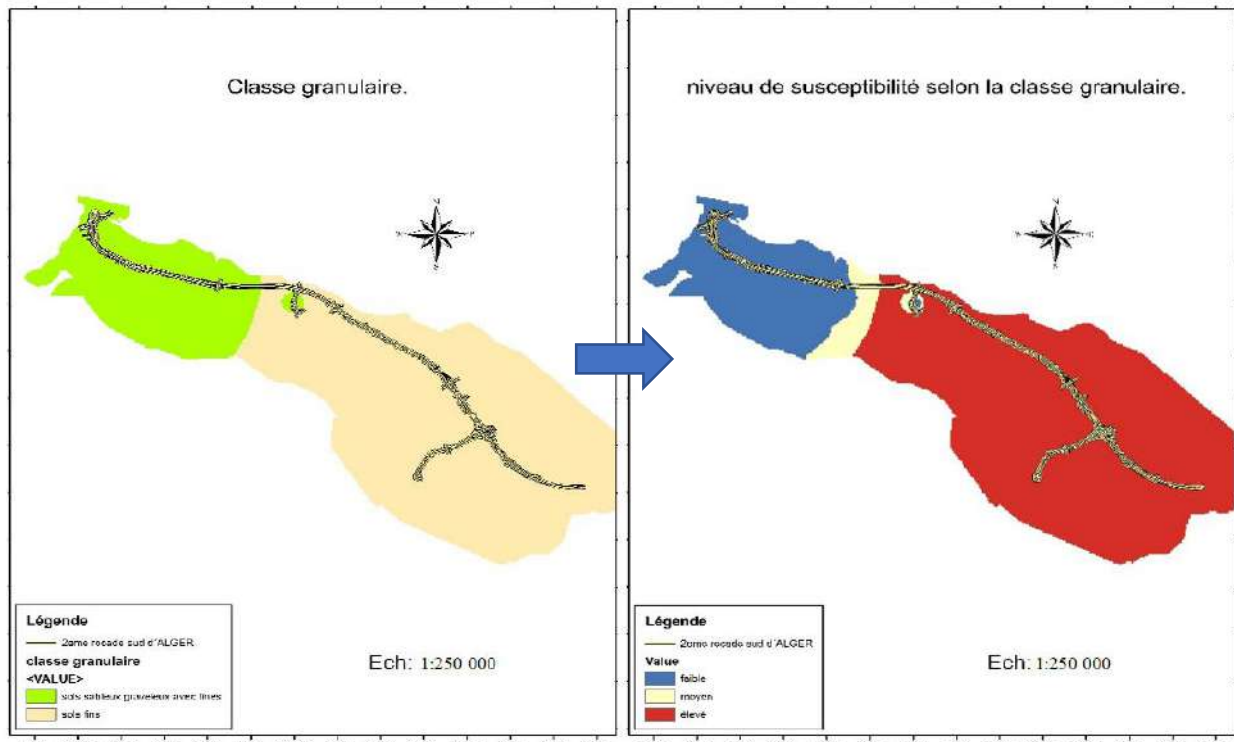


Figure V-15: Niveau de susceptibilité selon la classe granulaire.

V.4 Cartographie des aléas

Afin de cartographier la susceptibilité de l'occurrence des aléas, des combinaisons des facteurs influençant chaque aléa doivent être faites, en affectant pour chaque facteur un coefficient de pondération relevant de l'importance de ce dernier dans l'occurrence de cet aléa. Afin de déterminer les coefficients de pondération des facteurs et leurs impacts sur les deux aléas, deux méthodologies ont été utilisées, une méthode directe dite experte, et indirecte basée sur une analyse hiérarchique, fondées sur l'outil SIG pour combiner différents facteurs de prédisposition.

V.4.1 Méthodes de prise de décision

V.4.1.1 Méthode qualitative ou experte

Une méthode dans laquelle le scientifique évalue intuitivement les relations entre les aléas étudiés observés et différents facteurs de prédisposition.

V.4.1.2 Méthode semi quantitative AHP

La méthode d'aide à la décision multicritère AHP a été conçue par Thomas Saaty au cours des années 70. Elle est utilisée dans un vaste éventail de domaines d'application aux quatre coins de la planète et de façon soutenue depuis son introduction il y a 40 ans. [29]

AHP a l'avantage de permettre une structure hiérarchique des critères, ce qui nous a permis de mieux nous concentrer sur des critères et sous-critères spécifiques lors de l'attribution des pondérations. Cette approche est importante, car une structure différente peut conduire à un classement final différent. Les critères comportant un grand nombre de sous-critères ont tendance à recevoir plus de poids que lorsqu'ils sont moins détaillés. Dans l'application de l'analyse décisionnelle multicritères, le processus de hiérarchie analytique, qui est une technique structurée pour traiter des décisions complexes, a été appliqué pour structurer les facteurs causaux des inondations et les glissements de terrain. [25]

Une fois la hiérarchie construite, nous avons établie des priorités pour tous ses nœuds. Les priorités sont réparties sur une hiérarchie en fonction de son architecture, et leurs valeurs dépendent des informations saisies par les utilisateurs du processus, comme illustré dans le tableau ci-dessous. Dans AHP, les comparaisons multiples par paires sont basées sur une échelle de comparaison standardisée de neuf niveaux. Les neuf points sont choisis parce que les psychologues concluent que neuf objets sont le maximum qu'un individu peut simultanément comparer et classer de manière cohérente. Des jugements par paires sont effectués sur la base des meilleures informations disponibles et des connaissances et de l'expérience du décideur. [25]

Tableau V-4: Intensité d'importance des facteurs en AHP.

Intensité d'importance pour $a(i, j)$ (lorsque i domine j)	Définition	La description
1	D'importance égale	Deux facteurs contribuent également à l'objectif.
3	Modérément plus important	L'expérience et le jugement favorisent légèrement l'un par rapport à l'autre.
5	Fortement plus important	L'expérience et le jugement favorisent fortement l'un par rapport à l'autre.
7	Très fort plus important	L'expérience et le jugement favorisent très fortement l'un

9 2,4,6,8 Réciproque		par rapport à l'autre. Son importance est démontrée dans la pratique.
	Extrêmement plus important	Les preuves en faveur de l'un par rapport à l'autre sont de la plus haute validité possible.
	Valeurs intermédiaires	Quand un compromis est nécessaire.
	Si j domine i, prendra la valeur réciproque.	-

Le processus d'AHP peut se résumer en quatre étapes : construire la hiérarchie décisionnelle ; déterminer l'importance relative des attributs et des sous-attributs ; évaluer chaque alternative et calculer son poids global par rapport à chaque attribut, et vérifier la cohérence des évaluations subjectives [30].

La méthode AHP a été utilisée avec succès dans différents domaines et disciplines. La capacité de gérer à la fois des données qualitatives et quantitatives fait d'AHP une méthodologie idéale pour certains problèmes de priorisation en tenant compte de différents critères. Ceci est mathématiquement décrit ci-dessous : [25]

Soit $C = \{C_j | j=1, 2, \dots, n\}$ l'ensemble des critères. Les résultats de la comparaison par paires sur n critères peuvent être résumés dans une matrice d'évaluation A de dimension $(n \times n)$ dans laquelle chaque élément a_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) est le quotient des poids des critères, comme indiqué dans l'équation (V-1).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, a_{ii} = 1, a_{ji} = 1/a_{ij}, a_{ij} \neq 0. \quad (V-1)$$

À la dernière étape de l'AHP, le processus mathématique commence à normaliser et à trouver les poids relatifs pour chaque matrice. Les poids relatifs sont donnés par le vecteur propre (w) correspondant à la plus grande valeur propre ($\lambda_{\max}$) comme dans l'équation (VII-2). [25]

$$A_w = \lambda_{\max} w \quad (V-2)$$

Si les comparaisons par paires sont parfaitement cohérentes, la matrice A est de rang 1 et $\lambda_{\max} = n$. Dans ce cas, les poids peuvent être obtenus en normalisant n'importe laquelle des lignes ou colonnes de la matrice. Il convient de noter que la qualité de la sortie de l'AHP est

Chapitre V : Analyse multicritère de susceptibilité.

strictement liée à la cohérence des paires de jugements comparatifs. L'indice de cohérence IC est évalué par la relation : [25]

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (V-3)$$

Le rapport de cohérence finale RC, dont l'utilisation permet à l'utilisateur de conclure si les évaluations sont suffisamment cohérentes, est calculé comme le rapport des IC et l'indice aléatoire IR dont les valeurs sont exprimées dans le tableau ci-dessous.

Tableau V-5: Valeurs de l'indice aléatoire en fonction du nombre de critère.

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

V.5 Expression des résultats

V.5.1 Cartographie de l'aléa glissements de terrain

Les résultats de la comparaison par paires des facteurs sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V-6: Matrice de comparaison par paires des facteurs influençant les glissements de terrain.

Critère	Lithologie	Pentes	Distance aux cours d'eau	Pendage	compacité	Plasticité	Végétation
Lithologie	1	1/3	1/3	1/3	1	1/5	2
Pentes	3	1	1	1	3	1/5	5
Distance aux cours d'eau	3	1	1	1	3	1/2	1/2

Chapitre V : Analyse multicritère de susceptibilité.

Orientatio n des versants	3	1/3	1	1	4	1/2	4
compacité	1	1/3	1/3	1/4	1	1/5	2
Plasticité	5	5	2	2	5	1	7
Végétatio n	1/2	1/5	2	1/4	1/2	1/7	1

Tableau V-7: Matrice de comparaison normalisée.

Critère	Lithologi e	Pente s	Distanc e aux cours d'eau	Orientatio n des versants	SPT	Plasticit é	Végétatio n
Lithologie	0.06	0.05	0.04	0.06	0.06	0.07	0.09
Pentes	0.18	0.15	0.13	0.17	0.17	0.12	0.23
Distance aux cours d'eau	0.18	0.15	0.13	0.17	0.17	0.17	0.02
Orientatio n des versants	0.18	0.15	0.13	0.17	0.23	0.17	0.19
SPT	0.06	0.05	0.04	0.04	0.06	0.07	0.09
Plasticité	0.30	0.44	0.26	0.34	0.29	0.35	0.33

Chapitre V : Analyse multicritère de susceptibilité.

Végétation	0.03	0.03	0.26	0.04	0.03	0.05	0.05
-------------------	------	------	------	------	------	------	------

En effectuant les calculs décrits dans la partie précédente nous obtenons un Rapport de cohérence RC=0.08.

Les coefficients de pondérations obtenues de la méthode AHP ainsi que la méthode experte sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V-8: Coefficients de pondération pour les facteurs influençant les glissements de terrain.

Critère	Coefficient AHP (%)	Coefficient experte (%)
Lithologie	6.28	8
Degré des pentes	16.82	19
Distance aux cours d'eau	13.57	15
Pendage	17.44	17
Compacité	6.09	8
Plasticité	33	25
Végétation	6.80	8

Nous obtenons enfin les 2 cartes de susceptibilité au glissement de terrain. Comme montré dans les figures suivantes. On peut remarquer en analysant les deux cartes que les 2 méthodes convergent vers le même résultat malgré la différence dans les valeurs des coefficients de pondérations. Ceci revient au fait que la probabilité de l'occurrence de plusieurs facteurs au même temps dépend majoritairement des caractéristiques du terrain lui-même et très peu des coefficients pris en compte.

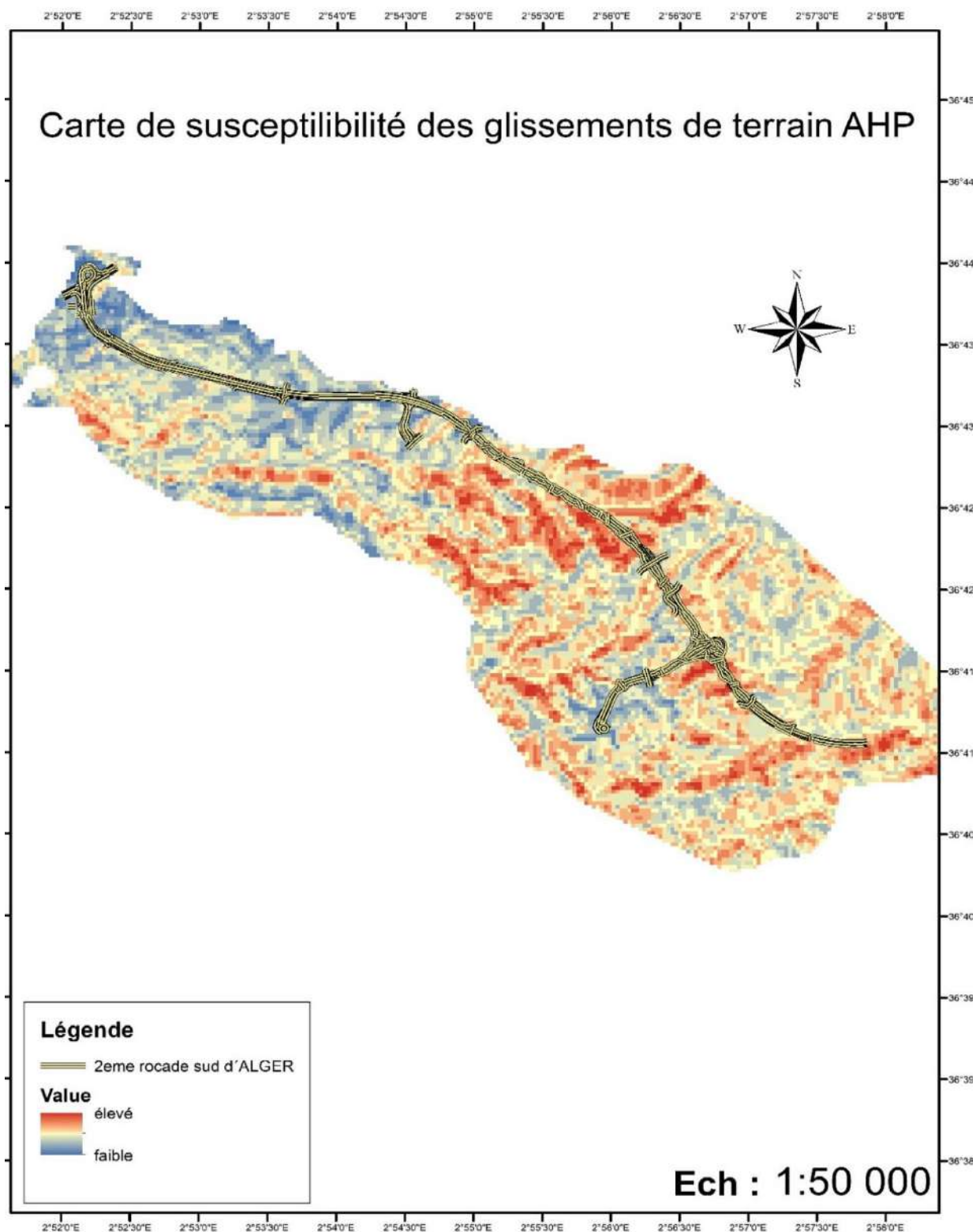


Figure V-16: Carte de susceptibilité aux glissements de terrain issue de la méthode AHP.

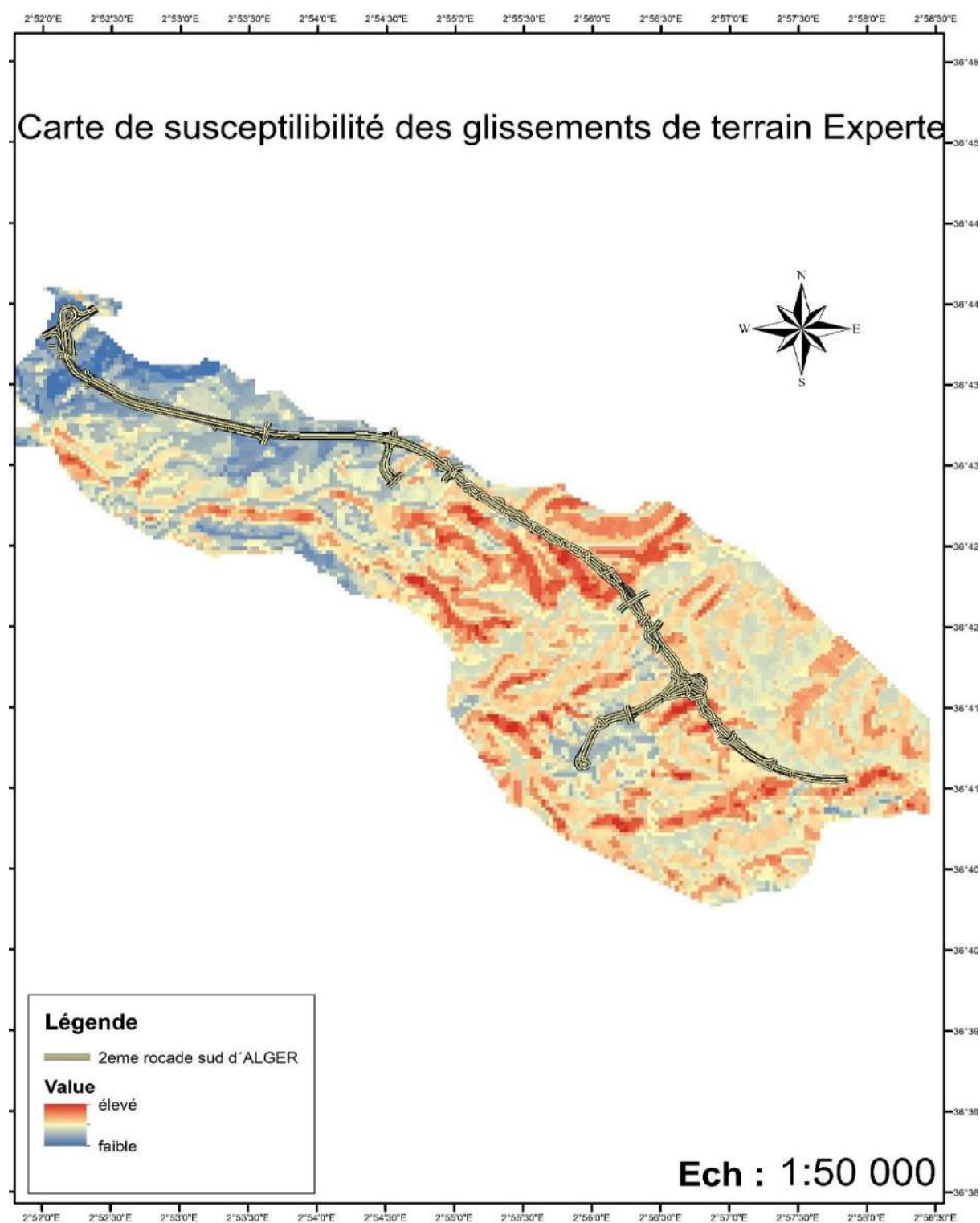


Figure V-17: Carte de susceptibilité aux glissements de terrain issue de la méthode experte.

V.5.2 Cartographie de l'aléa inondations

Les résultats de la comparaison par paires des facteurs sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V-9: Matrice de comparaison par paires des facteurs influençant les inondations.

Critère	TWI	Distance aux cours d'eau	Lithologie	Classe granulaire	Degré des pentes	Végétation
TWI	1	1	3	3	2	5
Distance aux cours d'eau	1	1	3	3	2	5
Lithologie	1/3	1	1	1	1/2	2
Classe granulaire	1/3	1/3	1	1	1/2	2
Degré des pentes	1/2	1/2	2	2	1	3
Végétation	1/5	1/5	1/2	1/2	1/3	1

Tableau V-10: Matrice de comparaison normalisée.

Critère	TWI	Distance aux cours d'eau	Lithologie	Classe granulaire	Degré des pentes	Végétation
TWI	0.30	0.30	0.29	0.29	0.32	0.28
Distance aux cours d'eau	0.30	0.30	0.29	0.29	0.32	0.28
Lithologie	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08	0.11
Classe granulaire	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08	0.11
Degré des pentes	0.15	0.15	0.19	0.19	0.16	0.17
Végétation	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06

En effectuant les calculs décrits dans la partie précédente nous obtenons un Rapport de cohérence $RC=0$.

Les coefficients de pondérations obtenues de la méthode AHP ainsi que la méthode experte sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau V-11: Coefficients de pondération pour les facteurs influençant les inondations.

Critère	Coefficient AHP (%)	Coefficient experte (%)
TWI	29.34	23
Distance aux cours d'eau	29.34	22
Lithologie	9.62	11
Classe granulaire	9.62	13
Degré des pentes	16.72	18
Végétation	5.36	13

Nous obtenons enfin les 2 cartes de susceptibilité aux inondations comme montré dans les figures suivantes :

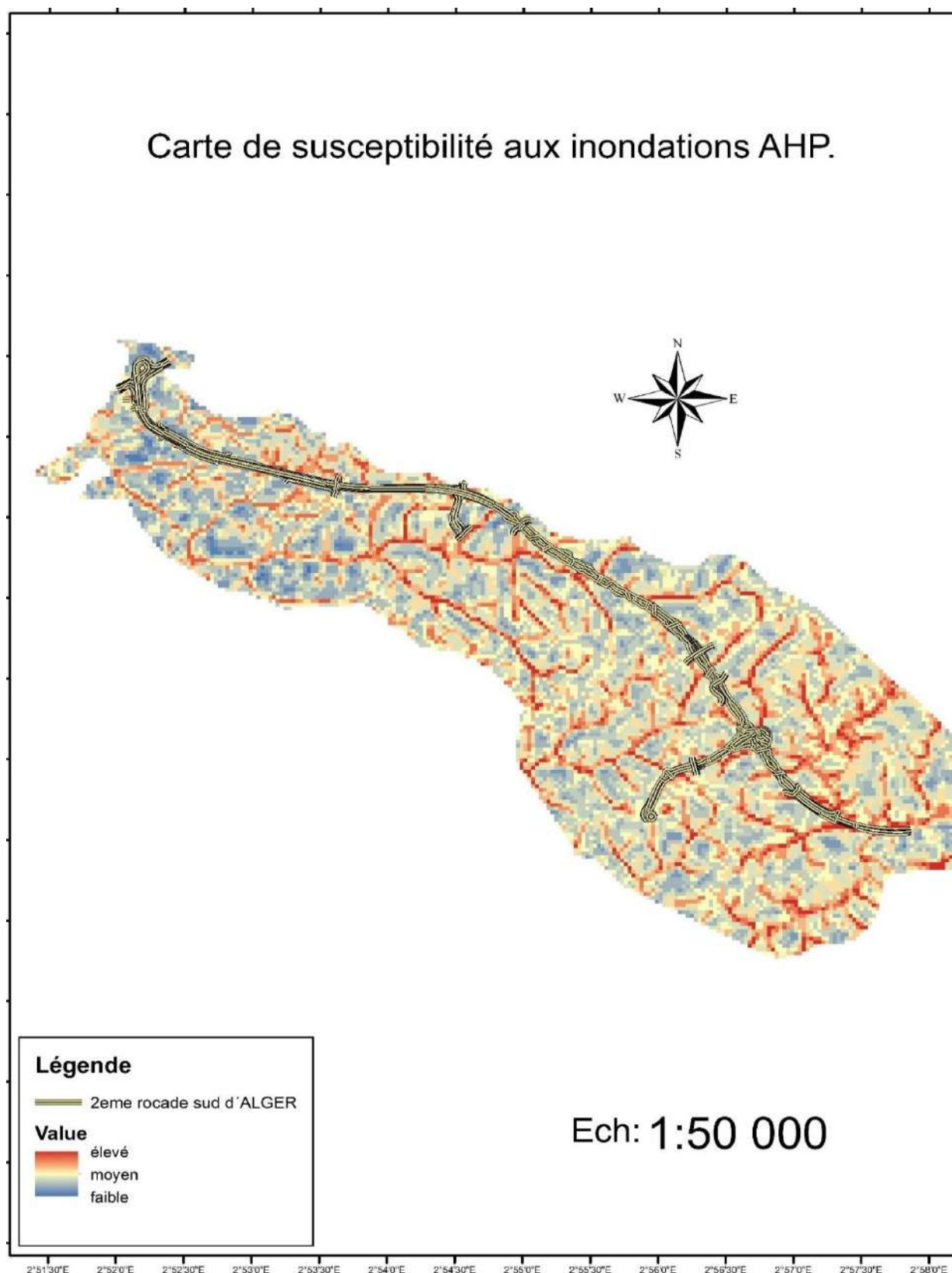


Figure V-18: Carte de susceptibilité aux inondations issue de la méthode AHP.

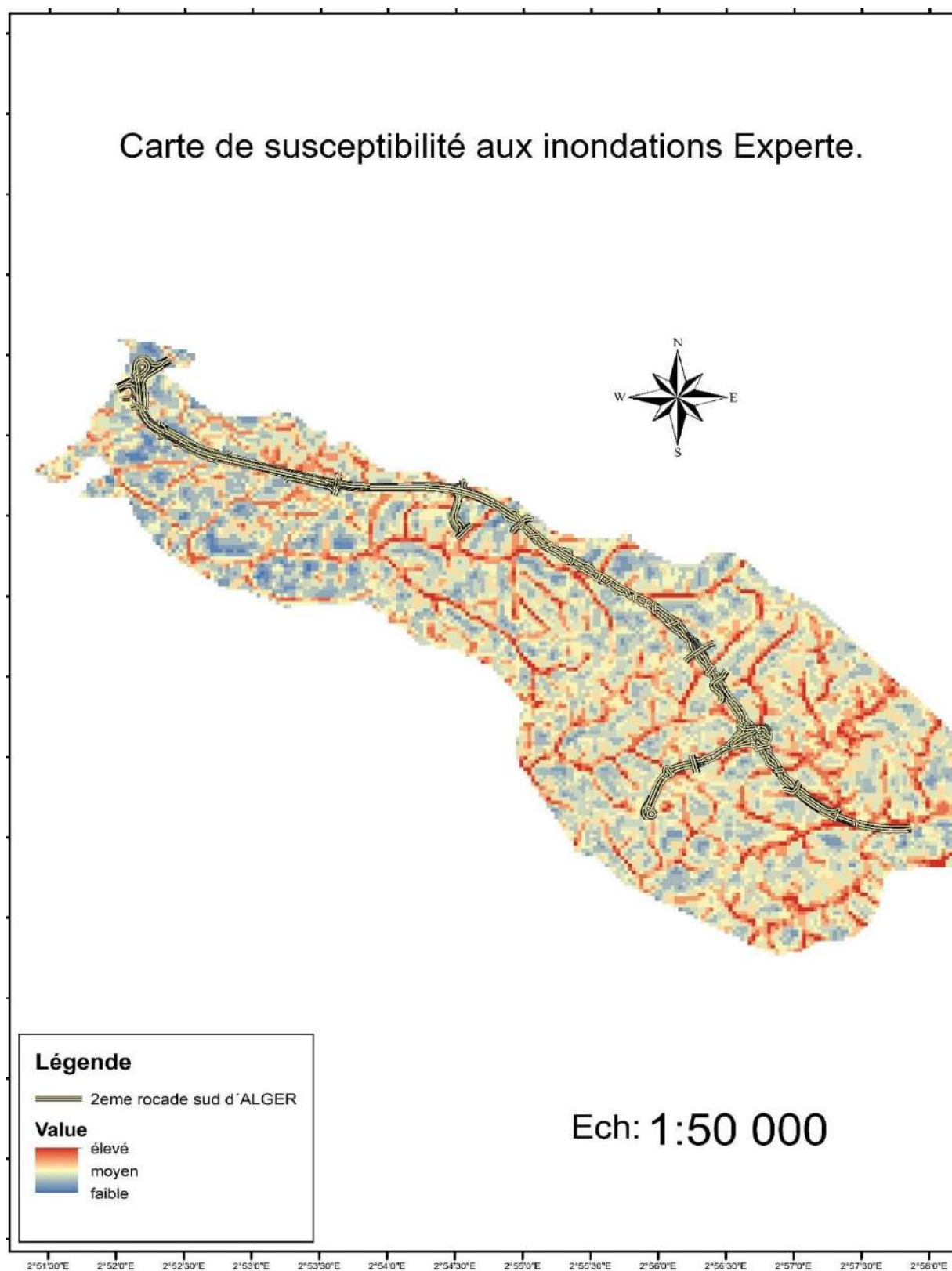


Figure V-19: Carte de susceptibilité aux inondations issue de la méthode experte.

V.6 Interprétation des résultats

A travers les cartes de susceptibilité présentée ci-dessus on remarque que la partie sud de la zone étudiée présente une grande susceptibilité aux glissements de terrains, ceci revient à la nature marneuse des sols de la zone, ainsi que la nature vallonnée du relief, contrairement à la partie nord qui est caractérisée par un grand plateau. En revanche, on remarque que les zones proches des cours d'eau sont plus susceptibles à être inondées que les zones éloignées.

La carte de susceptibilité aux glissements de terrains peut servir comme outil d'investigation sur terrain, par contre l'interprétation de la carte de susceptibilité aux inondations peut nous amener à se poser plusieurs questions. Si on prend l'exemple du tronçon montré dans la figure ci-dessous, la susceptibilité de l'occurrence d'une inondation est forte, mais quand elle aura lieu le tronçon sera-t-il concerné par cette inondation ? est-ce que le trafic sera coupé ? à quel point cette autoroute est vulnérable vis-à-vis cette inondation ? On ne le sait pas.

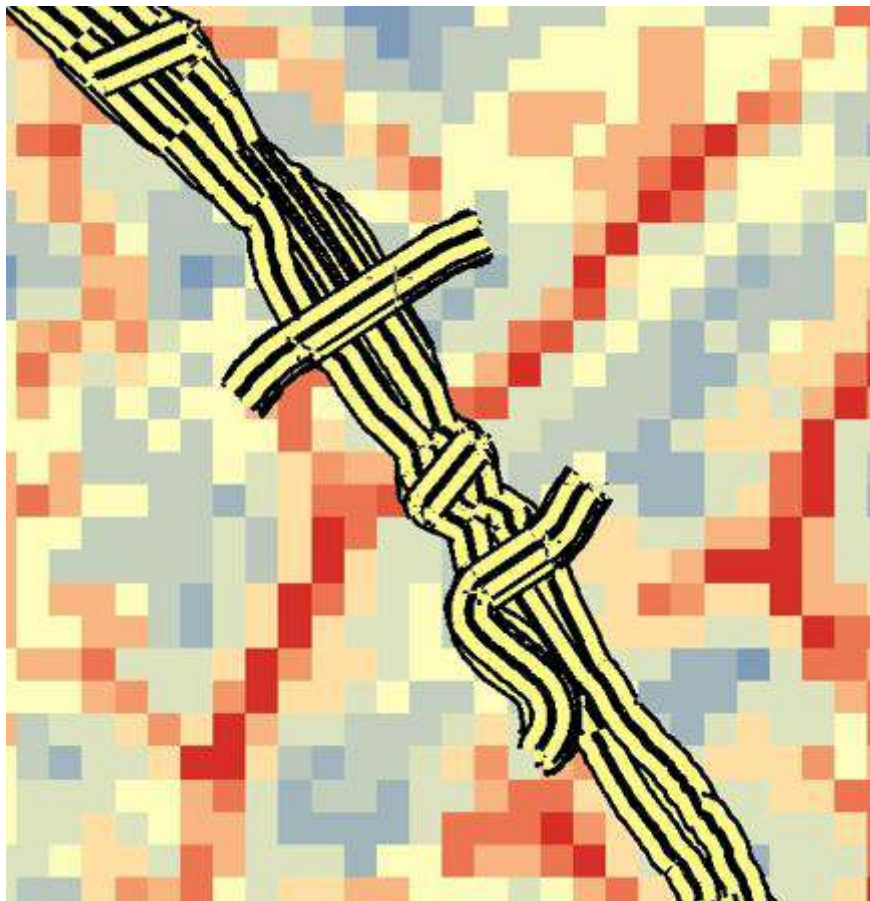


Figure V-20: Niveau de susceptibilité élevé au niveau de l'autoroute.

V.6.1 Le BIM instrument de mesure de la vulnérabilité

Comme on vient de voir, l'aléa est mesuré en utilisant les outils SIG. Une fois que cette cartographie est terminée la maquette numérique peut servir à quantifier la vulnérabilité (les routes, autoroutes, bâtiments, etc...). Ce qui permet de mesurer le risque défini comme l'aléa x La vulnérabilité. En effectuant la projection de la carte de susceptibilité aux glissements de terrain on peut apprécier le risque comme dans la figure suivante.

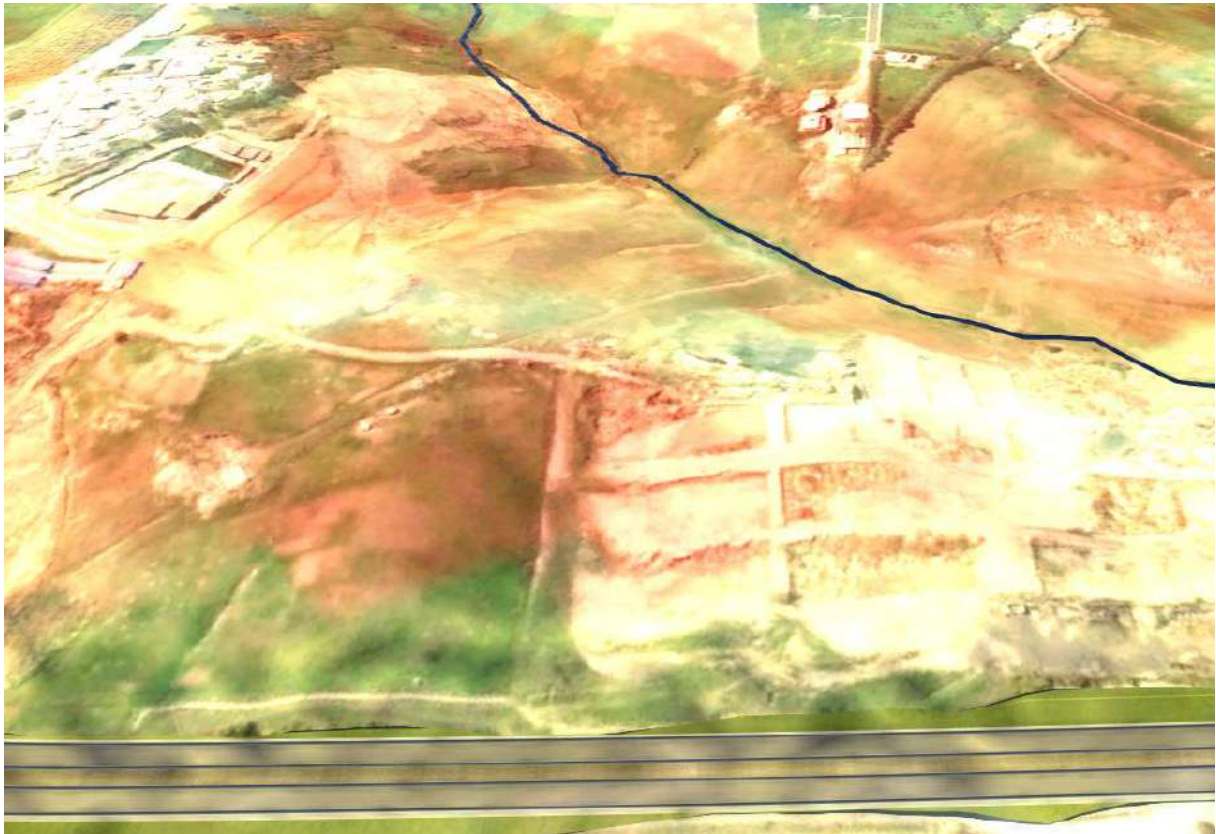


Figure V-21: Visualisation du risque de glissement sur INFRAWORKS.

Dans cette figure, on voit que le versant qui est susceptible de glisser et au-dessus de l'autoroute, si le glissement de terrain avait lieu, l'autoroute serait fortement touchée. Il y aura des coupures de Traffic. Ici on parle d'une zone à risque élevé. Dans certains cas, on peut avoir des zones à susceptibilité forte de glissement de terrain, mais comme la vulnérabilité est faible le risque est moins important.

V.7 Conclusion

Après la projection de la carte de susceptibilité de glissement de terrain sur le modèle Infraworks, nous avons pu mesurer le risque existant dans la route, il reste à vérifier les zones à risque élevé sur site pour pouvoir diagnostiquer et proposer des solutions.

La carte de susceptibilité aux inondations est mieux adaptée à la détermination des Territoires à Risque d'inondation, qui peut servir à mieux choisir entre les variantes du tracé routier lors des études préliminaires, mais qui reste insuffisante pour les besoins de notre étude. A cet effet, une modélisation hydraulique des inondations fera l'objet du chapitre suivant.

***Chapitre VI : La
modélisation hydraulique
des inondations dans la
zone d'étude.***

VI.1 Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéresserons aux modèles hydrauliques « numériques » (codes de calculs informatiques), en opposition aux modèles réduits (maquettes).

La modélisation hydraulique est un outil couramment employé pour la compréhension, l'analyse et la gestion des inondations. En particulier elle est d'un grand intérêt pédagogique (création de cartes d'inondations pour l'information des populations : prévention), prospectif (outil d'aide à la décision : protection et prévention) [31], mais aussi pour la prévision des inondations proprement dite. [5]

Il est important de rappeler que, comme pour tout type de modélisation, les objectifs et domaines d'utilisation visés (prévention, prévision, gestion de crise) imposent des contraintes sur le type de modèle exploité. Pour la prévention des inondations, l'objectif est de reproduire le plus précisément possible les écoulements dans la plaine, ce qui implique souvent l'emploi de modèles complexes et longs en temps de calcul. A l'inverse, dans le cadre de la prévision, les modèles employés doivent être rapides et simples à mettre en œuvre de manière à fournir des résultats de façon précise, mais surtout le plus vite possible. En conséquence, selon l'application visée, le niveau de complexité du modèle doit être adapté. [5]

VI.2 Le concept de modèle hydraulique

La modélisation hydraulique vise à prédire numériquement l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques hydrauliques au cours d'une crue : débits, vitesses, hauteurs d'eau dans la plaine. Cela permet en particulier de connaître les surfaces inondées, les durées de submersion et la vitesse de montée des eaux au cours de la crue. [5]

Un modèle est une représentation schématique, et donc simplifiée, d'un système réel. [32]. Les modèles hydrauliques abordés dans ce chapitre sont déterministes (ensemble des paramètres supposés connus exactement), distribués (paramètres et variables non uniformes dans l'espace) et mécanistes (mécanismes internes décrit par des lois physiques). Ils sont définis par : [5]

- Des équations physiques à résoudre,
- Un domaine de calcul caractérisé par une géométrie (discrétisation spatiale qui définit le type du modèle), des limites dans l'espace et le temps,
- Des paramètres hydrauliques (coefficients de frottement...) et topographiques,
- Des conditions aux limites (la plupart du temps à l'amont et à l'aval de la partie de cours d'eau modélisée),
- Des conditions initiales.

VI.2.1 Les modèles monodimensionnels (1D)

Les modèles hydrauliques monodimensionnels, aussi appelé 1D ou filaire, reposent sur une représentation géométrique de la plaine (lit mineur compris) sous forme de profils en travers repérés par leur abscisse curviligne sur un profil en long. Dans cette approche, l'écoulement est considéré canalisé, i.e. organisé suivant une direction préférentielle appelée axe d'écoulement, invariante au cours du temps. [5]

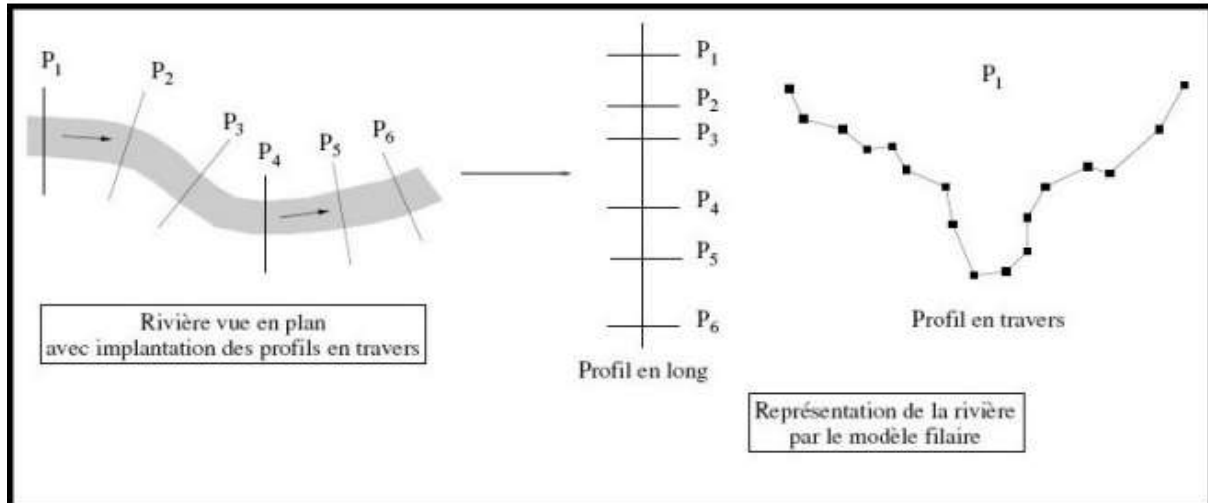


Figure VI-1: Représentation d'un cours d'eau par un modèle monodimensionnel (Roux, 2004).

En monodimensionnel, en absence de singularité hydraulique, les équations de St-Venant peuvent être simplifiées sous la forme suivante : [5]

Équation de la continuité :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (\text{VI-3})$$

Équation de la conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) V + gS \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + J \right) = K_L q_L V \quad (\text{VI-4})$$

Avec :

- S est la section mouillée, c'est-à-dire l'aire de la section transversale occupée par le fluide (m²).
- Q le débit (m³.s⁻¹).
- q_L le débit d'apport ($q_L \geq 0$) ou de fuite ($q_L < 0$) par unité de longueur (m².s⁻¹).
- g l'accélération de la pesanteur (m.s⁻²).
- Z la cote de la surface libre (m).
- J la pente de la ligne d'énergie (m.m⁻¹) également appelée perte de charge linéaire.

k_L est un coefficient tel que :

$$K_L = \begin{cases} 1 & \text{si } q_L < 0 \\ 0 & \text{si } q_L \geq 0 \end{cases} \quad (\text{VI-5})$$

- V est la vitesse moyenne dans un profil en travers (m.s-1).
- x l'abscisse curviligne (m).
- t le temps (s).

Par ailleurs, en régime graduellement varié, entre deux profils en travers de la géométrie suffisamment proches, le régime d'écoulement peut être considéré permanent. En conséquence, d'après une extrapolation de la formule de Manning-Strickler (en théorie valable uniquement en régime permanent) : [5]

$$V = K_s R_H^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (\text{VI-6})$$

où R_H désigne le rayon hydraulique (m), quotient de la section mouillée S par le périmètre mouillé P_w et K_s le coefficient de frottement de Strickler

NB : dans les modèles hydrauliques anglo-saxons, le coefficient de frottement est plus souvent représenté par le coefficient de Manning n , qui n'est autre que l'inverse du coefficient de Strickler.

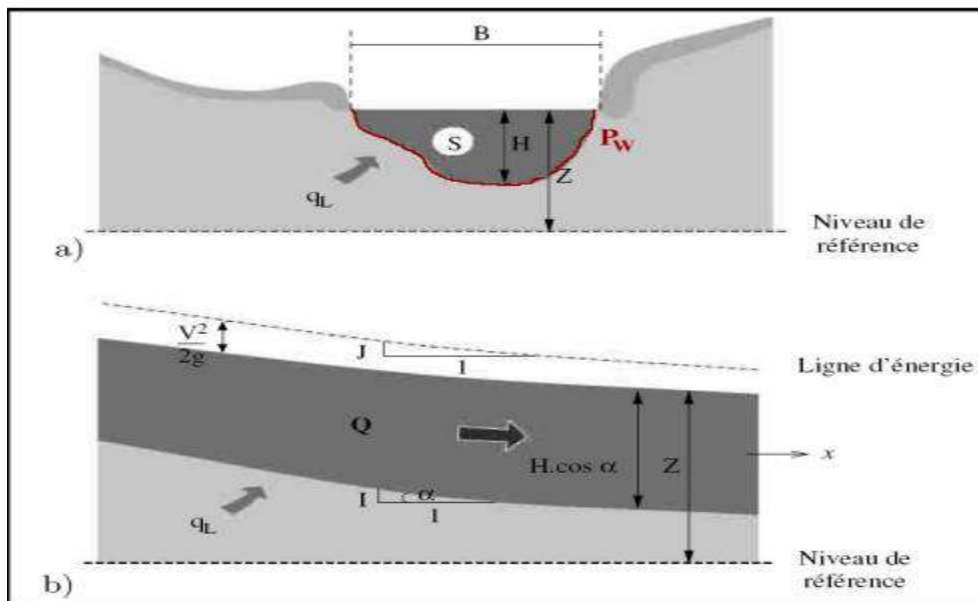


Figure VI-2: Variables hydrauliques intervenant dans les équations de Saint-Venant 1D. (a) profil en travers, (b) profil en long.

La simplification monodimensionnelle des équations de Barré de Saint-Venant impliquent les hypothèses suivantes [33] [32] :

- La surface libre est horizontale sur une section en travers : le niveau d'eau y est uniforme, l'écoulement est graduellement varié,
- La pente moyenne longitudinale de la surface libre est faible,
- L'axe de l'écoulement est assimilé à une ligne droite, c'est-à-dire que le rayon de courbure de l'axe du cours d'eau est très grand,
- Les pertes par frottements peuvent être calculées à l'aide des formules d'écoulement uniforme traditionnelles comme l'équation de Manning-Strickler.

La modélisation hydraulique monodimensionnelle est très pertinente pour des écoulements débordant peu du lit mineur [34]. Les résultats restent satisfaisants lorsque le débordement est important, à condition que la plaine d'inondation ne présente pas de trop fortes singularités, comme des obstacles transversaux par exemple, et que la topologie de la rivière n'évolue pas avec le débit - coupure de méandres, écoulement dans des bras normalement à sec... [32].

VI.3 Modélisation monodimensionnelle des inondations avec HEC-GeoRAS

En hydraulique, trois types de régime d'écoulement sont couramment distingués : l'écoulement permanent pour lequel les caractéristiques hydrauliques (débit, hauteurs, vitesses) sont invariantes au cours du temps et les écoulements graduellement et rapidement variés pour lesquels les paramètres hydrauliques varient respectivement lentement et rapidement le long de l'écoulement. Dans le cadre de la modélisation hydraulique des inondations de plaine abordée dans le mémoire, l'hypothèse est faite que les écoulements sont en régime torrentiel (rapidement variés).[5]

Afin de modéliser les inondations nous avons utilisé l'extension **HEC-GeoRAS** dans **ArcGIS** pour prendre en charge le développement et l'analyse de modèles hydrauliques avec **HEC-RAS**.

VI.3.1 Tâches principales

- Charger HEC-GeoRAS
- Démarrer un nouveau projet
- Créer des couches RAS
- Générer le fichier d'importation RAS GIS
- Analyse hydraulique HEC-RAS
- Importer le fichier d'exportation RAS GIS
- Générer des données SIG à partir des résultats RAS
- Effectuer les analyses cartographiques
- Interpréter

NB : un manuel détaillé de la modélisation des inondations est fourni en pièce jointe de ce mémoire pour le mettre à disposition de la bibliothèque de l'ENSTP

VI.3.2 Processus préliminaire

Pour commencer la modélisation nous avons tout d'abord procédé à la création des paramètres géométrique du flux sur ArcGIS afin de pouvoir importer ces paramètres ainsi que la surface du terrain vers HEC-RAS pour effectuer la simulation hydraulique, une fois la simulation est terminée les résultats sont réimporté vers ArcGIS pour la cartographie des résultats.

➤ Ligne médiane du flux

Le réseau fluvial est représenté par la ligne médiane du flux. Les réseaux sont créés branche par branche, en partant de l'amont vers l'aval en suivant le thalweg. Chaque branche est composée d'un nom de rivière et d'un nom de branche.

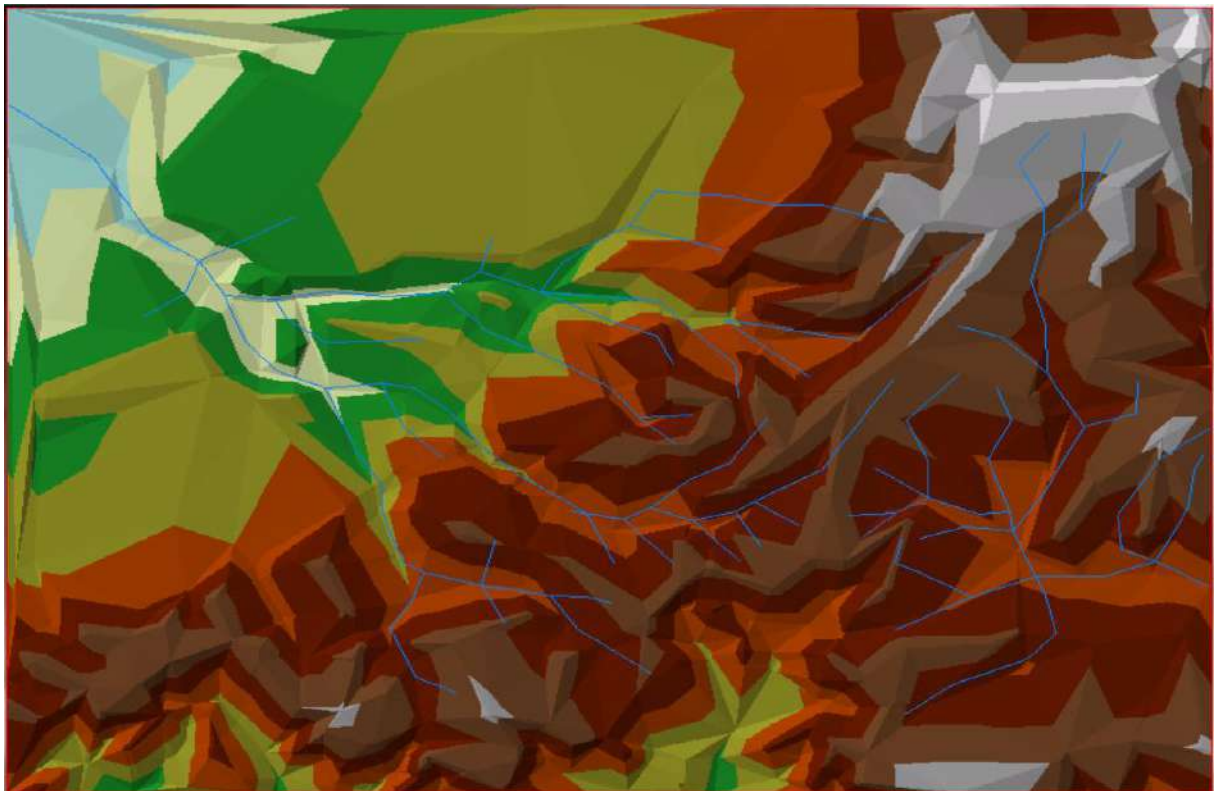


Figure VI-3: Lignes médianes du flux.

➤ Lignes de rive

Les lignes de rive définissent le flux du canal principal à partir de l'écoulement dans les berges.



Figure VI-4: Lignes de rive.

➤ Lignes du chemin d'écoulement

Les lignes du chemin d'écoulement sont utilisées pour identifier le chemin d'écoulement hydraulique dans la rive gauche, le canal principal et la rive droite.

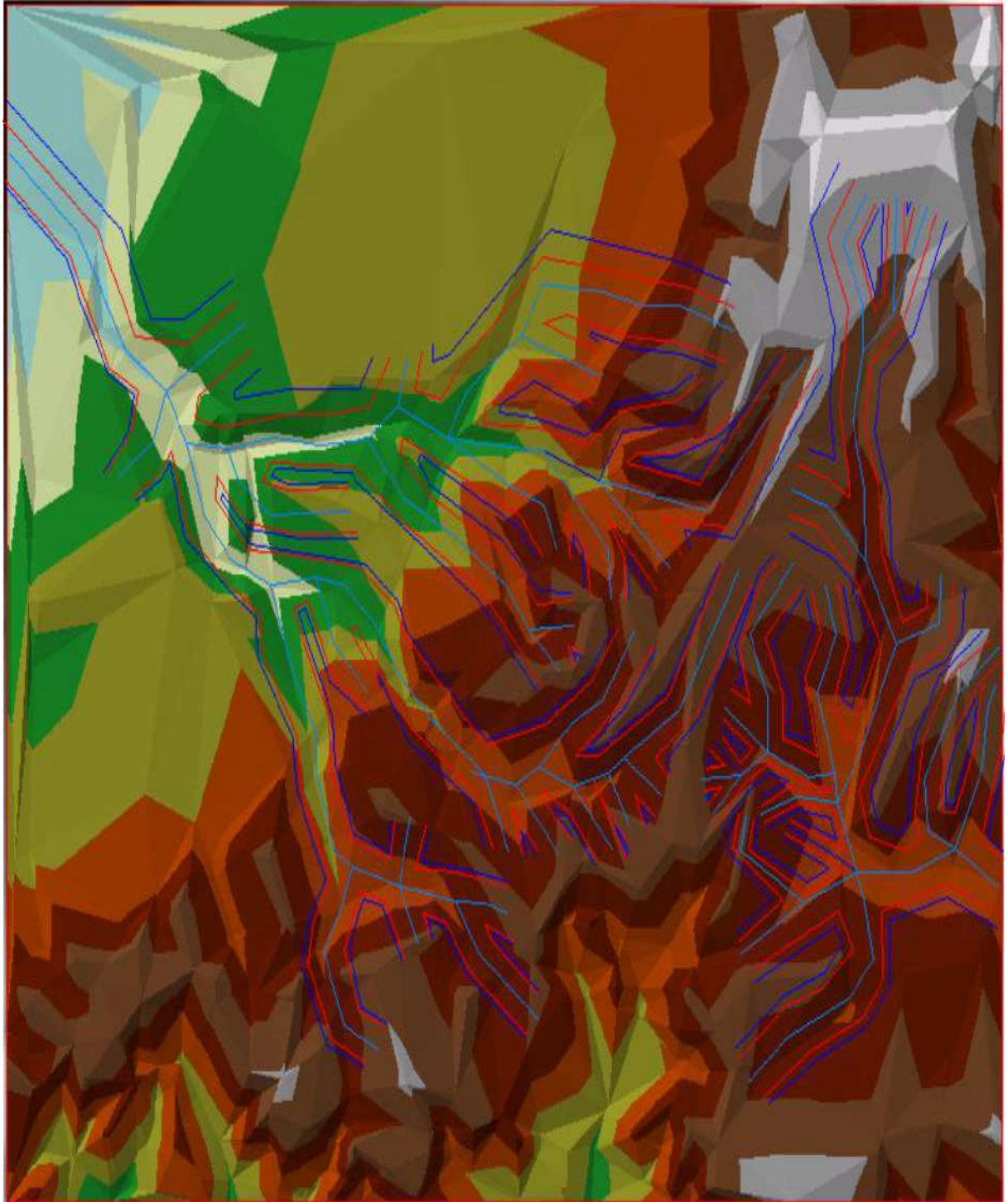


Figure VI-5: Ligne du chemin d'écoulement.

➤ Lignes de coupe transversales

Les lignes de coupe transversales assurent la projection des écoulements fluviaux sur le modèle numérique de terrain, afin de pouvoir créer des coupes transversales des fleuves.

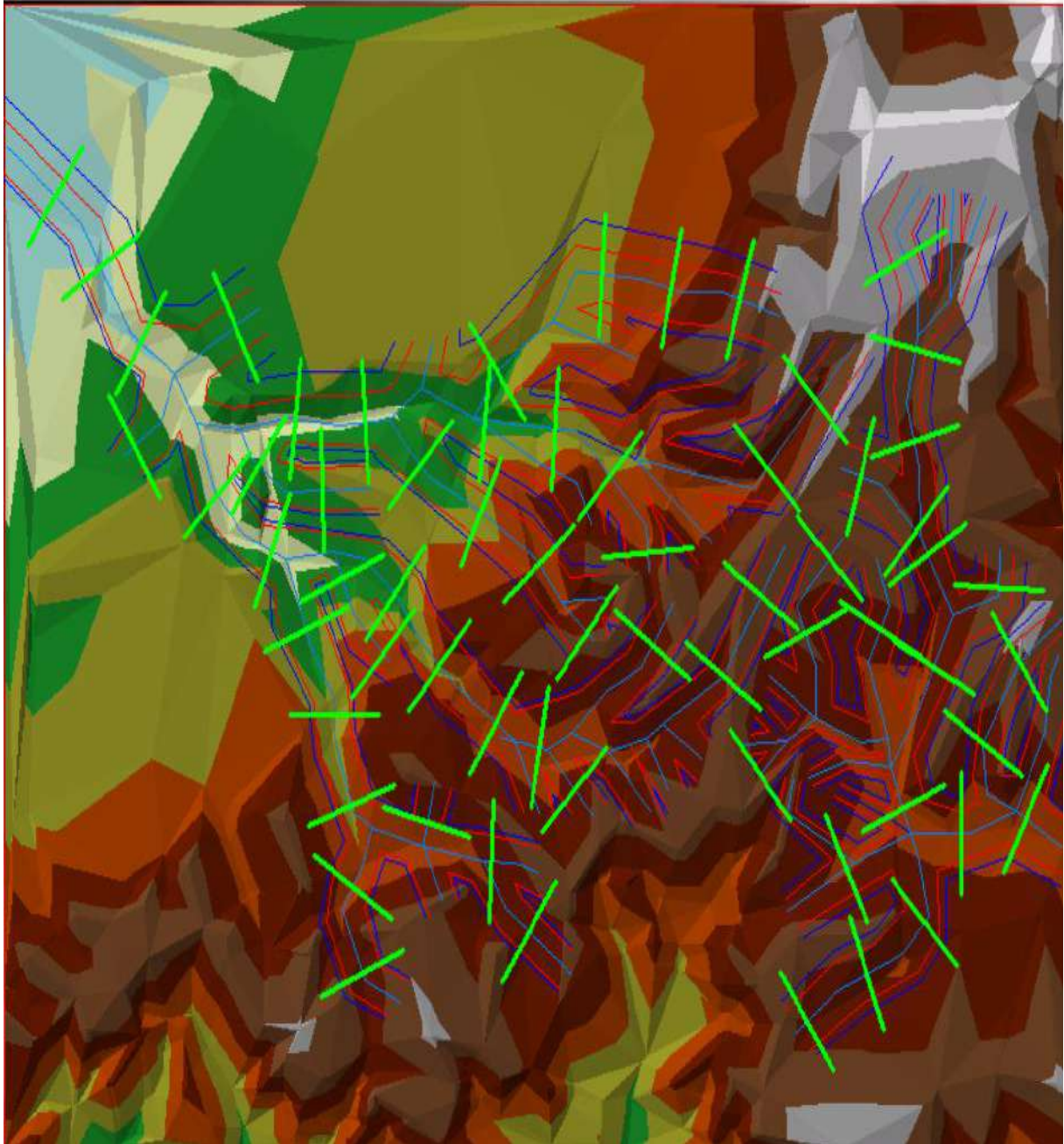


Figure VI-6: Lignes de coupe transversales.

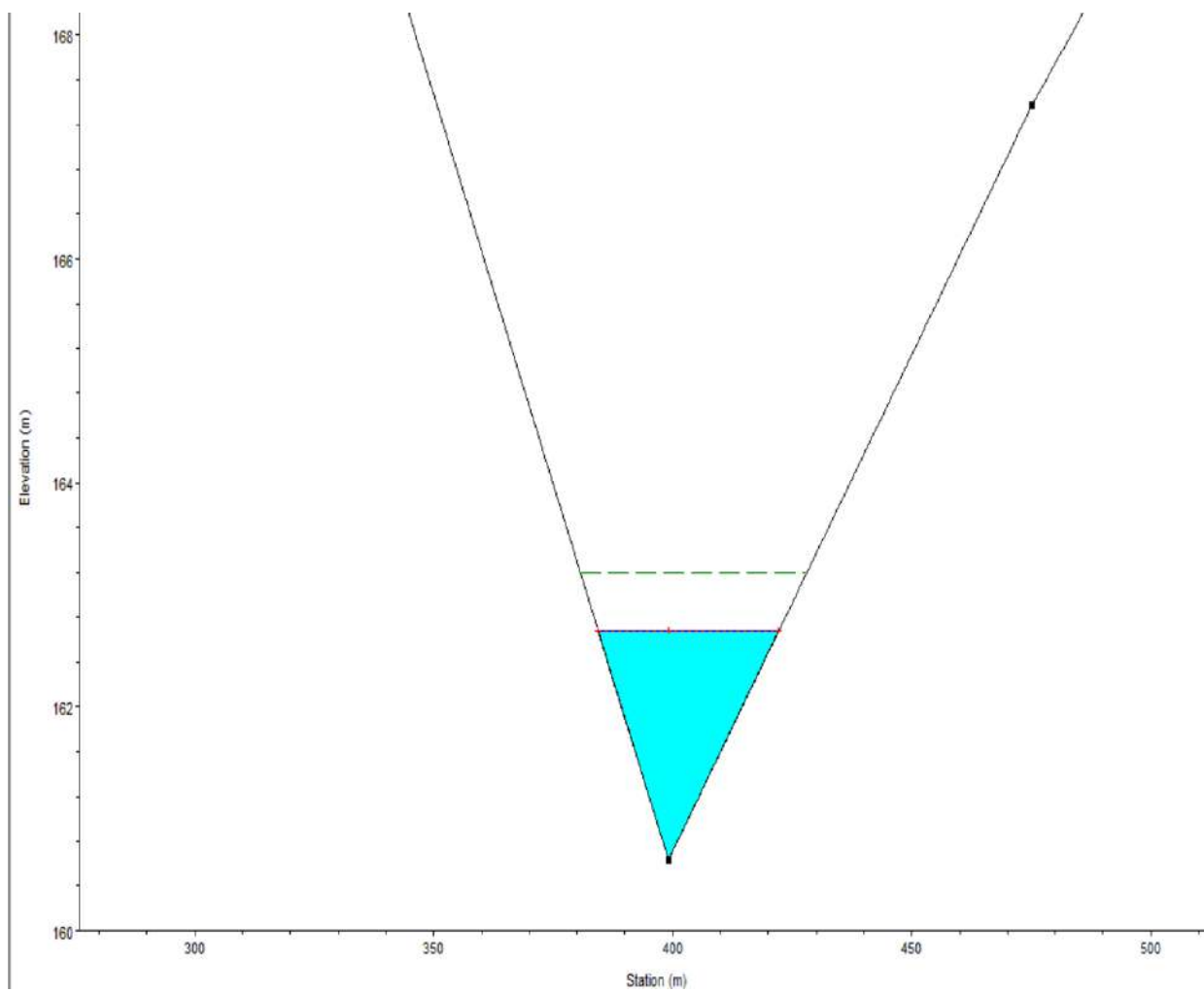


Figure VI-7: Coupe transversale sur l'oued.

Chapitre VI : La modélisation hydraulique des inondations dans la zone d'étude.

➤ Le coefficient de rugosité

Il est également nécessaire de connaître la rugosité (coefficient de Manning) en chacun des points de calcul (Werner et al., 2005). Cependant, cette information est rarement disponible car il est peu envisageable de mettre en œuvre des campagnes de mesure de coefficient de Manning pour chaque maille du modèle. Toutefois, on peut utiliser le tableau de rugosités de Manning.

Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
A) Canaux artificiels				
Ciment lissé	0,01	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,01	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moëllons bruts	0,017	0,02	0,025	0,03
Pierres sèches	0,025	0,03	0,033	0,035
Moëllons dressés	0,013	0,014	0,015	0,017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisse	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre droits et uniformes	0,017	0,020	0,0225	0,025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0,035	0,040	0,045	-
Canaux en terre à larges méandres	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre dragués	0,025	0,0275	0,030	0,033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0,028	0,030	0,033	0,035
B) Cours d'eau naturels				
1) Propres, rives en ligne droite	0,025	0,0275	0,030	0,033
2) Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0,030	0,033	0,035	0,040
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0,035	0,040	0,045	0,050
4) Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0,040	0,045	0,050	0,055
5) Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0,033	0,035	0,040	0,045
6) Idem 4, avec pierres	0,045	0,050	0,055	0,060
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0,050	0,060	0,070	0,080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0,075	0,100	0,125	0,150

Figure VI-9: Tableau des rugosités de Manning.

Edit Manning's n or k Values

River: (All Rivers) ☐ Edit Interpolated XS's Channel n Values have a light green background

Reach: All Regions

Selected Area Edit Options

	River	Reach	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	branch1	tributaryUP	6300	n	0.035	0.03	0.035
2	branch1	tributaryUP	5600	n	0.035	0.03	0.035
3	branch1	tributaryUP	4900	n	0.035	0.03	0.035
4	branch1	tributaryUP	4200	n	0.035	0.03	0.035
5	branch1	tributaryUP	3500	n	0.035	0.03	0.035
6	branch1	tributaryUP	2800	n	0.035	0.03	0.035
7	branch1	tributaryUP	2100	n	0.035	0.03	0.035
8	branch1	tributaryUP	1400	n	0.035	0.03	0.035
9	branch1	tributaryUP	700	n	0.035	0.03	0.035
10	branch1	tributaryUP	451.4606	n	0.035	0.03	0.035
11	branch2	tributaryUP2	2100	n	0.035	0.03	0.035
12	branch2	tributaryUP2	1400	n	0.035	0.03	0.035
13	branch2	tributaryUP2	700.0001	n	0.035	0.03	0.035
14	Mainstream1	Upstream	9100	n	0.035	0.03	0.035
15	Mainstream1	Upstream	8400	n	0.035	0.03	0.035
16	Mainstream1	Upstream	7700	n	0.035	0.03	0.035
17	Mainstream1	Upstream	7000	n	0.035	0.03	0.035
18	Mainstream1	Upstream	6300	n	0.035	0.03	0.035
19	Mainstream1	Upstream	5600	n	0.035	0.03	0.035
20	Mainstream1	Upstream	5302.003	n	0.035	0.03	0.035
21	Mainstream1	Upstream	4900	n	0.035	0.03	0.035
22	Mainstream1	Upstream	4559.875	n	0.035	0.03	0.035
23	Mainstream1	Upstream	4200	n	0.035	0.03	0.035
24	Mainstream1	Instream	3862.149	n	0.035	0.03	0.035

Figure VI-10: Attribution du coefficient de Manning à chaque branche de l'écoulement.

➤ Les débits d'écoulement

Afin de répondre aux besoins de notre étude les débits pris dans la simulation correspondent à un évènement climatique extrême les formules empiriques souvent utilisées dans le cadre d'une étude hydrologique ne sont pas valables ici, les débits en question sont délivrés par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques ANRH et correspondent aux événements du 07 Novembre 2021 pour une pluviométrie extrême qui a atteint les 214 mm/j.

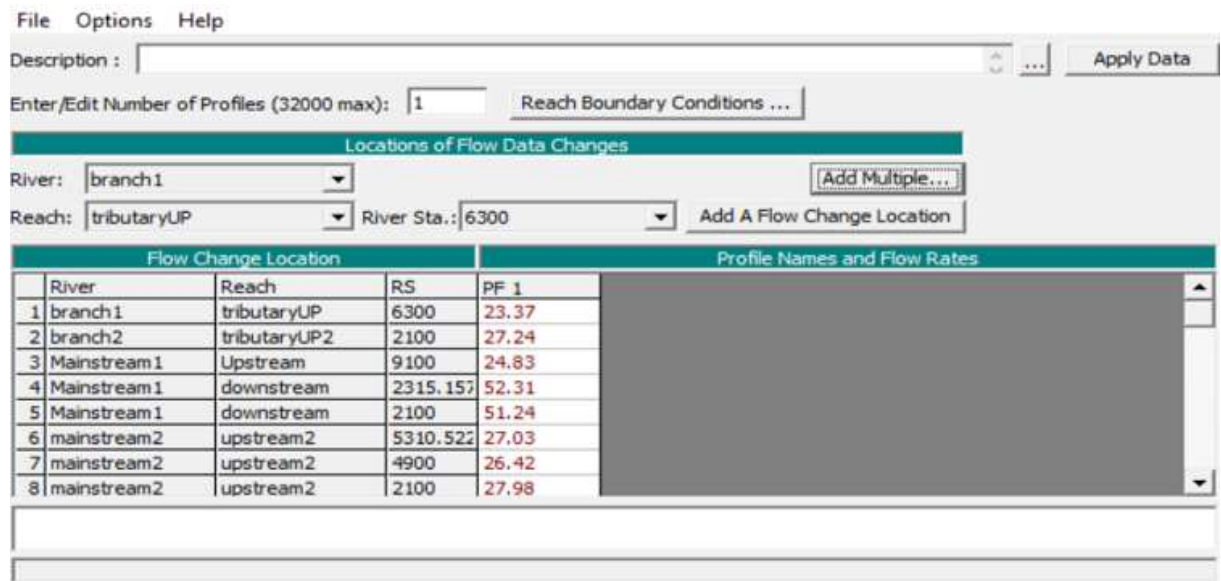


Figure VI-11: Insertion des débits d'écoulements.

VI.3.4 Processus final

Une fois les données hydrauliques sont attribuées au modèle on exécute la simulation et on importe les données vers ArcGIS, par la suite nous allons effectuer une analyse cartographique du modèle.

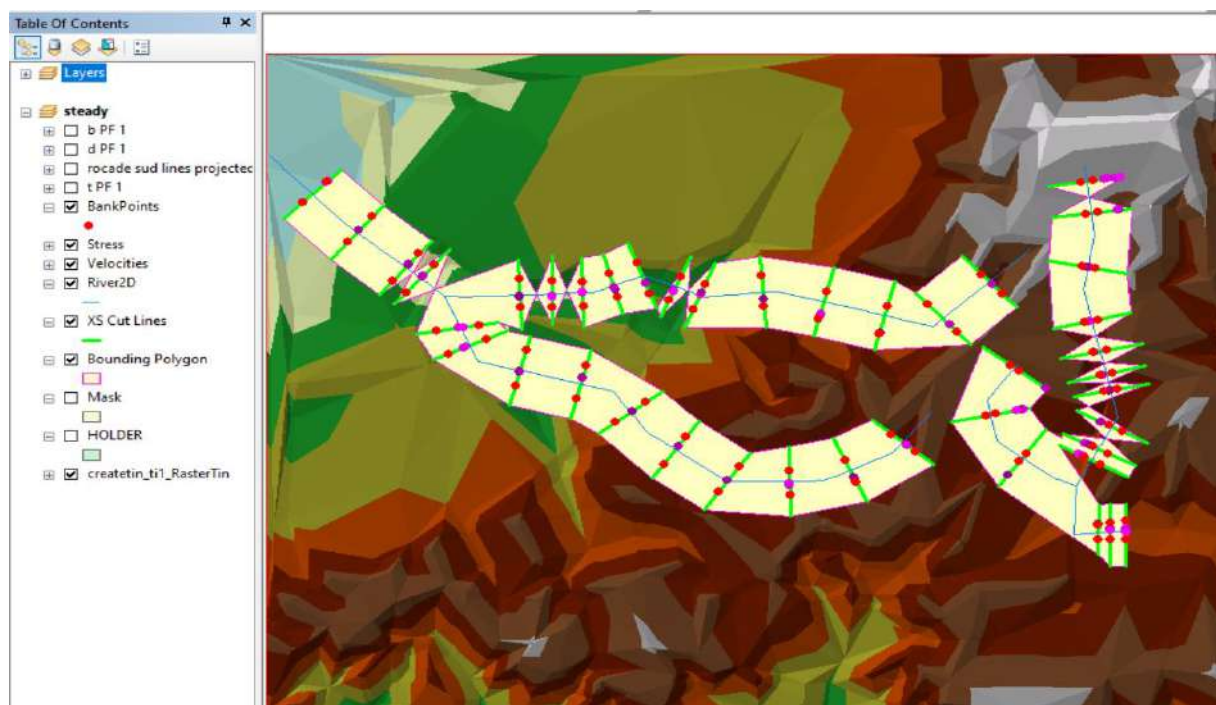


Figure VI-12: Carte importée GIS RAS.

➤ Surface d'eau

La surface de l'eau est construite à partir de la section transversale et des élévations de la surface de l'eau.

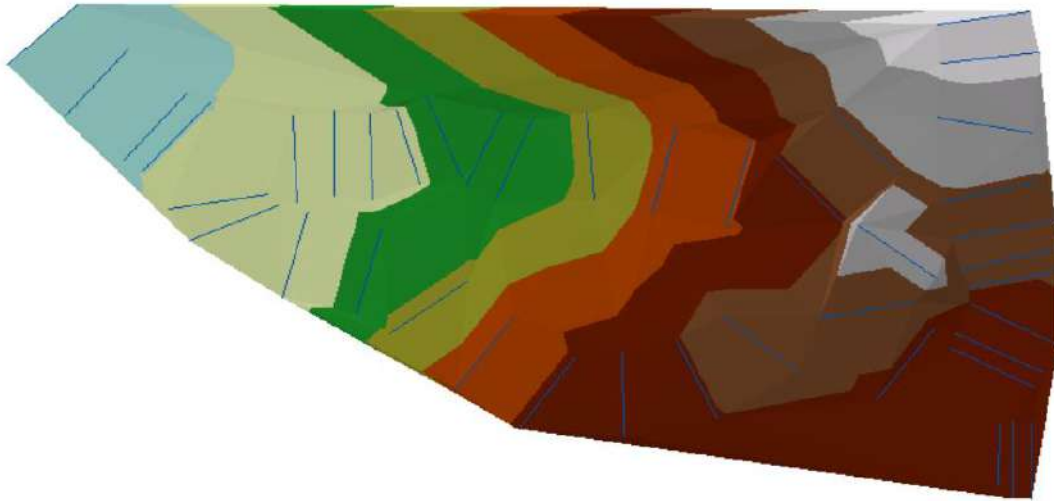


Figure VI-13: TIN de la surface d'eau.

➤ Cartographie des inondations

La surface de l'eau est comparée au MNT, les résultats montrent les zones où l'élévation de la surface d'eau est supérieure à celle du terrain naturel.

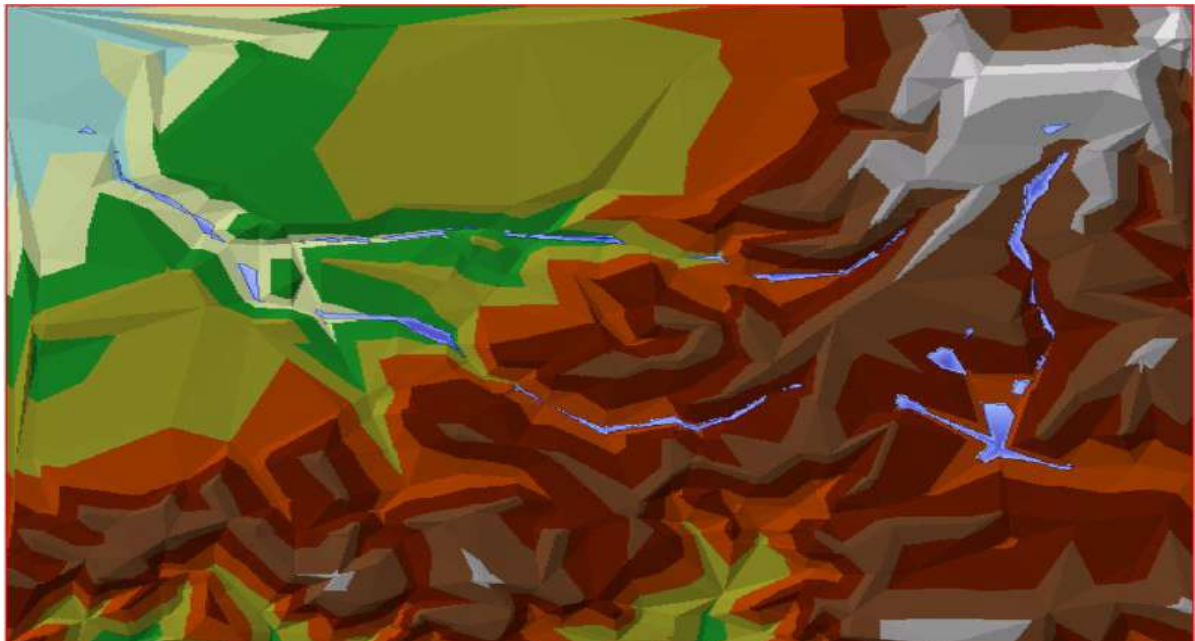


Figure VI-14: Plaine inondable.

Une fois la modélisation est terminée nous allons créer une carte afin de la mettre en exploitation.

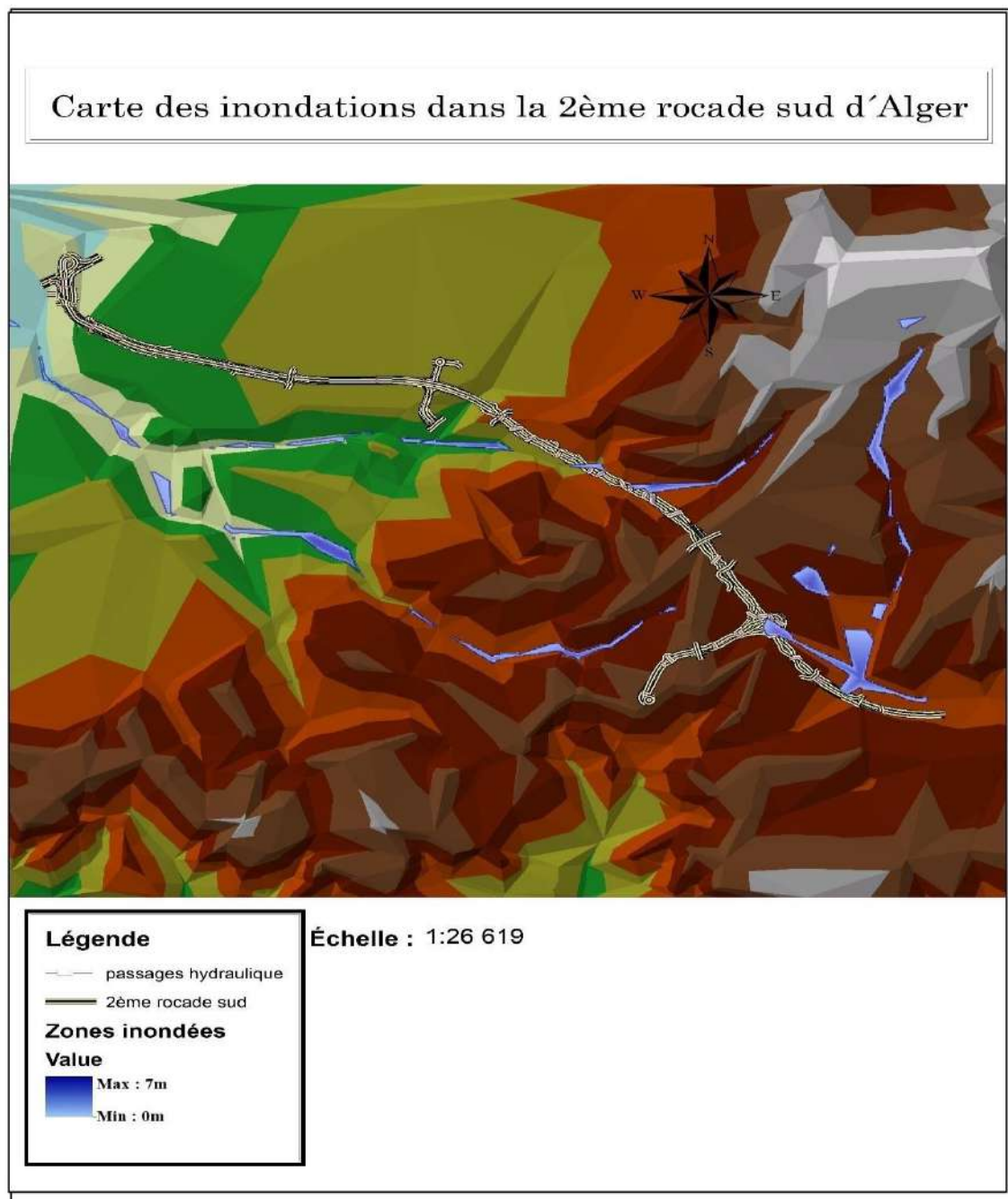


Figure VI-15: Carte des inondations dans la 2ème rocade sud d'Alger.

VI.4 Interprétation des résultats

Bien que la méthode promène des résultats précis Licencié par l'organisme US Corps of Engineers, les résultats ne sont pas directement interprétables, l'interprétation de ces derniers nécessite un passage entre CIVIL 3D et ArcGIS afin de comparer l'élévation de la surface d'eau par rapport au terrain naturel et par la suite la comparer à la hauteur des ouvrages hydrauliques correspondant.

Sur ArcGIS l'outil « Identify » peut être utilisé pour trouver des profondeurs d'eau à divers endroits comme montré dans la figure ci-dessous.

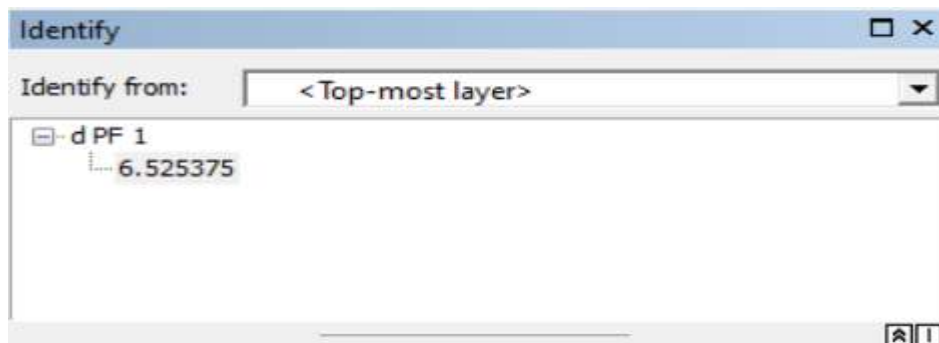


Figure VI-16: Détermination des élévations de la surface d'eau.

Par la suite on importe la zone inondable comme un shapefile et on l'ouvre dans Civil 3D pour la caler avec le tracé en plan

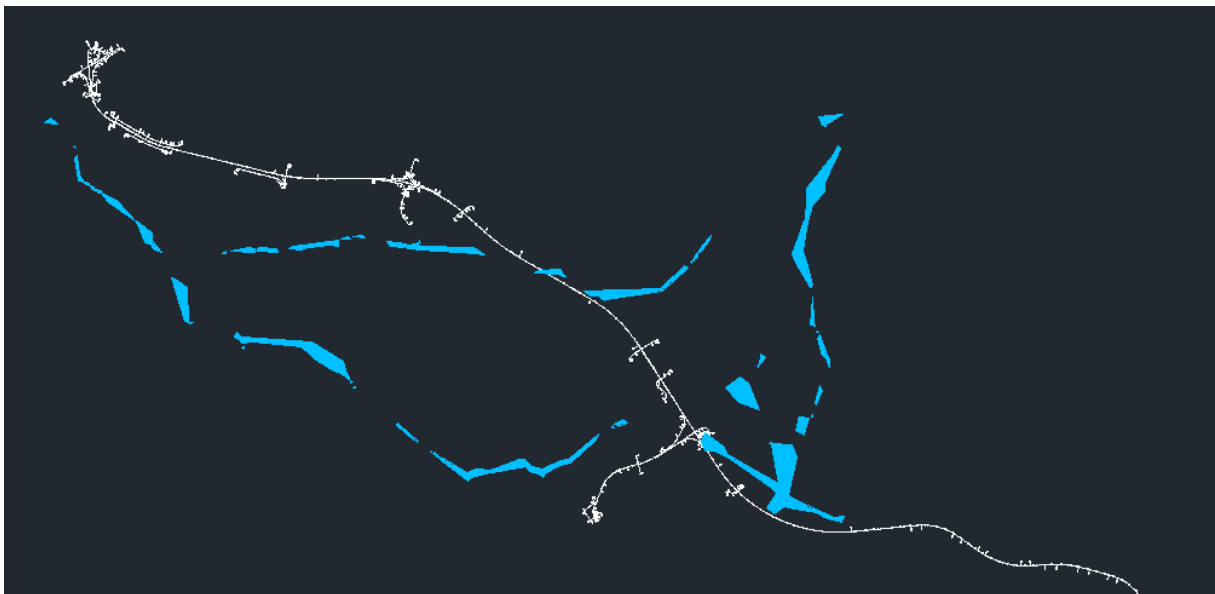


Figure VI-17: Import des zones inondables à Civil 3D.

Chapitre VI : La modélisation hydraulique des inondations dans la zone d'étude.

Et en fin on lit les élévations de la ligne rouge par rapport au terrain naturel sur le profil en long et on compare.

Tableau VI-1: Vérification des Zones inondables.

Localisation	Élévation de la surface d'eau (m)		Élévation de la ligne rouge (m)		Hauteur des ouvrages hydraulique		Interprétation
	Max	Moy	Max	Moy	Ouvrage Hydraulique	H (m)	
Pk 13+300							Taux de saturation 80,41%
Au							
Pk 13+400	0.965	0.923	7.350	7.125	OH 13-2	1.2	Vérifié
Pk 13+800							Taux de saturation 114,66%
Au	1.72	1.65	4.1	3.62	OH 13-5	1.5	
Pk 14+000							Danger
Pk 15+900							Taux de saturation 76,13%
Au	1.142	0.84	10.23	9.98	OH 16-1	1.5	
Pk 16+100							Vérifié

VI.5 Conclusion

La modélisation hydraulique monodimensionnel est suffisante pour pouvoir vérifier les zones inondables au niveau de l'autoroute. Les ouvrages hydrauliques concernés par les inondations permettent le passage d'eau dans les conditions les plus défavorables. Bien que l'ouvrage hydraulique 13-5 sera saturé, il ne représente pas une source d'inquiétude réelle car la simulation a été faite pour des débits de crues exceptionnels. Toutefois, la direction d'exploitation doit veiller à entretenir l'ouvrage d'une façon régulière et doit lui accorder une attention particulière.

Bien que cette méthode nous ait permis de résoudre le problème des cartes de susceptibilité SIG, cette modélisation est nécessaire mais pas suffisante car elle modélise les inondations issues des facteurs extrinsèques de l'autoroute. Cette dernière peut être inondée à cause des facteurs intrinsèques, tel que le dysfonctionnement d'un ou plusieurs ouvrages d'assainissement. Pour cela nous avons effectué une analyse des images satellitaires à l'aide du programme ENVI, le travail n'a pas pu être complété faute de la disponibilité des images satellitaires dans les périodes des événements climatiques extrêmes. Malheureusement les images qu'on a obtenues, qu'il s'agit des images gratuites obtenues en ligne (Landsat c08, Sentinel 2) ou des images payantes obtenues de chez l'Agence Spatiale Algérienne ne possèdent pas ces informations.

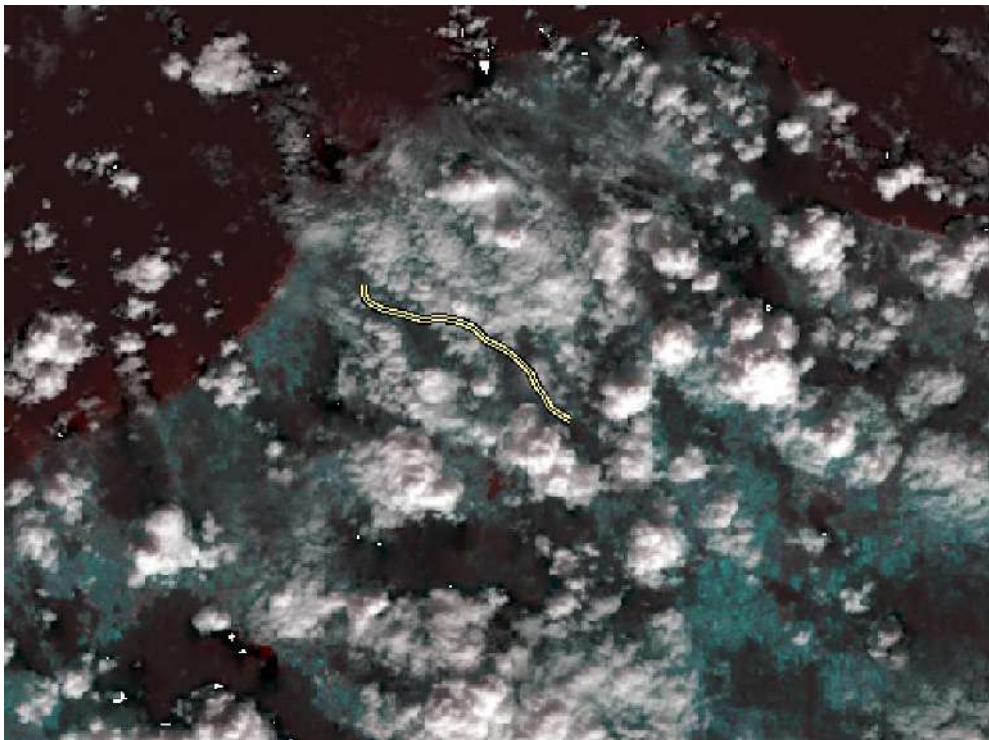


Figure VI-18: Image satellitaire prise le 16/11/2021.



Figure VI-19: Image satellitaire prise le 06/11/2021.

***Chapitre VII : Validation
des Modèles et
vérification des points
noirs.***

VII.1 Introduction

Afin de valider les modèles créés à partir des outils numériques et vérifier que les informations délivrées par ces dernières sont applicables on doit les comparer avec la réalité selon deux méthodes :

➤ **La comparaison avec les données historiques**

C'est la méthode de validation la plus utilisée et la plus précise, il s'agit de comparer le modèle créé avec une cartographie des catastrophes qui ont déjà eu lieu dans la zone.

➤ **La comparaison avec les conditions existantes sur terrain**

Cette méthode consiste à vérifier les points noirs sur terrain, repérer les indices et les signes d'instabilité, elle est mieux adaptée aux projets d'ingénierie car elle permet de mieux analyser la zone pour pouvoir déterminer les causes probables sur lesquelles les plans de traitements seront basés.

VII.2 Vérifications des points noirs en termes de glissement de terrain

En se basant essentiellement sur la maquette numérique déjà créée et la projection de la carte de susceptibilité sur cette dernière, nous avons pu repérer 5 zones d'instabilité dont 2 ont déjà été soutenues. Les points sont représentés en rouge dans la figure suivante :

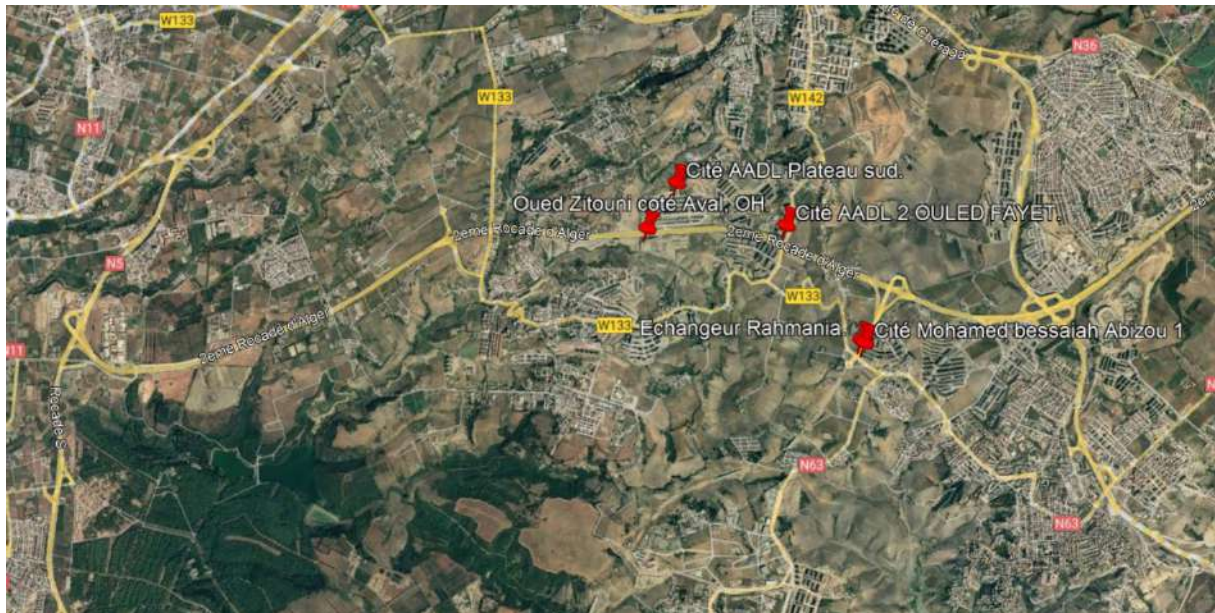


Figure VII-1: Points noirs en termes de glissements de terrain.

VII.2.1 Echangeur Sidi-Abdellah Pk 15+850

Localisé au niveau de l'échangeur de Sidi-Abdellah en allant vers Sidi-Abdellah. En face de la cité Mohamed Bessaiah, Douera. Le point représente une zone de risque majeurs sur la maquette numérique, car il représente une forte susceptibilité de glissement de terrain sur un talus de déblais, qui pourra engendrer la fermeture de la route.

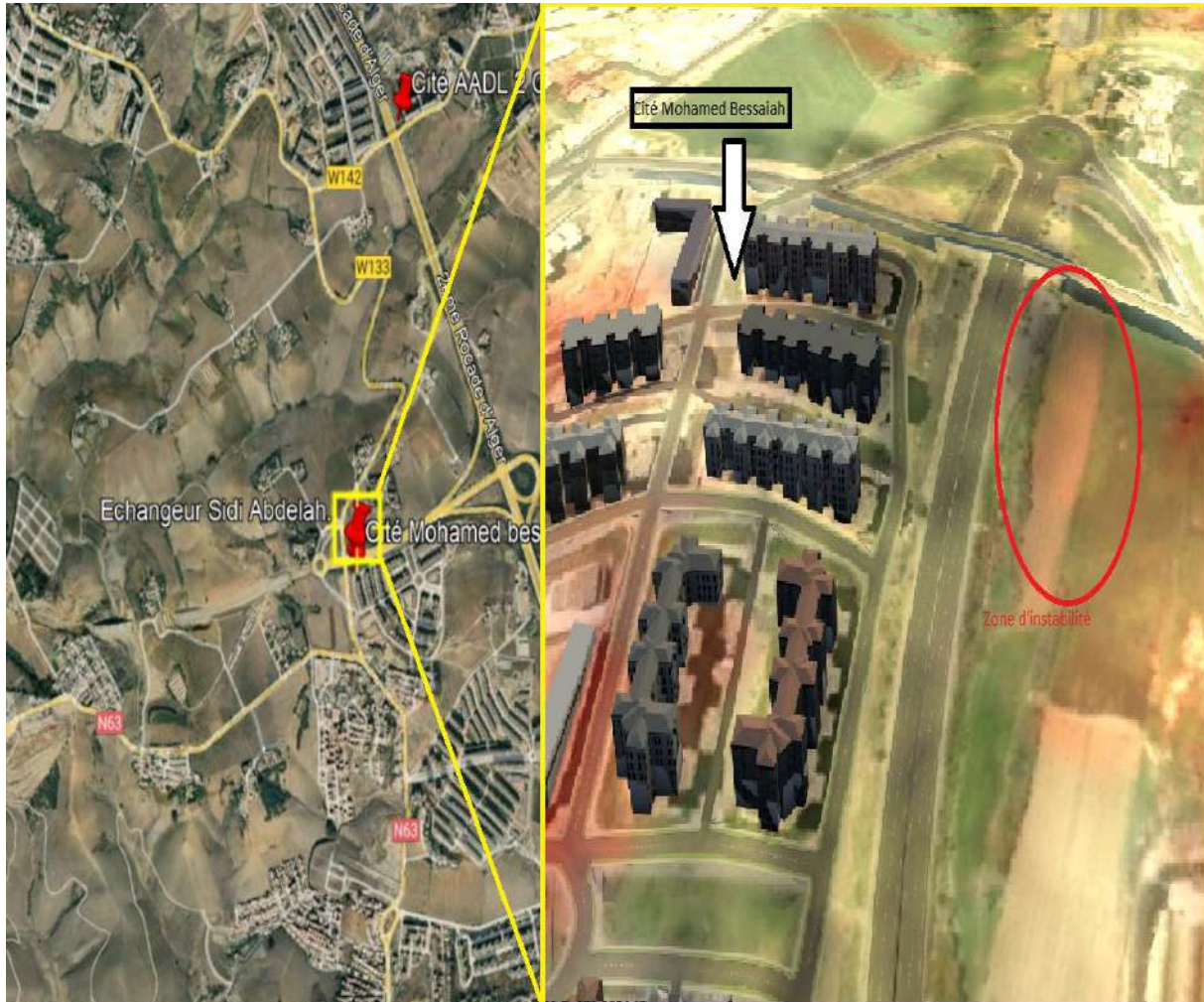


Figure VII-2: Localisation de la zone d'instabilité sur la maquette numérique.

VII.2.1.1 Indices d'instabilité

Des fissures de l'ordre de quelques centimètres sont apparentes sur le côté droit du talus.



Figure VII-3: Localisation du talus, mai 2022.



Figure VII-4: Apparition des fissures avec ordre de grandeur, mai 2022.

Le deuxième indice est l'inclinaison des arbres dans le côté gauche du talus, cette inclinaison peut aussi être un indice sur la direction du glissement probable.



Figure VII-5: Inclinaison des arbres sur talus, mai 2022.

VII.2.1.2 Causes probables de l'instabilité

Cette instabilité peut être due à plusieurs causes ou facteurs :

- La pente très accentuée du talus.
- La nature marneuse du sol en place qui a été perturbé par les travaux de terrassements de la route.
- Une dislocation au niveau du fossé de crête repéré au sommet du talus qui permet les infiltrations des eaux vers le talus ce qui entraîne l'altération des marnes en place.
- Le manque d'entretien des fossés qui constitue des zones de captage d'eau qui va ruisseler le long du talus.



Figure VII-6: Etat actuel du fossé de crête, mai 2022.

Les sols marneux en présence d'eau deviennent collants et glissants. L'altération des marnes augmente remarquablement leur plasticité comparée aux marnes saines. En présence d'eau, elles présentent un comportement gonflant, tandis qu'en désaturation elles présentent un retrait résiduel important. [35]

Ce comportement retrait-gonflement des marnes engendre une dégradation continue de sa stabilité qui se traduit concrètement par une augmentation de la fréquence et de la profondeur des fissures de dessiccation. En hiver ces fissures se remplissent d'eau et donnent naissance à des nappes superficielles temporaires. Ainsi l'eau provoque dans la masse du terrain des actions d'altération, gonflement et donc perte de résistance qui sont responsables de l'apparition de cette instabilité. [35]

VII.2.1.3 Plan de traitement

Le traitement de cette instabilité se résume en 3 étapes

- Décapage des dépôts solides sur les faussés de crête pour assurer le bon drainage des eaux.
- Continuer la cimentation du fossé au niveau de la dislocation.
- Continuer l'implantation des arbres dans le restant du talus.

VII.2.2 Cité Mohamed Bessaiah, Douera

Localisé en périphérie de la cité Mohamed Bessaiah, Douera en allant vers la 2eme rocade sud d'Alger. Le point a été signalé instable dans la maquette, en se déplaçant sur site, nous avons trouvé qu'il a déjà été soutenu, ces points sont importants dans la validation du modèle.



Figure VII-7: Localisation de la zone d'instabilité -2- sur la maquette numérique.

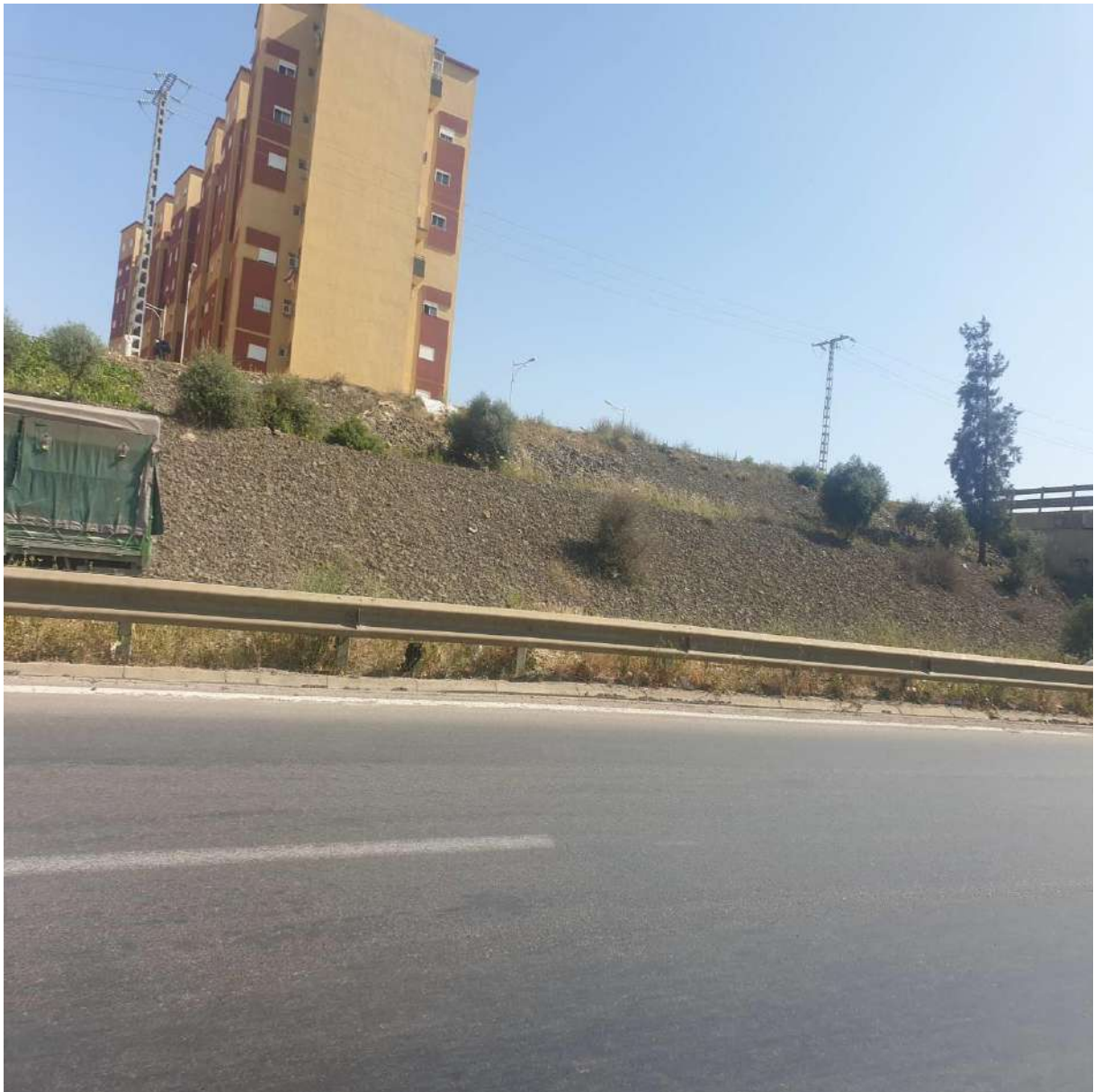


Figure VII-8: Talus soutenu, mai 2022.

VII.2.3 Cité AADL 2 OULED FAYET

La zone est localisée à droite du passage supérieur OA9-PS au PK 14+745, en périphérie de la cité AADL 2 OULED FAYET. Le talus est déjà soutenu.



Figure VII-9: Localisation de la zone d'instabilité -3- sur la maquette numérique.

Bien que le talus soit soutenu, un dépôt de solide qui s'est déposé sur les faussés en bloquant ces derniers indique sur l'existence d'une coulée sur le talus.

Les dépôts solides qui suppriment le faussé existent seulement là où il y'a une discontinuité des enrochements (Figure VII-10)



Figure VII-10: Etat du talus en place, mai 2022.



Figure VII-11: Fossé complètement bloqué par les dépôts de solide.

VII.2.3.1 Causes probables

- Les coulées de boues qui ont bloqué l'ouvrage sont le résultat des altérations du sol de nature marneuse en place, le manque d'entretien du système d'assainissement qui sera montré dans le chapitre suivant met ces sols en permanent contact avec l'eau, l'eau mal drainée provoque ce genre de coulée.

VII.2.3.2 Plan de traitement

- Continuer l'enrochement du talus en place.
- Décaper les dépôts sur les fossés.
- Veiller sur le bon entretien du système d'assainissement.

NOTE : Les 2 derniers points seront traités dans le chapitre suivant.

VII.3 Vérifications des points noirs en termes d'inondations

Bien comme montré dans les précédents chapitres, Le tronçon n'est pas concerné par des risques d'inondations majeurs. Toutefois la direction d'exploitation nous a confirmé qu'il y'a eu des zones qui ont été coupé par des flaques d'eau, les zones n'ont pas été repéré donc nous avons dû vérifier tout le système d'assainissement longitudinale. Le premier constat que nous avons fait sur terrain et en analysant les plans d'assainissement **ANNEXE 3**, est que le système d'assainissement longitudinale a été dimensionné pour reprendre les crues centennales + 15 cm de largeur pour prendre en compte les incertitudes des calculs.



Figure VII-12: Ordre de grandeur des fossés de crête.

Ceci, nous a permis de dire que les anomalies repérées au niveau du tronçon ne sont en aucun cas les conséquences d'une mauvaise conception.

Les investigations sur terrain ont révélé l'état catastrophique du système d'assainissement. A cause du manque d'entretien, **tous les ouvrages** d'assainissement longitudinal sont bloqués partiellement ou totalement. Les bassins de décantation sont bouchés et ne jouent plus leurs rôles. Quelques photos relevant sur l'état du système d'assainissement longitudinal sont présentées dans les figures suivantes :



Figure VII-13: Dysfonctionnement des ouvrages d’assainissement longitudinal, mai 2022.



Figure VII-14: Bassin de décantation entièrement bouché, mai 2022.

VII.3.1.1 Causes probables

Le dysfonctionnement des ouvrages d'assainissement entraîne le mauvais drainage des eaux superficielles. Les sols marneux qui caractérisent la zone d'Alger ouest sont des sols très peu perméables et ne permettent pas les infiltrations des eaux. Ce qui implique que ces eaux vont ruisseler jusqu'à atteindre la couche de roulement de l'autoroute.

VII.3.1.2 Plan de traitement

Pour ce problème le traitement est complexe, et le tronçon doit être divisé en plusieurs tranches, on doit procéder différemment pour chaque tranche, c'est-à-dire réparer les ouvrages là où il s'agit d'un dysfonctionnement structurel, décapier la végétation là où il y'a de la végétation, nettoyer les ouvrages là où il faut nettoyer, veiller à entretenir ces ouvrages en permanence.

VII.4 Problème de la cité AADL plateau sud Ouled Fayet

En analysant la maquette numérique relative aux glissements de terrains nous avons remarqué qu'une zone à risque élevé a été signalée sur un versant derrière la cité AADL plateau sud d'Ouled Fayet qui est située au bord du tronçon autoroutier que nous étudions.



Figure VII-15: Localisation de la cité sur la maquette numérique.

VII.4.1 Description des pathologies

Le 23 octobre 2021, une élévation du niveau d'eau d'Oued Zitouni a provoqué une inondation de la cité AADL plateau sud. Cette inondation a été accompagnée par un éclatement du réseau d'assainissement de la cité, permettant donc le ruissellement des eaux usées le long de l'oued qui était bloqué au niveau de l'ouvrage hydraulique 13-3 Pk 13+460 (voir l'ANNEXE 1). Quelques jours plus tard un glissement de terrain s'est déclenché sur le talus en périphérie du bloc 07 de la cité, résultant la ruine entière de la route qui mène vers ce bloc et des effondrements au niveau du mur en Atalus dédié au soutènement de ce talus.



Figure VII-16: Inondation de la cité AADL plateau sud le 23 Octobre 2021.



Figure VII-17 : Glissement de terrain en périphérie du bloc 07, 2022.

Du côté aval de l'OH 13-3 une coulée de boue a fait en sorte que l'ouvrage soit bloqué par des dépôts solides qui ferment partiellement le chemin de l'oued, sur le même versant des indices d'instabilité sont apparus en surface, indiquant sur un probable glissement de terrain.

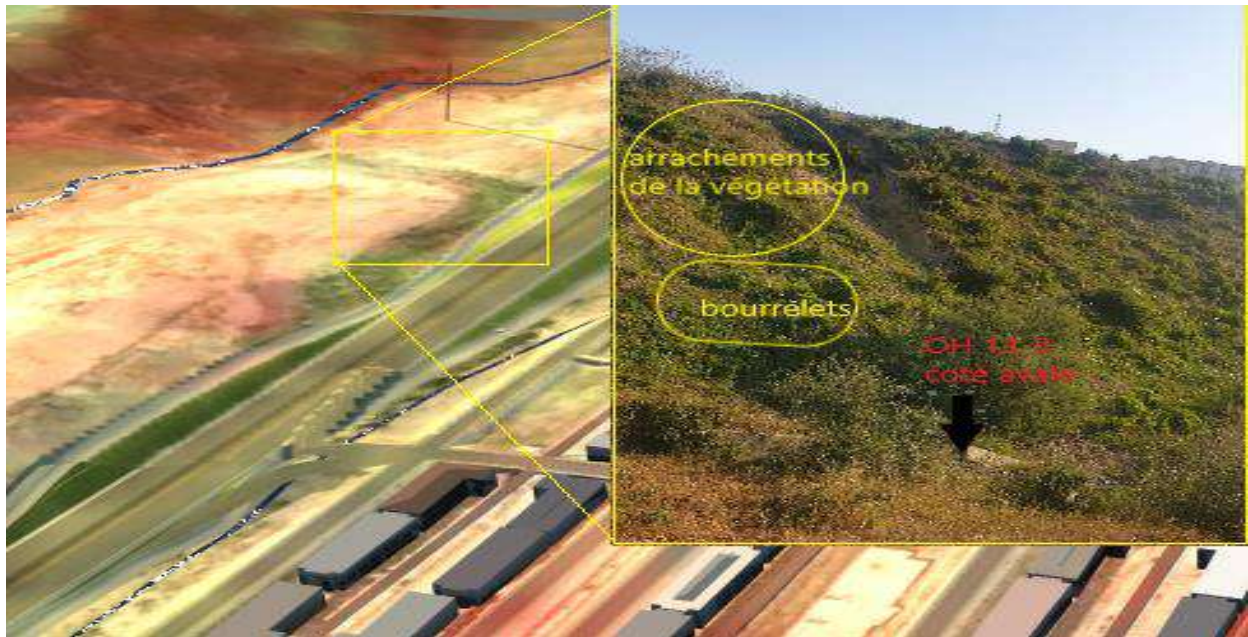


Figure VII-18: Indices d'instabilité sur le versant du côté aval de la cité, mai 2022.



Figure VII-19: Dépôts solides qui bloquent l'OH 13-3, mai 2022.

VII.4.2 Causes probables

La non détection de cette élévation du niveau d'eau dans cet oued sur la modélisation hydraulique faite précédemment nous informe que cette inondation est le résultat d'une intervention humaine mal menée. Les investigations sur terrain ainsi que l'analyse des images satellitaires ont montré que le réseau routier de cette cité a été construit sur l'oued. De plus en suivant le chemin de l'oued nous remarquons que des zones d'habitations se sont installées sur les rives gauche et droite de l'oued. La direction d'exploitation de la rocade nous a confirmé que les dépôts des terrassements après la construction des cités ont été transportés par les eaux de surfaces vers l'oued durant plusieurs épisodes pluviométriques ce qui a dérangé l'écoulement de l'oued. Ces dépôts ont été nettoyés suite à l'inondation de la cité. L'inspection de l'ouvrage hydraulique du côté amont a montré que presque la totalité de l'ouvrage est bloqué par des solides à cause de l'absence d'entretien, des élévations du niveau d'eau même en période de sécheresse est montré dans la figure VII-20.



Figure VII-21 : Image satellitaire montrant le dérangement d'Oued Zitouni par les nouvelles constructions.



Figure VII-22 : OH 13-3 Coté amont.

La coulée de boue et les instabilités sur le versant sont le résultat du mauvais drainage des eaux superficielles dû à l'absence d'entretien des ouvrages d'assainissement transversal, ainsi les sols de nature marneuse qui caractérisent ce versant sont altérés et exposés aux venues des eaux superficielles non drainées.

VII.4.3 Vérification de la stabilité du versant

La vérification de la stabilité a été faite par la méthode de bishop simplifiée. La loi de comportement des sols est supposée Plastique ou Elasto-Plastique où la rupture est décrite par le critère de Mohr-Coulomb sur le logiciel Slide 6. Le sondage S270 a donné les caractéristiques du sol suivantes :

Tableau VII-1: Tableau récapitulatif des caractéristiques du sol en place.

Lithologie	Poids volumique humide	Poids volumique saturé	Cohésion	Angle de frottement interne
Argile marneuse	20 KN/m ³	22KN/m ³	70 KPa	11°

La vérification a donné le résultat suivant :

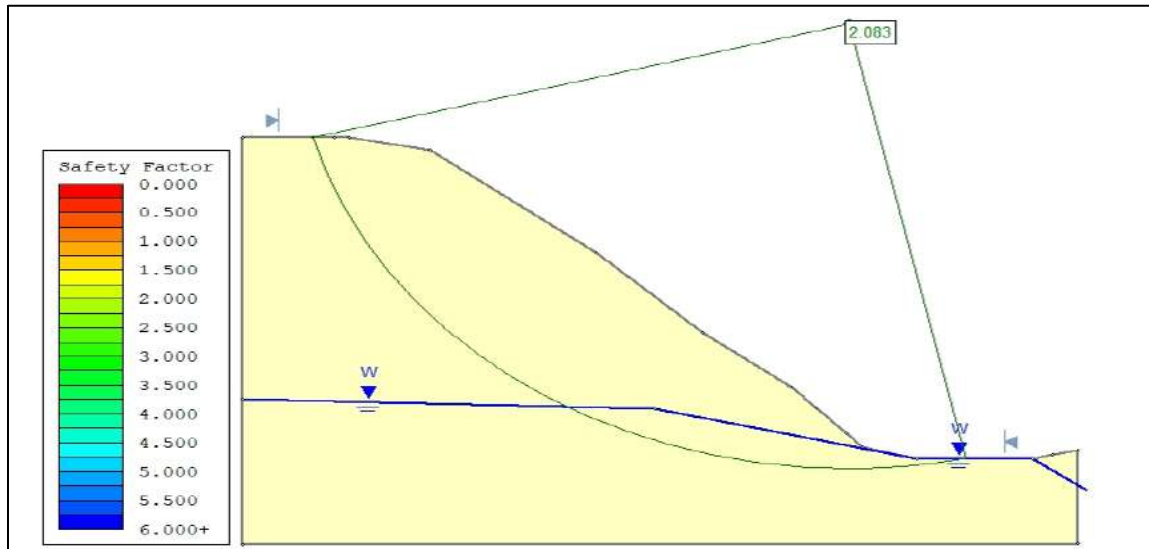


Figure VII-23 : Vérification de la stabilité du versant en utilisant les données du sondage.

La vérification a donné un facteur de sécurité égal à 2,083 donc le versant est stable, ce qui va en parfaite contradiction avec les indices repérés sur terrain. Ceci est dû à la perte de résistance des sols marneux quand ils sont exposés aux altérations. A cet effet nous avons utilisé l'analyse inverse des propriétés de ce matériau.

VII.4.3.1 Analyse inverse des propriétés du matériau

La philosophie de l'analyse se porte sur une approche probabiliste qui en admettant un ordre de grandeur du facteur de sécurité du versant nous donne des plages de couples (Cohésion, Angle de frottement) qui peuvent produire un facteur de sécurité de l'ordre que nous avons choisi. Dans cette analyse nous supposons que le versant est sur le point de glisser et donc un facteur de sécurité proche à 1 lui est approprié.

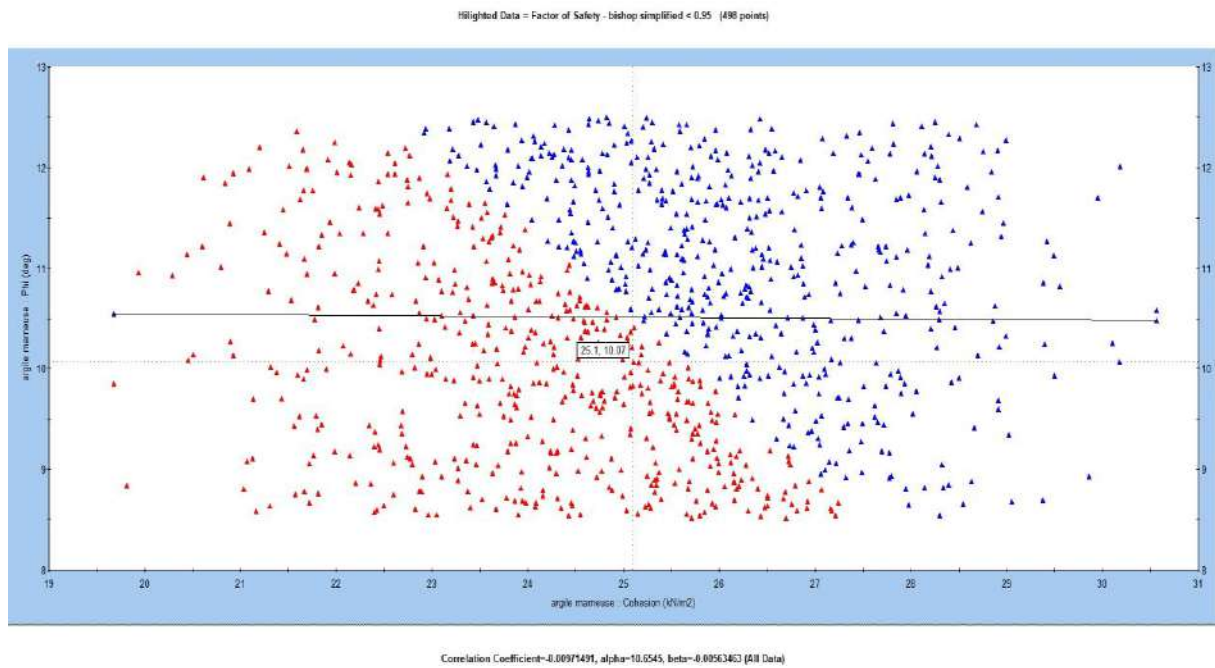


Figure VII-24: Résultats de l'analyse inverse.

Ceci nous permet donc de déduire les propriétés suivantes du matériau :

Tableau VII-2: Analyse inverse des propriétés du sol.

Lithologie	Poids volumique humide	Poids volumique saturé	Cohésion	Angle de frottement interne
Argile marneuse	20 KN/m ³	22KN/m ³	25.1 KPa	10.03°

La vérification après l'application de ces résultats au matériau a donné le résultat suivant :

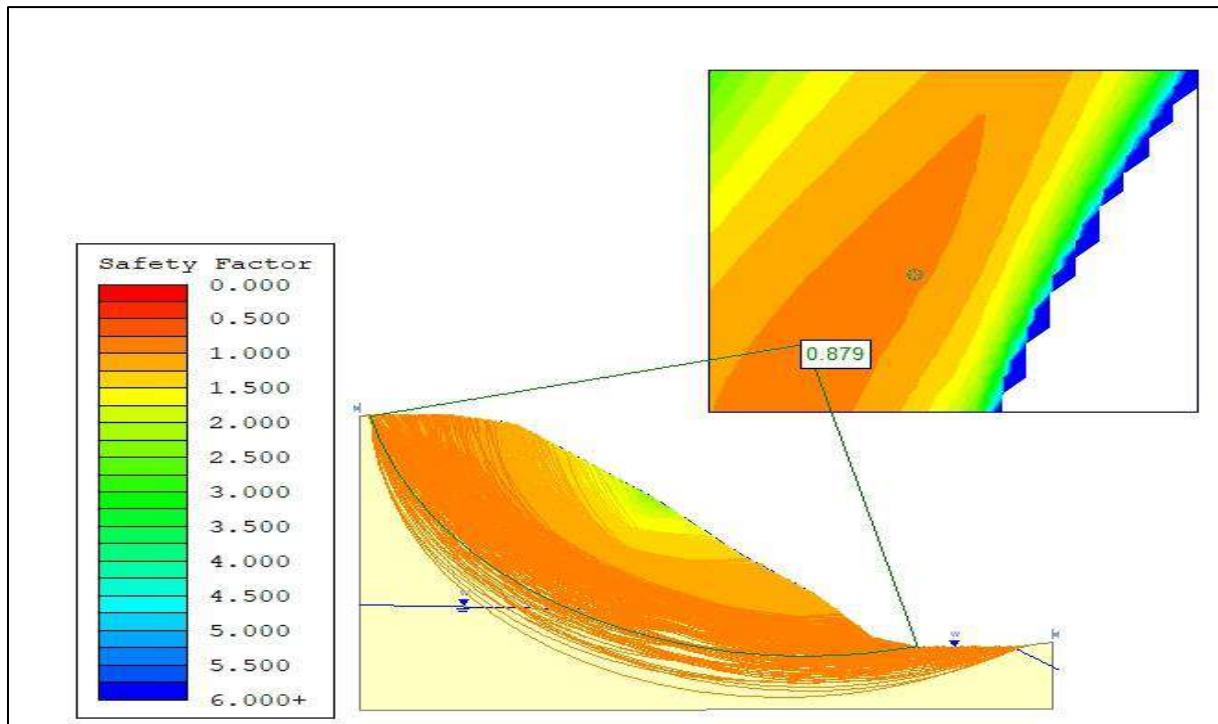


Figure VII-25: Vérification de la stabilité après l'analyse inverse des propriétés.

VII.4.4 Solution du traitement

Le traitement de cette problématique se fait en plusieurs étapes :

Pour protéger l'oued des agressions des constructions, nous proposons de le canaliser par des fondations monolithes et réaliser un remblai sur cette canalisation pour l'intégrer dans l'environnement.

Pour arrêter le probable glissement du versant du côté aval de l'OH 13-3 nous proposons un reprofilage du terrain pour adoucir la pente, la solution sera vérifiée dans le paragraphe suivant.

Pour arrêter les coulées de boue il va falloir réparer le système d'assainissement longitudinal pour empêcher les venues d'eau et puis implanter des arbres sur le versant.

Le décapage des dépôts solides ainsi que le nettoyage de l'OH 13-3 de part et d'autre.

VII.4.5 Vérification de la stabilité du versant après l'application de la solution

Afin de déterminer l'angle de réduction optimal de cette pente nous avons déterminé pour plusieurs angles de réduction le facteur de sécurité qui leur est associé comme le montre la figure VII-26.

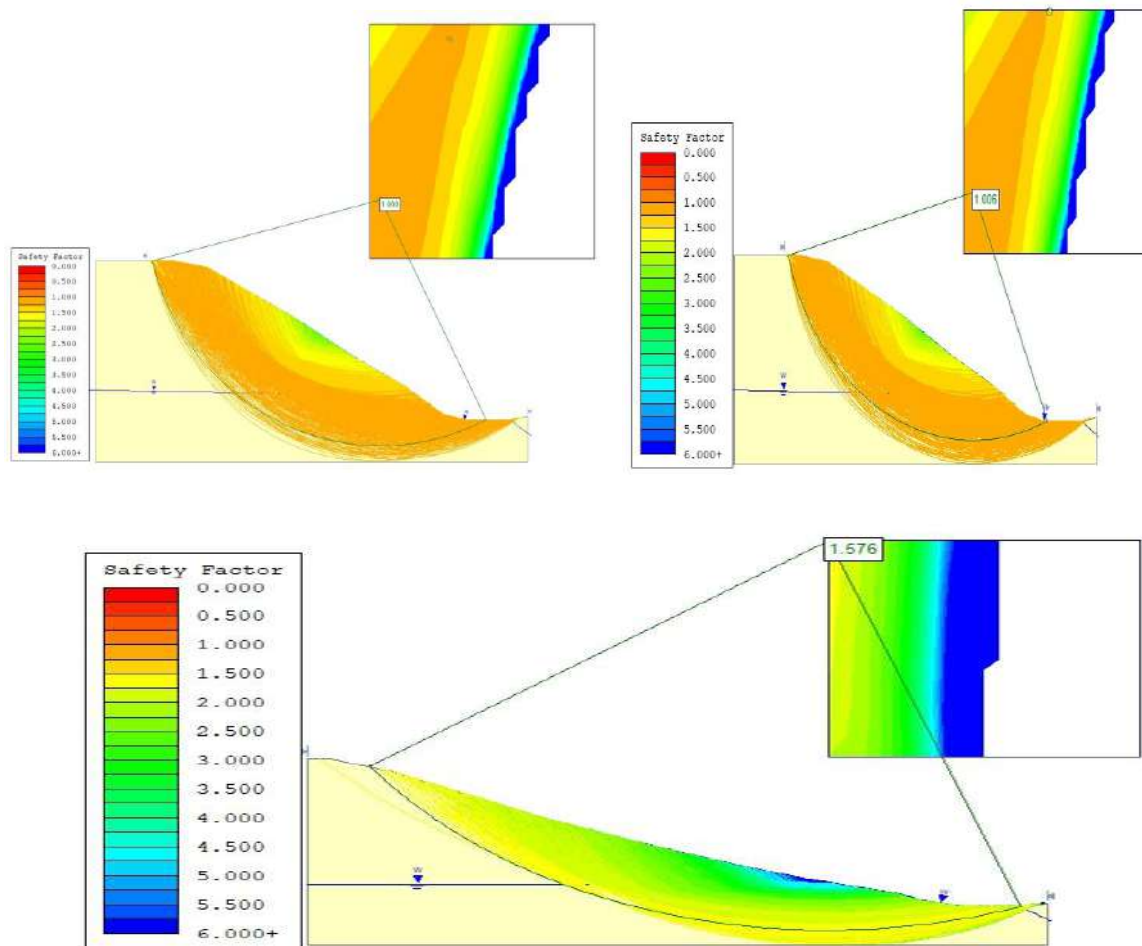


Figure VII-27 : Calcul des facteurs de sécurités pour les angles de réduction 1°, 2° et 7°.

Ceci nous a permis de tracer un graphe qui donne pour chaque angle un facteur de sécurité associé à cette réduction.

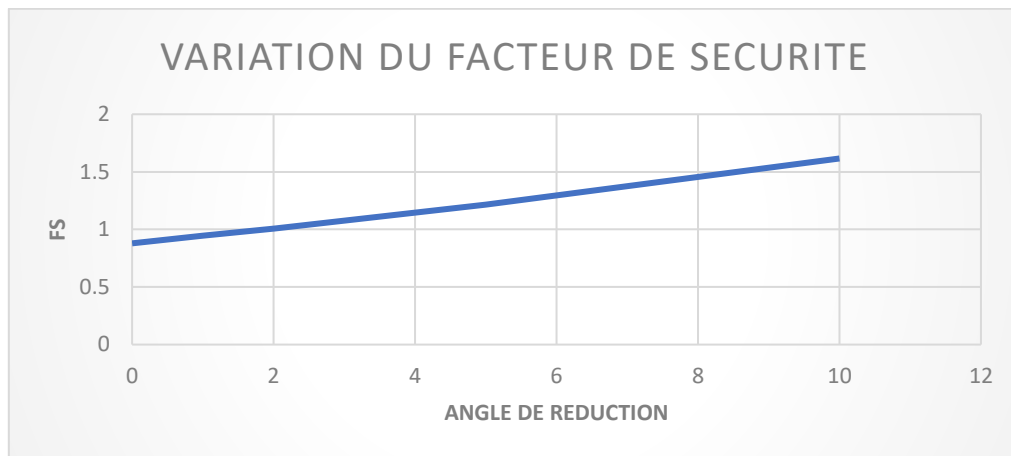


Figure VII-28 : Facteur de sécurité en fonction de l'angle de réduction.

On remarque à travers ce graphe qu'une réduction de la pente de l'ordre de 10° donne un facteur de sécurité de l'ordre de grandeur de 1,6. Cette remarque a été vérifiée par le logiciel slide (FigureVII-29).

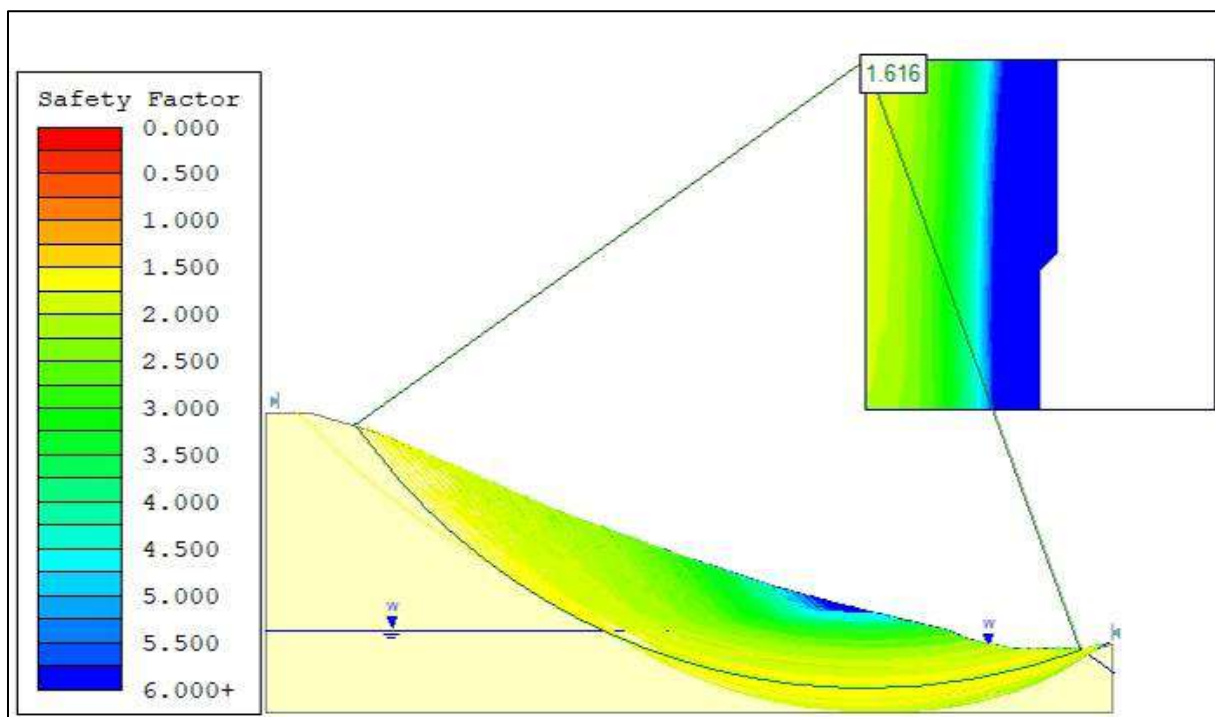


Figure VII-30: Vérification de la stabilité après reprofilage du terrain.

VII.4.5.1 Vérification de la stabilité pseudo-statique du versant

La vérification de la stabilité pseudo-statique (ou dynamique) est faite conformément aux critères de l'article **10.3** du règlement parasismique Algérien **RPA99 VERSION 2003**.

La vérification de la stabilité peut être effectuée en première analyse avec un calcul statique équivalent par application à tous les éléments de sol et aux charges supportées de deux coefficients sismiques $k_h = 0.5 A$ (%g) et $k_v = \pm 0,3 k_h$ représentant les forces horizontales contenues dans les plans verticaux de plus grande pente et dirigées vers l'aval et les forces verticales descendantes ou ascendantes selon les combinaisons (k_h, k_v) et $(k_h, -k_v)$.

Ou A est le coefficient d'accélération de zone choisi en fonction de la zone sismique du **tableau 4.1** du RPA. La wilaya d'Alger est classée dans la **zone** sismique **III**. Comme il s'agit d'un ouvrage d'importance économique élevée nous avons maximisé le coefficient d'accélération de zone par la valeur 0.35g. Les coefficient sismiques K_h et K_v sont donc de l'ordre de 0.175g et 0.0525g respectivement.

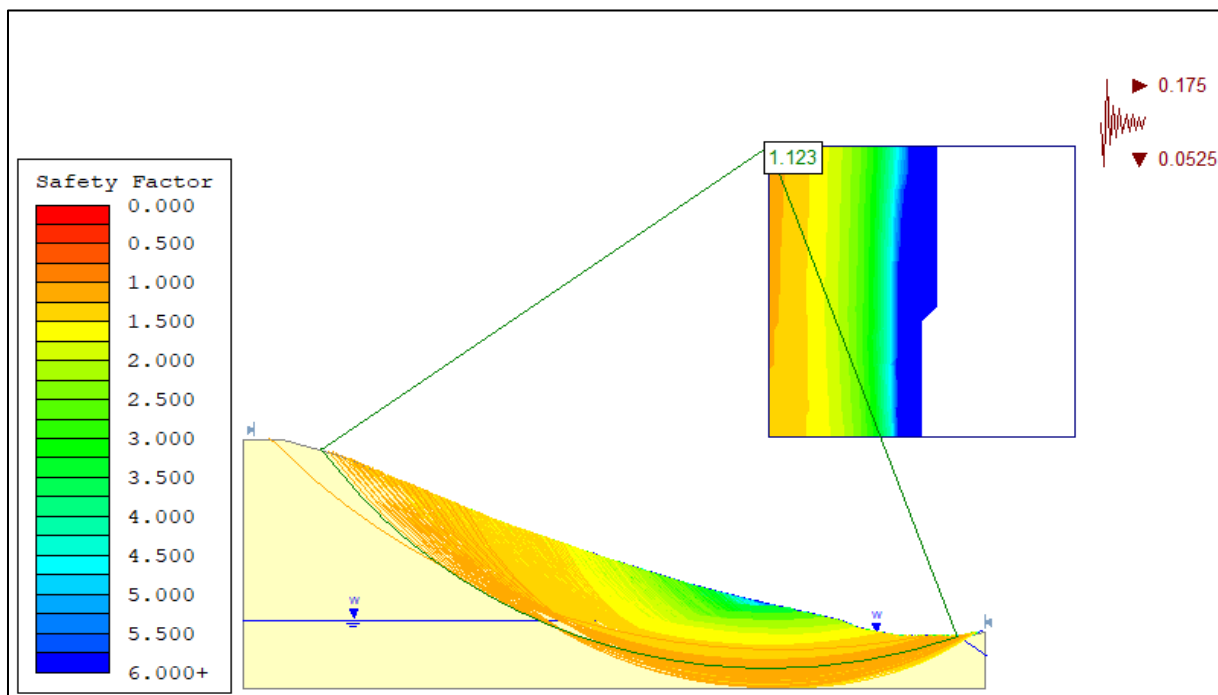


Figure VII-28 : vérification de la stabilité pseudo-statique du versant après reprofilage.

Chapitre VII : Validation des modèles et vérification des points noirs.

Le tableau VII-3 récapitule les vérifications de stabilité faite dans le paragraphe précédent.

Tableau VII-4 : Tableau récapitulatif des vérifications de stabilité.

Situation	Facteur de sécurité	Commentaire
Statique initiale	0,879	<1 instable
Statique finale	1,616	>1,5 stable
Pseudo-statique finale.	1,123	>1 stable

VII.4.6 Phasage des travaux

➤ **Coté amont**

- 1) Décapage des dépôts solides et nettoyage du coté amont de l'OH 13-3.
- 2) Canalisation de Oued Zitouni.

➤ **Coté avale**

- 1) Réparation et entretien du réseau d'assainissement longitudinal.
- 2) Reprofilage du versant instable.
- 3) Décapage des dépôts solide et nettoyage du coté aval de l'OH 13-3.

VII.5 Conclusion

Les points traités dans ce chapitre montrent que les modèles développés donnent des résultats satisfaisants, toutefois la validation de ces modèles nécessite l'élaboration des cartes qui représentent les instabilités historiques.

Conclusion

Générale

Dans le cadre de ce mémoire nous avons réalisé une étude technique portant sur l'analyse de la vulnérabilité d'une section de la deuxième rocade sud d'Alger vis-à-vis aux aléas inondations et glissements de terrain.

Pour cette raison nous avons établi une maquette numérique à base BIM-SIG qui nous a servi comme instrument de mesure de vulnérabilité par la suite. L'analyse de vulnérabilité à travers ces outils numériques nous a été très bénéfique car elle permet d'observer les enjeux dans les zones susceptibles et d'agir rapidement pour traiter les problèmes liés à ces zones.

Il a été montré que le flux de travail BIM-SIG pour l'infrastructure linéaire est souple, et il peut constituer un élément très important dans la planification des infrastructures pour assurer leur bonne insertion dans l'environnement d'aujourd'hui ainsi que l'environnement futur.

Dans ce mémoire nous avons présenté une approche empirique pour cartographier la vulnérabilité aux inondations et glissements de terrain grâce à l'intégration des techniques AHP et SIG. L'approche proposée peut aider les décideurs et les responsables politiques dans l'évaluation rapides des catastrophes naturelles à conditions que les facteurs influençant ces catastrophes aient une distribution spatiale sur le territoire étudié. L'utilisation de ces approches peut être cruciale dans les phases de planification des infrastructures linéaires.

La modélisation hydraulique des inondations nous a permis de déterminer les niveaux d'eau dans les zones inondables pour pouvoir évaluer l'impact de ces élévations sur le tronçon autoroutier.

La projection des cartes établies par approche empirique pour mesurer les aléas nous a permis d'établir une évaluation préliminaire des risques, pour mieux gérer ces risques on doit placer des capteurs dans les zones à risque élevé ces capteurs vont nous permettre de réaliser des simulations des catastrophes naturelles avant qu'elles aient lieux.

La vérification des points noirs sur terrain, nous a permis de valider à priori les modèles développés. Les problèmes traités lors de ce mémoire sont dus à plusieurs facteurs dont nous citons :

- Les mauvaises caractéristiques mécaniques des sols marneux qui caractérisent la zone de l'étude.
- L'absence totale d'entretien des ouvrages d'assainissement.

Le problème de la cité AADL plateau sud est un exemple qui montre que les inondations et les glissements sont liés les uns aux autres. Cet exemple permet aussi de montrer comment une intervention humaine mal menée à 10 Km de l'autoroute a pu influencer sur la stabilité des versants situés aux alentours de cette autoroute. A cet effet une attention particulière doit être portée aux facteurs liés à l'insertion des ouvrages dans leurs environnements, afin d'éviter les lourdes conséquence dûes à la négligence de cet important aspect.

Pour le futur :

- Réaliser une cartographie historique des inondations et glissements de terrains sur le territoire national.
- Réaliser les analyses d'images satellitaires des inondations.
- Réaliser des simulations des inondations à travers l'immersion des modèles hydrauliques bidimensionnels dans les modèles 3D. (par le logiciel Riverflow 2D).

Proposition de thème de recherche :

- Solutions innovantes pour des territoires résilients.
- Vers une fusion des données SIG-IFC.
- Problématique des pertes de données dans l'infraBIM.

Références Bibliographiques

- [1] C. ANCEY, «Une introduction à la dynamique des avalanches et des écoulements torrentiels,» Lausanne, Suisse , 2005.
- [2] O. GILARD et N. GENDREAU, «Inondabilité: une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants.,» *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, vol. 11, pp. 429-444, 1998.
- [3] G. OBERLIN, J.-N. GAUTIER, B. CHASTAN et e. al, «Une méthode globale pour la gestion rationnelle des zones inondables le programme «Inondabilité» du CEMAGREF,» vol. 4, pp. 171-176, 1993.
- [4] A. C, *Une introduction à la Dynamique des Avalanches*, 2005.
- [5] R. Hostache, «Analyse d'images satellitaires d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et l'aide à la modélisation hydraulique,» montpellier, 2006.
- [6] T. J. Philippe, «le cout des dommages dus aux inondations: estimation et analyse des incertitudes.,» Paris, 1993.
- [7] F. Leone, N. M. d. Richemond et F. Vinet., *Aléas naturels et gestion des risques*, 2021.
- [8] GUDMUNDSSON, T. Magnús et PEDERSEN, «Eruptions of Eyjafjallajökull volcano, iceland.,» 2010.
- [9] A. WEISROCK et B. J., «Les grands fleuves entre nature et société.,» vol. 42, 1999.
- [10] P. D.J, «Floods,» london, 2000.
- [11] F. LASSERRE et C. COSANDEY, «Les eaux courantes. Géographie et environnement.,» chez *Cahiers de géographie du Québec*, Paris , 2005, pp. 115-116.

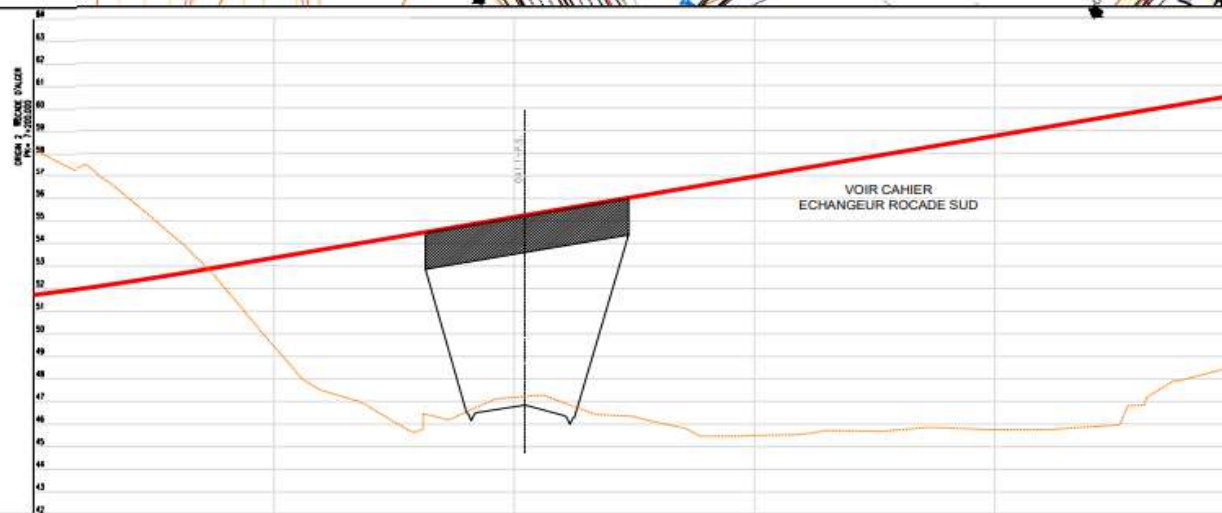
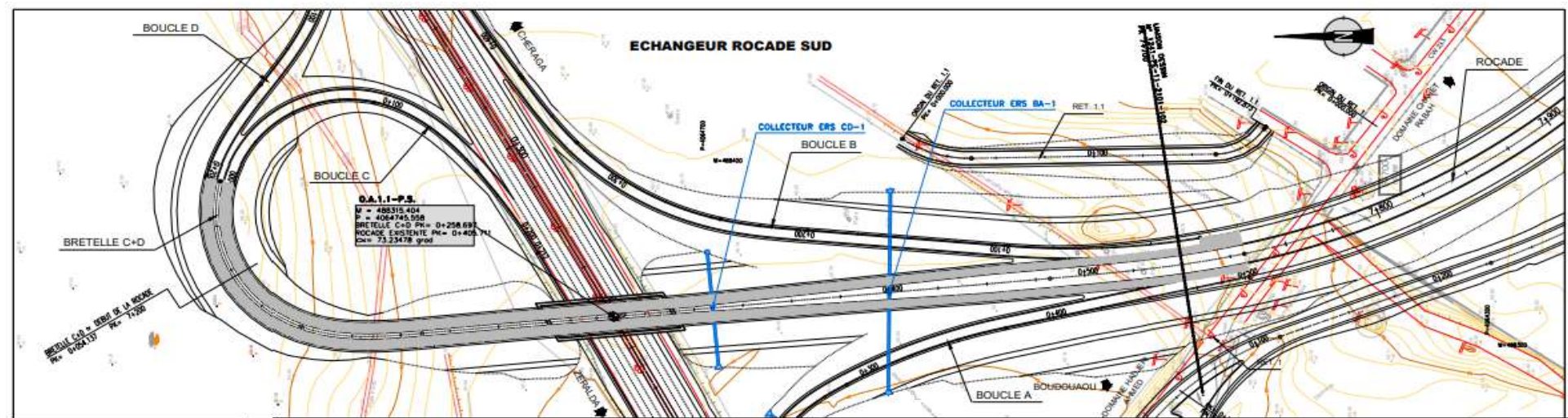
- [12] D. J.F et G.-L. M.A, «La Chine et les Chinois de la diaspora,» Neuilly, 2000, p. p61.
- [13] M. MASSON, G. GARRY et J.-L. BALLAIS, «Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique,» Les Editions Villes et Territoires, 1996.
- [14] S. CHAVE, «Elaboration d'une méthode intégrée du diagnostic du risque hydrologique.,» Aix-Marseille, 2003.
- [15] L. R, G. F, G. M et P. C., «La Cartographie informative des zones inondables. L'exemple de Midi-Pyrénées, in Actes du colloque « Au chevet d'une catastrophe »,» *Presses Universitaires de Perpignan*, pp. 147-164, 2001.
- [16] C. C, «Les Eaux courantes. Géographie et environnement,» Paris, 2003.
- [17] A. I, «Guidelines on non-structural measures in urban flood management.,» chez *International Hydrological Programme (IHP), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)*., 2001.
- [18] S. Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger, 2022. [En ligne]. Available: <https://www.seaal.dz/qui-sommes-nous/metiers/production/traitement-des-eaux/>.
- [19] X. XU, L. DING, H. LUO et e. al, «From building information modeling to city information modeling,» *Journal of information technology in construction*, vol. 19, pp. 292-307, 2014.
- [20] J. BERTHIER, projet de construction de routes, Techniques de l'ingénieur éd., 10 aout 1992.
- [21] Cerema, «Instructions sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison, ICTAAL,» 2015- Mise à jour 2021.
- [22] Philippe Carillo, Conception d'un projet routier : guide technique, Paris , 2015.
- [23] M. MAANAN, M. Mohamed, H. RUEFF et e. al, «Assess the human and environmental vulnerability for coastal hazard by using a multi-criteria decision analysis. Human and Ecological Risk Assessment,» *An International Journal*, vol. 24, pp. 1642-1658, 2018.

- [24] S. Boroushaki et J. Malczewski, «Using the fuzzy majority approach for GIS-based multi-criteria group decision-making,» 2010.
- [25] Y. O. OUMA et R. TATEISHI, «urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. Water,» vol. 6, pp. 1515-1545, 2014.
- [26] GISGeography, «What is NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)?,» 2022.
- [27] L. Vulliet, L. Laloui et J. Zhao, Mécanique des sols et des roches, Traité de Genie civil éd., vol. 18, 2016.
- [28] R. Sørensen, U. Zinko et j. Seibert, «On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations,» 2006.
- [29] R. RIVEST, «Techniques de simulation pour la recherche sur le perfectionnement de la méthode AHP,» 2019.
- [30] T. SCHOENHERR, V. R. TUMMALA et T. P. HARRISON, «Assessing supply chain risks with the analytic hierarchy process: Providing decision support for the offshoring decision by a US manufacturing company,» *Journal of purchasing and supply management*, vol. 14, pp. 100-111, 2008.
- [31] N. KREIS, «Modélisation des crues des rivières de moyenne montagne pour la gestion intégrée du risque d'inondation Application à la vallée de la thur (haut-rhin),» Paris, France , 2004.
- [32] H. ROUX, «Estimation de paramètres en hydraulique fluviale, à partir de données caractéristiques de l'imagerie aérienne,» 2004.
- [33] D. RACLOT, «Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation de plaine.,» Montpellier , 2003.
- [34] J. F. e. M. A. N. WEBER, «Performance of lateral velocity distribution models for compound channel sections.,» *River flow.*, pp. 449-457, 2004.

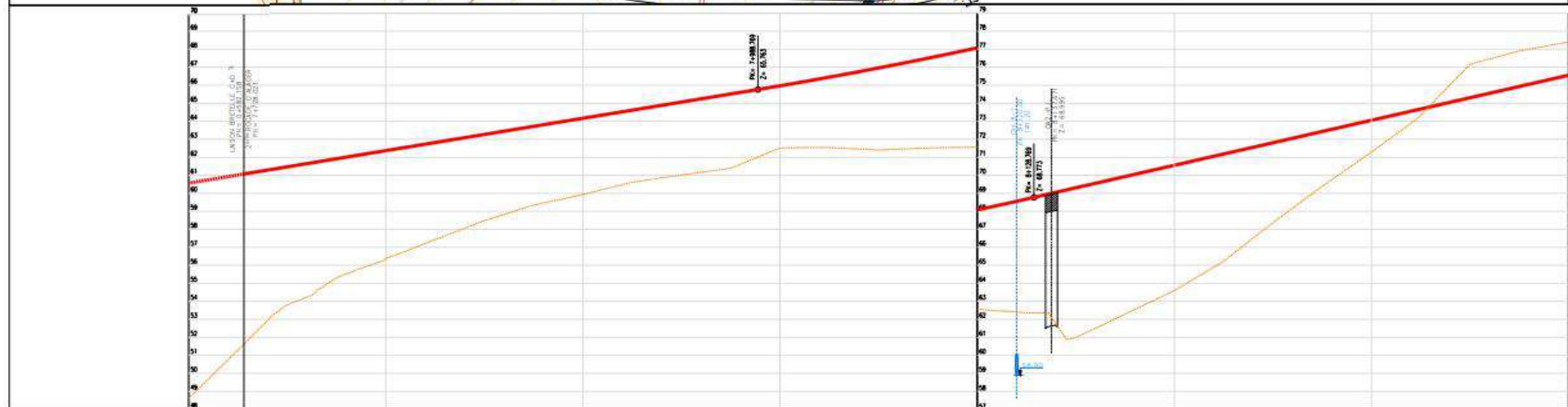
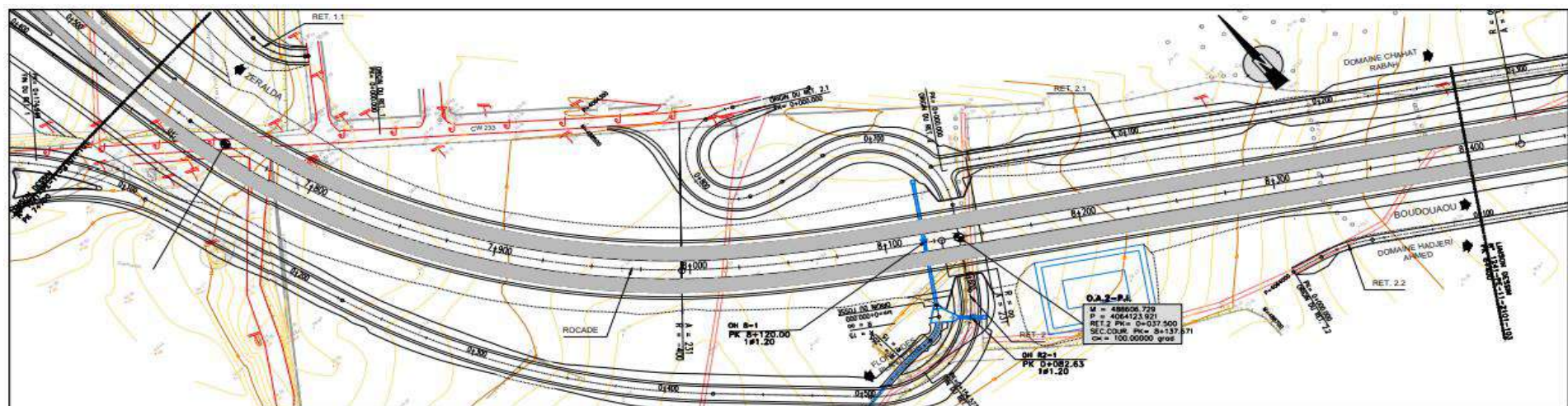
- [35] Z. DERRICHE et G. CHEIKH LOUNIS, «Geotechnical characteristics of the plaisancian marls of Algiers.,» chez *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 63, 2004, pp. 367-378.
- [36] T. L. SAATY et e. al, «Decision making with the analytic hierarchy process,» *International journal of services sciences*, vol. 1, pp. 83-98, 2008.

ANNEXE 1

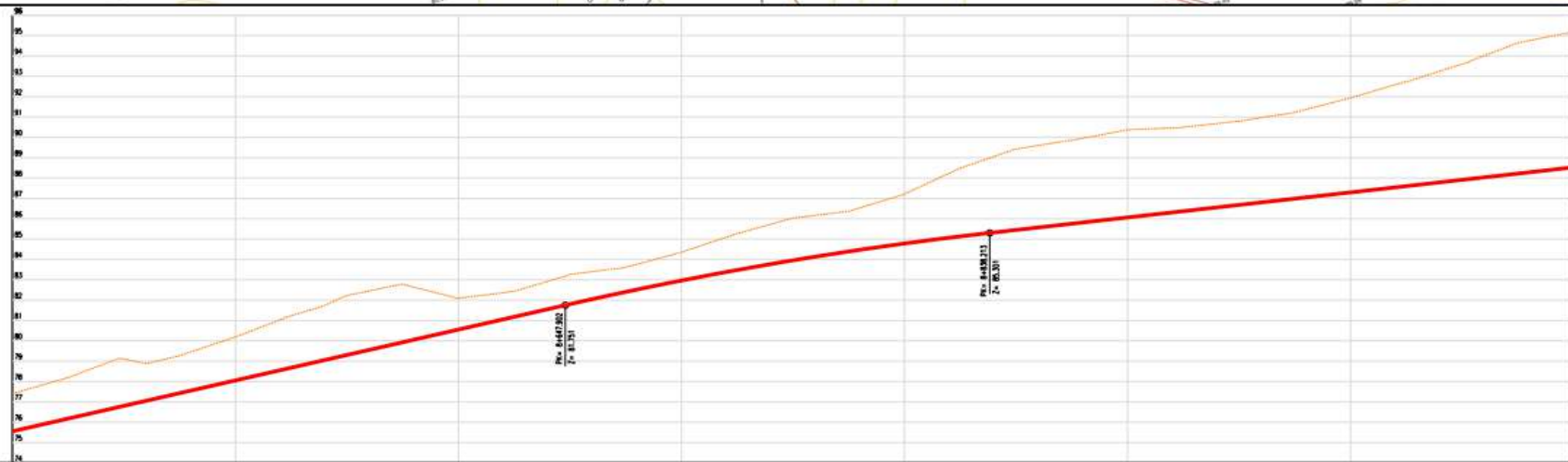
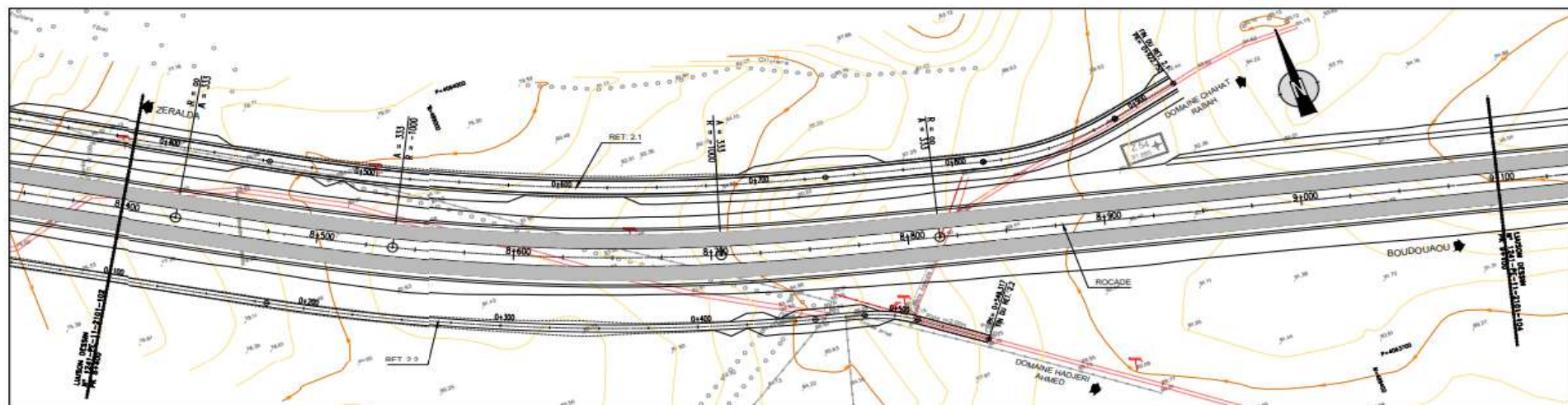
Tracé en plan et profil en long



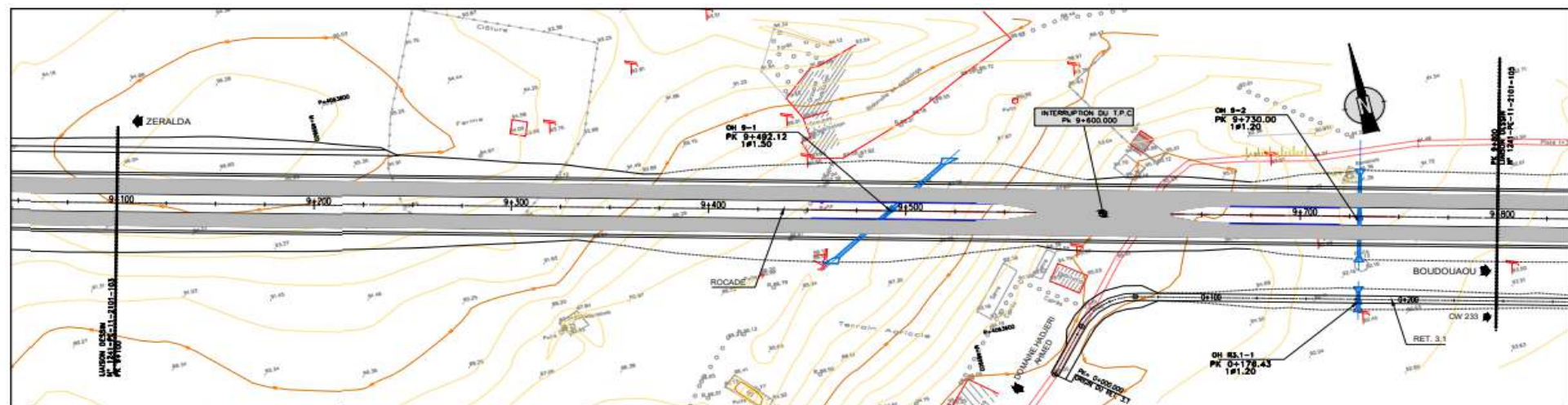
PROFIL EN LONG	DISTANCES CUMULEES	7+200	7+300	7+400	7+500	7+600	7+700
	COTES PROJET						
PLAN	COTES TERRAIN						
	DECLIVITES						
	AXE EN PLAN						
	DEVERS						



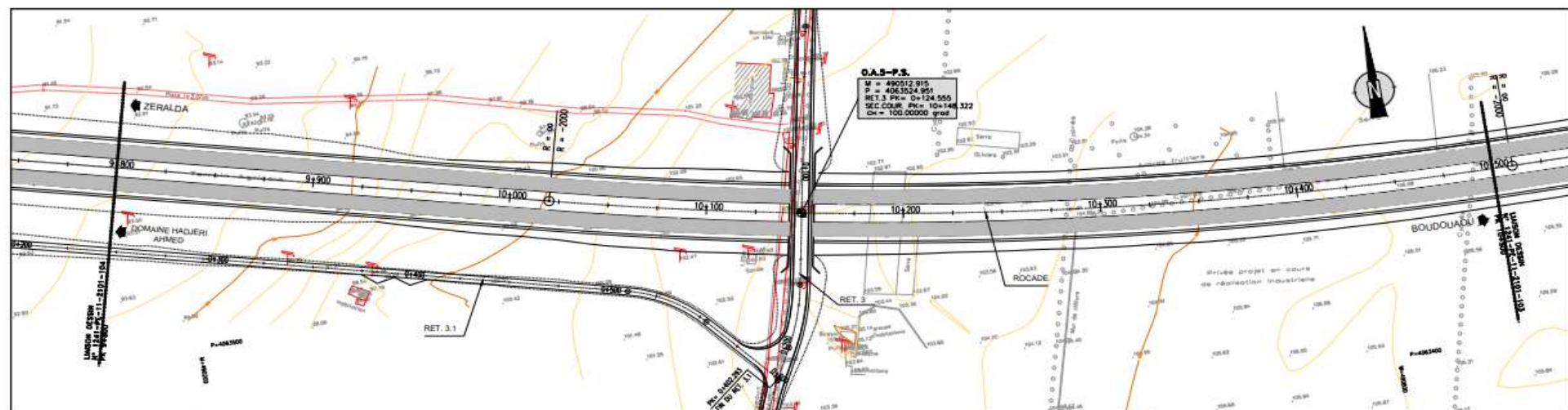
PROFIL EN LONG	DISTANCES CUMULEES	7+700	7+726.021	7+800	7+900	8+000	8+100	8+200	8+300	8+400	8+500	8+600	
		61.589	61.465	62.315	62.385	63.235	63.315	64.165	64.235	65.085	65.165	66.015	
PLAN	COTES TERRAIN	61.589	61.465	62.315	62.385	63.235	63.315	64.165	64.235	65.085	65.165	66.015	
		61.589	61.465	62.315	62.385	63.235	63.315	64.165	64.235	65.085	65.165	66.015	
DIAGRAMMES	AIRE EN PLAN	L=267.718 B=400.000				L=133.000 B=230.000				L=298.778 B=400.000			
		L=267.718 B=400.000				L=133.000 B=230.000				L=298.778 B=400.000			
DEVIERS		7+700	7+726.021	7+800	7+900	8+000	8+100	8+200	8+300	8+400	8+500	8+600	
		7+700	7+726.021	7+800	7+900	8+000	8+100	8+200	8+300	8+400	8+500	8+600	



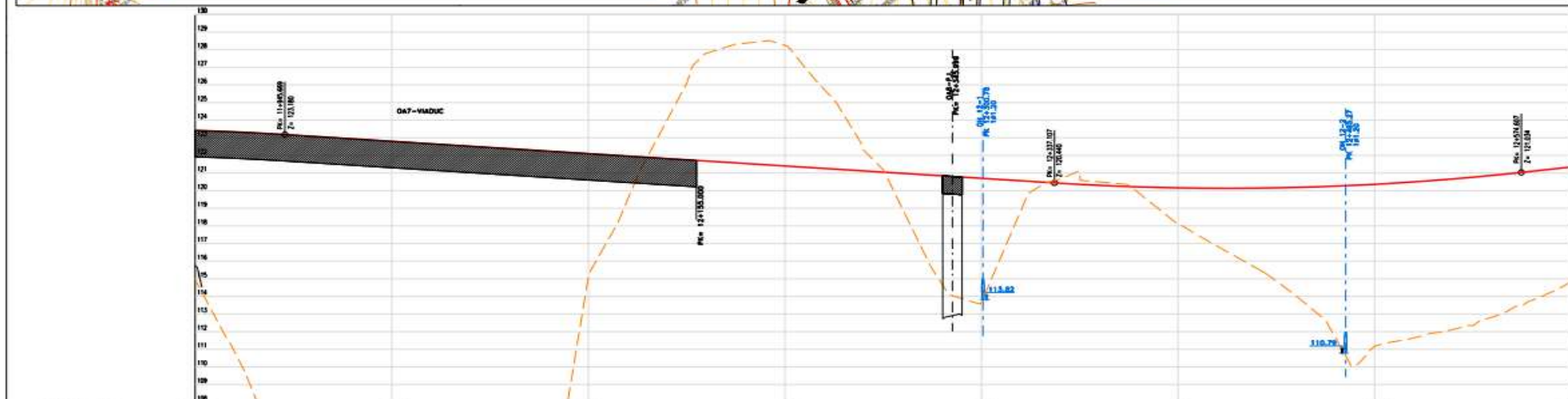
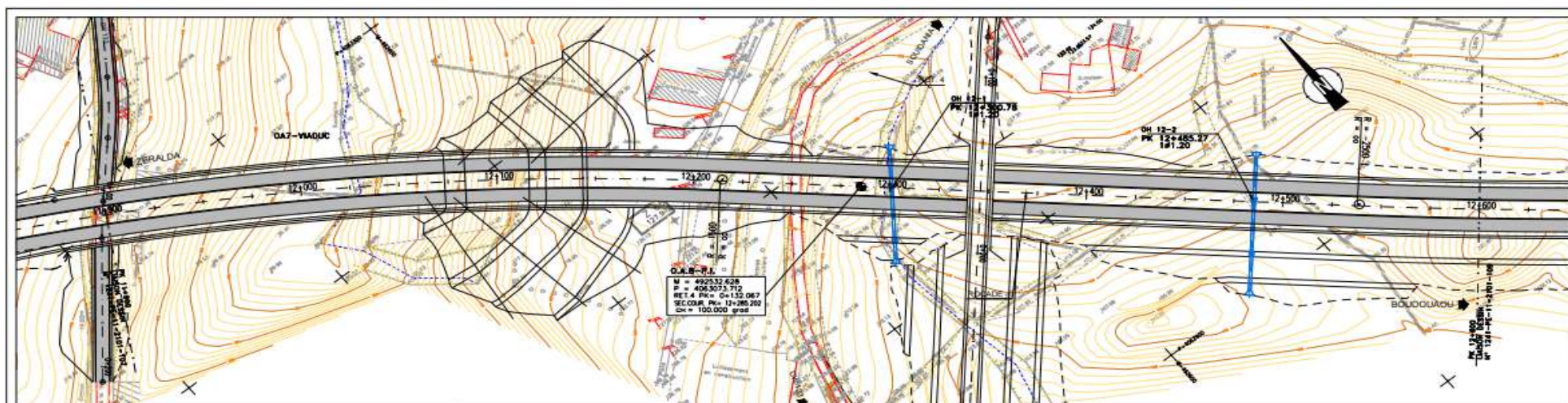
PROFIL EN LONG	DISTANCES CUMULEES																		
		8+400	8+500	8+600	8+700	8+800	8+900	9+000	9+100										
PLAN	COTES PROJET	75.353	76.333	77.428	78.678	80.333	82.363	84.362	86.333	88.333	90.333	92.333	94.333	96.333	98.333	100.333	102.333	104.333	106.333
	COTES TERRAIN	75.353	76.333	77.428	78.678	80.333	82.363	84.362	86.333	88.333	90.333	92.333	94.333	96.333	98.333	100.333	102.333	104.333	106.333
	DECENTES	L=10000 A=333.167																	
PLAN	DIAGRAMMES	L=10000 A=333.167																	
	AVE EN PLAN	L=10000 A=333.167																	
PLAN	DEVERS	L=10000 A=333.167																	
	DEVERS	L=10000 A=333.167																	



PROFIL EN LONG	DISTANCES CUMULEES									
	9+100	9+200	9+300	9+400	9+500	9+600	9+700	9+800	9+900	9+1000
COTES PROJET	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25
	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25
COTES TERRAIN	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25
	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25	88.25
DIAGRAMMES	DECLIVITES	9+100.000	9+200.000	9+300.000	9+400.000	9+500.000	9+600.000	9+700.000	9+800.000	9+900.000
	ARE EN PLAN	9+100.000	9+200.000	9+300.000	9+400.000	9+500.000	9+600.000	9+700.000	9+800.000	9+900.000
PLAN	DEVERS	9+100.000	9+200.000	9+300.000	9+400.000	9+500.000	9+600.000	9+700.000	9+800.000	9+900.000
	DEVERS	9+100.000	9+200.000	9+300.000	9+400.000	9+500.000	9+600.000	9+700.000	9+800.000	9+900.000



DISTANCES CUMULEES		9+800	9+900	10+000	10+100	10+200	10+300	10+400	10+500
PROFIL EN LONG	COTES PROJET	97.912	97.912	97.912	97.912	97.912	97.912	97.912	97.912
	COTES TERRAIN	97.912	97.912	97.912	97.912	97.912	97.912	97.912	97.912
PLAN	DIAGRAMMES	DECLIVITES							
		AXE EN PLAN							
	DEVERS	DEVERS							



PROFIL EN LONG	DISTANCES CUMULEES		11+900	12+000	12+100	12+200	12+300	12+400	12+500	12+600
	COTES PROJET		124.00	123.18	122.05	121.18	120.25	119.32	118.40	117.48
PLAN	COTES TERRAIN		124.00	123.18	122.05	121.18	120.25	119.32	118.40	117.48
	DIAGRAMES		11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00
PLAN	Axe en plan		11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00
	Devers		11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00	11+900.00

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DES TRAVAUX PUBLICS
AGENCE NATIONALE DES AUTOROUTES



Etat
Mise
Date

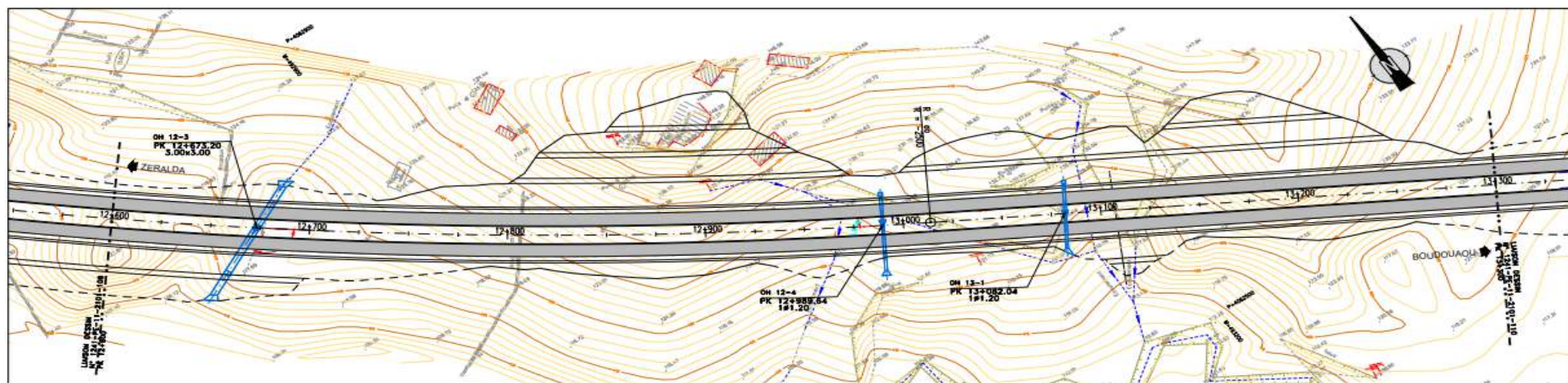
2^{ème} ROCADÉ
AUTOROUTIERE D'ALGER

Echelle
H: 1/100
V: 1/100

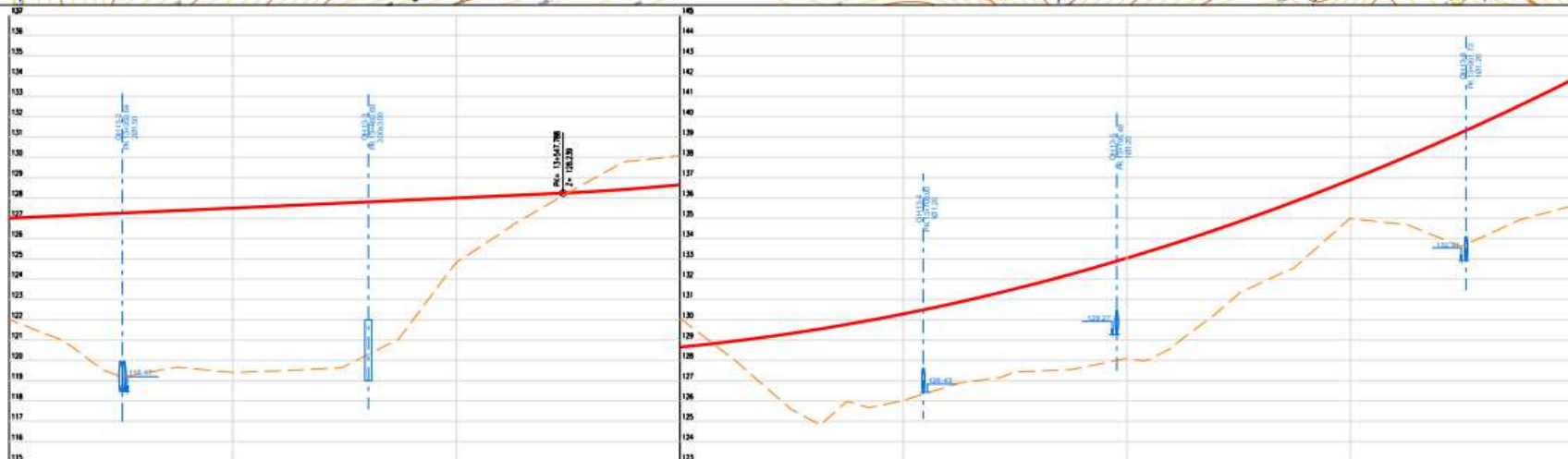
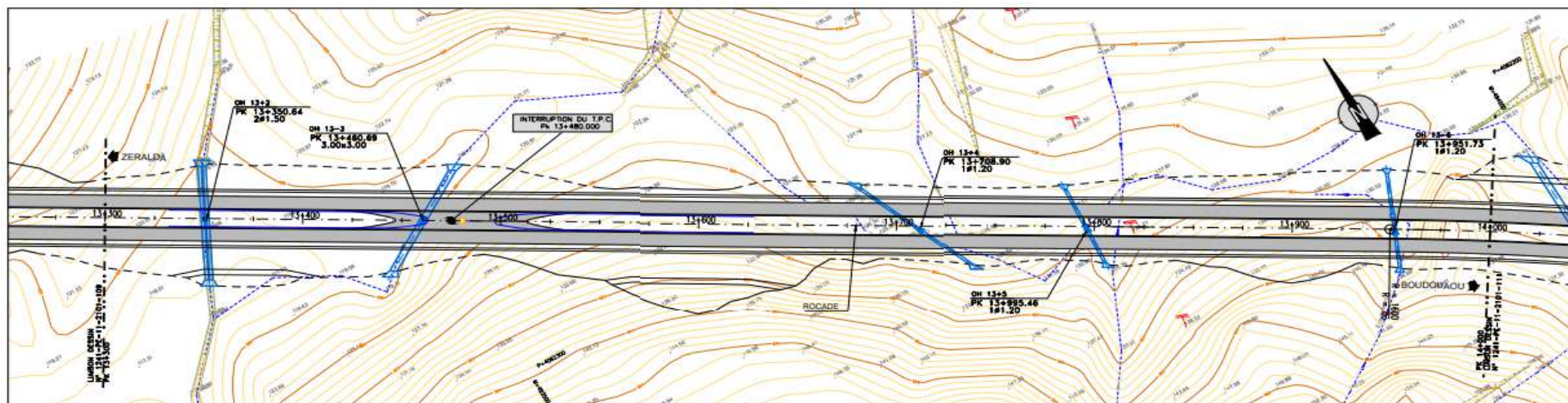
Sud
Sud-Est

PLANS DE RECUL
ETUDES ROUTIERES-SECTION COURANTE
PLAN ET PROFIL EN LONG
Du Pk 11+900 au Pk 12+600

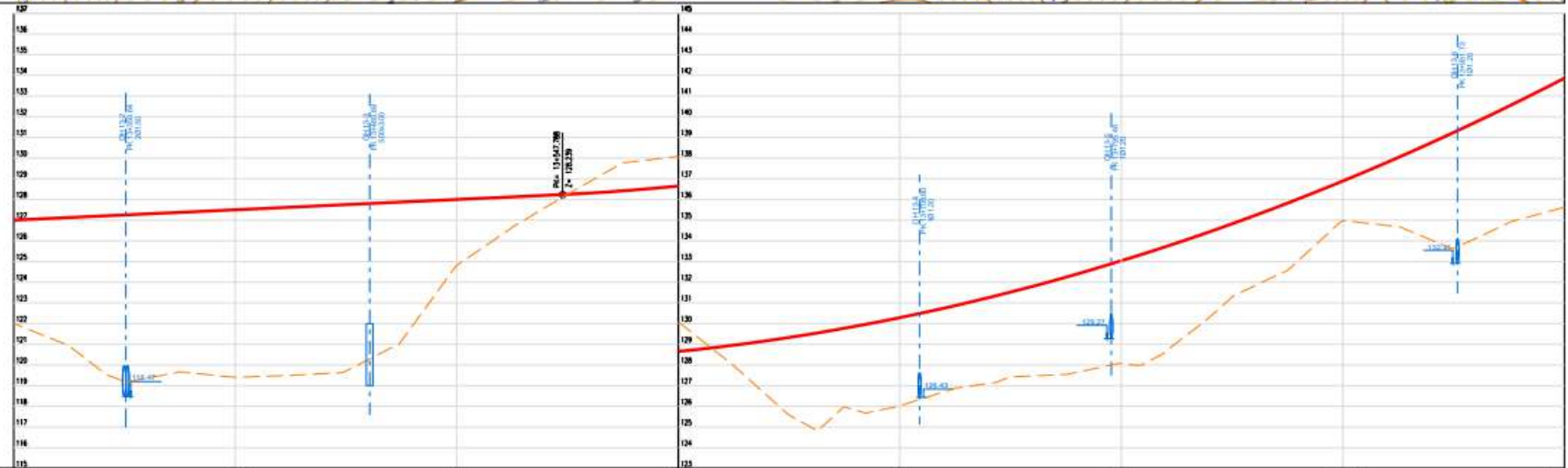
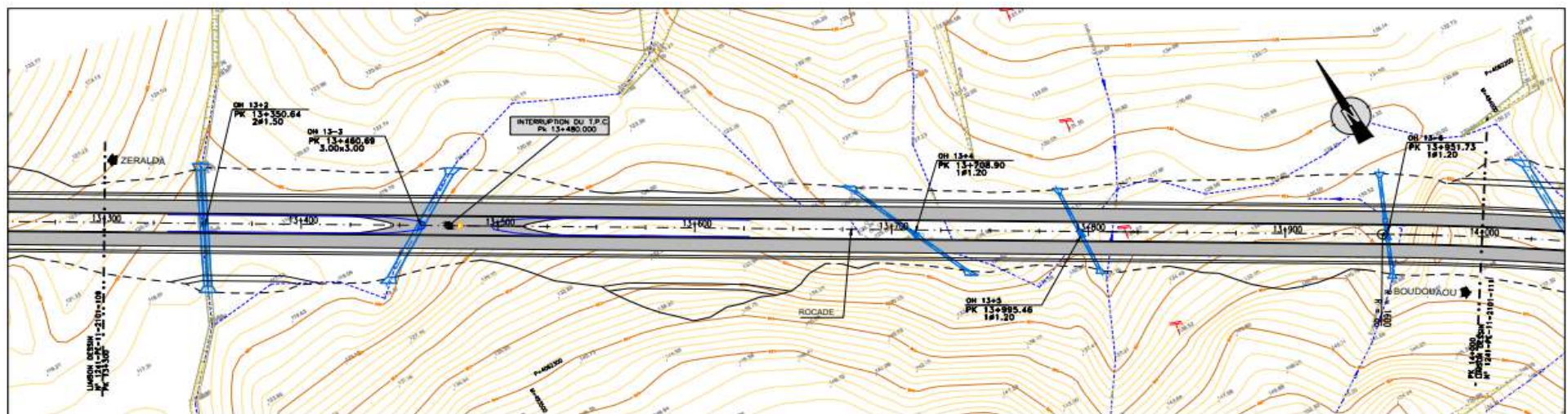
Document
1241-N029-11-2101-108
Date
SEPTEMBRE 2009 12/19



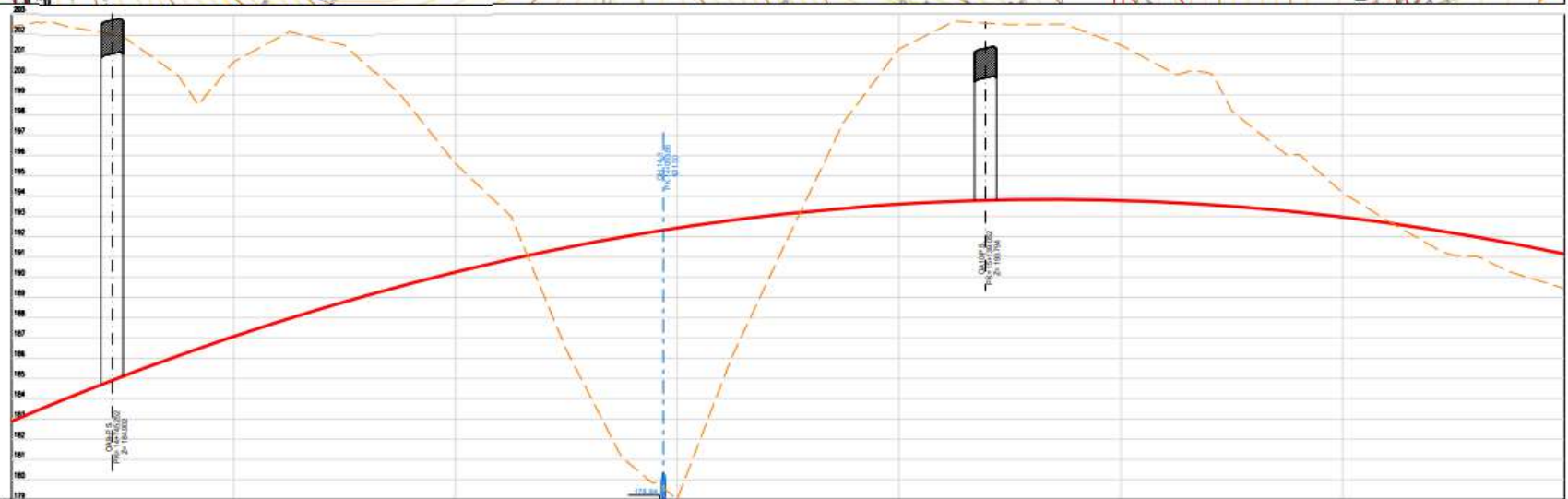
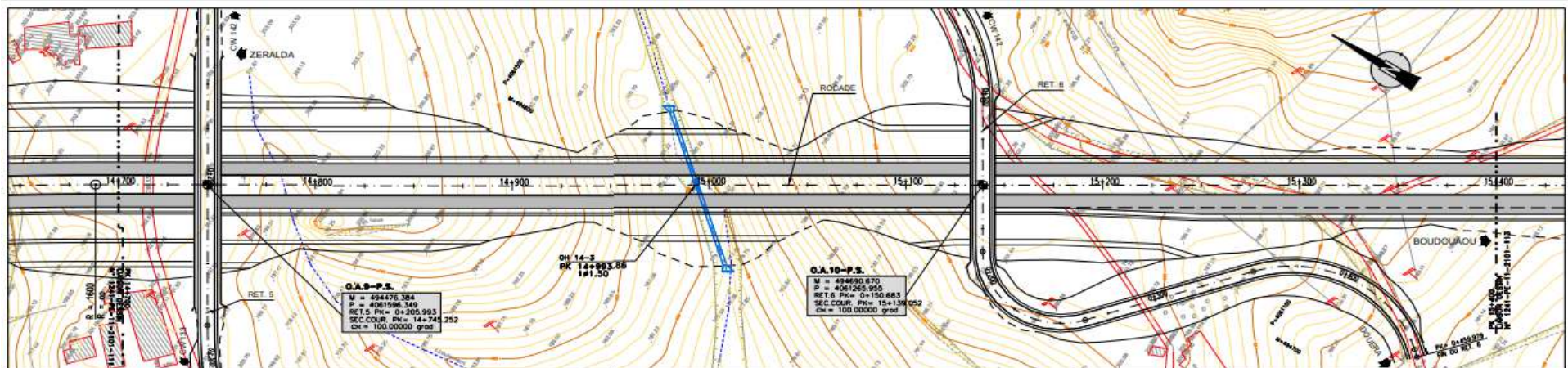
PROFIL EN LONG	DISTANCES CUMULEES	12+600	12+700	12+800	12+900	13+000	13+100	13+200	13+300
		12+600.000	12+700.000	12+800.000	12+900.000	13+000.000	13+100.000	13+200.000	13+300.000
PLAN	COTES TERRAIN	115.50	116.50	117.50	118.50	119.50	120.50	121.50	122.50
		115.50	116.50	117.50	118.50	119.50	120.50	121.50	122.50
PLAN	COTES PROJET	115.50	116.50	117.50	118.50	119.50	120.50	121.50	122.50
		115.50	116.50	117.50	118.50	119.50	120.50	121.50	122.50
PLAN	DECUVITES	115.50	116.50	117.50	118.50	119.50	120.50	121.50	122.50
		115.50	116.50	117.50	118.50	119.50	120.50	121.50	122.50
PLAN	DIAGRAMES	12+600.000	12+700.000	12+800.000	12+900.000	13+000.000	13+100.000	13+200.000	13+300.000
		12+600.000	12+700.000	12+800.000	12+900.000	13+000.000	13+100.000	13+200.000	13+300.000
PLAN	AXE EN PLAN	12+600.000	12+700.000	12+800.000	12+900.000	13+000.000	13+100.000	13+200.000	13+300.000
		12+600.000	12+700.000	12+800.000	12+900.000	13+000.000	13+100.000	13+200.000	13+300.000
PLAN	DEVERS	12+600.000	12+700.000	12+800.000	12+900.000	13+000.000	13+100.000	13+200.000	13+300.000
		12+600.000	12+700.000	12+800.000	12+900.000	13+000.000	13+100.000	13+200.000	13+300.000



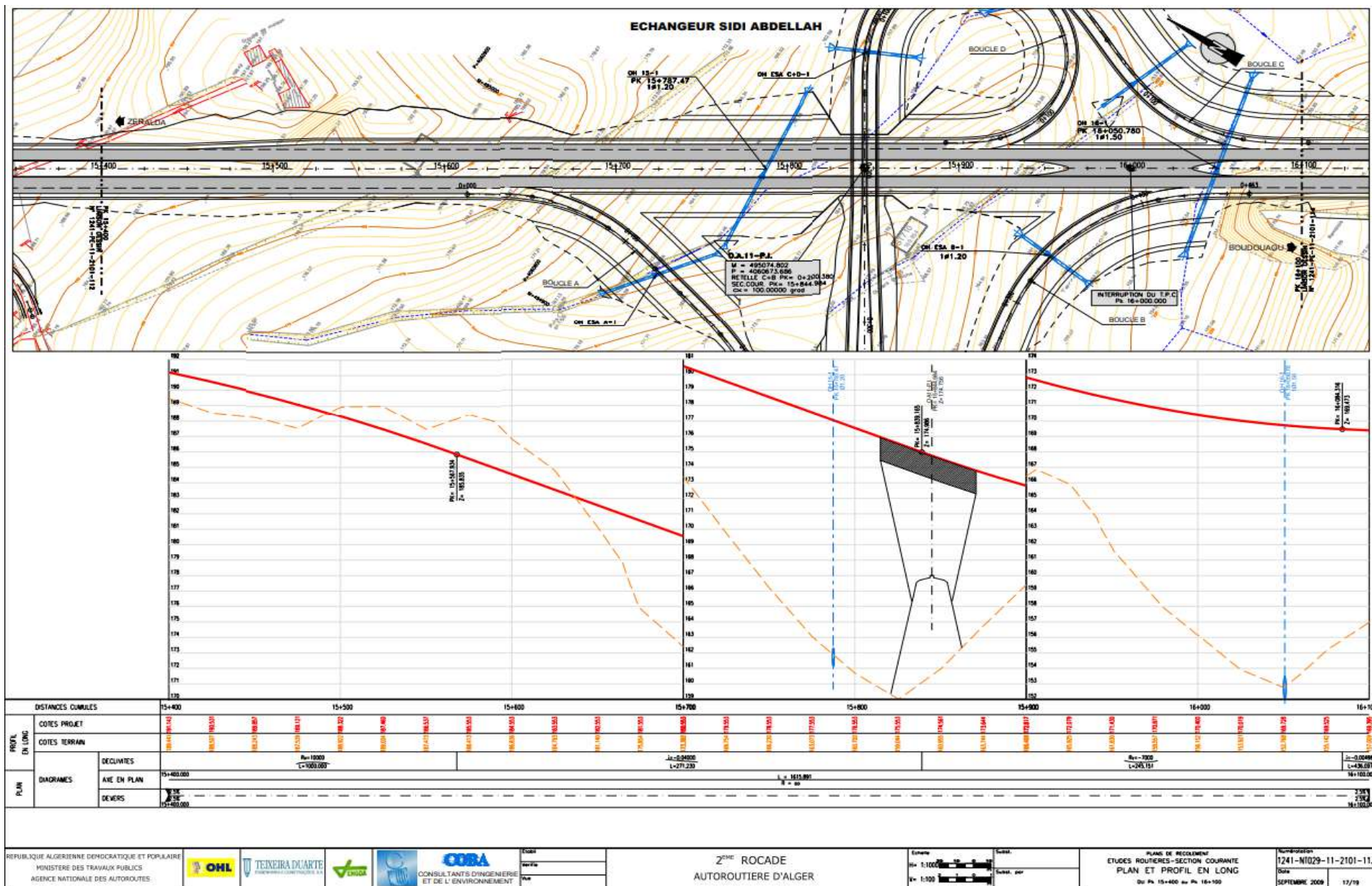
PROF. EN LONG	DISTANCES CUMULEES	13+300	13+400	13+500	13+600	13+700	13+800	13+900	14+000
	COTES PROJET	127.260	127.270	127.280	127.290	127.300	127.310	127.320	127.330
PLAN	COTES TERRAIN	127.260	127.270	127.280	127.290	127.300	127.310	127.320	127.330
	DECALQUES								
DIAGRAMES	AVE EN PLAN	13+300.000	13+400.000	13+500.000	13+600.000	13+700.000	13+800.000	13+900.000	14+000.000
	DEVERS	127.300.000	127.300.000	127.300.000	127.300.000	127.300.000	127.300.000	127.300.000	127.300.000

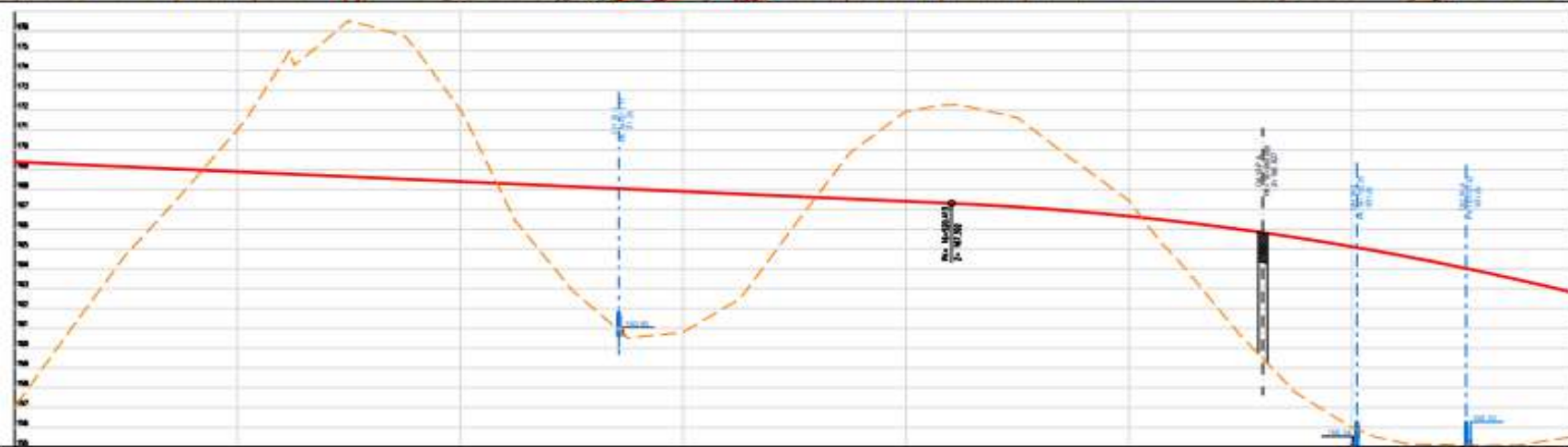
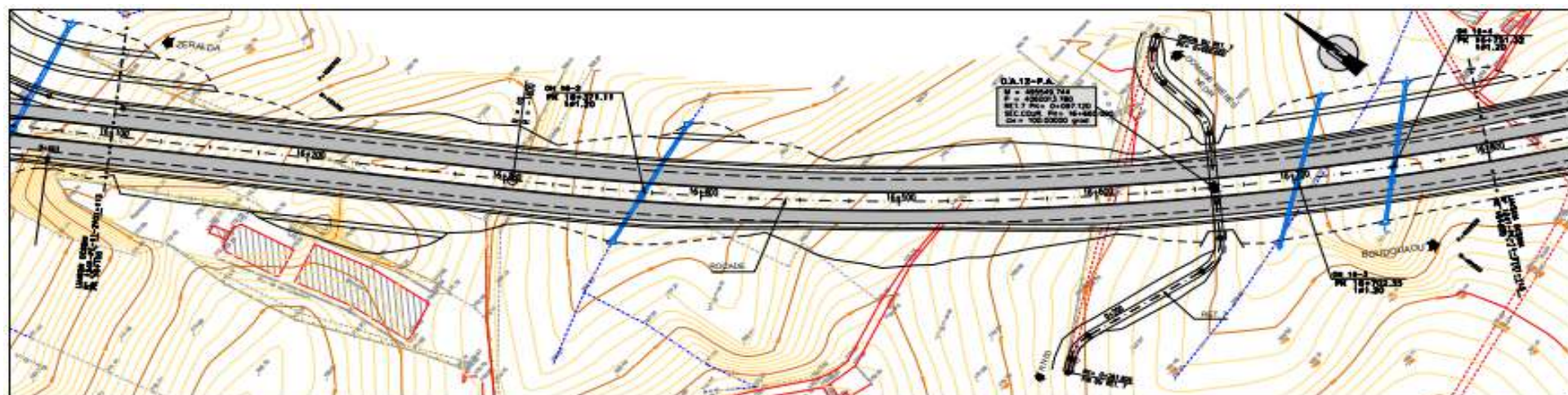


PROFIL EN LONG	DISTANCES CUMULEES		13+300	13+400	13+500	13+600	13+700	13+800	13+900	14+000
	COTES PROJET		127.070	127.125	127.180	127.235	127.290	127.345	127.400	127.455
PLAN	COTES TERRAIN		127.070	127.125	127.180	127.235	127.290	127.345	127.400	127.455
	DECENTES		127.070	127.125	127.180	127.235	127.290	127.345	127.400	127.455
DIAGRAMES	AXE EN PLAN		13+300.000	13+400.000	13+500.000	13+600.000	13+700.000	13+800.000	13+900.000	14+000.000
	DEVIERS		13+300.000	13+400.000	13+500.000	13+600.000	13+700.000	13+800.000	13+900.000	14+000.000



PROFIL EN LONG	DISTANCES CUMULEES		14+700	14+800	14+900	15+000	15+100	15+200	15+300	15+400
	COTES PROJET	COTES TERRAIN	193.20	193.20	193.20	193.20	193.20	193.20	193.20	193.20
PLAN	DIAGRAMMES									
	AXE EN PLAN	DEVIERS	14+700.000	14+700.000	14+700.000	14+700.000	14+700.000	14+700.000	14+700.000	14+700.000



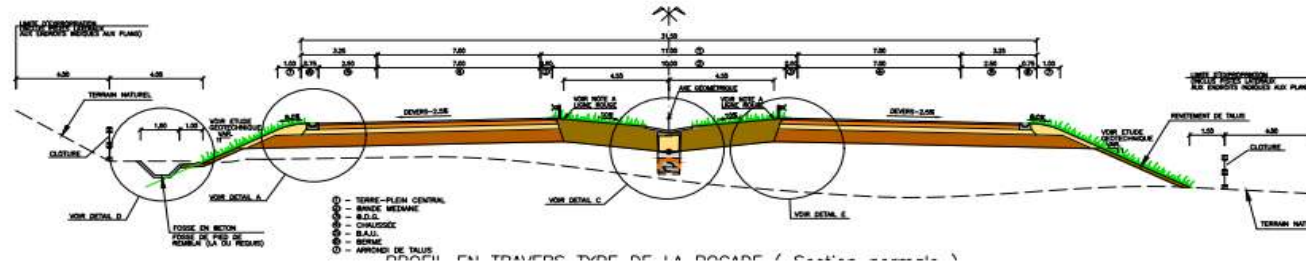


PLAN	DIAGRAMES	DISTANCES CUMULEES	14+000 14+100 14+200 14+300 14+400 14+500 14+600 14+700 14+800													
			14+000	14+100	14+200	14+300	14+400	14+500	14+600	14+700	14+800	14+900	14+000	14+100	14+200	14+300
PROFIL EN LONG	COTES PROJET		14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000
	COTES TERRAIN		14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000
	ALIGNEMENT		14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000
PLAN	ALIGNEMENT		14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000
	ALIGNEMENT		14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000
	ALIGNEMENT		14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000

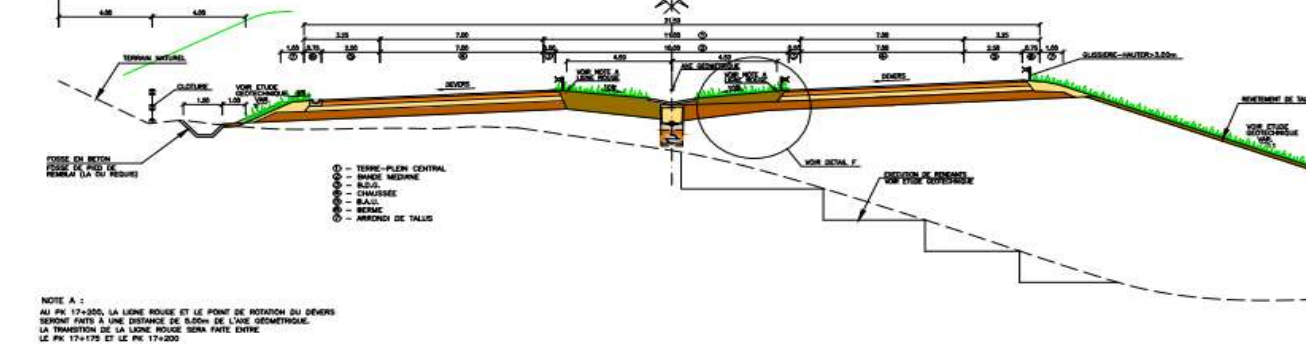
ANNEXE 2

Profil en travers type

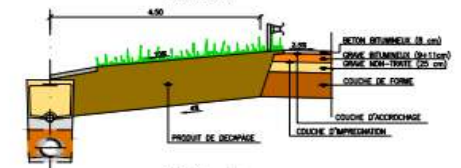
PROFIL EN TRAVERS TYPE DE LA ROCADE
SECTION NORMALE (REMBLAI)



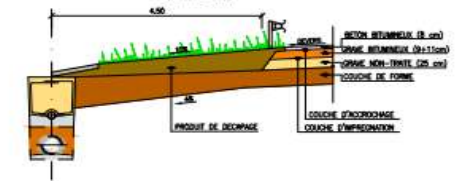
PROFIL EN TRAVERS TYPE DE LA ROCADE
SECTION DEVERSEE (REMBLAI)



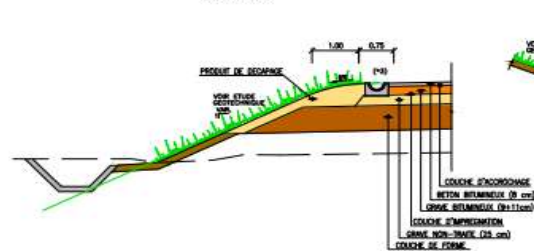
DETAIL E
TERRE-PLEIN CENTRAL-SECTION NORMALE
(Echelle 1:50)



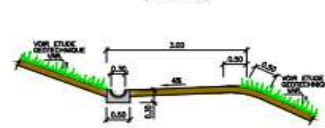
DETAIL F
TERRE-PLEIN CENTRAL-DEVERSEE
(Echelle 1:50)



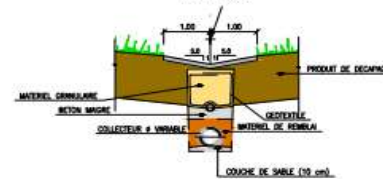
DETAIL A
BORDELETTE
(Echelle 1:50)



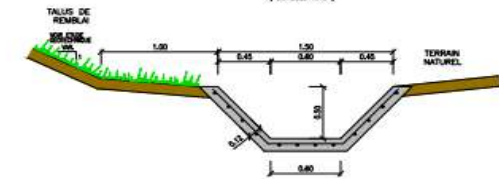
DETAIL B
RISBERME
(Echelle 1:50)



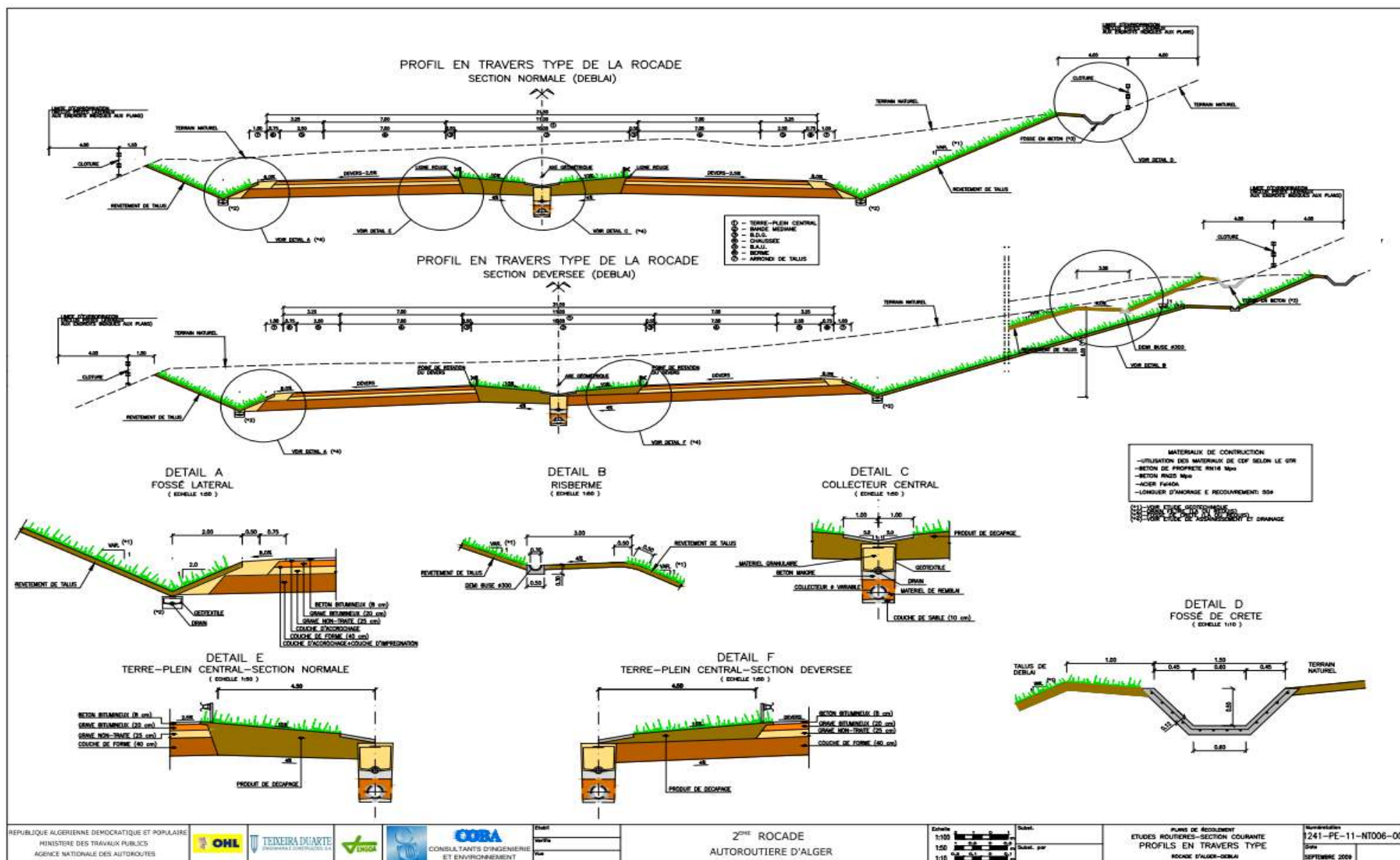
DETAIL C
COLLECTEUR CENTRAL
(Echelle 1:50)



DETAIL D
FOSSE DE PIED DE REMBLAI
(Echelle 1:10)



MATÉRIEL DE CONSTRUCTION
-UTILISATION DES MATÉRIELS DE GDF SELON LE GTR
-BETON DE PROPRETÉ PAYS 16 Mpa
-BETON R20 Mpa
-ACIER Fe400A
-LONGUEUR D'ANCHORAGE E RECOURBEMENT 50M

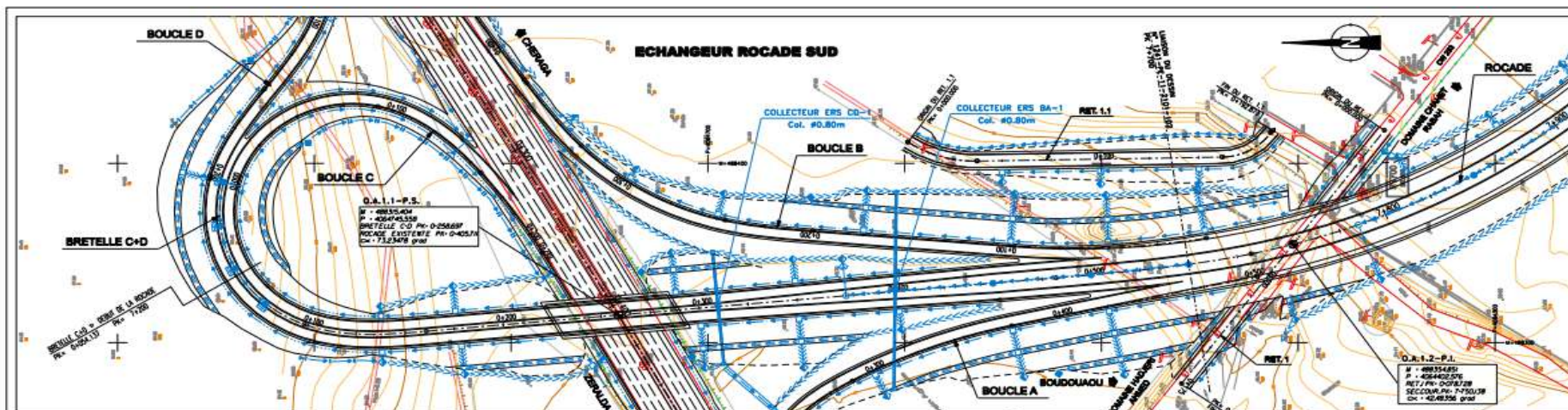


ANNEXE 3

Plan d'assainissement

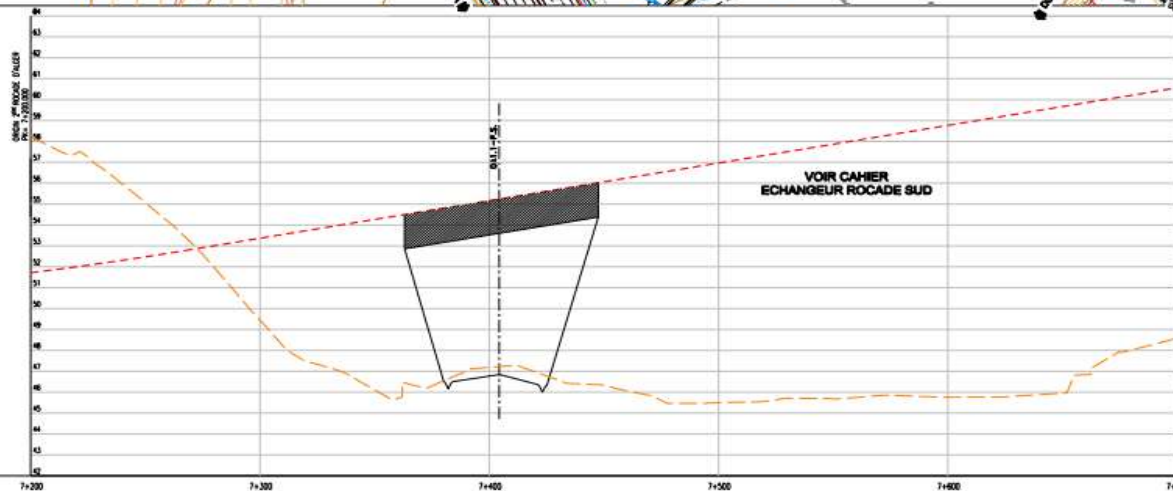
Débits de Pointe de Crue

OR		Bassin Versant								Intensité de précipitation	Coefficient d'écoulement (-)	Débit de Pointe (m³/s)	Section Hydraulique (mm)
Numérotation	PK	Désignation	Surface (km²)	Ligne d'eau principale			Temps de concentration		T = 100 ans	I = a * tc ^b (mm/h)			
				Longueur (km)	PPH (m)	PPB (m)	Δx (m)	tc (min)	tc (h)				
8-1	8+120.00	B 8-1	0.015	0.075	70.0	58.0	8.0	5.00	0.08	327	0.50	0.671	1200
9-1	9+492.12	B 9-1	0.847	2.500	121.0	87.5	22.3	73.90	1.23	46	0.50	5.355	2 x 1500
9-2	9+730.00	B 9-2	0.030	0.350	105.0	92.0	8.7	10.80	0.18	186	0.50	1.296	1200
10-1	10+972.00	B 10-1	0.009	0.050	111.0	108.9	1.4	5.00	0.08	327	0.50	0.368	1200
12-1	12+302.20	B 12-1	0.034	0.285	140.0	116.5	15.7	6.01	0.10	286	0.50	1.368	1200
12-2	12+495.16	B 12-2	0.099	0.550	155.0	113.0	28.0	10.61	0.18	189	0.50	2.603	1200
12-3	12+677.83	B 12-3	0.158	0.725	180.0	118.0	41.3	12.63	0.21	166	0.50	3.637	1500
12-4	12+989.83	B 12-4	0.028	0.200	162.5	130.0	21.7	5.00	0.08	327	0.50	1.283	1200
13-1	13+116.66	B 13-1	0.036	0.275	172.0	132.5	26.3	5.00	0.08	327	0.50	1.618	1200
13-2	13+350.64	B 13-2	0.907	2.290	197.0	120.0	51.3	48.27	0.80	62	0.50	7.830	2 x 1500
13-3	13+460.69	B 13-3	1.743	3.250	235.0	120.0	76.7	74.14	1.24	45	0.50	14.196	3 x 1500
		B 13-4	0.024										
		B 13-5	0.029										
		B 13-6	0.028										
		B 14-1	0.049										
		B 14-2	0.206										
		B 14-3	0.171										
13-4	13+708.90	B 13-4	0.024	0.175	170.0	128.0	28.0	5.00	0.08	327	0.50	1.082	1200
13-5	13+795.46	B 13-5	0.029	0.250	185.0	129.0	37.3	5.00	0.08	327	0.50	1.314	1200
13-6	13+951.73	B 13-6	0.028	0.260	185.0	136.0	32.7	5.00	0.08	327	0.50	1.282	1200
14-1	14+046.17	B 14-1	0.049	0.900	207.0	136.0	47.3	21.62	0.36	112	0.50	6.633	2 x 1500
		B 14-2	0.206										
		B 14-3	0.171										
14-2	14+316.84	B 14-3	0.171	0.575	207.0	146.0	40.7	11.81	0.20	174	0.50	4.145	1500
14-3	14+993.86	B 14-4	0.260	0.875	211.0	181.5	19.7	25.80	0.43	98	0.50	3.547	1500
15-1	15+325.00	B 15-1	0.008	0.100	199.0	185.0	9.3	5.00	0.08	327	0.50	0.343	1200
15-2	15+787.47	B 15-2	0.127	0.700	200.0	163.0	24.7	14.42	0.24	151	0.50	2.660	1200
16-1	16+050.78	B 16-1	0.437	0.900	194.0	154.0	26.7	29.15	0.49	90	0.50	5.460	1500
16-2	16+371.11	B 16-2	0.080	0.280	192.0	163.0	19.3	8.19	0.14	228	0.50	2.545	1200
16-3	16+702.35	B 16-3	0.079	0.455	192.0	158.0	22.7	9.54	0.16	204	0.50	2.227	1200
16-4	16+751.52	B 16-4	0.014	0.160	176.0	152.0	16.0	5.00	0.08	327	0.50	0.635	1200
E CW 133 A-1(*)		B E CW 133 A-1	<1ha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1200
E CW 133 A+B-1(*)		B E CW 133 A+B-1	<1ha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1200
E CW 133 A+B-2		B E CW 133 A+B-2	0.099	0.300	120.0	106.0	9.3	10.44	0.17	191	0.50	1.560	1200
E CW 133 D-1(*)		B E CW 133 D-1	<1ha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1200
E CW 133 C+D-1		B E CW 133 C+D-1	0.047	0.300	121.0	114.0	4.7	13.17	0.22	161	0.50	1.047	1200
ESA A-1		B ESA A-1	0.113	0.550	200.0	165.0	23.3	12.38	0.21	168	0.50	2.638	1200
ESA B-1		B ESA B-1	0.006	0.075	175.0	166.0	6.0	5.00	0.08	327	0.50	0.284	1200
ESA C-1		B ESA C-1	0.006	0.075	165.0	157.0	5.3	5.00	0.08	327	0.50	0.292	1200
ESA C-2	0+182.33	B 15-2	0.127	0.825	200.0	155.0	30.0	15.98	0.27	140	0.50	3.128	1500
		B ESA C+D-1	0.022										
		B ESA C-2	0.012										
ESA C+D-1	0+125.00	B 15-2	0.127	0.700	200.0	162.0	25.3	15.41	0.26	143	0.50	2.971	1500
		B ESA C+D-1	0.022										
ESA C+D-2	0+465.38	B ESA C+D-2	0.006	0.075	175.0	166.0	6.0	5.00	0.08	327	0.50	0.282	1200
ESA C+D-3	0+504.44	B ESA C+D-3	0.070	0.300	192.0	166.0	17.3	8.35	0.14	225	0.50	2.181	1200
ESA C+D-4	0+763.23	B ESA C+D-4	0.053	0.300	192.0	165.0	18.0	7.13	0.12	252	0.50	1.853	1200
ESA C+D-5	1+226.69	B ESA C+D-5	0.125	0.500	194.0	173.0	14.0	16.06	0.27	139	0.50	2.422	1200
ESA C+D-6(*)	1+312.20	B ESA C+D-6	<1ha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1200
ESA C+D-7	1+703.81	B ESA C+D-7	0.024	0.100	196.0	192.0	2.7	7.25	0.12	249	0.50	0.942	1200
R2-1		B R2-1	0.011	0.075	70.0	61.0	6.0	5.00	0.08	327	0.50	0.490	1200
R2.1-1		B R2.1-1	0.015	0.075	70.0	60.0	6.7	5.00	0.08	327	0.50	0.671	1200
R2.2-1		B R2.2-1	<1ha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1200
R3-1		B R3.1-1	0.023	0.350	105.0	92.5	8.3	7.50	0.12	243	0.50	0.784	1200
R7-1		B R7-1	0.006	0.075	170.0	161.0	6.0	5.00	0.08	327	0.50	0.285	1200
R7-2		B R7-2	0.013	0.150	180.0	160.0	13.3	5.00	0.08	327	0.50	0.590	1200



LEGENDE D'ASSAINISSEMENT:

	Fosse de type 1
	Fosse de type 2
	Fosse de type 3
	Fosse de type 4
	Fosse de type 5
	Fosse de type 6
	Fosse de type 7
	Fosse de type 8
	Fosse de type 9
	Fosse de type 10
	Fosse de type 11
	Fosse de type 12
	Fosse de type 13
	Fosse de type 14
	Fosse de type 15
	Fosse de type 16
	Fosse de type 17
	Fosse de type 18
	Fosse de type 19
	Fosse de type 20
	Fosse de type 21
	Fosse de type 22
	Fosse de type 23
	Fosse de type 24
	Fosse de type 25
	Fosse de type 26
	Fosse de type 27
	Fosse de type 28
	Fosse de type 29
	Fosse de type 30
	Fosse de type 31
	Fosse de type 32
	Fosse de type 33
	Fosse de type 34
	Fosse de type 35
	Fosse de type 36
	Fosse de type 37
	Fosse de type 38
	Fosse de type 39
	Fosse de type 40
	Fosse de type 41
	Fosse de type 42
	Fosse de type 43
	Fosse de type 44
	Fosse de type 45
	Fosse de type 46
	Fosse de type 47
	Fosse de type 48
	Fosse de type 49
	Fosse de type 50
	Fosse de type 51
	Fosse de type 52
	Fosse de type 53
	Fosse de type 54
	Fosse de type 55
	Fosse de type 56
	Fosse de type 57
	Fosse de type 58
	Fosse de type 59
	Fosse de type 60
	Fosse de type 61
	Fosse de type 62
	Fosse de type 63
	Fosse de type 64
	Fosse de type 65
	Fosse de type 66
	Fosse de type 67
	Fosse de type 68
	Fosse de type 69
	Fosse de type 70
	Fosse de type 71
	Fosse de type 72
	Fosse de type 73
	Fosse de type 74
	Fosse de type 75
	Fosse de type 76
	Fosse de type 77
	Fosse de type 78
	Fosse de type 79
	Fosse de type 80
	Fosse de type 81
	Fosse de type 82
	Fosse de type 83
	Fosse de type 84
	Fosse de type 85
	Fosse de type 86
	Fosse de type 87
	Fosse de type 88
	Fosse de type 89
	Fosse de type 90
	Fosse de type 91
	Fosse de type 92
	Fosse de type 93
	Fosse de type 94
	Fosse de type 95
	Fosse de type 96
	Fosse de type 97
	Fosse de type 98
	Fosse de type 99
	Fosse de type 100



PROFIL EN LONG	DISTANCES CUMULEES		7+200	7+300	7+400	7+500	7+600	7+700
	COTES PROJET							
	COTES TERRAIN							
	PLAN	DIAGRAMMES	DECLIVITES					
ATE EN PLAN								
DEVERS								

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DES TRAVAUX PUBLICS

AGENCE NATIONALE DES AUTOROUTES

OHL

TEIXEIRA DUARTE

ENGSA

COBA

CONSULTANTS D'INGENIERIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Etat: RGS

Version: RGS

Etat: JPC

2^{ME} ROCADE

AUTOROUTIERE D'ALGER

Echelle: 1:1000

Scale: 1:100

PROJET D'EXECUTION

ETUDES ROUTIERES-ASSAINISSEMENT

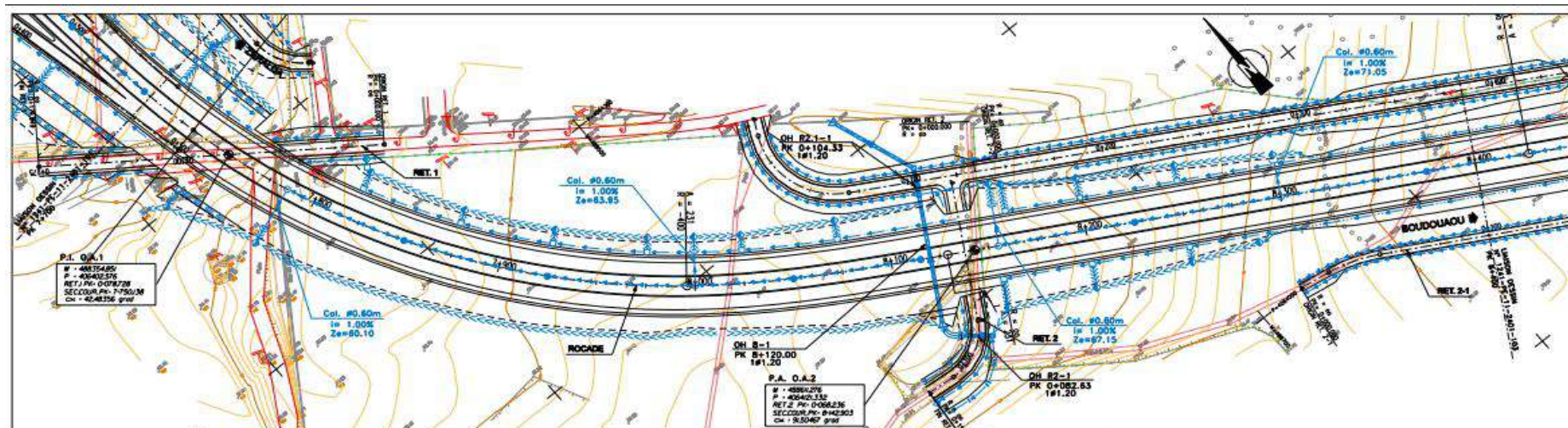
PLAN ET PROFIL EN LONG

Sur PI 7+200 au PI 7+700

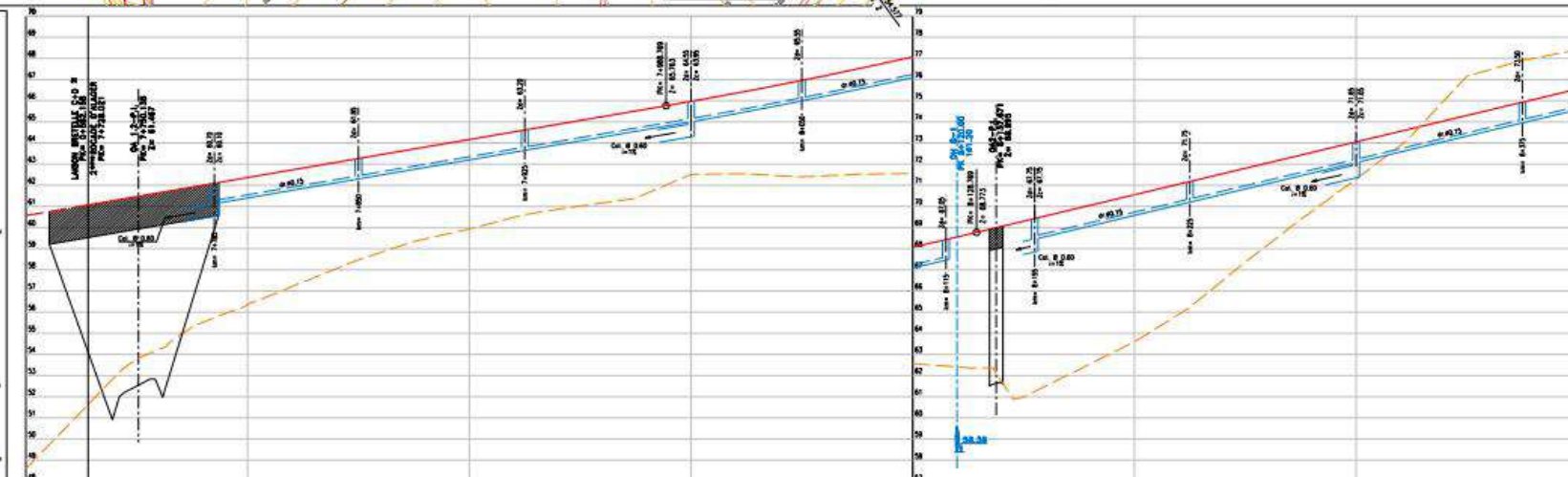
1241-NT021-11-2401-02

Date: AVR. 07

Page: 2/28



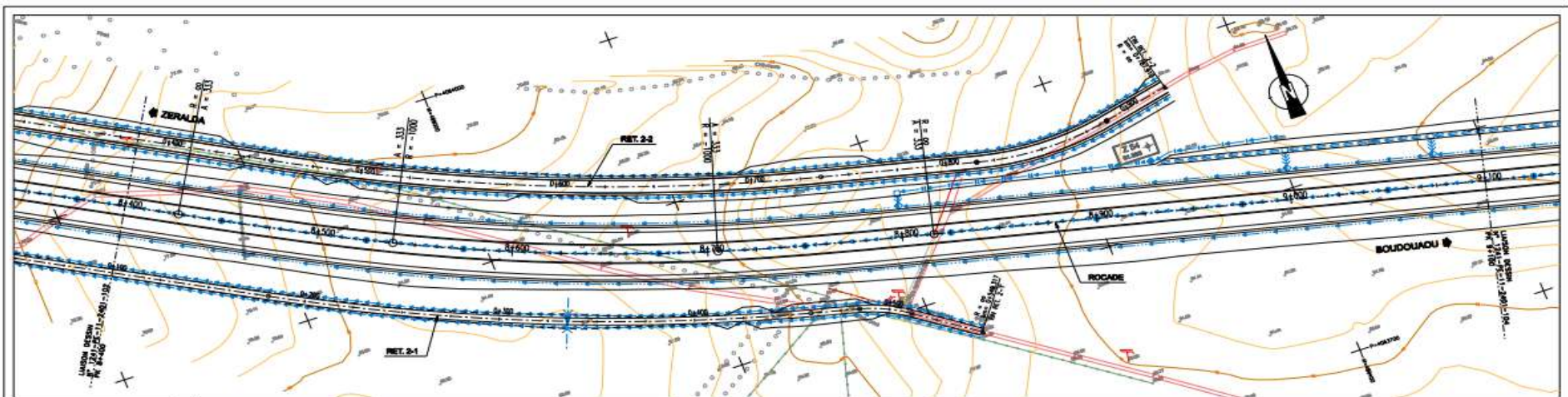
- LEGENDE D'ASSAINISSEMENT:**
- Fosse de type 1
 - Fosse de type 2
 - Fosse de type 3
 - Fosse de type 4
 - Fosse de type 5
 - Fosse de type 6
 - Fosse de type 7
 - Fosse de type 8
 - Fosse de type 9
 - Fosse de type 10
 - Fosse de type 11
 - Fosse de type 12
 - Fosse de type 13
 - Fosse de type 14
 - Fosse de type 15
 - Fosse de type 16
 - Fosse de type 17
 - Fosse de type 18
 - Fosse de type 19
 - Fosse de type 20
 - Fosse de type 21
 - Fosse de type 22
 - Fosse de type 23
 - Fosse de type 24
 - Fosse de type 25
 - Fosse de type 26
 - Fosse de type 27
 - Fosse de type 28
 - Fosse de type 29
 - Fosse de type 30
 - Fosse de type 31
 - Fosse de type 32
 - Fosse de type 33
 - Fosse de type 34
 - Fosse de type 35
 - Fosse de type 36
 - Fosse de type 37
 - Fosse de type 38
 - Fosse de type 39
 - Fosse de type 40
 - Fosse de type 41
 - Fosse de type 42
 - Fosse de type 43
 - Fosse de type 44
 - Fosse de type 45
 - Fosse de type 46
 - Fosse de type 47
 - Fosse de type 48
 - Fosse de type 49
 - Fosse de type 50
 - Fosse de type 51
 - Fosse de type 52
 - Fosse de type 53
 - Fosse de type 54
 - Fosse de type 55
 - Fosse de type 56
 - Fosse de type 57
 - Fosse de type 58
 - Fosse de type 59
 - Fosse de type 60
 - Fosse de type 61
 - Fosse de type 62
 - Fosse de type 63
 - Fosse de type 64
 - Fosse de type 65
 - Fosse de type 66
 - Fosse de type 67
 - Fosse de type 68
 - Fosse de type 69
 - Fosse de type 70
 - Fosse de type 71
 - Fosse de type 72
 - Fosse de type 73
 - Fosse de type 74
 - Fosse de type 75
 - Fosse de type 76
 - Fosse de type 77
 - Fosse de type 78
 - Fosse de type 79
 - Fosse de type 80
 - Fosse de type 81
 - Fosse de type 82
 - Fosse de type 83
 - Fosse de type 84
 - Fosse de type 85
 - Fosse de type 86
 - Fosse de type 87
 - Fosse de type 88
 - Fosse de type 89
 - Fosse de type 90
 - Fosse de type 91
 - Fosse de type 92
 - Fosse de type 93
 - Fosse de type 94
 - Fosse de type 95
 - Fosse de type 96
 - Fosse de type 97
 - Fosse de type 98
 - Fosse de type 99
 - Fosse de type 100



PROFIL EN LONG		DISTANCES CURVES																	
		7+700		7+720.001		7+800		7+900		8+000		8+100		8+200		8+300			
		COTES PROJET		COTES PROJET		COTES PROJET		COTES PROJET		COTES PROJET		COTES PROJET		COTES PROJET		COTES PROJET			
	COTES TERRAIN	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95			
PLAN	DECLIVITES																		
	AVE EN PLAN																		
	DEVIERS																		

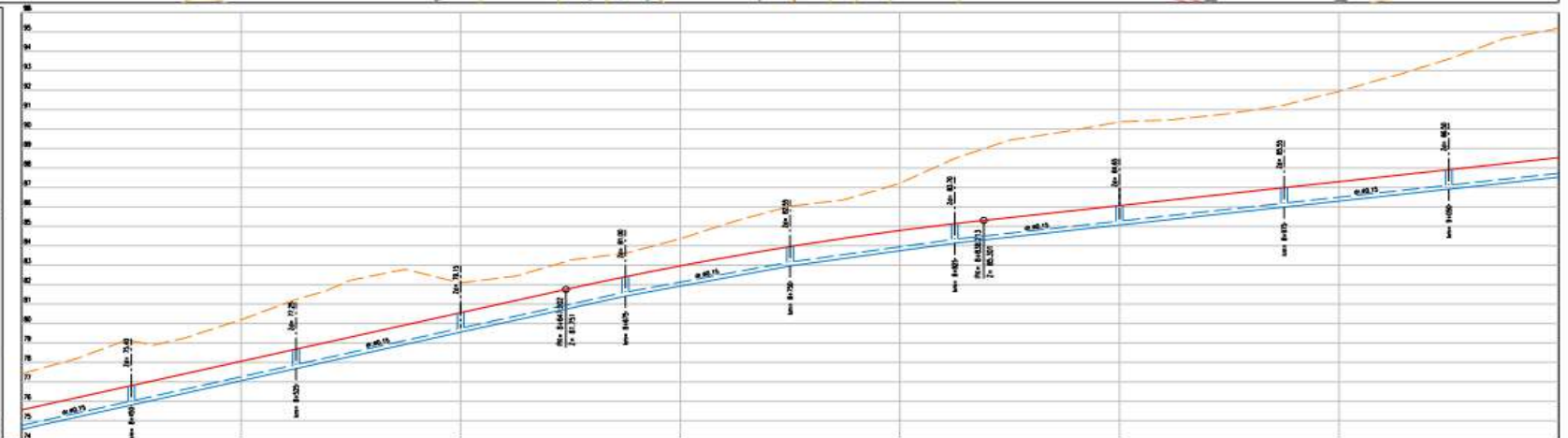
POUR COPIES HORS LE FORMAT A1
VOIR ECHELLE GRAPHIQUE

Rev.	Date	Description	Exécuté	Vérifié	Approuvé

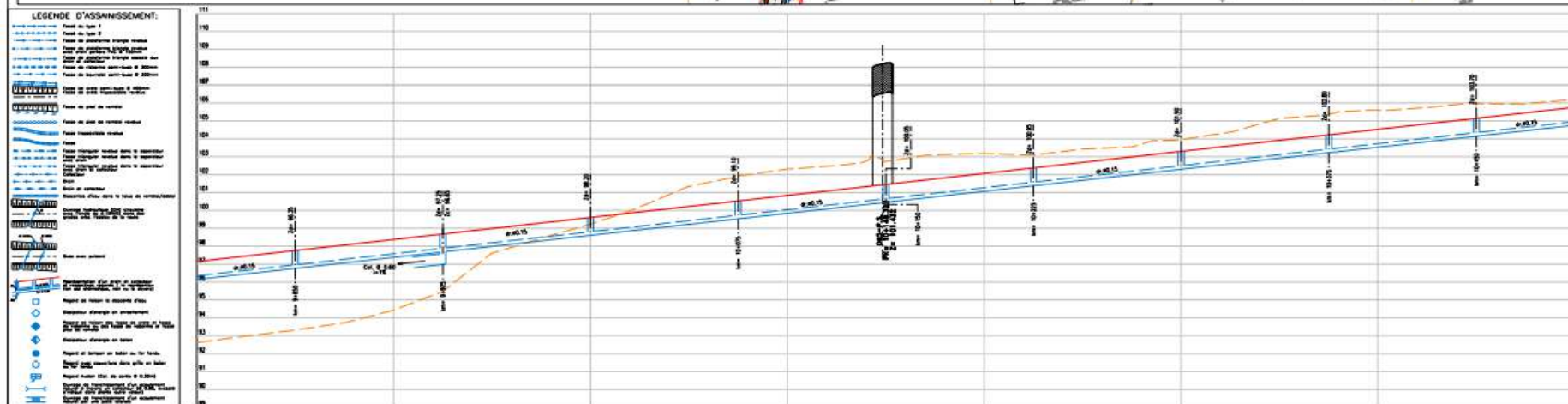
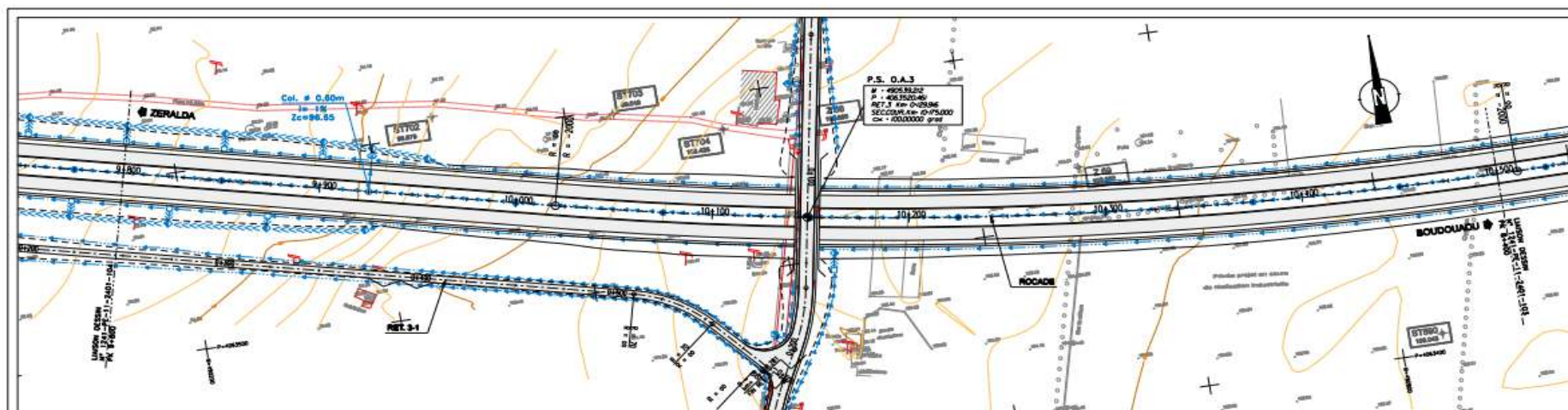


LEGENDE D'ASSAINISSEMENT:

	Éclair de type 1
	Éclair de type 2
	Éclair de type 3
	Éclair de type 4
	Éclair de type 5
	Éclair de type 6
	Éclair de type 7
	Éclair de type 8
	Éclair de type 9
	Éclair de type 10
	Éclair de type 11
	Éclair de type 12
	Éclair de type 13
	Éclair de type 14
	Éclair de type 15
	Éclair de type 16
	Éclair de type 17
	Éclair de type 18
	Éclair de type 19
	Éclair de type 20
	Éclair de type 21
	Éclair de type 22
	Éclair de type 23
	Éclair de type 24
	Éclair de type 25
	Éclair de type 26
	Éclair de type 27
	Éclair de type 28
	Éclair de type 29
	Éclair de type 30
	Éclair de type 31
	Éclair de type 32
	Éclair de type 33
	Éclair de type 34
	Éclair de type 35
	Éclair de type 36
	Éclair de type 37
	Éclair de type 38
	Éclair de type 39
	Éclair de type 40
	Éclair de type 41
	Éclair de type 42
	Éclair de type 43
	Éclair de type 44
	Éclair de type 45
	Éclair de type 46
	Éclair de type 47
	Éclair de type 48
	Éclair de type 49
	Éclair de type 50
	Éclair de type 51
	Éclair de type 52
	Éclair de type 53
	Éclair de type 54
	Éclair de type 55
	Éclair de type 56
	Éclair de type 57
	Éclair de type 58
	Éclair de type 59
	Éclair de type 60
	Éclair de type 61
	Éclair de type 62
	Éclair de type 63
	Éclair de type 64
	Éclair de type 65
	Éclair de type 66
	Éclair de type 67
	Éclair de type 68
	Éclair de type 69
	Éclair de type 70
	Éclair de type 71
	Éclair de type 72
	Éclair de type 73
	Éclair de type 74
	Éclair de type 75
	Éclair de type 76
	Éclair de type 77
	Éclair de type 78
	Éclair de type 79
	Éclair de type 80
	Éclair de type 81
	Éclair de type 82
	Éclair de type 83
	Éclair de type 84
	Éclair de type 85
	Éclair de type 86
	Éclair de type 87
	Éclair de type 88
	Éclair de type 89
	Éclair de type 90
	Éclair de type 91
	Éclair de type 92
	Éclair de type 93
	Éclair de type 94
	Éclair de type 95
	Éclair de type 96
	Éclair de type 97
	Éclair de type 98
	Éclair de type 99
	Éclair de type 100



DISTANCES CUMULEES		B+400	B+500	B+600	B+700	B+800	B+900	B+1000
PROFIL EN LONG	COTES PROJET	70.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.00
	COTES TERRAIN	70.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.00
PLAN	DIAGRAMES							
	AVE EN PLAN							
DEVERS								



DISTANCES CURVES		9+000	9+100	9+200	9+300	9+400	9+500	9+600	9+700	9+800	9+900	10+000	10+100	10+200	10+300	10+400	10+500
PROFIL EN LONG	COTES PROJET	92.14	92.15	92.16	92.17	92.18	92.19	92.20	92.21	92.22	92.23	92.24	92.25	92.26	92.27	92.28	92.29
	COTES TERRAIN	92.14	92.15	92.16	92.17	92.18	92.19	92.20	92.21	92.22	92.23	92.24	92.25	92.26	92.27	92.28	92.29
	DECLIVITES																
	AVE EN PLAN	9+000.000															
PLAN	DIAGRAMES																
	DEVERS																

02/04/2020 / J. J. J. J.

02/04/2020 / J. J. J. J.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DES TRAVAUX PUBLICS

AGENCE NATIONALE DES AUTOROUTES

OHL

TEIXEIRA DUARTE

ENSA

COBA

CONSULTANTS D'INGENIERIE

ET DE L'ENVIRONNEMENT

Etat

RCS

Verifié

RCS

Approuvé

JPC

2^{ème} ROCADÉ

AUTOROUTIERE D'ALGER

Echelle

1:1000

1:100

Sujet

Sujet par

POUR COPIES HORS LE FORMAT A1

VOIR ECHELLE GRAPHIQUE

Pro.

Date

Description

Projet d'exécution

ETUDES ROUTIERES-ASSAINISSEMENT

PLAN ET PROFIL EN LONG

Du Ph. 9+000 au Ph. 10+500

Etat

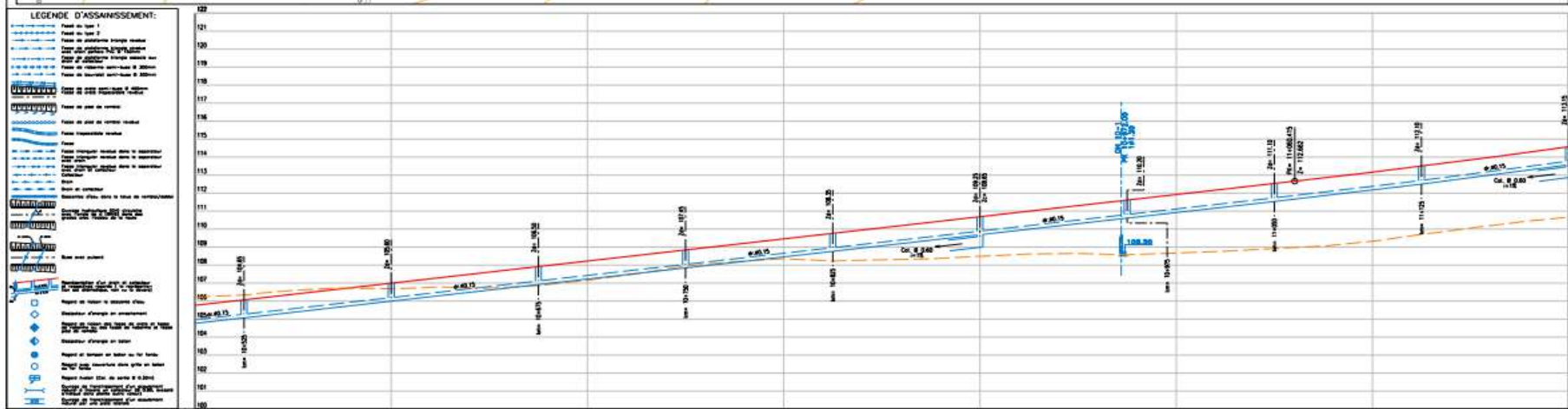
Verifié

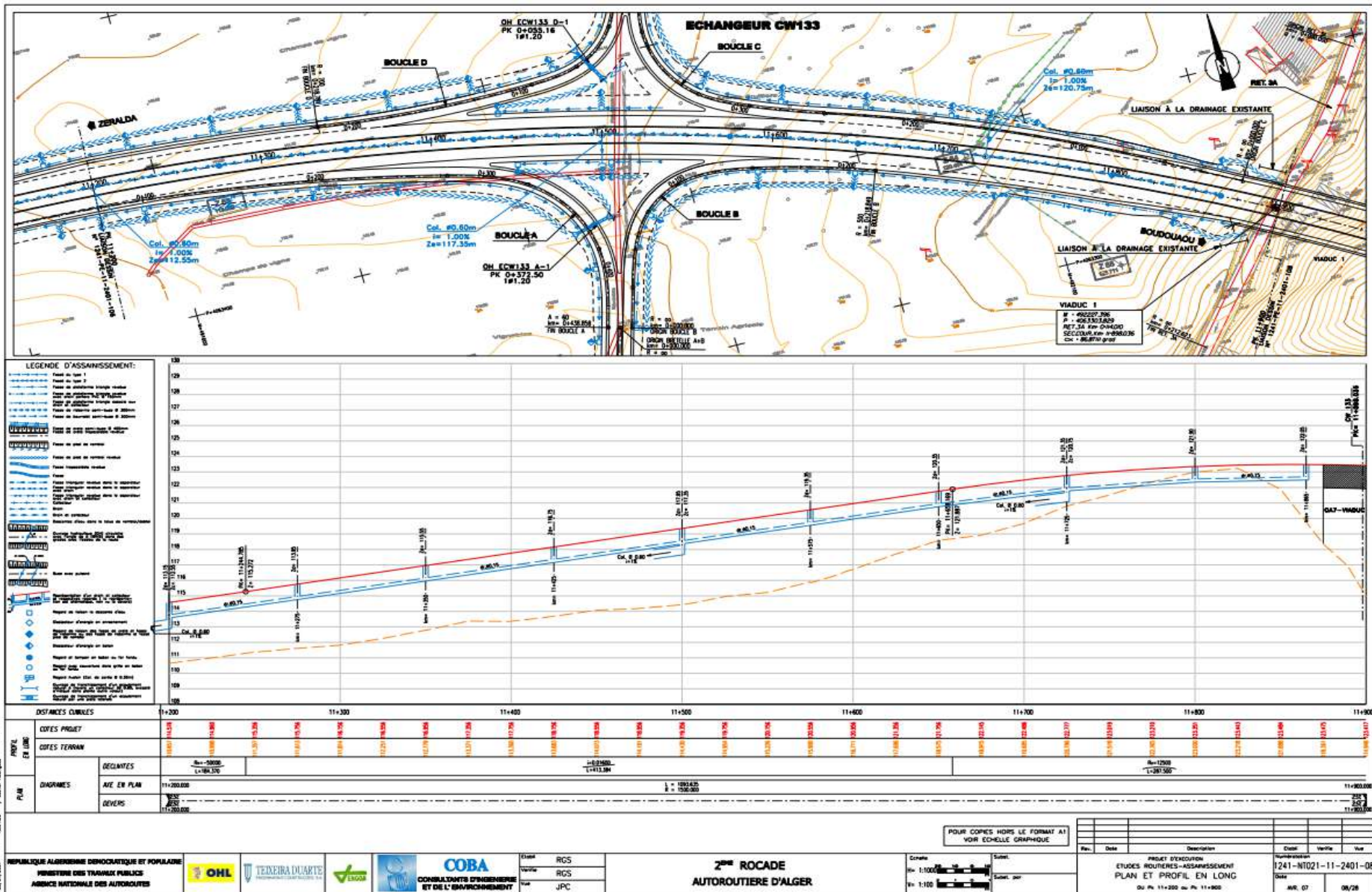
Date

1241-N021-11-2401-06

12/07

6/28

[illegible]



ANNEXE 4

Généralité sur le BIM pour les infrastructures linéaires.

Introduction

Le Building Information Modeling (BIM) est une méthode de conception relativement nouvelle pour l'industrie de la construction, développée ces dernières années dans de nombreux pays.

Le terme BIM a été inventé par le professeur Charles M. Eastman dans les années 1970 et signifie littéralement la modélisation informatisée d'une construction de bâtiment générique. Il est basé sur un processus qui organise toutes les informations sur les réalisations. C'est une méthode de conception pour les données, les graphiques et les documents techniques relatifs à la construction, dans un modèle riche en données. Ce n'est pas seulement une représentation en trois dimensions, mais aussi un modèle partagé qui constitue la première étape du développement de non pas seulement le domaine de l'AIC (Architecture, Ingénierie, Construction) mais aussi pour les propriétaires et exploitants. Pour cela, le concept BIM est étendu à des domaines d'expertise où il n'a pas été conçu à l'origine.

Son succès est principalement dû à une nouvelle approche de conception qui permet de suivre tout le cycle de vie du projet, y compris des informations supplémentaires, très utiles pour voir en profondeur chaque aspect comme le calendrier, la gestion financière, les calculs et les simulations.

Cette nouvelle approche concerne non seulement une nouvelle vision du design, mais aussi une analyse de durabilité.

Toutes ces fonctionnalités peuvent réduire considérablement le temps de conception en fournissant un contrôle en temps réel, impliquant la réduction des coûts en rendant la représentation plus efficace du modèle.

Chaque élément est lié aux matériaux, fournisseurs et caractéristiques de conception en fonction des coûts et de la gestion organisationnelle. De cette manière, il est possible de travailler à distance sur le même dossier, à partir de différentes positions, en résolvant l'important problème de l'échange de données et d'informations entre les différentes personnes qui abordent le projet.

Pour obtenir ces conditions, la publication de normes et de lignes directrices est très importante. Des procédures et des méthodes partagées, ainsi que des documents standardisés, sont à la base de la création d'un langage et de modalités d'approche communs entre les parties prenantes. Dans ce contexte, l'interopérabilité devient une exigence fondamentale. Cet élément est important entre les différents logiciels et disciplines BIM, pour standardiser le flux de travail. Pour cette raison, il était nécessaire d'établir un format d'échange international, appelé IFC (Industry Foundation Classes), dans le but de collecter les informations contenues dans toutes les vues du projet. Il s'agit d'un modèle d'information ouvert et neutre, non lié à un fabricant de logiciels spécifique, conçu pour prendre en charge l'interopérabilité entre les applications individuelles. L'IFC se définit comme un format spécifiquement conçu pour reproduire des aspects allant des études de faisabilité, de la conception, de la construction et

enfin de la maintenance . Il s'agit d'un schéma de modèle de données ouvert, pour la définition de la géométrie des composants et d'autres propriétés physiques pour permettre le transfert de données entre les applications CAO. Cette fonctionnalité permet d'échanger les données contenues dans le modèle de conception initiale, entre différentes plateformes logicielles et applications. Il permet d'intervenir depuis la conception, la maintenance jusqu'à l'éventuelle cession de la structure, en obtenant un dialogue facile entre les différentes figures professionnelles.

Comparé à la conception 3D de la CAO, le BIM n'est pas seulement la représentation dans l'espace tridimensionnel mais aussi un modèle dans lequel chaque entité a un rôle précis et des informations dans le projet. Un modèle BIM préparé par un architecte peut être converti relativement facilement et rapidement en modèle analytique, que le constructeur peut utiliser dans l'analyse structurelle. En quelques étapes simples, l'ingénieur en structure peut obtenir les contraintes ou les déviations et procéder à une vérification détaillée des exigences du code.

Dans l'UNI 11337-4 (2017), chaque élément du projet est lié à un LOD spécifique. Cet acronyme fait référence à deux concepts : « Levels Of Development » et « Levels Of Detail ». Le premier désigne le degré d'éléments géométriques et les informations qui s'y rapportent, tandis que le second désigne le niveau de détail du modèle BIM. Le processus repose sur trois niveaux de classification : le premier, constitué de modèles CAO 2D ; le second qui est constitué de modèles au format 3D ; le troisième lié au concept BIM.

Une autre fonction dans la rédaction d'un projet est les archives du logiciel Autodesk Infraworks qui peuvent être utilisées pour créer des familles de système. L'éditeur de familles permet de les éditer graphiquement, en établissant des relations paramétriques entre leurs géométries. Il permet également à l'utilisateur de créer des familles "chargeables" ou "locales". Il n'est pas possible, à la place, de créer un "système" de familles, car elles ne sont pas utiles pour être plus rigides et elles ont des paramètres prédéfinis pour fonctionner uniquement via des boîtes de dialogue spéciales.

Les niveaux de maturité du BIM

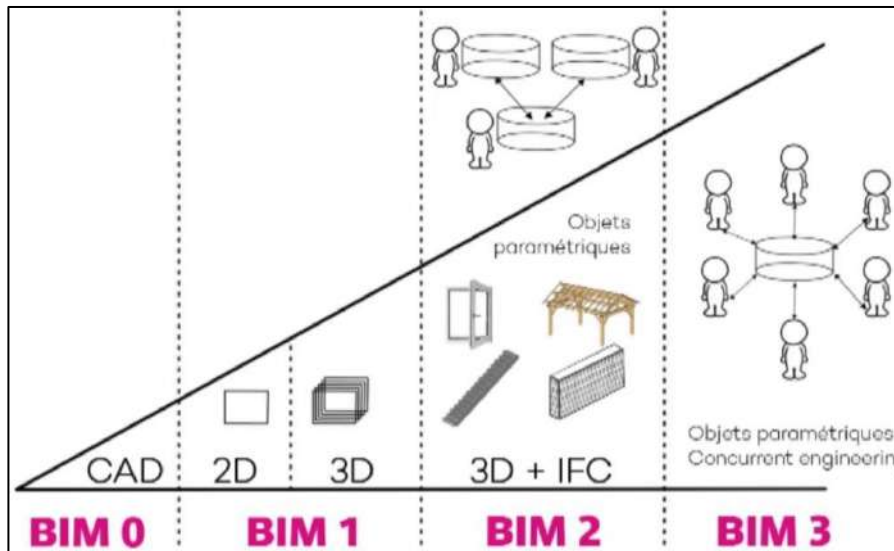
Le BIM a plusieurs niveaux de maturité. Ils sont les étapes pour aller vers le BIM collaboratif. Il s'articule donc autour de plusieurs niveaux d'organisation allant de 0 à 3 selon son utilisation lors du projet, allant d'utilisations très ponctuelles à l'intégration totale de l'ensemble des éléments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



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.

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.

Les niveaux de détails LOD (Levels 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



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 couts 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 un logistique optimisé (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 constituent le cœur du procès.
- 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.



Lien BIM et 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). **Source spécifiée non valide.**



L'interopérabilité 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. **Source spécifiée non valide.**

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

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).

Le format IFC

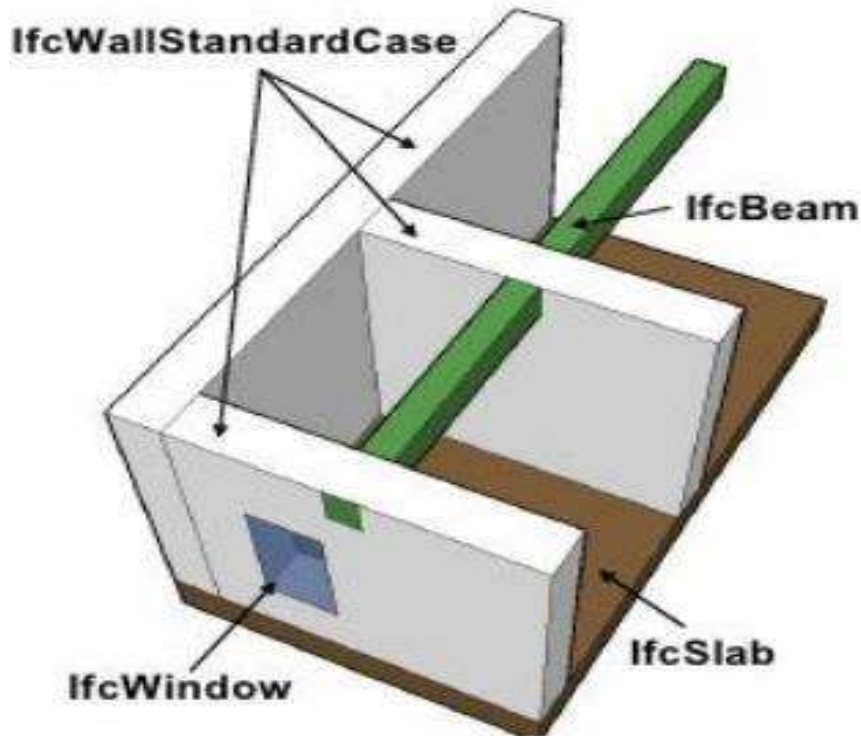
Le format IFC est le format d'échange standard utilisé par les logiciels BIM. Il a été développé par BuildingSmart, anciennement IAI (International Alliance for Interoperability) et est devenu une norme en 2013. Le format IFC contient pour chaque objet sa géométrie et les informations qui y sont rattachées. 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



Les outils BIM

On distingue 3 types d'outils BIM :

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

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.



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+.

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
- 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.

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.

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.

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 :

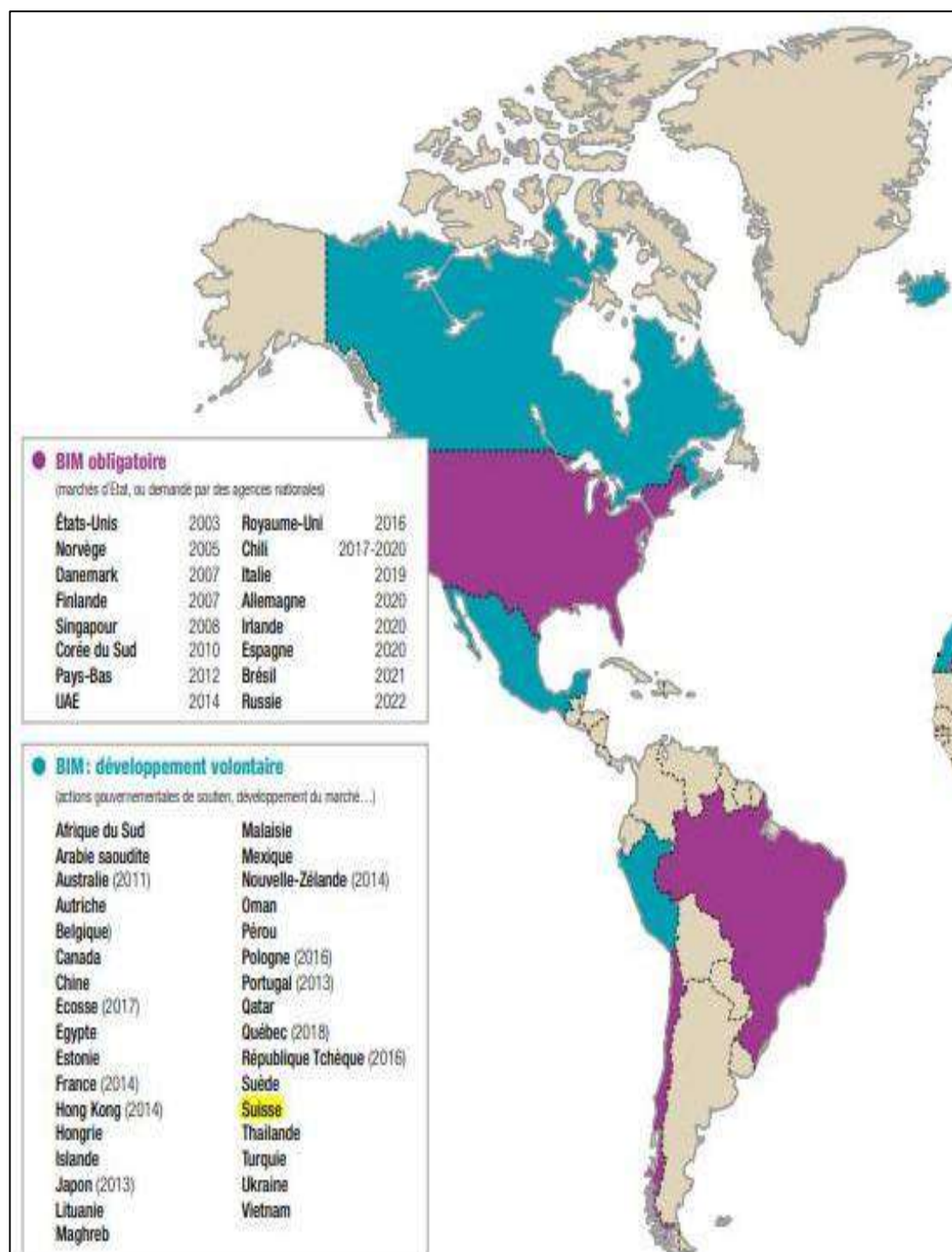
Royaume uni : En 2016, le gouvernement britannique a obligé l'utilisation du Niveau 2 du BIM, pour tous les marchés publics, et il a déclaré la volonté de la Grande Bretagne de se transformer en un leader mondial du BIM et ses technologies Connexes.

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.



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.



La passerelle Isoisänsilta en Finlande

C'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.



BIM pour les infrastructures routières

Bien que le BIM soit né pour les bâtiments, il s'étend désormais également à l'échelle de l'infrastructure qui comprend les domaines suivants :

Infrastructures de transport : routes, voies ferrées, ponts, tunnels et centres de transport en commun (aéroports, ports et havres) ;

Infrastructures énergétiques : centrales électriques (nucléaire, éolienne, hydrolienne), pétrolières et gazières (terminaux de stockage/distribution, raffineries, puits) et minières ;

Infrastructures de services publics : réseaux/canalisation pour l'acheminement et l'évacuation de l'électricité, du gaz, de l'eau et des eaux usées ;

Infrastructures environnementales : structures de gestion des inondations et de défense côtière telles que barrages, digues, déversoirs ou remblais.

A l'échelle de l'infrastructure, le BIM est également appelé Infra-BIM (Infrastructures Building Information Modeling).

La conception des infrastructures est plus complexe que la conception des bâtiments. La principale différence est liée à l'extension de l'infrastructure car elle se développe souvent sur plusieurs kilomètres et présente de nombreuses interférences avec le milieu environnant. Par conséquent, un géoréférencement précis est très important. Cela peut être réalisé en alignant les systèmes d'information géographique (SIG) avec le BIM, en obtenant une base de données liée à une représentation graphique des entités géométriques pour le SIG (points, lignes et polygones) et des objets paramétriques pour le BIM (murs, fenêtres, portes).

L'un des domaines dans lesquels le BIM peut avoir un grand développement est le domaine des infrastructures routières, car il permet de révolutionner l'approche de conception traditionnellement CAO en offrant plus de capacités d'interopérabilité. En augmentant le partage, la collaboration et l'échange d'informations entre les différents domaines de conception et les différentes applications logicielles, il permet de réduire les risques et les événements imprévus sur site vérifiant les interférences entre les objets architecturaux, structurels et d'ingénierie. Étant donné que les informations sont stockées sous forme de base de données dans le BIM, toutes les modifications de données requises pendant le processus de conception peuvent être logiquement entreprises et gérées tout au long du cycle de vie du projet.

L'utilisation du BIM dans les projets d'infrastructures routières peut être un outil utile dans trois phases principales : la pré-construction, la construction et la gestion.

L'étape de pré-construction comprend la planification routière, la conception et la préparation du site, l'étude de l'aménagement du site et de la logistique, la planification du projet, la gestion des matériaux et l'analyse technique, car le BIM est en mesure de fournir une plateforme pour simuler les charges requises dans le bâtiment pour assurer la sécurité structurelle et facilité d'entretien. La phase de construction, au contraire, implique les activités planifiées de l'équipe de construction qui peuvent bénéficier de manière significative de l'utilisation du BIM. Cela implique des inspections de construction, la gestion des ressources humaines et le suivi des progrès, l'assurance qualité et le contrôle des coûts. La phase de gestion explique les activités après la construction, où le projet a déjà été remis au client. Certaines activités liées au BIM au cours de cette étape pourraient être pris en compte la maintenance planifiée, l'analyse du système, la gestion des actifs, le plan d'urgence et la gestion des transports.

